

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTE**

Préparée au sein de l'**Université de Caen Normandie**

Développement et validation d'une plateforme d'exploration multisensorielle appliquée à la pathologie vestibulaire et au mal des transports

Présentée et soutenue par
JULIENNE ANGELA

Thèse soutenue le 07/11/2024
devant le jury composé de :

M. BESNARD STÉPHANE	Maître de conférences HDR - Université de Caen Normandie (UCN)	Directeur de thèse
MME BOCCA MARIE-LAURE	Professeur des universités - Université de Caen Normandie (UCN)	Président du jury
M. CAZALETS JEAN-RENE	Directeur de recherche - Université de Bordeaux	Membre du jury
M. CEYTE HADRIEN	Maître de conférences HDR - UNIVERSITE AIX MARSEILLE 1 PROVENCE	Membre du jury
M. BLOUIN JEAN	Directeur de recherche - UNIVERSITE AIX MARSEILLE 1 PROVENCE	Rapporteur du jury
MME SEVERAC CAUQUIL ALEXANDRA	Maître de conférences HDR - Université de Toulouse 3 - Paul Sabatier	Rapporteur du jury

| Thèse dirigée par **BESNARD STÉPHANE** (VERTEX - Vertige Extrême)

SOMMAIRE

Table des matières

REMERCIEMENTS	III
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	V
INTRODUCTION.....	- 1 -
CADRE THEORIQUE.....	- 6 -
CHAPITRE 1	- 6 -
– Chapitre 1 –.....	- 7 -
A) Contexte scientifique.....	- 7 -
1. De la sensation à l'action : processus multisensoriel	- 7 -
1.1. Notions et définitions.	- 7 -
1.2. Généralités sur le système vestibulaire	- 11 -
1.2.1. Neurophysiologie vestibulaire.....	- 11 -
1.2.2. Les fonctions du système vestibulaire	- 16 -
1.2.3. Le fonctionnement du système vestibulaire	- 18 -
2. Dysfonctionnement vestibulaire et ses conséquences.....	- 24 -
2.1. Présentation épidémiologique	- 24 -
2.2. Description sémiologique	- 25 -
2.3. D'autres dimensions sous-estimées : les troubles psychocognitifs	- 30 -
2.4. Altérations liées à l'âge	- 35 -
3. Critères de diagnostic des vestibulopathies fréquentes	- 39 -
3.1. Le vertige positionnel paroxystique bénin.....	- 39 -
3.2. La migraine vestibulaire	- 40 -
3.3. La maladie de Ménière	- 40 -
3.4. La névrite vestibulaire	- 40 -
3.5. La vestibulopathie bilatérale	- 41 -
3.6. Cas particuliers : le mal des transports et les étourdissements posturaux perceptifs persistants	- 41 -
4. Méthodes d'évaluation et leurs limitations	- 46 -
4.1. Les échelles subjectives.....	- 48 -
4.2. Evaluations des capacités perceptivo-motrices	- 51 -

4.3. Enjeux et problématiques	- 58 -
– Chapitre 1 –	- 60 -
B) Contexte industriel	- 60 -
1. Implantation de technologies innovantes et flexibles	- 60 -
1.1. Analyse de la situation industrielle, relative au domaine de la santé.....	- 61 -
1.2. Expression des besoins	73
2. Présentation d'outils à destination du système de santé.....	74
CADRE EXPERIMENTAL.....	76
CHAPITRE 2 : MISE EN PLACE METHODOLOGIQUE	76
– Chapitre 2 –	77
Application à une population saine : Évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration intégrant la réalité virtuelle.....	77
1. Etude 1 : Compte-rendu des valeurs de référence issues de l'analyse posturographique instrumentée.....	79
2. Etude 2 : Analyse posturographique avec le système de mesure MotionVR.	139
3. Etude 3 : Qualités métrologiques du système de mesure MotionVR.	172
CHAPITRE 3 : APPLICATIONS CLINIQUES	233
– Chapitre 3 –	234
Application à une population symptomatique : Efficacité de la désensibilisation au mal des transports & Evaluation de l'équilibre d'une vestibulopathie chronique	234
1. Etude 1 : Etude explorant les capacités posturales de patients atteints de PPPD sur la plateforme de MotionVR.	237
Résultats complémentaires : Etude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale.	239
2. Etude 2 : Etude observationnelle des effets de la désensibilisation au mal des transports en utilisant la plateforme MotionVR.....	293
CONCLUSION GENERALE	298
BIBLIOGRAPHIE.....	305
ANNEXES	338
ANNEXE n°1 : SUPPLEMENTARY INFORMATION PAPER N°1	338
RÉSUMÉ.....	375

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce travail doctoral a été possible grâce à plusieurs personnes à qui je souhaite témoigner toute ma reconnaissance. Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, le **Dr Stéphane BESNARD**, pour ses conseils précieux, son regard d'expert avisé et surtout sa bienveillance tout au long de ce parcours qui fut un chemin long parsemé d'embûches. Merci Stéphane pour avoir cru en mes capacités, ton aide précieuse et ton soutien indéfectible pendant ces quatre dernières années.

Je remercie également les deux structures qui m'ont permis de réaliser cette thèse, l'équipe du laboratoire **UR 7480 VERTEX**, pour le cadre académique fourni et la société **VIRTUALIS** pour le contexte industriel. Ce fut un réel plaisir d'évoluer à l'intersection de ces deux mondes.

Mes remerciements vont naturellement au jury qui a accepté d'évaluer mon travail. Plus spécifiquement, merci aux rapporteurs/rapportrices, le **Dr Jean BLOUIN** et la **Dre Alexandra SEVERAC CAUQUIL**, pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail, ainsi que leurs remarques et suggestions constructives qui m'ont permis d'améliorer ce manuscrit. De même, merci aux examinateurs, la **Pr¹ Marie-Laure BOCCA**, le **Dr Jean-René CAZALETS** et le **Dr Hadrien CEYTE**, pour les discussions enrichissantes et leur partage de connaissances pendant la soutenance.

Je tiens à remercier la **docteure Sylvette WIENER-VACHER** qui a accompagné mes premiers pas dans la recherche et qui a également accepté de faire partie du Comité de Suivi Individuel de cette thèse. Je remercie aussi les autres membres qui m'ont accompagné durant ces quatre années : la **Dre Emilie LACROIX**, le **Dr Brahim TIGHILET** et le **Dr Olivier LESOUHAITIER**.

Un merci particulier à **Dre Audrey SULTAN**, ingénieure de recherche, dont l'aide précieuse dans la gestion des ressources et les conseils ont permis de mener à bien nos études cliniques. J'exprime également ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé dans les expérimentations : les collaborateurs hospitaliers, la **Dre Laetitia PLISSION** et le Pr **Martin HITIER**, ainsi que les **stagiaires**. J'adresse mes remerciements aux **personnes ayant acceptées de participer** à nos études cliniques.

Sur le plan personnel, je tiens à adresser un remerciement spécial à **ma famille aux Seychelles**, notamment mes parents **Tessie** et **François**, mon frère **Jean-François** et ma tante **Suzanne**,

¹ ERRATUM - Correction page de garde : Professeure des Universités, Marie-Laure BOCCA.

pour leur amour inconditionnel, leur présence et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique. Leur écoute et leur compréhension m'ont donné la force de persévérer dans les moments les plus difficiles, malgré les kilomètres qui nous séparent. For all your love and support, I cannot thank you enough. You made a huge difference. Thank you for being part of my success. Анна, ты мой русский ангел. Спасибо, что поддерживаешь меня все эти годы.

Лучшего друга я бы не желала.

Pour finir, je remercie toutes les personnes, surtout mes amis, qui m'ont soutenu et aidé, de loin ou de près, au cours de mon parcours académique.

Pou mon pei
 Sesel

Pou Memer

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

TITRES	PAGES
Figure 1. Schéma de l'interaction entre sensation, perception et action.	8
Figure 2. Illustration des modalités sensorielles impliquées dans l'équilibration.	9
Figure 3. A) Illustration anatomique de l'oreille humaine. B) Illustration de l'orientation des otolithes et des canaux semi-circulaires.	12
Figure 4. A) Illustration schématique des projections vestibulaires. B) Représentation des modules du réseau vestibulaire humain.	14
Figure 5. Les différentes composantes de la fonction d'équilibration.	20
Figure 6. A) Illustration du modèle conceptuel proposant les mécanismes du dysfonctionnement cognitif provoqué par le système vestibulaire. B) Schéma conceptuel des niveaux sémiologique, syndromique, étiologique et physiopathologique de la Classification Internationale des Désordres Vestibulaires.	23
Figure 7. Proportion du spectre de symptômes rapportés par les patients vestibulaires.	25
Figure 8. Liens schématiques entre les conditions préexistantes, les troubles aigus et les conséquences chroniques du PPPD.	43
Figure 9. Schéma décisionnel fondé sur les symptômes et les signes observés lors de l'examen.	46
Figure 10. Illustration du paradigme expérimental avec A) les yeux ouverts sans casque, B) le cadre virtuel réel, C) le cadre virtuel abstrait, D) position debout avec et sans yeux fermés.	54
Figure 11. Représentation A) les domaines d'activité, B) les finalités des outils technologiques et C) les utilisateurs de solutions et produits de santé numérique.	60
Figure 12. Présentation des tests standardisés. A) Test d'Organisation Sensorielle : 1) yeux ouverts avec plateforme stable, 2) yeux fermés avec plateforme stable, 3) support visuel asservi et plateforme stable, 4) yeux ouverts avec plateforme asservie, 5) yeux fermés avec plateforme asservie et 6) support visuel asservi avec plateforme asservie. B) Test d'Adaptation : deux types de rotations antéro-postérieures. C) Test des Limites de Stabilité, avec un exemple de déplacements volontaires dans les huit directions.	140
Figure 13. Les scores individuels et composites du SOT en fonction du niveau de sensibilité.	184
Figure 14. Les ratios sensoriels du SOT en fonction du niveau de sensibilité.	185
Figure 15. Les ratios sensoriels du SOT en fonction du niveau de sensibilité.	186
Figure 16. La méthode Boruta pour le score composite du SOT.	251

Figure 17. La méthode Boruta pour le temps de réaction global du LOS.	252
Figure 18. La méthode Boruta pour le contrôle directionnel global du LOS.	253
Figure 19. Corrélation entre les différentes variables.	254
Tableau 1. Récapitulatif non-exhaustif des brevets pour la posturographie	62
Tableau 2. Présentation des plateformes de posturographie statiques et dynamiques disponibles sur le marché.	69
Tableau 3. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour le score du SOT.	171-172
Tableau 4. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour le ratio du SOT.	172
Tableau 5. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour la vitesse angulaire du SOT.	173
Tableau 6. Les différentes composantes du bilan multimodal.	280-281
Tableau 7. Comparaison entre les scores pour le SOT, la VVS, la VVS dynamique et la RFT avant et après le protocole de désensibilisation.	286-287

INTRODUCTION

Tous les jours, nous sommes confrontés à des environnements en perpétuelle évolution, avec une accélération notable au cours des dernières décennies, tant sur les plans social, économique que climatique. Une perception sensorielle cohérente et robuste de ces environnements est essentielle pour une réponse comportementale adaptée (De Gelder & Bertelson, 2003; Ernst & Bühlhoff, 2004; Murray et al., 2016). Ce sont des processus dynamiques, sous-tendus par les propriétés de neuroplasticité, qui permettent une adaptation progressive au cours de l'enfance puis à l'âge adulte grâce à l'apprentissage. Ces processus complexes, notamment multisensoriels, participent à la construction et au maintien des représentations perceptives, motrices et cognitives ainsi qu'à la résolution de conflits sensoriels, de manière instantanée et durable. Prenons le cas de l'équilibration humaine. Elle représente un processus d'intégration multisensorielle, qui implique une coordination entre la posture, l'équilibre et la locomotion. Tout au long de la vie, cette coordination doit évoluer nécessitant un apprentissage adaptatif pour assurer des fonctions antigravitaires et d'interface avec l'environnement (la marche, la course, tout mode de locomotion). Nous nous focaliserons sur ces processus multisensoriels d'équilibration dans ce projet doctoral.

Nombreux sont les mécanismes interconnectés misent en œuvre, tels que ceux participant à l'équilibration et la cognition spatiale (Bremner et al., 2008; Lewkowicz & Bremner, 2020). Lors de nos déplacements, les informations sensorielles provenant de l'environnement et du corps sont enregistrées, principalement, au sein des systèmes sensoriels visuel, vestibulaire et somesthésique. L'audition et l'olfaction sont également impliquées dans les capacités spatiales, particulièrement en cas de déficit visuel. L'intégration de ces signaux fournit des informations aux systèmes sensoriels, basés sur différents cadres de référence, pour produire des réponses comportementales adaptées et pour anticiper les événements de son environnement. Au cours de la dernière décennie, un certain nombre d'études ont mis en évidence le rôle majeur du système vestibulaire dans l'orientation, la navigation et la mémoire spatiale ainsi que dans la conscience et la perception de soi chez l'homme (Lopez et al., 2005; Mast et al., 2014; Smith & Zheng, 2013). En effet, ce système participe au contrôle postural, aux mouvements réflexes et à la perception du mouvement propre dans l'espace par une communication plurimodale permettant la programmation et la correction de l'action dans l'espace par rapport à la force gravitationnelle. Comprendre le fonctionnement vestibulaire normal est indispensable pour mieux étudier ses dysfonctionnements.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'unité de recherche UR 7480 Vertiges Extrêmes (VERTEX) et la société Virtualis. Ce projet comporte un volet méthodologique, visant à la standardisation, la validation métrologique et la normalisation d'un outil d'évaluation posturologique, et un volet clinique, avec l'évaluation des profils sensoriels liés à un dysfonctionnement vestibulaire (vestibulopathie chronique, cinétose). Dans un premier temps, nous présenterons la multisensorialité dans nos interactions avec l'environnement, pour ensuite, approfondir sur les contributions vestibulaires physiologiques et en cas de dysfonctionnement (premier chapitre). Par son rôle crucial dans les processus perception-action, nous nous concentrerons sur les dysfonctionnements vestibulaires entraînant un défaut de perception motrice spatio-temporelle et des troubles de l'équilibre. Nous aborderons ainsi l'évaluation des syndromes, provoquant des troubles sensoriels et perceptivo-moteurs, ainsi que ses limites. De nombreux outils non-instrumentés permettent d'évaluer ces répercussions sensorimotrices, de manière globale et subjective. Cependant, ce sont des méthodes simples, peu pertinentes et difficilement comparables aux conditions vécues lors des activités de la vie quotidienne. En effet, les outils instrumentés offrent la possibilité d'analyser les réponses comportementales, de manière approfondie et objective. Ces outils peuvent être combinés à d'autres équipements, tels que la réalité virtuelle et/ou des mouvements passifs ou actifs, pour proposer une approche écologique sous la forme de tâches simples ou doubles (Chiarovano et al., 2017; Keshner & Kenyon, 2009a; Negut et al., 2016). Cette approche écologique enrichit l'évaluation posturologique en intégrant des scénarios réalistes et variables, dans lesquelles l'individu est en interaction dynamique avec l'environnement. Grâce à un feedback sensoriel, des ajustements comportementaux se produisent face à des situations contraignantes. Il existe plusieurs cas concrets de mise en œuvre de cette approche, à savoir l'étude du sujet âgé chuteur dans un environnement virtuel ou réel et du sujet avec une vestibulopathie chronique pendant une double tâche. Chiarovano et collaborateurs (2017) ont étudié les effets de l'utilisation combinée de la réalité virtuelle, en modulant l'amplitude de rotation des perturbations visuelles, et d'une plateforme de posturographie statique, avec et sans mousse. Leurs résultats ont révélé un nombre élevé de chutes lié aux variations de l'amplitude des perturbations dans les conditions avec et sans mousse ; indiquant une instabilité accrue en conditions visuelles et proprioceptives contraignantes. De plus, la posturographie dynamique associée à la réalité virtuelle permet de mieux comprendre les changements subtils et la complexité des stratégies adoptées dans ces situations (Keshner et al., 2023). De ce fait, nous pouvons intégrer une variété de perturbations visuelles et proprioceptives, grâce à la modernisation de la posturographie dynamique et de la réalité virtuelle offrant une flexibilité indéniable.

Il semble pertinent de s'intéresser aux changements subtils des processus perception-action impliqués dans la fonction d'équilibration lors d'une évaluation instrumentée intégrant la réalité virtuelle et des configurations de la surface imitant des situations du quotidien (par exemple, surfaces instables, interaction avec des objets mouvants). Dans une perspective de développement technologique, une nouvelle plateforme de posturographie dynamique, appelée MotionVR (<https://virtualisvr.com>) intégrant la réalité virtuelle et des amplitudes de mouvements variables, a été conçue. La plateforme MotionVR représente une avancée technologique dans le domaine de la santé pour l'évaluation posturologique et la rééducation des troubles de l'équilibre. Il paraît aussi essentiel de présenter le contexte industriel dans lequel les outils technologiques, y compris MotionVR, sont implantés (deuxième partie du cadre théorique). Le deuxième chapitre a pour objectif de fournir des éléments supplémentaires sur les effets de l'évaluation posturographique dynamique associée à la réalité virtuelle. La première partie de ce chapitre permet de dresser un état des lieux de l'analyse posturographique instrumentée. Un premier article présente les résultats d'une revue systématique avec méta-analyse des valeurs de référence. A ce jour, les systèmes posturographiques instrumentés sont limités en termes de mouvements mécaniques car ils n'effectuent que des mouvements rotationnels et translationnels antéro-postérieurs. Cet outil offre la possibilité de contrôler la réactivité de la plateforme, en modulant son mouvement qui est quantifiable à 360° et caractérisé par trois degrés de liberté (antéro-postérieur, médio-latérale et haut/bas). De ce fait, nous nous focaliserons sur la quantification de l'équilibre par le système MotionVR associé à la réalité virtuelle afin d'en établir des valeurs de référence. Nous verrons les effets de l'âge, du genre et des différences entre cette plateforme et celles d'autres concurrents. Un deuxième article présente les résultats de cette étude clinique. Ensuite, nous nous intéresserons aux propriétés psychométriques de cet outil dans la troisième partie qui fait l'objet d'un article. Nous compléterons cette partie avec une analyse de la sensibilité de la plateforme.

Nous nous intéresserons aux conséquences du dysfonctionnement vestibulaire après avoir présenté le fonctionnement sensorimoteur du sujet sain. Ce dysfonctionnement présente un tableau clinique particulier. En effet, un dysfonctionnement du système vestibulaire perturbe la communication plurimodale, altérant alors les représentations perceptive, motrice et cognitive et la capacité à résoudre des incohérences sensorielles (Lopez, 2013; Smith, Zheng, et al., 2005). Une altération du modèle de représentation interne vestibulaire entraînerait des réponses comportementales et viscérales inadaptées aux contraintes environnementales (Borel et al., 2008; Hilber et al., 2018). Une désorganisation de la représentation interne, relative à la gravité terrestre, chez des patients vestibulaires serait à l'origine de leur incapacité à anticiper les

événements de leur environnement ; provoquant un stress physiologique chronique et un état d'anxiété élevé chez ces patients.

De ce fait, certains profils pathologiques perdurent dans le temps caractérisant une chronicisation des symptômes. Un cas de syndrome chronique vestibulaire est le PPPD, les étourdissements posturaux-perceptifs persistants (en anglais, persistent postural-perceptual dizziness) qui constituent un groupe hétérogène du fait de la diversité des symptômes présentés par les patients, de l'intensité de ces symptômes et de l'existence ou non de troubles associés. D'après la Classification Internationale des Désordres Vestibulaires, le PPPD représente un trouble fonctionnel chronique qui est caractérisé par un ou plusieurs symptômes persistants d'étourdissements, d'instabilité ou de vertiges non rotatoires qui sont présents pendant au moins trois mois. Des facteurs environnementaux ou psychologiques peuvent exacerber ces symptômes, tels des flux visuels complexes, la position debout et/ou des mouvements actifs ou passifs. Ce syndrome vestibulaire peut s'accompagner de troubles de la personnalité tels que la dépersonnalisation et la déréalisation. Il représente un modèle pathologique intéressant à étudier étant donné l'hétérogénéité symptomatologique résultant d'une multisensorialité altérée, de manière chronique. Dans le troisième chapitre, nous nous intéresserons à cette population spécifique afin d'étudier les conséquences perceptivo-motrices des facteurs exacerbants sur la fonction d'équilibration. Dans un premier temps, nous comparerons la performance de ces patients à une population saine appariée. Dans un deuxième temps, nous proposerons une étude exploratoire des facteurs exacerbants pour compléter cette analyse du sujet pathologique. Le mal des transports (ou cinétose) est un autre cas de syndrome chronique qui, impliquant une désorganisation perceptivo-motrice interne, est caractérisé par des symptômes psychologiques, neurovégétatifs et cognitifs perçus pendant le mouvement et s'aggravant avec une exposition prolongée (Denise et al., 2013; Dobie, 2019; Golding, 2016; Lentz & Collins, 1976). De nombreux traitements existent mais aucun permettant une diminution des symptômes du mal des transports. Dans la dernière partie du troisième chapitre, nous nous intéresserons aux effets d'un protocole de désensibilisation au mal des transports, en utilisant la plateforme MotionVR.

Pour résumer, ce manuscrit est organisé autour de trois grands axes pour répondre à l'objectif de ce projet doctoral visant à développer et valider une plateforme d'exploration multisensorielle appliquée à la pathologie vestibulaire et au mal des transports :

Un premier axe correspondant au cadre théorique avec :

- (1) Une présentation de la sensorialité, avec un focus sur le système vestibulaire et de ses fonctions,

- (2) Une description de son fonctionnement normal et anormal relatif à la composante posturale ainsi que
- (3) Des moyens d'évaluation instrumentés,
- (4) Une description de l'industrialisation des outils à destination du domaine de la santé.

Un deuxième axe, décrivant les travaux expérimentaux, qui s'articule autour de trois objectifs distincts et complémentaires pour :

- (1) Dresser un état des lieux, établir des valeurs de référence et déterminer les propriétés psychométriques pour le système MotionVR,
- (2) Evaluer les processus perception-action chez des patients vestibulaires chroniques sur le système,
- (3) Evaluer les effets d'un protocole de désensibilisation chez des sujets atteints de cinétose.

Un troisième axe proposant une synthèse des résultats et une discussion générale sur :

- (1) La compréhension de ces mécanismes au sein d'une population saine et pathologiques,
- (2) Une proposition de mise en perspective thérapeutique.

"It is easy to underrate the importance of a sensory system whose receptor is buried deep within the skull and of whose performance we are usually not aware" (Wilson and Melvill Jones, 1979).

1

Chapitre 1

| Cadre théorique

Objectif du chapitre

Ce chapitre vise à présenter la multisensorialité et les contributions vestibulaires dans les fonctions de stabilisation et d'orientation spatiale, mécanismes complexes impliquant un riche et dense réseau multisensoriel. Un dysfonctionnement de ce réseau provoque de nombreux symptômes observés dans plusieurs pathologies connues. Nous nous intéressons à la pathologie vestibulaire chronique et son évaluation ainsi qu'au mal des transports. De même, ce chapitre abordera les avancées technologiques relatives à la posturographie dans le secteur de la santé.

– Chapitre 1 –

A) Contexte scientifique

1. De la sensation à l'action : processus multisensoriel

1.1. Notions et définitions.

Dès la naissance, nos différents sens se développent progressivement, grâce à la neuroplasticité, pour construire un percept cohérent du monde (Burr & Gori, 2011). Cette multisensorialité peut être décrite selon trois étapes de traitement : sensoriel, perceptif et moteur. L'interaction entre sensation, perception et action est le socle sur lequel nous formons une représentation de l'environnement et nous adoptons des réponses comportementales (Figure 1). Ce processus multisensoriel peut être décrit par des modèles probabilistes, comme la théorie bayésienne qui est la plus couramment admise. D'après Ernst & Bühlhoff (2004), nous pouvons distinguer deux sous-processus impliqués dans la multisensorialité : la combinaison sensorielle, maximisant les informations non redondantes, et l'intégration, réduisant la variance sensorielle à partir d'informations redondantes. Ainsi, la combinaison des informations sensorielles est proportionnelle à leur fiabilité ; ce mécanisme de pondération est expliqué par le modèle Maximum Likelihood Estimation (ou MLE). La pondération sensorielle dépend en partie des expériences passées qui permettent de résoudre l'ambiguïté sensorielle, particulièrement dans des situations contraignantes. La désambiguïsation est un mécanisme complexe qui conduit à une réduction des conflits sensoriels lors d'une exposition immédiate et prolongée. De tels processus doivent être flexibles et fiables pour une prise de décision optimale dans des situations divergentes, en utilisant des connaissances préalables (Pick & Warren, 1969 ; Rouhana, 2008). Or, il existe un éventail de réponses comportementales permettant de s'adapter à une situation donnée.

« Chaque individu disposerait de plusieurs processus vicariants pour s'adapter à la situation dans laquelle il se trouve » (Reuchlin, 1978, p. 134)

Nous pouvons parler de processus vicariants qui désignent une stratégie comportementale dépendante d'un répertoire perceptuel vaste et d'une évocabilité préférentielle (Ohlmann, 2018). La flexibilité de ce système est qualifiée de conduite de détour qui représente la capacité d'un individu à inhiber un processus privilégié pour adopter un autre, voire combiner plusieurs possibilités, afin de s'adapter aux contraintes environnementales. Ce processus dynamique et adaptatif repose sur un couplage entre une exploration active et passive de l'environnement. Le

développement de cette multisensorialité est influencé par l'expérience et la privation sensorielles, qui sont fondamentales dans l'apprentissage sensorimoteur et cognitif. Au cours du développement de l'enfant, une absence de stimulations vestibulaires, visuelles et/ou proprioceptives peut altérer les fonctions visuo-spaciales, sensori-motrices, mnésiques, entre autres. Par exemple, la méningite chez l'enfant altère le fonctionnement vestibulaire, ce qui provoque un retard du développement posturo-moteur lorsqu'elle survient avant l'acquisition de la marche autonome, même sans déficit neurologique (Wiener-Vacher et al., 2012). De même, une discrimination de l'orientation haptique déficitaire a été observé chez des enfants atteints de cécité (Gori et al., 2010).

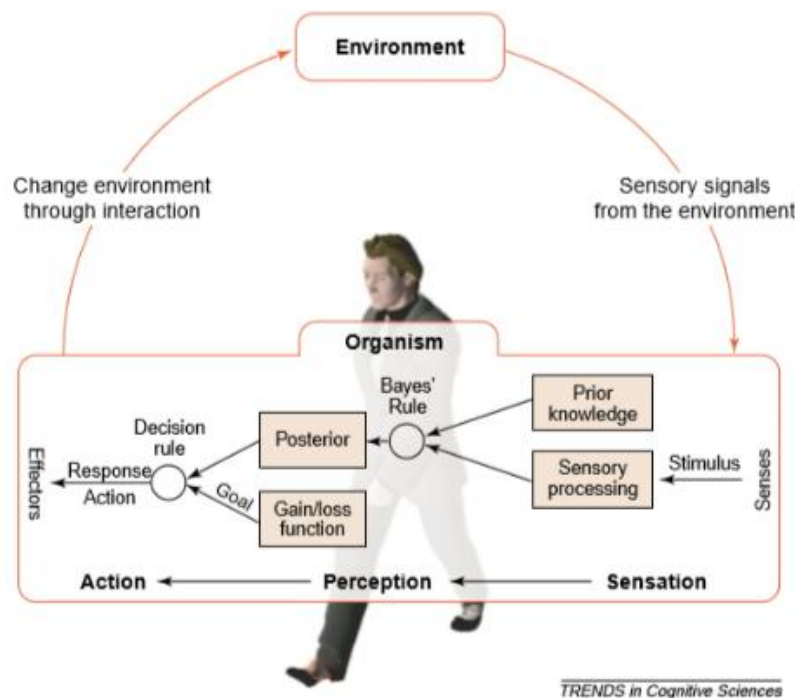


Figure 1. Schéma de l'interaction entre sensation, perception et action. Adapté Ernst & Bühlhoff, (2004).

L'équilibration s'organiserait selon des processus vicariants à travers la prise de référentiels visuel, gravitaire et égocentré (Isableu et al., 2010; Ohlmann & Marendaz, 1991). En condition contraignante, un référentiel privilégié (processus dominant) peut perturber l'adaptation comportementale d'un individu. Dans ce cas, les autres référentiels (processus récessifs) doivent être mobilisés ; cette conduite de détour montre la propriété de substitution de ces processus vicariants. Il paraît essentiel de présenter succinctement les modalités sensorielles principales impliquées dans la perception et le contrôle du mouvement (Figure 2) :

✚ **Le système visuel.** Le traitement visuel commence au niveau de la rétine de l'œil, qui est constituée d'une zone centrale et d'une zone périphérique ayant des propriétés fonctionnelles spécifiques². Les informations visuelles sont captées par des photorécepteurs (cônes et bâtonnets) et sont transmises via les nerfs optiques vers les structures sous-corticales : le corps genouillé latéral dorsal dans le thalamus, le colliculus supérieur dans le mésencéphale, le noyau suprachiasmatique dans l'hypothalamus. Le traitement cortical de l'information visuelle s'effectue au niveau du cortex visuel strié (l'aire V1) et extra-strié (par exemple, l'aire V5). Il existe deux voies corticales impliquées dans le traitement de l'information visuelle (Creem & Proffitt, 2001; Derrington et al., 2004; Mishkin et al., 1983; Rizzolatti & Matelli, 2003). D'une part, une voie occipito-temporale (ou ventrale) qui joue un rôle crucial dans l'identification visuelle des objets, associée aux émotions et aux gestes moteurs. D'autre part, une voie occipito-pariétale (ou dorsale) qui est essentielle à la localisation visuelle des objets, permettant la construction de cartes cognitives et le guidage visuel des gestes moteurs. La vision contribue à la régulation posturale ; en détectant les déséquilibres posturaux à partir

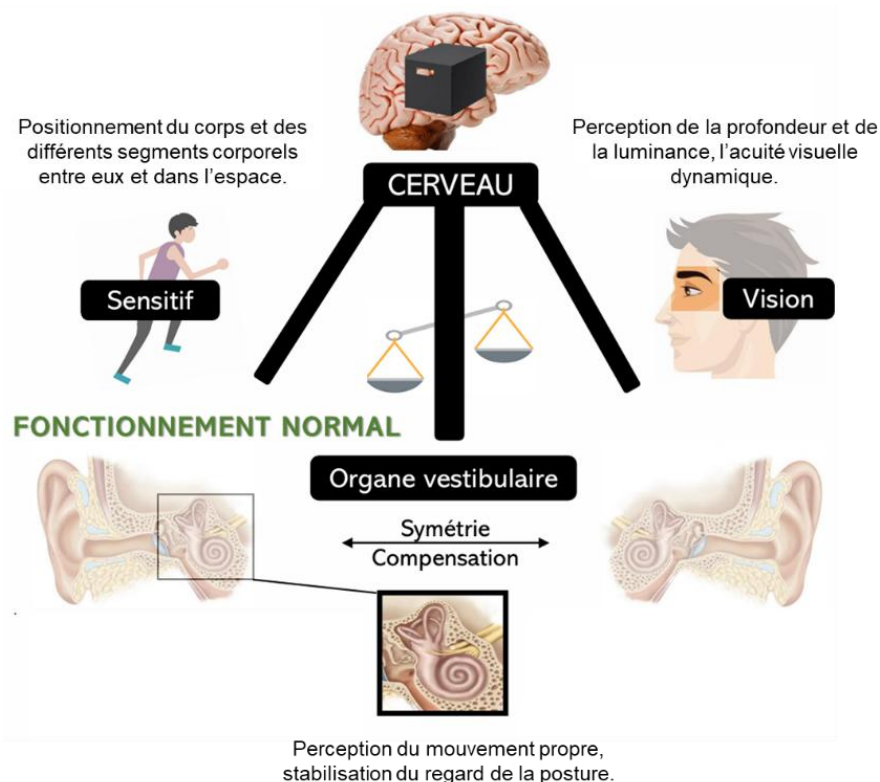


Figure 2. Illustration des modalités sensorielles impliquées dans l'équilibration.

² BULLIER, J. VISION - Neurophysiologie visuelle. Encyclopædia Universalis. <https://www-universalis-edu-com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/vision-neurophysiologie-visuelle> (consulté le 23 août 2024).

des informations sur la forme et la vitesse relative des objets, sur le mouvement propre et les mouvements relatifs de la scène visuelle par rapport à l'individu³.

✚ **Le système somesthésique.** La somesthésie représente les sensations tactiles, thermiques, douloureuses et kinesthésiques générées par des extérocepteurs à la surface de la peau et des propriocepteurs localisés dans les muscles, les tendons et les articulations⁴. Ce sont les mécanorécepteurs qui captent les informations sur la position, le mouvement du corps et les déformations de la peau. Il existe trois types de mécanorécepteurs proprioceptifs : les fuseaux neuromusculaires, les organes tendineux de Golgi et des récepteurs articulaires (corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Golgi-Mazzoni). Les cellules de Merkel, les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Ruffini, les corpuscules de Pacini et les terminaisons libres sont des mécanorécepteurs encodant la sensibilité cutanée. Ces informations sont acheminées vers les centres supra-segmentaires par l'intermédiaire de fibres myélinisées, dont la vitesse de conduction varie. Elles sont majoritairement transmises au niveau du cortex antéro-pariétal, à partir du noyau postéro-latéral du thalamus. Ce système joue un rôle important dans le contrôle du mouvement volontaire, via les sous-systèmes tactile et proprioceptif. Le cortex somatosensoriel primaire, situé au niveau du gyrus post-central, joue un rôle important dans le traitement des afférences somatosensorielles nécessaire pour le contrôle moteur, l'apprentissage moteur et la récupération fonctionnelle (Borich et al., 2015; de Haan & Dijkerman, 2020). De même, les cortex somatosensoriels associatifs sont impliqués dans la production et le contrôle du mouvement volontaire.

✚ **Le système vestibulaire.** Nous verrons plus en détail ce système étant donné que son dysfonctionnement entraîne des troubles fonctionnels et perceptuels persistants, qui sont au centre de ce projet doctoral. De ce fait, nous présenterons dans les prochains paragraphes, de manière plus détaillée, la neurophysiologie vestibulaire, ses fonctions et son fonctionnement normal ainsi que les conséquences d'un dysfonctionnement.

³ Isableu, B. & Vuillerme, N. (2016). Chapitre 1. Contrôle visuel de l'orientation et de l'équilibre postural. Dans : éd., Posture et équilibration humaines (pp. 55-72). Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

⁴ LAGET, P. SOMESTHÉSIE. Encyclopædia Universalis. <https://www-universalis-edu-com.ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedia/somesthesie/> (consulté le 23 août 2024).

1.2. Généralités sur le système vestibulaire

Comparé aux autres systèmes sensoriels, le système vestibulaire a longtemps été inexploré. Ce sont les travaux de Prosper Ménière (1799–1862) qui ont démontré, pour la première fois, que les maladies de l'oreille interne provoquaient des vertiges. Poursuivant ces travaux, Robert Bárány (1876-1936) a étudié les troubles de l'équilibre, mettant en avant le rôle du cervelet et l'implication des muscles dans le fonctionnement vestibulaire. Son travail a considérablement impacté la recherche sur le système vestibulaire et le Prix Nobel de Médecine lui a été décerné en 1918 pour sa contribution scientifique. De manière générale, ces études ont contribué au développement du domaine de l'otoneurologie, en apportant une base de connaissances sur les méthodes d'investigation de l'appareil vestibulaire et pour le traitement thérapeutique de plusieurs pathologies vestibulaires. Malgré ces avancées, les contributions vestibulaires demeurent sous-estimées et souvent sous-évaluées dans la pratique clinique. Dans ce premier chapitre, nous présenterons le système vestibulaire et ses diverses contributions ainsi que les conséquences de son dysfonctionnement et l'évaluation de certaines fonctions.

1.2.1. Neurophysiologie vestibulaire

Un certain nombre d'études ont porté sur le développement et l'anatomie du système vestibulaire (par exemple pour une revue voir respectivement Jamon, 2014 et Khan & Chang, 2013). Les études de l'anatomie comparée ont montré une conservation de ce système sensoriel au cours de l'évolution des Vertébrés (Graf & Klam, 2006).

Le système vestibulaire représente un système sensoriel évolutif et ancien, dont le développement débute à partir de la 4^{ème} semaine de gestation chez l'Homme. L'appareil périphérique vestibulaire est situé postérieurement à la cochlée au sein de l'oreille interne, enclavé dans l'os temporal. Il est composé de cinq structures : les otolithes (l'utricule et le saccule) et des canaux semi-circulaires (horizontal, vertical antérieur et vertical postérieur) (Figure 3. A). Au cours du développement embryonnaire et fœtal, les structures vestibulaires (les trois crêtes et l'utricule) deviennent des structures distinctes à la 8^{ème} semaine de gestation (Lim & Brichta, 2016). Les canaux semi-circulaires présentent une configuration tridimensionnelle, avec un canal horizontal et des canaux verticaux orientés respectivement à environ 30° par rapport à l'horizontal et 45° par rapport au plan sagittal (Figure 3. B). Les otolithes sont des gravicepteurs (dépendants de la gravité). L'épithélium de l'utricule est orienté parallèlement à l'horizontale alors que celui du saccule est orienté verticalement. Ces structures font partie du labyrinthe vestibulaire qui

comporte un composant osseux et un composant membraneux. Les structures vestibulaires sont situées à l'intérieure du labyrinthe membraneux, qui est composé d'endolymphe. Cet ensemble est protégé par le labyrinthe osseux.

Les structures vestibulaires présentent une orientation qui est spécifique au type de mouvement détecté. Les otolithes et les canaux semi-circulaires sont des récepteurs sensoriels qui permettent de détecter des mouvements du corps et l'orientation de la tête dans l'espace. Les otolithes détectent les accélérations linéaires avec un seuil de détection de 2 cm par seconde et angulaires avec un seuil de détection de 3° par seconde carré ainsi que l'inclinaison de la tête avec une précision de 0,5° (Kingma & van de Berg, 2016). Les canaux semi-circulaires détectent les accélérations angulaires avec un seuil de détection de 0,5° par seconde. Les variations de seuils de détection des accélérations sont dues aux caractéristiques morphologiques de ces structures. Les translations linéaires de basses fréquences (< 1 Hertz) et les rotations entre 0,1 et 10 Hertz sont respectivement captées par les otolithes et les canaux semi-circulaires.

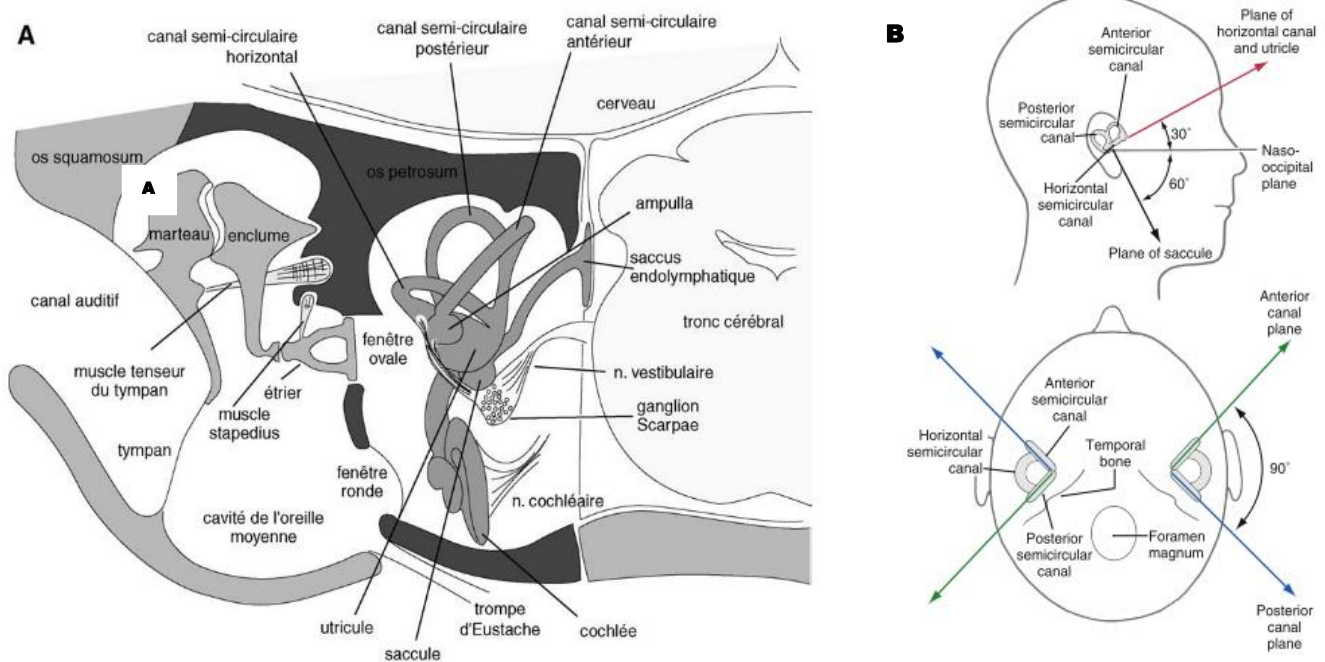


Figure 3. A) Illustration anatomique de l'oreille humaine. Issue de « *Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement* » de W. Graf & F. Klam (2006). *Compte-Rendu Palevol* 5 (2006), 5, 637-655. **B) Illustration de l'orientation des otolithes et des canaux semi-circulaires.** Issue de J. Dickman, (2017). *Fundamental Neuroscience for Basic and Clinical Applications (Fifth Edition)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39632-5.00022-0>.

Ces informations sensorielles sont enregistrées par les cellules ciliées, mécanorécepteurs au sein de ces structures, et sont envoyées par le nerf vestibulo-cochléaire (VIII) au complexe des noyaux vestibulaires, considéré principal relais sensoriel des afférences (Cullen, 2016; Dickman, 2018).

Ce complexe représente la première étape du traitement central vestibulaire. Il est composé de quatre sous-noyaux : inférieur, médian (le plus gros), latéral et supérieur situés dans la médulla rostrale et le pons caudal. Ces sous-noyaux intègrent les afférences, de manière sous-additive, de telle sorte que l'intégration simultanée des informations engendrent une moindre modulation qu'une intégration consécutive (en d'autres termes, $\text{intégration}_{a+b} < \text{intégration}_a + \text{intégration}_b$) permettant un traitement moins saturé et plus efficace (Cullen, 2016). Par ailleurs, cette intégration est plus importante du côté ipsilatéral du système périphérique stimulé lors des mouvements. Le complexe des noyaux est constitué de neurones codant les rotations et les translations linéaires de la tête par rapport au corps. Les rotations autour d'un axe vertical (ou de lacet) impliquent principalement des neurones localisés dans les sous-noyaux médian rostral et latéral ventral. Des neurones localisés dans les sous-noyaux supérieur et médian codent les rotations autour des axes horizontal (ou de roulis) et transversal (ou de tangage). Il existe trois groupes de neurones : les neurones PVP (position-vestibular-pause), EH (eye-head) et VO (vestibular-only). D'une part, ces neurones participent au codage des signaux sur la position des yeux pendant la fixation. Une inhibition de cette activité est possible en cas de saccades oculaires. D'autre part, ils participent au codage des mouvements de la tête lors d'une rotation du corps.

De plus, des fibres commissurales relient les paires de noyaux vestibulaires permettant une communication bilatérale et réciproque entre les structures otolithiques et canalaire afin de fournir un traitement global des informations. Ce traitement se traduit par une optimisation dynamique de la réactivité et de la sensibilité des noyaux vestibulaires relatives aux mouvements. Le système commissural joue un rôle important dans la réorganisation fonctionnelle centrale (autrement dit, compensation vestibulaire) après une perte unilatérale (Lacour et al., 2016; Olabi et al., 2009; Takeda et al., 2024). En effet, une telle lésion entraîne une absence de stimulation du noyau médian du côté atteint ayant pour conséquence immédiate une hyperactivité du noyau contra-latéral et une perturbation de l'activité GABAergique. Ce dysfonctionnement (ou déafférentation vestibulaire) entraîne des réponses oculomotrices et posturales asymétriques statiques. Ainsi, un réajustement de l'expression des récepteurs GABAergiques au sein des projections commissurales inhibitrices est impliqué dans la phase initiale de la compensation vestibulaire statique. Ces modifications atténuent les réponses anormales.

En outre, l'organisation complexe du réseau vestibulaire implique une communication entre l'appareil vestibulaire périphérique, le système oculaire, la moelle épinière, le cervelet et les différentes aires corticales (Khan & Chang, 2013; Lopez et al., 2005). Les aires corticales qui reçoivent les informations provenant du complexe des noyaux sont distribuées aux niveaux

insulaire, pariétal, temporal, frontal et cingulaire (Figure 4.A.). Ces dernières émettent en retour des projections vers le complexe des noyaux. Indovina et al. (2020) ont réalisé une analyse de la connectivité structurelle du réseau vestibulaire, par la théorie des graphes (approche connectomique), de données issues de 974 sujets sains. Les résultats ont permis de caractériser des clusters fonctionnels intraconnectés respectivement aux niveaux hémisphériques droit (pariéto-insulaire-préfrontal, visuel, limbique-sous-cortical contenant la formation hippocampique, le cortex cingulaire et le thalamus) et gauche (visuel, limbique-sous-cortical, pariéto-insulaire-préfrontal divisé en sous-clusters insulaire-operculaire-préfrontal et gyrus supramarginal-cortex intrapariétal) (Figure 4.B.). Il n'existe pas de cortex vestibulaire primaire mais un foyer central, localisé autour de la scissure de Sylvius, qui joue un rôle critique dans la perception du mouvement propre, de l'orientation spatiale et la représentation corporelle. Ce dernier peut être divisé en deux parties distinctes mais complémentaires, une zone de traitement vestibulaire au niveau de l'opercule pariétal (sous-région OP2) et une zone de traitement visuo-vestibulaire au niveau du cortex rétroinsulaire (précédemment appelé cortex insulaire postérieur ; PIC), qui présentent des caractéristiques anatomiques et fonctionnelles différentes (Frank et al., 2018; Indovina et al., 2020). Ces zones vestibulaire et visuo-vestibulaire correspondent respectivement aux homologues humains du cortex vestibulaire pariéto-insulaire et du cortex insulaire postérieur. Il a été démontré qu'il existait une connexion bilatérale entre le PIC et les zones pariétales médiales, le thalamus ainsi qu'une connexion ipsilatérale avec l'insula, les régions périssylvienne et prémotrice, les aires occipitales et temporales, le cortex cingulaire postérieur et l'hippocampe antérieur. De même, l'OP2 est connecté, de manière ipsilatérale, aux régions insulaire et périssylvienne, au cortex pariétal supérieur et au cortex somatosensoriel. Des différences de connectivités structurelles entre le PIC et l'OP2 ont également été observées.

Dans une revue de Hitier et al. (2014), les contributions vestibulaires dans la cognition avaient été décrites à travers l'existence de quatre voies hypothétiques. Leong et al., (2019) ont étudié les voies vestibulaires centrales par stimulation optogénétique du noyau médian ipsilatéral, chez des rats mâles Sprague-Dawley. Les observations de Leong et collaborateurs ont permis de suppléer aux lacunes expérimentales en détaillant les projections à partir du noyau médian vestibulaire de part une voie vestibulo-mésencéphale-thalamo-corticale, une voie constituée des projections mésencéphale-thalamo-formation hippocampique et mésencéphale-formation hippocampique, une voie vestibulo-cérébelleuse et une voie réflexe vestibulo-oculomotrice. En effet, leurs résultats ont montré une activation bilatérale au niveau du cortex sensorimoteur et des noyaux thalamiques associés (auditif, visuel, somatosensoriel et moteur), de régions de haut niveau (cortex cingulaire, cortex retrosplénial, cortex associatif pariéto-temporale) et de la formation hippocampique (gyrus

A



Ces voies constituent un dense et riche réseau multisensoriel interconnecté. Ce réseau central vestibulaire joue un rôle important dans le contrôle sensorimoteur, les émotions et la cognition (Besnard et al., 2015, 2018; Z. Cheng & Gu, 2018; Dieterich & Brandt, 2024; Hilber et al., 2018; Hitier et al., 2014). Par ses nombreuses projections, le système vestibulaire assure une multitude de fonctions, que nous présenterons succinctement dans les paragraphes suivants.

1.2.2. Les fonctions du système vestibulaire

Le système vestibulaire participe aux mouvements réflexes vestibulo-oculaires et spinaux, à la perception du mouvement propre dans l'espace et aux processus cognitivo-affectifs (Angelaki & Cullen, 2008; Dieterich & Brandt, 2024; Mast et al., 2014). De plus, il participe à la régulation du système nerveux autonome et à la régulation hypothalamique, par une connexion avec le noyau suprachiasmatique, essentiel à la rythmicité biologique, et par une connexion avec les neurones orexinergiques participant à la consolidation de la phase d'éveil (Besnard et al., 2018). En ce qui concerne les mouvements réflexes, le système vestibulaire permet la stabilisation du regard et de la posture ainsi que le maintien de l'équilibre, par la mise en œuvre de réflexes : le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) et le réflexe vestibulo-spinal (VSR). Les projections vestibulo-cérébelleuses sont impliquées dans les mécanismes de régulation des mouvements oculaires, de la tête et du contrôle postural. Nous nous intéresserons davantage à la stabilisation du regard par le réflexe vestibulo-oculaire, l'équilibration par le réflexe vestibulo-spinal et les fonctions cognitives dans les prochains paragraphes.

Lors d'un mouvement de la tête ou d'un déplacement, le regard doit être stable et maintenu pour une perception optimale de l'environnement et une orientation spatiale efficace. Le VOR assure une réponse complémentaire dynamique et rapide pour stabiliser le regard au cours des mouvements de la tête et du corps dans l'espace (Cullen, 2012; Swain & Dubey, 2023). Ce réflexe est complètement involontaire et inconscient. Il implique un arc réflexe, constitué d'un neurone primaire afférent émanant du labyrinthe vestibulaire, d'un neurone secondaire au niveau des noyaux vestibulaires et un neurone oculomoteur efférent. Les informations issues des canaux semi-circulaires et des structures otolithiques sont ainsi transmises vers les noyaux vestibulaires et les muscles extra-oculaires pour leur codage permettant la stabilisation de l'image sur la fovéa et des réponses motrices cohérentes. Il existe deux sous-mécanismes de VOR en fonction du type de mouvement : un réflexe canaliculo-oculaire pour une translation angulaire (en anglais, angular vestibulo-ocular reflex ou aVOR) et un réflexe otolitho-oculaire pour une translation linéaire (en anglais, translational vestibulo-ocular reflex ou tVOR). L'aVOR se traduit par des mouvements oculaires compensatoires de magnitude égale et opposée aux rotations de la tête

par rapport à l'espace. Le tVOR se traduit par des mouvements oculaires compensatoires aux accélérations gravito-inertielles. Ces sous-mécanismes présentent des caractéristiques différentes dépendantes de la fréquence du mouvement et de la distance des objets dans l'environnement (Angelaki, 2004; Angelaki et al., 2001; Raphan & Cohen, 2002). Son processus de maturation est toujours en cours chez les enfants de 6 à 12 ans et le gain du VOR diminue avec l'âge (Charpiot et al., 2010). Sur une période de 9 à 12 ans, Kerber et al., (2006) ont étudié l'effet de l'âge sur la fonction oculomotrice au sein d'une population gériatrique. Ces auteurs ont observé une réduction significative des gains pour les réponses visuo-vestibulo-oculaires, le réflexe vestibulo-oculaire et le nystagmus optocinétique entre les participants ayant réalisé les bilans oculomoteurs et fonctionnels après 9 ans et 12 ans. Ils ont aussi démontré un lien entre un déclin oculomoteur et postural. En effet, un déclin postural lié à l'âge pour la marche et l'équilibre statique a été observé dans cette étude.

Le contrôle moteur lors du déplacement est assuré par le réflexe vestibulo-spinal (VSR) (Horak et al., 2002). Le VSR coordonne les mouvements de la tête et du cou avec ceux du corps afin de maintenir la tête dans une position droite. De plus, il assure une mise à jour rapide et involontaire des mouvements corporels et de la posture. Ce réflexe contient de nombreuses connexions complexes avec le système visuel, la moelle épinière et le cervelet. Les projections vestibulo-spinales ajustent sélectivement le tonus postural en réponse aux mouvements de la tête afin de garantir un contrôle moteur précis. Les tractus vestibulo-spinal médial et latéral, provenant des noyaux vestibulaires, fournissent des informations aux motoneurones de la moelle épinière pour moduler respectivement la musculature du cou et de la partie supérieure du corps ainsi que les membres supérieurs et inférieurs ; avec une implication prédominante du tractus latéral dans le contrôle postural (McCall et al., 2017). Ce contrôle moteur précis est permis par l'intégration des informations visuelles et proprioceptives, en relation avec celles de la force gravitationnelle. Ainsi, l'équilibre nécessite un contrôle permanent de la tête et du corps dans l'espace ainsi qu'un contrôle de la tête par rapport au corps. Dans l'étude de Cathers et al., (2005), il a été démontré que les organes vestibulaires exercent un contrôle réflexe automatique sur l'équilibre de manière indépendante. Les réflexes de courte durée et provoquant de faibles oscillations posturales transitoires sont sous le contrôle des otolithes alors que les canaux semi-circulaires contrôlent les réflexes de durée moyenne et des oscillations élevées. Son processus de maturation est toujours en cours chez les enfants de 6 à 12 ans (Charpiot et al., 2010). Cette maturation se mettrait en place entre 15 et 17 ans (Sinno et al., 2021). L'équilibre devient instable avec l'âge et le genre (Eriksen & Hougaard, 2023). Des modifications du contrôle postural débuteraient à partir de la

quarantaine (Konukseven et al., 2022). Les types de performance posturale sont spécifiques à la tâche (Kiss et al., 2018).

La communication plurimodale permet la programmation et la correction de l'action dans l'espace (C. Lopez et al., 2005). Le système vestibulaire est responsable principalement de la perception de la verticalité (otolithes) et de la perception du mouvement propre (otolithes et canaux semi-circulaires) (Brandt & Dieterich, 1999). Des données ont mis en évidence le rôle important des voies vestibulaires dans l'orientation, la navigation et la mémoire spatiale (cognition spatiale) (Besnard et al., 2011) ainsi que dans la conscience et la perception de soi (Ionta et al., 2011; C. Lopez, 2013). Les informations visuelles, somatosensorielles et vestibulaires sont intégrées, en termes de cadres de référence, et permettent la représentation interne de l'espace ou verticalité (Bottini et al., 2001 ; Borel et al., 2001 ; Borel et al., 2008). L'intégration de ces coordonnées physiques et perceptives au niveau pariétal permet un codage et une transformation des informations spatiales (Andersen et al., 1993 ; Paillard, 2000). D'autres études ont montré que la jonction temporo-pariétale était un centre multisensoriel important dans la conscience de soi. En utilisant une stimulation robotique visuelle et tactile, Ionta et coll. (2011) ont montré que l'activation de la jonction temporo-pariétale reflétait les changements d'états perspectifs « first-person » et de « self-location » chez des participants sains. De même, cette représentation spatiale dépend également de processus cognitifs, comme l'attention et les émotions, pouvant influencer le traitement des informations perçues. En effet, des études ont également mis en évidence l'implication vestibulaire dans les processus affectifs (par exemple pour une revue voir Rajagopalan et al., 2017).

1.2.3. Le fonctionnement du système vestibulaire

Le fonctionnement normal du système vestibulaire peut être distingué selon deux versants, perceptif et moteur, qui sont primordiaux pour l'exécution de réponses comportementales adaptées aux contraintes de l'environnement. Le versant perceptif intègre les modalités sensorielles participant à l'identification et la localisation des objets pour la construction de cartes cognitives, associées à la sélection et au contrôle des gestes moteurs. Le versant moteur concerne les réponses mises en œuvre pour le maintien de l'équilibre et la stabilisation du corps et du regard.

Focus sur l'équilibration

L'équilibration correspond à un système adaptatif multisensoriel effectuant des actions prédictives (anticipatives) et/ou réactives (compensatoires), avec différents degrés de précision, pour maintenir l'équilibre dans un contexte environnemental changeant (Pollock et al., 2000). Les fonctions principales du contrôle postural sont l'orientation et la stabilisation du corps. La position posturale de référence est la station debout érigée, dont le maintien s'oppose à la force de pesanteur. Dans ce travail, nous nous intéresserons davantage aux différentes composantes de la fonction d'équilibration et la flexibilité de son fonctionnement chez des sujets sains et pathologiques. Ces composantes peuvent être de nature mécanique (contraintes mécaniques), fonctionnelle (stabilité de la marche/du mouvement, limites de stabilité et verticalité, ajustements posturaux anticipatoires et compensatoires, posture, réponses posturales) ou cognitive (orientation et intégrations sensorielles) (Figure 5).

Composante mécanique

Le maintien de l'équilibre repose sur trois composantes mécaniques : détection de la verticale gravitaire par le système vestibulaire, le centre de gravité (point d'application de la résultante des forces de gravité) et le polygone de sustentation (polygone obtenue en joignant les points d'appui les plus éloignés)⁵. Le système postural est le plus souvent décrit comme un pendule inversé. Pour l'équilibre orthostatique, les limites de stabilité dans le plan antéro-postérieur peuvent être calculées en décrivant les mouvements du corps en termes de pendule inversé en rotation à un seul degré de liberté autour des articulations de la cheville. La mesure quantitative de l'amplitude maximale de déplacement, sans perte d'équilibre, a été définie comme étant la fonction de limite de stabilité. Cette fonction est déterminée en utilisant une description mathématique de segments corporels et de données anthropométriques. De plus, une fonction de marge de stabilité est calculée correspondant à la différence entre la mesure de déplacement observée et la fonction limite de stabilité. En se référant à une base de données définissant la gamme de fonctions de déplacement et de marge cliniquement normales, le sujet est identifié comme étant instable lorsque la fonction de marge est inférieure à la fonction de marge normale définie. En utilisant cette description du pendule inversé, les limites de stabilité pour le déplacement angulaire du centre de masse⁶ du corps autour des articulations de la cheville sont déterminées en imposant

⁵ Noé, F. (2016). Chapitre 1. Bases biomécaniques du contrôle postural. Dans : éd., Posture et équilibration humaines (pp. 5-9). Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

⁶ Définition : point théorique par rapport auquel la masse d'un corps est uniformément répartie.

une contrainte mécanique sur le couple articulaire maximal de la cheville pour éviter les effets déstabilisants. D'après l'hypothèse que le centre de masse d'un corps est déplacé, de manière sinusoïdale, autour des chevilles, l'amplitude de déplacement angulaire peut être déterminée, pour chaque fréquence de déplacement, à laquelle le couple articulaire de la cheville atteint le maximum défini par la contrainte mécanique. Les effets combinés des déplacements angulaires au niveau de la cheville et de la hanche peuvent tous deux être pris en compte pour calculer le déplacement angulaire maximal du centre de masse corporel en utilisant un modèle à double pendule inversé. Les contraintes de couple articulaire de la cheville sont similaires à celles décrites pour le modèle du pendule inversé et les contraintes de couple articulaire de la hanche peuvent être basées soit sur des observations empiriques des accélérations maximales de l'articulation en fonction de la longueur et de la masse du tronc, soit sur des calculs théoriques des forces musculaires maximales de la hanche et des vitesses de contraction par rapport à la longueur et à la masse du tronc. D'après Nashner (L. M. Nashner, 1985; L. M. Nashner et al., 1989), on suppose que le corps commence à se déplacer à une vitesse angulaire constante à partir de la position debout pour déterminer les fonctions de seuil de vitesse angulaire. En utilisant le modèle du pendule inversé, les accélérations angulaires vers les canaux sont identiques à celles du centre de masse corporelle, tandis que l'inclinaison angulaire de la tête est identique à celle du centre de masse. En répétant ce calcul pour toutes les vitesses possibles de déplacement angulaire, une relation fonctionnelle distincte pour chacun des canaux et otolithes est définie et décrit l'amplitude de déplacement angulaire à laquelle le mouvement est d'abord détecté en fonction de la vitesse de déplacement angulaire. Si les effets combinés des rotations de la cheville, de la hanche et du cou sur les fonctions de seuil du canal et de l'otolithe sont souhaités, un modèle de pendule triple inversé, utilisant les articulations de la cheville, de la hanche et du cou, peut être utilisé.

Composante fonctionnelle

L'équilibration repose sur l'intégration des afférences sensorielles au niveau du système nerveux central pour exécuter des actions correctives permettant de maintenir le centre de gravité à l'intérieur du polygone de sustentation. Les informations visuelles, provenant des photorécepteurs, contribuent au fonctionnement du système postural. De nombreuses études ont démontré qu'une perturbation visuelle (obscurité, mouvement ou yeux fermés) pouvait entraîner des oscillations corporelles importantes (Black & Wall, 1981; Bronstein, 1986; L. Nashner & Berthoz, 1978). La manipulation de la vision périphérique (en utilisant des scènes visuelles mouvantes et/ou de la lumière stroboscopique) et centrale (en utilisant des lunettes opaques)

suggère une complémentarité entre ces deux systèmes, avec une contribution respective dans le contrôle des oscillations antéropostérieures et des oscillations médio-latérales / antéropostérieures (Amblard & Cremieux, 1976; Nougier et al., 1997). Un sondage dans un échantillon de 2375 personnes âgées, évaluées sur une période de vingt mois, a révélé que des défauts du champ visuel étaient associés au risque de chutes (OR = 1,08 pour une perte de 10 points, IC à 95 % 1,03-1,13) (Freeman et al., 2007). Cette association était significative pour la vision périphérique, suggérant un risque plus élevé de chutes pour une perte de cette vision. Dans une étude évaluant les effets d'une perte progressive du champ visuel virtuel (90°, 45°, 15°) sur le contrôle postural, les résultats ont démontré une instabilité accrue liée à une vision périphérique réduite chez des jeunes en bonne santé (Taneda et al., 2021). Cependant, aucune différence significative pour les oscillations antéro-postérieures n'a été observée entre les conditions visuelles, ce qui suppose une repondération sensorielle en faveur des informations vestibulaires plus fiables que celles provenant du système somesthésique perturbé par l'utilisation d'une mousse. Les personnes âgées présentent des oscillations plus importantes que des sujets jeunes lorsque les informations visuelles sont ambiguës ou supprimées, de manière dynamique (Eikema et al., 2012). Cet environnement visuel dynamique peut entraîner une repondération sensorielle nécessaire pour faciliter l'anticipation visuelle et l'adaptation posturale ; cette repondération étant moins efficace chez le sujet âgé, ce qui pourrait expliquer le risque de chute. Ainsi, d'autres modalités sensorielles peuvent suppléer une modalité moins fiable pour une adaptation posturale optimale. En effet, les informations vestibulaires et somesthésiques contribuent également au contrôle postural. Les informations somesthésiques, qu'elles soient proprioceptives ou tactiles, permettent de percevoir la position, le mouvement et la force exercée par le corps ainsi que d'informer sur les interactions entre le corps et la surface de support (sensibilité tactile) (Peterka & Loughlin, 2004). L'importance des informations tactiles a été démontrée en interposant une mousse entre les pieds et le sol, engendrant une instabilité accrue. Les caractéristiques d'une mousse peuvent impacter les capacités posturales – il a été observé que celle présentant une densité élevée et une faible fermeté engendrait des oscillations plus importantes dans les axes antéro-postérieurs et médio-latéraux que d'autres mousses ayant des caractéristiques différentes (Chaikeeree et al., 2015). Une étude menée par Kavounoudias et al. (1999) a démontré que les muscles de la nuque et de la cheville étaient impliqués dans différents processus du système postural et les informations provenant de ces segments corporels permettaient une meilleure orientation posturale. Il a été observé que le contrôle postural chez des sujets sains était dégradé après une stimulation galvanique (Cathers et al., 2005). Dans la suite de ce manuscrit, nous verrons qu'un dysfonctionnement vestibulaire provoque des troubles de l'équilibre. De même,

nous présenterons un cas de conflit visuo-vestibulaire, le mal des transports, entraînant un trouble fonctionnel lors du mouvement. Ces syndromes offrent un cadre d'étude privilégié puisqu'ils permettent d'aborder le dysfonctionnement vestibulaire sous différents angles. La symptomatologie associée à ces derniers est très vaste et présente des particularités individuelles rendant leur prise en charge difficile.

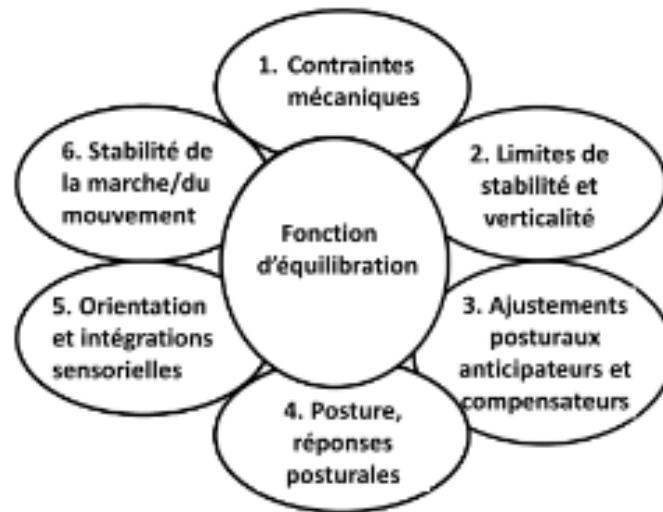


Figure 5. Les différentes composantes de la fonction d'équilibration. Adapté de Paillard et al., (2015).

Composante cognitive

La construction de cartes cognitives correspond à la capacité d'orienter l'attention automatiquement ou volontairement vers des informations pertinentes afin de représenter l'espace extra-personnel et péri-personnel (Rode et al., 2017). Cette représentation spatiale interne repose sur des cadres référentiels allocentrés (configuration spatiale des objets), gravitaire (position du corps dans l'espace) et égocentrés (position des objets par rapport au corps) contribuant à la perception de la verticalité (Lopez et al., 2005). Les informations extéro-, proprio- et exproprio-spécifiques, provenant du système visuel, sont intégrées pour renseigner respectivement sur les caractéristiques physico-cinétiques des objets, le mouvement propre du sujet et les modifications environnementales résultantes⁷. De même, l'intégration proprioceptive participe au contrôle postural en fournissant des informations sur les sens de la position et du mouvement ainsi que la perception de la force⁸. La perception de la verticale représente une

⁷ Isableu, B. & Vuillerme, N. (2016). Chapitre 1. Contrôle visuel de l'orientation et de l'équilibre postural. Dans : éd., Posture et équilibration humaines (pp. 56-67). Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

⁸ Boyas, S. (2016). Chapitre 3. Proprioception et contrôle postural. Dans : éd., Posture et équilibration humaines (pp. 81-77). Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

référence fondamentale permettant une organisation optimale des capacités posturales lors la marche et la position debout. Elle dépend des commandes antigravitaires (gravicepteurs) permettant le maintien du corps dans le plan sagittal. Une intégration optimale dépend de la repondération sensorielle, qui est un mécanisme flexible et dépendant de l'expérience de chaque individu (Murray et al., 2016).

De nombreuses études ont exploré les demandes attentionnelles liées au contrôle postural en fonction de la complexité du contexte sensoriel (Remaud et al., 2012; Shumway-Cook & Woollacott, 2000; Siu & Woollacott, 2007), de la tâche à réaliser (Boisgontie et al., 2011; Remaud et al., 2012; Vuillerme & Nafati, 2007) et de l'âge (Lacour et al., 2008; Marsh & Geel, 2000). Les résultats ont démontré que les besoins attentionnels augmentaient avec la limitation des informations sensorielles disponibles, la difficulté de la tâche et l'âge du sujet . Dans une étude menée par Shumway-Cook & Woollacott (2000), il a été démontré que des sujets âgés en bonne santé étaient plus instables que des sujets jeunes lorsque les informations visuelles et proprioceptives étaient perturbées pendant une double tâche. Cette instabilité a aussi été observée chez des sujets âgés chuteurs dans toutes les conditions sensorielles (yeux ouverts et fermés, flux optocinétique, plateforme asservie). Cette étude a également permis d'évaluer les ressources attentionnelles sollicitées, en mesurant le temps de réaction, pendant une tâche posturale en position debout présentant un son grave ou aigu. Les ressources attentionnelles étaient plus sollicitées pendant les conditions présentant une perturbation sensorielle importante. Vuillerme & Nafati (2007) ont apporté des éléments pour expliquer comment ces ressources attentionnelles pouvaient influencer le contrôle postural. Pour le faire, ils ont proposé à des participants de réaliser une tâche posturale soit en leur précisant de focaliser leur attention sur les capacités posturales soit sans indication particulière. Les résultats ont révélé une augmentation des oscillations posturales liées à la focalisation externe de l'attention. Cette focalisation externe perturberait les mécanismes automatiques impliqués dans le contrôle postural.

Ainsi, le système vestibulaire participe à de nombreuses fonctions réflexes et cognitives. D'une part, les fonctions réflexes regroupent le réflexe vestibulaires oculaire (VOR) et le réflexe vestibulaire spinal (VSR). D'une autre part, les fonctions cognitives regroupent les processus cognitivo-affectifs. Un dysfonctionnement vestibulaire peut entraîner des conséquences graves sur les capacités perceptivo-motrices.

2. Dysfonctionnement vestibulaire et ses conséquences

Le syndrome vestibulaire constitue un groupe de patients hétérogènes du fait de la diversité des symptômes présentés, de l'intensité de ces symptômes et de l'existence ou non de troubles associés (psychologiques, somatiques, cognitifs, etc.) (Figure 6.A.). Ce syndrome présente ainsi un tableau clinique complexe qui peut être décomposé en plusieurs niveaux (sémiologique, syndromique, étiologique et physiopathologique) intra et interconnectés (Figure 6.B.).

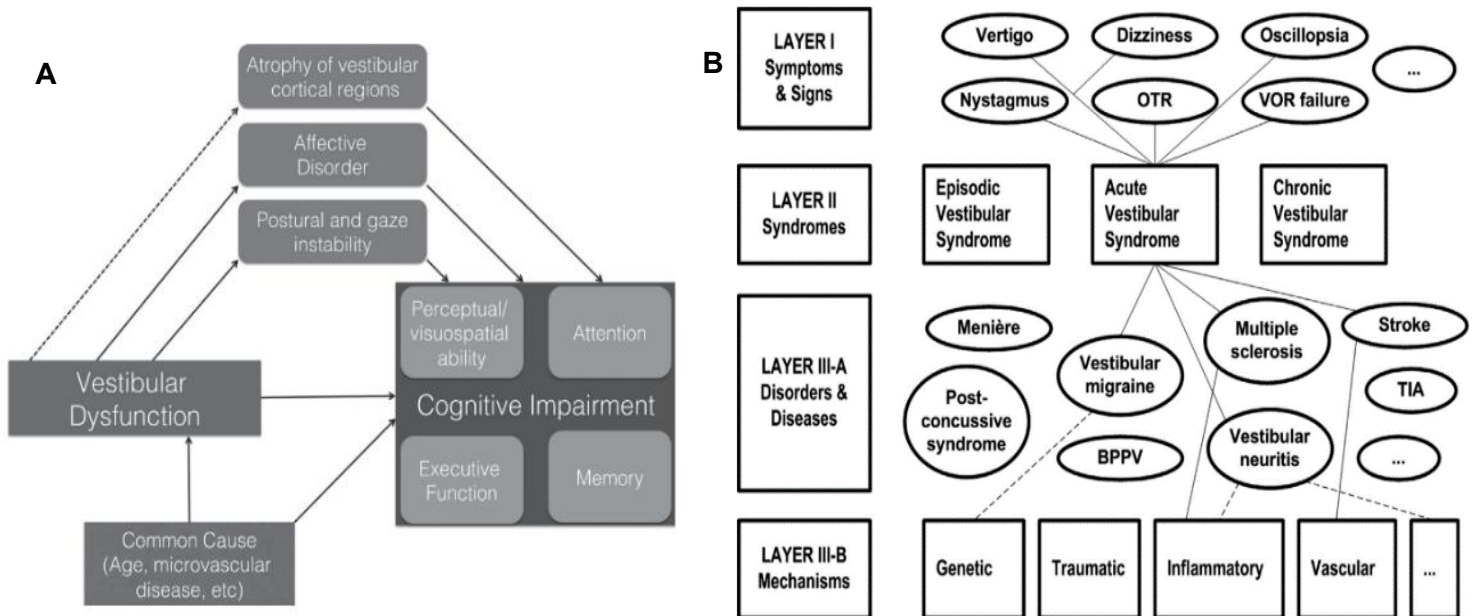


Figure 6. A) Illustration du modèle conceptuel proposant les mécanismes du dysfonctionnement cognitif provoqué par le système vestibulaire. Adaptée de « *Vestibular involvement in cognition: Visuospatial ability, attention, executive function, and memory* » de Biglow & Agrawal (2015). *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25, 73-89. **B) Schéma conceptuel des niveaux sémiologique, syndromique, étiologique et physiopathologique de la Classification Internationale des Désordres Vestibulaires.** Adapté de Bisdorff et al. (2015).

2.1. Présentation épidémiologique

Les pathologies vestibulaires se définissent par un dysfonctionnement du système vestibulaire périphérique ou central (Dieterich, 2007; Strupp & Brandt, 2013) et le nombre estimé de cas varie en fonction du profil étiologique (Gioacchini et al., 2014; Grill et al., 2018; Hülse et al., 2019; Lempert & Neuhauser, 2009; Neuhauser, 2016; Radtke et al., 2008; Saniasiaya et al., 2023). Il existe plusieurs formes étiologiques, dont les plus fréquentes sont : la maladie de Ménière (MD), le vertige positionnel paroxystique bénin (VPPB), la migraine vestibulaire (MV), la névrite vestibulaire (ou vestibulopathie unilatérale aiguë ; VPUA), le vestibulopathie bilatérale

(VPB), le mal des transports (MdT). D'après une revue systématique avec méta-analyse, la prévalence globale du dysfonctionnement vestibulaire est estimée à 30,4 % [95% CI 28,5–32,3 %] chez les enfants et les adolescents (Saniasiaya et al., 2023). Pour ceux souffrant de vertiges, d'étourdissements ou perte de la fonction vestibulaire, cette proportion était de 25,7% [95 % CI 23,7–27,8 %] comparé à 38,3 % [95 % CI 23,6–53,1 %] pour le mal des transports et à 33,5 % [95 % CI 0,0–70,4 %] pour les personnes avec un implant cochléaire. Au sein de la population pédiatrique, le vertige paroxystique bénin reste le plus fréquent (18,7 %), devant la migraine vestibulaire (17,6 %) et le traumatisme crânien (14 %) (Gioacchini et al., 2014). Chez l'adulte, une prévalence approximative de 6,5 (Hülse et al., 2019) à 6,7 % (Grill et al., 2018) des désordres périphériques est observée dans toutes les tranches d'âge, avec une progression liée au vieillissement. En Allemagne, le nombre estimé était de 458 cas de vertige positionnel paroxystique bénin pour 100 000 individus, de 205 cas de maladie de Ménière pour 100 000 individus et de 162 cas de névrite vestibulaire pour 100 000 individus. Les femmes âgées étaient les plus touchées ; par exemple, elles représentaient 66,7 % de l'échantillon dans l'étude épidémiologique de Hülse et collaborateurs (2019). Des résultats similaires ont été obtenus par une étude rétrospective des consultations oto-rhino-laryngologiques (ORL) réalisée en Espagne (Guerra-Jiménez et al., 2017). Les formes les plus diagnostiquées sont le vertige positionnel paroxystique bénin (28,2 %), la migraine vestibulaire (28,2 %) et la maladie de Ménière (13,8 %). D'après une revue systématique avec méta-analyse sur les patients présentant une atteinte unilatérale avec des symptômes chroniques, l'étiologie la plus fréquente était la maladie de Ménière (38 %) (Karabulut et al., 2023). Les pathologies centrales restent difficiles à diagnostiquer mais il a été constaté que 25 % des patients, dans un centre tertiaire, présentaient une étiologie centrale (Brandt & Dieterich, 2017).

2.2. Description sémiologique

D'après la Classification Internationale des Désordres Vestibulaires, il existe quatre symptômes principaux qui caractérisent un dysfonctionnement vestibulaire : une sensation vertigineuse interne et des étourdissements ainsi que des symptômes visuo-vestibulaires et des troubles de l'équilibre (A. Bisdorff et al., 2009; A. Bisdorff et al., 2015). Dans une étude menée par Paredis et al. (2021), une description par acronyme a été faite de la proportion de l'ensemble des symptômes rapportés chez des patients avec une atteinte unilatérale (VPU) ou bilatérale (VPB) évalués au centre médical de l'Université de Maastricht (Figure 7).

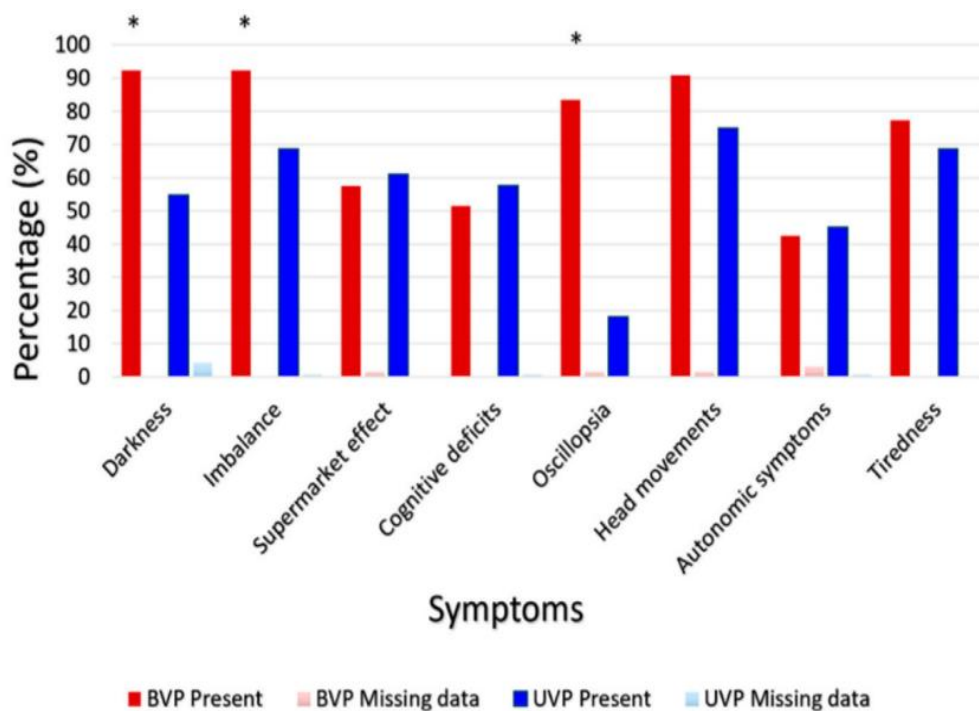


Figure 7. Proportion du spectre de symptômes rapportés par les patients vestibulaires. Sur l'axe des abscisses : DISCOHAT (Darkness, Imbalance, Supermarket effect, Cognitive deficits, Oscillopsia, Head movements, Autonomic symptoms, Tiredness). BVP : atteinte vestibulaire bilatérale ; UVP : atteinte vestibulaire unilatérale. Adapté de Paredis et al. (2020).

L'utilisation de l'acronyme DISCOHAT (*Darkness, Imbalance, Supermarket effect, Cognitive deficits, Oscillopsia, Head movements, Autonomic symptoms, Tiredness* ; en français *obscurité, troubles de l'équilibre, déficits cognitifs, oscillopsie, mouvement de la tête, symptômes autonomes, fatigue*) permet de recenser la présence d'un spectre de troubles observés dans les pathologies vestibulaires quelle que soit l'étiologie. Dans l'ensemble, la majorité des patients avait rapporté l'ensemble des symptômes recensés par le DISCOHAT. Ces observations sont corroborées par les résultats d'une revue systématique avec méta-analyse (Karabulut et al., 2023). En effet, des patients avec une atteinte unilatérale rapportent des symptômes chroniques (durée entre 3 mois à 42 ans), à savoir des étourdissements (98 %), des troubles de l'équilibre (81 %), des symptômes aggravés par un mouvement de la tête (75 %), des étourdissements visuellement induits (61 %), des symptômes aggravés dans l'obscurité (51 %) et une oscillopsie (22 %). Des vertiges récurrents, de la fatigue, des troubles cognitifs et des symptômes autonomes sont aussi rapportés par les patients dans respectivement 77 %, 68 %, 58 % et 46 % des cas.

La sensation vertigineuse interne peut-être déclenchée spontanément ou induite par un stimulus visuel ou auditif, avant ou pendant un mouvement de la tête, une manœuvre augmentant la pression intracrânienne ou de l'oreille interne, un mouvement du corps ou des facteurs

environnementaux. Les symptômes de vertige constituent un des motifs de consultation les plus fréquents en médecine (A. Bisdorff et al., 2013; Guerra-Jiménez et al., 2017; Toupet et al., 2002). Toupet et collaborateurs (2002) ont démontré une forte prévalence des vertiges en France, avec un nombre moyen de 4,9 consultations hebdomadaires, soit un patient consulté par jour ; une tendance plus élevée a été observée en milieu rural. De même, une étude épidémiologique menée par Bisdorff et collaborateurs (2013), a estimé que la prévalence des vertiges associés à une atteinte vestibulaire, dans le nord-est de la France, était de 48,3% au sein de la population générale. En Espagne, les vertiges et les étourdissements représentent les motifs de consultations les plus fréquents (respectivement, 31% et 40,2%). Les femmes et les personnes âgées sont majoritairement concernées par ces plaintes. En effet, il a été observé que les femmes rapportaient davantage de symptômes de vertige que les hommes (23,6 % contre 19,7 %, $p < 0,0001$; Hackenberg et al., 2023). De plus, un pic a été constaté vers la tranche d'âge 55-64 ans, avec 25% de vertiges rapportées au sein d'une population allemande.

Les vertiges sont souvent inclus dans la description de la littérature des étourdissements (Rosa et al., 2016; Yardley et al., 1998). Or, dans la classification internationale, les étourdissements caractérisent une sensation de désorientation spatiale, sans perception altérée du mouvement. Ils peuvent également être déclenchés de manière spontanée ou induite par les mêmes facteurs que les vertiges. En milieu urbain, Yardley et collaborateurs (1998) ont observé une prévalence notable et un effet handicapant de ces symptômes, qui sont récurrents, au sein d'une population active. Parmi les répondants, 23,3 % ont rapporté avoir eu des symptômes d'étourdissement au cours du mois précédent, perçus comme étant invalidants dans près de la moitié des cas. En ce qui concerne les personnes institutionnalisées, 48,9 % des personnes âgées ont indiqué avoir eu des symptômes d'étourdissements, parmi lesquels 87,5 % des individus ont signalé une activité physique restreinte associée (Rosa et al., 2016). Dans l'étude réalisée par Lindell et collaborateurs (2020), la majorité des personnes âgées vivaient à domicile et plus de la moitié de ces personnes âgées avaient rapporté des symptômes d'étourdissement (51 % de femmes et 58 % d'hommes). Ces symptômes étaient présents pendant plus de six mois chez la majorité de ces personnes (82 %). De plus, un lien entre les symptômes d'étourdissement et le risque de chute a été démontré chez les femmes âgées de 79 ans (95% CI 1,67–4,14, $p < 0,0001$) (Lindell et al., 2020). Le risque de chute était élevé (41%) chez les femmes présentant des symptômes d'étourdissement comparé à celles sans symptômes. Parmi les personnes ayant chutées plus de 3 fois au cours de l'année précédente, plus de 80 % souffraient d'étourdissements et de troubles d'équilibre.

Les troubles de l'équilibre correspondent à une instabilité survenant en position assise, debout ou pendant la marche d'après la définition issue de la classification internationale. Cette instabilité peut se présenter sous la forme d'une sensation propre sans ou avec latéro-, rétro- ou antéropulsion. L'étude réalisée par Voorhees (1990) a révélé que 45% des patients atteints d'une pathologie vestibulaire périphérique et 71 % des patients atteints d'une pathologie vestibulaire centrale de leur échantillon présentaient des troubles de l'équilibre. Une proportion élevée de troubles chroniques de l'équilibre a été observée, à savoir 81 % des patients avec une atteinte unilatérale (Karabulut et al., 2023). Ces patients présentent une instabilité accrue, une stratégie posturale modifiée et un rapport sensoriel anormal lorsqu'ils sont exposés à des conditions visuelles et proprioceptives contraignantes (Black et al., 1983, 1988; Black & Nashner, 1984; H. R. Hong et al., 2013; Horak et al., 1990; L. Nashner et al., 1982; Shim et al., 2018). L'instabilité démontre un déficit vestibulaire affectant le fonctionnement postural de l'individu avec plusieurs profils différents en fonction de la condition sensorielle. En effet, il a été observé que des patients présentaient une performance déficitaire pendant les conditions 5 (yeux fermés avec plateforme asservie) et 6 (support visuel asservi avec plateforme asservie) du Test d'Organisation Sensorielle (SOT), élément évocateur d'une incapacité à utiliser les informations vestibulaires lorsque les entrées visuelles et proprioceptives sont perturbées. Une revue systématique, menée par (Herrensens et al., 2020), a analysé les résultats regroupant les capacités posturales sans et avec perturbations proprioceptives, visuelles ou vestibulaires de 176 patients atteints de VPB (21 à 90 ans ; 82 hommes, 85 femmes), 196 patients atteints d'VPUA (20 à 92 ans ; 56 hommes, 72 femmes) et 205 sujets sains (18 à 87 ans ; 86 hommes et 112 femmes). L'analyse descriptive de ces études a montré que les patients VPB étaient plus instables que les sujets sains dans les conditions avec des perturbations proprioceptives ou visuelles. Des différences plus importantes ont été observées entre ces patients et ceux atteints de VPUA ainsi que les sujets sains lorsque plusieurs perturbations sensorielles étaient combinées. Plus spécifiquement, une instabilité posturale plus importante peut être observée chez des patients atteints de névrite vestibulaire comparé à ceux souffrant de migraine vestibulaire et de maladie de Ménière (H. R. Hong et al., 2013). De plus, les patients atteints d'une névrite vestibulaire présentaient un rapport vestibulaire plus élevé que les patients MD ainsi qu'un faible rapport somesthésique comparé aux patients avec une migraine vestibulaire.

Les patients atteints d'une pathologie vestibulaire sont plus susceptibles d'être victimes de chutes. En effet, une quasi-chute ou une chute peut aussi être un élément caractéristique des troubles de l'équilibre. Les patients présentant un bilan vestibulo-oculaire anormal (61 % [95 % CI 49,79-70,49 %]), un vertige positionnel paroxystique bénin (22 % [95 % CI 10,30-40,32 %]) ou une

atteinte centrale (11 % [95 % CI 2,24-37,76 %]) sont les patients les plus concernés (Donovan et al., 2023). Les scores du SOT des personnes âgées avec une atteinte vestibulaire ont également révélé un lien entre la présence d'un déficit vestibulaire et postural ainsi qu'un nombre de chutes élevés (Pedalini et al., 2009). Dans une étude réalisée par Ganança et al. (2006), 53,1 % de ces patients avaient signalé des chutes récurrentes. Il a été noté que le syndrome vertigineux était la cause la plus fréquente de chutes chez les patients atteints d'une pathologie vestibulaire. De plus, il existe une association significative entre la fréquence et la cause des chutes ($p < 0,001$). Ces auteurs ont observé une fréquence accrue de chutes provoquées par des symptômes d'étourdissement et de vertige chez des patients ayant chuté plus de deux fois ($p = 0,001$). De même, la restriction des activités quotidiennes était significativement plus importante chez les patients atteints d'une pathologie vestibulaire et ayant chuté plus de deux fois (78,6 %) par comparaison à ceux ayant chuté une seule fois (21,4 %). Des scores élevés aux questionnaires Dizziness Handicap Inventory (DHI) et Oscillopsia Severity Questionnaire peuvent être des éléments indicateurs chez des patients BVP (Dobbels et al., 2020).

Un dysfonctionnement vestibulaire peut altérer la conscience visuelle, ce qui pourrait expliquer les symptômes visuo-vestibulaires rapportés par des patients (Sharif et al., 2023). Ces symptômes décrivent une fausse sensation de mouvement propre ou de l'environnement visuel et une vision floue liée à un dysfonctionnement vestibulaire. Selon la classification, ces derniers peuvent être déclenchés par un vertige externe visuellement induit, une oscillopsie, un décalage ou une inclinaison de la scène visuelle et une acuité visuelle réduite pendant ou momentanément après un mouvement de la tête. Les difficultés rencontrées dans l'obscurité (*darkness*), dans un environnement visuel complexe (*supermarket effect*) et une oscillopsie (*oscillopsia*) correspondent aux facteurs décrits dans la définition des symptômes visuo-vestibulaires de la classification internationale. Une proportion élevée de ces symptômes a été observée chez les patients avec une atteinte bilatérale (approximativement 90%, 60% et 80% de cas rapportés respectivement dans l'obscurité, dans un environnement visuel complexe, pour l'oscillopsie) (Paredis et al., 2021). Des différences significatives ont été observées entre les proportions de patients rapportant des difficultés dans l'obscurité, des troubles de l'équilibre et de l'oscillopsie ; avec plus de symptômes observés pour une atteinte bilatérale.

Certains symptômes sont très peu explorés par les cliniciens tels que les déficits cognitifs et l'état psychologique. Pourtant, les patients vertigineux sont trois fois plus susceptibles d'avoir des antécédents psychiatriques (dépression, troubles d'anxiété généralisé et de panique) (Bigelow, Semenov, Du Lac, et al., 2015). Une triade de symptômes peut être observée chez des patients

atteints d'une pathologie périphérique chronique : troubles de l'équilibre, anxiété et désorientation spatiale (Elyoseph, Geisinger, Zaltzman, Hartman, et al., 2023). Cet impact psycho-cognitif est un élément à prendre en compte étant donné les répercussions sur la qualité de vie des patients.

2.3. D'autres dimensions sous-estimées : les troubles psychocognitifs

Le dysfonctionnement vestibulaire peut être caractérisé comme un syndrome multisensoriel avec des symptômes statiques et dynamiques (instabilité, vertige, oscillopsie, perceptions du mouvement anormales, etc.). Ce dysfonctionnement a un impact fonctionnel important sur le plan psychologique, cognitif et social aboutissant à des situations de handicap très variées. Dans les prochains paragraphes, nous illustrerons les conséquences psychosomatiques et cognitives d'un tel dysfonctionnement pour davantage illustrer la complexité du tableau clinique.

Symptômes d'ordre psychologique

L'expérience subjective des vertiges provoque chez les patients un stress considérable qui peut entraîner une détresse psychologique quel que soit le mécanisme physiopathologique d'une pathologie vestibulaire donnée (S. M. Hong et al., 2013). La prévalence de comorbidités psychiatriques secondaires est élevée dans la pathologie vestibulaire (Ketola et al., 2014 ; Lahmann et al., 2014). Dans une population de patients vertigineux recrutés dans un centre de traitement spécialisé (80,8 % des cas), Lahmann et al. (2014) ont observé que 42,5 % de ces patients présentaient une comorbidité psychiatrique. Une étude communautaire menée par Ketola et al. (2014) a également montré que 68 % des participants vertigineux présentaient des troubles psychiatriques, avec des symptômes dépressifs et anxieux dans respectivement 19 % et 12 % des cas. Bigelow et al. (2015) ont constaté que 62 % des patients souffrant de vertige avaient rapporté un syndrome dépressif. Un dysfonctionnement du réseau central peut provoquer une dérégulation de l'intégration émotionnelle. La détresse psychologique, qui s'ensuit, a été rapportée comme jouant un rôle important sur la prolongation du syndrome vertigineux. Par ailleurs, il a été noté que la dépression représentait le médiateur le plus important de la perception négative des symptômes et du handicap associé sur le long terme (Probst et al., 2017). Des études ont montré que plus les patients avaient vécu longtemps avec leur pathologie vestibulaire, plus ils rapportaient souffrir d'anxiété somatique, de handicaps spécifiques et de diminution du fonctionnement psychosocial (Mendel et al., 1999; Weidt et al., 2014). En effet, les troubles psychologiques peuvent entraver la récupération vestibulaire en prolongeant les symptômes (chronicisation) ainsi qu'en augmentant leur sévérité (Roh et al., 2018). Kammerlind et al. (2005) ont observé que les patients avec des symptômes chroniques présentaient une diminution

significative de leur qualité de vie liée à la santé et une augmentation significative des niveaux d'anxiété et de dépression par comparaison à des patients asymptomatiques. Dans une publication récente, Hilber et al. (2018) ont analysé le lien entre troubles psychologiques et vestibulaires sous un autre angle. En l'illustrant sous forme de modèles internes, ils ont suggéré qu'une altération du système sensoriel vestibulaire (modèle de représentation interne) entraînerait des réponses comportementales et viscérales inadaptées aux contraintes environnementales. En effet, une désorganisation de la représentation interne chez des patients vestibulaires est à l'origine de leur incapacité à anticiper les événements de leur environnement. Par conséquent, cette anticipation altérée provoque un stress physiologique chronique et un état d'anxiété élevé chez les patients. Cet état émotionnel négatif peut avoir un impact sur la qualité de vie. Ces observations sont corroborées par les résultats issus de l'étude de Jáuregui-Renaud et al. (2024). Ces résultats ont montré une corrélation entre l'anxiété spatiale et les items de l'échelle du handicap lié aux troubles de l'équilibre et aux vertiges (version anglaise, Dizziness Handicap Inventory).

Un dysfonctionnement vestibulaire pourrait donc induire des troubles du sommeil à travers l'activité des neurones orexinergiques (Besnard et al., 2018). Une détresse psychologique élevée et une faible qualité de vie liée à la santé sont associées à une insomnie et une fatigue chez des patients vertigineux chroniques. La comorbidité des troubles du sommeil et des vertiges chroniques chez les femmes était liée à l'intensité de la détresse et aux perturbations des activités de la vie quotidienne (Sugaya et al., 2017a). La présence de troubles du sommeil chez les patients vertigineux chroniques pourrait entraîner une spirale négative de symptômes en augmentant également la sévérité des vertiges. De plus, les troubles du sommeil chroniques pourraient empêcher le rétablissement en exacerbant les symptômes anxieux (Sugaya et al., 2017b). Une étude japonaise menée par Nakayama et al. (2010) a étudié plus précisément la qualité du sommeil en utilisant la polysomnographie chez des patients atteints de la maladie de Ménière. L'ensemble de leurs résultats indique une privation chronique de sommeil. En effet, ils ont observé une diminution du sommeil lent profond (stades 3 et 4) et l'augmentation de l'éveil chez ces patients vestibulaires. Une privation chronique de sommeil pourrait perturber la neuroplasticité favorisée par le sommeil. Cette perturbation altérerait la consolidation mnésique et entraverait la compensation vestibulaire. Ce lien entre dysfonctionnement vestibulaire et troubles du sommeil pourrait être davantage expliqué par les connexions neuroanatomiques.

L'expérience subjective des patients vertigineux pourrait notamment être influencée par des traits de personnalité. La personnalité prédisposerait certains patients à percevoir de manière

handicapante le syndrome vertigineux surtout après la chronicisation des symptômes (Chiarella et al., 2016; De Valck et al., 2007; Smith & Darlington, 2013; Staab et al., 2014). Chiarella et al. (2016) ont démontré que des traits de personnalité liés à l'anxiété, le neuroticisme particulièrement, pouvaient jouer un rôle amplificateur sur les mécanismes étiopathogénétiques liés à l'apparition des vertiges chroniques. La conséquence fonctionnelle de cette amplification serait une restriction délibérée des mouvements et une limitation des activités sociales, professionnelles et familiales par les patients pour éviter une crise vertigineuse et l'embarras associé. Staab et al. (2014) confirment que la personnalité de type « introverti-anxieux » peut constituer un facteur de risque de l'apparition de ces conséquences fonctionnelles. Récemment, une personnalité de type D ou « en détresse » a été conceptualisée comme un marqueur de détresse émotionnelle générale. Ce type de personnalité se traduit par une affectivité négative et une inhibition sociale importantes, ce qui signifie que les individus ont tendance à éprouver des émotions négatives (irritabilité, anxiété, dépression) et à éviter les interactions sociales (moins de liens personnels). De Valck et al. (2007) ont étudié l'influence de la personnalité dite type D sur la perception du handicap chez des patients vertigineux. Les résultats ont montré que les patients vertigineux avec un degré élevé d'affectivité négative ont tendance à être centrés sur eux-mêmes et à rechercher des sensations somatiques. A cause de leur tendance à éprouver des sentiments négatifs, ces patients se sentent plus handicapés par leur pathologie vestibulaire. De même, ces patients peuvent craindre un rejet ou une réaction négative de leur médecin et ainsi retarder le recours à l'aide médicale. Cette relation entre la personnalité de type D et le handicap perçu est plus prononcée sur les aspects émotionnels et fonctionnels des symptômes du vertige. De plus, un syndrome vestibulaire peut s'accompagner de troubles de la personnalité tels que la dépersonnalisation et la déréalisation (Smith & Darlington, 2013). Lors de l'interrogatoire médical, des sensations de détachement de la réalité, liées à la désorientation spatiale et aux troubles psychologiques, sont rapportées par les patients. Ces symptômes peuvent persister lors d'une mauvaise récupération vestibulaire. Gómez-Alvarez & Jáuregui-Renaud (2011) ont montré que la désorientation spatiale était associée à des symptômes de dépersonnalisation/déréalisation chez des patients atteints d'une lésion vestibulaire unilatérale. La désorientation spatiale et l'anxiété semblent jouer un rôle médiateur dans l'apparition de la dépersonnalisation et la déréalisation chez des patients BVP (Elyoseph, Geisinger, Zaltzman, Gordon, et al., 2023). Ces données montrent l'impact du déficit vestibulaire sur des mécanismes multisensoriels impliqués dans la perception du soi et la perception de soi dans son environnement.

Symptômes d'ordre cognitif

Un dysfonctionnement vestibulaire chez l'adulte peut retentir à différents niveaux corticaux. Une des zones les plus étudiées est l'hippocampe ; l'altération du réseau hippocampo-vestibulaire est à l'origine de déficits de navigation, d'orientation et de mémoire spatiale (Brandt et al., 2005; Smith, Zheng, et al., 2005). En effet, les résultats des études sur des modèles animaux ont corroboré que les signaux vestibulaires modulaient les représentations spatiales hippocampiques (Besnard et al., 2011; Russell et al., 2003; Smith, Horii, et al., 2005; Stackman et al., 2002). Une inhibition temporaire de l'activité neuronale, par injection bilatérale de tétrodoxtine au niveau de l'appareil périphérique vestibulaire de rats Long-Evans, diminue la cohérence spatiale et le contenu des informations des cellules de lieu ($p < 0.01$) et entraîne une perturbation des cellules de grille situées dans l'hippocampe (Stackman et al., 2002). Des difficultés de mémoire de référence et de travail sont observées à la suite d'une labyrinthectomie unilatérale chez des rats Sprague Dawley (Besnard et al., 2011). Une lésion vestibulaire permanente, après labyrinthectomie bilatérale, provoque un dysfonctionnement hippocampique avec modification de la décharge neuronale complexe et non-complexe dans la région CA1 (Russell et al., 2003). Cette modification se traduit par une baisse significative du ratio moyen infield/outfield, du contenu des informations et de la cohérence spatiale des neurones complexes ainsi qu'une augmentation de la décharge moyenne et la taille du champ neuronal chez les animaux lésés comparé aux animaux contrôles. Des effets du temps et de groupe ont également été observés en condition normale et dans l'obscurité ; indiquant une persistance des déficits mnésiques pour le groupe lésé et une incapacité à utiliser d'autres signaux non-vestibulaires pour la représentation spatiale. Ces résultats sont corroborés par Baek et al. (2010) qui ont montré que les déficits de mémoire pouvaient persister jusqu'à 14 mois après une lésion bilatérale et s'aggraver avec le temps chez le rongeur.

Le dysfonctionnement vestibulaire est à l'origine d'une altération des fonctions attentionnelles, visuo-spatiales et mnésiques qui ont un impact négatif sur la qualité de vie liée à la santé. Les patients vertigineux sont quatre fois plus susceptibles de limiter leurs activités quotidiennes à cause de difficultés de concentration et de mémorisation (Bigelow, Semenov, Du Lac, et al., 2015). Le degré de difficulté signalée en réponse à un questionnaire pour les plaintes cognitives associées au vertige est illustré par l'étude de Liu et al. (2019). Ces auteurs ont comparé 13 patients VPPB, 11 patients MD et 20 patients MV pour l'inventaire neuropsychologique du vertige (ou Neuropsychological Vertigo Inventory ; NVI). Les patients atteints de MV différaient des patients VPPB pour les items attentionnels (VPPB : $7,3 \pm 2,9$ vs. VM : $11,2 \pm 4,6$) et émotionnels

(VPPB : $8,2 \pm 3,5$ vs. VM : $11,5 \pm 3,9$) ainsi que le score total (VPPB : $51,0 \pm 17,7$ vs. MV : $67,5 \pm 16,8$). Les patients MD (VPPB : $8,0 \pm 3,8$ vs. MD : $12,5 \pm 3,5$) avaient un score à l'item moteur supérieur aux patients VPPB. Ces résultats démontrent que le degré de difficulté cognitive perçue était plus élevé chez les patients MV et MD, respectivement pour l'attention et l'émotion ainsi que pour la motricité.

Il existe peu d'études chez l'enfant, particulièrement en raison de la complexité de l'examen clinique et du diagnostic différentiel (Worden & Blevins, 2007). Dans une publication de Wiener-Vacher et al. (2013), il a été suggéré qu'une absence de stimulations vestibulaires au cours de l'enfance pourrait réduire les performances cognitives dans plusieurs domaines, altérant notamment les représentations spatiales. La littérature a largement montré une altération des fonctions cognitives spatiales et non spatiales chez le rongeur et l'adulte (voir par exemple des revues Chari et al., 2022; Dobbels, Peetermans, et al., 2019; Smith, Zheng, et al., 2005). Dans une étude de navigation spatiale, les capacités à adopter une stratégie allocentrée ou égocentrée de 23 patients VPB et 23 patients VPU ont été comparées à celles de 23 sujets sains pour une tâche visuo-spatiale virtuelle (Gammeri et al., 2022). Les résultats soulignent une incapacité à adopter une stratégie spatiale adéquate chez les patients VPB et VPU. Par ailleurs, il a également été démontré que la probabilité d'utiliser une stratégie allocentrée était réduite chez les patients VPB alors que les patients VPU avaient moins recours à une stratégie égocentrée pour s'orienter dans l'environnement virtuel. De plus, la perception de la verticalité, souvent évaluée par la tâche de Verticale Visuelle Subjective (VVS) ou le Rod Frame Test (RFT), est altérée dans les désordres vestibulaires. Une revue systématique avec méta-analyse a comparé la verticale visuelle de 3524 patients avec une atteinte périphérique (Obrero-Gaitán et al., 2021). Les auteurs ont observé que ces patients présentent une déviation de la verticale plus importante pour la tâche VVS (SMD = 1,510 [95 % CI 1,190-1,830] ; $p < 0,001$) et le RFT (SMD = 0,816 ; 95% CI 0,234-1,398 ; $p = 0,006$). En effet, des déficits de mémoire et navigation spatiale, des capacités visuospatiales, de l'attention et des fonctions exécutives ont été observés chez des patients atteints de vestibulopathie bilatérale. Ces patients présenteraient une atrophie hippocampique, à l'origine de déficits de l'apprentissage et de la mémorisation de tâches spatiales. Il a été observé que les patients VPB avaient obtenu des scores totaux inférieurs par comparaison à des sujets sains ainsi qu'aux sous-items du RBANS-H (Repeatable Battery for the Assessment of Neuropsychological Status for Hearing Impaired Individuals) évaluant la mémoire immédiate, l'attention et les capacités visuospatiales (Bosmans et al., 2022; Dobbels, Mertens, et al., 2019). Comparés aux sujets sains, les patients VPB différaient significativement des sujets sains pour l'alerte (ou rapidité attentionnelle), l'attention sélective, les fonctions exécutives (ou contrôle inhibiteur), la mémoire à

court-terme et la vitesse de traitement visuel, évaluées respectivement par les tâches d'alerte et de balayage visuel de la batterie informatisée Test of Attentional Performance (TAP), le Test du Stroop et le Theory of Visual Attention (TVA) (Popp et al., 2017). De même, les patients VPB étaient significativement plus déficitaires que les patients atteints de lésions unilatérales pour l'alerte et les fonctions exécutives. Selon l'étude de Schöne et al. (2024), les fonctions exécutives déficitaires concernant les patients VPB sont l'initiation verbale et la mémoire de travail uniquement lorsqu'ils sont comparés à des sujets sains, car la performance des patients VPUA et avec une atteinte chronique unilatérale est comparable à celle de sujets sains. D'autres dimensions cognitives déficitaires ont également été observées, telles que la transformation mentale visuo-spatiale de son propre corps (perception de soi) et la capacité à changer de perspectives (perception d'autrui) (Deroualle et al., 2019). Dans le cadre d'une étude sur l'interférence cognitivo-motrice, Danneels et al. (2023) ont étudié la mémoire visuospatiale, la rotation mentale, l'inhibition visuelle et auditive, la mémoire de travail visuelle et auditive et la vitesse de traitement de l'information chez des patients VPB dans le cadre d'une tâche simple (en position assise) et d'une double-tâche motrice statique et dynamique (en position debout sur sol instable ou en marchant). Ces auteurs ont démontré une performance déficitaire pour la rotation mentale et la mémoire de travail pendant la tâche simple et pour la rotation mentale et l'inhibition visuelle pendant la double-tâche. Ces résultats ont aussi révélé une interférence cognitivo-motrice importante chez les patients VPB. De plus, Popp et al. (2017) ont souligné que les déficits cognitifs étaient corrélés au degré et la durée du dysfonctionnement vestibulaire. Par ailleurs, les domaines cognitifs altérés varient en fonction du type d'atteinte sacculaire ou canalaire ; par exemple, Pineault et al., 2020) ont montré une association entre atteinte sacculaire et déficits cognitifs (de l'attention, de la vitesse de traitement, de balayage visuel, des fonctions exécutives, de la mémoire non verbale et des capacités visuo-constructives) alors qu'une atteinte canalaire était associée à une performance déficitaire de la mémoire non verbale et des capacités visuo-constructives.

2.4. Altérations liées à l'âge

Une détérioration des systèmes sensoriels est observée avec l'âge, qui se traduit par un déclin des capacités cognitives et motrices. Un vieillissement du système vestibulaire va favoriser et/ou accentuer l'apparition des symptômes précédemment décrits : vertiges et étourdissements, déséquilibre statique et dynamique, troubles visuo-vestibulaires et psychocognitifs. D'après les données de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques)⁹, la population

⁹ Bilan démographique 2023. INSEE Première N°1978. Publié le 16 janvier 2024.
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7750004>

gériatrique continue d'augmenter, avec désormais 21,5 % des habitants âgés de 65 ans ou plus. D'ailleurs, une personne sur dix (10,4 %) a plus de 75 ans en France. De plus, l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé)¹⁰ souligne que les chutes représentent la deuxième cause mondiale de décès accidentel, avec les personnes âgées de plus de 65 ans enregistrant le plus grand nombre de chutes mortelles. En raison d'une atteinte vestibulaire, la fragilité de la population gériatrique est davantage associée à un risque de chute plus élevé. Il a été observé que l'âge moyen des personnes souffrant de vertiges et déséquilibre était respectivement environ 50 ans et 61 ans (Toupet et al., 2002). Sur 2 279 individus interrogés, dont l'âge moyen était de 60,8 ans (51,6 % de femmes), 32,1 % des personnes âgées de plus de 79 ans avaient signalé une vestibulopathie unilatérale ou bilatérale (Grill et al., 2018). Hülse et collaborateurs (2019) ont souligné que les vestibulopathies étaient généralement diagnostiquées à partir de 70 ans (par exemple : 70-84 ans pour le VPPB, 75-79 ans pour la VPUA, 80-89 ans pour la MD).

Nous nous intéresserons davantage aux altérations induites par le vieillissement du système vestibulaire. Il a été estimé que sa prévalence générale était de 35,4 % chez des personnes âgées de plus de 40 ans (Madrigal et al., 2023). Ces altérations peuvent être observées à plusieurs niveaux, des cellules ciliées aux réponses comportementales. Prenons le cas des rongeurs, Paplou et al. (2023) ont montré que ce vieillissement entraînait des modifications fonctionnelles, morphologiques et moléculaires chez la souris. Une comparaison fonctionnelle de l'utricule a révélé une amplitude réduite (jeunes : $0,76 \pm 0,069 \mu V$ vs. âgées : $0,56 \pm 0,045 \mu V$) et une latence accrue (jeunes : $1,1 \pm 0,11$ ms vs. âgées : $1,4 \pm 0,03$ ms) de l'onde I chez des souris âgées de 24 mois comparées aux souris âgées de 1 mois et demi. De même, une diminution de la densité (jeunes : $12 \pm 0,5$ cellules ciliées vs. âgées : $9,7 \pm 0,4$ cellules ciliées) et du nombre de cellules ciliées de type I en contact avec des terminaisons provenant des afférences dysmorphes (jeunes : $6,4 \pm 0,8$ cellules ciliées vs. âgées : $4,3 \pm 0,4$ cellules ciliées). Sur le plan moléculaire, une expression génique liée aux mécanismes immunitaires était régulée, de manière plus importante, chez les souris âgées. Chez l'homme, une réduction constante et progressive du nombre de cellules a aussi été observée au sein des structures vestibulaires tout au long de la vie (Rauch et al., 2001). Ces modifications peuvent provoquer des altérations au niveau oculomoteur (Agrawal et al., 2012; Baloh et al., 2001; Furman & Redfern, 2001), postural (Baloh et al., 2003; Gabriel et al., 2022; Layman et al., 2015) et/ou spatial chez le sujet âgé. En outre, les manifestations cliniques et otopathologiques rendent le diagnostic des troubles plus difficile au

¹⁰ Chutes - Organisation Mondiale de la Santé. Publié le 26 avril 2021. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/falls>

sein de cette population (Madrigal et al., 2023). Dans une étude longitudinale, Baloh et al. (2001) ont étudié l'effet de l'âge sur le réflexe vestibulo-oculaire et les réponses visuo-vestibulaires chez des sujets sains. Ces auteurs ont observé des changements du VOR dépendant de la fréquence pour le gain et la constante de temps ainsi que des réponses optocinétiques et visuo-vestibulaires détériorées sur une période de 5 ans. Le gain du VOR avait davantage baissé pour des fréquences de rotation de 0,05 et 0,20 Hz au sein de cette même population sur une période plus longue de 8-10 ans (Baloh et al., 2003). Des modifications posturales peuvent être constatées avec l'âge ; par exemple, Baloh et collaborateurs (2003) ont observé un nombre de chutes significativement élevé ainsi qu'une instabilité statique et dynamique accrue (sur 10 ans, changement normalisé par année : $0,50 \pm 0,40$ pour le score Tinetti, de $-0,12 \pm 0,10$ pour la marche, de $-0,08 \pm 0,25$ pour le nombre de chutes). Ce déclin postural pourrait être expliqué par des modifications du seuil perceptif vestibulaire avec le vieillissement (Gabriel et al., 2022; Rey et al., 2016). Dans une étude de Gabriel et al. (2022), des sujets jeunes et âgés ont réalisé un test d'équilibre statique et des tâches de détection et de discrimination pour des translations linéaires selon l'axe Z et des rotations selon l'axe de tangage. Ces auteurs ont révélé que, comparés aux sujets jeunes, les sujets âgés présentaient une augmentation du seuil de détection des translations linéaires (sujets âgés : $0,022 \text{ m/s}^2 \pm 0,051$ vs. sujets jeunes : $0,002 \text{ m/s}^2 \pm 0,002$, $p = 0,007$) et des rotations (sujets âgés : $0,329 \text{ }^\circ/\text{s}^2 \pm 0,355$ vs. sujets jeunes : $0,024 \text{ }^\circ/\text{s}^2 \pm 0,032$, $p < 0,001$) qui était associée à une oscillation posturale plus importante (par exemple, $r = 0,60$ pour corrélation entre translation linéaire et déplacement du centre de pression en condition yeux ouverts et plateforme stable). De plus, la posturographie dynamique informatisée a été utilisée pour souligner l'effet du vieillissement vestibulaire sur l'équilibration (Pedalini et al., 2009). En effet, ces auteurs ont démontré une progression de l'instabilité, traduite par une baisse des scores composites au SOT, liée à l'âge. Les personnes saines et âgées de plus de 65 ans présentaient plus de difficultés que les personnes jeunes âgées entre 20 et 56 ans, malgré le fait que leurs scores demeuraient supérieurs à ceux des personnes âgées de plus de 65 ans avec une pathologie vestibulaire. De même, H. Cohen et al. (1996) ont démontré une influence de l'âge sur les scores du SOT. Ils ont réalisé une étude sur le contrôle postural dynamique chez des personnes saines âgées de 18 à 89 ans. Les participants étaient répartis en quatre groupes : 18 - 44 ans, 45 - 69 ans, 70 - 79 ans et 80 à 89 ans. Les résultats ont révélé un effet significatif de l'âge sur le score d'équilibre (ES), le nombre de chutes et la stratégie adoptée. Ces données ont démontré que l'équilibre devenait moins stable, que le nombre de chutes augmentait et que la stratégie changeait avec le vieillissement normal. Ces changements semblaient débiter vers un

âge moyen (entre 45 et 69 ans) et devenaient plus prononcés au cours du vieillissement mais n'étaient pas uniformes.

Il est aussi important de noter que le vieillissement vestibulaire était associé à une cognition spatiale altérée (Bigelow, Semenov, Trevino, et al., 2015; Semenov et al., 2016). Dans une étude portant sur 183 sujets âgés entre 26 et 91 ans, Bigelow et collaborateurs (2015) ont observé qu'une association entre une performance visuo-spatiale déficitaire et une fonction vestibulaire perturbée avec l'âge. Ces résultats sont retrouvés dans l'étude de Zhang et al. (2022) qui ont comparé 43 patients vestibulaires âgés et 115 sujets sains ($n = 32$ âgés, 38 âge moyen, 45 jeunes). Les patients se différenciaient des sujets sains appariés pour l'attention visuo-spatiale et la mémoire de travail (séquence directe réduite $p < 0,001$) ainsi que pour la navigation spatiale et les fonctions exécutives (plus de temps passé dans les labyrinthes de niveaux facile $p = 0,009$ et difficile $p = 0,032$). De même, Xie et al. (2017) ont observé des capacités de navigation spatiale déficitaires chez des patients comparés à des sujets sains âgés et jeunes. Ces auteurs ont montré que les patients présentaient une distance et un angle de déviation supérieurs à ceux des sujets sains pour une tâche de complétion de triangle (triangle completion task ; TCT). Une association a été démontrée entre l'atteinte sacculaire et une navigation spatiale altérée ; par exemple dans l'étude de Anson et al. (2019), des patients avec un potentiel myogénique évoqué vestibulaire cervical anormal présentaient une performance déficitaire au TCT. De plus, une relation entre le vieillissement vestibulaire et la mémoire topographique a été soulignée (Previc et al., 2014). Ces déficits de mémoire, d'orientation et de navigation spatiale peuvent être expliqués par des modifications corticales et sous-corticales liées au vieillissement vestibulaire (Jacob et al., 2020). Une diminution du volume de l'hippocampe et du cortex entorhinal associée à une fonction vestibulaire réduite a été démontrée chez des sujets sains âgés, avec des variations de la forme des structures hippocampique ($p = 0,0008$), de l'amygdale ($p = 0,01$), du thalamus ($p = 0,008$), du noyau caudé ($p = 0,002$), du putamen ($p = 0,02$) et du complexe cortex entorhinal-trans-entorhinal ($p = 0,008$).

Ainsi, le vieillissement vestibulaire engendre des altérations au niveau périphérique et central. Ces altérations entraînent des changements oculomoteurs, posturaux et cognitifs qui rendent plus difficile la prise en charge du patient âgé. Ces conséquences sont accentuées par la présence de vestibulopathies. Les données épidémiologique et sémiologique des vestibulopathies dressent un panorama empiriquement informé sur leurs conséquences socio-psycho-économiques. Les étiologies vestibulaires sont nombreuses et présentent des critères de diagnostic différents. Il semble pertinent de distinguer les plus fréquentes vestibulopathies, d'après les données

épidémiologiques précédemment présentées. Nous présenterons succinctement leurs critères de diagnostic dans les prochains paragraphes.

3. Critères de diagnostic des vestibulopathies fréquentes

Le dysfonctionnement vestibulaire peut être caractérisé comme un syndrome multisensoriel avec des symptômes statiques et dynamiques posturo-moteurs et psychocognitifs liés aux projections vestibulaires à tous les niveaux cérébraux. Comme évoqué précédemment, ce dysfonctionnement se traduit par un spectre de symptômes, avec des profils étiologiques variés. Parmi les formes les plus fréquentes, nous retrouvons le vertige positionnel paroxystique bénin (Von Brevern et al., 2015), la migraine vestibulaire (Lempert et al., 2022), la maladie de Ménière (Lopez-Escamez et al., 2015), la névrite vestibulaire (Strupp et al., 2022) et la vestibulopathie bilatérale (Strupp et al., 2017). Il existe d'autres syndromes chroniques fréquents, le mal des transports et les étourdissements posturaux perceptifs persistants, qui sont caractérisés par des incapacités plus ou moins sévères selon les individus. Les critères de diagnostic de ces désordres vestibulaires ont été présentés dans la Classification Internationale des Désordres Vestibulaires établie par la Société de Bárány¹¹.

3.1. Le vertige positionnel paroxystique bénin

Le vertige positionnel paroxystique bénin est le trouble vestibulaire le plus fréquent dont la cause serait une migration des otoconies de la macule otolitique vers l'un ou plusieurs canaux semi-circulaires, autrement dit canalolithiase. Le diagnostic consiste à réaliser une série de mouvements de la tête (ou manœuvres) pour cibler le canal semi-circulaire impliqué et procéder au repositionnement des cristaux. Une canalolithiase postérieure est caractérisée par des crises vertigineuses ou des étourdissements positionnels récurrents en position couchée avec ou sans mouvements, qui peuvent durer moins d'une minute. Un nystagmus positionnel, de direction vertico-rotatoire vers le haut, apparaît avec une latence de moins d'1 minute et provoqué par la manœuvre de Dix et Hallpike ou Semont. Une canalolithiase horizontale est caractérisée par les mêmes symptômes mais ce dernier est plutôt associé à un nystagmus positionnel avec ou sans une latence brève et de direction horizontale lors d'une rotation de la tête en position couchée. Ce type de nystagmus est provoqué par le test positionnel rotatoire couché. Les symptômes de chaque canalolithiase ne doivent pas être évocateurs d'un autre trouble vestibulaire.

¹¹Barany Society - The International Society for Neuro-otology. <https://www.thebaranysociety.org/icvd-consensus-documents/>

3.2. La migraine vestibulaire

La migraine vestibulaire est également un désordre vestibulaire fréquent qui peut être chronique. Elle est catégorisée par deux formes cliniques : la migraine vestibulaire et la forme probable. La migraine vestibulaire est caractérisée par au moins cinq crises épisodiques d'intensité modérée ou sévère, d'une durée de 5 minutes à 72 heures, des antécédents de migraine avec ou sans aura, d'après la classification internationale des céphalées. Elle est aussi associée à une ou plusieurs caractéristiques suivantes avec au moins 50% de symptômes vestibulaires : céphalées au niveau unilatéral avec une sensation pulsatile, d'intensité modérée ou sévère et aggravées par les activités physiques habituelles. Ces symptômes ne doivent pas être évocateurs d'un autre trouble vestibulaire. Pour la forme probable, les antécédents de migraine ou la présence des caractéristiques migraineuses doivent être observés.

3.3. La maladie de Ménière

La maladie de Ménière est un trouble multifactoriel associé à une perte d'audition neurosensorielle progressive, un acouphène et des crises vertigineuses spontanées. La sévérité des symptômes varie considérablement et certains patients sont atteints de comorbidités (VPPB ou MV), rendant difficile le diagnostic. Il s'agit d'un désordre vestibulaire chronique et progressif dont les causes demeurent encore inconnues. Il existe une forme définitive et une forme probable, dont le diagnostic différentiel est basé sur une observation clinique. D'une part, la forme définitive est caractérisée par au moins deux épisodes spontanés de vertige qui peuvent durer entre vingt minutes et douze heures, un bilan audiométrique avec une perte d'audition à faible ou moyenne fréquence au niveau d'une oreille, des complications sonores variables (audition, acouphènes ou sensation d'oreille bouchée ou cotonneuse). Ces symptômes ne doivent pas être évocateurs d'un autre trouble vestibulaire. D'autre part, la forme probable est caractérisée par les mêmes symptômes sauf la perte auditive évaluée par le bilan audiométrique.

3.4. La névrite vestibulaire

La névrite vestibulaire est un trouble périphérique unilatéral aigu causé par une atteinte du nerf vestibulaire. Il existe plusieurs catégories cliniques : aiguë, évolutive, probable ou historique. La forme aiguë est fréquente et caractérisée par des crises vertigineuses rotatoires ou non-rotatoires aiguës d'intensité modérée ou sévère pouvant durer au moins 24 heures, associées à un nystagmus spontané et accentué par une privation de fixation visuelle. De plus, un VOR réduit est observé du côté contralatéral de la phase rapide du nystagmus. Ces symptômes ne doivent pas

décrire une atteinte centrale (oculo-moteur ou vestibulaire) ou des signes audiolgiques aigus (acouphène, perte auditive). Ces symptômes ne doivent pas être évocateurs d'un autre trouble.

3.5. La vestibulopathie bilatérale

La vestibulopathie bilatérale est un syndrome chronique causé par une atteinte au niveau des deux oreilles internes. Elle est caractérisée par un déséquilibre pendant la marche ou en position debout, associé à une vision floue induite par un mouvement ou oscillopsie pendant un mouvement du corps et/ou de la tête ou même une instabilité accrue dans l'obscurité ou sur un sol instable. Aucun symptôme n'apparaît lorsque les patients sont assis ou en position couchée dans des conditions statiques. Ce syndrome est aussi caractérisé par une VOR angulaire bilatéral réduit ou absent, démontré par un gain VOR bilatéral horizontal angulaire < 0.6 , une réponse calorique réduite et/ou un gain VOR ≤ 0.1 sur la chaise rotatoire. Il existe aussi une forme probable qui est caractérisée par les mêmes symptômes sauf un VOR réduit ou absent. Dans cette forme, une fonction vestibulaire canalaire anormale doit être observée pour le Head Impulse test.

3.6. Cas particuliers : le mal des transports et les étourdissements posturaux perceptifs persistants

Le mal des transports

Le mal des transports (ou cinétose) fait référence à une sensation de malaise qui survient lorsque les informations sensorielles, intégrées au niveau central, sont discordantes au cours de mouvements réels ou virtuels (Cha et al., 2021). On parle de mal des transports (ou motion sickness ; MS) lorsque le facteur provocateur est un mouvement physique. Il s'agit d'un mal des transports visuellement induit (ou visually induced motion sickness ; VIMS) quand le mouvement est visuel. Ces derniers sont caractérisés par au moins un des symptômes suivants, perçus pendant le mouvement et s'aggravant avec une exposition prolongée : nausées et/ou problèmes gastro-intestinaux, thermorégulation perturbée, vertiges et/ou étourdissements, maux de tête et/ou fatigue oculaire. Il s'agit d'un désordre si les symptômes persistent dans le temps, à savoir 5 épisodes sont déclarés pour les mêmes facteurs provocateurs, et que des signes psychologiques ou comportementaux (restriction des activités quotidiennes, comportement d'évitement, émotions aversives d'anticipation) sont associés. Ukaegbu (2014) distingue trois types d'environnement provocateurs : (1) un environnement en mouvement mais visuellement stable, (2) un environnement visuellement immobile mais physiquement stable et (3) un environnement provoquant une discordance entre les informations perçues. Dans le cas (1), le mouvement est détecté et ressenti par les systèmes vestibulaire et proprioceptif mais ce dernier

n'est pas détecté par le système visuel. Dans le cas (2), le mouvement est visuellement détecté mais les systèmes vestibulaire et proprioceptif ne perçoivent pas cette information. Dans le cas (3), les systèmes sensoriels enregistrent des informations sur le mouvement mais ces informations sont discordantes. Il a été noté que la sensibilité apparaît généralement vers 6 ou 7 ans et celle-ci diminue avec le vieillissement.

Au cours des décennies, de nombreux chercheurs se sont concentrés sur la susceptibilité des individus et la sévérité des symptômes. Quelques théories ont été élaborées pour mieux élucider ce trouble dont la prévalence est élevée. Un sondage dans un échantillon de 3256 voyageurs, réalisé par Turner & Griffin (1999) a révélé qu'un passager sur quatre était sujet au mal des transports. Sharma (1997) a également observé que 54 % de personnes, dans un échantillon de 535 individus, étaient susceptibles au mal des transports. Il existe des grandes différences individuelles de sensibilité au mal des transports, liées au sexe, à l'âge et à la personnalité (Denise et al., 2013; Golding, 2006b, 2006a). Il existe trois théories expliquant la susceptibilité au mal des transports : la théorie du conflit sensoriel (Reason, 1978), la théorie de l'évolution (Treisman, 1977) et la théorie de l'instabilité posturale (Riccio & Stoffregen, 1991). Reason et Brand (1975) ont suggéré que le mal des transports résulterait d'un conflit entre les entrées sensorielles, où les informations sur le mouvement enregistrées par les systèmes vestibulaire, visuel et proprioceptif ne concordent pas avec les informations anticipées par le système nerveux. Treisman en 1977 (Treisman, 1977) a adopté une approche évolutive des symptômes du mal des transports. Selon cette théorie, des perturbations du contrôle moteur ou des entrées sensorielles seraient produites par des toxines ingérées. Par conséquent, les humains ont développé les symptômes comme un système d'alerte précoce qui aiderait à se débarrasser des toxines ingérées. Riccio & Stoffregen (1991) ont émis l'hypothèse que le mal des transports pourrait également être causé par une instabilité posturale prolongée. En considérant l'interaction entre l'individu et son environnement, ils ont suggéré que l'adaptation de l'individu aux contraintes environnementales dépendait des changements dynamiques du contrôle postural. Pour que de tels changements soient détectés, ils doivent être correctement détectés et enregistrés par les systèmes perceptuels pour une intégration interne. De même, le rôle important du système vestibulaire, responsable du contrôle postural, a été mis en évidence dans la susceptibilité au mal des transports au travers de l'absence de trouble chez des personnes souffrant d'une atteinte bilatérale vestibulaire.

Les étourdissements posturaux perceptifs persistants

Un cas de syndrome multisensoriel chronique connu est le PPPD, les étourdissements posturaux-perceptifs persistants (ou en anglais, persistent postural-perceptual dizziness). D'après la classification internationale des désordres vestibulaires (Staab et al., 2017), le PPPD représente un trouble fonctionnel chronique qui est caractérisé par un ou plusieurs symptômes persistants d'étourdissements, d'instabilité ou de vertiges non rotatoires qui sont présents pendant au moins trois mois. Les symptômes peuvent être déclenchés sans un facteur provocateur mais des facteurs environnementaux ou psychologiques peuvent exacerber ces symptômes, tels des flux visuels complexes, la position debout et/ou des mouvements actifs ou passifs. D'autres conditions provoquant des vertiges, des troubles de l'équilibre, des étourdissements ou des problèmes neurologiques ou psychologiques peuvent être à l'origine de ce désordre. Ce syndrome vestibulaire peut s'accompagner de troubles de la personnalité tels que la dépersonnalisation et la déréalisation. Dans une revue systématique, Trinidad & Goebel (2018) ont souligné que la pathophysiologie du PPPD demeurerait inconnue mais une connaissance des facteurs prédictifs lors de l'examen clinique pourrait faciliter la prise en charge des patients. En effet, ce syndrome semble être déclenché par un mécanisme maladaptatif survenant à la suite de troubles vestibulaires aigus et/ou d'événements anxiogènes ou traumatiques. Les facteurs prédictifs les plus importants du PPPD étaient l'anxiété, le comportement inadapté à la suite d'une lésion vestibulaire, le trouble de la personnalité dépendante, la vigilance accrue face à des événements perturbateurs et la dépendance visuelle (Trinidad et al., 2023a). Il existerait plusieurs sous-types de PPPD : visuel, mouvement actif et mixte (mouvement passif-position debout) (Yagi et al., 2021). Ces auteurs ont interrogé 108 patients, en utilisant le questionnaire Niigata PPPD ; ceux du sous-type « mouvement actif » étaient plus âgés que ceux du sous-type « visuel ». Le facteur visuel était la principale caractéristique exacerbante chez les patients.

En général, le diagnostic du PPPD repose sur l'examen clinique du patient. Les critères de diagnostic ont été établis récemment à cause de la complexité du tableau clinique (Figure 8), expliquant le fait que les études épidémiologiques sur le PPPD soient peu nombreuses. Ce syndrome a souvent regroupé le vertige postural phobique (phobic postural vertigo), le vertige chronique subjectif (chronic subjective dizziness), le malaise lié au mouvement (space-motion discomfort) ou le vertige visuel (visual vertigo). Le PPPD peut être caractérisé comme un syndrome perceptuel avec une forte prévalence au sein de la population générale (Powell et al., 2020). Dans une étude sur les caractéristiques cliniques et neurophysiologiques du PPPD, Adamec et al. (2020) ont estimé une prévalence de 19 % dans une clinique spécialisée, avec majoritairement des patientes âgées d'une cinquantaine d'années. Des désordres périphériques

(VPUA et VPPB) étaient le facteur qui prédisposait le plus souvent au PPPD. Les patients présentaient majoritairement un bilan anormal pour les tests vestibulométriques : vidéo d'impulsion de la tête (video head-impulse test ; vHIT), potentiel myogénique évoqué vestibulaire (Vestibular-Evoked Myogenic Potential ; VEMP) et test calorique.

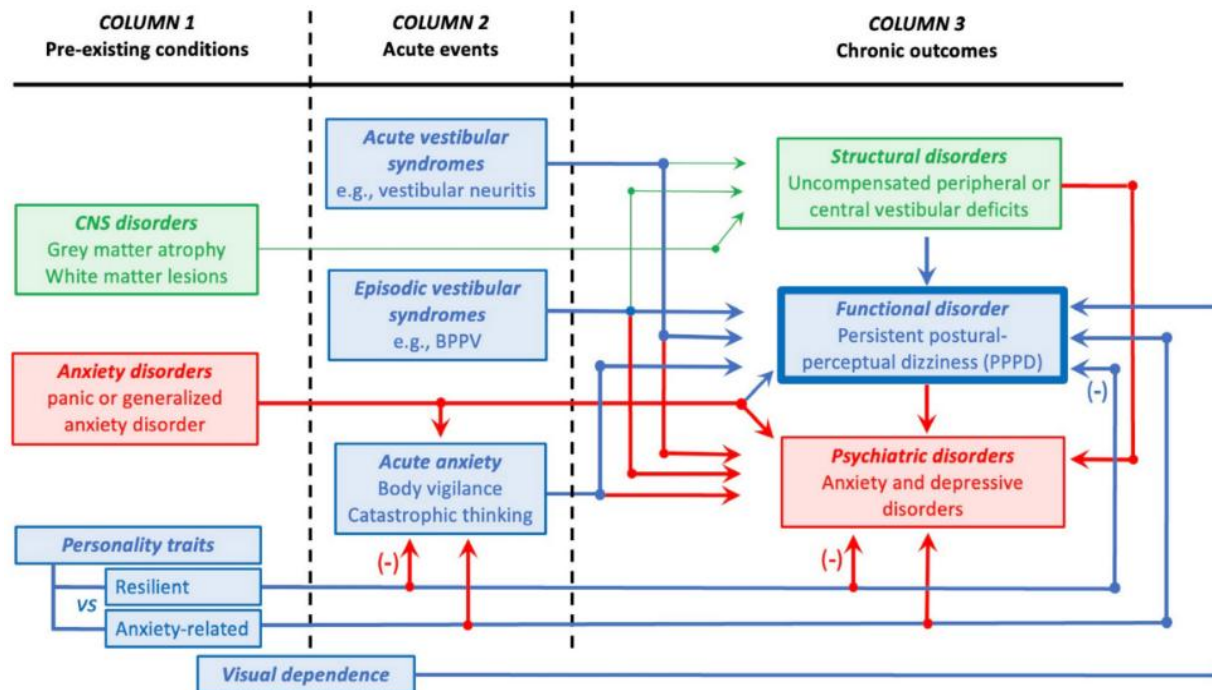


Figure 8. Liens schématiques entre les conditions préexistantes, les troubles aigus et les conséquences chroniques du PPPD. Adapté de Trinidad et al. (2023).

Les principaux symptômes du PPPD semblent provenir de modifications cérébrales et de stratégies comportementales inadaptées (Castro et al., 2022). En effet, les études de neuro-imagerie ont démontré des modifications fonctionnelles (par exemple, une réduction de la connectivité entre le cortex visuel, les régions frontales, l'hippocampe et les régions vestibulaires) et structurales (par exemple, une réduction du volume de matière grise au niveau de la jonction pariéto-temporale) cérébrales à plusieurs niveaux. Ces stratégies comportementales inadaptées se traduisent donc par un contrôle postural et une orientation spatiale déficitaires. Breinbauer et al. (2020) ont observé que les patients PPPD se différenciaient de sujets contrôles et de patients vestibulaires pour la navigation spatiale dans des conditions complexes. Les patients présentaient des stratégies chaotiques et désorganisées ; ils étaient plus dispersés dans la piscine de Morris (PPPD : 0,97 vs. patients vestibulaires : 0,46 vs. sujets sains : 0,20 pour l'écart de distance parcourue ; $p < 0,001$). De plus, un profil posturographique anormal a été observé chez des patients atteints de PPPD (Lubetzky et al., 2021; McCaslin et al., 2022; Sohsten et al., 2016). Des scores moyens inférieurs chez des patients PPPD comparé à des sujets sains ont été obtenus

pour le Test d'Organisation Sensorielle (SOT). Il a été démontré que les patients présentaient des déplacements antéro-postérieurs plus importants, déplacements qui étaient associés à une dépendance visuelle élevée et une augmentation des déplacements médio-latéraux dans des conditions moins complexes. Yagi et al. (2022) ont utilisé un test de posturographie statique avec ou sans mousse pour étudier l'ellipse de l'aire de confiance à 95% chez 14 sujets sains, 27 patients PPPD et 12 patients VPU. Les patients PPPD étaient plus instables que les sujets sains (médiane de patients : 8.39 cm², IQR : 11.6 vs. sujets sains : 4.36 cm², IQR : 3.01 ; p = 0.001). Par ailleurs, il existe un effet résiduel du dysfonctionnement vestibulaire chez des patients atteints de PPPD qui serait caractérisé par une association entre ce dysfonctionnement et leurs antécédents de troubles de l'équilibre mesurés par différents tests en pratique clinique (Oka et al., 2023). Yagi et al. (2022) ont aussi étudié la stabilisation du regard chez les patients PPPD. Les résultats ont révélé une diminution de la stabilisation du regard dans le plan horizontal après une exposition à un stimulus visuel en mouvement. Ce défaut de stabilisation visuelle semble exacerber les symptômes perçus par les patients.

Dans une étude sur la pertinence des bilans cliniques, De Vestel et al. (2022) ont comparé des patients atteints de PPPD, des patients vestibulaires chroniques (non-PPPD) et des sujets sains pour les tests évaluant l'équilibre et la dépendance visuelle. Ces auteurs ont observé que les patients étaient plus instables comparé aux sujets sains, en condition statique (patients PPPD vs. sujets sains, p < 0.001; patients non-PPPD vs. sujets sains, p = 0.002) et dynamique (pour les tests Timed Up and Go, marche en tandem et Fonctionnal Gait Assessment, p < 0.05). Une oscillation accrue a été aussi observée chez ces patients, en présence d'une perturbation visuelle (rotation de points). De plus, les patients PPPD avaient un score plus élevé que les autres groupes pour la tâche de verticale visuelle subjective (patients PPPD vs. sujets sains, p = 0,016) et le questionnaire Visual Vertigo Analog Scale (patients PPPD vs. patients non-PPPD, p = 0,006). Cependant, cette étude n'a révélé aucune différence entre les patients PPPD et non-PPPD pour ces tests cliniques. De plus, le questionnaire Visual Vertigo Analog Scale était le test clinique le plus utile pour discriminer des patients atteints de PPPD. Les tests cliniques plus sensibles et adaptés sont nécessaires pour détecter les troubles de l'équilibre et la dépendance visuelle chez ces patients ; d'autant plus que, les caractéristiques cliniques varient en fonction de l'âge. Il a été constaté que les patients jeunes présentaient un profil plus anxieux comparé aux patients âgés qui, avaient, quant à eux, plus de difficultés posturales (Fukushima et al., 2024). Néanmoins, Yago et al. (2021) n'ont observé aucune différence entre les sous-types visuel, mouvement actif et mixte pour les tests cliniques évaluant l'équilibre (pour le ratio romberg, visuel : 1,90 ± 0,70 vs. mouvement actif : 1,78 ± 0,38 vs. mixte : 1,94 ± 0,63 ; p = 0,782), le handicap perçu (pour le DHI,

visuel : $50,2 \pm 18,9$ vs. mouvement actif : $55,7 \pm 19,8$ vs. mixte : $50,3 \pm 23,9$; $p = 0,471$), l'état psychologique (pour le HADS, visuel : $17,2 \pm 7,40$ vs. mouvement actif : $15,6 \pm 8,25$ vs. mixte : $16,7 \pm 6,69$; $p = 0,610$), les fonctions otolithiques (pour le ratio cVEMP, visuel : $21,6 \pm 23,6$ vs. mouvement actif : $33,8 \pm 38,3$ vs. mixte : $29,1 \pm 30,3$; $p = 0,682$) et canalaire (pour le gain vHIT droit, visuel : $1,02 \pm 0,15$ vs. mouvement actif : $0,83 \pm 0,29$ vs. mixte : $0,93 \pm 0,24$; $p = 0,325$).

Ces facteurs ont un impact négatif sur l'état psychologique et la qualité de vie des patients (Ak et al., 2022; Steensnaes et al., 2023). A ce jour, il n'existe aucune preuve en faveur des traitements pharmacologiques et non-pharmacologiques pour les patients atteints de PPPD (Webster, Harrington-Benton, et al., 2023; Webster, Kamo, et al., 2023). Il a été noté qu'il n'existait aucune preuve provenant des essais contrôlés randomisés concernant les traitements pharmacologiques pour le PPPD, en particulier les traitements utilisant les inhibiteurs de la recapture de la sérotonine-noradrénaline (Webster, Harrington-Benton, et al., 2023). En ce qui concerne les traitements non-médicamenteux, une seule étude avait été réalisée en Corée du Sud qui comparait l'utilisation de la stimulation transcrânienne par courant continu, aussi appelé tDCS (Im et al., 2022). Cette étude réalisée chez des 24 patients atteints de PPPD a utilisé un montage cortex préfrontal dorsolatéral gauche qui a été administré en 15 séances pendant 3 semaines. Cette étude avait fourni des informations sur la survenue d'effets indésirables, ainsi que sur la qualité de vie à trois mois de suivi. Cependant, aucun effet significatif de la tDCS active n'a pu être démontré sur les symptômes de vertiges chez les patients.

Ainsi, les facteurs prédicteurs nécessiteraient une plus grande attention lors de l'évaluation des patients atteints de PPPD afin de différencier les sous-types et pour mieux orienter la prise en charge. L'objectif de notre travail renvoyant à une méthode d'évaluation de la multidimensionnalité de ce syndrome vestibulaire chronique, nous nous intéresserons ici à l'exploration des symptômes rapportés, à savoir les troubles de l'équilibre et psychocognitifs. Nous présenterons donc les évaluations réalisées en pratique clinique et en laboratoire, ainsi que leurs limitations.

4. Méthodes d'évaluation et leurs limitations

L'examen du patient vertigineux est fondamental pour définir, par un interrogatoire, les antécédents, la durée et fréquence des vertiges, les facteurs déclenchants, les comorbidités et les traitements. Il permet aussi de réaliser une évaluation clinique permettant de déterminer les déficits par des explorations otoneurologiques et auditives complémentaires. L'ensemble de ces observations est essentiel pour distinguer une atteinte périphérique ou centrale (Figure 9).

Les méthodes d'évaluation des vestibulopathies se présentent sous différentes formes : les échelles subjectives, les examens oculomoteurs, de l'équilibre et de l'orientation spatiale (H. S. Cohen, 2019). Les échelles subjectives permettent d'évaluer l'impact du handicap dans la vie quotidienne des patients. Les déficits oculomoteurs peuvent être estimés à l'aide de tests variés qui mesurent la stabilisation du regard, avec ou sans mouvement de la tête (par exemple, un head shaking test). Ces examens peuvent être une vHIT et un test calorique pour la fonction canalaire et/ou un VEMP cervical et oculaire pour la fonction otolithique. Les examens oculomoteurs servent à rechercher un nystagmus spontané ou déclenché qui est un signe pathologique. Or, les qualités métrologiques de ces examens semblent insuffisantes pour confirmer leur utilité clinique. Dans le cadre d'une étude sur la sensibilité et la spécificité des examens oculomoteurs, H. S. Cohen et al. (2018) ont démontré une faible sensibilité du head shaking test ($< 0,40$), head impulse tests non-instrumenté ($< 0,15$) et instrumenté ($0,15 - 0,35$) pour détecter des déficits chez des patients vestibulaires. Les évaluations de l'équilibre peuvent être réalisées en utilisant la marche en tandem, le test de Romberg (ou le Clinical Test of Sensory Interaction and Balance ; CTSIB) ou la posturographie informatisée dynamique (ou Computerized Dynamic Posturography ; CDP). Les tests de Fukuda, le Bucket Test et de la verticale visuelle subjective sont utilisés pour évaluer la perception de la verticalité.

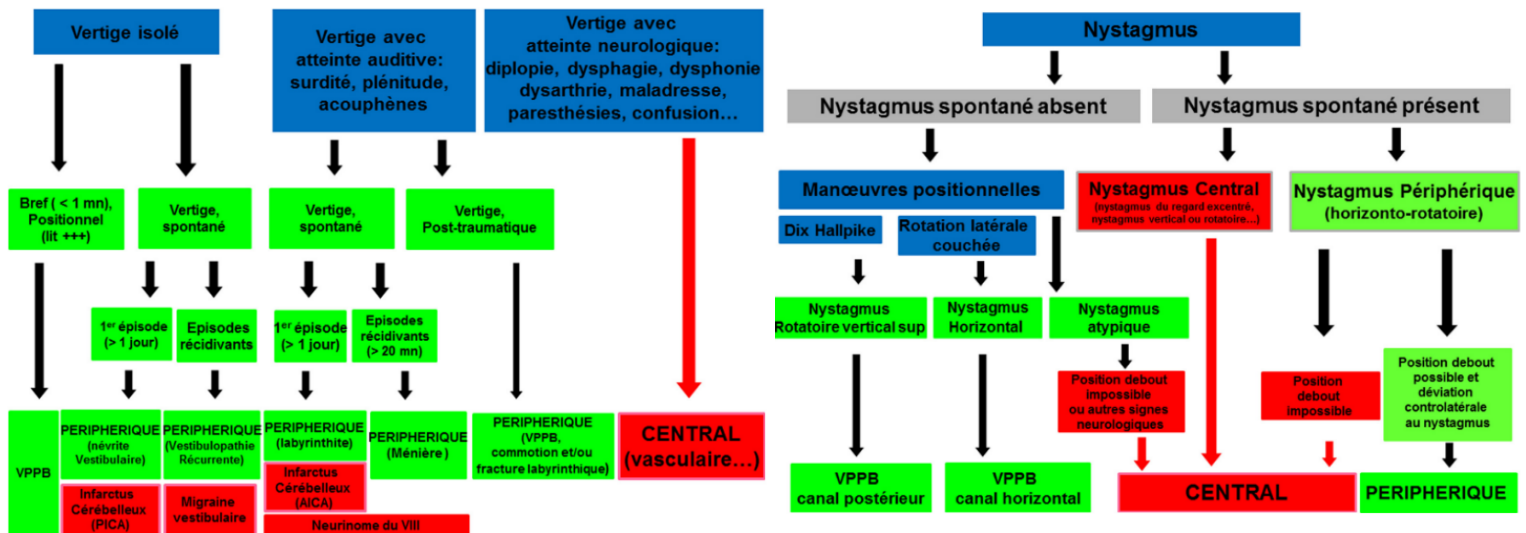


Figure 9. Schéma décisionnel fondé sur les symptômes et les signes observés lors de l'examen. Adapté de P. Bertholon et al., 2021.

Nous présenterons, dans un premier temps, les échelles subjectives étant donné que nous nous intéresserons à l'impact psychologique et social associé aux vestibulopathies. Notre travail traitant des fonctions d'équilibration et de la perception spatiale, nous nous concentrerons ensuite sur les méthodes d'évaluation de ces fonctions.

4.1. Les échelles subjectives

Les vertiges sont une plainte extrêmement courante des patients, mais restent souvent inexpliqués après une consultation, ce qui peut conduire à un traitement inapproprié. Les plaintes de patients vertigineux évoquent plusieurs sensations subjectives : symptômes neurovégétatifs (nausées, vomissements, transpiration), sensation rotatoire importante lors de changement de position orthostatique ou lors de mouvement vertical ou horizontal de la tête, troubles psychiatriques. Une chronicisation du syndrome vertigineux peut entraîner d'autres troubles. Des vertiges chroniques sont souvent associés à une altération fonctionnelle accrue et à une comorbidité psychiatrique, en particulier une dépression et une somatisation. L'ensemble de ces symptômes baisse significativement la qualité de vie des patients (Agrawal et al., 2018). Il est difficile pour le praticien de différencier et d'évaluer ces symptômes subjectifs. De nombreuses équipes ont alors développé des questionnaires pour évaluer l'impact de ces symptômes sur le fonctionnement quotidien des patients. Il est important de noter que la qualité de vie liée à la santé (QVLS) intègre les différents aspects de la vie quotidienne pouvant affecter la santé physique et mentale. Selon la Haute Autorité de la Santé, elle comprend plus spécifiquement les perceptions de la santé physique et mentale et ses corolaires, dont les risques et comorbidités, le statut fonctionnel, le support social et les conditions socioéconomiques.

Les questionnaires patients de mesure des résultats de soins (ou en anglais Patient-Reported Outcome MeasureS ; PROMs) sont des indicateurs de l'expérience subjective du patient, indépendants de l'interprétation des intervenants. Dans leur revue systématique, Fong et al. (2015) ont identifié les PROMs les plus couramment utilisées dans la recherche clinique vestibulaire. D'après les bases de données datant de 1950 à 2013, le Dizziness Handicap Inventory (DHI), l'Activities-specific Balance Confidence scale (ABC), le Vertigo Symptom Scale-short form (VSS) et le Visual Analog Scale (VAS) étaient les PROMs les plus utilisées. Ce sont des mesures classées en 3 domaines, conformément à la base de la Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé, qui sont : les limitations d'activité (incapacité à effectuer les tâches élémentaires nécessaires à une vie autonome), les restrictions de participation (activités inaccessibles à cause de la pathologie) et les fonctions et structures corporelles (qui sont plus ou moins déficientes). Parmi ces questionnaires, le questionnaire DHI est le plus couramment utilisé. Il a été développé pour prendre en compte les troubles fonctionnels, émotionnels et physiques associés aux vertiges (Jacobson & Newman, 1990). Un niveau de handicap modéré est observé chez les patients atteints d'une vestibulopathie unilatérale (moyenne DHI : 46,31 [IC 95 % 41,17-51,44]), d'après une revue systématique avec méta-

analyse de Karabulut et al. (2023). Par ailleurs, des différences peuvent être constatées entre les diverses vestibulopathies ; par exemple, les patients atteints de PPPD rapportaient plus de difficultés relatives aux composantes émotionnelles et fonctionnelles comparé à des patients atteints de MV ($p < 0,05$) (Ak et al., 2022). De même, Steensnaes et al. (2023) ont souligné que l'impact du handicap était plus marqué chez les patients atteints de PPPD comparé à des patients MV, MD, VPB ou autres vestibulopathies (PPPD : $49,2 \pm 17,8$ vs. VPB : $25,2 \pm 17,8$ vs. MV : $38,7 \pm 22,2$ vs. MD : $33,4 \pm 15,3$). Le nombre d'épisodes par mois et d'autres facteurs, comme la sensation de rotation, le déséquilibre étaient corrélés au score DHI (Formeister et al., 2020). Une corrélation existe aussi entre ce dernier et d'autres questionnaires évaluant la qualité de vie et l'humeur. Dans une étude de (Y.-Y. Cheng et al., 2012), les résultats ont démontré une corrélation positive entre la sévérité du syndrome vertigineux et les troubles de l'humeur (dépression et anxiété) en utilisant les questionnaires DHI et HADS (Hospital Anxiety and Depression Scale). De plus, ces auteurs ont aussi observé une corrélation entre le DHI et le SF36 (Short-Form 36 Health Survey Questionnaires) qui mesure la perception de la qualité de vie. En effet, les patients vestibulaires développent souvent des comportements d'évitement qui se traduisent par des activités quotidiennes limitées et une baisse de la qualité de vie. Ces derniers rapportent ainsi une insatisfaction liée à ces limitations qui est confondue avec la personnalité, l'état psychologique et les demandes importantes de soins des patients. Or, une revue systématique des propriétés psychométriques des PROMs a révélé que ceux qui présentaient une bonne fiabilité et validité étaient les questionnaires suivants (V. M. Stewart et al., 2018) : le Vestibular Rehabilitation Benefit Questionnaire (scores « excellent » pour contenu, critère et cohérence interne et score « bien » pour fiabilité), le Vertigo Symptom Scale (scores « bien » pour critère, cohérence et fiabilité) et le Vestibular Activities et Participation (score « excellent » pour contenu et score « bien » pour fiabilité).

Lors d'une consultation, la perception subjective du syndrome vestibulaire par le patient est faiblement corrélée à l'évaluation objective proposée par le médecin (Gofrit et al., 2017; Shim et al., 2018; Son et al., 2015). Ce manque de concordance peut fausser la communication entre patient et médecin et être source de diagnostic erroné et de traitement inadapté. D'autres facteurs tels que la phase de compensation vestibulaire, l'évolution imprévisible du vertige et la perception variable du vertige contribuent à la complexité de l'évaluation du syndrome vestibulaire. Les mesures objectives, c'est-à-dire les techniques vestibulométriques permettant de quantifier les déficits vestibulaires sont connues et standardisées dans le domaine médical et scientifique. Selon la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé, les outils devraient intégrer deux composantes : (1) les fonctions et les structures corporelles et (2) les

activités et la participation. Les déficits sont associés aux fonctions et structures corporelles alors que les limitations d'activités et la participation font référence à l'impact négatif de la maladie sur le fonctionnement des patients dans leurs vies quotidiennes. Alghwiri et al. (2012) ont noté que la catégorie « activités et participation » est un élément important dans la stratégie thérapeutique. Cet élément joue un rôle important dans la compréhension de l'interaction entre un malade (personne souffrant d'une pathologie) et son entourage (facteurs environnementaux). En règle générale, les patients s'intéressent davantage à leur récupération sur le plan fonctionnel que sur le plan physiologique. Dans cette optique, ces auteurs ont développé un nouveau questionnaire appelé Vestibular Activities et Participation permettant d'évaluer les activités et la participation des personnes atteintes de troubles vestibulaires conformément à la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé. Le développement de ce questionnaire a été effectué par un panel d'experts internationaux dans le domaine vestibulaire et des patients vestibulaires ont recrutés pour sa validation clinique.

A ce jour, il existe de nombreux questionnaires évaluant les symptômes physiques et la qualité de vie liée à la santé des patients vertigineux. Cependant, peu de ces questionnaires prennent en compte les troubles cognitifs (attentionnels, mémorisation et perception de l'espace). De ce fait, Lacroix et al. (2016) ont créé un outil évaluant pour la première fois de manière spécifique les plaintes physiques, émotionnelles et cognitives dans un seul inventaire. Ce questionnaire Neuropsychological Vertigo Inventory est destiné à détecter des troubles cognitifs subjectifs spécifiques chez les patients vertigineux (Lacroix et al., 2016). Il se compose de sept sous-échelles (perception de l'espace, perception du temps, attention, mémoire, émotion, vision et motricité) permettant d'évaluer les problèmes neuropsychologiques associés au vertige. De nombreuses méthodes cliniques existent aussi pour évaluer les déficits vestibulaires. Elles permettent de réaliser une observation qualitative et quantitative, en ciblant différentes structures vestibulaires, pour distinguer les fonctions déficitaires. Ces déficits peuvent être relatifs aux mouvements oculomoteurs, à l'équilibre statique ou dynamique et à la perception spatiale. Nous présenterons quelques examens de l'équilibre et de la perception spatiale mais cette liste reste inexhaustive. De nombreuses techniques et méthodes existent pour quantifier les troubles de l'équilibre statique et dynamique (Paillard & Noé, 2015). Parmi ces examens, nous pouvons distinguer les évaluations cliniques et instrumentales.

4.2. Evaluations des capacités perceptivo-motrices

Evaluation en pratique clinique

L'évaluation du patient vertigineux doit être rapide, peu coûteuse et facile à interpréter en pratique clinique. Elle peut comporter une observation de la marche, des tests du CTSIB et de Fukuda et/ou de la Verticale Visuelle Subjective (VVS) (Bouccara et al., 2018; H. S. Cohen, 2019; Curthoys, 2012). Une méthode simple pour déterminer une atteinte vestibulaire est la marche en tandem qui consiste à suivre une ligne droite en touchant le talon d'un pied aux orteils de l'autre, avec et sans les yeux ouverts. Le nombre de pas consécutifs est pris en compte pour déterminer le bon fonctionnement postural. Il existe des valeurs de référence pour ce test réalisé avec les yeux ouverts qui démontrent un effet de l'âge sur la marche (Friello et al., 2022; Vereeck et al., 2008). Un déclin est observé à partir de 70 ans avec des difficultés accrues à réaliser l'ensemble des pas demandés chez les personnes les plus âgées (par exemple, Vereeck et al. (2008) ont obtenu une moyenne sur 20 pas, pour les 30 à 60 ans : 20 ± 0 vs. 70 ans : $17,2 \pm 5,7$ vs. 80 ans : $14,1 \pm 7$). Friello et al. (2022) ont étudié les caractéristiques de la marche en tandem aussi chez des enfants ; ces derniers effectuaient moins de pas entre 4 et 9 ans. Ces auteurs ont également mesuré l'équilibre statique en utilisant le CTSIB qui est un autre test couramment utilisé par les cliniciens. Il est réalisé en position debout sur une mousse, avec et sans les yeux ouverts. Une moins bonne performance est soulignée aussi à partir de 70 ans ; par exemple, Vereeck et al. (2008) ont obtenu une moyenne avec les yeux fermés, pour les 30 à 60 ans : 30 ± 0 vs. 70 ans : $26,02 \pm 8,42$ vs. 80 ans : $19,82 \pm 10,52$. Cependant, l'utilité de la marche en tandem en otoneurologie est remise en question dans la discrimination entre atteinte périphérique ou centrale. Un résultat modéré pour la courbe ROC (caractéristique de performance entre sensibilité et spécificité), la sensibilité et la spécificité a été démontré pour la marche en tandem (H. S. Cohen et al., 2018a). Une meilleure qualité métrologique est obtenue lorsque la marche en tandem est combinée à un CTSIB pour évaluer les patients vestibulaires (H. S. Cohen et al., 2019). Les tests de Fukuda et de la verticale visuelle subjective permettent de mesurer l'intégration et la perception spatiale. Le test de Fukuda est souvent utilisé en pratique clinique ; pour le réaliser, le patient doit marcher sur place avec les yeux ouverts puis les yeux fermés en gardant les bras levés. Une déviation posturale vers la gauche ou la droite pendant le piétinement est révélateur d'une asymétrie vestibulaire (par exemple, signe détecté chez 90 % des patients atteints d'une vestibulopathie unilatérale ; Akis et al., 2023). D'après les valeurs de référence, les sujets sains se déplacent de 60 à 76 cm vers l'avant, dévient latéralement de 20 à 41,5° et tournent de 14 à 42° pendant le test du Fukuda (Nyabenda et al., 2004). Ce test réalisé avec les yeux fermés était

plus sensible que d'autres tests comme la marche en tandem (sensibilité de 65% ; coefficient kappa : 0.352). Or, les qualités métrologiques du test de Fukuda sont discutées par d'autres auteurs. Paquet et al. (2017) ont observé un test-retest modéré et variable chez des sujets jeunes et âgés alors que la sensibilité et la spécificité de ce test n'ont pu être déterminées par H. S. Cohen et al. (2014) car sa courbe ROC était inférieure à 0,80. Un autre test de perception spatiale est le bucket test au cours duquel les patients assis doivent aligner verticalement un segment au fond d'un seau dévié à gauche ou à droite. Un seau est utilisé pour supprimer toute indice visuel pouvant faciliter l'alignement. Des valeurs de référence ont été établies pour ce test (Celis-Aguilar et al., 2018; Dessai & Prasannan, 2021) ; un score normal correspond à une valeur comprise entre -1° et $+3^{\circ}$ de déviation par rapport à la verticale subjective. Une performance déficitaire est observée chez des patients atteints de différentes vestibulopathies (Chetana & Jayesh, 2015). Néanmoins, le bucket test ne semble pas suffisamment sensible et spécifique pour détecter les troubles vestibulaires (par exemple, courbe ROC $< 0,80$; H. S. Cohen & Sangi-Haghpeykar, 2012).

Evaluation en laboratoire

En laboratoire, des plateformes de force et des logiciels sont généralement utilisés pour évaluer les fonctions d'équilibration et de perception spatiale dans un environnement contrôlé. Pour la perception spatiale, plusieurs méthodes et outils sont utilisés en laboratoire permettant d'explorer les réponses comportementales des individus en interaction avec l'environnement. Des tâches psychophysiques (de discrimination, de localisation ou de reconnaissance) ou de navigation (avec ou sans la réalité virtuelle) peuvent être proposées. Une version informatisée de la tâche de la VVS a été développée en utilisant un casque de réalité virtuelle, un affichage sur écran, des lunettes spécifiques ou même un smartphone (Michelson et al., 2018; Negrillo-Cárdenas et al., 2018). Cette version permet de proposer une condition statique avec un segment dans un cadre dépourvu d'indices visuels ou dans un cadre de flux optocinétique pour une condition dynamique. Comparée au bucket test classique, la qualité métrologique de la VVS virtuelle était meilleure (Michelson et al., 2018). La perception de la verticalité est aussi évaluée en utilisant le Rod Frame Test (RFT) qui mesure la capacité à aligner un segment dans un cadre dévié à gauche et à droite. De même, il a été observé que l'intégration de la réalité virtuelle renforce les qualités métrologiques de ce test (Reger et al., 2003). D'autres méthodes sont également utilisées pour l'évaluation de différentes composantes de la perception spatiale, telles que la figure complexe de Rey pour la mémoire visuelle immédiate et les habiletés visuo-constructives, la Wechsler Memory Scale pour l'apprentissage visuospatial, la piscine de Morris ou les labyrinthes pour la navigation et mémoire spatiale. Or, il y a un réel manque de données normatives ; par exemple

68,9 % des neuropsychologues utilisaient des valeurs de référence de l'étranger car aucune base de données n'avait été établie au sein de la population française (Branco Lopes et al., 2021). Généralement, les méthodes d'évaluation traditionnelles sont réalisées avec un papier et crayon, d'où le terme « papier-crayon ». Avec l'informatisation croissante, des méthodes plus précises et sensibles, reproductibles et fiables ont été développées pour faciliter la passation et réduire les biais associés¹². L'évaluation de l'équilibre, en conditions statiques et dynamiques, est réalisée en utilisant des plateformes de force qui permettent de calculer les déplacements du centre de pression (CdP) à partir de la force résultante d'une composante verticale. La technique la plus appropriée pour mesurer plusieurs composantes du contrôle postural semble être la plateforme de force dynamique (Browne & O'Hare, 2001). La posturographie dynamique informatisée réalise une évaluation systématique des composants sensoriels et moteurs de l'équilibre. Cette dernière est essentielle pour comprendre les mécanismes associés et les facteurs influençant le contrôle postural dans différentes conditions, particulièrement pour détecter les troubles de l'équilibre et la prévention des risques de chute chez les personnes âgées (Harcourt, 1995). Il existe plusieurs types de mouvements de la plateforme, d'amplitudes et de vitesses plus ou moins importantes, tels que les rotations, les translations horizontales et les déplacements verticaux (Monsell et al., 1997). Les stratégies posturales changent en fonction du type de perturbations provoquées (Horak & Nashner, 1986). De nombreux tests peuvent être utilisés pour perturber le contrôle postural, tels que le test d'Organisation Sensorielle (SOT), le test d'Adaptation (ADT) ou le test de contrôle moteur (MCT). La posturographie dynamique informatisée est un outil pertinent dans l'évaluation des répercussions fonctionnelles en neurootologie (Vorhees, 1989). Les résultats ont révélé que 45% des patients atteints d'une pathologie vestibulaire périphérique et 71 % des patients atteints d'une pathologie vestibulaire centrale présentaient des troubles de l'équilibre alors que la proportion de patients ayant une évaluation nystagmographique anormale était moindre, à savoir 27,7% des cas périphériques et 41,5% des cas centraux. De même, une corrélation modérée a été démontrée entre la posturographie dynamique informatisée et les données cliniques et audiométriques chez des patients atteints de la maladie de Ménière, particulièrement ceux avec une atteinte auditive sévère (Soto et al., 2004). Il a été observé que des patients présentaient une performance déficitaire pendant les conditions 5 et 6 du SOT, ce qui est évocateur d'un déficit vestibulaire affectant le fonctionnement postural de l'individu (Black et al., 1988). En effet, cette méthode instrumentale permet de compléter l'examen clinique en

¹² Lacroix, É. & Edwards, M. (2022). Chapitre 7. Neuropsychologie 2.0 des troubles visuo-spatiaux : l'apport des mesures informatisées dans l'évaluation des troubles cognitifs associés aux pathologies vestibulaires. Dans : éd., Neuropsychologie clinique et technologies (pp. 135-154). Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

offrant une information fonctionnelle objective pour faciliter le diagnostic et le suivi pré et post traitement (Furman, 1995; L. M. Nashner & Peters, 1990; Visser et al., 2008). De plus, cette technique semble plus efficace que les autres tests d'équilibre pour identifier une pathologie vestibulaire périphérique, en accord avec la plainte subjective des patients (Asai et al., 1993a). Un grand nombre de paramètres stabilométriques sont utilisés en posturographie. Les paramètres peuvent être issus d'une analyse spatio-temporelle (longueur, surface, vitesse moyenne), spectrale (racine quadratique moyenne) et non-linéaire (distance quadratique moyenne). Entre autres, l'équilibration est la plus souvent évaluée à travers les mesures classiques spatio-temporelles. Cependant, quelques questions sont soulevées au sujet de la pertinence et de la fiabilité de ces paramètres (Doyle et al., 2005; Hill, Carroll, Kalogeropoulos, & Schwarz, 1995; Nagymáté, Orlovits, & Kiss, 2018; Pinsault & Vuillerme, 2009; Santos, Delisle, Larivière, Plamondon, & Imbeau, 2008). Dans une revue récente, Hébert-Losier & Murray (2020) ont réalisé une évaluation critique des publications abordant la fiabilité des paramètres et ils ont démontré que la surface et la distance des déplacements du CdP étaient les paramètres les plus fiables. Cependant, une bonne qualité méthodologique avait été obtenue uniquement pour deux publications (Lafond et al., 2004; Pinsault & Vuillerme, 2009). D'après l'étude menée par Lafond et al. (2004), la vitesse moyenne représente la mesure la plus fiable dans les axes médio-latéral et antéropostérieur, lorsque deux essais de 120 secondes sont moyennés ($ICC : r = 0,90$). En ce qui concerne l'étude réalisée par Pinsault & Vuillerme (2008), il a été observé que trois essais de 30 secondes étaient nécessaires pour s'assurer de la fiabilité des paramètres ($ICC > 0,75$) avec et sans normalisation, à savoir la surface, l'amplitude, la vitesse moyenne et maximale des déplacements du centre de pression. D'autres études ont pu observer une bonne qualité métrologique pour la posturographie dynamique. Dans une étude rétrospective, une sensibilité de 95% avait été démontrée pour le SOT (Hamid et al., 1991). Clark et al., (1997) avaient démontré que le test des limites de stabilité (LOS) était fiable pour évaluer une population âgée et saine.

Place de la réalité virtuelle dans l'évaluation

Avec l'émergence des nouvelles technologies, la réalité virtuelle est de plus en plus intégrée dans l'évaluation perceptivo-motrice normale et pathologique (Bohil et al., 2011; Creem-Regehr et al., 2024; Dolins et al., 2017; Garrett et al., 2018; Keshner & Kenyon, 2009b; Negu et al., 2016; Tossavainen et al., 2006). La réalité virtuelle est un dispositif technologique permettant d'étudier le comportement d'un sujet en interaction directe avec un environnement virtuel immersif. Il existe plusieurs catégories de dispositifs d'interaction : présentation visuelle (système de visualisation non immersif, semi-immersif ou immersif), capture de mouvement et de position (système de

localisation par capteurs mécaniques, électromagnétiques et optiques), feedback proprioceptif et cutané (système tactile ou de stimulation de mouvement) et présentation sonore (système de reconnaissance vocale)¹³. On peut distinguer deux composantes importantes de la réalité virtuelle : le profil cognitif et l'expérience utilisateur¹⁴. Ce dernier modifie le profil cognitif en modulant les ressources attentionnelles sollicitées lors de l'interaction du sujet avec l'environnement. Un sentiment de présence émerge de ces processus attentionnels qui va participer à la qualité de l'intégration multisensorielle et sa flexibilité, notamment lors d'un conflit sensoriel. Ainsi, la réalité virtuelle offre la possibilité d'évaluer des réponses comportementales dans un cadre écologique et proche de la réalité, en manipulant les conditions visuelles de l'environnement.

En posturologie, il est possible d'intégrer un environnement virtuel pour évaluer les différentes composantes du contrôle postural. Assländer & Streuber (2020) ont comparé quatre conditions visuelles (yeux ouverts et fermés sans casque VR, cadres virtuel, réel et abstrait) pour décrire le comportement postural dans des environnements réel et virtuels (Figure 10). Ces auteurs n'ont observé aucune différence entre la condition sans casque et l'environnement virtuel réaliste ; les participants étaient plus instables dans l'environnement virtuel abstrait, ce qui était associé à un faible sentiment de présence. En intégrant des perturbations visuelles, une instabilité plus importante est mesurée lorsqu'un individu est en position debout sur une plateforme statique avec et sans mousse (Chander et al., 2019; Chiarovano et al., 2015). Ces perturbations peuvent aussi révéler des caractéristiques cliniques dépendantes du handicap chez des patients atteints d'une vestibulopathie (Chiarovano et al., 2018) ; en d'autres termes, il existerait des catégories de patients rapportant un handicap sévère et sans troubles de l'équilibre ainsi que des patients présentant une instabilité sans handicap perçu. Une instabilité importante et un nombre élevé de chutes ont été constatés chez des patients souffrant de vestibulopathie bilatérale lorsqu'ils fermaient les yeux sur une surface en mousse et étaient exposés à des perturbations visuelles d'amplitude croissante. (Chiarovano et al., 2017). Ces auteurs ont également observé un effet de l'âge et de la difficulté induite par les perturbations visuelles sur le contrôle postural des sujets sains.

¹³ SAGNIER C. (2019). *Étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique* [Thèse de doctorat publiée]. <https://theses.hal.science/tel-03637171/document>

¹⁴ MANEUVRIER A. (2020). *Le sentiment de présence en réalité virtuelle : rôle modérateur des facteurs humains sur la performance* [Thèse de doctorat publiée]. <https://theses.hal.science/tel-03198706/document>

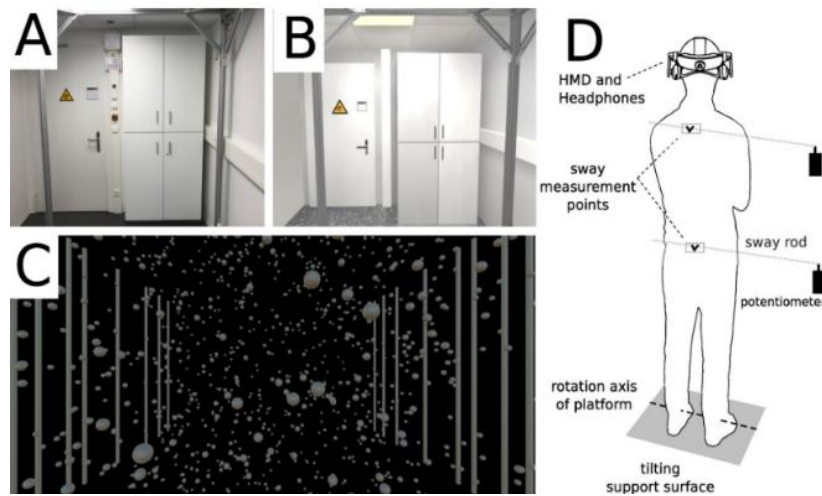


Figure 10. Illustration du paradigme expérimental avec A) les yeux ouverts sans casque, B) le cadre virtuel réel, C) le cadre virtuel abstrait, D) position debout avec et sans yeux fermés. Adapté de Assländer & Streuber (2020).

Malgré un développement technologique accru en posturologie, il existe plusieurs limitations pouvant induire des interprétations fallacieuses (Thoumie, 2012), telles que l'utilisation du harnais, un manque de données psychométriques, un surcoût et une complexité de l'interprétation. Par ailleurs, la base de données normatives de NeuroCom représente les valeurs de référence les plus utilisées pour comparer les données de patients et détecter des troubles de l'équilibre. Or, ces normes sont caractérisées par des groupes inégaux de 20–59 ans, 60–69 ans et 70–79 ans (par exemple pour le SOT : 20 – 59 ans ($n = 112$), 60 – 69 ans ($n = 54$) et 70 – 79 ans ($n = 29$)). Ces normes ont été utilisées pour déterminer les propriétés psychométriques et représentent une référence clé dans la pratique clinique et dans la recherche. Cependant, le regroupement des valeurs normatives dans une tranche d'âge de 20 – 59 ans représente un biais qui pourrait mener à une mauvaise interprétation des scores obtenus par un patient (par exemple, en minimisant un trouble chez un patient âgé ou en sous-estimant un déficit chez un patient jeune) (Ionescu et al., 2005a). De même, l'inégalité des échantillons pourrait réduire la puissance de l'analyse statistique, élément important pour comparer des groupes et tirer des conclusions pertinentes. De plus, les conditions d'enregistrement, les paramètres de mesure et leur traitement représentent des facteurs essentiels à prendre en compte. En effet, ces facteurs peuvent influencer l'interprétation des données en stabilométrie (Chiari et al., 2002a; Fearing, 1924; Raymakers et al., 2005; Rocchi et al., 2004; Scoppa et al., 2017). Dans une perspective de standardisation, l'Association Posturologie Internationale (anciennement Association Française en Posturologie), la Société Japonaise d'Etude de l'Equilibre (ou *Japan Society for Equilibrium Research* en anglais) et la Société Internationale de la Recherche sur la Posture et de la Marche ont établi et publié des

recommandations, pour l'évaluation en stabilométrie. Tout d'abord, les premières recommandations ont été proposées par Gagey et collaborateurs (1990) menant à la publication des Normes85. Par la suite, des normes japonaises ont été publiées par ANIMA Corporation (1997). Des différences de recommandations existent entre ces documents ce qui rend la standardisation plus difficile au niveau international. Les différences clés sont en relation avec les conditions d'enregistrement (pieds à 30° avec talons écartés de 2 centimètres et cible située à 90 centimètres selon Normes85 vs. pieds joints et cible située à 2 mètres selon ANIMA), la durée (51,2 secondes selon Normes85 vs. 60 secondes selon ANIMA) et la fréquence d'échantillonnage (5 Hertz selon Normes85 vs. 20 Hertz selon ANIMA). Une révision des Normes85 a été réalisée ce qui a conduit à la publication des Normes13 (P. M. Gagey, 2016; P.-M. Gagey, 2016). Dans ce document, il a été précisé que la position des pieds reste inchangée et que la durée d'enregistrement ainsi que la fréquence d'échantillonnage ont été modifiées (31,6 secondes pour la durée et 40 Hertz pour la fréquence). Yamamoto et al. (2017) soulignent l'importance d'une normalisation en stabilométrie sur le plan international qui facilitera le partage des résultats en posturologie au sein de la communauté scientifique.

En bref, il existe de nombreuses méthodes pour évaluer les fonctions d'équilibration et de perception spatiale en pratique clinique et en laboratoire. Des valeurs de référence ont été établies pour ces tests pour faciliter l'interprétation en comparant les patients et les sujets sains. En pratique clinique, ce sont des méthodes simples et faciles à administrer et à interpréter mais elles présentent quelques limitations. L'interprétation repose sur une observation subjective du patient (variabilité inter-observateur et intra-observateur). De plus, les conditions d'administration peuvent aussi varier. D'autres facteurs influencent la performance (par exemple en posturographie, la position des pieds). En général, une faible qualité métrologique a été démontrée pour les tests évaluant les capacités perceptivo-motrices. L'utilisation de la réalité virtuelle peut provoquer une cybermalaise (ou mal des simulateurs ; cybersickness en anglais) se traduisant par de la fatigue visuelle, de la pâleur, de la désorientation et des maux de tête. Ce facteur doit donc être considéré lors de l'utilisation de la réalité virtuelle dans la recherche biomédicale. Ces méthodes peuvent varier, mais l'absence de propriétés psychométriques fiables et de valeurs de référence complique leur standardisation, en particulier avec l'informatisation croissante et l'émergence de nouveaux outils. D'ailleurs, la popularité de ces derniers est justifiée par le fait que l'observation clinique ne fournit pas une valeur quantifiée des déficits de l'équilibre et de la perception spatiale.

4.3. Enjeux et problématiques

Dans l'ensemble, les vestibulopathies ont un impact important sur la qualité de vie des patients, en particulier chez les personnes âgées ; aboutissant à des situations de handicaps variés, où le nombre de chutes est élevé et leurs conséquences graves. Cependant, la prise en charge des patients est ponctuée d'incertitudes et de diagnostics erronés. Dans une étude systémique recensant les soins de santé proposés aux patients vertigineux, Grill et al., (2016) ont démontré une importante hétérogénéité dans les critères de diagnostic, de prise en charge et de traitement entre différents établissements de soins primaires. Les résultats provenant des PROMs, indicateurs de l'expérience subjective des patients, n'ont montré aucune amélioration significative entre leur état initial et après un traitement. En effet, les médecins généralistes ou urgentistes, voire une partie des ORL en première ligne, ne sont pas forcément sensibilisés à ce type de pathologie et l'aide au diagnostic reste faible. De toute évidence, un diagnostic erroné aboutirait à des propositions de traitement inefficaces et mènerait éventuellement à une chronicisation du dysfonctionnement vestibulaire et à l'apparition de symptômes secondaires. En effet, il existe une discordance entre l'évaluation objective essentiellement faite par le médecin ORL et la perception subjective du trouble vestibulaire par le patient (Duracinsky et al., 2007; Mendel et al., 1999). La perception de leurs symptômes est influencée par les symptômes psychosomatiques et autonomes qui constituent des marqueurs à long-terme de la chronicisation (Yardley et al., 1994). En France, la majorité des généralistes ont tendance à prescrire un traitement médicamenteux (99,1 %) principalement pour les effets vasculaires (88,7 %) et neurologiques (70,3 %) (Toupet et al., 2002). Dans 34 % des cas, ce traitement pouvait être accompagné d'une rééducation. Une faible proportion de praticiens proposait une prise en charge psychologique (3,4 %). Or, une revue systémique sur l'efficacité de l'acétylleucine (Tanganil®), dans le traitement symptomatique des vertiges, a révélé une charge économique importante de ce médicament qui aurait coûté 6 millions d'euros en 2016 alors que sa pharmacodynamie et son efficacité clinique demeurent inconnues (Vanderkam et al., 2019). Une analyse des ordonnances pour la betahistine a souligné une augmentation de la dose annuelle chez les hommes et les femmes en France ; en 2022, une dose en mg plus élevée a été observée, chez les personnes âgées de 60 et plus, comparé aux années précédentes (5 206,46 mg en 2014 vs. 5 750,17 mg en 2022) (Grill et al., 2024). De plus, une revue menée par Kovacs et al., (2019) a révélé une tendance croissante des coûts directs des soins de santé associés au syndrome vertigineux, en raison du vieillissement de la population. Il existe trois facteurs principaux : (1) des consultations fréquentes ponctuées d'incertitudes et de diagnostics erronés à tous les niveaux, (2) l'utilisation

inadéquate et excessive de l'imagerie diagnostique et (3) le recours inutile aux soins d'urgence. En raison de leur forte prévalence, les vestibulopathies constituent un poids socio-économique conséquent pour le système de santé, examen, particulièrement en raison du vieillissement démographique.

A ce jour, il n'existe aucun bilan multimodal évaluant l'étendue des symptômes, de manière globale, des patients vestibulaires (Chabbert, 2013). De plus, les méthodes d'évaluation actuelles présentaient certaines limitations qui aboutirait à une errance médicale pouvant durer plusieurs années. L'examen clinique du patient est parfois trop peu sensible pour détecter des troubles fins, en particulier psychocognitifs, entraînant pourtant des répercussions dramatiques en termes d'activités sociales, familiales et professionnelles. Actuellement, l'évaluation des capacités perceptivo-motrices et neuropsychologiques reste pauvrement évaluée alors que la présence de ces déficits a été largement démontrée par de nombreuses études. La nature multidimensionnelle des vestibulopathies, et plus spécifiquement du PPPD, complique l'évaluation de la problématique propre à chaque patient lors de l'observation clinique, en raison des difficultés persistantes à identifier précisément le profil psycho-cognitif des patients. Ainsi, ces facteurs nécessiteraient une plus grande attention en clinique étant donné la large hétérogénéité des symptômes et leur degré d'expression. Le diagnostic des vestibulopathies chroniques présentent des enjeux liés à la complexité sémiologique (symptômes non spécifiques) et au manque de sensibilité des tests (faible qualité métrologique) ainsi que des problématiques relatives au manque de centres spécialisés et au diagnostic erroné. Il est nécessaire de proposer une approche multidisciplinaire avec une stratégie d'amélioration par le développement de nouvelles mesures plus sensibles et écologiques.

Ce travail vise à proposer une évaluation multimodale, en utilisant une approche plus écologique pour augmenter la sensibilité de l'examen du patient. Cette évaluation pourrait avoir plus d'applications possibles. Dans ce manuscrit, nous présenterons un nouveau dispositif, intégrant la réalité virtuelle, à destination du système de santé. Il nous semble pertinent de présenter le contexte industriel dans le secteur de la santé, par une analyse de la situation actuelle, des besoins et du développement stratégique de ce nouvel outil.

– Chapitre 1 –

B) Contexte industriel

1. Implantation de technologies innovantes et flexibles

L'émergence d'une nouvelle ère industrielle 4.0 a été caractérisée par la convergence vers un monde de plus en plus numérique marqué par une intégration technologique remarquable, dans notre vie quotidienne, de différents outils innovants et automatisés tels que les systèmes robotisés, l'intelligence artificielle ainsi que la réalité augmentée et virtuelle. Parmi les grands enjeux médicaux et sociétaux du XXI^e siècle figurent le vieillissement de la population, l'augmentation des maladies chroniques, l'accroissement des dépenses de santé et l'intégration des outils numériques relatifs à la prise en charge du patient (de la prévention jusqu'au suivi). Pour répondre à ces enjeux, un budget de 7 milliards d'euros a été mobilisé pour favoriser les investissements dans le cadre de l'Innovation Santé 2030¹⁵. Dans la filière Healthtech française, 34% d'entreprises développent des outils numériques et 39% sont à destination du système de santé (Figure 10. A et B.). La R&D demeure le premier domaine d'activités avec 60 % des dépenses consacrées¹⁶. Ces entreprises ont pour volonté d'optimiser la prise en charge des patients (dépistage précoce, réduction des complications, optimisation du parcours de soin) et de proposer des soins plus adaptés et pertinents afin d'améliorer l'espérance de vie et augmenter l'autonomie des patients (Figure 10. C.).

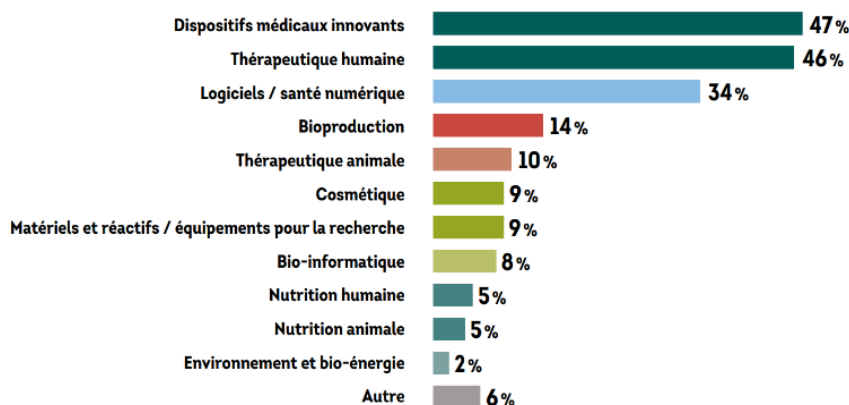
Ainsi, l'implantation de nouvelles technologies innovantes et flexibles, telles que les logiciels associés ou pas à d'autres équipements, représente un investissement attractif tant pour les entreprises que pour les établissements de santé. Dans cette partie, nous nous intéressons à l'implantation de nouvelles technologies dans l'industrie de la santé, plus spécifiquement les outils numériques à destination du système de santé (logiciels et plateformes). Dans un premier temps, nous réaliserons une analyse de la situation industrielle actuelle en nous focalisant sur les moyens d'évaluation des composantes perceptivo-motrices. Dans un deuxième temps, nous décrirons les perspectives industrielles en analysant un cas spécifique de logiciels utilisés pour l'évaluation de troubles de l'équilibre et de déficits cognitifs.

¹⁵ Bruxer M. (2023, 14 avril). *Quels sont les chiffres à retenir sur le secteur de la santé en France?*. Bpifrance. Consulté le 19 avril 2024, de <https://bigmedia.bpifrance.fr/infographies/quels-sont-les-chiffres-a-retenir-sur-le-secteur-de-la-sante-en-france>

¹⁶ Dechaud C. & Evans C. France Biotech. Dossier Panorama France Healthtech 2023. 21^{ème} édition. p. 20.

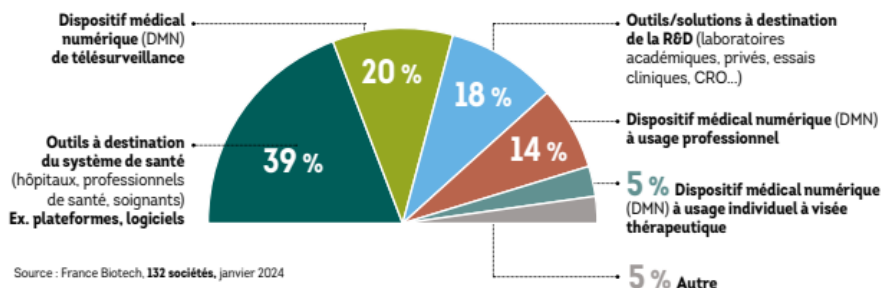
A

DOMAINES D'ACTIVITÉS DES ENTREPRISES (% D'ENTREPRISES)



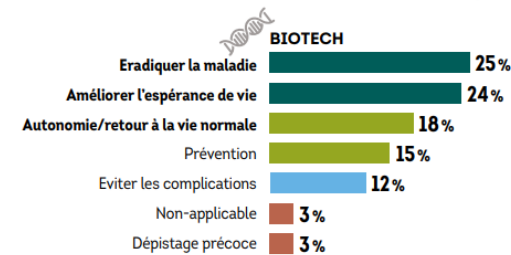
B

UTILISATEURS DE SOLUTIONS ET PRODUITS DE SANTÉ NUMÉRIQUE (% DE PRODUITS)

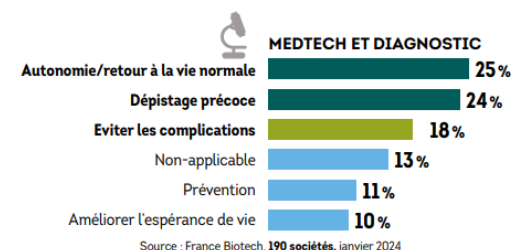


C

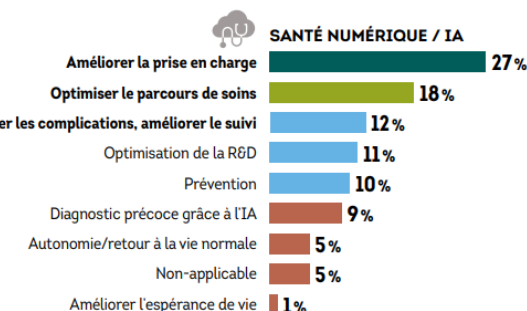
FINALITÉS DES TECHNOLOGIES DÉVELOPPÉES (% PRODUITS)



Source : France Biotech, 63 sociétés, janvier 2024



Source : France Biotech, 190 sociétés, janvier 2024



Source : France Biotech, 122 sociétés, janvier 2024

Figure 11. Représentation A) les domaines d'activité, B) les finalités des outils technologiques et C) les utilisateurs de solutions et produits de santé numérique. Source : France Biotech. Dossier Panorama France Healthtech 2023. 21^{ème} édition. p. 21-22 & p. 28.

1.1. Analyse de la situation industrielle, relative au domaine de la santé

Dans le secteur industriel, certains équipements ont fait l'objet d'un dépôt de brevet étant donné que leur pertinence clinique avait été démontrée à travers des preuves scientifiques. Ces équipements représentaient de nouvelles inventions apportant une solution objective et efficace à une problématique rencontrée dans le domaine de la santé. Un brevet est défini comme un dispositif qui « protège une innovation technique, c'est-à-dire un produit ou un procédé qui apporte une solution technique à un problème technique donné. L'invention pour laquelle un brevet pourra être obtenu doit également être nouvelle, impliquer une activité inventive et être susceptible d'application industrielle. De nombreuses innovations peuvent faire l'objet d'un dépôt de brevet, à

condition de répondre aux critères de brevetabilité et de ne pas être expressément exclues de la protection par la loi. Certaines inventions ne sont pas brevetables mais peuvent faire l'objet d'autres types de protection, comme le droit d'auteur ou le dépôt de dessins et modèles. »¹⁷. Au cours des dernières décennies, un nombre important d'outils instrumentés a été conçu et breveté pour proposer une évaluation objective du contrôle postural. Parmi ces outils, nous retrouvons les plateformes de posturographie, qui sont couramment utilisées dans la littérature scientifique. En effet, nous constatons que les plateformes statiques les plus utilisées sont celles fabriquées par AMTI (AMTI, Watertown, MA, USA) et Kistler (Kistler, Winterthur, Suisse). D'autres alternatives à prix abordable existent comme la Wii Balance Board (WBB ; Nintendo, Kyoto, Japon). Comme évoqué précédemment, les plateformes de posturographie dynamique de NeuroCom International sont les plus rencontrées et utilisées dans la littérature sur la stabilité posturale (gold standard). Le développement technologique récent a également permis de proposer des équipements associés à des systèmes logiciels plus poussés pour augmenter la sensibilité des tests et la flexibilité de leur utilisation. Nous retrouvons de nombreux paradigmes proposés, en termes de solutions logicielles, pour évaluer le contrôle postural et la cognition spatiale. Cependant, les logiciels représentent un cas particulier, par rapport aux plateformes, car ils sont régis uniquement par le droit d'auteur. Ainsi, les plateformes et les logiciels sont encadrés différemment par la propriété intellectuelle (industrielle pour les plateformes, littérature et artistique pour les logiciels).

Dans un premier temps, il nous a semblé pertinent de mettre en lien les observations scientifiques avec une bref historique des brevets. Comme précisé, ces dépôts de brevets s'appliquent uniquement aux plateformes. Nous constatons que la majorité des dépôts de brevet concerne les plateformes de posturographie assignées à la société Neurocom International, Inc. Un récapitulatif non-exhaustif de ces brevets est présenté dans le tableau 1 ci-dessous.

Brève historique des brevets

Le concept de posturographie dynamique (en anglais, Computerized Dynamic Posturography ou CDP) a été développé par Nashner (*NASHNER Lewis M. Apparatus and method for sensory integration and muscular coordination analysis. Brevet US4738269. 19 avril 1988*), ainsi que la méthodologie d'analyse des réponses posturales (*NASHNER Lewis M. Analyses of posture responses. Brevet WO1990006082A1. 14 juin 1990*). Cette invention permet l'étude quantitative des processus sensoriels et moteurs du contrôle postural mis en place par un individu et ses stratégies adaptatives face à des situations perturbantes. Elle vise à : 1) analyser les données sur la capacité

¹⁷ Définition du brevet publiée le 9 février 2021. Source : L'Institut national de la statistique et des études économiques. Consulté le 20 avril 2024, de <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2054>

à maintenir l'équilibre et à s'adapter à des conditions contraignantes, tant sur le plan biomécanique que sensoriel, 2) comparer les résultats de l'analyse à une base de données normatives, et 3) afficher les résultats sous un format facilitant l'interprétation par les cliniciens. L'étude quantitative de l'équilibre est permise par la présence de capteurs de pression, situés aux extrémités de la plateforme, qui transmettent des informations, sous forme de signaux électriques, vers un ordinateur permettant la visualisation numérique ou graphique des processus de contrôle postural.

Tableau 1. Récapitulatif non-exhaustif des brevets pour la posturographie.

Signet	Titre	Assignment	Inventeur(s)	Date de publication
WO-8804909-A2	Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology	Neurocom International, Inc.	Lewis M. Nashner	14/07/1988
WO-9006082-A1	Analysis of posture responses	Neurocom International, Inc.	Lewis M. Nashner	14/06/1990
US-5052406-A	Apparatus and method for movement coordination analysis	Neurocom International, Inc.	Lewis M. Nashner	01/10/1991
US-5269318-A	Apparatus and method for movement coordination analysis	Neurocom International Inc.	Lewis M. Nashner	14/12/1993
US-5303715-A	Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology	Neurocom International, Inc.	Lewis M. Nashner, F. Owen Black, David J. Lilly	19/04/1994
US-2006264786-A1	Method and system for analyzing status of balance functions in patients with acute neurological disorders	Nashner Lewis M	Lewis Nashner	23/11/2006
US-2007093989-A1	Method and Apparatus for Reducing Errors in Screening-Test Administration	Neurocom International, Inc.	Lewis Nashner	26/04/2007
US-2007135265-A1	Apparatus and Method for Characterizing Contributions of Forces Associated with a Body Part of a Subject	Neurocom International, Inc.	Lewis Nashner	14/06/2007
US-8643669-B1	Measurement and testing system	Bertec Corporation	Todd Christopher Wilson, Necip Berme	04/02/2014
US-8902249-B1	Measurement and testing system	Bertec Corporation	Todd Christopher Wilson, Necip Berme	02/12/2014
US-9081436-B1	Force and/or motion measurement system and a method of testing a subject using the same	Bertec Corporation	Necip Berme, Scott Zerkle Barnes, Lewis Michael Nashner	14/07/2015
US-9168420-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Haluk Ay	27/10/2015
US-9200897-B1	Measurement and testing system	Bertec Corporation	Todd Christopher Wilson, Necip Berme	01/12/2015

US-9526443-B1	Force and/or motion measurement system and a method of testing a subject	Bertec Corporation	Necip Berme, Scott Zerkle Barnes, Lewis Michael Nashner	27/12/2016
US-9526451-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme	27/12/2016
US-9770203-B1	Force measurement system and a method of testing a subject	Bertec Corporation	Necip Berme, Scott Zerkle Barnes, Lewis Michael Nashner	26/09/2017
US-9814430-B1	System and method for measuring eye movement and/or eye position and postural sway of a subject	Bertec Corporation	Necip Berme, Kamran Barin	14/11/2017
US-9829311-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Todd Christopher Wilson, Necip Berme, Jan Jakub Ober	28/11/2017
US-10010286-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Scott Zerkle Barnes	03/07/2018
US-10117602-B1	Balance and/or gait perturbation system and a method for testing and/or training a subject using the same	Bertec Corporation	Necip Berme, Jaswandi Tushar Pitale, Scott Zerkle Barnes, Qian Wang	06/11/2018
US-10231662-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, David James Oravec, Aysun Gokoglu	19/03/2019
US-10331324-B1	Measurement and testing system	Bertec Corporation	Todd Christopher Wilson, Necip Berme	25/06/2019
US-10342473-B1	System and method for measuring eye movement and/or eye position and postural sway of a subject	Bertec Corporation	Necip Berme, Scott Zerkle Barnes	09/07/2019
US-10413230-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Jaswandi Tushar Pitale, Qian Wang	17/09/2019
US-10527508-B2	Force measurement system and a method of calibrating the same	Bertec Limited	Necip Berme, Sasan Ghassab, Jan Jakub Ober	07/01/2020
US-2020139229-A1	Force Measurement System	Bertec Limited	Necip Berme, Sasan Ghassab, Mohan Chandra Baro	07/05/2020
US-10646153-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Jaswandi Tushar Pitale, Mohan Chandra Baro	12/05/2020
US-10736545-B1	Portable system for vestibular testing and/or training of a user	Bertec Corporation	Necip Berme, Cameron Scott Hobson, Qian Wang	11/08/2020
US-10856796-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Jaswandi Tushar Pitale	08/12/2020
US-10966606-B1	System and method for measuring the head position and postural sway of a subject	Bertec Corporation	Necip Berme	06/04/2021
US-11052288-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Jaswandi Tushar Pitale, Cameron Scott Hobson, Mohan Chandra Baro, Fernando Vanderlinde dos Santos	06/07/2021
US-11054325-B2	Force measurement system	Bertec Limited	Necip Berme, Sasan Ghassab	06/07/2021
US-2021333163-A1	Force Measurement System	Bertec Limited	Necip Berme, Sasan Ghassab	28/10/2021
US-11311209-B1	Force measurement system and a motion base used therein	Bertec Corporation	Necip Berme, Sasan Ghassab	26/04/2022

US-11458362-B1	Swing analysis system	Bertec Corporation	Necip Berme, Cameron Scott Hobson, Cal Thomas Haefke	04/10/2022
US-11540744-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme	03/01/2023
US-11604106-B2	Force measurement assembly	Bertec Limited	Necip Berme, Sasan Ghassab	14/03/2023
US-11705244-B1	Force and/or motion measurement system that includes at least one camera and at least one data processing device configured to execute computer executable instructions for determining a position and/or movement	Bertec Corporation	Necip Berme	18/07/2023
US-11816258-B1	Head-mounted display system	Bertec Corporation	Necip Berme, Murat Kerim Berme, Fernando Vanderlinde dos Santos, Todd Christopher Wilson	14/11/2023
US-11857331-B1	Force measurement system	Bertec Corporation	Necip Berme, Aysun Gokoglu	02/01/2024
US-11865407-B1	Measurement and testing system	Bertec Corporation	Necip Berme, Murat Kerim Berme, Fernando Vanderlinde dos Santos, Geoffrey Lee Brown	09/01/2024

Le développement d'un tel système a abouti à la conception de la plateforme dynamique EquiTest. Ce système se compose de deux plateformes de force mesurant les forces exercées par chacun des pieds du sujet et d'une enceinte visuelle autour de son champ de vision. La plateforme et le support visuel peuvent tourner autour d'un axe, à travers l'interface informatique sur laquelle sont affichés les résultats obtenus à partir d'algorithmes mathématiques intégrés. Entre autres, l'ordinateur calcule et enregistre les valeurs relatives aux déplacements antéro-postérieurs. La plateforme a une double fonction : elle évalue les oscillations posturales, en mesurant les forces au niveau de la cheville, et induit des mouvements rotationnels et translationnels verticaux. Elle comporte quatre capteurs de force à résistance, permettant de mesurer la différence de force entre les capteurs antérieur et postérieur de chaque côté. La force résultante est produite à partir de l'amplification et la sommation de ce signal différentiel. Les oscillations posturales sont mesurées par le système câblé avec deux potentiomètres. Le support de la plateforme peut avoir un mouvement autour d'un axe colinéaire par rapport à la cheville et un roulement mécanique permet les translations antéro-postérieures. Nashner a mis en place un protocole pour caractériser le profil sensoriel lors de l'évaluation du contrôle postural. Cette invention permet l'étude quantitative des processus sensoriels et moteurs du contrôle postural mis en place par un individu et ses stratégies adaptatives face à des situations perturbantes par une évaluation à travers des tests d'organisation sensorielle (SOT), de coordination motrice (MCT) et des limites de stabilité (LOS). L'étude quantitative est permise par la présence de capteurs de pression, situés

aux extrémités de la plateforme, qui transmettent des informations, sous forme de signaux électriques, vers un ordinateur permettant la visualisation numérique ou graphique des processus du contrôle postural.

Le Test d'Organisation Sensorielle (SOT) a été développé pour mesurer les déplacements antéro-postérieurs et latéraux au cours d'une série de six essais de vingt secondes (yeux ouverts, yeux fermés, support visuel asservi et plateforme stable, yeux ouverts et plateforme instable, yeux fermés et plateforme instable, support visuel et plateforme asservis). Ce test est couramment utilisé dans la recherche. Le protocole X correspond à la condition yeux ouverts avec plateforme asservie alors que les yeux sont fermés avec plateforme asservie dans le protocole Y (contrôle sensoriel direct). Le protocole Z correspond à la condition support visuel et plateforme asservis (contrôle sensoriel adaptatif). L'index de stabilité mesuré correspond à l'amplitude moyenne des déplacements antéro-postérieurs au cours d'un intervalle de temps donné. Deux critères ont été définis pour déterminer quatre catégories de profil (I, II, III, IV) :

- « direct sensory control » ou contrôle sensoriel direct : capacité à maintenir l'équilibre lorsque les entrées proprioceptives (mouvement antéro-postérieur) et visuelles sont perturbées.
- « adaptive sensory control » ou contrôle sensoriel adaptatif : capacité à maintenir l'équilibre lorsque le mouvement antéro-postérieur est perturbé et l'information visuelle est incorrecte.

En collaboration avec Nashner, Bertec Corporation (Columbus, OH US) a développé une autre plateforme dont la description la plus récente est présentée dans le brevet US 10,856,796 B1 (*BERME, Necip & PITALE, Jaswandi Tushar. Force Measurement System. Brevet US 10,856,796 B1. 8 décembre 2020*). Cette plateforme de posturographie représente la nouvelle génération de CDP et comprend une plateforme de force qui est fonctionnellement couplée à un dispositif d'acquisition de données/traitement de données, qui à son tour, est couplé à un support visuel et écran d'affichage. La plateforme de force se présente sous la forme d'une double plateforme dynamique comprenant deux plateaux auxquels sont associés des capteurs de force. La double plateforme dynamique peut effectuer des mouvements translationnels et rotationnels. Il y a quatre capteurs de force de « type pylône » qui sont disposés à proximité de chacun des quatre coins du premier plateau et du deuxième plateau. Le dispositif d'affichage visuel comprend un projecteur, un miroir généralement sphérique (un miroir incurvé de manière convexe qui a la forme d'une pièce découpée sur une surface sphérique), et un écran de projection concave généralement hémisphérique avec un rayon. L'écran de projection est capable de créer un environnement visuel

complètement immersif. L'écran de projection englobe entièrement la vision périphérique du sujet. Le contrôleur logique programmable convertit le centre de pression calculé (COP) en un centre de gravité (COG) à l'aide d'un filtre de Butterworth. Il calcule également un angle d'oscillation en utilisant une valeur corrigée du centre de gravité (COG'). Cette valeur est ajustée pour tenir compte de la position décalée du sujet par rapport à l'origine de l'axe de coordonnées du plateau de force. Il existe de nombreuses plateformes de posturographie statiques et dynamiques. Nous avons répertorié celles qui sont les plus rencontrées et utilisées, d'après nos observations scientifiques. Comme indiqué, les données provenant des plateformes sont intégrées au sein d'une interface informatique (ou logiciel). Ces informations doivent être affichées, d'une manière intelligible et interprétable, par les utilisateurs. Pour favoriser une valorisation par les utilisateurs dans le domaine de la santé, les logiciels doivent répondre à certains besoins en termes de flexibilité, d'utilisabilité et d'automatisation. Les caractéristiques fonctionnelles demeurent donc un élément important à considérer. En effet, ce sont ces caractéristiques qui vont rendre les solutions logicielles innovantes et attrayantes par rapport aux performances d'acquisition, d'analyse et de gestion des données.

Caractéristiques techniques et fonctionnelles

Dans un deuxième temps, nous nous sommes donc intéressés aux logiciels permettant l'analyse de la performance posturographique et spatiale. Pour la performance posturographique, nous retrouvons les plateformes qui sont communément utilisées par les professionnels de santé et les chercheurs. Le tableau numéro 2 présente les caractéristiques techniques et fonctionnelles de ces plateformes ainsi que les logiciels associés, l'origine et la certification. Elles sont composées de capteurs de force qui permettent de mesurer et convertir les signaux en données sur les oscillations posturales grâce aux algorithmes intégrés dans le logiciel. Les plateformes statiques sont des outils simples et compacts pouvant être utilisés avec ou sans mousse. Cependant, ces dernières ne permettent pas une analyse plus poussée des différentes composantes de la stabilisation. De ce fait, des plateformes dynamiques ont été développées pour approfondir l'analyse des capacités posturales, comme indiqué dans les précédents paragraphes. En effet, ces plateformes intègrent des mouvements mécaniques et visuels permettant de perturber les informations sensorielles impliquées dans la stabilisation. D'une part, le support visuel est souvent composé d'un écran pour une visualisation 2D (par exemple Equitest) ; mais ces dernières années, un dispositif immersif a été aussi intégré grâce aux avancées technologiques (par exemple Bertec). D'autre part, les mouvements mécaniques sont programmables via l'interface informatique. Ils correspondent à des mouvements translationnels

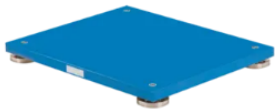




et rotationnels antéro-postérieurs. Le développement de ce support mécanique est majoritairement issu des plateformes brevetées vu précédemment. Ainsi, un support visuel et mécanique contrôlable et quantifiable vient compléter les caractéristiques techniques des plateformes. Ce sont donc des outils plus encombrants et chers. Pour rendre le matériel plus attrayant, des logiciels spécifiques ont été développés avec ces outils afin de proposer des tests standardisés, une interprétation automatisée des résultats et une gestion simple des bases de données. Ces caractéristiques fonctionnelles contribuent à la flexibilité, l'utilisabilité et l'automatisation de ces outils en posturographie.

De même, de nombreuses boîtes à outils (ou logiciels) ont été développées en cognition spatiale pour faciliter leurs utilisations dans le domaine de la santé, par des individus n'ayant aucune expérience en programmation. Ces logiciels peuvent aussi proposer une visualisation 2D ou immersive mais leur développement tend davantage vers l'utilisation des environnements virtuels à cause des contraintes liées à l'étude de la navigation spatiale dans un contexte naturel. Les logiciels doivent répondre aux mêmes exigences que ceux utilisés en posturographie, à savoir la flexibilité, l'utilisabilité et l'automatisation. D'après Wolfel et al. (2021), la valorisation de ces logiciels dépend des fonctionnalités suivantes que nous illustrerons en utilisant des exemples : conception/contrôle (design et customisation de protocoles), configuration à distance (utilisation hors laboratoire), compatibilité avec d'autres équipements, interface utilisateur et de visualisation (qualité de l'affichage) et gestion des données (export et analyse). De manière générale, les solutions logicielles sont développées en utilisant des moteurs de développement nécessitant une compréhension en programmation tels que Python (PyEPL ; Geller et al., 2007L ; Geller et al., 2007, Panda3D (PandaEPL ; Solway et al., 2013 ou Unity (Unity Experiment Framework ; Brookes et al., 2020. Ces outils présentent de nombreux avantages mais leur utilisation peut être difficile pour des individus non-experts. De ce fait, des packages ne requérant aucune programmation ont été proposés tels que Landmarks (Starrett et al., 2021 qui permet de créer facilement des environnements dans le moteur Unity par glisser-déposer. Le Virtual Navigation Toolbox ou VNT est une autre solution logicielle facilitant la conception et le contrôle de protocoles de navigation virtuelle (Müller et al., 2023. Cette boîte à outils propose aux utilisateurs la possibilité de créer de nouvelles conceptions expérimentales par la réutilisation du code pour une prise en main efficace et rapide. Ces fonctionnalités ne sont pas intégrées dans d'autres logiciels tels que MazeSuite (Ayaz et al., 2011, NavWell (Commins et al., 2020 et VREX (Vasser et al., 2017. Ces derniers proposent des environnements spécifiques, comme les labyrinthes couramment utilisés, pour évaluer la navigation spatiale mais cette spécificité entraîne un manque de flexibilité dans la conception de nouveaux protocoles. Pour la gestion des données, le logiciel MazeSuite comporte

aussi des composantes, MazeWalker pour l'interface de visualisation et LazeViwer pour la gestion des données. De même, il a été noté que peu de logiciels proposaient un feedback lors de la passation des protocoles. Ce feedback se traduit par un rétrocontrôle après le déclenchement d'un stimulus permettant une adaptation comportementale lors de la navigation. Cette fonctionnalité a été proposée dans le logiciel Delayed feedback-based immersive navigation environment ou DeFINE (Tiwari et al., 2021). L'interface de visualisation est souvent un environnement virtuel présenté sur l'ordinateur (en anglais, VR-desktop) ou dans un casque de réalité virtuelle. Ce constat a amené au développement du logiciel DomeVR (pre-print, Shapcott et al., 2022 pour l'utilisation d'un dôme immersif. L'ensemble de ces outils est compatible avec d'autres équipements et permet une gestion de données rapide.

Ainsi, nous observons qu'il existe un nombre important d'outils pour évaluer le comportement perceptivo-moteur. Or, cette variété matérielle et logicielle rend la généralisation et la standardisation difficiles malgré la flexibilité et la richesse méthodologique de ces outils. Un outil doit répondre à des exigences métrologiques importantes et offrir des valeurs de références précises pour soutenir la démonstration de conformité aux exigences de sécurité et de performance cliniques.

Tableau 2. Présentation des plateformes de posturographie statiques et dynamiques disponibles sur le marché.

<div> <div>Modèles statiques</div> <div>Description</div> </div>		Type 9260AA Kristler	OR6-7 AMTI	Wii Balance Board
				
Matériel	Dimensions (cm)	298.5 x 500 x 50	50 x 50 x13	511 x 316 x 53.2
Logiciel	Modes	Evaluation et rééducation	Evaluation et rééducation	Divertissement, Evaluation et rééducation
	Paramètres personnalisables	Logiciel BioWare Protocoles de recherche	Logiciel BalanceClinic Logiciel BioAnalysis Logiciel BalanceTrainer	Logiciel WiiFit Jeux vidéo, Protocoles de recherche
	Gestionnaire patients	Sauvegarde sur une base de données spécifique	Sauvegarde sur une base de données spécifique	Sauvegarde sur une base de données spécifique
Origine		Kistler Group	Advanced Mechanical Technology, Inc.	Nintendo
Certification				
<div> <div>Modèles dynamiques</div> <div>Description</div> </div>		Multitest Equilibre (Balance Quest – USA)	Smart Balance Master, Smart EquiTest	Bertec CDP/IVR
				
Matériel	Dimensions (cm)	135 x 155 x 239 Support visuel : 107 x 91 x 188	46,4 x 50,8 x 8,255 Support visuel : 187,96 L x 106,68 P x 266,7H	46,4 x 50,8 x 8,255 Support visuel : 187,96 L x 106,68 P x 266,7H

		Marchepied : 15	Marchepied : 10	Marchepied : 10
	Capacité (kg)	200	226	226
	Eléments inclus	Plateforme de force dynamique (rotation et translation) Entourage visuel mobile avec écran LCD et éclairage Barre de soutien au-dessus de la tête avec ensemble de harnais pour patient Ordinateur sous Windows® Deux moniteurs LCD pour l'opérateur et le patient Imprimante couleur Souris sans fil Chariot de point de service ergonomique Kit de harnais (Tailles : S/M/L) Coussin en mousse : 46 x 46 x 13 cm Les blocs P102604-00 pour Prepkit comprennent : Plaque à bascule Blocs éleveurs : 10 cm et 15 cm Bloc de nivellement : 5 cm Talon/orteils compensés : 6° et 12° A/P Cales d'inversion/éversion : 3° et 6° M/L	Ordinateur dédié Moniteur à écran tactile Clavier sans fil et dispositif de pointage/souris Imprimante couleur Base dynamique avec plaque de force à double équilibrage Écran immersif surround visuel avec projecteur LCD Structure de harnais de sécurité intégrée Poste de travail clinicien réglable en hauteur Un an pièces et main-d'œuvre avec assistance continue Coussin d'équilibre en mousse 46 x 50 x 10 cm	Ordinateur dédié Moniteur à écran tactile Clavier sans fil et dispositif de pointage/souris Imprimante couleur Base dynamique avec plaque de force à double équilibrage Écran immersif surround visuel avec projecteur LCD Structure de harnais de sécurité intégrée Poste de travail clinicien réglable en hauteur Un an pièces et main-d'œuvre avec assistance continue Coussin d'équilibre en mousse 46 x 50 x 10 cm
Logiciels	Modes	Evaluation et rééducation	Evaluation et rééducation	Evaluation et rééducation
	Paramètres personnalisables	Logiciel Multitest Logiciel Frami3D	Logiciel NeuroCom Balance Manager Clinical	Logiciel Bertec Balance Advantage
	Tests d'évaluation disponibles	Test d'organisation sensorielle (SOT) Mesures centre de gravité (COG) Test d'adaptation (ADT)	Dynamique : Test d'organisation sensorielle (SOT) Test de contrôle moteur (MCT)	Dynamique : Test d'organisation sensorielle (SOT) Test de contrôle moteur (MCT)

			Test d'adaptation (ADT) Statique : Limites de stabilité (LOS) Test des mouvements rythmiques (Rhythmic Weight Shifts, RWS) Test de stabilité monopodale (Unilateral Stance, US) Test de répartition du poids du corps (Weight Bearing Squat, WBS)	Test d'adaptation (ADT) Statique : Limites de stabilité (LOS) Test des mouvements rythmiques (Rhythmic Weight Shifts, RWS) Test de stabilité monopodale (Unilateral Stance, US) Test de répartition du poids du corps (Weight Bearing Squat, WBS)
	Gestionnaire patients	Sauvegardes sur une base de données spécifique	Sauvegardes sur une base de données spécifique	Sauvegardes sur une base de données spécifique
Origine		Framiral	Neurocom International, Inc	Bertec Corporation
Certification				

1.2. Expression des besoins

La mise en place d'un équipement de pointe nécessite une standardisation protocolaire, un échantillonnage représentatif et une validation métrologique. De ce fait, il est nécessaire d'exprimer des besoins fonctionnels, non fonctionnels et techniques en termes de valeurs de référence et de qualités métrologiques. Un instrument de mesure doit conserver ses propriétés métrologiques dans le temps ; il fait preuve de stabilité (concepts ISO/IEC Guide 99 :2007). Ces propriétés métrologiques permettent de confirmer la fiabilité (étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées, de manière répétée) et la validité (exigences adéquates pour un usage déterminé). En effet, les mesures doivent être cohérentes et maintenir leurs performances dans des conditions similaires et sur de longues périodes d'utilisation. Pour une meilleure standardisation protocolaire, l'outil doit offrir une facilité d'utilisation et d'accessibilité aux utilisateurs. Un respect des normes réglementaires est nécessaire pour son utilisation et validation clinique. Sa validation clinique peut se baser sur une base de données normatives qui permet de fournir des valeurs de référence pour la comparaison entre une population asymptomatique et pathologique. Cette base de données normatives repose sur des caractéristiques méthodologiques prédéfinies et une qualité et fiabilité des données. Les caractéristiques méthodologiques concernent la mise à disposition des données démographiques, la précision des paramètres de mesure et le respect des conditions contrôlées et uniformes. Des procédures rigoureuses et une actualisation des données sont nécessaires pour garantir une bonne qualité métrologique et refléter les différences démographiques et techniques. Lorsque ces conditions sont respectées, une accessibilité et utilisabilité de l'outil doivent faciliter l'accès aux données de référence et leur analyse automatisée en temps réel, avec des filtres intégrés par critères. De plus, la protection et l'anonymisation des données sont primordiales pour le respect des exigences de sécurité.

Pour répondre à ces exigences, ce travail porte sur le développement et la validation d'une nouvelle plateforme de posturographie, couplée à des scénarios de réalité virtuelle. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'unité de recherche VERTEX 7480 et la société Virtualis. Nous souhaitons caractériser le profil sensoriel des personnes à partir de tests fournis par une nouvelle plateforme d'exploration dans le but de proposer une évaluation multimodale complète. Cette plateforme multisensorielle à visée diagnostic et de rééducation, a été optimisée dans le cadre d'un financement CIFRE pour établir des profils perceptivo-moteurs au sein d'une population saine et pathologique.

2. Présentation d'outils à destination du système de santé

Avec l'émergence des nouvelles technologies intégrant la réalité virtuelle, il est essentiel de considérer les forces, les limites, les opportunités et les menaces (strengths, weaknesses, opportunities, threats ; SWOT) associées à ces outils relatifs à l'étude du comportement et du mouvement humain. Une analyse SWOT est couramment utilisée dans le secteur industriel pour le développement stratégique afin d'identifier les avantages compétitifs, améliorer les processus internes, exploiter les opportunités du marché, gérer les risques et atténuer les menaces. Cette analyse contribue à la mise en place de stratégies de croissance et la gestion des ressources. Dans l'industrie de la santé, les entreprises s'intéressent aux avancées scientifiques et à la propriété intellectuelle, à l'expertise par la collaboration ainsi qu'aux capacités de production. Une analyse SWOT permet de prendre en compte ces éléments indispensables pour ces entreprises.

Dans une perspective de développement technologique, une nouvelle plateforme de posturographie intégrant la réalité virtuelle, a été conçue par l'entreprise Virtualis. A partir d'une étude des besoins, les premières ébauches sont présentées en 2008 et le premier prototype est testé en 2017 lors de l'Assise d'ORL de Nice. Une stratégie de sourcing est mise en place pour rechercher et sélectionner des fournisseurs potentiels. Ce processus aboutit à la production des plateformes et à la préparation de l'industrialisation en 2020-2021 ; tout en tenant compte des différentes contraintes (contexte sanitaire lors de la production, respect des normes de qualité, délai de la procédure de conformité CE...).

Les plateformes de posturographie, StaticVR et MotionVR (<https://virtualisvr.com>), intègrent une technologie différente de celle des concurrents : la réalité virtuelle. Ces produits de nouvelle génération peuvent néanmoins être utilisés sans la réalité virtuelle (avec un écran TV/vidéo projecteur) afin d'augmenter l'utilisabilité des équipements ; ainsi, offrant ainsi, plus de choix aux utilisateurs. Virtualis propose donc un seul outil pour de multiples applications avec de nombreux bilans posturographiques et programmes de rééducation immersifs. Les plateformes dynamiques et statiques sont composées de deux plateaux indépendants avec la répartition des appuis (G/D, avant/arrière). Il y a huit capteurs de force (4 capteurs par pied). En ce qui concerne la réactivité du plateau, la plateforme dynamique est caractérisée par trois degrés de liberté (antéro-postérieur, médio-latérale et haut/bas), une accélération 2G et une vitesse de 280 mm/s ainsi que des amplitudes de 24° avant/arrière, de 26° d'amplitude gauche/droite et d'une hauteur de 15 cm (haut/bas). Les mouvements sont contrôlés et quantifiables à 360° (hauteur du plateau en mouvement réglable). Les plateformes sont solides et peuvent supporter une charge de plus de 200 kg. Le garde-corps de la plateforme



dynamique est également réglable, offrant la possibilité de travailler avec des personnes de tailles différentes. En intégrant la réalité virtuelle avec la plateforme de posturographie dynamique, Virtualis propose une méthode d'évaluation avant-gardiste offrant une flexibilité et une utilisabilité accrue. Cette méthode facilite la passation des patients tout en augmentant leur engagement dans leur prise en charge et traitement sur le long terme. Le logiciel associé aux plateformes permet de développer et d'administrer des bilans ludiques pour diverses applications possibles. Dans le cadre de ce travail doctoral, nous avons proposé un bilan posturographique adapté à une population saine et pathologique afin de souligner la polyvalence de ces outils. De même, ces plateformes présentent un design technique avancé pour une mesure précise de l'équilibre et des caractéristiques de mouvements différentes de celles des plateformes concurrentes : dynamique avec trois degrés de liberté (antéro-postérieur, médio-latéral, haut/bas) et réactive (accélération de 2G, vitesse de 280 mm/s). De plus, la robustesse des plateformes (support charge de plus de 200g), la réglabilité (hauteur du plateau) et la quantifiabilité (mouvements contrôlés et quantifiables à 360°) sont des éléments considérables du design moderne. Cependant, la conception d'un tel outil peut s'avérer coûteuse en raison des matériaux utilisés et de la nécessité d'une main d'œuvre techniques compétente et formée pour l'installation, la gestion des problèmes informatiques et la formation des partenaires cliniques et scientifiques. Malgré ces quelques défis surmontables, cet outil permet de répondre à une demande croissante pour les nouvelles technologies dans le secteur de la santé et d'investir dans la R&D en développant des nouveaux protocoles et de les valider cliniquement. Cet investissement contribue au renforcement des opportunités de financement par des subventions telles que la convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE). De plus, la R&D offre la possibilité de créer des programmes personnalisés et d'intégrer des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle. Néanmoins, il existe une forte concurrence technologique étant donné les avancées dans le domaine de la posturographie depuis l'invention du CDP. Les réglementations dans le secteur de la santé peuvent aussi imposer des contraintes supplémentaires tant que l'utilité clinique n'aura pas été définie.

Les forces de ces plateformes correspondent à son design avancé, sa robustesse et sa flexibilité. Cependant, son utilisation peut présenter quelques limites : coût élevé, complexité technologique, acceptation clinique. Or, le secteur de la santé peut bénéficier d'une telle technologie tant que les opportunités de recherche, de financement et de personnalisation des traitements sont exploitées pour transformer la prise en charge et le suivi thérapeutique des patients atteints de troubles de l'équilibre.

Chapitre 2

2

| Mise en place méthodologique

L'objectif de ce deuxième chapitre est la standardisation protocolaire, la mise en place d'un échantillonnage représentatif et la validation métrologique de la plateforme MotionVR.

Etude n° 1 : Compte-rendu de valeurs de référence issues de l'analyse posturographique instrumentée.

Etude n°2 : Valeurs de référence avec le système de mesure MotionVR.

Etude n°3 : Qualités métrologiques du système de mesure MotionVR.

– Chapitre 2 –

Application à une population saine : Évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration intégrant la réalité virtuelle.

Dans le secteur de la santé, il existe plusieurs méthodes et techniques pour réaliser l'évaluation de l'équilibration dans des conditions statiques et dynamiques. Ces méthodes comprennent une analyse de l'équilibre par une plateforme de posturographie, une analyse photographique (statique rachidienne), une analyse des appuis (plateforme de podologie) et une analyse de la marche. Nous nous concentrerons ici sur les plateformes de posturographie, en rapport avec le sujet, pour répondre aux objectifs de cette thèse. Ces plateformes comprennent une variété de paramètres pour déterminer les profils sensoriels direct ou adaptatif. Ces éléments complexifient l'évaluation posturale, ce qui ne facilite pas leur utilisation dans la pratique clinique. De plus, ces outils instrumentés doivent présenter de bonnes qualités métrologiques pour démontrer leur utilité clinique. A ce jour, les limitations de l'évaluation instrumentée sont nombreuses malgré le développement technologique accru. Bloem et collaborateurs (2003) rapportent plusieurs limites de la posturographie, notamment l'utilisation du harnais, le manque de données sur la fiabilité test-retest, le surcoût et la complexité de cette technique difficilement utilisable en pratique clinique. Dans la revue de Visser et collaborateurs (2008), des limites liées à la population étudiée, la collecte et l'interprétation des données de la posturographie sont également présentées, à savoir la grande variabilité inter et intra-individuelle, le manque de sensibilité et de spécificité des mesures. Les auteurs recommandent l'inclusion de groupes de patients homogènes en termes de diagnostic (sévérité et stadification de la maladie), la détermination de la fiabilité, de la sensibilité et de la spécificité (avec valeurs prédictives positive et négative) ainsi que la prise en compte de la validité écologique des études. De manière générale, une des limites les plus observées concerne les propriétés psychométriques en posturographie, c'est-à-dire la reproductibilité, la sensibilité, la spécificité et la fiabilité (Thoumie, 2012). Dans ce contexte, une nouvelle conception industrielle a été mise sur le marché afin de proposer une approche écologique de l'évaluation posturographique. Cette plateforme de posturographie, intégrant la réalité virtuelle, a pour volonté de répondre aux besoins du secteur de la santé, à savoir la nécessité de standardisation protocolaire, d'échantillonnage représentatif et de validation métrologique.

L'objectif de ce deuxième chapitre était de mettre en place un protocole expérimental (standardisation, normalisation, validation) permettant de proposer un équipement fiable et valide pour l'évaluation posturale. En effet, les profils sensoriels ne peuvent être établis qu'à

partir d'une standardisation protocolaire et d'une validation métrologique préalablement déterminées. Cette démarche standardisée devra renforcer la reproductibilité de l'évaluation dans la pratique clinique et l'interprétation des résultats issus de cet outil. Ce dernier doit fournir une mesure fiable et valide pour faciliter l'interprétation des valeurs à des fins de diagnostic et de prise en charge thérapeutique. Des valeurs de références seront établies pour la comparaison entre les différentes populations évaluées. Ces observations permettront de fournir des informations sur les effets du genre et de l'âge sur la fonction d'équilibration évaluée sur une plateforme de posturographie dynamique, associée à la réalité virtuelle et qui intègre un mouvement quantifiable à 360°.

La multiplicité des plateformes sur le marché industriel, des paramètres de mesure, des tâches et des facteurs influençant les capacités posturales rend difficile l'utilisation de normes existantes, à savoir celles établies pour la plateforme de Neurocom dont les effets de l'âge et du genre restent peu catégorisés. Dans ce contexte scientifique, le domaine de la posturologie manque de standardisation, alors que les plateformes sont largement utilisées, rendant difficile la comparaison des résultats et la reproductibilité. Nous avons donc réalisé une revue complète de la littérature afin de dresser un état des lieux sur la démarche protocolaire, l'échantillonnage représentatif et la validation métrologique de la posturographie instrumentée. (1) Cet état des lieux nous a permis de retenir des éléments méthodologiques à considérer dans notre protocole pour (2) établir des valeurs de référence et (3) démontrer les qualités métrologiques de fiabilité et de validité de la nouvelle plateforme. Pour évaluer l'effet du mouvement quantifiable, nous avons également complété ce chapitre par une comparaison des différents niveaux de sensibilité de la plateforme.

1. Etude 1 : Compte-rendu des valeurs de référence issues de l'analyse posturographique instrumentée.

[Soumis] [Julienne A., Verbecque E., Besnard S., 2024. Normative data for computerized posturography: a systematic review and meta-analysis.](#)

Nous avons réalisé une revue systématique avec une méta-analyse permettant de dresser un état des lieux méthodologiques et théoriques de valeurs de référence établies par le biais de la posturographie instrumentée, en condition statique et dynamique. Cet état de lieux nous a permis d'examiner les points forts et les limites pour proposer des recommandations. Il s'agit d'une première proposition de synthèse et d'analyse de la littérature scientifique utilisant une méthode qualitative et quantitative mixte, comme expliqué ci-dessous.

Dans un premier temps, nous avons effectué une analyse qualitative des caractéristiques méthodologiques. L'analyse qualitative a démontré des lacunes en termes de standardisation expérimentale et de documentation, entraînant une hétérogénéité méthodologique rendant difficile la comparaison entre les études. Seules quelques études ont établi des valeurs de références stratifiées par genre et par âge. Nous avons aussi observé qu'une large variété de tâches et de paramètres de mesure avait été utilisée, tâches et paramètres pour lesquels différentes définitions ont été données. Cette sémantique lexicale variée a complexifié l'identification des tâches standardisées et des paramètres. De plus, les conditions de mesure variaient considérablement en ce qui concernait la position des bras et des pieds, l'utilisation d'une cible visuelle, le nombre et la durée des essais ainsi que la séquence des conditions. La population était majoritairement composée d'enfants et de jeunes adultes confondus. Seules quelques études ont établi des valeurs chez les personnes âgées ainsi que chez des cohortes spécifiques d'athlètes et de militaires. Un déclin du contrôle postural lié à l'âge a été largement rapporté dans la population adulte, mais peu de données normatives sont disponibles pour les populations gériatriques et spécifiques qui sont concernées par les troubles de l'équilibre. Ainsi, un manque de représentativité peut être noté car la population incluse ne représentait pas les patients cibles vus en pratique clinique ou ceux souffrant de troubles de l'équilibre. La plupart des études n'ont pas évalué l'impact d'autres facteurs sur le contrôle postural du sujet sain. En somme, l'analyse qualitative a révélé que seules quatre études présentaient une bonne qualité méthodologique.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une analyse quantitative uniquement pour les yeux ouverts et fermés, car le nombre d'études pour les autres conditions était insuffisant. Nous avons inclus dix-sept études pour comparer les valeurs stratifiées par genre et par âge, impliquant 5 194 participants (F : 2 630 ; M : 2 564). Une méta-analyse par réseau a révélé que les enfants de moins de 8 ans étaient significativement plus instables que ceux âgés de 8 à 14 ans, dans la condition avec les yeux ouverts et yeux fermés. Une méta-analyse des

données individuelles a révélé que les femmes adultes étaient plus stables que les hommes que ce soit en condition avec les yeux ouverts ou fermés. Une différence significative n'a été observée qu'avec les yeux fermés. Les résultats ont également démontré une différence significative entre les individus âgés de 50 et 79 ans et les individus plus jeunes ; avec plus d'instabilité observée chez les personnes les plus âgées en conditions avec les yeux ouverts et yeux fermés.

De plus, nous avons évalué le niveau de certitude des preuves pour chaque comparaison à l'aide d'une application web CINeMA (Confidence in network meta-analysis). Cette dernière est utilisée pour évaluer la confiance des estimations des preuves issues de la méta-analyse par réseaux. Cet outil repose sur les six domaines suivants : biais intra-étude (risque de biais), biais de déclaration (biais de publication), caractère indirect (c'est-à-dire pertinence par rapport à la question de recherche), imprécision (comparaison de l'amplitude des effets avec l'amplitude d'équivalence) et incohérence (désaccord entre les preuves directes et indirectes). Pour l'analyse des valeurs posturographiques pendant l'enfance, le niveau de certitude était faible ou très faible pour la plupart des comparaisons, principalement en raison de biais intra-études et d'incohérences. Pour l'analyse des valeurs posturographiques à l'âge adulte, le niveau de certitude était faible ou très faible pour la plupart des comparaisons, principalement en raison de biais intra-études et de déclaration.

En d'autres termes, cette revue systématique nous a permis de souligner 1) une grande hétérogénéité dans les caractéristiques méthodologiques, 2) un risque élevé de biais, 3) une variabilité considérable en termes de définitions et d'utilisation de tâches et de paramètres. De plus, nos résultats semblent suggérer une meilleure stabilité vers l'âge de 8 ans, tandis que les adultes deviennent instables à partir de 50 ans . Par conséquent, les études devraient établir des valeurs de référence de l'ordre de la décennie pour les adultes et de l'âge biologique pour les enfants pour une meilleure estimation des troubles de l'équilibre dans la pratique clinique. De même, les futures études doivent garantir une documentation suffisante des données sociodémographiques, anthropométriques, sur la santé générale et la condition physique des participants. La standardisation des conditions expérimentales et l'harmonisation des tâches et paramètres sont encore nécessaires pour garantir une évaluation de qualité.

Normative data for computerized posturography: a systematic review and meta-analysis

Angela Julienne^{1(*)}, Evi Verbecque², Stéphane Besnard¹

¹ VERTEX Research Lab, Caen University, 1400 Caen, France

² REVAL (Rehabilitation Research Center), Faculty of Rehabilitation Sciences, Wetenschapspark 7, 3590 Diepenbeek.

ABSTRACT

Postural control is a multisensory adaptive system performing predictive (anticipatory) and/or reactive (compensatory) actions, with varying degrees of accuracy, to maintain balance in changing environmental context [1]. Common instrumentation to evaluate balance includes static and dynamic force platforms; added sway-referenced perturbations on the dynamic platform constitute its main advantage. Clinical applications notwithstanding, normative data are needed for interpretation in clinical settings. Posturography norms are used to compare a reference group (healthy individuals) and a specific patient population. To our knowledge, this work represents the first attempt to synthesize the literature on normative data for computerized posturography using a combined mixed method. The search strategy resulted in the retrieval of 1244 articles from PubMed, Web of Science and Science Direct. After deduplication, 689 papers remained and were screened based on title and abstract. One hundred and seven articles met the criteria after the first screening. In depth full text screening resulted in the inclusion of 44 studies for the systematic and 17 studies for the meta-analyses. Main findings of this systematic review are: 1) extensive heterogeneity was found in methodological characteristics, 2) there was insufficient risk of bias mitigation, 3) most tasks evaluated less than four components of the SFPC, 4) studies mostly used distance domain sway parameters and did not report the influence of other variables on postural sway. Based on the multilevel meta-analyses, females appeared to significantly outperform males in eyes closed conditions. Based on the network meta-analyses, we found that younger children swayed significantly more than those aged between 8 and 14 years in eyes open condition and closed. The results also revealed a significant difference in sway between individuals between 50 and 79 years old and younger individuals; with more instability observed in older participants in both eyes open and closed conditions. Thus, future studies need to ensure the following that enough information about participants is provided. Standardization of experimental conditions and sway parameters harmonisation are still needed to ensure high-quality assessment. Finally, evidence-based management of postural impairments require both age and gender-related normative data.

Keywords: Normative data, postural control, systematic review, meta-analysis

Conflicts of interest: None.

1. Introduction

Balance arises from a multisensory adaptive system performing predictive (anticipatory) and/or reactive (compensatory) actions, with varying degrees of accuracy, to maintain balance in changing environmental contexts (Pollock et al., 2000b). Numerous techniques and methods are employed to evaluate postural control at a functional and neurophysiological level, in static and dynamic conditions (Paillard & Noé, 2015). Basic noninstrumented tests, such as the Timed Up and Go test (Podsiadlo et al., 1991), the Berg Balance Scale (Berg et al., 1992) and the Tinetti Balance Scale (Tinetti, 1986) among others, are well known and widely used by clinicians. However, these tests give a broad overview of the functional state whereas instrumented tests offer the possibility to carry out in depth quality of movement assessment under different conditions and difficulty levels. Instrumented tests evaluating balance are carried out through computerized force platforms calculating the displacements of the centre of pressure in static and dynamic conditions (Bizzo et al., 1985). When standing and walking, the point of application of the ground reaction forces can be measured as the centre of pressure signal using linear and non-linear variables (Quijoux et al., 2021).

There are many instrumented devices available on the market for clinical and research use. Common instrumentation includes static and dynamic force platforms. Both platforms can be used to assess postural control; the added sway-referenced perturbations on the dynamic platform constitute its main advantage. These perturbations allow the evaluation of sensory integration, reweighting and the use of sensory strategies while standing and walking. The most used static platforms are laboratory-grade force plates manufactured by AMTI (AMTI, Watertown, MA, USA) and Kistler (Kistler, Winterthur, Switzerland). Other low-cost alternatives also exist such as the Wii Balance Board (WBB; Nintendo, Kyoto, Japan); which is considered a reliable and valid tool (for review, see (R. A. Clark et al., 2018)). In general, studies investigating reliability and validity of the Wii Balance Board mostly used path length as sway parameter to evaluate healthy participants. Numerous studies have used conventional force platforms manufactured by Neurocom International (Inc., Clackamas, OR U.S.A). In fact, EquiTest® device, which is a Computerized Dynamic Posturography (CDP) system, is considered a gold standard instrument. The concept of Computerized Dynamic Posturography, an apparatus and method for sensory integration and motor coordination analysis, was developed and patented by Nashner in 1988. Sensory and motor components of human postural control can be assessed by different standardized tests (Sensory Organization Test, Motor Coordination Test, Adaptation Test, Limits of Stability) for which normative data have been commercially published by manufacturers. For these tests, balance is measured using equilibrium and composite scores as well as sway energy and maximal voluntary movement parameters (e.g. directional control, reaction time).

Moreover, instrumented posturographic tools have been used to investigate balance deficits, especially in populations at higher risk of falls (Ben Achour Lebib et al., 2006; Bloem et al., 2003). As an example, the CDP's role has been widely studied in neurotology (Black et al., 1983; Horak et al., 1990; L. Nashner et al., 1994; L. M. Nashner & Peters, 1990; Wall et al., 1983). Increased instability has been reported in patients with vestibular disorders. Sensory Organization Test (SOT) results have shown that patients exhibit impaired performances during conditions 5 (fixed visual surround and sway-referenced platform) and 6 (sway-referenced visual surround and platform), which is indicative of a vestibular deficit affecting the postural functioning of the individual (Black et al., 1988). Furthermore, results of dynamic

posturography in a broad spectrum of patients with peripheral and central vestibular disorders revealed that there are varying degrees of functional capacity within each group. Psychometric properties have been studied particularly in this specific population (di Fabio, 1995, 1996; Hamid et al., 1991). Analogous to CDP, computerized static posturography, using a foam-supported platform as perturbation, also offers a low-cost and portable alternative. Thus, balance can be evaluated in eyes open and closed conditions with and without foam using the Clinical Test of Sensory Interaction on Balance (CTSIB). Increased sway was observed in patients compared to controls during foam posturography, particularly with eyes closed (i.e. considering amplitude and velocity (Baloh et al., 1998); velocity, area, and Romberg's ratio (Fujimoto et al., 2009)). In the CTSIB integrated with virtual reality, instability was condition-dependent - patients with vestibular disorders sway more during more challenging sensory conditions (i.e. foam surface, eyes closed and optokinetic stimulus)(Macedo et al., 2015).

Clinical applications notwithstanding, normative data are needed for interpretation in clinical settings. Normative data (SpringerReference) are observational data summarizing and describing characteristics of a defined population at a specific time. Posturography norms are used to compare a reference group (healthy individuals) and a specific patient population. Thus, variations between patients and healthy individuals can be observed and interpreted in a clinical setting to determine pathological profiles. Descriptive information (e.g., total sample size, age groups and gender) and statistics (e.g., median, and other summaries of distribution, indicators of central tendency and dispersion, standard scores) are needed to report such datasets. Some studies have focused on establishing reference values for computerized dynamic posturography, mostly by means of the NeuroCom EquiTest; for which normative data are already available. Normative data has also been published by the parent company of the BTrackS Balance Plate (Balance Tracking systems) for static computerized posturography.

However, one important limitation has been noted: the lack of stratification and socio-demographic information. As a matter of fact, many studies have demonstrated that gender and age influence postural control (Farenc et al., 2003; Hageman et al., 1995; Ionescu et al., 2005b). For static computerized posturography, a systematic review on postural sway in children revealed that age stratification was arbitrary in most studies which led to conflicting results concerning postural control development (Verbecque, Vereeck, et al., 2016a). Furthermore, results showed that stability increased with age and children swayed more when visual input (eyes closed condition) was removed. Other variables such as anthropometric characteristics (Alonso et al., 2012; Chiari et al., 2002b), feet positioning (Gibbons et al., 2019; Kollegger et al., 1989), and physical activity (García-Soidán et al., 2020; Gauchard, 2003; Lelard & Ahmaidi, 2015) can also affect balance. Thus, lack of stratification and reporting might lead to misinterpretation of patient postural performance in clinical practice as well as healthy individuals undergoing behavioural and balance assessments. Therefore, there is room for improvement and this work aspires to complement previous studies.

The purpose of this study is to systematically review the reported normative data, assessed by computerized posturography, in a healthy population as well as to discuss the strengths and limitations of these norms to outline future perspectives and needs. Overall, we aimed to identify methodological characteristics of computerized posturography assessment in this systematic review as well as to investigate the impact of age and gender in the meta-analysis.

2. Methods

2.1. Information sources, search strategy and inclusion criteria

This systematic review and meta-analysis included studies that provide normative data assessed by means of instrumented platforms in healthy populations (Registration: CRD42023378144). It was conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis Statement. A comprehensive literature search was performed in the electronic databases PubMed, Web of Science and Science Direct. A search string was used with keywords 1) “Normative data”, 2) “Posturography”, 3) Instrumented platform combined using the Boolean operator OR, and interaction among sets using the operator AND. Searches were conducted in May 2022 and were updated in January 2023. The studies were screened based on a priori defined inclusion and exclusion criteria using Rayyan, a web-based application (Ouzzani et al., 2016). The literature search was limited to articles published between January 1, 1980, and January 1, 2022. Computerized posturography was created in 1980 (L. M. Nashner, 1982), therefore only studies published as of this date were included in this review. In each article the use of instrumented platforms as evaluation tools was sought. Reference lists and citations of the included articles were manually screened to identify additional studies of interest. The literature search was limited to full-text papers written in English and French. The articles meeting the criteria based on their titles and abstracts were included, and their full-text versions were then extracted. Screening was performed by AJ and EV. If information in the title and abstract was insufficient to determine eligibility, full-text papers were checked.

2.2. Selection criteria and strategy

To select relevant literature, the following selection criteria were applied:

- Healthy participants consisting of a combination of men and women (absence of any other impairments that can influence balance). The normative data had to be representative for the average population of healthy people. However, studies including athletes, soldiers, one of the sexes exclusively were considered relevant to the research question. A minimum sample size of 30 participants was considered as an adequate representative sample.
- An instrumented equipment during static or dynamic bipodal balance measurement had to be included. Citations were excluded when data were collected during gait and functional measures (e.g., Timed Up and Go, climbing stairs, six-minute walk test, Y-Balance Test, Star Excursion Balance Test, treadmill walking or during running, turning, stepping tasks (lateral, forward, backward, etc)). Balance assessment through mobile devices were excluded as well.
- Original research, including full length articles, written in English or French. Reviews of any kind, meta-analyses, case control studies/-series, conference proceedings, abstract only, books/book chapters, letter to the editor, study protocols, pilot studies, editorials or opinion pieces were excluded.
- Studies that had explicitly reported normative data were included.

2.3. Data extraction and study quality assessment

Data extraction was a priori defined using a codebook which included the following information: 1) Study characteristics (authors, year of publication, etc.); 2) methodological details, such as population and measurement characteristics, tasks, and sway parameters; 3) equations used and psychometric properties (if provided). Authors were contacted to obtain any unavailable

data. At a systematic review level, we evaluated the stratification of age and gender as well as the significance of other factors tested in each study. These are expressed as significant (S), not significant (NS), not reported (NP).

Studies used a combination of different support and visual conditions which can be divided into distinct groups and subgroups. In this review, balance tasks were described according to measurement and movement control type as well as sensory perturbations based on a classification process used by Herssens et al. (2020) (Herssens et al., 2020): without sensory perturbations, with proprioceptive perturbations (foam, moving platform and/or foot placement), with visual perturbations (deprivation and/or altered surround), with vestibular perturbations (head movements) and with multiple sensory perturbations. A distinction between measurement and movement control types was made to describe performance in the present review. Measurement type is determined by external conditions during balance assessment. It is classified as dynamic when tasks are executed in altered visual and/or tactile environments and static when tasks executed in stable visual and/or tactile environments. Movement control type is considered as activity-based conditions represented as tasks consisting of quiet standing (static) and voluntary body movements (dynamic). In addition, we used the Systems Framework of Postural Control (Sibley et al., 2015) to determine the nine components of balance (functional stability limits, underlying motor systems, static stability, Verticality, reactive postural control, anticipatory postural control, dynamic stability, sensory integration, cognitive influences) which were assessed in the different tasks.

To our knowledge, there is no quality assessment tool for reference values. However, we adapted the QUADAS scale reported by (P. Whiting et al., 2003; P. F. Whiting et al., 2006) and selected relevant questions (1, 2, 5, 9, 12 and 13) based on our study objectives: questions 1) Was there adequate sampling of normative data? ; 2) Were selection criteria clearly described? ; 5) Was a motor scale (i.e. other than posturographic measurement) used as part of the test battery?; 9) Was description of instruction and position/set-up for patient, type of equipment and the outcomes at least reported ?; 12) Was age and gender of sample at least available ?; 13) Were drop-outs and falls collected (e.g. was it reported that a portion of the participants fell) and reported ?. Answers were scored “Yes” or “No” and missing or ambiguous details were scored as “Unclear”. Total score has not been defined for the QUADAS tool. Therefore, studies were considered as having high quality (low risk of bias) if four or more items out of six items were scored “Yes”. Quality assessment for each article was performed by AJ and EV independently, and each assessor was blind to the score given by the other. Any disagreement over the final score for each article was discussed until consensus.

Studies providing summary statistics were included in the meta-analysis. Quantitative analysis was done after extraction by categorizing and grouping according to population type (adults, children, both) and gender distribution (females, males) as well as posturography type (static, dynamic), tasks, and sway parameters. We performed meta-analysis on sway parameters that were used by at least three publications in similar measurement conditions and priority was given to age and/or gender-stratified reference values to mitigate inter-study variability. When possible, participants mean age and groups were converted and pooled according to decade for adults and biological ages for children to reduce heterogeneity. We used a broad age categorization to ensure enough studies were included in the quantitative analysis to allow for meaningful interpretation. Subgroups were combined, according to the Cochrane Handbook (Higgins et al., 2020), into a single group to compare males and females separately and specific age groups, when possible. Specific terms were attributed to sway parameters, when possible, based on the definitions in the literature (Prieto et al., 1996) to aggregate data and

comparison for meta-analysis purposes. The homogeneity should have been particularly present across age/gender stratification and test conditions. Additionally, quantitative analysis was not conducted when an insufficient number of identified studies were available per task condition (eyes open and closed, foam etc.) ($n > 5$). We found that 38 studies had used sway parameters that were used by at least three publications. After further inspection, we removed studies that had no age and/or gender comparisons, insufficient statistics or owned by a company ($n = 21$). Instead, these studies were summarized narratively (see Figure 2B). Most of the excluded studies had reported a decrease in sway with increasing age for children whereas an increase was observed for aging adults. Sensory perturbations tended to increase instability and overall females outperformed males. Studies assessing children did not investigate the influence of other factors.

2.4. Statistical analysis

Statistical analyses were performed in R version 4.2.3, using the packages *metafor* (Viechtbauer, 2010), *clubSandwich* (Pustejovsky, 2020) and *netmeta* (Balduzzi et al., 2023). Age and gender were analysed in each sensory condition using different models with effect sizes nested within outcomes, and the latter within studies. We undertook meta-analyses if participants, interventions, outcomes, and comparisons were sufficiently similar. Potential modifiers included population characteristics and intervention details, which are considered sources of heterogeneity.

Measures of group effect. Standardized mean difference was calculated to pool effect sizes, to quantify the difference in performance between gender and age groups. For measures where a higher score represented better performance (e.g. equilibrium scores in eyes open and closed), the direction of the scale was reverse by multiplying by -1 to ensure interpretability across studies. Furthermore, we accounted for a hierarchical dependence structure as multiple effect sizes were extracted from the same studies, experiments, and outcomes across samples for the multilevel meta-analysis.

Outliers and influential cases. Standardized deleted residuals and Cook's distance were used to identify outliers and influential studies. Residuals larger than ± 1.96 indicated that studies did not fit the model and thus represented outliers. Moreover, influential cases were removed when Cook's distance was over $4/n$ (n : total number of data points).

Assessment of heterogeneity. In the multilevel meta-analysis, we assessed heterogeneity using the I^2 statistic to quantify the percentage of variation attributable to each level – study, outcome, and effect size (low: 25%, moderate: 50%, high: 75%; Higgins et al., 2003). In the network meta-analysis, global and local approaches were used to assess heterogeneity (i.e. variation in effect modifiers within comparisons) and inconsistency (i.e. imbalance in effect modifiers between comparisons). Specifically, we fitted the Cochran's Q (χ^2) statistic decomposition to evaluate the contribution of each design to the heterogeneity within-designs and consistency between-designs. Moreover, a design by treatment (in our case age groups) interaction model was also fitted for the global approach. Local inconsistency between direct and indirect evidence was evaluated using the Separate Indirect from Direct Evidence (SIDE) method (Dias et al, 2010). To explore sources of heterogeneity, a meta-regression was conducted.

Assessment of publication bias. The potential publication bias was addressed by estimating the funnel plot asymmetry and was tested via Egger's regression when more than ten studies were included.

Multilevel meta-analysis using robust variance estimation. We conducted a multilevel meta-analysis using robust variance estimation to synthesize studies comparing females and males. To account for the complexity of the data structure, a robust variance estimation (RVE) method can be used to model dependencies between effect sizes and their correlated sampling errors. To obtain robust confidence intervals and p-values, the Sandwich estimator was used in combination with the model. For smaller numbers of included studies, valid analysis results are ensured by an adjustment matrix which is based on the bias-reduced linearization CR2 method. An assumption of the degree of correlation was estimated at $r = 0.6$. The RVE model provides valid overall average effect size even if the correlation assumption is inaccurate. Several sensitivity analyses for varying values of r were nonetheless conducted.

Frequentist network meta-analysis: multiple interventions. We conducted a network meta-analysis (NMA) to estimate the relative effects for all possible comparisons between different age groups. The frequentist random-effects network meta-analysis is used to consider direct and indirect evidence, also called mixed evidence (i.e. direct -studies comparing A vs B and indirect - studies comparing A vs C) (Rouse et al., 2017). Thus, this method provides estimates for relative effects of comparisons between groups via one or more intermediate comparators or direct ones. The network structure was inspected, and subnetworks (i.e. not fully connected networks) were analysed separately. Furthermore, studies with missing or inconsistent group estimates and variances were also excluded from the network meta-analysis. The age groups (i.e. interventions) were ranked using the surface under the cumulative ranking curve (SUCRA) method (Salanti, 2011) to account for the entire distribution of the relative effects. This score is expressed as a percentage, with the best ranking corresponding to 100%. In our case, this analysis allowed us to include all possible direct and indirect comparisons of different age groups and determine their rankings. Furthermore, we assessed the certainty of evidence for each comparison using Confidence in Network Meta-Analysis (CINeMA) which is a web application used to evaluate confidence of the evidence estimates from network meta-analysis. It is based on the following six domains: within-study bias (risk of bias), reporting bias (publication bias), indirectness (i.e. relevance to the research question), imprecision (comparing the range of effects with the range of equivalence) and incoherence (disagreement between direct and indirect evidence). We excluded two studies (Libardoni et al., 2018 & Micarelli et al., 2020) from the meta-analysis in EO and EC conditions due to inconsistent group estimates and variances.

3. Results

3.1. Information sources and search strategy

The search strategy resulted in the retrieval of 1244 articles from PubMed, Web of Science and Science Direct, on 9th May 2022 and a second search on 31st December 2022. After deduplication, 689 papers remained and were screened based on title and abstract. One hundred and seven articles met the criteria after the first screening. In depth full text screening resulted in the inclusion of 44 studies for the systematic. An overview of the study design is summarized in the PRISMA flowchart (Figure 1).

3.2. Descriptive synthesis: Risk of bias assessment and methodological characteristics

3.2.1. The risk of bias assessment reveals extensive variation in methodological characteristics (see Table S1). Ten studies had high quality assessment and took measures to reduce risk of bias (Figure 2). Most problematic aspects were at questions 1, 5 and 13 of the adapted QUADAS.

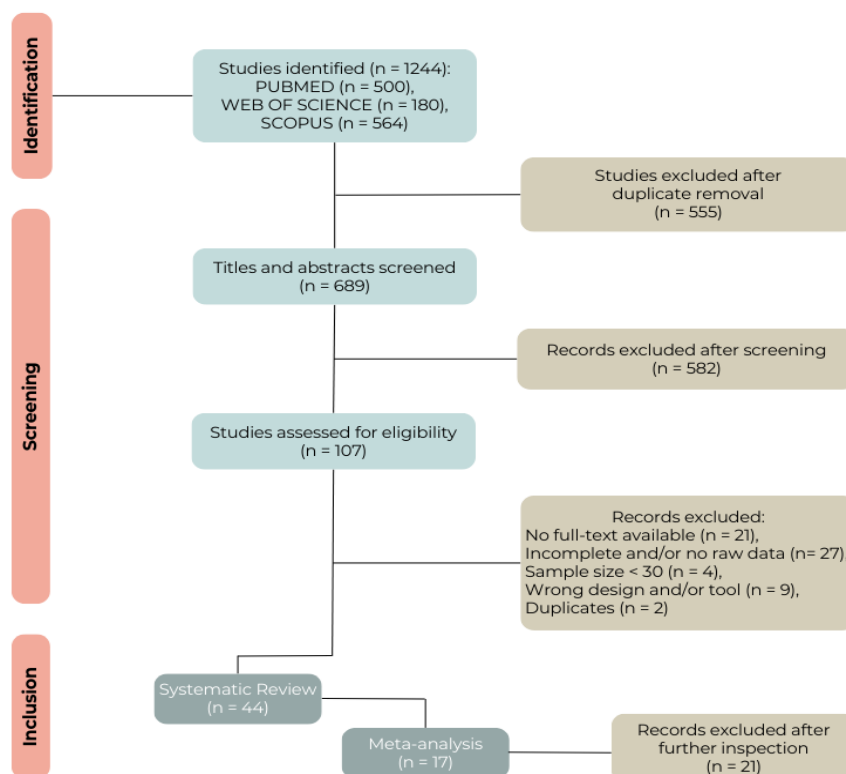


Figure 1. Flowchart for the systematic review and meta-analysis.

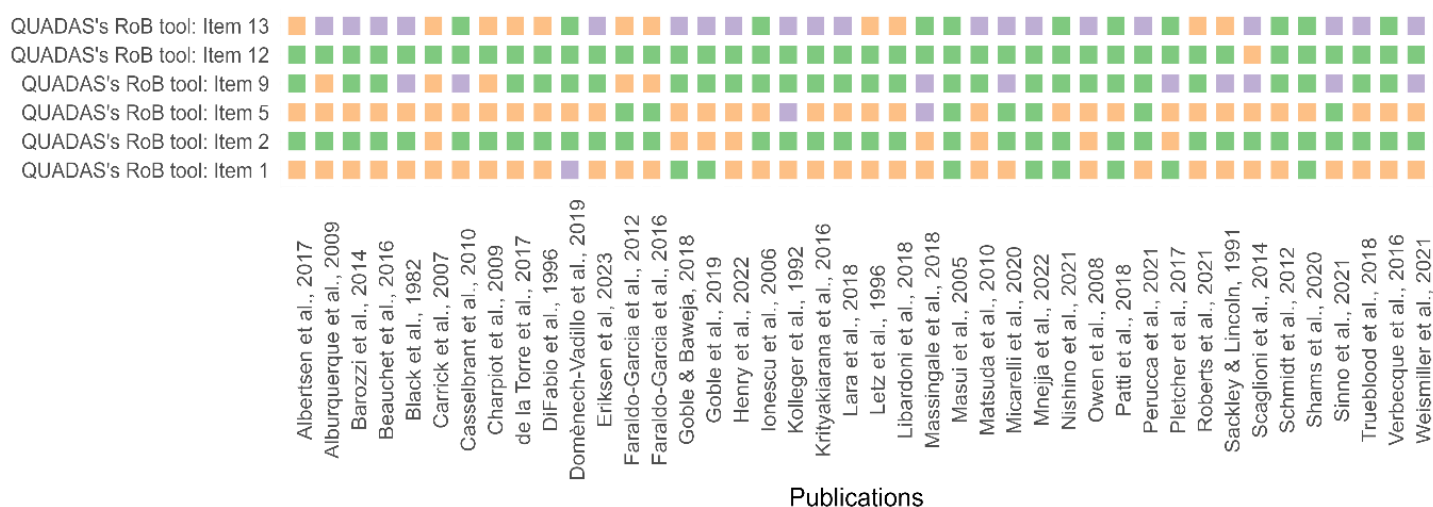


Figure 2. Assessment of study quality (QA) and risk of bias. The risk of bias according to QUADAS's tool [35], [36], for each study, indicated by reference, included in the systematic review. Answers were scored "Yes" or "No" and missing or ambiguous details were scored as "Unclear". Unreported details were scored as an 'unclear' risk of bias.

3.2.2. Participants

General characteristics of included studies are presented in Table 1. Sample size of publications included in the systematic review ranged between 30 and 16,357 participants. In total, 42,408 participants (12,043 women, 13,761 males) were included and represented mostly regular individuals (77%). Children and adults combined were mostly represented in the sample (48%). Specific cohorts were included in a few studies, such as athletes (11%), military (6.8%) and mixed (4.5%). Most of the studies were conducted in Europe (41%) and North America (36%). Study population represented a large range of ages and participants comprising of children, adolescents, and adults. Age and gender were stratified respectively in 64% and 45% of the publications. Regarding age stratification, most studies did not provide age-groups (34%) (Albertsen et al., 2017; Beauchet et al., 2016; Carrick et al., 2007; de la Torre et al., 2017; Goble, Brar, et al., 2019; Henry et al., 2022; Kritiyakiarana & Jongkamonwiwat, 2016; Lara et al., 2018; Letz et al., 1996; Matsuda et al., 2010; Owen et al., 1998; Pletcher et al., 2017; Scaglioni-Solano & Aragón-Vargas, 2014; Schmidt et al., 2012; Weismiller et al., 2021); whereas some reported values per biological age (18%) (Barozzi et al., 2014; Casselbrant et al., 2010; Di Fabio & Foudriat, 1996; Ionescu et al., 2005c; Libardoni et al., 2018; Micarelli et al., 2020; Mnejja et al., 2022; Verbecque, Costa, et al., 2016), per decade (16%) (Black et al., 1982; Eriksen & Hougaard, 2023; Faraldo-García et al., 2012a; Faraldo-García, Santos-Pérez, Crujeiras, et al., 2016; Goble & Baweja, 2018b; Sackley & Lincoln, 1991; Trueblood et al., 2018a) or academic level associated with school year (11%) (Charpiot et al., 2010b; Goble, Rauh, et al., 2019; Massingale et al., 2018; Shams et al., 2020; Sinno et al., 2021b). Other used an unconventional stratification method (Albuquerque-Sendín et al., 2009; Domènech-Vadillo et al., 2019; Goble & Baweja, 2018a; Kollegger et al., 1992; Masui et al., 2005; Nishino et al., 2021; Patti et al., 2018; Perucca et al., 2021; Roberts et al., 2021).

3.2.3. Tasks and sway parameters

The included studies investigated postural sway using a variety of tasks. Measurement conditions varied largely regarding arm and foot position, use of visual target, the number and duration of trials as well as sequence of the conditions. Twenty-three studies used static measurement, whereas static movement control was described in 40 studies. When possible, tasks were converted into standardised tests commonly used in clinical practice based on specified conditions. If a task did not correspond to a known test, we coded it according to precise sensory conditions. Overall, seventeen different tasks were used. Most studies used multiple sensory perturbations (70%) and did not report psychometric properties (80%). Using the Systems Framework of Postural Control, components of postural control measured in each task were determined (Figure 3. A.). Three out of 17 tasks evaluated the most components of the SFPC (4 items); only one task was used in more than three studies, the Motor Control Test (MCT). Other mostly used tasks were the Modified Clinical Test of Sensory Interaction in Balance (mCTSIB) and the Sensory Organization Test (SOT), which evaluated three components of the SFPC (static stability, underlying motor systems, and sensory integration) as well as Vision + FIRM (visual perturbation with firm surface) and EC + FIRM (eyes closed with firm surface) which evaluated two components (static stability and sensory integration). Lastly, EO + FIRM (eyes open with firm surface) was also used and evaluated one component, static stability. The four SFPC components evaluated in the MCT were static stability, underlying motor systems, reactive postural control, and sensory integration.

A large variety of parameters for postural sway was used leading to semantic heterogeneity in the reported data. Therefore, specific terms were attributed to sway parameters, when possible, in this review, based on the definitions in the literature to allow comparison between different studies. The publications used 45 different sway parameters to assess balance performance; only a few provided equations used for calculating sway parameters (27%). Thirteen sway parameters were used by more than three studies which were distance domain features: COP area, COP path and COP velocity in either the anteroposterior (AP) and mediolateral (ML) direction or in a combined plane, COP range in AP and ML direction as well as SOT ratios, SOT equilibrium scores, SOT and MCT composite scores which are non-domain specific features (Figure 3.B.).

Other variables were also reported as factors influencing postural control (Figure S2.A). A significant effect of sensory condition in the adults was reported by five studies whereas height was mostly reported as a non-significant variable in children (n=3) and mixed populations (n=4). However, most studies did not report the influence of other variables on postural sway.

Table 1. General characteristics of included studies.

Characteristic	N = 44 ¹		
Population Group		Stratified by Gender	
Adults	14 / 44 (31.8%)	No	24 / 44 (55%)
Both	21 / 44 (47.7%)	Yes	20 / 44 (45%)
Children	9 / 44 (20.4%)	Posturographic Assessment Type	
Individuals' Category within each population		Dynamic	21 / 44 (48%)
Athletic	5 / 44 (11%)	Static	23 / 44 (52%)
Military	3 / 44 (6.8%)	Movement Control Type	
Mixed	2 / 44 (4.5%)	Dynamic	4 / 44 (9.1%)
Regular	34 / 44 (77%)	Static	40 / 44 (91%)
Region		Sensory Perturbations used in tasks	
Africa	1 / 44 (2.3%)	Multiple	32 / 44 (72.7%)
Asia	5 / 44 (11%)	Proprioceptive	3 / 44 (6.8%)
Central/South America	4 / 44 (9.1%)	Visual	8 / 44 (18.1%)
Europe	18 / 44 (41%)	Without	5 / 44 (11.3%)
North America	16 / 44 (36%)	Were Equations for calculating sway parameters provided?	
Sample size	30 - 16,357; 42,408	No	32 / 44 (73%)
Females	0 - 4,292; 12,043	Yes	12 / 44 (27%)
Not reported	3	Were Psychometric Properties reported?	
Males	0 - 6,624; 13,761	No	35 / 44 (80%)
Not reported	3	Yes	9 / 44 (20%)
Stratified by Age		Footnote	
No	16 / 44 (36%)	¹ n / N (%); Range; Sum	
Yes	28 / 44 (64%)		
How was age stratified?			
Academic	5 / 44 (11%)		
Biological	8 / 44 (18%)		
Decade	7 / 44 (16%)		
None	15 / 44 (34%)		
Unconventional	9 / 44 (20%)		

3.3. Quantitative analysis

We pooled data from seventeen studies, involving 5,194 participants (F: 2,630; M: 2,564), in the multilevel or network meta-analysis. Furthermore, we did not conduct quantitative analysis for Foam conditions and sway-referenced conditions (SOT 3, SOT 4, SOT 5, SOT 6) as well as for composite score and ratio outcomes as there was insufficient number of studies ($n < 5$).

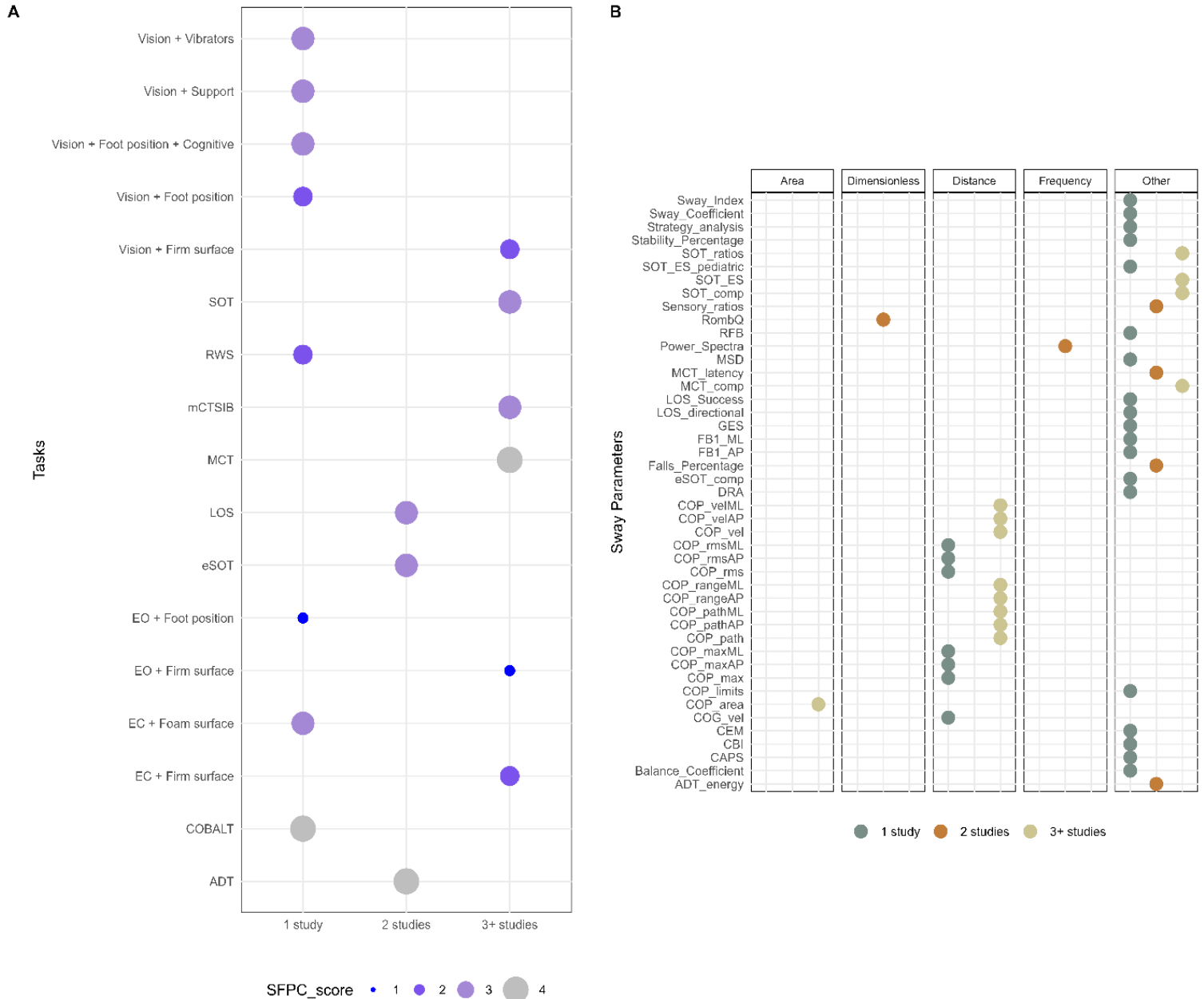


Figure 3. Methodological characteristics for Tasks and Sway parameters. A) Tasks reported in $n \geq 3$ number of studies based on the Systems Framework of Postural Control components evaluated in each task. B) Sway parameters used in $n \geq 3$ number of studies and grouped by domain.

3.3.1. Effect of gender on postural sway

In EO condition (Figure 4), an overall summary meta-analysis found an average gender difference of $SMD = -0.17$, $t(7.6) = -2.02$, $p = 0.08$, 95% CI $[-0.36, 0.01]$. The overall I^2 value indicates that 79.1% was due to heterogeneity, with variance component accounting for about 28.6% of the total variance at the study level, of 25.3% at the outcome level, and of 25.3% at

the effect size level. The remaining 20.9% was sampling variance. There were no influential outliers found. Subgroup analyses were conducted since high heterogeneity was detected and no influential cases were found. Population group, Region and Risk of Bias were determined a priori as potential modifiers. However, none of them could explain explicitly the overall high heterogeneity (Table S5). The overall average effect size was not sensitive to our assumption about correlation between effect size estimates, with estimates varying from -0.187, 95% CI [-0.382, 0.008] assuming $\rho = 0.0$ to -0.168, 95% CI [-0.372, 0.036] assuming $\rho = 0.9$. The estimated total variation in true effect sizes was similarly insensitive, with a total SD ranging from 0.220 to 0.255, although individual variance component estimates were more sensitive to the assumed ρ (see Supplementary Table S4.a.).

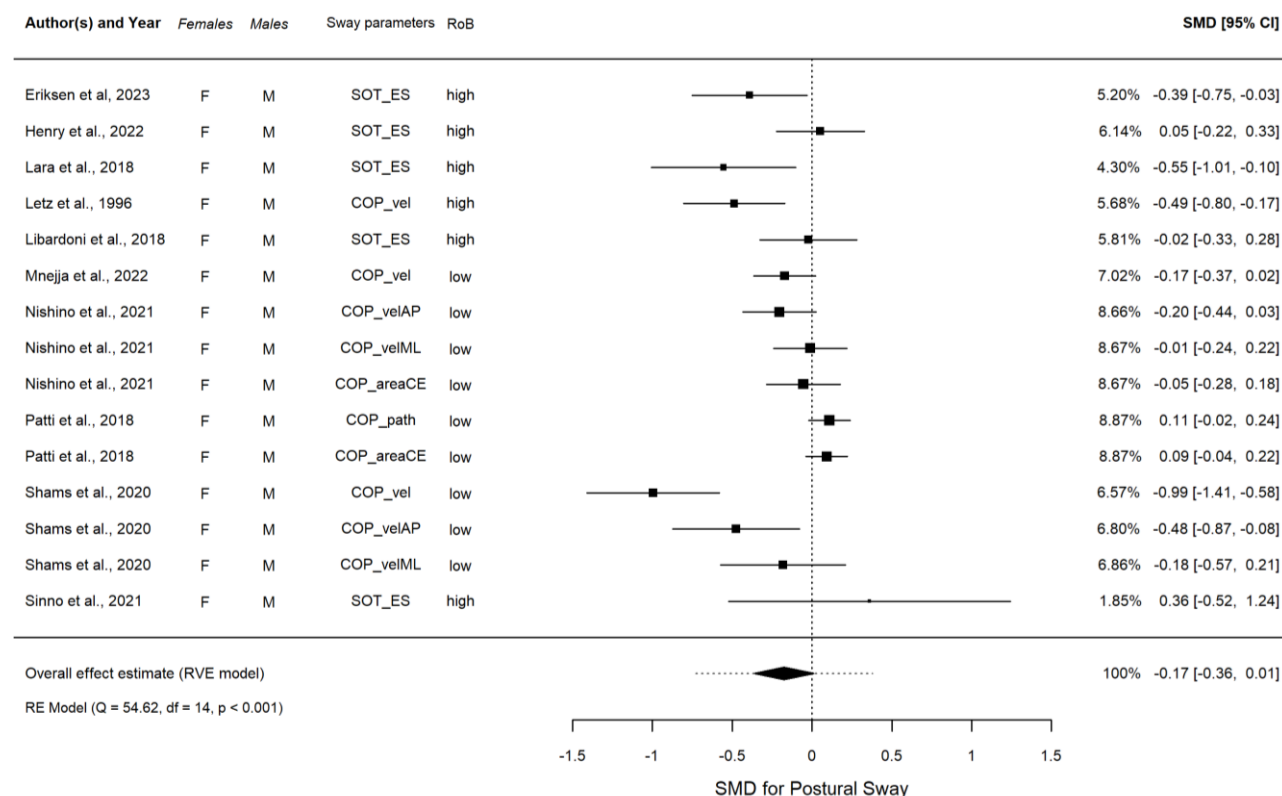


Figure 4. Forest plot visualizing the overall effect in EO, calculated using robust variance estimation (RVE).

In EC condition (Figure 5), an overall summary meta-analysis found an estimated overall significant SMD = -0.22, $t(4.6) = -4.20$, $p = 0.01$, 95% CI [-0.34, -0.10], with non-significant low heterogeneity ($I^2 = 11.6\%$) after removing one outlier. The overall average effect size was not sensitive to our assumption about correlation between effect size estimates, with estimates varying from -0.233, 95% CI [-0.396, -0.069] assuming $\rho = 0.0$ to -0.211, 95% CI [-0.347, -0.076] assuming $\rho = 0.9$. The estimated total variation in true effect sizes was similarly insensitive, with a total SD ranging from 0.11 to 0.141, although individual variance component estimates were more sensitive to the assumed ρ (see Supplementary Table S4.b.).

3.3.2. Effect of age on postural sway

Network meta-analysis in EO and EC conditions included each 10 studies and revealed two subnetworks, which consisted of 22 groups, 358 comparisons and 8 study designs. The ten characteristics were relatively similar across groups in each subnetwork, indicating an

acceptable transitivity assumption (see Table S5). The first and second subnetworks represented respectively, adults aged between 20 and 79 years old and children aged between 3 and 14 years old (Figure S4). The subnetworks were analysed separately.

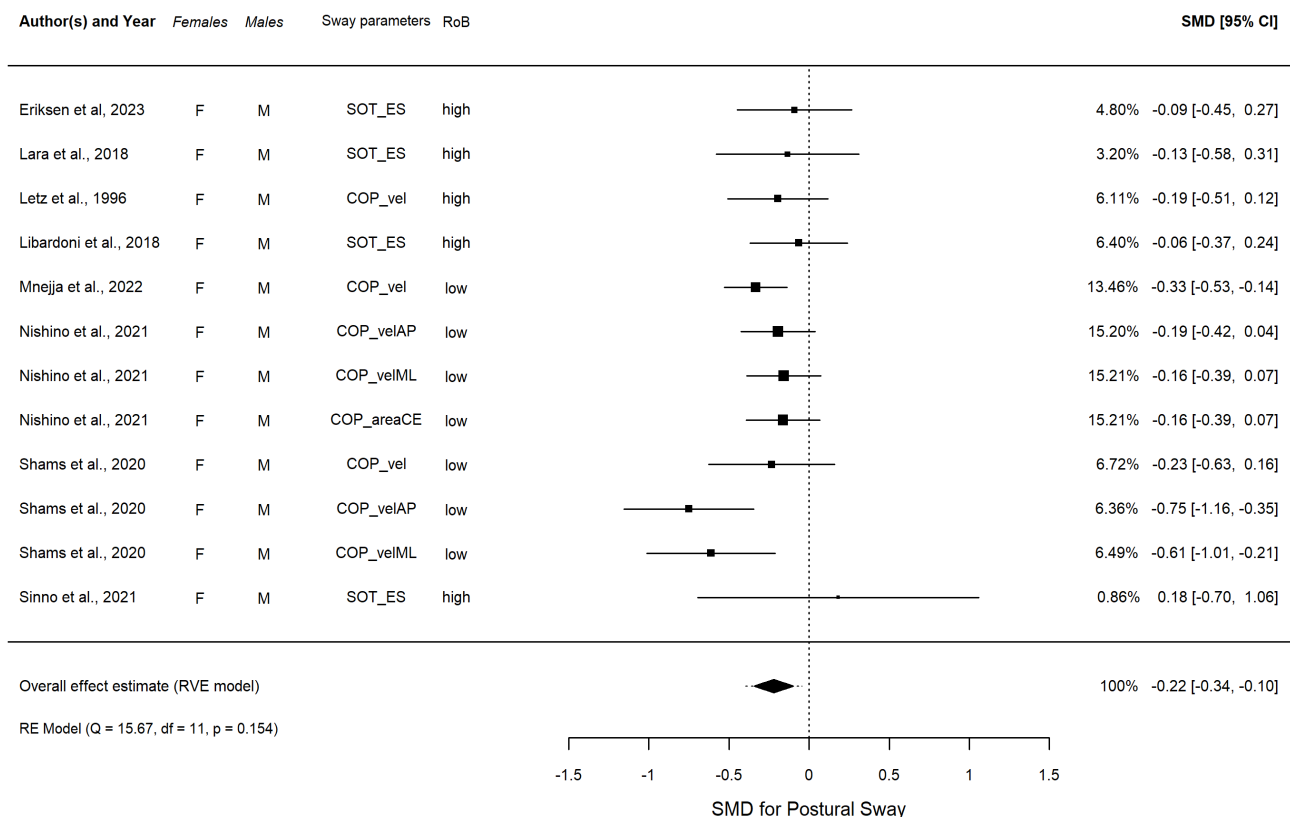


Figure 5. Forest plot visualizing the overall effect in EC, calculated using robust variance estimation (RVE).

3.3.2.1. Effect of age within adults +20 years

In the first subnetwork analysis, 20–29-year-olds was used as the reference group. Figure 5. shows the first connected subnetworks for both EO (Figure 5A) and EC (Figure 5B) conditions. The most frequently examined comparisons were between 20-29 vs 30-69, 30-39 vs 40-69 as well as between 40-49 vs 50-69 and 50-59 vs 60-69. Table S6. summarises the main results of both direct and indirect evidence and the first subnetwork meta-analysis for EO and EC. Figure 6. A and B show the relative rankings of the treatments with group 20-29 as the reference group. The lowest ranked was group 70-79 (SUCRA: 0.09 for EO and 0.09 for EC) followed by 60-69 (SUCRA: 0.28 for EO and 0.14 for EC) and 50-59 (SUCRA: 0.29 for EO and 0.38 for EC). We present the summary relative effects in league tables (Table 2; see top table).

In EO condition, older groups 50-59, 60-69 and 70-79 were significantly more unstable than the reference group 20-29 (EO: SMD range 0.43-0.66). The groups 30-39 and 40-49 were more stable than older groups 60-69 (EO: SMD range 0.61-0.75) and 70-79 (EO: SMD range 0.53-0.59).

In EC condition, older groups 50-59, 60-69 and 70-79 were significantly more unstable than the reference group 20-29 (EC: SMD range 0.51-0.85). The groups 30-39 and 40-49 were more stable than older group 70-79 (EC: SMD range 0.70-0.84). A statistically significant difference

was also found for 50-59 compared to 30-39 (SMD =0.50, 95% CI [0.10, 0.90] and 60-69 (SMD = 0.25, 95% CI [0.03, 0.46]); indicating that older individuals swayed more for EC.

The heterogeneity and global inconsistency were low in the first subnetwork (EO: $I^2 = 0\%$, 95% CI [0, 62.4%], $\chi^2 = 8.59$, $df = 9$, $p = 0.47$; EC: $I^2 = 0\%$, 95% CI [0, 62.4%], $\chi^2 = 8.41$, $df = 9$, $p = 0.49$). Inconsistency between designs seemed not to be an issue in this subnetwork (EO: $p = 0.7$; EC: $p = 0.6$). Table S8. A. and B. summarises the local inconsistency between direct and indirect evidence using the SIDE method for EO and EC. The results show that there are 11 pairwise comparisons contributing both direct and indirect evidence, for none of which there is evidence of inconsistency for EO condition (Table S8A). However, a handful of comparisons with inconsistency for EC was observed ($p < 0.10$ refer to Table S8B).

1.1.1.1. Effect of age within children ≤ 14 years

In second subnetwork analysis, 14-year-olds was used as the reference group. Figure 5. shows the second connected subnetworks for both EO (Figure 5C) and EC (Figure 5D) conditions. The most frequently examined comparisons were between 8 vs 9, 8 vs 10 and 9 vs 10. Table S7. summarises the main results of both direct and indirect evidence and the first subnetwork meta-analysis for EO and EC. Figure 6. C and D show the relative rankings with group 14 as the reference. The lowest ranked was group 5 (SUCRA: 0.06 for EO and 0.04 for EC) followed by 4 (SUCRA: 0.13 for EO and 0.08 for EC), 3 (SUCRA: 0.19 for EO and 0.17 for EC), 6 (SUCRA: 0.21 for EO and 0.26 for EC) and 7 (SUCRA: 0.19 for EO and 0.17 for EC). The summary relative effects from the network meta-analysis are presented in league tables of each subnetwork (Table 2, see bottom table).

In EO condition, children aged between 3 and 7 swayed significantly more than the reference group 14 (EO: SMD range 1.00-1.78). Between 3 and 6, children were more instable than older groups 9 (EO: SMD range 0.93-1.36), 10 (EO: SMD range 0.90-1.33), 11 (EO: SMD range 1.0-1.50), 12 (EO: SMD range 1.26-1.68) and 13 (EO: SMD range 1.38-1.80). A statistically significant difference was also found for group 7 compared to 11 (EO: SMD = 0.73, 95% CI [0.03, 1.42], 12 (EO: SMD = 0.91, 95% CI [0.23, 1.59] and 13 (EO: SMD = 1.03, 95% CI [0.34, 1.72]). A significant difference was also observed between groups 5 vs 7 for EO (SMD = 0.77, 95% CI [0.03, 1.51]). For children aged 8, a significant difference was reported compared to younger children for EO (SMD for 4 to 6 range 0.87-1.10) and to group 13 (SMD = 0.70, 95% CI [0.01, 1.39]). Children aged 5 swayed significantly more than those age 7 for EO (SMD = 0.77, 95% CI [0.03, 1.51]).

In EC condition, children aged between 3 and 7 swayed significantly more than the reference group 14 (EC: SMD range 0.75-1.56). Between 3 and 6, children were more instable than older groups 9 (EC: SMD range 0.65-1.15), 10 (EC: SMD range 0.44-0.94), 11 (EC: SMD range 0.78-1.28), 12 (EC: SMD range 0.86-1.35) and 13 (EC: SMD range 0.80-1.30). A statistically significant difference was also found for group 7 compared to 11 (EC: SMD = 0.47, 95% CI [0.09, 0.86]), 12 (EC: SMD = 0.55, 95% CI [0.18, 0.91]) and 13 (EC: SMD = 0.49, 95% CI [0.12, 0.87]). A significant difference was also observed between younger children and group 7 for EC (SMD for groups 3 to 6 range 0.31-0.81). For children aged 8, a significant difference was reported compared to older children (EC SMD for 11 to 12 range 0.27-0.34 and for 14 (EC SMD = 0.55, 95% CI [0.03, 1.06]). Children aged 5 swayed significantly more than the group 3 for EC (SMD = -0.29, 95% CI [-0.57, -0.02]). A significant difference was observed between group 7 and 9 (SMD = 0.34, 95% CI [0.00, 0.69]) as well as between group 10 and older children (SMD for 12 to 14 range 0.36-0.62).

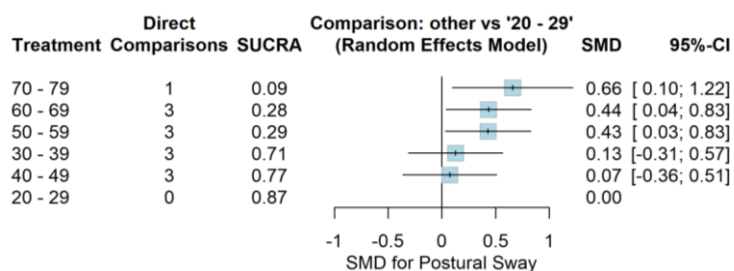
The heterogeneity and global inconsistency were significantly high for EO ($I^2 = 79.8\%$, 95% CI [70.2, 86.3%], $\chi^2 = 104.06$, $df = 21$, $p < 0.0001$) and low for EC ($I^2 = 35.4\%$, 95% CI [0, 61.5%], $\chi^2 = 32.53$, $df = 21$, $p = 0.0517$). Inconsistency between designs seemed to be an issue in this subnetwork ($p < 0.0001$ for EO and for EC). Results for detaching single designs shows that the between-design heterogeneity can largely be traced back to the comparison of 4 versus 5 for EO ($\chi^2 = 46.45$, $df = 4$, $p < 0.0001$) and for EC ($\chi^2 = 15.90$, $df = 4$, $p < 0.0001$). Results for the full design-by-treatment interaction model show evidence of inconsistency between designs for EO ($\chi^2 = 91.11$, $df = 5$, $p < 0.0001$) and for EC ($\chi^2 = 26.72$, $df = 5$, $p < 0.0001$). Table S8. C. and D. summarises the local inconsistency between direct and indirect evidence using the SIDE method for EO and EC. The results show that there are 47 pairwise comparisons contributing both direct and indirect evidence. There is evidence of inconsistency for a few comparisons ($p < 0.10$ for 3 vs 4, 3 vs 5, 4 vs 6, 5 vs 8 for EO and 5 vs 7 for EC).

Certainty of evidence. We estimated within-trial bias as the weighted average of the overall risk of bias and reporting bias was considered of some concern in the first subnetwork. Furthermore, we had no concerns about indirectness and a clinically significant threshold was $SMD = 0.20$. For EO, no concern was reported about incoherence because no comparison had a global or local inconsistency. Certainty of the evidence was low or very low for most of the comparisons, mainly due to within-study bias and reporting bias (Table S9A). For EC, some concern was reported about incoherence because some comparisons had a global or local inconsistency. Certainty of the evidence was low or very low for most of the comparisons, mainly due to within-study bias and reporting bias (Table S9B).

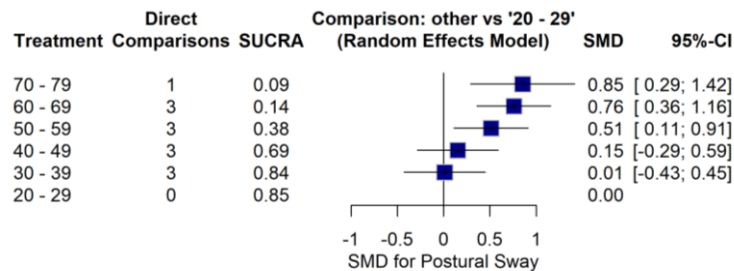
We estimated within-trial bias as the weighted average of the overall risk of bias and reporting bias was considered low in the second subnetwork. Furthermore, we had no concerns about indirectness and a clinically significant threshold was $SMD = 1.0$. We had some concern about incoherence because a few comparisons had a global or local inconsistency. Certainty of the evidence was low or very low for most of the comparisons, mainly due to within-study bias and incoherence (Table S9C). For EC, certainty of the evidence was moderate or low for most of the comparisons, mainly due to within-study bias and incoherence (Table S9D).

Publication bias. There was no clear evidence of publication bias according to a cluster robust Egger's test for EO of gender comparisons ($p = 0.46$). For funnel plot, see Figure S3 in Supplementary Material. We could not run this analysis for EC of gender comparisons after excluding the influential outliers (≥ 10 needed).

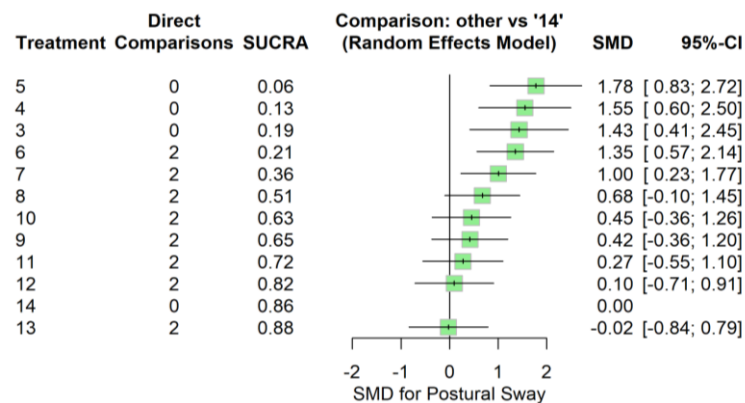
A



B



C



D

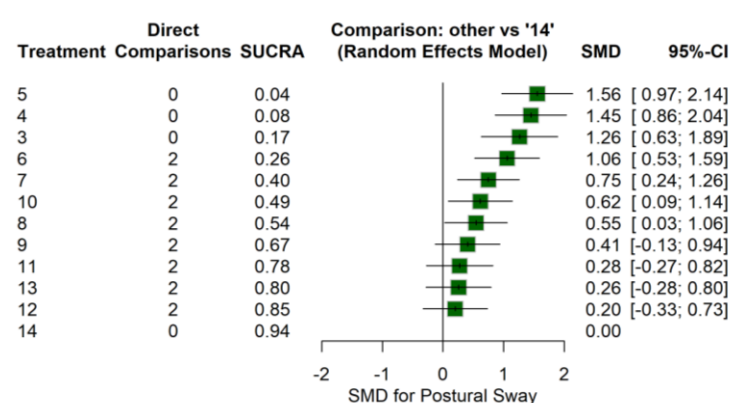


Figure 6. Forest plot showing the SUCRA ranking, and effect estimates for EO (left) and EC (right) conditions. A) and B) The group 20-29 was used as reference for the first subnetwork analysis. C) and D) The group 14 was used as reference for the second subnetwork analysis. SMD: standardized mean difference; CI: confidence intervals.

4. DISCUSSION

4.1. Summary of main results

The aim of this review was to map age and gender-related reference values in a healthy population, assessed by computerized posturography in static and dynamic conditions, as well as to discuss the strengths and limitations of these norms to outline future perspectives and needs. To our knowledge, this work represents the first attempt to synthesize the literature on normative data for computerized posturography using a combined mixed method. Main findings of this systematic review are: 1) extensive heterogeneity was found in methodological characteristics, 2) there was insufficient risk of bias mitigation, 3) most tasks evaluated less than four components of the SFPC, 4) studies mostly used distance domain sway parameters and did not report the influence of other variables on postural sway.

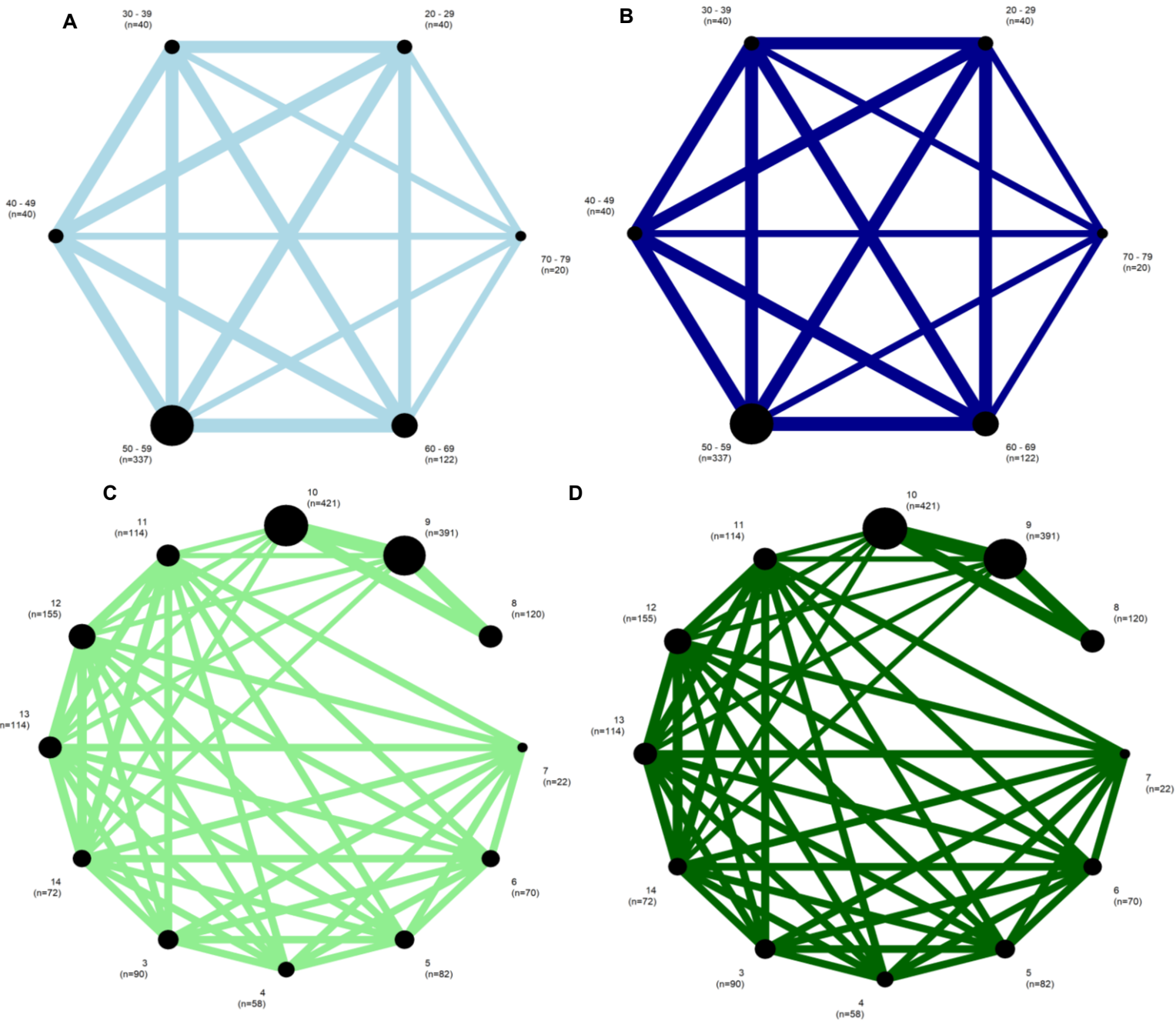


Figure 5. Network plots for EO condition (left) and EC condition (right) of the A) and B) first and C) and D) the second subnetworks. The width of the lines represents the number of studies comparing each pair of groups. The size of the circle represents the sample size in each arm.

Furthermore, we conducted quantitative analyses on the age and gender stratified data from these sway parameters of studies with similar interventions, comparisons, and groups. We included seventeen studies for gender and age comparisons, involving 5,194 participants (F: 2,630; M: 2,564), in the multilevel or network meta-analyses. We were only able to conduct quantitative analysis for eyes open and closed conditions as there was an insufficient number of studies for other conditions. Based on the multilevel meta-analyses, females appeared to significantly outperform males in eyes closed conditions. A significant difference was observed only in eyes closed condition. Based on the network meta-analyses, we found that a significant difference in sway between individuals between 50 and 79 years old and younger individuals;

with more instability observed in older participants in both eyes open and closed conditions. The results also revealed younger children swayed significantly more than those aged between 8 and 14 years in eyes open condition. In eyes closed condition, older children were significantly more stable than those aged 8 and younger.

4.2. Methodological characteristics

We were able to draw some conclusions on methodological characteristics of normative data assessed by computerized posturography. Experimental standardization and reporting are lacking, which leads to overall low risk of bias mitigation. Specific details are provided below.

Only a few studies provided age stratified reference values. However, some reported values per biological age, per decade or academic level which made their comparison difficult. We also observed that a variety of tasks and sway parameters were used, leading to semantic heterogeneity. The performances were most often evaluated through distance domain features. However, some questions have been raised about the relevance and reliability of these parameters (Hébert-Losier & Murray, 2020b; Ruhe et al., 2010). Hébert-Losier & Murray (2020) found that sway area and path of the centre of pressure seemed to be the most reliable. However, an evaluation of the quality of the studies revealed that only four studies had good methodological quality. We also found that measurement conditions varied largely regarding arm and foot position, use of visual target, the number and duration of trials as well as sequence of the conditions. Most studies did not report the influence of other variables (i.e. height, weight, foot placement) on postural sway. These factors need to be considered as they may influence postural control (i.e. anthropometric characteristics (Chiari et al., 2002b) feet positioning (Gibbons et al., 2019), and physical activity (Lelard & Ahmaidi, 2015). These discrepancies highlight methodological disparities that may impact the generalisability of these normative data. These findings agree with systematic reviews by Verbecque et al. (2016) (Verbecque, Vereeck, et al., 2016b) and Quijoux et al. (2018) (Quijoux et al., 2020) where a need to standardization in posturography assessment was recommended for reliable and conclusive results.

Overall, participants in the included studies mostly represented regular individuals, with approximately equal numbers of females and males. The sample population was largely children and young adults combined. Only a few studies investigated postural sway in elderly adults (Eriksen & Hougaard, 2023; Goble & Baweja, 2018b; Masui et al., 2005; Nishino et al., 2021; Perucca et al., 2021; Trueblood et al., 2018a) as well as specific athletic (Goble, Rauh, et al., 2019; Kritiyakarana & Jongkamonwiwat, 2016; Massingale et al., 2018; Matsuda et al., 2010; Scaglioni-Solano & Aragón-Vargas, 2014; Schmidt et al., 2012; Weismiller et al., 2021) and military cohorts (Henry et al., 2022; Pletcher et al., 2017; Roberts et al., 2021). Moreover, highly-active individuals such as athletes and servicemen are at high-risk of concussion that can lead to functional impairments (Massingale et al., 2018). As noted by Pletcher et al. (2017) (Pletcher et al., 2017), difference in postural control can be observed across different military branches of the US Special Operations Forces. The authors suggested that their training, mission environment and equipment could have impacted their performances. Age-related declines in balance have been widely reported in the adult population (Eriksen & Hougaard, 2023; Goble & Baweja, 2018b; Kollegger et al., 1992; Masui et al., 2005; Nishino et al., 2021; Perucca et al., 2021) yet few normative data are available on geriatric and highly-active population. This first observation demonstrated that the targeted population may not be sufficiently well represented in the included studies. In fact, this young age group and civilian cohort may not be typical patients seen in clinical practice or those with balance impairments.

4.3. Age and gender-related reference values

Gender-related instability has also been observed and seems to be condition-dependent. We found that females were more stable than males in eyes closed conditions. This has been corroborated in previous studies which suggested that better control in females could be explained by physiologic and morphologic characteristics (Farenc et al., 2003; Kollegger et al., 1992). In eyes open condition, such differences are not observed due to the stabilizing effect of vision on postural sway in males.

Adults become more unstable with age due to a natural decline in sensory systems' functioning which are less accurate and slower (Hageman et al., 1995). Eriksen & Hougaard, (2023) demonstrated a progressive decline in SOT composite scores between healthy individuals aged over 70 and those aged between 20-39 years. Similarly, Perucca et al. (2022) (H. Cohen et al., 1996b) demonstrated an influence of age on the scores of the same test. Their participants were divided into two older age groups: 80–84 and 85–89 years. The results revealed a significant effect of age on balance and sensory systems. These authors demonstrated that balance becomes less stable after the age of 85 years and more marked changes were observed during vestibular-perturbed conditions. These age-related changes appear to become more pronounced with gender as females were more stable (Goble & Baweja, 2018b; Kollegger et al., 1992; Masui et al., 2005). These results on the effect of age are corroborated by studies using other sway measures (Goble & Baweja, 2018b; Masui et al., 2005; Nishino et al., 2021).

1.1. Quality of the evidence: Risk of bias and publication bias

The risk of bias in the included studies appear to be globally high. These results could be explained by the extensive variability in the methodological characteristics and lack of reporting. In fact, we found considerable evidence of heterogeneity either in the gender-related comparisons for eyes open or in the age-related comparisons for eyes open in the second network involving children. We were only able to evaluate publication bias for eyes open conditions in gender-related comparisons as there was insufficient data for the other conditions and age-related comparisons. There was no clear evidence of publication bias. Overall, our confidence in the group estimates for age-related comparisons was low as we downgraded the certainty of the evidence for within-study bias and incoherence in comparisons involving children and for within-study bias and reporting bias in comparisons involving adults.

A

EO	70 - 79	0.09 [-0.43; 0.62]	0.34 [-0.18; 0.86]	0.70 [0.14; 1.26]	0.84 [0.28; 1.40]	0.85 [0.29; 1.42]
	0.22 [-0.30; 0.75]	60 - 69	0.25 [0.03; 0.46]	0.61 [0.21; 1.00]	0.75 [0.35; 1.15]	0.76 [0.36; 1.16]
	0.23 [-0.29; 0.75]	0.01 [-0.21; 0.22]	50 - 59	0.36 [-0.04; 0.76]	0.50 [0.10; 0.90]	0.51 [0.11; 0.91]
	0.59 [0.03; 1.15]	0.36 [-0.04; 0.76]	0.36 [-0.04; 0.75]	40 - 49	0.14 [-0.30; 0.58]	0.15 [-0.29; 0.59]
	0.53 [-0.02; 1.09]	0.31 [-0.09; 0.70]	0.30 [-0.09; 0.70]	-0.05 [-0.49; 0.39]	30 - 39	0.01 [-0.43; 0.45]
	0.66 [0.10; 1.22]	0.44 [0.04; 0.83]	0.43 [0.03; 0.83]	0.07 [-0.36; 0.51]	0.13 [-0.31; 0.57]	20 - 29
EC						

B

EO	3	-0.19 [-0.46; 0.09]	-0.29 [-0.57; -0.02]	0.20 [-0.24; 0.65]	0.51 [0.07; 0.96]	0.72 [0.26; 1.18]	0.86 [0.37; 1.34]	0.65 [0.13; 1.16]	0.99 [0.45; 1.52]	1.06 [0.54; 1.58]	1.01 [0.48; 1.53]	1.26 [0.63; 1.89]
	-0.12 [-0.59; 0.35]	4	-0.10 [-0.31; 0.11]	0.39 [0.01; 0.78]	0.70 [0.32; 1.08]	0.91 [0.51; 1.31]	1.05 [0.62; 1.48]	0.84 [0.38; 1.30]	1.18 [0.69; 1.66]	1.25 [0.78; 1.72]	1.19 [0.72; 1.67]	1.45 [0.86; 2.04]
	-0.35 [-0.81; 0.12]	-0.23 [-0.62; 0.17]	5	0.50 [0.12; 0.88]	0.81 [0.43; 1.18]	1.01 [0.62; 1.40]	1.15 [0.72; 1.57]	0.94 [0.48; 1.39]	1.28 [0.80; 1.76]	1.35 [0.89; 1.81]	1.30 [0.83; 1.77]	1.56 [0.97; 2.14]
	0.08 [-0.76; 0.91]	0.20 [-0.55; 0.95]	0.42 [-0.32; 1.17]	6	0.31 [-0.02; 0.64]	0.51 [0.17; 0.85]	0.65 [0.28; 1.02]	0.44 [0.06; 0.83]	0.78 [0.37; 1.20]	0.86 [0.46; 1.25]	0.80 [0.40; 1.20]	1.06 [0.53; 1.59]
	0.43 [-0.40; 1.26]	0.55 [-0.20; 1.29]	0.77 [0.03; 1.51]	0.35 [-0.25; 0.95]	7	0.20 [-0.11; 0.52]	0.34 [0.00; 0.69]	0.13 [-0.22; 0.49]	0.47 [0.09; 0.86]	0.55 [0.18; 0.91]	0.49 [0.12; 0.87]	0.75 [0.24; 1.26]
	0.75 [-0.08; 1.59]	0.87 [0.12; 1.63]	1.10 [0.35; 1.85]	0.68 [0.07; 1.29]	0.33 [-0.26; 0.92]	8	0.14 [-0.22; 0.50]	-0.07 [-0.44; 0.29]	0.27 [-0.13; 0.67]	0.34 [-0.03; 0.72]	0.29 [-0.09; 0.67]	0.55 [0.03; 1.06]
	1.01 [0.16; 1.87]	1.13 [0.36; 1.90]	1.36 [0.59; 2.13]	0.93 [0.31; 1.56]	0.59 [-0.03; 1.20]	0.26 [-0.36; 0.87]	9	-0.21 [-0.60; 0.18]	0.13 [-0.29; 0.55]	0.20 [-0.19; 0.60]	0.15 [-0.26; 0.55]	0.41 [-0.13; 0.94]
	0.98 [0.03; 1.93]	1.10 [0.23; 1.97]	1.33 [0.46; 2.20]	0.90 [0.20; 1.60]	0.55 [-0.12; 1.23]	0.23 [-0.46; 0.91]	-0.03 [-0.73; 0.66]	10	0.34 [-0.07; 0.75]	0.41 [0.03; 0.80]	0.36 [-0.04; 0.76]	0.62 [0.09; 1.14]
	1.16 [0.20; 2.12]	1.28 [0.39; 2.16]	1.50 [0.62; 2.39]	1.08 [0.36; 1.79]	0.73 [0.03; 1.42]	0.40 [-0.30; 1.10]	0.14 [-0.57; 0.86]	0.18 [-0.56; 0.92]	11	0.07 [-0.34; 0.49]	0.02 [-0.41; 0.44]	0.28 [-0.27; 0.82]
	1.33 [0.38; 2.28]	1.45 [0.58; 2.33]	1.68 [0.81; 2.55]	1.26 [0.55; 1.96]	0.91 [0.23; 1.59]	0.58 [-0.11; 1.26]	0.32 [-0.38; 1.02]	0.35 [-0.37; 1.08]	0.18 [-0.56; 0.92]	12	-0.06 [-0.46; 0.35]	0.20 [-0.33; 0.73]
	1.45 [0.50; 2.41]	1.57 [0.69; 2.45]	1.80 [0.92; 2.68]	1.38 [0.67; 2.08]	1.03 [0.34; 1.72]	0.70 [0.01; 1.39]	0.44 [-0.26; 1.15]	0.47 [-0.26; 1.21]	0.30 [-0.45; 1.05]	0.12 [-0.61; 0.85]	13	0.26 [-0.28; 0.80]
	1.43 [0.41; 2.45]	1.55 [0.60; 2.50]	1.78 [0.83; 2.72]	1.35 [0.57; 2.14]	1.00 [0.23; 1.77]	0.68 [-0.10; 1.45]	0.42 [-0.36; 1.20]	0.45 [-0.36; 1.26]	0.27 [-0.55; 1.10]	0.10 [-0.71; 0.91]	-0.02 [-0.84; 0.79]	14
EC												

Table 2. Netleague tables for EO and EC conditions of first subnetwork (upper) and second subnetwork (lower). Relative effect estimates for the contrasts between the different intervention and control arms for EO condition (lower triangle) and EC condition (upper triangle). Statistically significant effects are shown in bold letters and highlighted in white cells. SMD: standardized mean

1.2. Strengths and limitations

We performed an extensive search, but some limitations must be considered. A potential limitation is the classification of some tasks and sway parameters based on definitions presented in the literature. In addition, some studies did not provide sufficient details to extract outcomes and adequately assess quality. Confidence in our results were only assessed using CIneMA and care must be taken in the interpretation of these results as we included a small sample of studies in the quantitative analyses.

1.3. Implications for practice and research

This systematic review discussed the strengths and limitations of age and gender-related normative data as well as methodological characteristics to outline future perspectives and needs. We pointed out low methodological quality, sparse reporting, and variability in measurement characteristics. As noted, there was variability in the definition of tasks and sway parameters. The classification of these tasks showed that most studies focused on static movement control (i.e. as activity-based conditions) which is different to static measurement (external conditions). There is a need for reference values in dynamic movement control-based tasks (i.e. voluntary body movements). Furthermore, there could be benefit in exploring the movements evaluated with respect to the Systems Framework for Postural Control (SFPC) (Sibley et al., 2015). The Motor Control Test (MCT), the Adaptation Test (ADT) and the Concussion Balance Test (COBALT) evaluated the most components of the SFPC (4 items). However, only one task was used in more than three studies, the MCT. The four SFPC components evaluated in the MCT were static stability, underlying motor systems, reactive postural control, and sensory integration. This framework can be used to identify underlying postural deficits for better patient management. Therefore, there is a need to evaluate balance using standardized tasks or designing future tasks encompassing the most components of the SFPC to fully understand the underlying postural mechanisms. This recommendation is also applied to exergaming interventions in the geriatric population (Tahmosybayat et al., 2018).

From a clinical perspective, there is a need for stratified normative which considers normal aging processes separately for children and adults as well as highly-active individuals. Cohen and colleagues (1996) (H. Cohen et al., 1996b) demonstrated that age-appropriate reference values per decade should be used for adults as postural control continues to decline up to the ninth decade. These deficits become more pronounced in high-risk concussion populations. It has been noted that differences could be expected among biological ages as children are still in the developing stages (Verbecque, Vereeck, et al., 2016b). Therefore, reference values per decade for adults and biological ages for children might be necessary for better comparisons in clinical practice. Furthermore, our findings seem to suggest a turning point in children and adults. Age-related differences point to improved stability around the age of 8 for children whereas adults swayed more from middle age and upwards.

1.4. Conclusions

Thus, our results revealed gender and age-related effects on balance. We found that females were more stable than males in eyes closed conditions. In addition, we also observed that children younger than 8 years of age and adults over 50 swayed more in eyes open condition and closed suggesting a turning point. Future studies need to ensure that enough information about participants is provided (i.e. anthropometric data). Standardization of experimental conditions and sway parameters harmonisation are still needed to ensure high-quality assessment. Finally, evidence-based management of postural impairments require both age and gender-related normative data.

- Adamec, I., Juren Meaški, S., Krbot Skorić, M., Jažić, K., Crnošija, L., Milivojević, I., & Habek, M. (2020). Persistent postural-perceptual dizziness: Clinical and neurophysiological study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 72, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.01.043>
- Agrawal, Y., Pineault, K. G., & Semenov, Y. R. (2018). Health-related quality of life and economic burden of vestibular loss in older adults. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 3(1), 8–15. <https://doi.org/10.1002/lio2.129>
- Agrawal, Y., Zuniga, M. G., Davalos-Bichara, M., Schubert, M. C., Walston, J. D., Hughes, J., & Carey, J. P. (2012). Decline in semicircular canal and otolith function with age. *Otology and Neurotology*, 33(5). <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3182545061>
- Aharoni, M. M. H., Lubetzky, A. V., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). Factors associated with dynamic balance in people with Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD): a cross-sectional study using a virtual-reality Four Square Step Test. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00852-0>
- Ak, A. K., Çelebisoy, N., Özdemir, H. N., & Gökçay, F. (2022). Vestibular migraine and persistent postural perceptual dizziness: Handicap, emotional comorbidities, quality of life and personality traits. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 221, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2022.107409>
- Akis, E., Gurses, E., & Aksoy, S. (2023). Vestibulo-spinal reflex tests to determine unilateral vestibular loss. *Hearing, Balance and Communication*, 21(1), 61–66. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2125243>
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Albuquerque-Sendín, F., Fernández-de-las-Peñas, C., Santos-del-Rey, M., & Martín-Vallejo, F. J. (2009). Immediate effects of bilateral manipulation of talocrural joints on standing stability in healthy subjects. *Manual Therapy*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.11.005>
- Alghwiri, A. A., Whitney, S. L., Baker, C. E., Sparto, P. J., Marchetti, G. F., Rogers, J. C., & Furman, J. M. (2012). The development and validation of the vestibular activities and participation measure. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(10). <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.017>
- Alonso, A. C., Luna, N. M. S., Mochizuki, L., Barbieri, F., Santos, S., & Greve, J. M. D. (2012). The influence of anthropometric factors on postural balance: the relationship between body composition and posturographic measurements in young adults. *Clinics*, 67(12), 1433–1441. [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(12\)14](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(12)14)
- Alvarez-Otero, R., & Perez-Fernandez, N. (2017). The limits of stability in patients with unilateral vestibulopathy. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(10). <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1339326>
- Amblard, B., & Cremieux, J. (1976). [Role of visual information concerning movement in the maintenance of postural equilibrium in man]. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie*

- Appliquees Aux Effets de l'agression*, 17(C Spec No).
- Angelaki, D. E. (2004). Eyes on target: What neurons must do for the vestibuloocular reflex during linear motion. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 92, Issue 1, pp. 20–35). <https://doi.org/10.1152/jn.00047.2004>
- Angelaki, D. E., & Cullen, K. E. (2008). Vestibular System: The Many Facets of a Multimodal Sense. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 125–150. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125555>
- Angelaki, D. E., Green, A. M., & Dickman, J. D. (2001). *Differential Sensorimotor Processing of Vestibulo-Ocular Signals during Rotation and Translation*.
- Anson, E. R., Ehrenburg, M. R., Wei, E. X., Bakar, D., Simonsick, E., & Agrawal, Y. (2019). Saccular function is associated with both angular and distance errors on the triangle completion test. *Clinical Neurophysiology*, 130(11), 2137–2143. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.08.027>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993a). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993b). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Assländer, L., & Streuber, S. (2020). Virtual reality as a tool for balance research: Eyes open body sway is reproduced in photo-realistic, but not in abstract virtual scenes. *PLoS ONE*, 15(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241479>
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Curtin, A., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2011). Using MazeSuite and functional near infrared spectroscopy to study learning in spatial navigation. *Journal of Visualized Experiments*, 56. <https://doi.org/10.3791/3443>
- Baek, J. H., Zheng, Y., Darlington, C. L., & Smith, P. F. (2010). Evidence that spatial memory deficits following bilateral vestibular deafferentation in rats are probably permanent. *Neurobiology of Learning and Memory*, 94(3), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.08.007>
- Balduzzi, S., Rücker, G., Nikolakopoulou, A., Papakonstantinou, T., Salanti, G., Efthimiou, O., & Schwarzer, G. (2023). netmeta: An R Package for Network Meta-Analysis Using Frequentist Methods. *Journal of Statistical Software*, 106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i02>
- Baloh, R. W., Enrietto, J., Jacobson, K. M., & Lin, A. (2001). Age-related changes in vestibular function a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 210–219. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03747.x>
- Baloh, R. W., Jacobson, K. M., Beykirch, K., & Honrubia, V. (1998). Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of Neurology*, 55(5), 649–654. <https://doi.org/10.1001/archneur.55.5.649>
- Baloh, R. W., Ying, S. H., & Jacobson, K. M. (2003). A longitudinal study of gait and balance dysfunction in normal older people. *Archives of Neurology*, 60(6).

- <https://doi.org/10.1001/archneur.60.6.835>
- Barozzi, S., Socci, M., Soi, D., Di Berardino, F., Fabio, G., Forti, S., Gasbarre, A. M., Brambilla, D., & Cesarani, A. (2014). Reliability of postural control measures in children and young adolescents. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(7), 2069–2077. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9883-4>
- Ben Achour Lebib, S., Missaoui, B., Miri, I., Ben Salah, F. Z., & Dziri, C. (2006). Rôle du Neurocom Balance Master® dans l'évaluation des troubles de l'équilibre et du risque de chute chez le sujet âgé. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*, 49(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2006.03.005>
- Berg, K. O., Maki, B. E., Williams, J. I., Holliday, P. J., & Wood-Dauphinee, S. L. (1992). Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(11), 1073–1080. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1444775>
- Besnard, S., Lopez, C., Brandt, T., Denise, P., & Smith, P. F. (2015). Editorial: The Vestibular System in Cognitive and Memory Processes in Mammalians. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9(November), 7–10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00055>
- Besnard, S., Machado, M. L., Vignaux, G., Boulouard, M., Coquerel, A., Bouet, V., Freret, T., Denise, P., & Lelong-Boulouard, V. (2011). Influence of vestibular input on spatial and nonspatial memory and on hippocampal NMDA receptors. *Hippocampus*, 22(4), 814–826. <https://doi.org/10.1002/hipo.20942>
- Besnard, S., Tighilet, B., Chabbert, C., Hitier, M., Toulouse, J., Le Gall, A., Machado, M. L., & Smith, P. F. (2018). The balance of sleep: Role of the vestibular sensory system. In *Sleep Medicine Reviews* (Vol. 42, pp. 220–228). W.B. Saunders Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2018.09.001>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Du Lac, S., Hoffman, H. J., & Agrawal, Y. (2015). Vestibular vertigo and comorbid cognitive and psychiatric impairment: The 2008 National Health Interview Survey. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 87(4), 367–372. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2015-310319>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Trevino, C., Ferrucci, L., Resnick, S. M., Simonsick, E. M., Xue, Q. L., & Agrawal, Y. (2015). Association between visuospatial ability and vestibular function in the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(9), 1837–1844. <https://doi.org/10.1111/jgs.13609>
- Bisdorff, A., Bosser, G., Gueguen, R., & Perrin, P. (2013). The epidemiology of vertigo, dizziness, and unsteadiness and its links to co-morbidities. *Frontiers in Neurology*, 4(MAR(March)), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00029>

- Bisdorff, A. R., Staab, J. P., & Newman-Toker, D. E. (2015). Overview of the International Classification of Vestibular Disorders. *Neurologic Clinics*, 33(3), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2015.04.010>
- Bisdorff, A., Von Brevern, M., Lempert, T., & Newman-Toker, D. E. (2009). Classification of vestibular symptoms: towards an international classification of vestibular disorders. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 19(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0343>
- Bizzo, G., Guillet, N., Patat, A., & Gagey, P. M. (1985). Specifications for building a vertical force platform designed for clinical stabilometry. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 23(5), 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02448937>
- Black, F. O., & Nashner, L. M. (1984). Postural Disturbance in Patients with Benign Paroxysmal Positional Nystagmus. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 93(6), 595–599. <https://doi.org/10.1177/000348948409300612>
- Black, F. O., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Abnormal postural control associated with peripheral vestibular disorders. *Progress in Brain Research*, 76(C), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64513-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64513-6)
- Black, F. O., & Wall, C. (1981). Comparison of vestibulo-ocular and vestibulospinal screening tests. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 89(5), 811–817. <https://doi.org/10.1177/019459988108900523>
- Black, F. O., Wall, C., & Nashner, L. M. (1983). Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 199–210. <https://doi.org/10.3109/00016488309130936>
- Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, 3(5), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1)
- Bloem, B. R., Visser, J. E., & Allum, J. H. J. (2003). Chapter 20 Posturography. In *Handbook of Clinical Neurophysiology* (Vol. 1, Issue C). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1567-4231\(09\)70168-6](https://doi.org/10.1016/S1567-4231(09)70168-6)
- Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Boisgontie, M., Mignardot, J.-B., Nougier, V., Olivier, I., & Palluel, E. (2011). Attentional cost of the executive functions involved in postural control. *Science et Motricite*, 74. <https://doi.org/10.1051/sm/2011106>
- Borel, L., Lopez, C., Péruch, P., & Lacour, M. (2008). Vestibular syndrome: A change in internal spatial representation. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.002>
- Borich, M. R., Brodie, S. M., Gray, W. A., Ionta, S., & Boyd, L. A. (2015). Understanding the role of the primary somatosensory cortex: Opportunities for rehabilitation. *Neuropsychologia*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.007>
- Bosmans, J., Gommeren, H., Mertens, G., Cras, P., Engelborghs, S., Van Ombergen, A., Vereeck, L., Gilles, A.,

- & Van Rompaey, V. (2022). Associations of Bilateral Vestibulopathy with Cognition in Older Adults Matched with Healthy Controls for Hearing Status. *JAMA Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 148(8), 731–739. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2022.1303>
- Bouccara, D., Rubin, F., Bonfils, P., & Lisan, Q. (2018). Management of vertigo and dizziness. In *Revue de Medecine Interne* (Vol. 39, Issue 11, pp. 869–874). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2018.02.004>
- Branco Lopes, A., Leal, G., Malvy, L., Wauquiez, G., Ponchel, A., Rivera, D., & Arango-Lasprilla, J. C. (2021). Neuropsychology in France. *Applied Neuropsychology:Adult*, 28(3), 328–339. <https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1633329>
- Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). The dizzy patient: Don't forget disorders of the central vestibular system. In *Nature Reviews Neurology* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.58>
- Brandt, T., Schautzer, F., Hamilton, D. A., Brüning, R., Markowitsch, H. J., Kalla, R., Darlington, C., Smith, P., & Strupp, M. (2005). Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain*, 128(11), 2732–2741. <https://doi.org/10.1093/brain/awh617>
- Breinbauer, H. A., Contreras, M. D., Lira, J. P., Guevara, C., Castillo, L., Ruëdinger, K., Muñoz, D., & Delano, P. H. (2020). Spatial Navigation Is Distinctively Impaired in Persistent Postural Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01361>
- Bremner, A. J., Holmes, N. P., & Spence, C. (2008). Infants lost in (peripersonal) space? *Trends in Cognitive Sciences*, 12(8), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.05.003>
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Experimental Brain Research*, 63(3). <https://doi.org/10.1007/BF00237488>
- Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., Mon-Williams, M., & Mushtaq, F. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52(2), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
- Browne, J., & O'Hare, N. (2001). Review of the different methods for assessing standing balance. *Physiotherapy*, 87(9), 489–495. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60696-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60696-7)
- Burr, D., & Gori, M. (2011). Multisensory integration develops late in humans. In *The Neural Bases of Multisensory Processes*. <https://doi.org/10.1201/b11092-23>
- Caldwell, A. R. (2022). SimplyAgree: An R package and jamovi Module for Simplifying Agreement and Reliability Analyses. *Journal of Open Source Software*, 7(71). <https://doi.org/10.21105/joss.04148>
- Carrick, F. R., Oggero, E., & Pagnacco, G. (2007). Posturographic changes associated with music listening. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 13(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/acm.2007.7020>
- Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., Sparto, P. J., Perera, S., Redfern, M. S., Fall, P. A., & Furman, J. M. (2010). Longitudinal posturography and rotational testing in children three to

- nine years of age: Normative data. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 142(5), 708–714.
<https://doi.org/10.1016/j.otohns.2010.01.028>
- Castro, P., Bancroft, M. J., Arshad, Q., & Kaski, D. (2022). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) from Brain Imaging to Behaviour and Perception. *Brain Sciences*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/brainsci12060753>
- Cathers, I., Day, B. L., & Fitzpatrick, R. C. (2005). Otolith and canal reflexes in human standing. *The Journal of Physiology*, 563(1), 229–234.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.079525>
- Celis-Aguilar, E., Castro-Urquiza, A., & Mariscal-Castro, J. (2018). Evaluation and interpretation of the bucket test in healthy individuals*. *Acta Otolaryngologica*, 138(5), 458–462.
<https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1410289>
- Cha, Y. H., Golding, J. F., Keshavarz, B., Furman, J., Kim, J. S., Lopez-Escamez, J. A., Magnusson, M., Yates, B. J., Lawson, B. D., Staab, J. P., & Bisdorff, A. (2021). Motion sickness diagnostic criteria: Consensus Document of the Classification Committee of the Bárány Society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(5), 327–344.
<https://doi.org/10.3233/VES-200005>
- Chabbert, C. (2013). New insights into vestibular neuropharmacology: From bench to bedside. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 23(3), 107–111.
<https://doi.org/10.3233/VES-130495>
- Chaikeeree, N., Saengsirisuwan, V., Chinsongkram, B., & Boonsinsukh, R. (2015). Interaction of age and foam types used in Clinical Test for Sensory Interaction and Balance (CTSIB). *Gait and Posture*, 41(1), 313–315.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.011>
- Chander, H., Arachchige, S. N. K. K., Hill, C. M., Turner, A. J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2019). Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behavioral Sciences*, 9(11).
<https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Chari, D. A., Madhani, A., Sharon, J. D., & Lewis, R. F. (2022). Evidence for cognitive impairment in patients with vestibular disorders. *Journal of Neurology*, 269(11), 5831–5842.
<https://doi.org/10.1007/s00415-022-11289-3>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010a). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010b). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Cheng, Y.-Y., Kuo, C.-H., Hsieh, W.-L., Lee, S.-D., Lee, W.-J., Chen, L.-K., & Kao, C.-L. (2012). Anxiety, depression and quality of life (QoL) in patients with chronic dizziness. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 54(1), 131–135.
<https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.04.007>
- Cheng, Z., & Gu, Y. (2018). Vestibular system and self-motion. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12(November), 1–9.
<https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00456>

- Chetana, N., & Jayesh, R. (2015). Subjective visual vertical in various vestibular disorders by using a simple bucket test. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 67(2), 180–184. <https://doi.org/10.1007/s12070-014-0760-0>
- Chiarella, G., Petrolo, C., Riccelli, R., Giofrè, L., Olivadese, G., Gioacchini, F. M., Scarpa, A., Cassandro, E., & Passamonti, L. (2016). Chronic subjective dizziness: Analysis of underlying personality factors. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(4), 403–408. <https://doi.org/10.3233/VES-160590>
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002a). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002b). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiarovano, E., de Waele, C., MacDougall, H. G., Rogers, S. J., Burgess, A. M., & Curthoys, I. S. (2015). Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots or at a virtual reality scene. *Frontiers in Neurology*, 6(JUL). <https://doi.org/10.3389/fneur.2015.00164>
- Chiarovano, E., Wang, W., Reynolds, P., & MacDougall, H. G. (2018). Imbalance: Objective measures versus subjective self-report in clinical practice. *Gait and Posture*, 59, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.10.019>
- Chiarovano, E., Wang, W., Rogers, S. J., MacDougall, H. G., Curthoys, I. S., & de Waele, C. (2017). Balance in virtual reality: Effect of age and bilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, 8(JAN). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00005>
- Clark, R. A., Mentiplay, B. F., Pua, Y. H., & Bower, K. J. (2018). Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review. *Gait and Posture*, 61(December 2017), 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.022>
- Clark, S., Rose, D. J., & Fujimoto, K. (1997). Generalizability of the limits of stability test in the evaluation of dynamic balance among older adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(10), 1078–1084. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90131-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90131-3)
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996a). Changes in Sensory Organization Test Scores with Age. In *Age and Ageing* (Vol. 25). <https://academic.oup.com/ageing/article/25/1/39/35818>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996b). Changes in sensory organization test scores with age. *Age and Ageing*, 25(1), 39–44. <https://doi.org/10.1093/ageing/25.1.39>
- Cohen, H. S. (2019). A review on screening tests for vestibular disorders. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 122, Issue 1, pp. 81–92). American Physiological Society. <https://doi.org/10.1152/jn.00819.2018>
- Cohen, H. S., Mulavara, A. P., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2019). Screening for Vestibular Disorders Using the Modified Clinical Test of Sensory Interaction and

- Balance and Tandem Walking With Eyes Closed. *Otology and Neurotology*, 40(5), 658–665. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002173>
- Cohen, H. S., & Sangi-Haghpeykar, H. (2012). Subjective visual vertical in vestibular disorders measured with the bucket test. *Acta Oto-Laryngologica*, 132(8). <https://doi.org/10.3109/00016489.2012.668710>
- Cohen, H. S., Sangi-Haghpeykar, H., Ricci, N. A., Kampangkaew, J., & Williamson, R. A. (2014). Utility of stepping, walking, and head impulses for screening patients for vestibular impairments. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 151(1), 131–136. <https://doi.org/10.1177/0194599814527724>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018a). Tandem walking as a quick screening test for vestibular disorders. *Laryngoscope*, 128(7), 1687–1691. <https://doi.org/10.1002/lary.27022>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018b). Utility of quick oculomotor tests for screening the vestibular system in the subacute and chronic populations. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(4), 382–386. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1398838>
- Commins, S., Duffin, J., Chaves, K., Leahy, D., Corcoran, K., Caffrey, M., Keenan, L., Finan, D., & Thornberry, C. (2020). NavWell: A simplified virtual-reality platform for spatial navigation and memory experiments. *Behavior Research Methods*, 52(3), 1189–1207. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01310-5>
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "What", "Where", and "How". *Acta Psychologica*, 107(1–3), 43–68. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00021-X)
- Creem-Regehr, S. H., Kelly, J. W., Bodenheimer, B., & Stefanucci, J. K. (2024). Virtual reality as a tool to understand spatial navigation. In *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology* (pp. 103–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820480-1.00011-5>
- Cullen, K. E. (2012). The vestibular system: Multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends in Neurosciences*, 35(3), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.12.001>
- Cullen, K. E. (2016). Physiology of central pathways. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 17–40). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00002-9>
- Curthoys, I. S. (2012). The interpretation of clinical tests of peripheral vestibular function. In *Laryngoscope* (Vol. 122, Issue 6, pp. 1342–1352). <https://doi.org/10.1002/lary.23258>
- Danneels, M., Van Hecke, R., Leyssens, L., van de Berg, R., Dhooge, I., Cambier, D., Delrue, S., Van Rompaey, V., & Maes, L. (2023). The impact of vestibular function on cognitive–motor interference: a case–control study on dual-tasking in persons with bilateral vestibulopathy and normal hearing. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40465-2>
- De Gelder, B., & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.014>

- de Haan, E. H. F., & Dijkerman, H. C. (2020). Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-evaluation and a New Model. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 24, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.04.003>
- de la Torre, J., Marin, J., Marin, J. J., Auria, J. M., & Sanchez-Valverde, M. B. (2017). Balance study in asymptomatic subjects: Determination of significant variables and reference patterns to improve clinical application. *Journal of Biomechanics*, 65, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.013>
- De Valck, C. F. J., Denollet, J., Wuyts, F. L., & Van De Heyning, P. H. (2007). Increased handicap in vertigo patients with a type-D personality. *Audiological Medicine*, 5(3), 169–175. <https://doi.org/10.1080/16513860701497441>
- De Vestel, C., De Hertogh, W., Van Rompaey, V., & Vereeck, L. (2022). Comparison of Clinical Balance and Visual Dependence Tests in Patients With Chronic Dizziness With and Without Persistent Postural-Perceptual Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.880714>
- Denise, P., Paolino, M., & Golding, J. F. (2013). Motion sickness susceptibility in healthy subjects and vestibular patients: Effects of gender, age and trait-anxiety. *Journal of Vestibular Research*, 203–210. <https://doi.org/10.3233/VES-130501>
- Deroualle, D., Borel, L., Tanguy, B., Bernard-Demanze, L., Devèze, A., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2019). Unilateral vestibular deafferentation impairs embodied spatial cognition. *Journal of Neurology*, 266, 149–159. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09433-7>
- Derrington, A. M., Allen, H. A., & Delicato, L. S. (2004). Visual Mechanisms of Motion Analysis and Motion Perception. *Annual Review of Psychology*, 55(1), 181–205. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.141903>
- Dessai, T. D., & Prasannan, A. (2021). Subjective visual vertical and horizontal: bucket test normative. *Hearing, Balance and Communication*, 19(4). <https://doi.org/10.1080/21695717.2021.1943786>
- di Fabio, R. P. (1995). Sensitivity and specificity of platform posturography for identifying patients with vestibular dysfunction. *Physical Therapy*, 75(4), 290–305. <https://doi.org/10.1093/ptj/75.4.290>
- di Fabio, R. P. (1996). Meta-analysis of the sensitivity and specificity of platform posturography. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 122(2), 150–156. <https://doi.org/10.1001/archotol.1996.01890140036008>
- Di Fabio, R. P., & Foudriat, B. A. (1996). Responsiveness and reliability of a pediatric strategy score for balance. *Physiotherapy Research International*, 1(3), 180–194. <https://doi.org/10.1002/pri.57>
- Dickman, J. D. (2018). The Vestibular System. In *Fundamental Neuroscience for Basic and Clinical Applications: Fifth Edition* (Fifth Edit, pp. 320–333). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39632-5.00022-0>
- Dieterich, M. (2007). Central vestibular disorders. In *Journal of Neurology* (Vol. 254, Issue 5, pp. 559–568). <https://doi.org/10.1007/s00415-006-0340-7>

- Dieterich, M., & Brandt, T. (2024). Central vestibular networking for sensorimotor control, cognition, and emotion. *Current Opinion in Neurology*, 37(1), 74–82. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001233>
- Dobbels, B., Lucieer, F., Mertens, G., Gilles, A., Moyaert, J., van de Heyning, P., Guinand, N., Fornos, A. P., Herssens, N., Hallemans, A., Vereeck, L., Vanderveken, O., van Rompaey, V., & van de Berg, R. (2020). Prospective cohort study on the predictors of fall risk in 119 patients with bilateral vestibulopathy. *PLoS ONE*, 15(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228768>
- Dobbels, B., Mertens, G., Gilles, A., Claes, A., Moyaert, J., Van De Berg, R., Van De Heyning, P., Vanderveken, O., & Van Rompaey, V. (2019). Cognitive function in acquired bilateral vestibulopathy: A cross-sectional study on cognition, hearing, and vestibular loss. *Frontiers in Neuroscience*, 13(APR), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00340>
- Dobbels, B., Peetermans, O., Boon, B., Mertens, G., Van de Heyning, P., & Van Rompaey, V. (2019). Impact of bilateral vestibulopathy on spatial and nonspatial cognition: A systematic review. *Ear and Hearing*, 40(4), 757–765. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000679>
- Dobie, T. G. (2019). *Psychological Mechanisms That Exacerbate Motion Sickness* (pp. 113–127). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97493-4_6
- Dolins, F. L., Schweller, K., & Milne, S. (2017). Technology advancing the study of animal cognition: Using virtual reality to present virtually simulated environments to investigate nonhuman primate spatial cognition. *Current Zoology*, 63(1), 97–108. <https://doi.org/10.1093/cz/zow121>
- Domènech-Vadillo, E., Aguilera-Aguilera, G., Sánchez-Blanco, C., Batuecas-Caletrio, Á., Guajardo, C., Pérez, N., Trinidad-Ruiz, G., Gimeno, C., Rama, J., Rossi-Izquierdo, M., San-Roman-Rodriguez, E., Patiño-Castiñeira, B., Espinosa-Sanchez, J. M., Mاتیئو, E., Barona, R., Krstulovic, C., Benitez-Rosario, J., Santandreu, E., Zuma e Maia, F. C., ... Rey-Martínez, J. (2019). Normative data for static balance testing in healthy individuals using open source computerized posturography. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5170-6>
- Donovan, J., De Silva, L., Cox, H., Palmer, G., & Semciw, A. I. (2023). Vestibular dysfunction in people who fall: A systematic review and meta-analysis of prevalence and associated factors. *Clinical Rehabilitation*, 37(9), 1229–1247. <https://doi.org/10.1177/02692155231162423>
- Doyle, T. L., Newton, R. U., & Burnett, A. F. (2005). Reliability of traditional and fractal dimension measures of quiet stance center of pressure in young, healthy people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(10), 2034–2040. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.05.014>
- Duracinsky, M., Mosnier, I., Bouccara, D., Sterkers, O., Chassany, O., Attal, N., Bertholon, P., Bordure, P., Chays, A., Dubois, B., Dubreuil, C., Ferber, C., Ferran, P., Frayssé, M. J., Garcia-Macé, J., Gehanno, P., Lacour, M., Liard, F., Mari, I., ... Toupet, M. (2007). Literature review of questionnaires assessing vertigo and dizziness, and their impact on patients' quality of life. *Value in Health*, 10(4), 273–284.

- <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2007.00182.x>
- Eikema, D. J. A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2012). Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age*, 34(6), 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9310-9>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). How vestibular dysfunction transforms into symptoms of depersonalization and derealization? *Journal of the Neurological Sciences*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120530>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Hartman, T. G., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). The overarching effects of vestibular deficit: Imbalance, anxiety, and spatial disorientation. *Journal of the Neurological Sciences*, 451. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120723>
- Eriksen, N. D., & Hougaard, D. D. (2023). Age- and gender-specific normative data on computerized dynamic posturography in a cohort of Danish adults. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(5), 2191–2200. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07706-y>
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras, R., & Soto-Varela, A. (2016). Postural changes associated with ageing on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Auris Nasus Larynx*, 43(2), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2015.07.001>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012a). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012b). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Rossi-Izquierdo, M., Lirola-Delgado, A., Vaamonde-Sánchez-Andrade, I., del-Río-Valeiras, M., & Soto-Varela, A. (2016). Posturographic limits of stability can predict the increased risk of falls in elderly patients with instability? *Acta Oto-Laryngologica*, 136(11). <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1201591>
- Farenc, I., Rougier, P., & Berger, L. (2003). The influence of gender and body characteristics on upright stance. *Annals of Human Biology*, 30(3), 279–294. <https://doi.org/10.1080/030144603100068842>
- Fearing, F. S. (1924). The factors influencing static equilibrium. *J Comp Psychol*, 4, 91–121.
- Fong, E., Li, C., Aslakson, R., & Agrawal, Y. (2015). Systematic review of patient-reported outcome measures in clinical vestibular research. In *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 96, Issue 2, pp. 357–365). W.B. Saunders.

- <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.017>
- Formeister, E. J., Krauter, R., Kirk, L., Zhu, T. R., Rizk, H. G., & Sharon, J. D. (2020). Understanding the Dizziness Handicap Inventory (DHI): A Cross Sectional Analysis of Symptom Factors That Contribute to DHI Variance. *Otology & Neurotology*, 41(1), 86–93. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002438>
- Frank, S. M., Mark, X., & Greenlee, W. (2018). The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? *REVIEW Sensory Processing J Neurophysiol*, 120, 1438–1450. <https://doi.org/10.1152/jn.00907.2017>. -Here
- Freeman, E. E., Muñoz, B., Rubin, G., & West, S. K. (2007). Visual field loss increases the risk of falls in older adults: The salisbury eye evaluation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 48(10). <https://doi.org/10.1167/iovs.07-0326>
- Friello, P., Silver, N., Sangi-Haghpeykar, H., & Cohen, H. S. (2022). Screening for balance in children and adults in a community science education setting: Normative data, influence of age, sex, and body mass index, and feasibility. *PLoS ONE*, 17(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268030>
- Fujimoto, C., Murofushi, T., Chihara, Y., Ushio, M., Sugasawa, K., Yamaguchi, T., Yamasoba, T., & Iwasaki, S. (2009). Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: Analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1408–1414. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.002>
- Fukushima, A., Kabaya, K., Minakata, T., Katsumi, S., Esaki, S., & Iwasaki, S. (2024). Age-related differences in the characteristics of persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1378206>
- Furman, J. M. (1995). Role of posturography in the management of vestibular patients. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 112(1), 8–15. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(95\)70300-4](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(95)70300-4)
- Furman, J. M., & Redfern, M. S. (2001). Effect of aging on the otolith-ocular reflex. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 11(2). <https://doi.org/10.3233/ves-2001-11204>
- Gabriel, G. A., Harris, L. R., Gnanasegaram, J. J., Cushing, S. L., Gordon, K. A., Haycock, B. C., & Campos, J. L. (2022). Age-related changes to vestibular heave and pitch perception and associations with postural control. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09807-4>
- Gagey, P. M. (2016). International standardization of clinical stabilometry (Minutes of the meeting of posturologists, Paris 07.10.2015). In *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal* (Vol. 14, Issue September). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.315>
- Gagey, P.-M. (2016). Recording Conditions - Normes13. *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal*, 14(December 2016). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.362>
- Gálvez-García, G., Aldunate, N., Bascour-Sandoval, C., Barramuño, M., Fonseca, F., & Gómez-Milán, E. (2020). Decreasing motion sickness by mixing different techniques. *Applied Ergonomics*, 82.

- <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102931>
- Gammeri, R., Léonard, J., Toupet, M., Hautefort, C., van Nechel, C., Besnard, S., Machado, M. L., Nakul, E., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2022). Navigation strategies in patients with vestibular loss tested in a virtual reality T-maze. *Journal of Neurology*, 269(8), 4333–4348. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11069-z>
- Ganança, F. F., Gazzola, J. M., Aratani, M. C., Perracini, M. R., & Ganança, M. M. (2006). Circumstances and consequences of falls in elderly people with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 72(3), 388–392. [https://doi.org/10.1016/s1808-8694\(15\)30974-5](https://doi.org/10.1016/s1808-8694(15)30974-5)
- García-Soidán, J. L., García-Liñeira, J., Leirós-Rodríguez, R., & Soto-Rodríguez, A. (2020). Physical Activity Practice and Optimal Development of Postural Control in School Children: Are They Related? *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2919. <https://doi.org/10.3390/jcm9092919>
- Garrett, B., Taverner, T., Gromala, D., Tao, G., Cordingley, E., & Sun, C. (2018). Virtual reality clinical research: Promises and challenges. In *JMIR Serious Games* (Vol. 6, Issue 4). JMIR Publications Inc. <https://doi.org/10.2196/10839>
- Gauchard, G. (2003). Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research*, 45(4), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(03\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(03)00008-7)
- Geller, A. S., Schleifer, I. K., Sederberg, P. B., Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2007). *PyEPL: A cross-platform experiment-programming library*.
- Gibbons, C. T., Amazeen, P. G., & Likens, A. D. (2019). Effects of foot placement on postural sway in the anteroposterior and mediolateral directions. *Motor Control*, 23(2), 149–170. <https://doi.org/10.1123/mc.2017-0074>
- Gioacchini, F. M., Alicandri-Ciufelli, M., Kaleci, S., Magliulo, G., & Re, M. (2014). Prevalence and diagnosis of vestibular disorders in children: A review. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(5), 718–724. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.02.009>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018a). *Normative Data for the BTrackS Balance Test of Postural Sway: Results from 16,357 Community-Dwelling Individuals Who Were 5 to 100 Years Old* (Vol. 98). <https://academic.oup.com/ptj/article/98/9/779/4998861>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018b). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225–1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452>
- Goble, D. J., Brar, H., Brown, E. C., Marks, C. R., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the balance tracking system modified clinical test of sensory integration and balance protocol. *Medical Devices: Evidence and Research*, 12, 183–191. <https://doi.org/10.2147/MDER.S206530>
- Goble, D. J., Rauh, M. J., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the btracks balance test concussion-management tool: Results from 10045 athletes aged 8 to 21 years. *Journal of Athletic Training*, 54(4), 439–444. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-178-18>

- Gofrit, S. G., Mayler, Y., Eliashar, R., Bdolah-Abram, T., Ilan, O., & Gross, M. (2017). The Association between Vestibular Physical Examination, Vertigo Questionnaires, and the Electronystagmography in Patients with Vestibular Symptoms: A Prospective Study. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 126(4), 315–321.
<https://doi.org/10.1177/0003489417691298>
- Golding, J. F. (2006a). Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 129(1–2), 67–76.
<https://doi.org/10.1016/j.autneu.2006.07.019>
- Golding, J. F. (2006b). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248.
<https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Golding, J. F. (2016). Motion sickness. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 371–390). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00027-3>
- Gómez-Alvarez, F. B., & Jáuregui-Renaud, K. (2011). Psychological Symptoms and Spatial Orientation During the First 3 Months After Acute Unilateral Vestibular Lesion. *Archives of Medical Research*, 42(2), 97–103.
<https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.03.004>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2010). Poor Haptic Orientation Discrimination in Nonsighted Children May Reflect Disruption of Cross-Sensory Calibration. *Current Biology*, 20(3).
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.069>
- Graf, W., & Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus - Palevol*, 5(3–4), 637–655.
<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.12.009>
- Grill, E., Darrouzet, V., Mansmann, U., & Chabbert, C. (2024). Prevalence of vestibular disease in France: analysis of prescription data from a national health insurance database. *Journal of Neurology*.
<https://doi.org/10.1007/s00415-024-12423-z>
- Grill, E., Heuberger, M., Strobl, R., Saglam, M., Holle, R., Linkohr, B., Ladwig, K. H., Peters, A., Schneider, E., Jahn, K., & Lehn, N. (2018). Prevalence, Determinants, and Consequences of Vestibular Hypofunction. Results From the KORA-FF4 Survey. *Frontiers in Neurology*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01076>
- Grill, E., Penger, M., & Kentala, E. (2016). Health care utilization, prognosis and outcomes of vestibular disease in primary care settings: systematic review. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 36–44). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG.
<https://doi.org/10.1007/s00415-015-7913-2>
- Guerra-Jiménez, G., Arenas Rodríguez, A., Carlos, J., González, F., Plasencia, D. P., & Ramos Macías, Á. (2017). Epidemiology of Vestibular Disorders in the Otoneurology Unit. In *Acta Otorrinolaringol Esp* (Vol. 68, Issue 6). www.elsevier.es/otorrino
- Hackenberg, B., O'Brien, K., Döge, J., Lackner, K. J., Beutel, M. E., Münzel, T., Wild, P. S., Pfeiffer, N., Chalabi, J., Matthias, C., & Bahr-Hamm, K. (2023). Vertigo and its burden of disease—Results from a population-based cohort study. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 8(6), 1624–1630.
<https://doi.org/10.1002/lio2.1169>

- Hageman, P. A., Leibowitz, J. M., & Blanke, D. (1995). Age and gender effects on postural control measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(10), 961–965. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(95\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80075-1)
- Hamid, M. A., & Hughes, G. B. (1991). Specificity and Sensitivity of Dynamic Posturography A Retrospective Analysis. In *Acta Otolaryngol (Stockh)* (Vol. 481).
- Hamid, M. A., Hughes, G. B., & Kinney, S. E. (1991). Specificity and sensitivity of dynamic posturography: A retrospective analysis. *Acta Otolaryngologica*, 111(S481), 596–600. <https://doi.org/10.3109/00016489109131480>
- Harcourt, J. P. (1995). Posturography—applications and limitations in the management of the dizzy patient. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 20(4), 299–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1995.tb00045.x>
- Harro, C. C., Marquis, A., Piper, N., Burdis, C., & Harro, C. C. (2016). Reliability and Validity of Force Platform Measures of Balance Impairment in Individuals With Parkinson's Disease. *Physical Therapy*, 96(12), 1955–1964. <https://doi.org/10.2522/ptj.20160099>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020a). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait and Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020b). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait & Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Henry, N. E., Weart, A. N., Miller, E. M., Feltner, L. D., & Goss, D. L. (2022). Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in United States Military Academy Boxers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(3), 366–377. <https://doi.org/10.26603/001c.32547>
- Herssens, N., Verbecque, E., McCrum, C., Meijer, K., van de Berg, R., Saeys, W., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Hallemans, A. (2020). A Systematic Review on Balance Performance in Patients With Bilateral Vestibulopathy. *Physical Therapy*, 100(9), 1582–1594. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa083>
- Heutink, J., Broekman, M., Brookhuis, K. A., Melis-Dankers, B. J. M., & Cordes, C. (2019). The effects of habituation and adding a rest-frame on experienced simulator sickness in an advanced mobility scooter driving simulator. *Ergonomics*, 62(1), 65–75. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1518543>
- Higgins, J. P. T., Green, S., & Ben Van Den, A. (2020). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *International Coaching Psychology Review*, 15(2). <https://doi.org/10.53841/bpsicpr.2020.15.2.123>
- Hilber, P., Cendelin, J., Le Gall, A., Machado, M.-L., Tuma, J., & Besnard, S. (2018). Cooperation of the vestibular and cerebellar networks in anxiety disorders and depression. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 89, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.004>
- Hill, K. D., Carroll, S. G., Kalogeropoulos, A., & Schwarz, J. A. (1995). Retest Reliability of Centre of Pressure Measures of Standing Balance in

- Healthy Older Women. *Australian Journal on Ageing*, 14(2), 76–80.
<https://doi.org/10.1111/j.1741-6612.1995.tb00701.x>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014a). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014b). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hong, H. R., Shim, D. B., Kim, T. S., Shim, B. S., Ahn, J. H., Chung, J. W., Yoon, T. H., & Park, H. J. (2013). Results of caloric and sensory organization testing of dynamic posturography in migrainous vertigo: Comparison with Meniere's disease and vestibular neuritis. *Acta Oto-Laryngologica*, 133(12), 1236–1241.
<https://doi.org/10.3109/00016489.2013.820343>
- Hong, S. M., Lee, H. J., Lee, B., Park, S. K., Hong, S. K., Park, I. S., Kim, Y. B., & Kim, H. J. (2013). Influence of vestibular disease on psychological distress: A multicenter study. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 148(5), 810–814.
<https://doi.org/10.1177/0194599813476476>
- Horak, F. B., Buchanan, J., Creath, R., & Jeka, J. (2002). Vestibulospinal Control of Posture. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 508, pp. 139–145).
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_17
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381.
<https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369>
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82(1), 167–177.
<https://doi.org/10.1007/BF00230848>
- Hülse, R., Biesdorf, A., Hörmann, K., Stuck, B., Erhart, M., Hülse, M., & Wenzel, A. (2019). Peripheral Vestibular Disorders: An Epidemiologic Survey in 70 Million Individuals. *Otology and Neurotology*, 40(1), 88–95.
<https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002013>
- Im, J. J., Na, S., Kang, S., Jeong, H., Lee, E. S., Lee, T. K., Ahn, W. Y., Chung, Y. A., & Song, I. U. (2022). A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Trial of Transcranial Direct Current Stimulation for the Treatment of Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD). *Frontiers in Neurology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.868976>
- Indovina, I., Bosco, G., Riccelli, R., Maffei, V., Lacquaniti, F., Passamonti, L., & Toschi, N. (2020). Structural connectome and connectivity lateralization of the multimodal vestibular cortical network. *NeuroImage*, 222.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117247>
- Indovina, I., Passamonti, L., Mucci, V., Chiarella, G., Lacquaniti, F., & Staab, J. P. (2021). Brain correlates of persistent postural-perceptual dizziness: A review of neuroimaging studies. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 10, Issue 18).
<https://doi.org/10.3390/jcm10184274>
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart, C. (2005a). Evolution physiologique

- des paramètres d'équilibre sur Equitest chez l'adulte sain âgé de 20 à 60 ans. *Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005b). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005c). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., Vuillerme, N., Amblard, B., & Gresty, M. A. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience*, 169(3), 1199–1215.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.072>
- Jacob, A., Tward, D. J., Resnick, S., Smith, P. F., Lopez, C., Rebello, E., Wei, E. X., Tilak Ratnanather, J., & Agrawal, Y. (2020). Vestibular function and cortical and sub-cortical alterations in an aging population. *Heliyon*, 6(8).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04728>
- Jacobson, G. P., & Newman, C. W. (1990). The Development of the Dizziness Handicap Inventory. *Archives of Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 116(4), 424–427.
<https://doi.org/10.1001/archotol.1990.01870040046011>
- Jamon, M. (2014). The development of vestibular system and related functions in mammals: impact of gravity. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(February), 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00011>
- Jáuregui-Renaud, K., García-Jacuinde, D. M., Bárcenas-Olvera, S. P., Gresty, M. A., & Gutiérrez-Márquez, A. (2024). Spatial anxiety contributes to the dizziness-related handicap of adults with peripheral vestibular disease. *Frontiers in Neurology*, 15.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1365745>
- Jayakaran, P., Johnson, G. M., & Sullivan, S. J. (2011). Test-Retest Reliability of the Sensory Organization Test in Older Persons With a Transtibial Amputation. *PM and R*, 3(8).
<https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.01.005>
- Kammerlind, A. S. C., Ledin, T. E. A., Skargren, E. I. B., & Ödkvist, L. M. (2005). Long-term follow-up after acute unilateral vestibular loss and comparison between subjects with and without remaining symptoms. *Acta Oto-Laryngologica*, 125(9), 946–953.
<https://doi.org/10.1080/00016480510043477>
- Karabulut, M., Van Laer, L., Hallemans, A., Vereeck, L., Van Rompaey, V., Viechtbauer, W., Melliti, A., van Stiphout, L., Mohamad, A., Pérez Fornos, A., Guinand, N., & van de Berg, R. (2023). Chronic symptoms in patients with unilateral vestibular hypofunction: systematic review and meta-analysis. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 14). Frontiers Media SA.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1177314>

- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R., & Roll, J. P. (1999). From balance regulation to body orientation: Two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research*, 124(1). <https://doi.org/10.1007/s002210050602>
- Kerber, K. A., Ishiyama, G. P., & Baloh, R. W. (2006). A longitudinal study of oculomotor function in normal older people. *Neurobiology of Aging*, 27(9), 1346–1353. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.07.009>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009a). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009b). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., Mallinson, A. I., Longridge, N. S., Sinno, S., Petersen, H., & Perrin, P. (2023). Evolution of postural control assessment: From dynamic posturography to virtual reality. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1054346>
- Keshner, E. A., Streepey, J., Dhaher, Y., & Hain, T. (2007). Pairing virtual reality with dynamic posturography serves to differentiate between patients experiencing visual vertigo. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-24>
- Ketola, S., Havia, M., Appelberg, B., & Kentala, E. (2014). Psychiatric symptoms in vertiginous patients. *Nordic Journal of Psychiatry*, 69(4), 287–291. <https://doi.org/10.3109/08039488.2014.972976>
- Khan, S., & Chang, R. (2013a). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Khan, S., & Chang, R. (2013b). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Kingma, H., & van de Berg, R. (2016). Anatomy, physiology, and physics of the peripheral vestibular system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00001-7>
- Kiss, R., Schedler, S., & Muehlbauer, T. (2018). Associations Between Types of Balance Performance in Healthy Individuals Across the Lifespan: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01366>
- Kobel, M. J., Wagner, A. R., & Merfeld, D. M. (2023). Recurrence quantification analysis of postural sway in patients with persistent postural perceptual dizziness. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 4. <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1142018>
- Kollegger, H., Baumgartner, C., Wöber, C., Oder, W., & Deecke, L. (1992). Spontaneous Body Sway as a Function of Sex, Age, and Vision: Posturographic Study in 30 Healthy Adults. *European Neurology*, 32(5), 253–259. <https://doi.org/10.1159/000116836>
- Kollegger, H., Wöber, C., Baumgartner, C., & Deecke, L. (1989). Stabilizing and destabilizing effects of vision and foot position on body sway of healthy young subjects: A posturographic study. *European Neurology*, 29(5),

- 241–245.
<https://doi.org/10.1159/000116420>
- Konukseven, O., Satıcı, S., Adalı, I., Yıldız, Y., Doğru, L., & Duruoğlu, S. (2022). Vestibulospinal system findings caused by ageing between 40 and 55 years. *Hearing, Balance and Communication*, 20(4), 257–262. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2087310>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kovacs, E., Wang, X., & Grill, E. (2019). Economic burden of vertigo: A systematic review. *Health Economics Review*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13561-019-0258-2>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwiwat, N. (2016). Comparison of Balance Performance between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, 20(2), 72–78. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lacour, M., Helmchen, C., & Vidal, P. P. (2016). Vestibular compensation: the neuro-otologist's best friend. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 54–64). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7903-4>
- Lacroix, E., Deggouj, N., Salvaggio, S., Wiener, V., Debue, M., & Edwards, M. G. (2016). The development of a new questionnaire for cognitive complaints in vertigo: the Neuropsychological Vertigo Inventory (NVI). *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 273(12), 4241–4249. <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4135-x>
- Lafond, D., Corriveau, H., Hébert, R., & Prince, F. (2004). Intrassession reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.08.089>
- Lahmann, C., Henningsen, P., Brandt, T., Strupp, M., Jahn, K., Dieterich, M., Eckhardt-Henn, A., Feurecker, R., Dinkel, A., & Schmid, G. (2014). Psychiatric comorbidity and psychosocial impairment among patients with vertigo and dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 86(3), 302–308. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2014-307601>
- Lara, S., Graup, S., De Souza Balk, R., Teixeira, L. P., Farias, A. D., Alves, G. B., & Leiria, V. B. (2018). Association between postural balance and anthropometric indexes in elementary schoolchildren. *Revista Paulista de Pediatria*, 36(1), 59–65. <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00011>
- Layman, A. J., Li, C., Simonsick, E., Ferrucci, L., Carey, J. P., & Agrawal, Y. (2015). Association between saccular function and gait speed: Data from the Baltimore Longitudinal study of aging. *Otology and Neurotology*, 36(2). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000544>
- Leitner, C., Mair, P., Paul, B., Wick, F., Mittermaier, C., Sycha, T., & Ebenbichler, G. (2009). Reliability of posturographic measurements in the

- assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.09.007>
- Lelard, T., & Ahmaidi, S. (2015). Effects of physical training on age-related balance and postural control. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4–5), 357–369. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCLI.2015.09.008>
- Lempert, T., & Neuhauser, H. (2009). Epidemiology of vertigo, migraine and vestibular migraine. *Journal of Neurology*, 256(3), 333–338. <https://doi.org/10.1007/s00415-009-0149-2>
- Lempert, T., Olesen, J., Furman, J., Waterston, J., Seemungal, B., Carey, J., Bisdorff, A., Versino, M., Evers, S., Kheradmand, A., & Newman-Toker, D. (2022). Vestibular migraine: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.3233/VES-201644>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R Package Version 1.10.2.090002.
- Lentz, M., & Collins, W. E. (1976). *Three studies of motion sickness susceptibility* (Vol. 7, Issue 2).
- Leong, A. T. L., Gu, Y., Chan, Y. S., Zheng, H., Dong, C. M., Chan, R. W., Wang, X., Liu, Y., Tan, L. H., & Wu, E. X. (2019). Optogenetic fMRI interrogation of brain-wide central vestibular pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 10122–10129. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812453116>
- Letz, R., Gerr, F., Deborah Harris-abbott, F., Dick, R., Gerr, F., Harris-abbott, D., & Dick, R. (1996). A Comparison of Standing Steadiness Measurements from Two Devices: Covariates and Normal Values. In *Neurotoxicology and Teratology* (Vol. 18, Issue 1).
- Lewkowicz, D. J., & Bremner, A. J. (2020). The development of multisensory processes for perceiving the environment and the self. In *Multisensory Perception* (Vol. 49, Issue 5, pp. 89–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00004-8>
- Liang, H. W., Chi, S. Y., Chen, B. Y., & Hwang, Y. H. (2021). Reliability and Validity of a Virtual Reality-Based System for Evaluating Postural Stability. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 85–91. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3034876>
- Libardoni, T. de C., Silveira, C. B. da, Sinhorim, L. M. B., Oliveira, A. S. de, Santos, M. J. dos, & Santos, G. M. (2018). Reference values and equations reference of balance for children of 8 to 12 years. *Gait and Posture*, 60, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.004>
- Lim, R., & Brichta, A. M. (2016). Anatomical and physiological development of the human inner ear. *Hearing Research*, 338, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.02.004>
- Lindell, E., Kollén, L., Johansson, M., Karlsson, T., Rydén, L., Zettergren, A., Frändin, K., Skoog, I., & Finizia, C. (2020). Dizziness and its association with walking speed and falls efficacy among older men and women in an urban population. *Aging Clinical and Experimental Research*, 32(6), 1049–1056. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01303-6>

- Liston, R. A. L., & Brouwer, B. J. (1996). Reliability and validity of measures obtained from stroke patients using the balance master. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(5), 425–430. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(96\)90028-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(96)90028-3)
- Liu, Y. F., Locklear, T. D., Sharon, J. D., Lacroix, E., Nguyen, S. A., & Rizk, H. G. (2019). Quantification of Cognitive Dysfunction in Dizzy Patients Using the Neuropsychological Vertigo Inventory. *Otology and Neurotology*, 40(7), E723–E731. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002311>
- Lopez, C. (2013). A neuroscientific account of how vestibular disorders impair bodily self-consciousness. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00091>
- Lopez, C., Lacour, M., & Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. In *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (pp. 35–86).
- Lopez-Escamez, J. A., Carey, J., Chung, W. H., Goebel, J. A., Magnusson, M., Mandalà, M., Newman-Toker, D. E., Strupp, M., Suzuki, M., Trabalzini, F., & Bisdorff, A. (2015). Diagnostic criteria for Menière's disease. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(1), 1–7. <https://doi.org/10.3233/VES-150549>
- Lubetzky, A. V., Aharoni, M. M. H., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). People with persistent postural-perceptual dizziness demonstrate altered postural strategies in complex visual and cognitive environments. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(6), 505–517. <https://doi.org/10.3233/VES-201552>
- Lucertini, M., Verde, P., & Trivelloni, P. (2013). Rehabilitation from airsickness in military pilots: Long-term treatment effectiveness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 84(11), 1196–1200. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3509.2013>
- Macedo, C., Gazzola, J. M., Ricci, N. A., Doná, F., & Ganança, F. F. (2015). Influence of sensory information on static balance in older patients with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 81(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.11.004>
- Madrigal, J., Arbelaez-Lelion, D., Candelo, E., Valencia Ramírez, S., Franco Sanchez, I., Castillo-Bustamante, M., Andalon-Dueñas, E., & García, A. (2023). Clinical and otopathologic findings on age-related vestibular loss: state of the art review. *International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery*, 9(7), 602–612. <https://doi.org/10.18203/issn.2454-5929.ijohns20231822>
- Maresova, P., Penhaker, M., Selamat, A., & Kuca, K. (2015). The potential of medical device industry in technological and economical context. In *Therapeutics and Clinical Risk Management* (Vol. 11, pp. 1505–1514). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S88574>
- Marsh, A. P., & Geel, S. E. (2000). The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait and Posture*, 12(2). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00074-6)
- Massingale, S. L., Alexander, A. D., Erickson, S. M., McQueary, E. S., Gerkin, R. D., Schodrof, S. B., Kisana, H. M., & Pardini, J. E. (2018). Assessing balance in an athletic population: Normative data for the

- concussion balance test (COBALT®). *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 23(3), 96–100. <https://doi.org/10.1123/ijatt.2017-0042>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877–887.
- Mast, F. W., Preuss, N., Hartmann, M., & Grabherr, L. (2014). Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(May), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00044>
- Masui, T., Hasegawa, Y., Matsuyama, Y., Sakano, S., Kawasaki, M., & Suzuki, S. (2005). Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41(2), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.02.003>
- Matsuda, S., Demura, S., & Demura, T. (2010). Examining differences between center of pressure sway in one-legged and two-legged stances for soccer players and typical adults. *Perceptual and Motor Skills*, 110(3), 751–760. <https://doi.org/10.2466/pms.110.3.751-760>
- McCall, A. A., Miller, D. M., & Yates, B. J. (2017). Descending influences on vestibulospinal and vestibulosympathetic reflexes. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 8, Issue MAR). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00112>
- McCaslin, D. L., Shepard, N. T., Hollman, J. H., & Staab, J. P. (2022). Characterization of Postural Sway in Patients With Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) Using Wearable Motion Sensors. *Otology & Neurotology*, 43(2), e243–e251. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000003393>
- McCollum, G., Shupert, C. L., & Nashner, L. M. (1996). Organizing sensory information for postural control in altered sensory environments. *Journal of Theoretical Biology*, 180(3), 257–270. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0101>
- Mendel, B., Bergenius, J., & Langius, A. (1999). Dizziness symptom severity and impact on daily living as perceived by patients suffering from peripheral vestibular disorder. *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 24(4), 286–293. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2273.1999.00261.x>
- Micarelli, A., Viziano, A., Augimeri, I., Micarelli, B., & Alessandrini, M. (2020). Age-related Assessment of Postural Control Development: A Cross-sectional Study in Children and Adolescents. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 418–426. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>
- Michelson, P. L., McCaslin, D. L., Jacobson, G. P., Petrak, M., English, L., & Hatton, K. (2018). Assessment of subjective visual vertical (SVV) using the “bucket test” and the virtual SVV system. *American Journal of Audiology*, 27(3). https://doi.org/10.1044/2018_AJA-17-0019
- Mirka, Alar., & Black, F. O. (1990). Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 8, 351–359.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6(C), 414–417.

- [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mnejja, K., Fendri, T., Chaari, F., Harrabi, M. A., & Sahli, S. (2022). Reference values of postural balance in preschoolers: Age and gender differences for 4–5 years old Tunisian children. *Gait and Posture*, 92, 401–406.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.12.015>
- Monsell, E. M., Furman, J. M., Herdman, S. J., Konrad, H. R., & Shepard, N. T. (1997). Computerized dynamic platform posturography. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 117(4), 394–398.
[https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(97\)70132-3](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(97)70132-3)
- Müller, M. M., Scherer, J., Unterbrink, P., Bertrand, O. J. N., Egelhaaf, M., & Boeddeker, N. (2023). The Virtual Navigation Toolbox: Providing tools for virtual navigation experiments. *PLoS ONE*, 18(11 November).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293536>
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes: A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567–579.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nagymáté, G., Orlovits, Z., & Kiss, R. M. (2018). Reliability analysis of a sensitive and independent stabilometry parameter set. *PLoS ONE*, 13(4), 1–14.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195995>
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. In *Biological Reviews* (Vol. 82, Issue 4, pp. 591–605).
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Nakayama, M., Suzuki, M., Inagaki, A., Takemura, K., Watanabe, N., Tanigawa, T., Okamoto, K., Hattori, H., Brodie, H., & Murakami, S. (2010). Impaired quality of sleep in Ménière's disease patients. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 6(5), 445–449.
- Nashner, L., & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 150(2).
[https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3)
- Nashner, L., Black, F. O., & Lilly, D. J. (1994). *Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology*.
- Nashner, L., Black, F., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *The Journal of Neuroscience*, 2(5), 536–544.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.02-05-00536.1982>
- Nashner, L. M. (1982). Adaptation of human movement to altered environments. *Trends in Neurosciences*, 5(C), 358–361. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1)
- Nashner, L. M. (1985). The organisation of human postural movements A formal basis and experimental synthesis. *THE BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES*, 8, 135–172.
- Nashner, L. M., & Peters, J. F. (1990). Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics*, 8(2), 331–349.
- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Black, F. O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80(C), 411–418.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)62237-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)62237-2)

- Negrillo-Cárdenas, J., Rueda-Ruiz, A. J., Ogayar-Anguita, C. J., Lomas-Vega, R., & Segura-Sánchez, R. J. (2018). A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device. *Journal of Medical Systems*, 42(7). <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0981-y>
- Negu, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Negut, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Neuhauser, H. K. (2016). The epidemiology of dizziness and vertigo. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 137, pp. 67–82). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00005-4>
- Nishino, L. K., Rocha, G. D., de Souza, T. S. A., de Andrade Quintanilha Ribeiro, F., & Cóser, P. L. (2021). Protocol for static posturography with dynamic tests in individuals without vestibular complaints using the Horus system. *CODAS*, 33(3), 1–13. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20202019270>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1997). Contribution of central and peripheral vision to the regulation of stance. *Gait and Posture*, 5(1). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01071-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01071-5)
- Nyabenda, A., Briart, C., Deggouj, N., & Gersdorff, M. (2004). A normative study of the vestibulospinal and rotational tests. *Advances in Physiotherapy*, 6(3), 122–129. <https://doi.org/10.1080/14038190310012052>
- Obrero-Gaitán, E., Molina, F., Montilla-Ibañez, M. de A., Del-Pino-Casado, R., Rodríguez-Almagro, D., & Lomas-Vega, R. (2021). Misperception of Visual Vertical in Peripheral Vestibular Disorders. A Systematic Review With Meta-Analysis. In *Laryngoscope* (Vol. 131, Issue 5, pp. 1110–1121). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/lary.29124>
- Ohlmann, T. (2018). Vicariences: La flexibilité du vivant. *Orientation Scolaire et Professionnelle*, 47(1), 173–203. <https://doi.org/10.4000/osp.5626>
- Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection/control of frames of reference and spatial aspects of field dependence-independence. *Field Dependence-Independence: Cognitive Style across the Life Span.*, 95, 105–129. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001691896000157>
- Oka, M., Ichijo, K., Koda, K., Kamogashira, T., Kinoshita, M., Igarashi, K., Kawahara, T., Takashima, I., Yamasoba, T., & Fujimoto, C. (2023). Preceding Balance Disorders Affect Vestibular Function in Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Journal of Clinical Medicine*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/jcm12072589>
- Olabi, B., Bergquist, F., & Dutia, M. B. (2009). Rebalancing the commissural system: Mechanisms of vestibular compensation. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 19(5–6), 201–207. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0367>

- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Owen, N., Leadbetter, A. G., & Yardley, L. (1998). Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00101-4)
- Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/891390>
- Paplou, V. G., Schubert, N. M. A., van Tuinen, M., Vijayakumar, S., & Pyott, S. J. (2023). Functional, Morphological and Molecular Changes Reveal the Mechanisms Associated with Age-Related Vestibular Loss. *Biomolecules*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/biom13091429>
- Paquet, N., Jehu, D. A., & Lajoie, Y. (2017). Age-related differences in Fukuda stepping and Babinski-Weil tests, within-day variability and test–retest reliability. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s40520-016-0544-3>
- Paredis, S., van Stiphout, L., Remmen, E., Strupp, M., Gerards, M. C., Kingma, H., Van Rompaey, V., Fornos, A. P., Guinand, N., & van de Berg, R. (2021). DISCOHAT: An Acronym to Describe the Spectrum of Symptoms Related to Bilateral Vestibulopathy. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.771650>
- Patti, A., Bianco, A., Şahin, N., Sekulic, D., Paoli, A., Iovane, A., Messina, G., Gagey, P. M., & Palma, A. (2018). Postural control and balance in a cohort of healthy people living in Europe An observational study. *Medicine (United States)*, 97(52). <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013835>
- Pedalini, M. E. B., Cruz, O. L. M., Bittar, R. S. M., Lorenzi, M. C., & Grasel, S. S. (2009). Sensory organization test in elderly patients with and without vestibular dysfunction. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(9), 962–965. <https://doi.org/10.1080/00016480802468930>
- Perucca, L., Robecchi Majnardi, A., Frau, S., & Scarano, S. (2021). Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.761262>
- Peterka, R. J. (2018). Sensory integration for human balance control. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 159). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990a). Age-related changes in human posture control: Motor coordination tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 87–96.
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990b). Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 73–85.
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *Journal of Neurophysiology*, 91(1), 410–423. <https://doi.org/10.1152/jn.00516.2003>
- Pick, H. L., & Warren, D. H. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial

- direction. In *Perception & Psychophysics* (Vol. 6, Issue 4).
- Pineault, K., Pearson, D., Wei, E., Kamil, R., Klatt, B., & Agrawal, Y. (2020). Association between Saccule and Semicircular Canal Impairments and Cognitive Performance among Vestibular Patients. *Ear and Hearing*, 41(3), 686–692. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000795>
- Pinsault, N., & Vuillerme, N. (2009). Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Medical Engineering and Physics*, 31(2), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.08.003>
- Pletcher, E. R., Williams, V., Abt, J. P., Morgan, P. M., Parr, J. J., Wohleber, M. F., Lovalekar, M., & Sell, T. C. (2017). Normative data for the neurocom sensory organization test in us military special operations forces. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 129–136. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>
- Podsiadlo, J. D., Bscpt, S., & Richardson, M. D. J. (1991). The Timed “Up & Go”: A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. In *J Am Geriatr SOC* (Vol. 39).
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000a). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000b). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Popp, P., Wulff, M., Finke, K., Rühl, M., Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). Cognitive deficits in patients with a chronic vestibular failure. *Journal of Neurology*, 264(3). <https://doi.org/10.1007/s00415-016-8386-7>
- Powell, G., Derry-Sumner, H., Rajenderkumar, D., Rushton, S. K., & Sumner, P. (2020). Persistent postural perceptual dizziness is on a spectrum in the general population. *Neurology*, 94(18), E1929–E1938. <https://doi.org/10.1212/WNL.00000000000009373>
- Previc, F. H., Krueger, W. W., Ross, R. A., Roman, M. A., & Siegel, G. (2014). The relationship between vestibular function and topographical memory in older adults. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(JUNE). <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00046>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Probst, T., Dinkel, A., Schmid-Mühlbauer, G., Radziej, K., Limburg, K., Pieh, C., & Lahmann, C. (2017). Psychological distress longitudinally mediates the effect of vertigo symptoms on vertigo-related handicap. *Journal of Psychosomatic Research*, 93, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2016.11.013>
- Quijoux, F., Nicolaï, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code*. In *Physiological Reports* (Vol. 9, Issue 22). American Physiological Society. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>

- Quijoux, F., Vienne-Jumeau, A., Bertin-Hugault, F., Zawieja, P., Lefevre, M., Vidal, P.-P., & Ricard, D. (2020). *Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: a systematic review with meta-analysis*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156816372030252X>
- Radtke, A., Von Brevern, M., Feldmann, M., Lezius, F., Ziese, T., Lempert, T., & Neuhauser, H. (2008). Screening for Menière's disease in the general population - The needle in the haystack. *Acta Oto-Laryngologica*, 128(3), 272–276.
<https://doi.org/10.1080/00016480701509933>
- Raphan, T., & Cohen, B. (2002). The vestibulo-ocular reflex in three dimensions. In *Experimental Brain Research* (Vol. 145, Issue 1, pp. 1–27). <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1067-z>
- Rauch, S. D., Velazquez-Villaseñor, L., Dimitri, P. S., & Merchant, S. N. (2001). Decreasing hair cell counts in aging humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 220–227.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03748.x>
- Raymakers, J. A., Samson, M. M., & Verhaar, H. J. J. (2005). The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait and Posture*, 21(1), 48–58.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.11.006>
- Reason, J. T. (1978). Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829.
<https://doi.org/10.1177/014107687807101109>
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thiebaut, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(8).
<https://doi.org/10.1076/jcen.25.8.1169.16733>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5).
<https://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Rey, M. C. B., Clark, T. K., Wang, W., Leeder, T., Bian, Y., & Merfeld, D. M. (2016). Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. *Frontiers in Neurology*, 7(OCT).
<https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00162>
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195–240.
https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Rizzolatti, G., & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: Anatomy and functions. *Experimental Brain Research*, 153(2), 146–157.
<https://doi.org/10.1007/s00221-003-1588-0>
- Roberts, H. J., Hoppes, C. W., Del Toro, Y. M., Lambert, K. H., & Springer, B. A. (2021). Normative values for the Sensory Organization Test in an active duty military cohort. *Gait and Posture*, 85, 31–37.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.014>
- Rocchi, L., Chiari, L., & Cappello, A. (2004). Feature selection of stabilometric parameters based on principal component analysis. *Medical and Biological Engineering and*

- Computing*, 42(1), 71–79.
<https://doi.org/10.1007/BF02351013>
- Rode, G., Pérennou, D., & Azouvi, P. (2017). Spatial cognition. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 60(3), 123.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.05.003>
- Roh, K. J., Kim, M. K., Kim, J. H., & Son, E. J. (2018). Role of Emotional Distress in Prolongation of Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Journal of Audiology and Otology*, 22(1), 6–12.
<https://doi.org/10.7874/jao.2017.00290>
- Rosa, T. S. M., de Moraes, A. B., & dos Santos Filha, V. A. V. (2016). The institutionalized elderly: Sociodemographic and clinical-functional profiles related to dizziness. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 82(2), 159–169.
<https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.12.014>
- Rouhana, J. (2008). *Flexibilité de l'intégration multi-sensorielle : aspects spatiaux et temporels*.
- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010). The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions - A systematic review of the literature. In *Gait and Posture* (Vol. 32, Issue 4, pp. 436–445).
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>
- Russell, N. A., Horii, A., Smith, P. F., Darlington, C. L., & Bilkey, D. K. (2003). Long-Term Effects of Permanent Vestibular Lesions on Hippocampal Spatial Firing. *The Journal of Neuroscience*, 23(16), 6490–6498.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-16-06490.2003>
- Sackley, C. M., & Lincoln, N. B. (1991). Weight distribution and postural sway in healthy adults. *Clinical Rehabilitation*, 5(3), 181–186.
<https://doi.org/10.1177/02692155910500302>
- San Pedro Murillo, E., Bancroft, M. J., Koohi, N., Castro, P., & Kaski, D. (2023). Postural misperception: a biomarker for persistent postural perceptual dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 94(2), 165–166.
<https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-329321>
- Saniasiaya, J., Islam, M. A., & Salim, R. (2023). The global prevalence of vestibular dysfunction in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. In *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* (Vol. 280, Issue 6, pp. 2663–2674). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1007/s00405-023-07842-z>
- Santos, B. R., Delisle, A., Larivière, C., Plamondon, A., & Imbeau, D. (2008). Reliability of centre of pressure summary measures of postural steadiness in healthy young adults. *Gait and Posture*, 27(3), 408–415.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.05.008>
- Scaglioni-Solano, P., & Aragón-Vargas, L. F. (2014). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board to assess standing balance and sensory integration in highly functional older adults. *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(2), 138–143.
<https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000046>
- Schmidt, J. D., Register-Mihalik, J. K., Mihalik, J. P., Kerr, Z. Y., & Guskiewicz, K. M. (2012). Identifying impairments after concussion: Normative data versus individualized baselines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1621–1628.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318258a9fb>

- Schöne, C. G., Vibert, D., & Mast, F. W. (2024). Executive functions in patients with bilateral and unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Journal of Neurology*, 271(6), 3291–3308. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12267-7>
- Scoppa, F., Gallamini, M., Belloni, G., & Messina, G. (2017). Clinical stabilometry standardization: Feet position in the static stabilometric assessment of postural stability. *Acta Medica Mediterranea*, 33(May), 707–713. https://doi.org/10.19193/0393-6384_2017_4_105
- Semenov, Y. R., Bigelow, R. T., Xue, Q. L., Lac, S. Du, & Agrawal, Y. (2016). Association between Vestibular and Cognitive Function in U.S. Adults: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 71(2), 243–250. <https://doi.org/10.1093/gerona/glv069>
- Sevilla-Garcia, M. A., Boleas-Aguirre, M. S., & Perez-Fernandez, N. (2009). The limits of stability in patients with Ménière's disease. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(3). <https://doi.org/10.1080/00016480802226171>
- Shams, A., Vameghi, R., Shamsipour Dehkordi, P., Allafan, N., & Bayati, M. (2020). The development of postural control among children: Repeatability and normative data for computerized dynamic posturography system. *Gait and Posture*, 78, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>
- Shapcott, K. A., Weigand, M., Glukhova, I., Havenith, M. N., & Schölvinck, M. L. (n.d.). *DomeVR: A setup for experimental control of an immersive dome virtual environment created with Unreal Engine* 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2022.04.04.486889>
- Sharif, M., Saman, Y., Burling, R., Rea, O., Patel, R., Barrett, D. J. K., Rea, P., Kheradmand, A., & Arshad, Q. (2023). Altered visual conscious awareness in patients with vestibular dysfunctions; a cross-sectional observation study. *Journal of the Neurological Sciences*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120617>
- Sharma, K. (1997). Prevalence and correlates of susceptibility to motion sickness. *Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae*, 46(2), 105–121. <https://doi.org/10.1017/S000156600000660>
- Shim, D. B., Song, M. H., & Park, H. J. (2018). Typical sensory organization test findings and clinical implication in acute vestibular neuritis. *Auris Nasus Larynx*, 45(5), 916–921. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.11.018>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: The effect of sensory context. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(1), 10–16. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.1.M10>
- Sibley, K. M., Beauchamp, M. K., Van Ooteghem, K., Straus, S. E., & Jaglal, S. B. (2015). Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(1), 122-132.e29. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.021>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021a). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*,

- 32(2), 122–136.
<https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021b). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136.
<https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Siu, K. C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait and Posture*, 25(1).
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Sjoberg, D., Whiting, K., Curry, M., Lavery, J., & Larmarange, J. (2021). Reproducible Summary Tables with the gtsummary Package. *The R Journal*, 13(1), 570.
<https://doi.org/10.32614/RJ-2021-053>
- Smith, P. F., & Darlington, C. L. (2013). Personality changes in patients with vestibular dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(October), 1–7.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00678>
- Smith, P. F., Horii, A., Russell, N., Bilkey, D. K., Zheng, Y., Liu, P., Kerr, D. S., & Darlington, C. L. (2005). The effects of vestibular lesions on hippocampal function in rats. In *Progress in Neurobiology* (Vol. 75, Issue 6, pp. 391–405).
<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2005.04.004>
- Smith, P. F., & Zheng, Y. (2013). From ear to uncertainty: vestibular contributions to cognitive function. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00084>
- Smith, P. F., Zheng, Y., Horii, A., & Darlington, C. L. (2005). Does vestibular damage cause cognitive dysfunction in humans? *Journal of Vestibular Research*, 15, 1–9.
- Sohsten, E., Bittar, R. S. M., & Staab, J. P. (2016). Posturographic profile of patients with persistent postural-perceptual dizziness on the sensory organization test. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(3).
<https://doi.org/10.3233/VES-160583>
- Solway, A., Miller, J. F., & Kahana, M. J. (2013). PandaEPL: A library for programming spatial navigation experiments. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1293–1312.
<https://doi.org/10.3758/s13428-013-0322-5>
- Son, E. J., Lee, D. H., Oh, J. H., Seo, J. H., & Jeon, E. J. (2015). Correlation between the dizziness handicap inventory and balance performance during the acute phase of unilateral vestibulopathy. *American Journal of Otolaryngology - Head and Neck Medicine and Surgery*, 36(6), 823–827.
<https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2015.07.011>
- Soto, A., Labella, T., Santos, S., Río, M. Del, Lirola, A., Cabanas, E., & Elhendi, W. (2004). The usefulness of computerized dynamic posturography for the study of equilibrium in patients with Meniere's disease: Correlation with clinical and audiologic data. *Hearing Research*, 196(1–2), 26–32.
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.06.010>
- Staab, J. P. (2020). Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Seminars in Neurology*, 40(1), 130–137.
<https://doi.org/10.1055/s-0039-3402736>
- Staab, J. P., Eckhardt-Henn, A., Horii, A., Jacob, R., Strupp, M., Brandt, T., &

- Bronstein, A. (2017). Diagnostic criteria for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD): Consensus document of the committee for the classification of vestibular disorders of the barany society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 27(4), 191–208. <https://doi.org/10.3233/VES-170622>
- Staab, J. P., Rohe, D. E., Eggers, S. D. Z., & Shepard, N. T. (2014). Anxious, introverted personality traits in patients with chronic subjective dizziness. *Journal of Psychosomatic Research*, 76(1), 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2013.11.008>
- Stackman, R. W., Clark, A. S., & Taube, J. S. (2002). Hippocampal spatial representations require vestibular input. In *Hippocampus* (Vol. 12, Issue 3, pp. 291–303). <https://doi.org/10.1002/hipo.1112>
- Starrett, M. J., McAvan, A. S., Huffman, D. J., Stokes, J. D., Kyle, C. T., Smuda, D. N., Kolarik, B. S., Laczko, J., & Ekstrom, A. D. (2021). Landmarks: A solution for spatial navigation and memory experiments in virtual reality. *Behavior Research Methods*, 53(3), 1046–1059. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01481-6>
- Steensnaes, M. H., Knapstad, M. K., Goplen, F. K., & Berge, J. E. (2023). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) and quality of life: a cross-sectional study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(12), 5285–5292. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08040-7>
- Stewart, M. G., Chen, A. Y., Wyatt, J. R., Favrot, S., Beinart, S., Coker, N. J., & Jenkins, H. A. (1999). Cost-effectiveness of the diagnostic evaluation of vertigo. *Laryngoscope*, 109(4), 600–605. <https://doi.org/10.1097/00005537-199904000-00015>
- Stewart, V. M., Mendis, M. D., & Low Choy, N. (2018). A systematic review of patient-reported measures associated with vestibular dysfunction. *Laryngoscope*, 128(4), 971–981. <https://doi.org/10.1002/lary.26641>
- Strupp, M., Bisdorff, A., Furman, J., Hornibrook, J., Jahn, K., Maire, R., Newman-Toker, D., & Magnusson, M. (2022). Acute unilateral vestibulopathy/vestibular neuritis: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(5), 389–406. <https://doi.org/10.3233/VES-220201>
- Strupp, M., & Brandt, T. (2013). Peripheral vestibular disorders. *Current Opinion in Neurology*, 26(1), 81–89. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32835c5fd4>
- Strupp, M., Kim, J.-S., Murofushi, T., Straumann, D., Jen, J. C., Rosengren, S. M., Della Santina, C. C., & Kingma, H. (2017). Bilateral vestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society¹. *Journal of Vestibular Research*, 27(4), 177–189. <https://doi.org/10.3233/VES-170619>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017a). The effect of sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(1), 47–52. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1213418>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017b). The effect of vestibular rehabilitation on sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(3), 275–278. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1244859>
- Summers, S. J., Antcliff, S., Waddington, G., & Wallwork, S. (2022). Reliability and learning effects of repeated

- exposure to the Bertec Balance Advantage sensory organisation test in healthy individuals. *Gait and Posture*, 93, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.02.004>
- Swain, S., & Dubey, D. (2023). Vestibulo-ocular reflex – A narrative review. *Matrix Science Medica*, 7(4), 90. https://doi.org/10.4103/mtsm.mtsm_24_22
- Tahmosybayat, R., Baker, K., Godfrey, A., Caplan, N., & Barry, G. (2018). Movements of older adults during exergaming interventions that are associated with the Systems Framework for Postural Control: A systematic review. In *Maturitas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.03.005>
- Takeda, N., Matsuda, K., Fukuda, J., Sato, G., Uno, A., & Kitahara, T. (2024). Vestibular compensation: Neural mechanisms and clinical implications for the treatment of vertigo. In *Auris Nasus Larynx* (Vol. 51, Issue 2, pp. 328–336). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2023.11.009>
- Taneda, K., Mani, H., Kato, N., Komizunai, S., Ishikawa, K., Maruya, T., Hasegawa, N., Takamatsu, Y., & Asaka, T. (2021). Effects of simulated peripheral visual field loss on the static postural control in young healthy adults. *Gait and Posture*, 86, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.011>
- Thoumie, P. (2012). Intérêts et limites de la posturographie pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *Lettre de Medecine Physique et de Readaptation*, 28(3), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0300-9>
- Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 34(2), 119–126. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x>
- Tiwari, K., Kyrki, V., Cheung, A., & Yamamoto, N. (2021). DeFINE: Delayed feedback-based immersive navigation environment for studying goal-directed human navigation. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2668–2688. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01586-6>
- Tossavainen, T., Toppila, E., Pyykkö, I., Forsman, P. M., Juhola, M., & Starck, J. (2006). Virtual reality in posturography. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10(2), 282–292. <https://doi.org/10.1109/TITB.2005.859874>
- Toupet, M., Chassany, O., Rothoft, J.-M., & Bremaud des Ouillères, L. (2002). Vertiginous Complaints: Usual Presentation in Private Practice and Concrete Aspects of Care and Management. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 12(6), 276–281. <https://doi.org/10.1159/000083116>
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302). <https://doi.org/10.1126/science.301659>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023a). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11), 904–915. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J.

- (2023b). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11). <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018a). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10, pp. 1291–1303). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018b). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018a). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018b). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: Passenger behaviour and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444–461. <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- Ukaegbu, C. I. (2014). Kinetosis: All you need to know. *Journal of Biotechnology Science Research*, 1(3), 63–74.
- Vanderkam, P., Blanchard, C., Naudet, F., Pouchain, D., Roussel, H. V., Perault-pochat, M. C., Jaafari, N., & Boussageon, R. (2019). *Efficacy of acetylleucine in vertigo and dizziness: a systematic review of randomised controlled trials*.
- Vasser, M., Kängsepp, M., Magomedkerimov, M., Kilvits, K., Stafinjak, V., Kivisik, T., Vicente, R., & Aru, J. (2017). VREX: An open-source toolbox for creating 3D virtual reality experiments. *BMC Psychology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-017-0173-4>
- Verbecque, E., Costa, P. H. L. da, Meyns, P., Desloovere, K., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016). Age-related changes in postural sway in preschoolers. *Gait and Posture*, 44, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016a). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016b). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Vereeck, L., Wuyts, F., Truijen, S., & Van De Heyning, P. (2008). Clinical assessment of balance: Normative data, and gender and age effects. *International Journal of Audiology*,

- 47(2), 67–75.
<https://doi.org/10.1080/14992020701689688>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 36). <http://www.jstatsoft.org/>
- Visser, J. E., Carpenter, M. G., van der Kooij, H., & Bloem, B. R. (2008). The clinical utility of posturography. *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2424–2436.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.07.220>
- Von Brevern, M., Bertholon, P., Brandt, T., Fife, T., Imai, T., Nuti, D., & Newman-Toker, D. (2015). Benign paroxysmal positional vertigo: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(3–4), 105–117.
<https://doi.org/10.3233/VES-150553>
- Voorhees, R. L. (1990). Dynamic posturography findings in central nervous system disorders. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 103(1), 96–101.
<https://doi.org/10.1177/019459989010300114>
- Vorhees, R. L. (1989). The role of dynamic posturography in neurotologic diagnosis. *Laryngoscope*, 99, 995–1001.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 71(2).
<https://doi.org/10.1007/s00426-005-0018-2>
- Wall, C., Black, F. O., & Wall, C. (1983). Postural stability and rotational tests: Their effectiveness for screening dizzy patients. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 235–246.
<https://doi.org/10.3109/00016488309130940>
- Webster, K. E., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023(3).
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD015188.pub2>
- Webster, K. E., Kamo, T., Smith, L., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Non-pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2023, Issue 3). John Wiley and Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD015333.pub2>
- Weech, S., Moon, J., & Troje, N. F. (2018). Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLoS ONE*, 13(3), 1–21.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>
- Wei, Y., Zheng, J., & So, R. H. Y. (2018). Allocating less attention to central vision duringvection is correlated with less motion sickness. *Ergonomics*, 61(7), 933–946.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1427805>
- Weidt, S., Bruehl, A. B., Straumann, D., Hegemann, S. C. A., Krautstrunk, G., & Rufer, M. (2014). Health-related quality of life and emotional distress in patients with dizziness: A cross-sectional approach to disentangle their relationship. *BMC Health Services Research*, 14(1).
<https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-317>
- Weismiller, S. A., Monaco, R., Womack, J., Alderman, B., Esopenko, C., Conway, F. N., Brostrand, K., Brown, A., de

- Souza, N. L., & Buckman, J. F. (2021). Individual baseline balance assessments in a large sample of incoming NCAA division I athletes using a force plate system. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.26603/001c.18713>
- Whiting, P. F., Weswood, M. E., Rutjes, A. W. S., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. N. M., & Kleijnen, J. (2006). Evaluation of QUADAS, a tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. In *BMC Medical Research Methodology* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-6-9>
- Whiting, P., Rutjes, A. W., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. M., & Kleijnen, J. (2003). *The development of QUADAS: a tool for the quality assessment of studies of diagnostic accuracy included in systematic reviews*. <http://www.biomedcentral.com/1471-2288/3/25>
- Wiener-Vacher, S. R., Hamilton, D. A., & Wiener, S. I. (2013). Vestibular activity and cognitive development in children: perspectives. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00092>
- Wiener-Vacher, S. R., Obeid, R., & Abou-Elew, M. (2012). Vestibular impairment after bacterial meningitis delays infant posturo-motor development. *Journal of Pediatrics*, 161(2). <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.02.009>
- Wolfel, M., Hepperle, D., Purps, C. F., Deuchler, J., & Hettmann, W. (2021). Entering a new Dimension in Virtual Reality Research: An Overview of Existing Toolkits, their Features and Challenges. 2021 *International Conference on Cyberworlds (CW)*, 180–187. <https://doi.org/10.1109/CW52790.2021.00038>
- Wolfson, L., Whipple, R., Derby, C. A., Amerman, P., & Nashner, L. (1994). Gender differences in the balance of healthy elderly as demonstrated by dynamic posturography. *Journals of Gerontology*, 49(4). <https://doi.org/10.1093/geronj/49.4.M160>
- Worden, B. F., & Blevins, N. H. (2007). Pediatric vestibulopathy and pseudovestibulopathy: Differential diagnosis and management. *Current Opinion in Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 15(5), 304–309. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e3282bf139e>
- Xie, Y., Bigelow, R. T., Frankenthaler, S. F., Studenski, S. A., Moffat, S. D., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular loss in older adults is associated with impaired spatial navigation: Data from the triangle completion task. *Frontiers in Neurology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00173>
- Yagi, C., Morita, Y., Kitazawa, M., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., & Horii, A. (2021). Subtypes of Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.652366>
- Yagi, C., Morita, Y., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., Itoh, K., Suzuki, Y., Igarashi, H., & Horii, A. (2022). Gaze instability after exposure to moving visual stimuli in patients with persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1056556>
- Yardley, L., Luxon, L. M., & Haacke, N. P. (1994). A longitudinal study of symptoms, anxiety and subjective well-being in patients with vertigo. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 19(2), 109–116.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1994.tb01192.x>

Yardley, L., Owen, N., Nazareth, I., & Luxon, L. (1998). Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *British Journal of General Practice*, 48(429), 1131–1135.

Zhang, X., Huang, Y., Xia, Y., Yang, X., Zhang, Y., Wei, C., Ying, H., & Liu, Y.

(2022). Vestibular dysfunction is an important contributor to the aging of visuospatial ability in older adults—Data from a computerized test system. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1049806>

2. Etude 2 : Analyse posturographique avec le système de mesure MotionVR.

[En préparation] Julienne A., Besnard S., 2024. Normative data for a dynamic computerized posturography system using virtual reality: MotionVR®.

Dans cette deuxième étude, nous avons souhaité proposer une normalisation de cet outil. Ce premier échantillonnage représentatif constitue le socle empirique sur lequel reposeront les futures études sur différentes populations pathologiques. En effet, cet échantillonnage constitue un référentiel de valeurs collectées à partir d'une population en bonne santé, pouvant être comparé aux valeurs de patients. Une base de données complète et précise est essentielle pour faciliter la détection de troubles de l'équilibre dans la pratique clinique, le suivi des protocoles rééducatifs et apporter des éléments solides au domaine de la recherche. Une mise à jour de ces données par d'autres études scientifiques est importante pour améliorer notre compréhension des mécanismes impliqués dans l'équilibration surtout sur une plateforme intégrant un environnement virtuel et un mouvement mécanique complexe. Ces normes serviront de base pour pouvoir déterminer les valeurs pathologiques lors de l'exploration de nombreuses pathologies, en particulier la pathologie vestibulaire ou d'autres induisant des troubles de l'équilibre et de la posture (neurologie, rhumatologie).

Les plateformes de Neurocom, récemment remplacées par celles de Bertec, sont parmi les plus fréquemment citées dans la littérature concernant l'évaluation posturale dynamique. Il s'agit de plateformes de posturographie dynamique, permettant la réalisation de divers tests standardisés tels que le test d'Organisation Sensorielle (SOT), le test d'Adaptation (ADT) et le test des Limites de Stabilité (LOS). Ces tests sont largement utilisés dans la recherche et dans la pratique clinique. Le SOT est constitué de six conditions de trois essais chacun : 1) yeux ouverts avec plateforme stable, 2) yeux fermés avec plateforme stable, 3) support visuel asservi et plateforme stable, 4) yeux ouverts avec plateforme asservie, 5) yeux fermés avec plateforme asservie et 6) support visuel asservi avec plateforme asservie (Figure 12. A). Le SOT identifie, de manière objective, les difficultés de pondération sensorielle (visuelle, vestibulaire et proprioceptive) contribuant à un contrôle postural déficitaire. Un score de 100 indique une bonne performance posturale. L'ADT est constitué de cinq essais avec deux conditions de rotations antéro-postérieures vers le haut ou vers le bas (Figure 12. B). Le ADT permet d'analyser la capacité adaptative à réduire l'oscillation posturale et à maintenir un équilibre lorsque la plateforme subit des inclinaisons irrégulières et inattendues. Des réponses anormales peuvent signaler des chutes éventuelles. Le LOS est composé de huit essais au cours desquels un individu va s'incliner volontairement dans huit directions à partir d'un point médian : devant, derrière, à gauche, à droite et à des points compris entre ces quatre repères. Les directions suivent des axes antéropostérieurs, latéraux et diagonaux (Figure 12. C). Le

LOS permet d'évaluer le contrôle moteur volontaire et de déterminer le cône de stabilité. Les limites de stabilité théoriques dans l'axe antéropostérieure correspondent approximativement à 12,5 degrés et à 16 degrés dans l'axe médio latéral chez des individus sains. Pour ces tâches, la démarche protocolaire consistait à se tenir debout le plus immobile possible, en gardant les bras le long du corps et les pieds avec un écartement au choix et les malléoles positionnés au niveau de la ligne horizontale sur la plateforme. L'analyse de la situation actuelle révèle de nombreuses limites, parmi lesquelles un manque de données sur les qualités métrologiques et les populations de référence (dont la proportion de femmes, les caractéristiques anthropométriques ou le niveau d'activité physique), ainsi que des biais liés aux bases de données normatives, caractérisées par des tranches d'âge étendues, des groupes disproportionnés et sans stratification selon le genre. Par ailleurs, les plateformes Neurocom et Bertec présentent des mouvements restreints, se limitant à des déplacements rotationnels et translationnels dans l'axe antéro-postérieur. Ces constats mettent en évidence la nécessité de disposer d'un outil fiable et valide, doté de valeurs normatives prenant en compte l'âge et le genre. Dans ce contexte, une nouvelle conception industrielle, une plateforme de posturographie dynamique MotionVR, a été mise sur le marché afin de proposer une approche écologique de l'évaluation posturographique. Cette plateforme de posturographie, intégrant la réalité virtuelle et des mouvements avancés, a pour volonté de répondre aux besoins du secteur de la santé. De ce fait, la deuxième partie de ce chapitre avait pour objectif d'obtenir des données normatives pour la plateforme de posturographie dynamique MotionVR. Dans un premier temps, nous avons évalué les effets de l'âge et du genre sur le contrôle postural des sujets mesuré sur cette plateforme. Dans un second temps, nous avons comparé les valeurs enregistrées sur la plateforme MotionVR à celles publiées pour les plateformes communément utilisées, Neurocom et Bertec.

Nous avons inclus 189 participants dans l'étude clinique VESTINORM (ID RCB : 2022-A00856-37), dont 106 femmes (âge : $47,01 \pm 16,24$ ans ; poids : $68,38 \pm 14,56$ kg ; taille : $1,64 \pm 0,05$ m) et 83 hommes (âge : $43,82 \pm 14,76$ ans ; poids : $83,55 \pm 14,93$ kg ; hauteur : $1,78 \pm 0,06$ m). Cet échantillon représentait majoritairement des personnes actives ($26,1 \pm 4,70$ points), non-fumeuses ($n = 144$, 76,2 %), n'ayant pas de régime alimentaire spécifique ($n = 178$, 94,2 %) et avec une excellente perception de leur propre santé (note 9 : $n = 57$, 30,2).. Les sujets sains ont été recrutés au sein des populations estudiantines, actives et gériatriques selon les critères d'inclusion suivants : 1) Aucun symptôme de vertige, d'étourdissements, de troubles de l'équilibre, de mal des transports ; 2) Aucun antécédent de pathologie neurologie ou musculosquelettique ; 3) Aucune prise de médicament connu pour ou susceptible de modifier l'équilibre ; 4) Aucun antécédent de deux chutes ou plus dans les six derniers mois précédant l'étude ; 5) Aucun trouble psychiatrique ; 6) Vision normale avec ou sans correction

; 7) Être capable de se tenir debout pendant plus de 20 min et de marcher de façon indépendante.. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé pour participer à cette étude, dans le respect des recommandations de la déclaration d'Helsinki. Au cours de cette étude clinique, les participants devaient réaliser les tests d'Organisation Sensorielle (SOT), d'Adaptation (ADT) et des Limites de Stabilité. Les inclusions sont toujours en cours afin d'atteindre notre objectif de 240 participants, avec 40 personnes dans les groupes 20 à 69 ans et 20 personnes dans les groupes 70 à 89 ans (nombre égal de femmes et d'hommes).

L'analyse statistique a été réalisée en deux étapes. Nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes pour étudier les effets de l'âge et du genre sur les capacités posturales au cours du SOT, de l'ADT et du LOS. Le groupe, le genre, la condition (ou les essais) et leur interaction ont été considérés comme des effets fixes dans les modèles. Les participants ont été considérés comme des effets aléatoires. Nous avons aussi utilisé une méthode de Tukey pour les comparaisons multiples post-hoc sauf lorsqu'un effet principal de la condition a été observé. Nous n'avons pas pu inclure suffisamment de participants âgés dans les groupes 70-79 et 80-89. De ce fait, nous avons regroupé les données dans un seul groupe représentant des personnes entre 70 et 89 ans. Ensuite, nous avons réalisé une analyse non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney pour mesurer les différences entre les valeurs issues des groupes répartis par décennie pour les plateformes de MotionVR et de Bertec. Les valeurs de Bertec ont été extraites de deux publications Eriksen et al. (2023) et Trueblood et al. (2018). Ces données représentent un échantillon composé de 150 participants âgés de 20 à 69 ans. Une autre analyse par modèles mixtes a été réalisée pour évaluer les différences entre les groupes répartis en 20-59 ans et 60-69 ans pour les plateformes de Neurocom, MotionVR et Bertec. Le groupe, le système de posturographie, la condition et leur interaction ont été considérés comme des effets fixes dans les modèles. Les valeurs de Neurocom ont été extraites de leur guide (Rev. 8/juin 2008/CIS 100-03A D102285-00 Rev. C).

Nous avons observé que les sujets jeunes étaient significativement plus stables pendant le SOT comparé aux sujets âgés lorsque les conditions visuelles et proprioceptives sont plus complexes (SOT 4, 5, 6), c'est-à-dire avec des mouvements asservis de la scène visuelle et de la plateforme. Nous avons également observé des scores composites plus faibles chez les sujets âgés. Nos résultats semblent suggérer un tournant vers la cinquième décennie, qui marquerait le début du vieillissement physiologique et de son impact sur la fonction d'équilibration. Nous avons constaté que les femmes âgées de 20 à 39 ans et de 70 à 89 ans oscillaient plus que les hommes dans ces tranches d'âge pour la plupart des conditions du SOT. En général, les participants étaient moins stables dans des conditions plus difficiles. De plus, nous avons constaté que les sujets jeunes utilisaient les informations vestibulaires et visuelles plus efficacement que ceux âgés de 50 ans et plus. Les femmes présentaient des

difficultés à intégrer les informations vestibulaires et visuelles pour s'adapter dans les conditions complexes. Peu de différences ont été observées pour l'ADT à part une énergie plus élevée dans le groupe 60-89 ans par comparaison aux personnes âgées de 30 et 49 ans. L'absence de différences significatives pourrait être due à une plus faible sensibilité de mouvement de la plate-forme pour l'ADT (25 % pour l'ADT contre 50 % pour le SOT). Nos résultats ont révélé que la plupart des sous-paramètres mesurant les limites de stabilité dépendaient de l'âge et de la direction. Il a été constaté que les excursions volontaires diminuaient avec l'âge, cette diminution devenant plus marquées après 50 ans. Nous avons également observé une plus grande ampleur de mouvement dans les directions latérales par rapport à l'axe antéro-postérieur. Nous avons également constaté que le temps de réaction et le contrôle directionnel étaient influencés par le sexe. Les jeunes hommes ont mis plus de temps à exécuter le mouvement dans les quadrants avant et arrière que les femmes, mais cette tendance s'est inversée au-delà de 70 ans. En général, les sujets plus âgés mettaient plus de temps à démarrer l'essai. Le contrôle directionnel diminuait également avec l'âge et un effet plus prononcé a été observé au-delà de 50 ans pour les hommes. La performance posturale sur la plateforme MotionVR était inférieure à celle sur les plateformes de Neurocom et Bertec. Cette différence pourrait être expliquée par le niveau de sensibilité de la plateforme MotionVR. En effet, elle est caractérisée par trois degrés de liberté (antéro-postérieur, médio-latérale et haut/bas) et les mouvements sont contrôlés et quantifiables à 360°. Les ratios vestibulaires et visuels étaient inférieurs à ceux publiés pour Bertec et Neurocom. Cette différence pourrait être expliquée par l'utilisation de la réalité virtuelle. En effet, le sentiment de présence en VR peut impacter la performance. La technologie MotionVR offre de nouvelles perspectives quant à la meilleure caractérisation des performances sujets et des patients.

Pour la première fois, nous avons établi des valeurs de référence pour le SOT, l'ADT et le LOS administrés sur une nouvelle plateforme de posturographie, intégrant la réalité virtuelle et un mouvement quantifiable à 360°. Nous avons également démontré que les valeurs enregistrées sur la MotionVR n'étaient pas comparables à celles publiées pour les plateformes a Bertec et Neurocom. A l'issue de cette démarche, nous avons obtenu un outil de diagnostic et de rééducation fiable et valide avec des valeurs normatives adaptées à l'âge et tenant compte des changements liés au vieillissement normal.

Normative data for a dynamic computerized posturography system using virtual reality: MotionVR®

Angela Julienne¹, Stéphane Besnard^{1(*)}

¹ VERTEX Research Lab, Caen University, Caen, France

ABSTRACT

Computerized dynamic posturography is considered a gold standard for balance assessment. It is used to differentiate postural strategies and sensorimotor responses. Commonly used standardized tests included Sensory Organization Test, Adaptation Test, Limits of Stability for which normative data have been commercially published by manufacturers. Recently, a newly developed CDP device, the MotionVR system, has been made commercially available. This system integrates a VR headset to produce virtual visual perturbations and a controllable platform movement of 360° for proprioceptive perturbations. However, no studies have reported normative data for the MotionVR system. Due to the MotionVR's platform differing from the gold-standard NeuroCom and the Bertec CDP system, their values might be incomparable. This study aimed at reporting age- and gender-based normative data, assessed by MotionVR CDP, in a healthy adult population aged 20-89 and to determine if these results are comparable to the Bertec and Neurocom platforms.

A total of 189 healthy subjects were recruited and divided into age groups of 20-29, 30-39, 40-49, 50-59, 60-69 and 70-89 years. Concerning general health status, the sample represented non-smokers ($n = 144$, 76.2 %), with no specific diet ($n = 178$, 94.2 %) and their self-perceived health was rated excellent (rating 9: $n = 57$, 30.2 %). Physical activity level showed that the sample represented active individuals (26.1 ± 4.70 points). The participants completed (1) comprehensive clinical examination, (2) quantitative posturographic evaluation using the MotionVR system (Virtualis, Montpellier) that included the sensory organisation test (SOT), the adaptation test (ADT) and the limits of stability test (LOS).

In general, participants were less stable in more challenging conditions SOT 4-SOT 6. With respect to sensory contribution in postural control, we found that younger individuals used vestibular and visual information more efficiently compared to those aged 50 and above. Our findings revealed that most sub-parameters measuring limits of stability were age- and condition-dependent. Our results showed that individuals were more instable on the MotionVR platform during SOT 5 and SOT 6 compared to Neurocom and Bertec. We also observed higher vestibular and visual contributions on the Bertec and Neurocom system compared to the MotionVR system. This is the first study to report normative data for the SOT, ADT and LOS on the MotionVR system. This study represents a crucial step in providing clinicians and researchers with representative values for comparison with patients.

Keywords: normative data, force platform, computerized dynamic posturography

Funding statement: This study was funded as part of a CIFRE thesis under a public-private contract by the ANRT with Virtualis SAS, grant number 2019/1807.

Conflicts of interest: None.

1. Introduction

When moving through an environment, sensory information from the surrounding and the body is recorded within sensory systems. Throughout their lifespans, humans are constantly exposed to changing visual and tactile surroundings. A coherent and robust perception of the environment is essential for correct behavioural adaptation (Ernst & Bühlhoff, 2004; Lewkowicz & Bremner, 2020; Murray et al., 2016). These adaptation mechanisms involve multiple motor and cognitive inter-connected networks, such as postural control. Postural control is a multisensory adaptive system which performs predictive (anticipatory) and/or reactive (compensatory) actions, with varying degrees of accuracy, to maintain balance in changing environmental context (Pollock et al., 2000b). The main functions of postural control are body orientation and stability, via sensory-to-motor transformations (Massion, 1994; Peterka, 2018). Proprioceptive, visual, and vestibular signals are integrated to provide information on mechanical gravity and perception-action reference frames. These signals and processes contribute to constructing an internal body scheme which relies on feedback for corrective actions.

Numerous techniques and methods are employed to evaluate postural control in static and dynamic conditions (Paillard & Noé, 2015). Basic noninstrumented tests, such as the Timed Up and Go test (Podsiadlo et al., 1991), the Berg Balance Scale (Berg et al., 1992) and the Tinetti Balance Scale (Tinetti, 1986) among others, are well known and widely used by clinicians. However, these tests give a broad overview of functional state whereas instrumented tests offer the possibility to carry out in depth movement assessment under different conditions and difficulty levels. There are many instrumented devices available on the market for clinical and research use. Common instrumentation includes computerized static and dynamic force platforms. In fact, EquiTest® device, which is a Computerized Dynamic Posturography (CDP) system, is considered a gold standard instrument. The concept CDP, an apparatus and method for sensory integration and muscular coordination analysis, was developed and patented by Nashner in 1988. It has been noted that dynamic force platform is the most efficient clinical tool as it provides additional information about multisensory components of balance (visual, somatosensory, vestibular) and postural control strategies (Browne & O'Hare, 2001; Monsell et al., 1997) as well as evaluates normal age-related changes (H. Cohen et al., 1996b; Peterka & Black, 1990a, 1990b) and improvements in balance function following rehabilitation programs (Mirka & Black, 1990). Moreover, CDP is considered as a valid, reliable, and cost-effective tool in the evaluation of functional aspects of vestibular disorders (Monsell et al., 1997; M. G. Stewart et al., 1999; Vorhees, 1989) and corresponding the most with the patients' complaints compared to other postural tests (Asai et al., 1993b). Recently, the Bertec Balance Advantage (Bertec Incorporated, Columbus, OH), a CDP system which uses virtual visual surround, has become available. Immersive systems are promising tools that can contribute to the ecological validity of neuropsychological assessment and computerized posturography (Aharoni et al., 2021; Chander et al., 2019; Chiarovano et al., 2017; Liang et al., 2021). In fact, virtual reality technologies (VR) can be used to integrate a wide range of visual perturbations during balance assessment.

Despite technological advances in the field of posturography, there are several limitations that have been observed (Bloem et al., 2003; Thoumie, 2012; Visser et al., 2008). These limitations are related to the methodological aspects (i.e. population studied, test conditions) and the interpretation of results (large inter and intra-individual variability, lack of psychometric properties). Furthermore, clinical applications notwithstanding, normative data are needed for interpretation in clinical settings. Normative data, as defined by the Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research (SpringerReference), are observational data summarizing and describing characteristics of a defined population at a specific time. Postural norms are used

to compare a reference group (healthy individuals) and a specific patient population. Thus, variations between patients and healthy individuals can be observed and interpreted in a clinical setting to determine pathological profiles. Some studies have focused on establishing reference values for computerized posturography, mostly by means of NeuroCom EquiTest; for which normative data are already available. More recently, reference values have been published for the Bertec immersive CDP system (Trueblood et al., 2018b). The lack of age and gender stratification, socio-demographic information and sample size are other limitations that have been noted. In fact, many studies have demonstrated that gender and age influence postural control (Farenc et al., 2003; Hageman et al., 1995; Ionescu et al., 2005b). Other variables such as anthropometric characteristics (Alonso et al., 2012; Chiari et al., 2002b), feet positioning (Gibbons et al., 2019; Kollegger et al., 1989), and physical activity (García-Soidán et al., 2020; Gauchard, 2003; Lelard & Ahmaidi, 2015) can also affect balance. Thus, a lack of stratification and reporting might lead to misinterpretation of patient postural performance in clinical practice, as well as healthy individuals undergoing behavioural assessments.

As part of the research and development perspective, computerized posturography systems using VR have recently become available. The MotionVR® system allows for the development of assessments that integrate a wide range of proprioceptive and visual perturbations. Unlike the NeuroCom and Bertec systems, which rely only on sagittal plane movements, the movements of the force platform are controlled and quantifiable at 360°. The head mounted display combined with the moveable platform creates immersive dynamic constraints, thus, providing an ecologically valid environment for balance assessment. Due to the differences in the MotionVR® system, it is unknown whether the reference values are comparable to those of the NeuroCom and Bertec systems. Furthermore, no normative data have been reported using MotionVR. Therefore, the purpose of this study was to report age- and gender-based normative data, assessed by MotionVR CDP, in a healthy adult population aged 20-89 and to determine if these results are comparable to the Bertec and Neurocom platforms.

1. Materials and methods

3.1. Participants

The present study was conducted at the ENT department of the Caen University Hospital, France. For this study, we aimed to recruit 240 participants who met our inclusion criteria using quota sampling. Participants were recruited through social media advertisements, hospital staff and by word to mouth. They were stratified into six groups, 40 subjects per group (20 females and 20 males): 20-29, 30-39, 40- 49, 50- 59, 60- 69 years and 20 subjects in each group aged 70-79 and 80-89 years old. A medical visit was performed to ensure that the following criteria were met: (1) no symptoms of dizziness, impaired balance, motion sickness/sensitivity, (2) no neurological or musculoskeletal impairment, (3) no medication intake likely to modify the balance, (4) no history of two or more falls in the last six months, concussion with symptoms within the past 10 years, (5) no psychiatry disorder, (6) normal vision with or without correction, (7) able to stand for more than 20 min and walk independently.

The study was approved by the Ethics Committee of Caen University Hospital (ID RCB n° 2022-A00856-37) and was registered at Clinical Trials (clinicaltrials.gov) with identifier NCT05532176. Participants were asked to provide written informed consent prior to the study, in accordance with the Declaration of Helsinki. All participants were able to ask questions and were informed that withdrawal from the study, without requiring a specific reason, was possible. Personal information was pseudonymized.

3.2. Procedure

Three tests were conducted on the MotionVR CDP platform (Virtualis, Montpellier; <https://virtualisvr.com/>). HTC Vive VR head-mounted display was used during the Sensory Organization Test (SOT), the Adaptation Test (ADT), and the Limits of Stability (LOS). To reduce error, the same tester was used to conduct all three examinations. Sociodemographic, anthropometric, general health data and physical activity level through the Ricci-Gagnon questionnaire were recorded. The Ricci-Gagnon questionnaire has 9 items which assess habits related to physical activities such as sedentary behaviour, leisure activities and activities of daily living. A total score < 18 points is considered as inactive, between 18 and 35 points as active and > 35 points as very active.

Participants stood on the platform with bare feet while the researcher aligned their medial malleolus into the standardized position, parallel to the horizontal line on the force platform. Detailed explanations of each test or trial were provided to each participant prior to beginning any test. Participants were asked to stand quietly, with their arms along their sides and to look straight ahead.

The SOT was the first test performed. It consists of 6 different sensory conditions averaged over three trials lasting 20 seconds each: 1) eyes open with stable platform, 2) eyes closed with stable platform, 3) sway-referenced visual surround, 4) eyes open with sway-referenced platform, 5) closed eyes with sway-referenced platform and 6) sway-referenced visual support and platform. Sway-referenced platform was quantifiable at 360° and set at 50 % of movement sensitivity. The SOT objectively identifies visual, vestibular, and proprioceptive sensory reweighting during movement in different conditions. Equilibrium scores (ES) for each condition, sensory ratios and a composite score are provided in percentages. Better postural performance was measured as a score of 100.

The Adaptation Test (ADT) consisted of five trials with two unexpected platform rotations (upwards or downwards). The ADT is used to analyse the adaptive capacity to reduce postural oscillation and maintain balance when the platform undergoes irregular and unexpected rotations. Platform rotations were set at 25 % of movement sensitivity. Values are provided for each rotation trial (five toes up, five toes down) and measured as sway energy, a non-dimensional score. The sway energy measures the force produced to minimize the anterior-posterior oscillation and progressively recovers after the rotations. Abnormal responses can signal possible falls.

The Limits of Stability Test (LOS) is composed of eight trials during which an individual will voluntarily lean in eight directions from a midpoint as follows: forward, forward right, right, backward right, backward, backward left, left, forward left. Values are provided for target direction, each cardinal direction (forward, backward, right, and left), as well as a composite score. The LOS is used to assess voluntary motor control and determine the cone of stability. The theoretical stability limits in the antero-posterior axis correspond approximately to 12.5 degrees and 16 degrees in the mediolateral axis in healthy individuals. The parameters reported are Directional Control (DCL), Reaction Time (RT), End Point Excursion (EXE), Maximum Excursion (MXE) and Movement Velocity (MVL). DCL provides information about the quality of movement control used to move in the target direction. Normal performance (straight path) is represented by values approaching 100%. However, lower values can indicate a distorted path toward the target. RT reflects the onset of movement after start cue. Increased values indicate response delays due to aging or psycho-cognitive factors. EXE indicates the magnitude of movement on the first attempt. MXE indicates the farthest distance during the trial. Reduced excursion parameters reflect limited range of motion. MVL reflects

the speed of the movement. Lower values indicate slowed movement due to neuromuscular impairments.

3.3. Instrumentation

The MotionVR dynamic platforms are composed of two independent platforms, with eight force sensors (four sensors per foot) integrated. Regarding the responsiveness of the platform, the dynamic platform is characterized by three degrees of freedom (anteroposterior, mediolateral, and top/bottom), 2G acceleration, and a speed of 280 mm/s, as well as amplitudes of 24 ° front/back, 26° left/right, and a height of 15 cm (top/bottom). Movements are controlled and quantifiable at 360° (adjustable height of the moving plate). Platform movement sensitivity can also be set at various percentages ranging from 0 (less movement) to 100 % (more movement). The dynamic platform guardrail is also adjustable, providing the ability to work with people of various sizes. The computerized dynamic posturography device is depicted in Figure 1.



Figure 1. Illustration of the MotionVR system.

4. Statistical Analysis

Data were extracted from the MotionVR system and analysed using R software (version R.4.4.1). For sociodemographic characteristics, descriptive statistics are presented as marginal means, standard deviation (SD) and range unless stated otherwise. Age and gender-related scores for the SOT, the ADT and the LOS are summarized with mean, standard deviation (SD), range and median (IQR – interquartile range). Outliers are included in the calculations. Graphical results and tables were reported using ggplot and gtsummary (Sjoberg et al., 2021) packages. Differences were assessed using a Linear Mixed Model (LMM) with Subject as random factors (random intercept only). To obtain effect sizes, *d* statistics (Cohen's *d*) (Nakagawa & Cuthill, 2007). LMM assumptions were checked using the performance package (Lüdtke et al., 2021). To fit and test the LMMs, the lme4 (Bates et al., 2015), lmerConvenienceFunction (Tremblay and Ransijn, 2015) and lmerTest (Kuznetsova et al., 2017) packages were used. P-values were obtained by likelihood ratio tests of the full model with the effect in question against the model without the effect ($\alpha = 0.05$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons were calculated using the emmeans package for interaction effects, if no main effect were found (Lenth, 2024). Missing values were excluded from the analyses. Models were adjusted for Weight, Height and Physical activity level (inactive, active, very active). Missing values due to technical issues were excluded from the analyses. The normative data is owned by the parent company of the MotionVR CDP platform (Virtualis, Montpellier; <https://virtualisvr.com/>).

Comparison between age groups and gender. LMMs were fitted to the SOT, the ADT, and LOS data to assess age and gender effects on different components of postural control. Group, Gender, Condition or Trials and their interaction were entered as fixed effects for each test whereas Subject entered as random effect. Visual inspection of residual plots did not reveal any obvious deviations from homoscedasticity or normality for the SOT, ADT and LOS. Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons were used to compare the differences across groups and gender. No further post-hoc analysis was conducted if Condition was a main effect. We pooled data of the oldest group into one 70-89 age group to increase sample size.

Comparison to NeuroCom and Bertec normative values. LMMs were fitted to the SOT data to compare the mean scores in our sample, to the reported NeuroCom and Bertec mean values for each of the three tests. Group, System, Condition and their interaction were entered as fixed effects for each test. Visual inspection of residual plots did not reveal any obvious deviations from homoscedasticity or normality. We carried out a non-parametric Wilcoxon test to measure differences between MotionVR and Bertec for age groups per decade, after having verified the normality of the variables and the homogeneity of the variances.

5. Results

5.1. Participants

Sociodemographic characteristics are stratified by age groups and gender. In total, we recruited 189 participants representing 106 females (age: 47.01 ± 16.24 years; weight: 68.38 ± 14.56 kg; height: 1.64 ± 0.05 m) and 83 males (age: 43.82 ± 14.76 years old; weight: 83.55 ± 14.93 kg; height: 1.78 ± 0.06 m). They completed the SOT, ADT and LOS on the MotionVR system. Most participants were separated ($n = 108$, 57.1 %), had completed higher education (bachelor's degree: $n = 55$, 29.1%) and rated their computer level as intermediate ($n = 120$, 63.5 %). Concerning general health status, the sample represented non-smokers ($n = 144$, 76.2 %), with no specific diet ($n = 178$, 94.2 %) and their self-perceived health was rated excellent (rating 9: $n = 57$, 30.2 %). Physical activity level showed that the sample represented active individuals (26.1 ± 4.70 points). Two females (p75, p90) reported dizziness or side effects at the start of testing and were removed from statistical analysis.

5.2. Comparison between age groups and gender

Sensory Organization test. The LMMs on the SOT scores revealed a significant 2-way interactions between Group and Condition ($\chi^2(30) = 70.078$, $p < 0.000$;), Gender and Condition ($\chi^2(6) = 12.703$, $p = 0.048$), Group and Gender ($\chi^2(5) = 11.808$, $p = 0.038$) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 48.028$, $p < 0.000$), Gender ($\chi^2(1) = 4.871$, $p = 0.027$) and Condition ($\chi^2(6) = 2,295.189$, $p < 0.000$).

Post-hoc Tukey-adjusted comparisons between age groups, separated by gender and test conditions, revealed that younger females were more stable than older females across several conditions. For SOT 4, significant differences between the 70–89 group and younger groups were observed (e.g., 20–29, 30–39, 40–49, all $p < 0.05$). For SOT 5, the 70–89 group was less stable compared to younger groups (e.g., 20–29, 30–39; $p < 0.05$). Similarly, the 60–69 group showed reduced stability compared to younger women. For SOT 6 and Composite Scores, similar differences were observed, with older women being significantly less stable than younger ones. Furthermore, younger males were more stable than older males. For SOT 4 significant differences between the 60–69 and 70–89 groups were revealed compared to younger groups (e.g., 20–29, 30–39; $p < 0.05$). For SOT 5, SOT 6, and Composite Scores, older males in the 60–69 group were less stable compared to younger men (all p -values <

0.05). Over more, differences were observed between younger (e.g., 20–29, 30–39) and middle-aged adults in the 50–59 group, particularly in more challenging conditions, like SOT 4–6, and composite scores. These results are shown on Figure 2. Gender comparisons showed that females were generally less stable than males in SOT 4, 5, and 6 for the 70–89 age group ($p < 0.05$). Females and males, regardless of age, were less stable in more difficult conditions (SOT 4–6), with p -values < 0.000 for all groups.

The LMMs on the SOT ratios revealed a significant 2-way interactions between Group and Ratio ($\chi^2(15) = 60.753$, $p < 0.000$), Gender and Ratio ($\chi^2(3) = 8.451$, $p = 0.038$) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 48.968$, $p < 0.000$) and Ratio ($\chi^2(3) = 1,232.726$, $p < 0.000$).

Post-hoc comparisons revealed that younger adults used vestibular and visual information more efficiently than older adults (Figure 3). Females aged 20–29 and 30–39 years had significantly lower vestibular ratio scores than those aged 70–89 years ($p < 0.05$). Males aged 20–29 and 30–39 years had significantly lower vestibular ratio scores than those aged 60–69 and 70–89 years ($p < 0.05$). Differences were also noted between specific age groups, such as females aged 50–59 vs. 70–89 ($p = 0.007$) and males aged 30–39 vs. 50–59 ($p = 0.024$). The results also revealed that younger adults had significantly lower visual ratio scores than older adults. Females aged 20–29, 30–39, and 40–49 years had significantly better visual ratio scores than those aged 70–89 ($p < 0.05$). Males aged 20–29 and 30–39 showed better visual ratio scores than older males ($p < 0.05$).

Gender differences showed significant differences in vestibular ratio between males and females in various age groups (20–29, 30–39, 40–49, and 70–89, $p < 0.05$). Sensory ratio comparisons demonstrated that both genders, across all age groups, used vestibular and visual information less efficiently compared to somatosensory input ($p < 0.05$). Visual dependence was higher than vestibular and visual ratios for all groups and both genders ($p < 0.001$).

Adaptation test. The LMMs on the ADT sway energy revealed a significant main effect of Group ($\chi^2(5) = 23.007$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons of sway energy between age groups showed that the 30–39 and the 40–49 years old groups had lower mean sway energy as compared to both the 60–69 groups (60–69 vs. 30–39, $p = 0.004$; vs. 40–49, $p = 0.009$) and the 70–89 (70–89 vs. 30–39, $p = 0.023$; vs. 40–49, $p = 0.038$). These differences were observed only between 20–29 years and 60–69 years ($p = 0.031$). These findings are shown in Figure 4.

Limits of Stability test. For MVL, the LMMs revealed a significant main effect of Condition ($\chi^2(7) = 404.270$, $p < 0.000$) Main effects of Group ($\chi^2(5) = 42.493$, $p < 0.000$) and Conditions ($\chi^2(7) = 267.254$, $p < 0.000$) were revealed for EXE scores. Tukey adjusted post hoc revealed that younger individuals aged 20–29 and 30–39 years had significantly larger end-point excursions compared to adults aged 50–89 (all $p < 0.05$). Differences were also found between 40–49 and 60–89-year-olds ($p < 0.05$).

The LMMs on the MXE scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(35) = 66.270$, $p = 0.001$) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 18.103$, $p = 0.003$) and Condition ($\chi^2(7) = 157.254$, $p < 0.000$). Tukey post hoc revealed that younger adults aged 20–29 and 30–39 years had larger maximal excursions during forward leaning compared to older groups aged 50–89 (all $p < 0.05$). Differences were also observed between the 40–49 group and both the 50–59 ($p = 0.022$) and 70–89 groups ($p = 0.001$), as well as

between the 60–69 and 70–89 groups ($p = 0.045$). Older adults aged 50–89 years had reduced maximal excursions in forward leaning compared to other directions ($p < 0.05$).

The LMMs on the RT scores revealed a significant 3-way interaction between Group, Gender and Condition ($\chi^2(35) = 61.993$, $p = 0.003$; Table SC.4.) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 22.425$, $p < 0.000$) and Condition ($\chi^2(7) = 86.934$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post hoc showed that males aged 70–89 had longer reaction times during forward and right leaning compared to all younger age groups ($p < 0.05$). Older males aged 70–89 years had significantly longer reaction times during forward leaning compared to younger males aged 20–29 ($p = 0.002$) and 30–39 ($p = 0.003$). Reaction time differences were also observed between males aged 20–29 and 60–69 years ($p = 0.044$). Females aged 70–89 years had longer reaction times during forward-right leaning compared to those aged 20–29 ($p = 0.022$). Gender Differences in reaction time were also observed, such that females had shorter reaction times than male during forward leaning at 30–39 years ($p = 0.018$), backward-left leaning at 40–49 years ($p = 0.047$) and 50–59 years ($p = 0.028$). However, this trend reversed in older adults aged 70–89 years, with males outperforming females during right leaning ($p < 0.000$). Directional variations in reaction time were also demonstrated. At 40–49 years, males took longer to react during forward leaning compared to right ($p = 0.037$), backward ($p = 0.042$), and left leaning ($p = 0.039$). At 60–69 years, males had longer reaction times for forward leaning compared to backward-right ($p = 0.022$), left ($p = 0.018$), and forward-left ($p = 0.037$). At 50–59 years, females exhibited longer reaction times during forward leaning compared to other directions: backward-right ($p = 0.009$), backward ($p = 0.018$), left ($p = 0.006$), and forward-left ($p = 0.017$). Differences were also observed for backward-left ($p = 0.010$) and forward-left ($p = 0.015$).

The LMMs on the DCL scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Gender ($\chi^2(5) = 13.080$, $p = 0.023$; Table SC.5.) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 18.405$, $p = 0.002$) and Condition ($\chi^2(7) = 304.333$, $p < 0.000$). Post hoc results revealed that younger males aged 20–39 years had better directional control compared to older males (50–69 years, $p < 0.05$).

The LMMs on the Global scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(20) = 87.231$, $p < 0.000$; Table SC.6.) as well as main effects of Group ($\chi^2(5) = 36.848$, $p < 0.000$) and Condition ($\chi^2(4) = 2,474.188$, $p < 0.000$). The findings for Global scores showed that adults aged 20–49 had better end-point and maximal excursions compared to those aged 50 years and older ($p < 0.05$). The 30–39 group had better directional control than the 60–69 and 70–89 groups ($p < 0.05$).

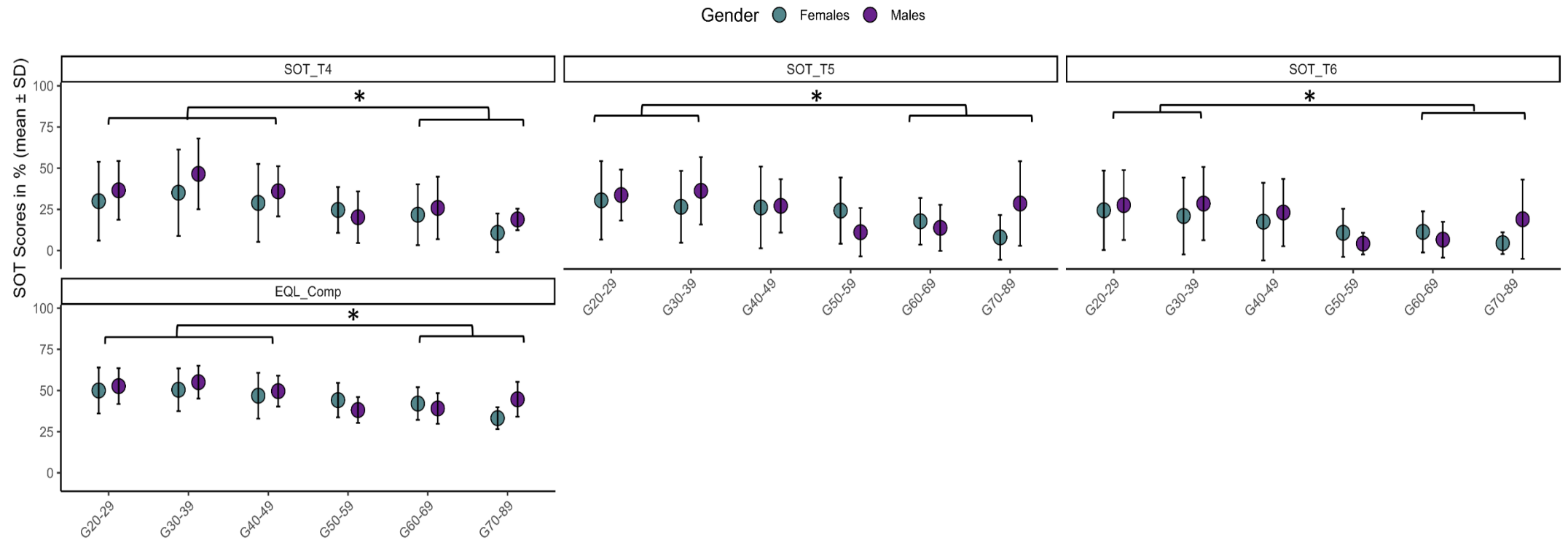


Figure 2. Individual and composite SOT scores between different age groups and gender. Significant results between age groups are shown using brackets and asterisks. Younger subjects aged 20-39 years were significantly more stable than older individuals aged 70-89 years under SOT conditions 4, 5, and 6, as well as composite scores ($p < 0.05$). Older women aged 70-89 years were less stable than men of the same age in more difficult conditions (SOT 4-6, $p < 0.05$).

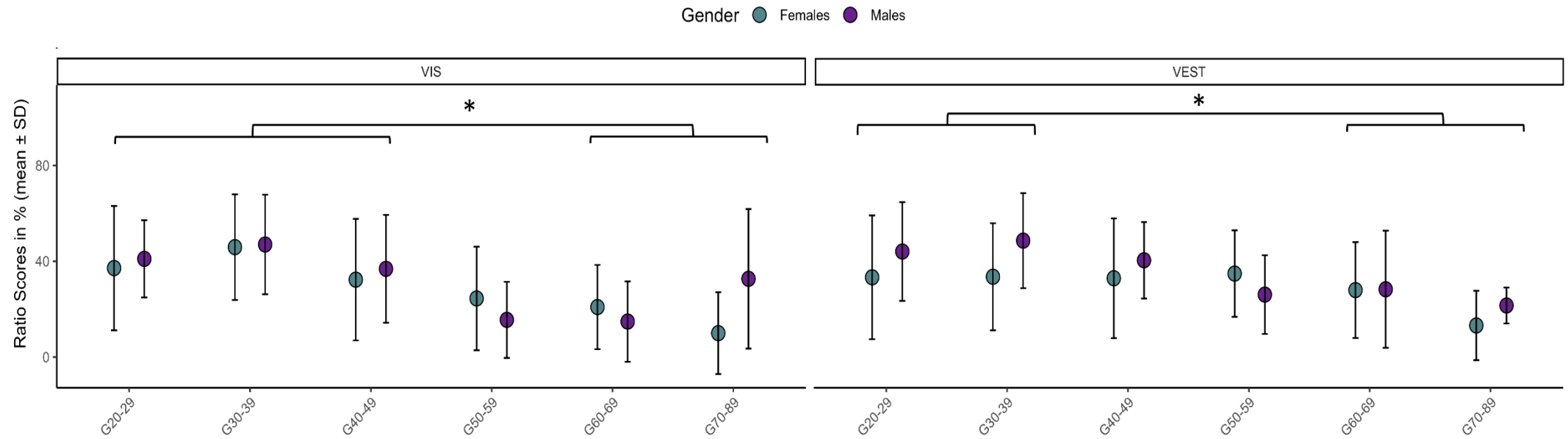


Figure 3. Visual and vestibular ratio scores between different age groups and gender. Significant results between age groups are shown using brackets and asterisks. Vestibular and visual ratio scores were significantly better in younger adults compared to older groups aged 60-89 years.

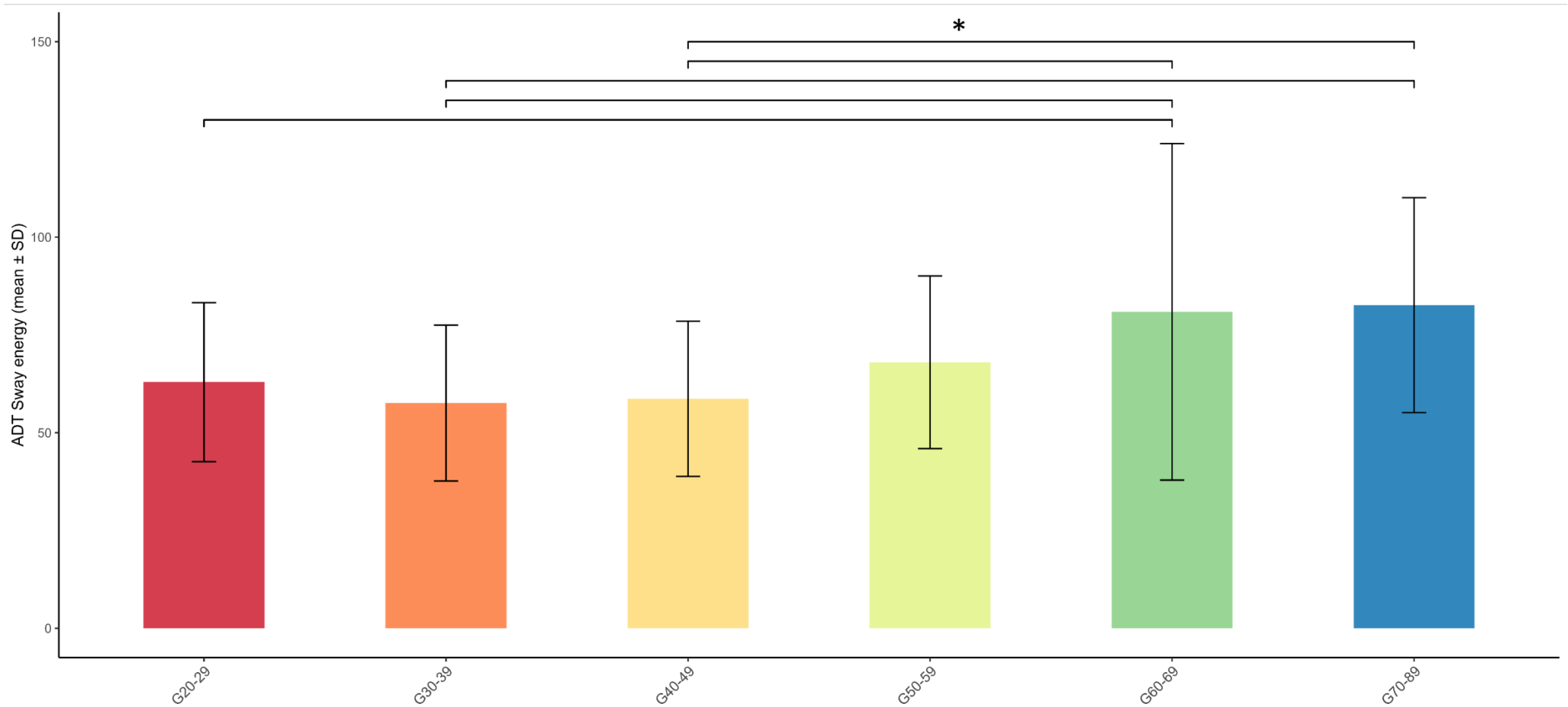


Figure 4. Sway energy results for the ADT between different age groups. Significant differences between age groups are shown using brackets and asterisks. Younger adults aged 20-39 years possess more efficient adaptive mechanisms than older adults aged 60-89 years.

3.1. Comparison to NeuroCom and Bertec normative values.

We compared age-related normative data published by Neurocom with grouped values from Bertec and MotionVR. We pooled age-related normative data for the Bertec system from recently published papers (Eriksen & Hougaard, 2023; Trueblood et al., 2018). These data represent a sample consisting of 150 participants aged between 20 and 69 years old. The grouped values were separated to create a 20–59 years old and 60–69 years old age group for comparisons between the three CDPs for SOT scores. We focused on differences during the SOT because it integrated the quantifiable platform movements. The LMMs on SOT scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(6) = 18.955$, $p = 0.004$.) and System and Condition ($\chi^2(12) = 174.807$, $p < 0.000$) as well as main effects of Group ($\chi^2(1) = 9.435$, $p = 0.002$), System ($\chi^2(2) = 72.747$, $p < 0.000$) and Condition ($\chi^2(7) = 2,077.770$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons of SOT scores between systems (per conditions) revealed higher values for the Bertec and Neurocom systems compared to the MotionVR system during SOT 4 (MotionVR vs. Bertec and vs. Neurocom, $p < 0.000$), SOT 5 (MotionVR vs. Bertec and vs. Neurocom, $p < 0.000$), SOT 6 (MotionVR vs. Bertec and vs. Neurocom, $p < 0.000$) and for the composite score (MotionVR vs. Bertec, $p < 0.000$; vs. Neurocom, $p = 0.003$). These results are shown in the Figure 5. The LMMs on SOT

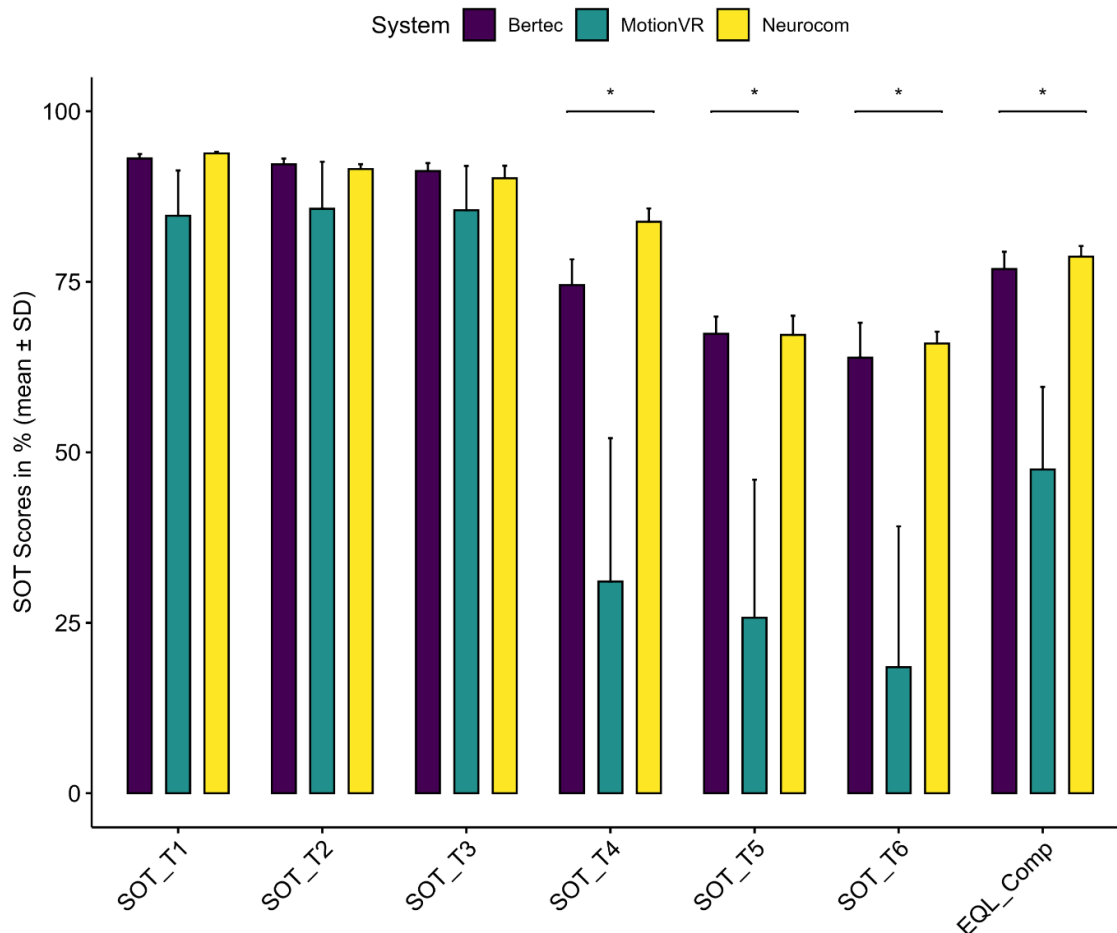


Figure 5. Comparison of reference values between MotionVR, Neurocom and Bertec. Significant differences are shown using asterisks. The Bertec and Neurocom systems reported higher reference values for SOT compared to the MotionVR system across multiple conditions, with significant differences observed in conditions SOT 4, 5, 6, and composite score.

scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Ratio ($\chi^2(3) = 13.822$,

$p = 0.003$; Table.4.) and System and Ratio ($\chi^2(6) = 96.949$, $p < 0.000$) as well as main effects of Group ($\chi^2(1) = 12.204$, $p < 0.000$), System ($\chi^2(2) = 52.220$, $p < 0.000$) and Condition ($\chi^2(3) = 1,097.480$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons of SOT scores between systems (per conditions) revealed higher values for the Bertec system compared to the MotionVR system for vestibular and visual ratios (for both, $p < 0.000$; Table SD.2.). Lower values for the MotionVR system compared to the Neurocom system for vestibular ($p = 0.002$) and visual ratios ($p < 0.000$).

. For all age groups comparisons between MotionVR and Bertec (Table 2), we observed that reported reference values were significantly lower for the MotionVR system compared to those of the Bertec system for SOT 1 (G20-29, $p = 0.027$; G30-39, $p = 0.039$; G40-49, $p = 0.024$; G50-59, $p = 0.031$; G60-69, $p = 0.022$), for SOT 5 (G20-29, $p = 0.023$; G30-39, $p = 0.028$; G40-49, $p = 0.033$; G50-59, $p = 0.020$; G60-69, $p = 0.022$) and for SOT 6 (G20-29, $p = 0.021$; G30-39, $p = 0.031$; G40-49, $p = 0.025$; G50-59, $p = 0.015$; G60-69, $p = 0.018$). Differences were also observed in all groups for the composite scores (G20-29, $p = 0.020$; G30-39, $p = 0.020$; G40-49, $p = 0.020$; G50-59, $p = 0.021$; G60-69, $p = 0.022$), for vestibular (G20-29, $p = 0.020$; G30-39, $p = 0.024$; G40-49, $p = 0.028$; G50-59, $p = 0.021$; G60-69, $p = 0.028$) and visual ratios (G20-29, $p = 0.020$; G30-39, $p = 0.024$; G40-49, $p = 0.024$; G50-59, $p = 0.021$; G60-69, $p = 0.022$). For SOT 2, reference values on the MotionVR platform were lower compared to those on the Bertec system in the 20-29 group ($p = 0.025$), the 50-59 group ($p = 0.037$) and the 60-69 group ($p = 0.035$). Only reference values for individuals aged 60-69 years old were lower on the MotionVR than on the Bertec system for SOT 3. Differences were observed for all age groups for SOT 4 ($p < 0.05$) except in the 30-39 group ($p = 0.054$). No differences were noted for SOM ratio whereas only values for individuals aged 20-29 years seemed to demonstrate more visually dependance on the Bertec platform compared to the MotionVR system ($p = 0.011$).

4. Discussion

This is one of the first studies to report normative values on the SOT, ADT and LOS protocols using the MotionVR CDP platform. The MotionVR® system allows for the development of assessments that integrate a wide range of proprioceptive and visual perturbations. Unlike the NeuroCom and Bertec systems, which rely only on sagittal plane movements, the movements of the force platform are controlled and quantifiable at 360°. The head mounted display combined with the moveable platform creates immersive dynamic constraints, thus, providing an ecologically valid environment for balance assessment. Due to the differences in the MotionVR® system, it is unknown whether the reference values are comparable to those of the NeuroCom and Bertec systems. Therefore, our objectives were twofold: 1) report normative using MotionVR, 2) to determine if these values are comparable to the Bertec and Neurocom platforms.

4.1. Age and gender differences

In the present study, the findings revealed a progressive decline in postural stability and sensory efficiency with age during the Sensory Organisation Test (SOT). Younger adults demonstrated better postural control and integration of vestibular and visual cues to maintain balance compared to older adults. Women, particularly those in older age groups, exhibited greater postural instability than men in complex conditions (SOT 4 - SOT 6). Younger individuals were significantly more stable during the SOT compared to older age groups for condition 4 (eyes open with sway-referenced platform), 5 (closed eyes with sway-referenced platform) and 6 (sway-referenced visual support and platform). We also observed that lower composite scores were obtained by older adults. Our findings seem to suggest a turning point at around the fifth decade, with older subjects experiencing increased instability. Previous

normative studies have widely reported age-related balance decline in the adults for computerized dynamic posturography systems (H. Cohen et al., 1996a; Eriksen & Hougaard, 2023; Faraldo-García, Santos-Pérez, Crujeiras, et al., 2016; Perucca et al., 2021). Using the Bertec system, Eriksen & Hougaard, (2023) demonstrated a progressive decline in SOT composite scores between healthy individuals aged between 20-39 years and over 70 years. However, these differences were not found in a similar study by (Trueblood et al., 2018a). Moreover, young adults had significantly higher equilibrium scores compared to elderly subjects for the conditions 2 to 6 on the Neurocom system (Cohen et al., 1996). Comparing elderly groups, Perucca et al., (2021) found that subjects aged 85 and above swayed significantly more than those aged between 80-84 years. These authors demonstrated that balance becomes less stable after the age of 85 years and more marked changes was observed during vestibular-perturbed conditions. Age-related instability continues up to the ninth decade and can be explained by less accurate and slower sensory systems' functioning (Hageman et al., 1995). These age-related changes appear to become more pronounced with gender (Goble & Baweja, 2018b; Kollegger et al., 1992; Masui et al., 2005). We found that females aged 20-39 and 70-89 years swayed more than males during most SOT conditions and had lower composite scores. Poor balance in the SOT has been confirmed in elderly females compared to males (Wolfson et al., 1994). In general, participants were less stable in more challenging conditions SOT 4-SOT 6. With respect to sensory contribution in postural control, we found that younger individuals used vestibular and visual information more efficiently compared to those aged 50 and above. In fact, Faraldo-García et al., (2012) found that vestibular and visual contributions varied throughout life, with a minimum for visual ratio and a maximum for vestibular ratio at 40-49 years old. Gender influenced vestibular contribution as males outperformed females between 20-49 years and 70-89 years. However, a previous study using Neurocom system did not reveal gender effects on sensory contribution (Faraldo-García et al., 2012). The changes in vestibular contribution might be due to sensory reweighting processes varying between males and females at the beginning and end of adulthood. Females became less able to use vestibular information to adapt in sensory-perturbed conditions. The Adaptation Test (ADT) measures how well a person can adjust to unexpected changes, like sudden platform movements. The results showed that younger adults adapted better and maintained balance more effectively than older adults, highlighting age-related declines in the capacity to minimize anterior-posterior oscillation and progressively recover after the rotations. For the ADT, sway energy tended to be higher in older age groups; significant differences were only observed between 30-49 and 60-89 years old. Eriksen & Hougaard, (2023) also found that adaptation to sudden perturbations declined with increasing age which might be explained by reduced muscle mass. Lack of significant differences could be due to smaller platform movement sensibility for the ADT (25 % for ADT vs. 50 % for SOT). Our findings revealed that most sub-parameters measuring limits of stability (LOS) were age- and condition-dependent. They indicated that younger adults exhibit better excursion, reaction times, and directional control compared to older adults, with forward leaning posing the greatest challenge. It was found that endpoint and maximal excursions decreased with age, becoming more pronounced after the age of 50 years. Young adults had larger excursion during forward leaning than the older groups. We also observed that greater magnitude of movement in the lateral directions compared to anterior-posterior axis. These findings have been corroborated in previous studies that explained that these differences could be due to base of support constraints and fear of falling (Faraldo-García, Santos-Pérez, Crujeiras, et al., 2016; Konukseven et al., 2022). Also, we found that reaction time and directional control were influenced by gender. Young males took longer to execute movement after start cue in the front and back quadrants compared to females, but this trend was reversed above 70 years old. Reaction time was also longer for forward movement in both genders. Generally, older subjects took more time for movement onset. This is an indication of decline in reflexes and processing

speed. Regarding directional control, it also decreases with age, with a more pronounced effect above 50 years old for males. A previous study has highlighted these changes in limits of stability (Faraldo-García et al., 2016). We have found a limited number of normative studies using the adaptation test and the limits of stability test which has made comparison with our findings difficult.

3.1. Comparison to Bertec and NeuroCom normative data

First, we compared normative data stratified per decade (range: 20-69 years) from Bertec and MotionVR. We pooled age-related normative data for the Bertec system from recently published papers (Eriksen & Hougaard, 2023; Trueblood et al., 2018). These data represented a sample consisting of 150 participants aged between 20 and 69 years old. This comparison was conducted only for the SOT data as we aimed to understand mechanical and visual differences. As a matter of fact, their technical specifications are quite similar since these systems integrate immersive virtual environment without reference points. For the Bertec device, a stationary spherical dome allows virtual visual perturbations. The projection of concentric ovals on the dome produces a full-field view. For the MotionVR, a virtual reality headset is used for visual surround. This novel CDP is associated with paired virtual scenes and quantifiable platform 360° movements. Such a pairing could offer a more ecologically sound assessment, especially in patients with perceptive-motor dysfunctions. Thus, we proposed to investigate the impact of this virtual-mechanical pairing during the SOT. Our findings indicate that the reference values on the MotionVR were not comparable to the Bertec for the SOT 5, SOT 6, composite score as well as the vestibular and visual ratios in all age groups. Significant differences were also observed for SOT 1 which could be due to varied adaptation mechanisms, between virtual reality headset and spherical dome, occurring at the beginning of testing. The differences found in conditions 5 (closed eyes with sway-referenced platform) and 6 (sway-referenced visual support and platform) can be clinically relevant. The sway-referenced platform in the MotionVR produces a more complex dynamic movement at 360° and with various levels of movement sensibility. In contrast, individuals assessed in the Bertec are only confronted with sagittal plane movements, which require less postural control and adaptation strategies. Moreover, the use of virtual reality headset in the MotionVR can provide a wide range of visual perturbations and could help differentiate between vestibular patients (Chiarovano et al., 2017; Keshner et al., 2007). Therefore, the MotionVR may be more sensitive in assessing postural strategies and motor responses as well as sensory reweighting during perturbed conditions. Second, we used published norms from the Neurocom Clinical Operations Guide (Rev. 8/June 2008/ CIS 100-03A D102285-00 Rev. C) to compare them with MotionVR and Bertec values. These systems differ from the traditional CDP system as an immersive virtual reality environment is used for self-motion illusion. Over more, MotionVR differs due to its dynamic movement at 360° and with various levels of movement sensibility. Thus, we sought to determine if MotionVR values were comparable to the Bertec and Neurocom normative data. The grouped values were separated to create a 20–59 years old and 60-69 years old age group for comparisons between the three CDPs for SOT scores. Our results showed that individuals were more instable on the MotionVR platform during SOT 5 and SOT 6 compared to Neurocom and Bertec. The composite score was lower for the MotionVR. We also observed higher vestibular and visual contributions on the Bertec and Neurocom system compared to the MotionVR system. This could be explained by the increase visual and proprioceptive perturbations in the MotionVR system, which can make postural control more difficult.

4. The present study has certain limitations. We were not able to recruit enough elderly subjects aged above 70 years. We had to pool both 70-79 and 80-89 age groups together to increase sample size, which represented a narrow spectrum (n = 13). The study

population was drawn mostly from a hospital setting and less active or rural individuals might be under-represented. The MotionVR normative data are representative for populations comparable to the French population since socio-demographic characteristics may vary and influence postural control. We had to exclude some participants from statistical analysis due to technical problems or side-effects during testing. Furthermore, certain age and gender-related groups are not complete and will continue until September 2024 to achieve study objectives (n = 240). **Conclusion**

The MotionVR platform is commercially available and utilized worldwide. This is the first attempt to report normative data for healthy French adults between 20-89 years old for the SOT, ADT and LOS protocols with the MotionVR CDP. Age and gender-related differences were observed mostly for the SOT and LOS. Lack of significant differences could be due to smaller platform movement sensibility for the ADT (25 % for ADT vs. 50 % for SOT). When compared to the Bertec and Neurocom systems, MotionVR seemed to be more sensitive in assessing postural strategies and motor responses as well as sensory reweighting during perturbed conditions. This study represents a crucial step in providing clinicians and researchers with representative values for comparison with patients.

Table 2. Comparison of MotionVR and Bertec values.

Characteristic	G20-29			G30-39			G40-49			G50-59			G60-69		
	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹
SOT 1			0.027			0.039			0.024			0.031			0.022
Mean (SD)	93.29 (1.15)	86.22 (5.90)		93.44 (0.09)	85.16 (8.10)		93.14 (1.22)	84.25 (6.79)		93.04 (0.09)	83.68 (5.95)		92.57 (0.33)	83.54 (6.11)	
SOT 2			0.025			0.052			0.069			0.037			0.035
Mean (SD)	92.99 (0.02)	86.96 (4.88)		92.92 (0.12)	88.19 (3.95)		92.55 (0.35)	86.33 (5.26)		91.00 (0.71)	82.51 (7.62)		91.75 (0.07)	83.54 (10.91)	
SOT 3			0.14			0.071			0.069			0.12			0.043
Mean (SD)	91.95 (0.35)	86.77 (5.77)		92.40 (0.42)	88.19 (4.35)		91.15 (1.48)	84.35 (7.92)		89.82 (1.11)	83.19 (6.80)		90.84 (0.76)	84.38 (6.07)	
SOT 4			0.019			0.054			0.024			0.021			0.022
Mean (SD)	77.12 (0.69)	33.18 (21.17)		76.17 (4.29)	40.52 (24.45)		75.09 (6.24)	32.33 (20.06)		72.09 (4.69)	22.84 (14.61)		72.20 (2.55)	23.26 (18.42)	
SOT 5			0.023			0.028			0.033			0.020			0.022
Mean (SD)	69.65 (1.20)	32.03 (20.00)		68.30 (1.70)	31.14 (21.49)		65.54 (3.77)	26.63 (20.79)		66.22 (3.23)	18.92 (19.00)		67.14 (2.64)	16.30 (13.97)	
SOT 6			0.021			0.031			0.025			0.015			0.018
Mean (SD)	69.10 (0.85)	25.97 (22.51)		64.54 (5.75)	24.54 (22.81)		60.64 (9.14)	20.23 (21.97)		64.40 (4.10)	8.10 (12.33)		60.67 (2.35)	9.58 (11.93)	
Composite Score			0.020			0.020			0.020			0.021			0.022
Mean (SD)	79.24 (0.08)	51.31 (12.45)		77.93 (2.65)	52.64 (11.72)		75.74 (4.47)	48.19 (11.85)		75.98 (3.01)	41.72 (9.83)		75.46 (0.48)	40.96 (9.63)	
PREF			0.011			0.25			0.47			0.23			0.31

	G20-29			G30-39			G40-49			G50-59			G60-69		
Characteristic	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹	Bertec	MotionVR	P-value ¹
Mean (SD)	101.86 (2.48)	97.74 (4.42)		100.35 (1.62)	98.06 (3.80)		98.82 (0.03)	96.95 (4.98)		99.57 (1.09)	93.72 (9.61)		97.98 (7.04)	92.11 (9.52)	
SOM			0.49			0.69			0.50			0.57			0.42
Mean (SD)	99.70 (1.27)	98.77 (1.80)		99.45 (0.07)	98.97 (1.65)		99.35 (1.06)	98.70 (2.34)		97.60 (0.28)	97.00 (4.91)		99.15 (0.49)	97.00 (8.50)	
VEST			0.020			0.024			0.028			0.021			0.028
Mean (SD)	74.90 (2.40)	38.69 (23.77)		72.80 (1.27)	40.81 (22.25)		70.45 (3.32)	36.70 (21.16)		71.10 (3.39)	31.44 (17.70)		72.40 (2.55)	29.30 (21.10)	
VIS			0.020			0.024			0.024			0.021			0.022
Mean (SD)	82.80 (0.14)	39.03 (21.54)		81.60 (4.53)	46.42 (21.18)		79.65 (5.44)	34.51 (23.79)		77.30 (4.95)	20.84 (19.71)		77.95 (2.47)	19.19 (17.16)	

¹Wilcoxon rank sum test

- Aharoni, M. M. H., Lubetzky, A. V., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). Factors associated with dynamic balance in people with Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD): a cross-sectional study using a virtual-reality Four Square Step Test. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00852-0>
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Albuquerque-Sendín, F., Fernández-de-las-Peñas, C., Santos-del-Rey, M., & Martín-Vallejo, F. J. (2009). Immediate effects of bilateral manipulation of talocrural joints on standing stability in healthy subjects. *Manual Therapy*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.11.005>
- Alonso, A. C., Luna, N. M. S., Mochizuki, L., Barbieri, F., Santos, S., & Greve, J. M. D. (2012). The influence of anthropometric factors on postural balance: the relationship between body composition and posturographic measurements in young adults. *Clinics*, 67(12), 1433–1441. [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(12\)14](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(12)14)
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Balduzzi, S., Rücker, G., Nikolakopoulou, A., Papakonstantinou, T., Salanti, G., Efthimiou, O., & Schwarzer, G. (2023). netmeta: An R Package for Network Meta-Analysis Using Frequentist Methods. *Journal of Statistical Software*, 106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i02>
- Baloh, R. W., Jacobson, K. M., Beykirch, K., & Honrubia, V. (1998). Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of Neurology*, 55(5), 649–654. <https://doi.org/10.1001/archneur.55.5.649>
- Barozzi, S., Socci, M., Soi, D., Di Berardino, F., Fabio, G., Forti, S., Gasbarre, A. M., Brambilla, D., & Cesarani, A. (2014). Reliability of postural control measures in children and young adolescents. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(7), 2069–2077. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9883-4>
- Ben Achour Lebib, S., Missaoui, B., Miri, I., Ben Salah, F. Z., & Dziri, C. (2006). Rôle du Neurocom Balance Master® dans l'évaluation des troubles de l'équilibre et du risque de chute chez le sujet âgé. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*, 49(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2006.03.005>
- Berg, K. O., Maki, B. E., Williams, J. I., Holliday, P. J., & Wood-Dauphinee, S. L. (1992). Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(11), 1073–1080.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1444775>

- Bizzo, G., Guillet, N., Patat, A., & Gagey, P. M. (1985). Specifications for building a vertical force platform designed for clinical stabilometry. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 23(5), 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02448937>
- Black, F. O., & Nashner, L. M. (1984). Postural Disturbance in Patients with Benign Paroxysmal Positional Nystagmus. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 93(6), 595–599. <https://doi.org/10.1177/000348948409300612>
- Black, F. O., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Abnormal postural control associated with peripheral vestibular disorders. *Progress in Brain Research*, 76(C), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64513-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64513-6)
- Black, F. O., Wall, C., & Nashner, L. M. (1983). Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 199–210. <https://doi.org/10.3109/00016488309130936>
- Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, 3(5), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1)
- Bloem, B. R., Visser, J. E., & Allum, J. H. J. (2003). Chapter 20 Posturography. In *Handbook of Clinical Neurophysiology* (Vol. 1, Issue C, pp. 295–336). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1567-4231\(09\)70168-6](https://doi.org/10.1016/S1567-4231(09)70168-6)
- Browne, J., & O'Hare, N. (2001). Review of the different methods for assessing standing balance. *Physiotherapy*, 87(9), 489–495. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60696-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60696-7)
- Caldwell, A. R. (2022). SimplyAgree: An R package and jamovi Module for Simplifying Agreement and Reliability Analyses. *Journal of Open Source Software*, 7(71). <https://doi.org/10.21105/joss.04148>
- Carrick, F. R., Oggero, E., & Pagnacco, G. (2007). Posturographic changes associated with music listening. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 13(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/acm.2007.7020>
- Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., Sparto, P. J., Perera, S., Redfern, M. S., Fall, P. A., & Furman, J. M. (2010). Longitudinal posturography and rotational testing in children three to nine years of age: Normative data. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 142(5), 708–714. <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2010.01.028>
- Chander, H., Arachchige, S. N. K. K., Hill, C. M., Turner, A. J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2019). Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behavioral Sciences*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210. <https://doi.org/10.1159/000255338>
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)

- Chiarovano, E., Wang, W., Rogers, S. J., MacDougall, H. G., Curthoys, I. S., & de Waele, C. (2017). Balance in virtual reality: Effect of age and bilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, 8(JAN).
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00005>
- Clark, R. A., Mentiplay, B. F., Pua, Y. H., & Bower, K. J. (2018). Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review. *Gait and Posture*, 61(December 2017), 40–54.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.022>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996a). Changes in sensory organization test scores with age. *Age and Ageing*, 25(1), 39–44.
<https://doi.org/10.1093/ageing/25.1.39>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996b). Changes in Sensory Organization Test Scores with Age. In *Age and Ageing* (Vol. 25).
<https://academic.oup.com/ageing/article/25/1/39/35818>
- de la Torre, J., Marin, J., Marin, J. J., Auria, J. M., & Sanchez-Valverde, M. B. (2017). Balance study in asymptomatic subjects: Determination of significant variables and reference patterns to improve clinical application. *Journal of Biomechanics*, 65, 161–168.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.013>
- di Fabio, R. P. (1995). Sensitivity and specificity of platform posturography for identifying patients with vestibular dysfunction. *Physical Therapy*, 75(4), 290–305.
<https://doi.org/10.1093/ptj/75.4.290>
- di Fabio, R. P. (1996). Meta-analysis of the sensitivity and specificity of platform posturography. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 122(2), 150–156.
<https://doi.org/10.1001/archotol.1996.01890140036008>
- Di Fabio, R. P., & Foudriat, B. A. (1996). Responsiveness and reliability of a pediatric strategy score for balance. *Physiotherapy Research International*, 1(3), 180–194.
<https://doi.org/10.1002/pri.57>
- Domènech-Vadillo, E., Aguilera-Aguilera, G., Sánchez-Blanco, C., Batuecas-Caletrio, Á., Guajardo, C., Pérez, N., Trinidad-Ruiz, G., Gimeno, C., Rama, J., Rossi-Izquierdo, M., San-Roman-Rodriguez, E., Patiño-Castiñeira, B., Espinosa-Sanchez, J. M., Matión, E., Barona, R., Krstulovic, C., Benitez-Rosario, J., Santandreu, E., Zuma e Maia, F. C., ... Rey-Martínez, J. (2019). Normative data for static balance testing in healthy individuals using open source computerized posturography. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5170-6>
- Eriksen, N. D., & Hougaard, D. D. (2023). Age- and gender-specific normative data on computerized dynamic posturography in a cohort of Danish adults. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(5), 2191–2200. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07706-y>
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras, R., & Soto-Varela, A. (2016). Postural changes associated with ageing on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Auris Nasus Larynx*, 43(2), 149–154.
<https://doi.org/10.1016/j.anl.2015.07.001>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A.

- (2012a). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012b). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Farenc, I., Rougier, P., & Berger, L. (2003). The influence of gender and body characteristics on upright stance. *Annals of Human Biology*, 30(3), 279–294. <https://doi.org/10.1080/0301446031000068842>
- Fujimoto, C., Murofushi, T., Chihara, Y., Ushio, M., Sugasawa, K., Yamaguchi, T., Yamasoba, T., & Iwasaki, S. (2009). Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: Analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1408–1414. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.002>
- García-Soidán, J. L., García-Liñeira, J., Leirós-Rodríguez, R., & Soto-Rodríguez, A. (2020). Physical Activity Practice and Optimal Development of Postural Control in School Children: Are They Related? *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2919. <https://doi.org/10.3390/jcm9092919>
- Gauchard, G. (2003). Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research*, 45(4), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(03\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(03)00008-7)
- Gibbons, C. T., Amazeen, P. G., & Likens, A. D. (2019). Effects of foot placement on postural sway in the anteroposterior and mediolateral directions. *Motor Control*, 23(2), 149–170. <https://doi.org/10.1123/mc.2017-0074>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018a). *Normative Data for the BTrackS Balance Test of Postural Sway: Results from 16,357 Community-Dwelling Individuals Who Were 5 to 100 Years Old* (Vol. 98). <https://academic.oup.com/ptj/article/98/9/779/4998861>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018b). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225–1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452>
- Goble, D. J., Brar, H., Brown, E. C., Marks, C. R., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the balance tracking system modified clinical test of sensory integration and balance protocol. *Medical Devices: Evidence and Research*, 12, 183–191. <https://doi.org/10.2147/MDER.S206530>
- Goble, D. J., Rauh, M. J., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the btracks balance test concussion-management tool: Results from 10045 athletes aged 8 to 21 years. *Journal of Athletic Training*, 54(4), 439–444. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-178-18>
- Hageman, P. A., Leibowitz, J. M., & Blanke, D. (1995). Age and gender effects on postural control measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(10), 961–965. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(95\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80075-1)
- Hamid, M. A., & Hughes, G. B. (1991). Specificity and Sensitivity of Dynamic Posturography A Retrospective Analysis. In *Acta Otolaryngol (Stockh)* (Vol. 481).

- Hamid, M. A., Hughes, G. B., & Kinney, S. E. (1991). Specificity and sensitivity of dynamic posturography: A retrospective analysis. *Acta Oto-Laryngologica*, 111(S481), 596–600. <https://doi.org/10.3109/00016489109131480>
- Harro, C. C., Marquis, A., Piper, N., Burdis, C., & Harro, C. C. (2016). Reliability and Validity of Force Platform Measures of Balance Impairment in Individuals With Parkinson's Disease. *Physical Therapy*, 96(12), 1955–1964. <https://doi.org/10.2522/ptj.20160099>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait & Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Henry, N. E., Weart, A. N., Miller, E. M., Feltner, L. D., & Goss, D. L. (2022). Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in United States Military Academy Boxers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(3), 366–377. <https://doi.org/10.26603/001c.32547>
- Herssens, N., Verbecque, E., McCrum, C., Meijer, K., van de Berg, R., Saeys, W., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Hallemans, A. (2020). A Systematic Review on Balance Performance in Patients With Bilateral Vestibulopathy. *Physical Therapy*, 100(9), 1582–1594. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa083>
- Higgins, J. P. T., Green, S., & Ben Van Den, A. (2020). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *International Coaching Psychology Review*, 15(2). <https://doi.org/10.53841/bpsicpr.2020.15.2.123>
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82(1), 167–177. <https://doi.org/10.1007/BF00230848>
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C. (2005a). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C. (2005b). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Jayakaran, P., Johnson, G. M., & Sullivan, S. J. (2011). Test-Retest Reliability of the Sensory Organization Test in Older Persons With a Transtibial Amputation. *PM and R*, 3(8). <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.01.005>
- Keshner, E. A., Streepey, J., Dhaher, Y., & Hain, T. (2007). Pairing virtual reality with dynamic posturography serves to differentiate between patients experiencing visual vertigo. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-24>
- Kollegger, H., Baumgartner, C., Wöber, C., Oder, W., & Deecke, L. (1992). Spontaneous Body Sway as a Function of Sex, Age, and Vision: Posturographic Study in 30 Healthy Adults. *European Neurology*, 32(5), 253–259. <https://doi.org/10.1159/000116836>
- Kollegger, H., Wöber, C., Baumgartner, C., & Deecke, L. (1989). Stabilizing and destabilizing effects of vision and foot position on body sway of healthy young subjects: A posturographic study. *European Neurology*, 29(5), 241–245. <https://doi.org/10.1159/000116420>

- Konukseven, O., Satıcı, S., Adalı, I., Yıldız, Y., Doğru, L., & Duruoğlu, S. (2022). Vestibulospinal system findings caused by ageing between 40 and 55 years. *Hearing, Balance and Communication*, 20(4), 257–262. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2087310>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwivat, N. (2016). Comparison of Balance Performance between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, 20(2), 72–78. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Lara, S., Graup, S., De Souza Balk, R., Teixeira, L. P., Farias, A. D., Alves, G. B., & Leiria, V. B. (2018). Association between postural balance and anthropometric indexes in elementary schoolchildren. *Revista Paulista de Pediatria*, 36(1), 59–65. <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00011>
- Leitner, C., Mair, P., Paul, B., Wick, F., Mittermaier, C., Sycha, T., & Ebenbichler, G. (2009). Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.09.007>
- Lelard, T., & Ahmaidi, S. (2015). Effects of physical training on age-related balance and postural control. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4–5), 357–369. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCLI.2015.09.008>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R Package Version 1.10.2.090002.
- Letz, R., Gerr, F., Deborah Harris-abbott, F., Dick, R., Gerr, F., Harris-abbott, D., & Dick, R. (1996). A Comparison of Standing Steadiness Measurements from Two Devices: Covariates and Normal Values. In *Neurotoxicology and Teratology* (Vol. 18, Issue 1).
- Lewkowicz, D. J., & Bremner, A. J. (2020). The development of multisensory processes for perceiving the environment and the self. In *Multisensory Perception* (Vol. 49, Issue 5, pp. 89–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00004-8>
- Liang, H. W., Chi, S. Y., Chen, B. Y., & Hwang, Y. H. (2021). Reliability and Validity of a Virtual Reality-Based System for Evaluating Postural Stability. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 85–91. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3034876>
- Libardoni, T. de C., Silveira, C. B. da, Sinhorim, L. M. B., Oliveira, A. S. de, Santos, M. J. dos, & Santos, G. M. (2018). Reference values and equations reference of balance for children of 8 to 12 years. *Gait and Posture*, 60, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.004>
- Liston, R. A. L., & Brouwer, B. J. (1996). Reliability and validity of measures obtained from stroke patients using the balance master. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(5), 425–430. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(96\)90028-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(96)90028-3)
- Macedo, C., Gazzola, J. M., Ricci, N. A., Doná, F., & Ganança, F. F. (2015). Influence of sensory information on static balance in older patients with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 81(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.11.004>

- Massingale, S. L., Alexander, A. D., Erickson, S. M., McQueary, E. S., Gerkin, R. D., Schodrof, S. B., Kisana, H. M., & Pardini, J. E. (2018). Assessing balance in an athletic population: Normative data for the concussion balance test (COBALT®). *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 23(3), 96–100. <https://doi.org/10.1123/ijatt.2017-0042>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877–887.
- Masui, T., Hasegawa, Y., Matsuyama, Y., Sakano, S., Kawasaki, M., & Suzuki, S. (2005). Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41(2), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.02.003>
- Matsuda, S., Demura, S., & Demura, T. (2010). Examining differences between center of pressure sway in one-legged and two-legged stances for soccer players and typical adults. *Perceptual and Motor Skills*, 110(3), 751–760. <https://doi.org/10.2466/pms.110.3.751-760>
- Micarelli, A., Viziano, A., Augimeri, I., Micarelli, B., & Alessandrini, M. (2020). Age-related Assessment of Postural Control Development: A Cross-sectional Study in Children and Adolescents. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 418–426. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>
- Mirka, Alar., & Black, F. O. (1990). Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 8, 351–359.
- Mnejja, K., Fendri, T., Chaari, F., Harrabi, M. A., & Sahli, S. (2022). Reference values of postural balance in preschoolers: Age and gender differences for 4–5 years old Tunisian children. *Gait and Posture*, 92, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.12.015>
- Monsell, E. M., Furman, J. M., Herdman, S. J., Konrad, H. R., & Shepard, N. T. (1997). Computerized dynamic platform posturography. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 117(4), 394–398. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(97\)70132-3](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(97)70132-3)
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes: A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. In *Biological Reviews* (Vol. 82, Issue 4, pp. 591–605). <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Nashner, L., Black, F. O., & Lilly, D. J. (1994). *Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology*.
- Nashner, L. M. (1982). Adaptation of human movement to altered environments. *Trends in Neurosciences*, 5(C), 358–361. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1)
- Nashner, L. M., Black, F. O., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *Journal of Neuroscience*, 2(5), 536–544. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.02-05-00536.1982>
- Nashner, L. M., & Peters, J. F. (1990). Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics*, 8(2), 331–349.

- Nishino, L. K., Rocha, G. D., de Souza, T. S. A., de Andrade Quintanilha Ribeiro, F., & Cóser, P. L. (2021). Protocol for static posturography with dynamic tests in individuals without vestibular complaints using the Horus system. *CODAS*, 33(3), 1–13. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20202019270>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Owen, N., Leadbetter, A. G., & Yardley, L. (1998). Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00101-4)
- Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/891390>
- Patti, A., Bianco, A., Şahin, N., Sekulic, D., Paoli, A., Iovane, A., Messina, G., Gagey, P. M., & Palma, A. (2018). Postural control and balance in a cohort of healthy people living in Europe An observational study. *Medicine (United States)*, 97(52). <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013835>
- Perucca, L., Robecchi Majnardi, A., Frau, S., & Scarano, S. (2021). Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.761262>
- Peterka, R. J. (2018). Sensory integration for human balance control. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 159). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990a). Age-related changes in human posture control: Motor coordination tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 87–96.
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990b). Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 73–85.
- Pletcher, E. R., Williams, V., Abt, J. P., Morgan, P. M., Parr, J. J., Wohleber, M. F., Lovalekar, M., & Sell, T. C. (2017). Normative data for the neurocom sensory organization test in us military special operations forces. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 129–136. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>
- Podsiadlo, J. D., Bscpt, S., & Richardson, M. D. J. (1991). The Timed “Up & Go”: A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. In *J Am Geriatr SOC* (Vol. 39).
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Quijoux, F., Nicolai, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code*. In *Physiological Reports* (Vol. 9, Issue 22). American Physiological Society. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>

- Quijoux, F., Vienne-Jumeau, A., Bertin-Hugault, F., Zawieja, P., Lefevre, M., Vidal, P.-P., & Ricard, D. (2020). *Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: a systematic review with meta-analysis*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156816372030252X>
- Roberts, H. J., Hoppes, C. W., Del Toro, Y. M., Lambert, K. H., & Springer, B. A. (2021). Normative values for the Sensory Organization Test in an active duty military cohort. *Gait and Posture*, 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.014>
- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010). The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions - A systematic review of the literature. In *Gait and Posture* (Vol. 32, Issue 4, pp. 436–445). <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>
- Sackley, C. M., & Lincoln, N. B. (1991). Weight distribution and postural sway in healthy adults. *Clinical Rehabilitation*, 5(3), 181–186. <https://doi.org/10.1177/026921559100500302>
- Scaglioni-Solano, P., & Aragón-Vargas, L. F. (2014). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board to assess standing balance and sensory integration in highly functional older adults. *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(2), 138–143. <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000046>
- Schmidt, J. D., Register-Mihalik, J. K., Mihalik, J. P., Kerr, Z. Y., & Guskiewicz, K. M. (2012). Identifying impairments after concussion: Normative data versus individualized baselines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1621–1628. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318258a9fb>
- Shams, A., Vameghi, R., Shamsipour Dehkordi, P., Allafan, N., & Bayati, M. (2020). The development of postural control among children: Repeatability and normative data for computerized dynamic posturography system. *Gait and Posture*, 78, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>
- Sibley, K. M., Beauchamp, M. K., Van Ooteghem, K., Straus, S. E., & Jaglal, S. B. (2015). Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(1), 122–132.e29. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.021>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Sjoberg, D., Whiting, K., Curry, M., Lavery, J., & Larmarange, J. (2021). Reproducible Summary Tables with the gtsummary Package. *The R Journal*, 13(1), 570. <https://doi.org/10.32614/RJ-2021-053>
- Stewart, M. G., Chen, A. Y., Wyatt, J. R., Favrot, S., Beinart, S., Coker, N. J., & Jenkins, H. A. (1999). Cost-effectiveness of the diagnostic evaluation of vertigo. *Laryngoscope*, 109(4), 600–605. <https://doi.org/10.1097/00005537-199904000-00015>
- Summers, S. J., Antcliff, S., Waddington, G., & Wallwork, S. (2022). Reliability and learning effects of repeated exposure to the Bertec Balance Advantage sensory organisation test

- in healthy individuals. *Gait and Posture*, 93, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.02.004>
- Tahmosybayat, R., Baker, K., Godfrey, A., Caplan, N., & Barry, G. (2018). Movements of older adults during exergaming interventions that are associated with the Systems Framework for Postural Control: A systematic review. In *Maturitas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.03.005>
- Thoumie, P. (2012). Intérêts et limites de la posturographie pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *Lettre de Medecine Physique et de Readaptation*, 28(3), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0300-9>
- Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 34(2), 119–126. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018a). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018b). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Verbecque, E., Costa, P. H. L. da, Meyns, P., Desloovere, K., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016). Age-related changes in postural sway in preschoolers. *Gait and Posture*, 44, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016a). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016b). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 36). <http://www.jstatsoft.org/>
- Visser, J. E., Carpenter, M. G., van der Kooij, H., & Bloem, B. R. (2008). The clinical utility of posturography. *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2424–2436. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.07.220>
- Vorhees, R. L. (1989). The role of dynamic posturography in neurologic diagnosis. *Laryngoscope*, 99, 995–1001.
- Wall, C., Black, F. O., & Wall, C. (1983). Postural stability and rotational tests: Their effectiveness for screening dizzy patients. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 235–246. <https://doi.org/10.3109/00016488309130940>
- Weismiller, S. A., Monaco, R., Womack, J., Alderman, B., Esopenko, C., Conway, F. N., Brostrand, K., Brown, A., de Souza, N. L., & Buckman, J. F. (2021). Individual baseline balance assessments in a large sample of incoming NCAA division I athletes using a force plate system. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.26603/001c.18713>

Whiting, P. F., Weswood, M. E., Rutjes, A. W. S., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. N. M., & Kleijnen, J. (2006). Evaluation of QUADAS, a tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. In *BMC Medical Research*

3. Etude 3 : Qualités métrologiques du système de mesure MotionVR.

[En préparation] Julienne A., Besnard S., 2024. Reliability and validity of a dynamic computerized posturography system using virtual reality: MotionVR®.

Dans cette troisième étude, nous avons réalisé une étude de la fiabilité test-retest et de la validité par groupes extrêmes de la plateforme de posturographie dynamique, intégrant la réalité virtuelle et un mouvement quantifiable à 360°. A partir des précédentes recommandations (étude 1), nous avons adopté une démarche protocolaire précise pour réduire l'hétérogénéité méthodologique et les biais qui ont été observées dans la première étude. Cette démarche permet donc de proposer une standardisation expérimentale à suivre par les utilisateurs scientifiques ou cliniques de la plateforme pour obtenir des résultats robustes. De plus, nous avons sélectionné des tests standardisés afin de proposer une première caractérisation des capacités posturales de sujets sains, en utilisant des tâches et paramètres classiques sur la plateforme MotionVR. Ces qualités métrologiques représentent l'épine dorsale qui garantit une évaluation fiable de différentes populations symptomatiques comparativement aux normes réalisées.

Afin d'établir la fiabilité test-retest, les données de 48 sujets sains¹⁸ ont été utilisées. La fiabilité test-retest est une mesure de la cohérence des résultats obtenus lorsqu'un même test est administré à plusieurs reprises, dans des conditions similaires, à un même groupe ou individu. Elle évalue la stabilité des réponses dans le temps. Parmi ces participants, 27 femmes (âge : $48,80 \pm 15,80$ ans ; poids : $69,64 \pm 16,91$ kg ; taille : $1,64 \pm 0,04$ m) et 21 hommes (âge : $44,25 \pm 22,38$ ans ; poids : $81,95 \pm 16,73$ kg ; taille : $1,79 \pm 0,06$ m) ont été évalués pour le test d'Organisation Sensorielle (SOT), le test d'Adaptation (ADT) et le test des Limites de Stabilité (LOS). Les sujets ont exécuté les trois tests au cours de deux sessions expérimentales à une semaine (7 ± 2 jours) d'intervalle. Nous avons observé une différence significative entre les femmes et les hommes pour la taille et le poids ($p < 0,05$).

Nous avons inclus les données de 24 sujets sains (âge : $52,48 \pm 14,08$ ans ; poids : $72,87 \pm 13,89$ kg ; taille : $1,69 \pm 0,10$ m) et de 24 patients vestibulaires chroniques¹⁹ (âge : $52,45 \pm 14,04$ ans ; poids : $73,16 \pm 24,09$ kg ; taille : $1,67 \pm 0,09$ m) afin d'établir la validité par groupes extrêmes. Le groupe de sujets sains était composé de 17 femmes (âge : $56,2 \pm 12,49$ ans ; poids : $70,08 \pm 14,2$ kg ; taille : $1,64 \pm 0,05$ m) et 7 hommes (âge : $43,44 \pm 14,48$ ans ; poids : $79,66 \pm 11,22$ kg ; taille : $1,8 \pm 0,07$ m). Le groupe de patients était composé de 17 femmes (âge : $56,15 \pm 12,43$ ans ; poids : $65,65 \pm 16,6$ kg ; taille : $1,63 \pm 0,06$ m) et 7 hommes (âge : $43,46 \pm 14,51$ ans ; poids : $91,4 \pm 30,67$ kg ; taille : $1,78 \pm 0,04$ m). La validité par groupes

¹⁸ Données issues de l'étude clinique VESTINORM (ID RCB : 2022-A00856-37)

¹⁹ Données issues de l'étude clinique SENSORIEL 2 (ID RCB : 2020-A02956-33)

extrêmes évalue si un test ou un équipement peut discriminer efficacement entre deux groupes aux caractéristiques opposées ou distinctes, généralement un groupe "pathologique" et un groupe "sain". Les patients ont été recrutés selon les critères d'inclusion suivants : 1) Patient homme ou femme (18-80 ans) et 2) présentant une pathologie vestibulaire chronique selon les critères diagnostic ORL. Les capacités posturales des participants ont été comparées pour les mêmes tests standardisés, le SOT, l'ADT et le LOS, pour évaluer la capacité à différencier significativement ces deux groupes cliniquement différents. Nous n'avons observé aucune différence significative entre les groupes pour les caractéristiques sociodémographiques (pour l'âge, la taille, le poids et l'indice de masse corporelle ; $p > 0,05$).

Tous les participants ont donné leur consentement éclairé pour participer à cette étude, dans le respect des recommandations de la déclaration d'Helsinki. La batterie de tests sur la plateforme de posturographie dynamique était composée de trois tests standardisés (SOT, ADT, LOS), couramment utilisés dans la recherche et dans la pratique clinique. Pour ces tâches, la démarche protocolaire consistait à se tenir debout le plus immobile possible, en gardant les bras le long du corps et les pieds avec un écartement au choix et les malléoles positionnés au niveau de la ligne horizontale sur la plateforme. Nous avons utilisé la nouvelle plateforme de posturographie MotionVR (Virtualis, Montpellier, France) qui intègre la réalité virtuelle et un mouvement quantifiable à 360°. Le mouvement asservi de la plateforme pour le SOT était quantifiable à 360°, avec un niveau de sensibilité (ou amplitude de mouvement modulable de 0 à 100 %) réglé à 50 %. Pour les rotations antéro-postérieures pendant l'ADT, un niveau de sensibilité de 25 % avait été sélectionné.

L'analyse statistique a été réalisée en deux étapes. Nous avons réalisé une analyse de coefficient de corrélation intra-classe à modèle mixte à deux facteurs de type cohérence absolue pour mesurer la fiabilité test-retest. Nous nous sommes appuyés sur l'interprétation des coefficients qui stipule qu'une valeur 1) $> 0,90$ indique une excellente fiabilité ; 2) entre 0,75 et 0,90 indique une bonne fiabilité ; 3) entre 0,50 - 0,75 indique une fiabilité modérée et 4) inférieur à 0,50 indique faible fiabilité (Koo & Li, 2016). De plus, une autre approche, celle de Bland & Altman, a été utilisée pour estimer la moyenne et l'écart-type des différences entre les sessions et les limites d'agrément (LOS ; Limits of Agreement en anglais). Nous avons déterminé le coefficient de variation (%) et l'erreur standard de la mesure. Nous avons réalisé une analyse non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney pour mesurer la validité par groupes extrêmes, après avoir vérifié la normalité des variables et l'homogénéité des variances.

Les résultats de la fiabilité test-retest montraient une fiabilité modérée pour les scores du SOT (ICC = 0,52 - 0,69) et une bonne fiabilité pour l'énergie d'oscillation moyenne de l'ADT (ICC = 0,76 - 0,79). Pour les scores composites du LOS, nous avons observé une fiabilité faible à modérée (ICC = 0,37 - 0,64 pour le DCL, ICC = 0,45 - 0,58 pour le EXE, ICC = 0,48 - 0,61

pour le MVL, ICC = 0,47 – 0,65 pour le MXE, ICC = 0,23 – 0,40 pour le RT). Pour les scores globaux du LOS, une fiabilité modérée a été démontrée (ICC = 0,55 – 0,72). Autrement dit, l'analyse de la fiabilité test-retest indiquait une fiabilité variable en fonction du test réalisé sur la plateforme et des paramètres de mesure. Une fiabilité modérée à bonne a été démontré pour les scores du SOT, de l'ADT et les scores globaux du LOS.

Les résultats de la validité par groupes extrêmes montraient des différences significatives pour les scores du SOT ($p < 0,05$) sauf pour la première condition (yeux ouverts avec plateforme stable ; $p = 0,93$). Pour les ratios sensoriels, nous avons observé aussi des différences significatives pour le somesthésique, le vestibulaire et le visuel ($p < 0,05$). La performance des patients n'était pas significativement différent par comparaison aux sujets sains pour l'énergie d'oscillation de l'ADT, à part pour le premier essai de la rotation antérieure ($p = 0,042$). Le groupe de patients présentaient significativement un score différent des sujets sains pour le temps de réaction à gauche ($p = 0,003$), la vélocité à l'avant droite ($p = 0,035$), à l'arrière ($p = 0,010$) et à l'arrière gauche ($p = 0,047$), la première limite à l'arrière droit ($p = 0,001$) et à l'arrière ($p = 0,041$), la limite maximale à l'arrière ($p = 0,041$), le contrôle directionnel à droite ($p = 0,021$), l'arrière droite ($p = 0,006$) et à l'arrière ($p < 0,001$). Une différence significative a été mesurée pour les scores composites du temps de réaction à gauche ($p = 0,002$), de première limite à l'arrière ($p = 0,009$), du contrôle directionnel à droite ($p = 0,005$) et à l'arrière ($p < 0,001$). Pour les scores globaux, nous avons observé que les patients avaient un score significativement différent uniquement pour le temps de réaction ($p = 0,008$) et le contrôle directionnel ($p = 0,009$).

Pour la première fois, nous avons démontré une fiabilité modérée à bonne et une validité discriminante confirmée pour le SOT, l'ADT et le LOS administrés sur une nouvelle plateforme de posturographie, intégrant la réalité virtuelle et un mouvement quantifiable à 360°.

Résultats complémentaires sur les niveaux de sensibilité.

Nous avons donc décidé de réaliser une analyse complémentaire sur 30 participants en comparant trois niveaux de sensibilité de la plateforme pour le SOT (faible : 30 %, modéré : 50 % et élevé : 80 %). Ce choix a été fait en diminuant de 20 % le niveau de sensibilité le plus élevé et la moitié de ce niveau, ce qui correspond à 80 % (100 % - 20 %) et 30 % (50 % - 20 %). Les participants ont réalisé trois fois le SOT, en suivant la séquence suivante pour réduire l'effet apprentissage : 50 %, 30 % et 80 %. Nous avons souhaité évaluer les effets de ces niveaux de sensibilité sur les scores individuels, le score composite, les rapports sensoriels et la vitesse angulaire du SOT.

Pour le faire, une analyse par modèles linéaires mixtes a été réalisé, suivi d'un post-hoc de Tukey. Les modèles ont été ajustés en fonction du groupe et du genre. La condition (ou les

ratios), l'amplitude (niveau de sensibilité) et leur interaction ont été considérées comme des effets fixes dans les modèles. Les participants ont été considérés comme des effets aléatoires.

Pour les scores du SOT, les résultats ont révélé une interaction entre la condition et l'amplitude ($\chi^2(12) = 337.071$, $p < 0.000$; Tableau 3) ainsi que des effets principaux de la condition ($\chi^2(6) = 917.782$, $p < 0.000$) et de l'amplitude ($\chi^2(2) = 223.630$, $p < 0.000$). Une analyse post-hoc de l'interaction a révélé une diminution significative des scores à 30 % vs. 50 % ($p < 0.000$) ainsi que 80 vs. 30 % ($p < 0.000$) aux conditions 4 à 6 et entre 80 vs. 50% ($p < 0.000$) aux conditions 4 et 5. Pour le score composite, une différence significative a été observée entre les amplitudes de 50 % vs. 30 % ($p < 0.000$) et 80 % vs. 30 % ($p < 0.000$). Les résultats sont présentés sur la figure 12 ci-dessous.

Tableau 3. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour le score du SOT.

Model	df	Log Likelihood	χ^2	Δ df	p-value
1. Full Model	28	-2,433.035			
2. Condition x Amplitude	16	-2,601.570	337.071	12	0.000
3. Condition ^a	10	-3,060.461	917.782	6	0.000
4. Amplitude ^a	14	-2,713.385	223.630	2	0.000

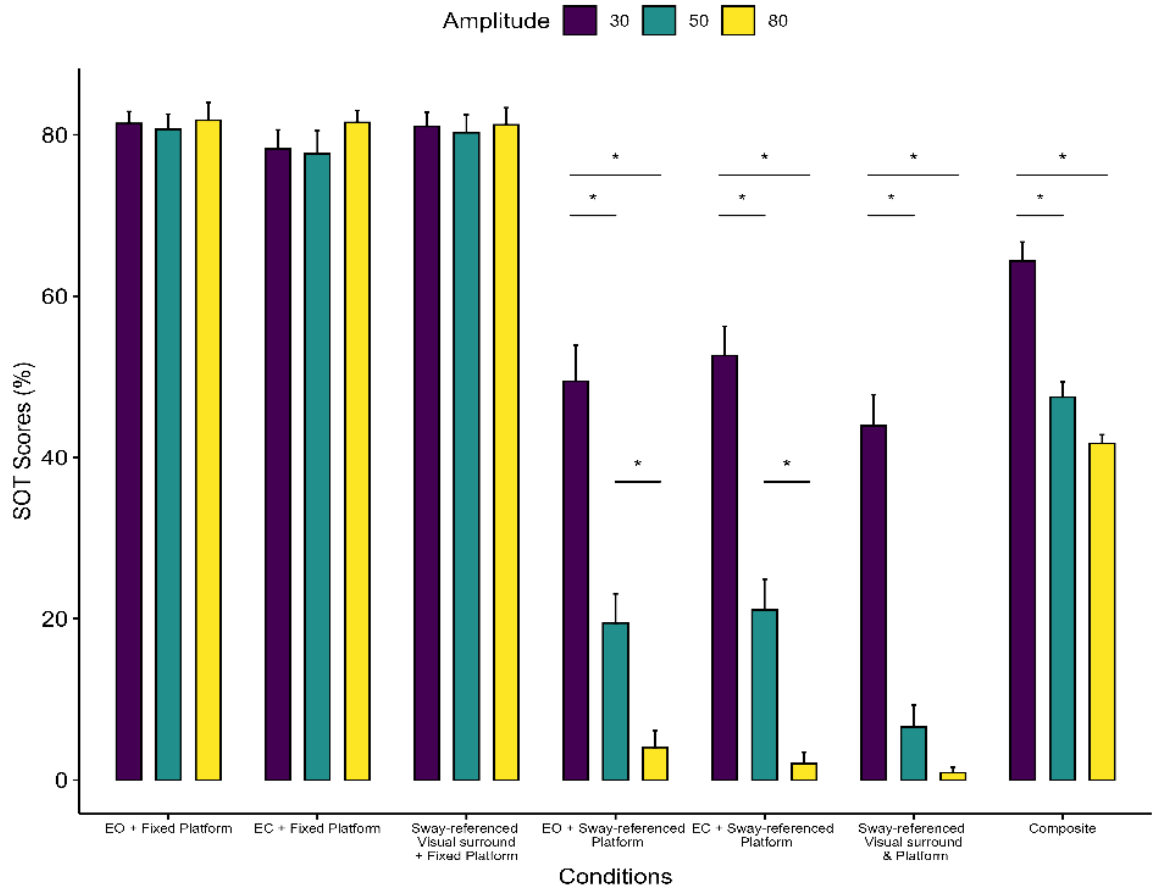


Figure 13. Les scores individuels et composites du SOT en fonction du niveau de sensibilité. Un astérix indique une différence significative ($p < 0.05$).

Pour les ratios, une interaction entre le ratio et l'amplitude a été démontrée ($\chi^2(6) = 143.446$, $p < 0.000$; Tableau 4) ainsi que des effets principaux du ratio ($\chi^2(3) = 403.303$, $p < 0.000$) et de l'amplitude ($\chi^2(2) = 86.960$, $p < 0.000$). Une analyse post-hoc de l'interaction a révélé une diminution significative du ratio à 50 % vs. 30 % ($p < 0.000$), 80 vs. 30 % ($p < 0.000$) ainsi que 80 vs. 50% ($p < 0.000$) pour les ratios vestibulaires et visuels. Les résultats sont présentés sur la figure 14 ci-dessous. **Tableau 4. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour le ratio du SOT.**

Model	df	Log Likelihood	χ^2	Δ df	p-value
1. Full Model	19	-1,542.092			
2. Ratio x Amplitude	13	-1,613.815	143.446	6	0.000
3. Ratio ^a	10	-1,815.466	403.303	3	0.000
4. Amplitude ^a	11	-1,657.295	86.960	2	0.000

^a χ^2 and p-values for Models 3 and 4 are based on the comparisons with Model 2. $p < .05$ in bold.

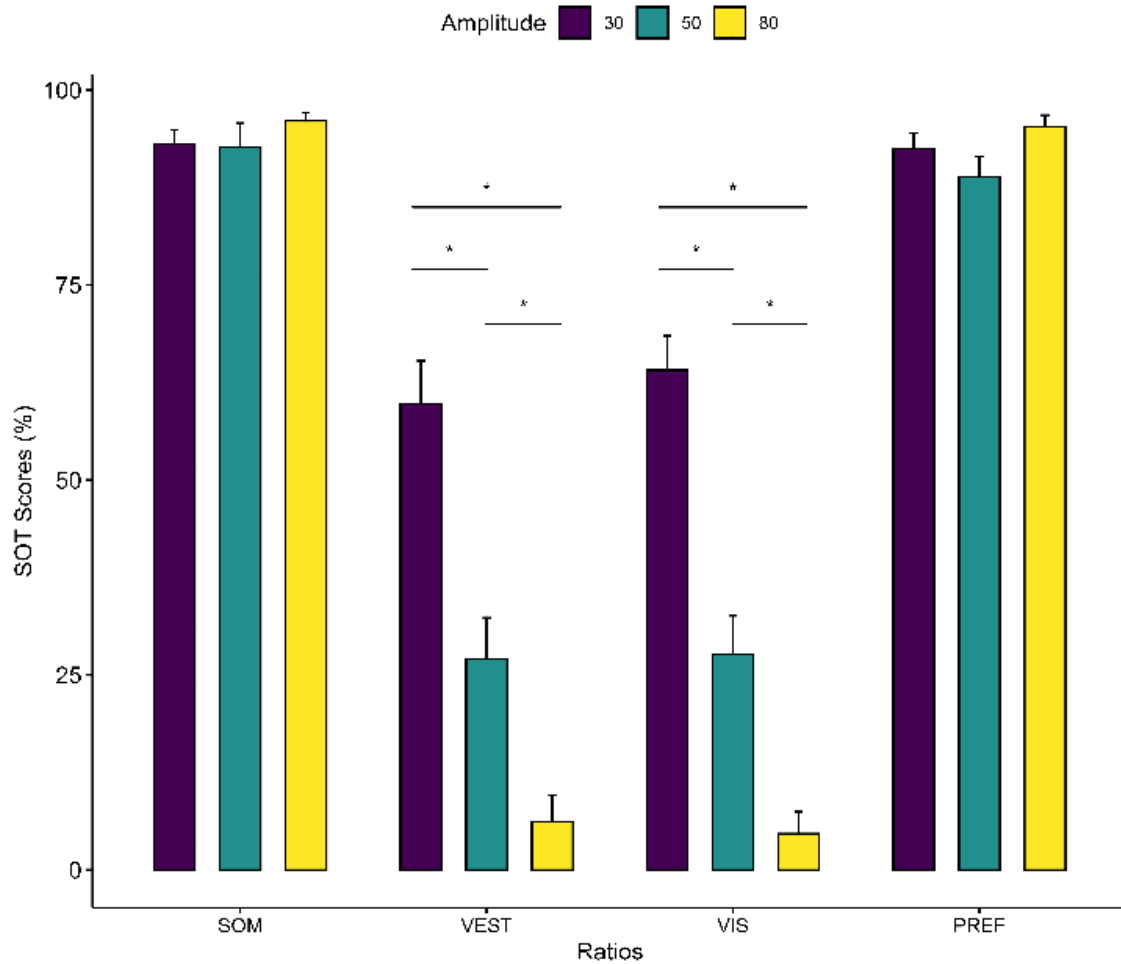


Figure 14. Les ratios sensoriels du SOT en fonction du niveau de sensibilité. Un astérix indique une différence significative ($p < 0.05$).

Pour les vitesses angulaires, un effet principal de la condition ($\chi^2(5) = 143.446$, $p < 0.000$; Tableau B) et l'amplitude ($\chi^2(2) = 11.807$, $p < 0.000$; Tableau 5) a été démontrée, avec une augmentation significative de la vitesse à 50 % vs. 30 % ($p = 0.004$) ainsi que à 80 % vs. 30 % ($p = 0.020$). Les résultats sont présentés sur la figure 15 ci-dessous.

Tableau 5. χ^2 comparant les différents modèles linéaires mixtes pour la vitesse angulaire du SOT.

Model	df	Log Likelihood	χ^2	Δ df	p-value
1. Full Model	25	-1,503.644			
2. Condition x Amplitude	15	-1,512.053	16.820	10	0.078
3. Condition ^a	10	-1,556.592	89.078	5	0.000
4. Amplitude ^a	13	-1,517.957	11.807	2	0.003

Model	df	Log Likelihood	χ^2	Δ df	p-value
-------	----	----------------	----------	-------------	---------

^a χ^2 and p-values for Models 3 and 4 are based on the comparisons with Model 2. $p < .05$ in bold.

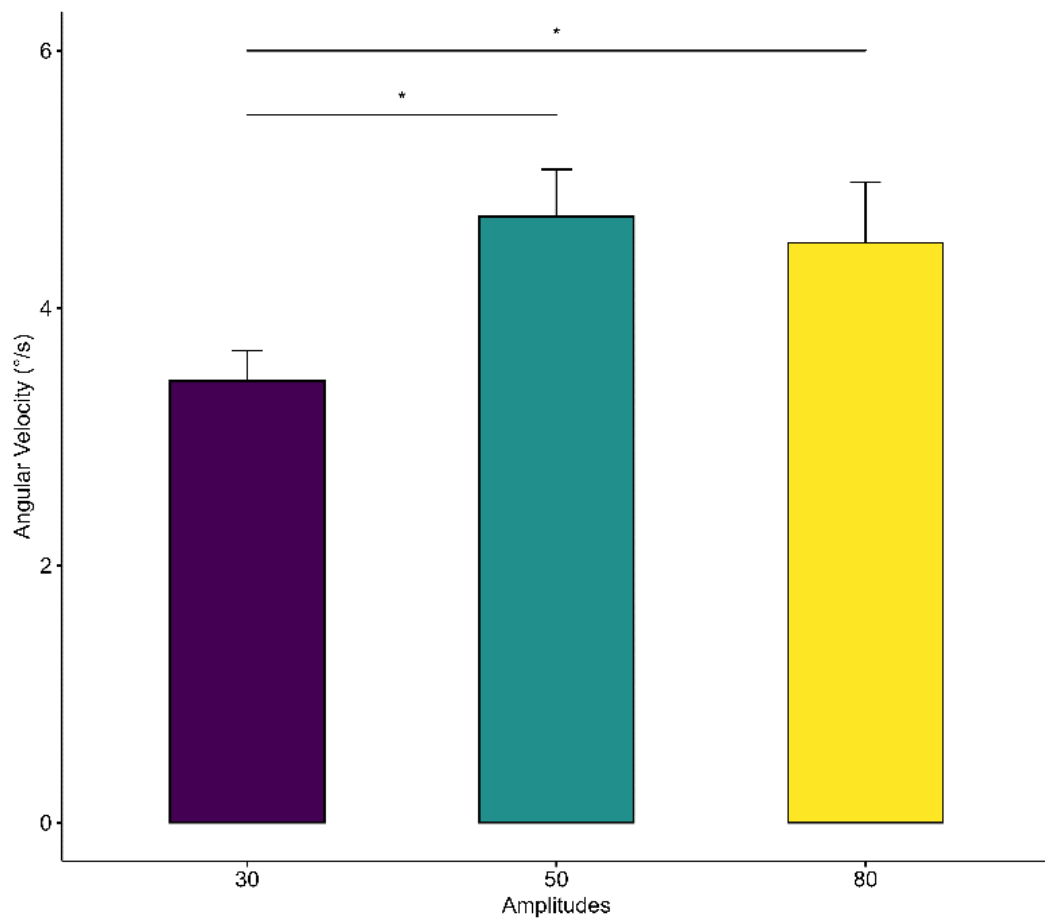


Figure 15. Les ratios sensoriels du SOT en fonction du niveau de sensibilité. Un astérix indique une différence significative ($p < 0.05$).

Cette analyse a permis de démontrer l'impact des niveaux de sensibilité sur la performance lors des conditions visuelles et proprioceptives complexes. Nous avons observé une augmentation de l'instabilité liée au niveau de sensibilité de la plateforme. En effet, plus le niveau était élevé plus les participants devenaient instables pendant le SOT. Les capacités à intégrer des informations vestibulaires et visuelles diminuaient également en fonction du niveau de sensibilité. Cet impact pourrait s'expliquer par un mouvement caractérisé par trois degrés de liberté (antéro-postérieur, médio-latérale et haut/bas) et quantifiable à 360°. Cette différence pourrait également être aussi expliquée par l'utilisation de la réalité virtuelle étant donné que le sentiment de présence en VR peut impacter la performance. La combinaison d'un environnement virtuel et d'un mouvement à 360°, pouvant être modulé à différents niveaux de sensibilité, peut impacter l'intégration multisensorielle et les capacités posturales

dans des situations contraignantes. Compte tenu des résultats, nous avons choisi de régler la plateforme à 50% de sensibilité pour le SOT et à 25% pour l'ADT pour les expériences suivantes. Ce paramètre de réglage serait important à prendre en compte pour évaluer certaines cohortes spécifiques (sportif, militaire) afin d'accroître la difficulté des conditions de mesure et mieux évaluer les performances de ces sujets entraînés et spécifiques et ainsi différents de la population générale.

Reliability and validity of a dynamic computerized posturography system using virtual reality: MotionVR®.

Angela Julienne¹, Stéphane Besnard^{1(*)}

¹ VERTEX Research Lab, Caen University, Caen, France

ABSTRACT

Computerized dynamic posturography has proven to be a clinically practicable tool for overall assessment of impaired sensorimotor performance in vestibular patients. However, its clinical utility relies on robust psychometric properties. However, no studies have investigated reliability and validity of the MotionVR system, which is a newly developed CDP device. This system integrates a VR headset to produce virtual visual perturbations and a controllable platform movement of 360° for proprioceptive perturbations. Due to the MotionVR's platform differing from the gold-standard NeuroCom and the Bertec CDP system, their psychometric properties may be incomparable. This study aimed at investigating (1) test-retest reliability posturographic measures in healthy subjects, (2) extreme groups validity of these measurements in chronic vestibular patients and healthy subjects.

A total of 48 healthy subjects were recruited for the test-retest reliability analysis. They repeated the measurements on a second day, one week later. For the extreme group validity, 24 chronic vestibular patients and 24 healthy subjects were included in the study. The participants completed (1) comprehensive clinical examination, (2) quantitative posturographic evaluation using the MotionVR system (Virtualis, Montpellier) that included the sensory organisation test (SOT), the adaptation test (ADT) and the limits of stability test (LOS).

Results revealed moderate to good reliability for the SOT, ADT, and global LOS scores. Varying test-retest reliability for the LOS composite scores was observed. Extreme groups validity was more pronounced for the SOT as all sensory perturbed conditions were able to distinguish between patients and healthy controls. Whereas the ADT did not prove to be sufficiently valid for clinical use. Only a few individual parameters of the LOS were able to distinguish between pathological and non-pathological subjects. As a matter of fact, most valid individual scores of the LOS consisted of voluntary movement in backwards direction.

This is the first study to investigate psychometric properties of the SOT, ADT and LOS by the MotionVR system. The tests were generally reliable and valid in healthy subjects and patients with chronic vestibulopathy. Future studies should establish normative data using the MotionVR system.

Keywords: test-retest reliability, extreme groups validity, computerized dynamic posturography, virtual reality

Funding statement: This study was funded as part of a CIFRE thesis under a public-private contract by the ANRT with Virtualis SAS, grant number 2019/1807.

Conflicts of interest: None.

1. Introduction

According to the World Health Organization, falls are the second leading cause of accidental deaths worldwide, with people aged over 60 years old recording the highest number of fatal falls. Gait, balance and functional training has been recommended as preventive interventions for the elderly to improve quality of life and support autonomy. Such training can be done using instrumented posturography on static and dynamic platforms, which provide quantitative evaluation of postural strategies and motor responses used during sensory conditions. One instrumented posturographic tool that is widely used is the computerized dynamic posturography (CDP) system which offers the possibility of modulating visual inputs and platform movements by varying amplitudes and gains of rotations and linear translations (Monsell et al., 1997). Thus, the CDP offers a more in-depth observation through different tests of sensory organization (SOT), motor coordination (MCT), adaptation (ADT) and stability limits (LOS) which provides various sensory perturbations. In neurotology, cost-effectiveness of balance assessment using CDP has been demonstrated (M. G. Stewart et al., 1999). Several studies have showed impaired postural control and movement coordination in vestibular patients (Black et al., 1983, 1988; Black & Nashner, 1984; Horak et al., 1990; L. Nashner et al., 1982, 1994; L. M. Nashner & Peters, 1990). Their results demonstrated that balance disorders were present in most patients with peripheral and central vestibulopathies, with abnormal balance during visual and proprioceptive perturbations. Such findings were interpreted as being indicative of alterations within the vestibular system, e.g. vestibulo-spinal reflex, affecting the automatic and central sensorimotor processing.

Thus, computerized dynamic posturography has proven to be a clinically practicable tool for overall assessment of impaired sensorimotor performance in vestibular patients. However, its clinical utility relies on robust psychometric properties. Investigations of the reliability of the CDP in vestibular patients are lacking. Only a few studies have established psychometric properties particularly in this population (di Fabio, 1995, 1996; Hamid et al., 1991). In addition, the ability of the CDP to measure differences in balance using paired virtual scenes and quantifiable platform movements is currently absent from the literature. Such a pairing could offer a more ecologically sound assessment, especially in patients with perceptive-motor dysfunctions. Technological advances have enabled the development of novel systems which integrate virtual reality, such as the Bertec Balance Advantage®. These systems differ from the traditional CDP system as an immersive virtual reality environment is used for self-motion illusion. For the Bertec device, a stationary spherical dome allows virtual visual perturbations. The projection of concentric ovals on the dome produces a full-field view without reference points. However, poor within- and between session reliability has been found and a learning effect has been observed for the SOT (Summers et al., 2022). Whereas, moderate to good reliability for some score of the SOT, ADT and MCT has been showed (Trueblood et al., 2018a). More recently, a newly developed CDP device, the MotionVR system, has become available. This system integrates a VR headset to produce virtual visual perturbations and a controllable platform movement of 360° for proprioceptive perturbations. Due to the MotionVR's platform differing from the gold-standard NeuroCom and the Bertec CDP system, their psychometric properties may be incomparable.

In the present paper, we propose to assess the psychometric properties of this device. Specifically, our aim was to determine its validity (i.e. degree to which it measures postural sway) and reliability (i.e. degree to which it consistently measures postural sway). In this context, the purpose of this study was twofold: 1) to ascertain test-retest reliability (reproducibility) when retested one week later in healthy individuals and 2) to determine extreme groups discriminant validity in three different test protocols (SOT, ADT, LOS) on the MotionVR system. We present the methods and results for test-retest reliability (part 1) and for the extreme groups validity for specific chronic vestibulopathy population (part 2).

2. Materials and methods

2.1. Participants

Part 1 – Test-retest reliability

A convenience sampling method was used to include 48 healthy participants for test-retest reliability. These participants aged 20 to 89 years old were recruited through online publicity and word of mouth as part of a study registered at Clinical Trials (clinicaltrials.gov) with identifier NCT05532176. A medical visit was performed to ensure that the following criteria were met: (1) no symptoms of dizziness, impaired balance, motion sickness/sensitivity, (2) no neurological or musculoskeletal impairment, (3) no medication intake likely to modify the balance, (4) no history of two or more falls in the last six months, concussion with symptoms within the past 10 years, (5) no psychiatry disorder, (6) normal vision with or without correction, (7) able to stand for more than 20 min and walk independently.

Part 2 – Extreme groups validity

To measure discriminant validity, 24 chronic vestibular patients was matched to healthy controls based on age and gender. These patients aged 20 to 89 years old had participated in the study registered at Clinical Trials (clinicaltrials.gov) with identifier NCT05525728. Patients were recruited from the ENT department and were consulted during a medical visit regarding their symptoms. Vestibulopathy diagnosis was established using the Barany Society criteria.

Participants were asked to provide written informed consent prior to both study subparts, in accordance with the Declaration of Helsinki. All participants were able to ask questions and were informed that withdrawal from the study, without requiring a specific reason, was possible. Personal information was pseudonymized.

2.2. Procedure

Three tests were conducted on the MotionVR CDP platform (Virtualis, Montpellier; <https://virtualisvr.com/>). HTC Vive VR head-mounted display was used during the Sensory Organization Test (SOT), the Adaptation Test (ADT), and the Limits of Stability (LOS). To reduce error, the same tester was used to conduct all three examinations. Sociodemographic, anthropometric, general health questionnaire data were recorded.

Participants stood on the platform with bare feet while the researcher aligned their medial malleolus into the standardized position, parallel to the horizontal line on the force platform. Detailed explanations of each test or trial were provided to each participant prior to beginning any test. Participants were asked to stand quietly, with their arms along their sides and to look straight ahead. The healthy participants performed the CDT tests during two sessions one week apart.

The SOT was the first test performed. It consists of 6 different sensory conditions averaged over three trials lasting 20 seconds each: 1) eyes open with stable platform, 2) eyes closed with stable platform, 3) sway-referenced visual surround, 4) eyes open with sway-referenced platform, 5) closed eyes with sway-referenced platform and 6) sway-referenced visual support and platform. Sway-referenced platform was quantifiable at 360° and set at 50 % of movement sensitivity. The SOT objectively identifies visual, vestibular, and proprioceptive sensory reweighting during movement in different conditions. Equilibrium scores (ES) for each condition, sensory ratios and a composite score are provided in percentages. Better postural performance was measured as a score of 100.

The Adaptation Test (ADT) consisted of five trials with two unexpected platform rotations (upwards or downwards). The ADT is used to analyse the adaptive capacity to reduce postural

oscillation and maintain balance when the platform undergoes irregular and unexpected rotations. Platform rotations were set at 25 % of movement sensitivity. Values are provided for each rotation trial (five toes up, five toes down) and measured as sway energy, a non-dimensional score. The sway energy measures the force produced to minimize the anterior-posterior oscillation and progressively recovers after the rotations. Abnormal responses can signal possible falls.

The Limits of Stability Test (LOS) is composed of eight trials during which an individual will voluntarily lean in eight directions from a midpoint as follows: forward, forward right, right, backward right, backward, backward left, left, forward left. Values are provided for target direction, each cardinal direction (forward, backward, right, and left), as well as a composite score. The LOS is used to assess voluntary motor control and determine the cone of stability. The theoretical stability limits in the antero-posterior axis correspond approximately to 12.5 degrees and 16 degrees in the mediolateral axis in healthy individuals. The parameters reported are Directional Control (DCL), Reaction Time (RT), End Point Excursion (EPE), Maximum Excursion (MXE) and Movement Velocity (MVL). DCL provides information about the quality of movement control used to move in the target direction. Normal performance (straight path) is represented by values approaching 100%. However, lower values can indicate a distorted path toward the target. RT reflects the onset of movement after start cue. Increased values indicate response delays due to aging or psycho-cognitive factors. EPE indicates the magnitude of movement on the first attempt. MXE indicates the farthest distance during the trial. Reduced excursion parameters reflect limited range of motion. MVL reflects the speed of the movement. Lower values indicate slowed movement due to neuromuscular impairments.

2.3. Instrumentation

The MotionVR dynamic platforms are composed of two independent platforms, with eight force sensors (four sensors per foot) integrated. Regarding the responsiveness of the platform, the dynamic platform is characterized by three degrees of freedom (anteroposterior, mediolateral, and top/bottom), 2G acceleration, and a speed of 280 mm/s, as well as amplitudes of 24 ° front/back, 26° left/right, and a height of 15 cm (top/bottom). Movements are controlled and quantifiable at 360° (adjustable height of the moving plate). Platform movement sensitivity can also be set at various percentages ranging from 0 (less movement) to 100 % (more movement). The dynamic platform guardrail is also adjustable, providing the ability to work with people of various sizes. The computerized dynamic posturography device is depicted in Figure 1.



Figure 1. Illustration of the MotionVR

3. Statistical Analysis

Data were extracted from the MotionVR system and analysed using R software (version R.4.4.1). For sociodemographic characteristics, descriptive statistics are presented as

marginal means, standard deviation (SD) and range unless stated otherwise. Statistical analysis was carried out in two parts using SimplyAgree package (Caldwell, 2022) and gtsummary (Sjoberg et al., 2021) packages.

Part 1. We performed absolute agreement two-way random effect model intraclass correlation (ICC 2,1) to assess between-session reliability for all outcomes of the SOT, the ADT, and the LOS. A correlation coefficient > 0.90 is considered excellent; good between 0.75 - 0.90; moderate between 0.50 - 0.75 and poor when below 0.50 (Koo & Li, 2016). In addition, we used Bland & Altman approach according to which the mean and standard deviation of the differences between sessions and the Limits of Agreement (95 % LOS) must be estimated. Standard error of measurement (SEM) and coefficient of variation (CV) were also calculated.

Part 2. We carried out a non-parametric Wilcoxon test to measure the validity by extreme groups, after having verified the normality of the variables and the homogeneity of the variances.

4. Results

4.1. Part 1 – Test-retest reliability

For the first part, 27 females (age: 48.80 ± 15.80 years; weight: 69.64 ± 16.91 kg; height: 1.64 ± 0.04 m) and 21 males (age: 44.25 ± 22.38 years old; weight: 81.95 ± 16.73 kg; height: 1.79 ± 0.06 m) completed the SOT, ADT and LOS on the MotionVR system. Subjects performed the three tests during two experimental sessions one week (7 ± 2 days) apart. We observed a significant difference between females and males for height and weight ($p < 0.05$). Sociodemographic characteristics are presented in Table 1.

Table 2. Sociodemographic characteristics for test-rest reliability.

	Females (N=27)	Males (N=21)	Total (N=48)	p value
Age				0.41
Mean (SD)	48.80 (15.80)	44.25 (22.38)	46.81 (18.88)	
Range	20.39 - 69.29	21.23 - 124.32	20.39 - 124.32	
Height (m)				< 0.01
Mean (SD)	1.64 (0.04)	1.79 (0.06)	1.70 (0.09)	
Range	1.53 - 1.71	1.67 - 1.87	1.53 - 1.87	
Weight (kg)				0.02
Mean (SD)	69.64 (16.91)	81.95 (16.73)	75.03 (17.76)	
Range	52.60 - 131.90	54.00 - 131.00	52.60 - 131.90	
BMI				0.87
Mean (SD)	25.79 (5.58)	25.55 (4.25)	25.68 (4.99)	
Range	19.56 - 45.11	19.13 - 37.46	19.13 - 45.11	

The respective ICCs revealed varying test-retest reliability for the SOT individual conditions (ICC SOT 1 = 0.65, 95% CI [0.49, 0.77]; SOT 2 = 0.60, 95% CI [0.43, 0.74]; SOT 3 = 0.52, 95% CI [0.33, 0.68]; SOT 4 = 0.52, 95% CI [0.33, 0.68]; SOT 5 = 0.52, 95% CI [0.32, 0.68]; SOT 6 = 0.57, 95% CI [0.38, 0.71]). ICC for the SOT were 0.69 (95% CI [0.54, 0.80]) for the composite score. For the ADT, ICCs were 0.79 for the toes up condition (95% CI [0.68, 0.87]) and 0.76 (95% CI [0.64-0.85]) for the toes-down condition. The respective ICCs of the global LOS scores were 0.65 (95% CI [0.49-0.77]) for DCL, 0.72 (95% CI [0.58-0.82]) for EXE, 0.62 (95% CI [0.45-0.76]) for MVL, 0.70 (95% CI [0.55-0.80]) for MXE, 0.55 (95% CI [0.36-

0.69]) for RT. Individual ICCs for the LOS varied between 0,37 – 0,64 for DCL, 0,45 – 0,58 for EXE, 0,48 – 0,61 for MVL, 0,47 – 0,65 for MXE and 0,23 – 0,40 for RT. The standard error of measurement, coefficient of variation and limits of agreement are presented in table 2.

Table 2. Between-session ICC values.

Characteristic	ICC	95 % CI	SEM	CV (%)	95 % LOA
SOT Scores					
SOT 1	0.65	0.49-0.77	3.7	4.39	-9.76-10.75
SOT 2	0.60	0.43 -0.74	5.28	6.19	-15.43-13.86
SOT 3	0.52	0.33-0.68	5.29	6.24	-14.30-15.01
SOT 4	0.52	0.33-0.68	15.3	53	-38.71-45.86
SOT 5	0.52	0.32-0.68	13.7	59.3	-38.11-38.01
SOT 6	0.57	0.38-0.71	13.1	79	-34.46-38.36
Composite Score	0.69	0.54-0.80	6.98	15.3	-18.66-20.03
ADT Composite					
Toes-up	0.79	0.68-0.87	14.1	22.7	-32.11-46.12
Toes-down	0.76	0.64-0.85	14.9	23.6	-34.92-47.67
LOS Composite					
DCL					
Backward	0.48	0.27- 0.64	17.1	26.9	-42.88-51.76
Forward	0.61	0.43- 0.74	6.58	8.11	-21.45-15.03
Left	0.64	0.48-0.76	5.75	7.27	-15.30-16.55
Right	0.37	0.15-0.56	6.7	8.48	-18.91-18.24
EXE					
Backward	0.45	0.24-0.62	13.1	25.6	-34.71-37.96
Forward	0.56	0.38-0.71	12.4	20.6	-37.43-31.38
Left	0.58	0.40-0.72	10.8	16.3	-30.03-29.99
Right	0.49	0.28-0.65	12	19.7	-32.76-33.97
MVL					
Backward	0.54	0.35-0.69	0.49	21.8	-1.52-1.21
Forward	0.53	0.33-0.68	0.721	23	-2.38-1.60
Left	0.48	0.28-0.65	0.914	26.8	-2.93-2.13
Right	0.61	0.44-0.74	0.629	21.3	-1.91-1.57
MXE					
Backward	0.49	0.29-0.65	14.8	19.8	-34.19-47.98
Forward	0.47	0.25-0.63	13.6	16.4	-37.53-37.82
Left	0.65	0.49-0.77	7.64	8.94	-21.81-20.52
Right	0.58	0.39-0.71	8.58	10.1	-20.93-26.60
RT					
Backward	0.23	0-0.45	0.36	47.8	-1.05-0.93
Forward	0.36	0.14-0.55	0.26	34.5	-0.58-0.88
Left	0.27	0.03-0.48	0.23	34.5	-0.67-0.61
Right	0.4	0.19-0.58	0.26	35.1	-0.64-0.77
LOS Global					
DCL	0.65	0.49-0.77	6.61	8.74	-17.74-18.91
EXE	0.72	0.58-0.82	7.57	12.7	-21.05-20.92
MVL	0.62	0.45-0.76	0.54	18.4	-1.77-1.22
MXE	0.7	0.55-0.80	7.28	8.87	-17.86-22.48
RT	0.55	0.36-0.69	0.17	23.3	-0.43-0.50

ICC = Intraclass correlation; CI = Confidence interval; SEM = Standard error of measurement; CV = Coefficient of variation; LOA = Limits of agreement

4.2. Part 2 – Extreme groups validity

For the second part, we used data from 24 healthy subjects (age: 52.48 ± 14.08 years; weight: 72.87 ± 13.89 kg; height: 1.69 ± 0.10 m) and 24 chronic vestibular patients (age: 52.45 ± 14.04 years; weight: 73.16 ± 24.09 kg; height: 1.67 ± 0.09 m) to establish validity by extreme groups. The group of healthy subjects consisted of 17 women (age: 56.2 ± 12.49 years; weight: 70.08 ± 14.2 kg; height: 1.64 ± 0.05 m) and 7 men (age: 43.44 ± 14.48 years; weight: 79.66 ± 11.22 kg; height: 1.8 ± 0.07 m). The group of patients consisted of 17 women (age: 56.15 ± 12.43 years; weight: 65.65 ± 16.6 kg; height: 1.63 ± 0.06 m) and 7 men (age: 43.46 ± 14.51 years old; weight: 91.4 ± 30.67 kg; height: 1.78 ± 0.04 m). Participants' performances were compared on the same standardized tests, the SOT, ADT and LOS, to assess the ability to significantly differentiate these two clinically different groups. We observed no significant differences between groups for sociodemographic characteristics (for age, height, weight and body mass index; $p > 0.05$). Sociodemographic characteristics are presented in Table 3.

Table 3. Sociodemographic characteristics for extreme groups validity.

	Healthy (N=24)	Patients (N=24)	Total (N=48)	p value
Gender	7 (29.17%)	7 (29.17%)	14 (29.17%)	1.00
Age				0.99
Mean (SD)	52.48 (14.08)	52.45 (14.04)	52.47 (13.91)	
Range	26.00 - 76.00	26.45 - 75.94	26.00 - 76.00	
Height (m)				0.65
Mean (SD)	1.69 (0.10)	1.67 (0.09)	1.68 (0.09)	
Range	1.53 - 1.92	1.50 - 1.83	1.50 - 1.92	
Weight (kg)				0.96
Mean (SD)	72.87 (13.89)	73.16 (24.09)	73.01 (19.45)	
Range	55.00 - 115.00	44.00 - 157.00	44.00 - 157.00	
BMI				0.83
Mean (SD)	25.64 (4.37)	26.04 (7.87)	25.84 (6.30)	
Range	20.70 - 40.75	17.21 - 48.46	17.21 - 48.46	

The extreme groups validity results revealed significant differences for the SOT individual (SOT 1, $p = 0.93$; SOT 2, $p < 0.001$; SOT3, $p = 0.002$; SOT 4, $p < 0.001$; SOT 5, $p = 0.002$, SOT 6, $p = 0.003$) and composite scores ($p < 0.001$) except for the first condition (eyes open with stable platform; $p = 0.93$). For the sensory ratios, we also observed significant differences between patients and healthy controls for the somaesthetic, vestibular and visual ratios (SOM, $p = 0.004$; VEST, $p < 0.001$; VIS, $p = 0.008$) except for the visual dependence ratio (PREF, $p = 0.38$). The results for the SOT are presented in table 4.

Table 4. Results of the SOT for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
SOT 1		80, 86		70, 86	0.93
Median (IQR)	82.83 (78.83 - 87.50)		84.00 (76.25 - 88.25)		
Mean (SD)	82.93 (6.19)		78.07 (18.20)		
SOT 2		83, 87		59, 77	<0.001
Median (IQR)	85.83 (81.67 - 89.00)		73.00 (62.50 - 84.00)		
Mean (SD)	84.68 (4.85)		68.40 (21.32)		
SOT 3		83, 87		55, 78	0.002
Median (IQR)	85.67 (78.33 - 89.50)		77.00 (47.75 - 83.50)		
Mean (SD)	85.04 (5.64)		66.40 (26.52)		
SOT 4		22, 38		1.6, 21	<0.001
Median (IQR)	28.00 (16.92 - 47.00)		0.00 (0.00 - 9.00)		
Mean (SD)	29.86 (19.11)		11.33 (23.13)		
SOT 5		13, 28		1.1, 13	0.002
Median (IQR)	19.50 (4.25 - 31.67)		0.00 (0.00 - 2.50)		
Mean (SD)	20.38 (17.83)		7.08 (14.12)		
SOT 6		6.9, 20		-0.48, 8.6	0.003
Median (IQR)	3.50 (0.00 - 23.50)		0.00 (0.00 - 0.00)		
Mean (SD)	13.67 (16.06)		4.08 (10.81)		
Composite Score		40, 50		22, 33	<0.001
Median (IQR)	43.00 (35.75 - 57.25)		28.00 (18.75 - 33.25)		
Mean (SD)	45.46 (11.89)		27.46 (12.91)		
PREF		90, 97		82, 96	0.38
Median (IQR)	96.50 (86.50 - 100.00)		95.00 (78.75 - 100.00)		
Mean (SD)	93.08 (8.39)		88.83 (16.01)		
SOM		97, 99		82, 95	0.004
Median (IQR)	100.00 (96.75 - 100.00)		94.00 (78.75 - 100.00)		
Mean (SD)	98.29 (2.63)		88.33 (15.83)		
VEST		29, 47		1.5, 13	<0.001
Median (IQR)	36.00 (21.50 - 55.00)		0.00 (0.00 - 10.50)		
Mean (SD)	37.58 (21.24)		7.04 (13.03)		
VIS		16, 37		3.3, 16	0.008
Median (IQR)	24.50 (3.50 - 42.75)		1.00 (0.00 - 16.25)		
Mean (SD)	26.46 (24.28)		9.83 (15.54)		

¹CI = Confidence Interval

²Wilcoxon rank sum test

The performance of patients was not significantly different compared to healthy subjects for ADT oscillation energy, except for the first trial of anterior rotation ($p = 0.042$; Table 5).

Table 5. Results of the ADT for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
ADT Up 1		61, 86		52, 77	0.19
Median (IQR)	64.00 (57.00 - 76.50)		60.50 (43.00 - 78.00)		
Mean (SD)	73.42 (30.36)		64.58 (30.53)		
ADT Up 2		56, 78		53, 73	0.63
Median (IQR)	61.00 (53.00 - 72.75)		61.50 (46.75 - 74.00)		
Mean (SD)	67.21 (25.50)		63.25 (23.10)		
ADT Up 3		54, 74		52, 69	0.60
Median (IQR)	57.00 (50.00 - 72.00)		58.00 (44.75 - 69.25)		
Mean (SD)	63.79 (23.60)		60.33 (19.88)		
ADT Up 4		51, 70		51, 67	0.78
Median (IQR)	54.50 (48.75 - 67.50)		57.00 (43.00 - 67.00)		
Mean (SD)	60.83 (22.85)		58.75 (19.20)		
ADT Up 5		49, 67		49, 65	>0.99
Median (IQR)	50.50 (46.75 - 64.00)		57.00 (42.25 - 66.75)		
Mean (SD)	57.79 (21.81)		57.08 (18.29)		
ADT Down 1		63, 86		51, 72	0.042
Median (IQR)	66.00 (58.25 - 76.50)		58.50 (43.75 - 69.00)		
Mean (SD)	74.50 (26.10)		61.38 (24.07)		
ADT Down 2		57, 78		53, 73	0.50
Median (IQR)	60.50 (55.50 - 70.75)		57.50 (45.00 - 71.25)		
Mean (SD)	67.50 (25.62)		63.17 (23.50)		
ADT Down 3		53, 74		53, 71	0.82
Median (IQR)	56.00 (50.00 - 67.75)		58.00 (44.75 - 70.00)		
Mean (SD)	63.71 (24.39)		61.67 (21.27)		
ADT Down 4		51, 71		53, 70	0.75
Median (IQR)	53.50 (47.75 - 67.25)		57.00 (45.00 - 71.25)		
Mean (SD)	60.71 (23.66)		61.38 (20.51)		
ADT Down 5		49, 68		52, 82	0.50
Median (IQR)	51.50 (47.00 - 65.00)		56.50 (45.75 - 75.00)		
Mean (SD)	58.67 (21.99)		66.92 (35.11)		
ADT Toes Up composite		54, 75		52, 70	0.61
Median (IQR)	56.60 (51.00 - 71.05)		58.40 (43.70 - 71.25)		
Mean (SD)	64.61 (24.60)		60.80 (21.44)		
ADT Toes Down composite		55, 75		54, 72	0.78

Table 5. Results of the ADT for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Median (IQR)	58.30 (52.30 - 69.50)		58.20 (44.95 - 74.60)		
Mean (SD)	65.02 (23.03)		62.90 (22.01)		

¹CI = Confidence Interval²Wilcoxon rank sum test

The group of patients presented a significantly different score from healthy subjects for reaction time on the left ($p = 0.003$; Table 6), velocity at the front right ($p = 0.035$), backwards ($p = 0.010$) and backwards left ($p = 0.047$), the end-point excursion for backwards right ($p = 0.001$) and backwards ($p = 0.041$), the maximum excursion for backwards ($p = 0.041$), directional control to the right ($p = 0.021$), backwards right ($p = 0.006$) and backwards ($p < 0.001$). A significant difference was measured for the composite scores of left reaction time ($p = 0.002$; Table 7), backwards endpoint excursion ($p = 0.009$), right directional control ($p = 0.005$) and backwards ($p < 0.001$). For global scores, we observed that patients scored significantly different only for reaction time ($p = 0.008$; Table 7) and directional control ($p = 0.009$).

Table 6. Results of the LOS for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
RT - Forward		0.59, 1.4		0.89, 1.5	0.14
Median (IQR)	0.76 (0.34 - 1.61)		1.23 (0.47 - 1.79)		
Mean (SD)	0.98 (0.91)		1.20 (0.73)		
RT - Forward Right		0.65, 1.1		0.79, 1.6	0.34
Median (IQR)	0.83 (0.49 - 1.20)		1.07 (0.49 - 1.52)		
Mean (SD)	0.89 (0.55)		1.19 (0.93)		
RT - Right		0.60, 0.96		0.64, 1.2	0.73
Median (IQR)	0.78 (0.45 - 0.93)		0.69 (0.52 - 1.25)		
Mean (SD)	0.78 (0.43)		0.93 (0.71)		
RT - Backward Right		0.52, 0.91		0.58, 1.0	0.28
Median (IQR)	0.60 (0.51 - 0.72)		0.89 (0.33 - 1.30)		
Mean (SD)	0.71 (0.46)		0.81 (0.54)		
RT - Backward		0.47, 0.83		0.51, 1.3	0.48
Median (IQR)	0.58 (0.37 - 0.89)		0.67 (0.29 - 1.05)		
Mean (SD)	0.65 (0.42)		0.89 (0.90)		
RT - Backward Left		0.58, 0.94		0.66, 1.5	0.54
Median (IQR)	0.77 (0.42 - 1.09)		0.78 (0.40 - 1.74)		
Mean (SD)	0.76 (0.43)		1.08 (0.99)		
RT - Left		0.42, 0.63		0.72, 1.3	0.003
Median (IQR)	0.44 (0.32 - 0.73)		0.82 (0.55 - 1.26)		
Mean (SD)	0.53 (0.26)		0.99 (0.65)		
RT - Forward Left		0.52, 0.88		0.61, 1.1	0.55

Table 6. Results of the LOS for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Median (IQR)	0.56 (0.43 - 0.96)		0.78 (0.43 - 1.17)		
Mean (SD)	0.70 (0.42)		0.84 (0.54)		
MVL - Forward		1.8, 2.5		1.8, 3.1	0.66
Median (IQR)	2.12 (1.66 - 2.65)		2.38 (1.43 - 2.91)		
Mean (SD)	2.15 (0.89)		2.45 (1.56)		
MVL - Forward Right		2.7, 4.2		1.9, 2.9	0.035
Median (IQR)	3.02 (2.58 - 4.12)		2.38 (1.44 - 3.27)		
Mean (SD)	3.45 (1.70)		2.37 (1.16)		
MVL - Right		2.5, 3.7		2.0, 3.0	0.13
Median (IQR)	2.76 (2.05 - 4.26)		2.28 (1.58 - 3.39)		
Mean (SD)	3.13 (1.41)		2.49 (1.16)		
MVL - Backward Right		1.8, 2.5		1.3, 2.3	0.20
Median (IQR)	1.98 (1.42 - 2.72)		1.52 (1.07 - 2.86)		
Mean (SD)	2.13 (0.83)		1.82 (1.24)		
MVL - Backward		1.8, 2.6		1.2, 1.9	0.010
Median (IQR)	1.86 (1.54 - 2.45)		1.46 (1.17 - 1.76)		
Mean (SD)	2.16 (0.92)		1.54 (0.91)		
MVL - Backward Left		1.9, 3.0		2.4, 3.6	0.047
Median (IQR)	2.19 (1.48 - 2.84)		2.73 (2.26 - 3.43)		
Mean (SD)	2.45 (1.31)		3.00 (1.50)		
MVL - Left		2.7, 4.1		2.5, 3.9	0.97
Median (IQR)	3.34 (2.48 - 3.91)		3.44 (1.98 - 4.21)		
Mean (SD)	3.43 (1.66)		3.22 (1.67)		
MVL - Forward Left		2.8, 4.5		2.2, 3.5	0.17
Median (IQR)	3.35 (2.22 - 4.44)		2.70 (1.95 - 3.63)		
Mean (SD)	3.66 (1.97)		2.87 (1.57)		
EXE - Forward		33, 49		35, 56	0.64
Median (IQR)	37.50 (28.75 - 52.25)		50.00 (26.75 - 59.75)		
Mean (SD)	41.00 (18.58)		45.67 (24.64)		
EXE - Forward Right		49, 73		39, 65	0.32
Median (IQR)	57.50 (45.25 - 84.00)		57.00 (19.75 - 75.75)		
Mean (SD)	60.79 (27.97)		51.83 (31.05)		
EXE - Right		47, 68		47, 72	0.80
Median (IQR)	57.00 (38.75 - 77.00)		64.00 (40.25 - 81.00)		
Mean (SD)	57.42 (25.76)		59.38 (30.09)		
EXE - Backward Right		45, 67		22, 40	0.001
Median (IQR)	55.00 (37.00 - 76.00)		26.00 (17.75 - 39.75)		

Table 6. Results of the LOS for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Mean (SD)	56.00 (24.94)		30.71 (21.56)		
EXE - Backward		35, 53		24, 38	0.041
Median (IQR)	45.00 (25.50 - 60.25)		32.00 (18.75 - 44.00)		
Mean (SD)	44.04 (21.78)		30.79 (16.31)		
EXE - Backward Left		48, 67		42, 64	0.41
Median (IQR)	59.50 (50.00 - 70.25)		54.00 (39.75 - 71.00)		
Mean (SD)	57.67 (22.95)		52.79 (25.53)		
EXE - Left		58, 79		47, 68	0.15
Median (IQR)	69.50 (54.75 - 83.00)		58.50 (43.50 - 74.50)		
Mean (SD)	68.58 (25.06)		57.54 (25.43)		
EXE - Forward Left		54, 77		50, 80	0.80
Median (IQR)	67.50 (46.00 - 90.00)		66.50 (38.75 - 86.25)		
Mean (SD)	65.75 (26.79)		64.79 (35.24)		
MXE - Forward		50, 84		60, 81	0.30
Median (IQR)	66.00 (49.50 - 77.25)		68.50 (56.75 - 87.25)		
Mean (SD)	66.83 (40.88)		70.79 (24.81)		
MXE - Forward Right		81, 97		73, 95	0.50
Median (IQR)	96.00 (81.75 - 101.25)		88.50 (70.75 - 103.25)		
Mean (SD)	89.38 (19.13)		83.88 (25.96)		
MXE - Right		76, 93		72, 93	0.98
Median (IQR)	93.00 (80.25 - 97.50)		92.50 (69.75 - 98.00)		
Mean (SD)	84.33 (19.41)		82.71 (25.53)		
MXE - Backward Right		68, 88		51, 79	0.10
Median (IQR)	82.50 (73.00 - 96.00)		71.50 (53.50 - 86.50)		
Mean (SD)	77.92 (23.06)		65.17 (32.40)		
MXE - Backward		61, 79		45, 76	0.041
Median (IQR)	74.00 (66.25 - 81.75)		54.00 (43.25 - 63.50)		
Mean (SD)	70.04 (20.58)		60.58 (37.69)		
MXE - Backward Left		70, 88		64, 89	0.93

Table 6. Results of the LOS for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Median (IQR)	80.00 (66.50 - 96.50)		87.00 (58.25 - 97.25)		
Mean (SD)	79.13 (21.75)		76.33 (29.71)		
MXE - Left		76, 92		72, 93	0.86
Median (IQR)	86.50 (75.00 - 94.50)		88.50 (73.25 - 98.75)		
Mean (SD)	84.00 (18.17)		82.42 (24.74)		
MXE - Forward Left		75, 94		80, 104	0.39
Median (IQR)	88.50 (60.75 - 100.25)		92.50 (81.75 - 105.25)		
Mean (SD)	84.21 (22.95)		91.54 (28.36)		
DCL - Forward		73, 90		69, 88	0.76
Median (IQR)	87.50 (78.75 - 90.25)		86.00 (78.75 - 91.00)		
Mean (SD)	81.21 (19.69)		78.54 (21.89)		
DCL - Forward Right		70, 81		62, 82	0.97
Median (IQR)	78.50 (71.00 - 85.25)		79.50 (71.50 - 84.25)		
Mean (SD)	75.38 (13.82)		72.17 (23.56)		
DCL - Right		83, 87		65, 85	0.021
Median (IQR)	86.50 (83.00 - 88.25)		83.00 (77.75 - 85.50)		
Mean (SD)	85.00 (5.77)		75.13 (24.00)		
DCL - Backward Right		60, 77		31, 57	0.006
Median (IQR)	72.00 (60.75 - 79.00)		55.00 (10.00 - 70.75)		
Mean (SD)	68.63 (19.63)		44.29 (30.84)		
DCL - Backward		58, 80		26, 52	<0.001
Median (IQR)	79.00 (53.50 - 86.50)		47.50 (0.00 - 62.25)		
Mean (SD)	68.75 (26.63)		39.04 (31.52)		
DCL - Backward Left		53, 72		34, 59	0.054
Median (IQR)	69.50 (57.25 - 77.00)		53.50 (24.50 - 72.25)		
Mean (SD)	62.67 (22.99)		46.08 (29.76)		
DCL - Left		73, 89		71, 88	0.73
Median (IQR)	87.00 (82.75 - 90.00)		87.00 (81.50 - 89.25)		

Table 6. Results of the LOS for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Mean (SD)	81.46 (18.92)		79.92 (19.94)		
DCL - Forward Left		72, 84		72, 88	0.23
Median (IQR)	84.00 (75.75 - 86.25)		85.50 (78.75 - 88.25)		
Mean (SD)	78.04 (14.53)		79.83 (18.70)		
¹ CI = Confidence Interval					
² Wilcoxon rank sum test					

Table 7. Results of the LOS composite and global scores for extreme groups validity.

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
RT - Composite Forward		0.67, 1.1		0.89, 1.3	0.081
Median (IQR)	0.78 (0.55 - 1.21)		1.13 (0.81 - 1.37)		
Mean (SD)	0.89 (0.51)		1.10 (0.51)		
RT - Composite Right		0.68, 0.91		0.75, 1.2	0.23
Median (IQR)	0.79 (0.56 - 0.97)		0.86 (0.69 - 1.21)		
Mean (SD)	0.79 (0.27)		0.97 (0.51)		
RT - Composite Backward		0.60, 0.79		0.67, 1.2	0.087
Median (IQR)	0.70 (0.53 - 0.86)		0.89 (0.60 - 1.07)		
Mean (SD)	0.69 (0.23)		0.92 (0.59)		
RT - Composite Left		0.55, 0.71		0.76, 1.2	0.002
Median (IQR)	0.64 (0.52 - 0.74)		0.90 (0.64 - 1.13)		
Mean (SD)	0.63 (0.18)		0.98 (0.52)		
MVL - Composite Forward		2.5, 3.5		2.1, 3.0	0.24
Median (IQR)	2.88 (2.29 - 3.41)		2.47 (1.95 - 3.23)		
Mean (SD)	3.03 (1.21)		2.56 (1.11)		
MVL - Composite Right		2.4, 3.4		1.9, 2.6	0.085
Median (IQR)	2.77 (2.08 - 3.68)		2.30 (1.70 - 3.11)		
Mean (SD)	2.92 (1.17)		2.24 (0.92)		
MVL - Composite Backward		1.9, 2.6		1.7, 2.5	0.89
Median (IQR)	2.00 (1.61 - 2.80)		1.89 (1.63 - 2.55)		
Mean (SD)	2.24 (0.91)		2.09 (0.88)		
MVL - Composite Left		2.6, 3.8		2.5, 3.6	0.94
Median (IQR)	3.04 (2.34 - 3.70)		3.04 (2.21 - 3.80)		

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Mean (SD)	3.19 (1.36)		3.04 (1.34)		
EXE - Composite Forward		47, 64		43, 64	0.87
Median (IQR)	56.00 (42.75 - 69.00)		56.00 (38.75 - 64.75)		
Mean (SD)	55.04 (20.18)		53.58 (24.43)		
EXE - Composite Right		51, 65		39, 57	0.11
Median (IQR)	59.50 (49.25 - 69.50)		52.00 (29.00 - 64.00)		
Mean (SD)	57.96 (17.53)		47.92 (22.24)		
EXE - Composite Backward		44, 60		31, 44	0.009
Median (IQR)	54.50 (43.00 - 61.75)		39.00 (33.25 - 47.50)		
Mean (SD)	52.08 (19.16)		37.75 (15.65)		
EXE - Composite Left		56, 73		49, 68	0.29
Median (IQR)	67.00 (55.75 - 79.25)		58.50 (47.50 - 70.00)		
Mean (SD)	64.38 (19.41)		58.42 (22.16)		
MXE - Composite Forward		69, 90		71, 92	0.42
Median (IQR)	82.00 (66.75 - 92.50)		88.50 (72.50 - 94.50)		
Mean (SD)	79.58 (24.07)		81.50 (24.33)		
MXE - Composite Right		76, 92		67, 88	0.38
Median (IQR)	89.50 (78.00 - 97.00)		87.00 (70.00 - 93.00)		
Mean (SD)	84.00 (18.40)		77.67 (24.98)		
MXE - Composite Backward		67, 84		55, 79	0.23
Median (IQR)	76.50 (68.25 - 91.00)		70.00 (55.75 - 82.75)		
Mean (SD)	75.29 (19.90)		67.00 (28.53)		
MXE - Composite Left		75, 90		72, 94	0.43
Median (IQR)	88.50 (70.00 - 94.00)		90.00 (69.50 - 101.25)		
Mean (SD)	82.63 (17.02)		83.25 (25.93)		
DCL - Composite Forward		73, 85		69, 86	0.72
Median (IQR)	81.50 (75.00 - 87.25)		82.50 (80.25 - 87.00)		
Mean (SD)	78.96 (13.40)		77.33 (20.23)		
DCL - Composite Right		75, 82		58, 75	0.005
Median (IQR)	79.00 (76.75 - 83.00)		72.00 (60.75 - 78.00)		
Mean (SD)	78.46 (7.30)		66.63 (20.21)		
DCL - Composite Backward		59, 76		31, 53	<0.001

Characteristic	Healthy, N = 24	95% CI ¹	Patients, N = 24	95% CI ¹	p-value ²
Median (IQR)	73.00 (61.00 - 80.25)		44.00 (21.00 - 65.00)		
Mean (SD)	67.25 (20.40)		42.21 (26.01)		
DCL - Composite Left		70, 82		63, 80	0.54
Median (IQR)	80.50 (75.00 - 82.25)		77.00 (67.00 - 83.50)		
Mean (SD)	75.92 (13.27)		71.46 (19.07)		
RT Composite - Global		0.67, 0.83		0.80, 1.2	0.008
Median (IQR)	0.77 (0.64 - 0.86)		0.93 (0.81 - 1.15)		
Mean (SD)	0.75 (0.19)		0.99 (0.44)		
MVL Composite - Global		2.4, 3.3		2.1, 2.9	0.44
Median (IQR)	2.71 (2.09 - 3.14)		2.63 (1.82 - 3.03)		
Mean (SD)	2.85 (1.05)		2.48 (0.96)		
EXE Composite - Global		51, 64		42, 57	0.13
Median (IQR)	61.00 (46.75 - 73.00)		51.50 (39.25 - 62.25)		
Mean (SD)	57.33 (16.10)		49.42 (18.06)		
MXE Composite - Global		73, 88		67, 88	>0.99
Median (IQR)	85.00 (69.50 - 92.00)		86.50 (68.00 - 91.25)		
Mean (SD)	80.46 (16.78)		77.38 (24.37)		
DCL Composite - Global		71, 79		57, 72	0.009
Median (IQR)	78.50 (70.50 - 82.00)		67.00 (59.25 - 78.25)		
Mean (SD)	75.17 (10.03)		64.38 (18.55)		
¹ CI = Confidence Interval					
² Wilcoxon rank sum test					

5. Discussion

This study investigated – for the first time – test-retest reliability and extreme groups validity of posturographic measures in healthy subjects and chronic vestibular patients using three widely used tests on the MotionVR system. This device is a newly developed dynamic computerized posturography system using virtual reality and quantifiable platform movement. As such there are three main findings to report.

First, test-retest reliability varied according to the tests carried out on the platform and the parameters. Moderate reliability was demonstrated for SOT scores (ICC = 0.52 - 0.69) and good reliability for ADT mean oscillation energy (ICC = 0.76 – 0.79). For the LOS composite scores, we observed low to moderate reliability (ICC = 0.37 – 0.64 for the DCL, ICC = 0.45 – 0.58 for the EXE, ICC = 0.48 – 0.61 for MVL, ICC = 0.47 – 0.65 for MXE, ICC = 0.23 – 0.40 for RT). For the global LOS scores, moderate reliability was demonstrated (ICC = 0.55 – 0.72). Overall, moderate to good reliability was demonstrated for the SOT, ADT, and global LOS scores. Varying test-retest reliability for the LOS composite scores was observed. However,

none of the tests showed excellent reliability. This is the first study to investigate psychometric properties of the SOT, ADT and LOS by the MotionVR system. Other studies using the Bertec system have previously demonstrated poor to good reliability for some scores of these tests in healthy individuals (Summers et al., 2022; Trueblood et al., 2018a) and in patients (Jayakaran et al., 2011; Leitner et al., 2009). However, test-retest reliability was conducted on sample sizes ($n < 30$) in these studies, reducing statistical power and limiting interpretation. The present study provides a first robust between-session reliability analysis in a larger sample ($n = 48$) using a new computerized posturography system, MotionVR. This equipment differs from previous CDP systems as it uses immersive visual environments and quantifiable 360° movement at various sensitivity levels (from 0 to 100%). This pairing may provide a more challenging visual et proprioceptive setting that can be incomparable to other CDP devices.

Diagnostic relevance of the MotionVR needs to be established in patient populations presenting impaired sensorimotor functioning. As such, its ability to distinguish chronic vestibular patients from healthy individuals was investigated to prove clinical usefulness of this CDP. Second, extreme groups validity was more pronounced for the SOT as all sensory perturbed conditions were able to distinguish between patients and healthy controls. Whereas the ADT did not prove to be sufficiently valid for clinical use. The increased movement sensitivity in the SOT could be a possible explanation; patients swayed more with higher platform movement (50 % in the SOT vs. 25% in the ADT). Only a few individual parameters of the LOS were able to distinguish between pathological and non-pathological subjects. As a matter of fact, most valid individual scores of the LOS consisted of voluntary movement in backwards direction. Patients had distorted path in backwards and backwards right directions, reduced range of motion in backwards and backwards right directions and slowed movement in backwards left and backwards directions. Furthermore, global directional control and reaction time proved to be valid parameters. In general, patients had less directional control and took more time to execute volitional sway. Valid composite scores were also few. Most commonly valid scores of the LOS were directional control and reaction time which could be predictive of impaired voluntary centre of pressure displacements in chronic vestibular patients. Other studies using different CDP systems have previously investigated validity in patients with various conditions (Hamid & Hughes, 1991; Harro et al., 2016; Leitner et al., 2009; Liston & Brouwer, 1996). However, no clear consensus was established, and none investigated extreme groups validity on the MotionVR system.

6. Conclusion

This is the first study to investigate psychometric properties of the SOT, ADT and LOS by the MotionVR system. The tests were generally reliable and valid in healthy subjects and patients with chronic vestibulopathy. In particular, the SOT and the ADT demonstrated moderate to good test-retest reliability. However, only the SOT showed robust validity in distinguishing chronic vestibular patients from healthy subjects. Varying platform sensitivity could be an explanation for this observation. Thus, further investigations are needed on the effects of platform sensitivity for optimal evaluation of patient populations. Furthermore, it is unknown whether the balance performance is comparable to other CDP devices as this tool used platform and virtual pairing. Future studies should establish normative data using the MotionVR system.

- Adamec, I., Juren Meaški, S., Krbot Skorić, M., Jažić, K., Crnošija, L., Milivojević, I., & Habek, M. (2020). Persistent postural-perceptual dizziness: Clinical and neurophysiological study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 72, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.01.043>
- Agrawal, Y., Pineault, K. G., & Semenov, Y. R. (2018). Health-related quality of life and economic burden of vestibular loss in older adults. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 3(1), 8–15. <https://doi.org/10.1002/lio2.129>
- Agrawal, Y., Zuniga, M. G., Davalos-Bichara, M., Schubert, M. C., Walston, J. D., Hughes, J., & Carey, J. P. (2012). Decline in semicircular canal and otolith function with age. *Otology and Neurotology*, 33(5). <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3182545061>
- Aharoni, M. M. H., Lubetzky, A. V., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). Factors associated with dynamic balance in people with Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD): a cross-sectional study using a virtual-reality Four Square Step Test. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00852-0>
- Ak, A. K., Çelebisoy, N., Özdemir, H. N., & Gökçay, F. (2022). Vestibular migraine and persistent postural perceptual dizziness: Handicap, emotional comorbidities, quality of life and personality traits. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 221, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2022.107409>
- Akis, E., Gurses, E., & Aksoy, S. (2023). Vestibulo-spinal reflex tests to determine unilateral vestibular loss. *Hearing, Balance and Communication*, 21(1), 61–66. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2125243>
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Albuquerque-Sendín, F., Fernández-de-las-Peñas, C., Santos-del-Rey, M., & Martín-Vallejo, F. J. (2009). Immediate effects of bilateral manipulation of talocrural joints on standing stability in healthy subjects. *Manual Therapy*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.11.005>
- Alghwiri, A. A., Whitney, S. L., Baker, C. E., Sparto, P. J., Marchetti, G. F., Rogers, J. C., & Furman, J. M. (2012). The development and validation of the vestibular activities and participation measure. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(10). <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.017>
- Alonso, A. C., Luna, N. M. S., Mochizuki, L., Barbieri, F., Santos, S., & Greve, J. M. D. (2012). The influence of anthropometric factors on postural balance: the relationship between body composition and posturographic measurements in young adults. *Clinics*, 67(12), 1433–1441. [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(12\)14](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(12)14)
- Alvarez-Otero, R., & Perez-Fernandez, N. (2017). The limits of stability in patients with unilateral vestibulopathy. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(10). <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1339326>
- Amblard, B., & Cremieux, J. (1976). [Role of visual information concerning movement in the maintenance of postural equilibrium in man]. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie*

- Appliquees Aux Effets de l'agression*, 17(C Spec No).
- Angelaki, D. E. (2004). Eyes on target: What neurons must do for the vestibuloocular reflex during linear motion. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 92, Issue 1, pp. 20–35). <https://doi.org/10.1152/jn.00047.2004>
- Angelaki, D. E., & Cullen, K. E. (2008). Vestibular System: The Many Facets of a Multimodal Sense. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 125–150. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125555>
- Angelaki, D. E., Green, A. M., & Dickman, J. D. (2001). *Differential Sensorimotor Processing of Vestibulo-Ocular Signals during Rotation and Translation*.
- Anson, E. R., Ehrenburg, M. R., Wei, E. X., Bakar, D., Simonsick, E., & Agrawal, Y. (2019). Saccular function is associated with both angular and distance errors on the triangle completion test. *Clinical Neurophysiology*, 130(11), 2137–2143. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.08.027>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993a). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993b). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Assländer, L., & Streuber, S. (2020). Virtual reality as a tool for balance research: Eyes open body sway is reproduced in photo-realistic, but not in abstract virtual scenes. *PLoS ONE*, 15(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241479>
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Curtin, A., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2011). Using MazeSuite and functional near infrared spectroscopy to study learning in spatial navigation. *Journal of Visualized Experiments*, 56. <https://doi.org/10.3791/3443>
- Baek, J. H., Zheng, Y., Darlington, C. L., & Smith, P. F. (2010). Evidence that spatial memory deficits following bilateral vestibular deafferentation in rats are probably permanent. *Neurobiology of Learning and Memory*, 94(3), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.08.007>
- Balduzzi, S., Rücker, G., Nikolakopoulou, A., Papakonstantinou, T., Salanti, G., Efthimiou, O., & Schwarzer, G. (2023). netmeta: An R Package for Network Meta-Analysis Using Frequentist Methods. *Journal of Statistical Software*, 106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i02>
- Baloh, R. W., Enrietto, J., Jacobson, K. M., & Lin, A. (2001). Age-related changes in vestibular function a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 210–219. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03747.x>
- Baloh, R. W., Jacobson, K. M., Beykirch, K., & Honrubia, V. (1998). Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of Neurology*, 55(5), 649–654. <https://doi.org/10.1001/archneur.55.5.649>
- Baloh, R. W., Ying, S. H., & Jacobson, K. M. (2003). A longitudinal study of gait and balance dysfunction in normal older people. *Archives of Neurology*, 60(6).

- <https://doi.org/10.1001/archneur.60.6.835>
- Barozzi, S., Socci, M., Soi, D., Di Berardino, F., Fabio, G., Forti, S., Gasbarre, A. M., Brambilla, D., & Cesarani, A. (2014). Reliability of postural control measures in children and young adolescents. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(7), 2069–2077. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9883-4>
- Ben Achour Lebib, S., Missaoui, B., Miri, I., Ben Salah, F. Z., & Dziri, C. (2006). Rôle du Neurocom Balance Master® dans l'évaluation des troubles de l'équilibre et du risque de chute chez le sujet âgé. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*, 49(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2006.03.005>
- Berg, K. O., Maki, B. E., Williams, J. I., Holliday, P. J., & Wood-Dauphinee, S. L. (1992). Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(11), 1073–1080. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1444775>
- Besnard, S., Lopez, C., Brandt, T., Denise, P., & Smith, P. F. (2015). Editorial: The Vestibular System in Cognitive and Memory Processes in Mammals. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9(November), 7–10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00055>
- Besnard, S., Machado, M. L., Vignaux, G., Boulouard, M., Coquerel, A., Bouet, V., Freret, T., Denise, P., & Lelong-Boulouard, V. (2011). Influence of vestibular input on spatial and nonspatial memory and on hippocampal NMDA receptors. *Hippocampus*, 22(4), 814–826. <https://doi.org/10.1002/hipo.20942>
- Besnard, S., Tighilet, B., Chabbert, C., Hitier, M., Toulouse, J., Le Gall, A., Machado, M. L., & Smith, P. F. (2018). The balance of sleep: Role of the vestibular sensory system. In *Sleep Medicine Reviews* (Vol. 42, pp. 220–228). W.B. Saunders Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2018.09.001>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Du Lac, S., Hoffman, H. J., & Agrawal, Y. (2015). Vestibular vertigo and comorbid cognitive and psychiatric impairment: The 2008 National Health Interview Survey. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 87(4), 367–372. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2015-310319>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Trevino, C., Ferrucci, L., Resnick, S. M., Simonsick, E. M., Xue, Q. L., & Agrawal, Y. (2015). Association between visuospatial ability and vestibular function in the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(9), 1837–1844. <https://doi.org/10.1111/jgs.13609>
- Bisdorff, A., Bosser, G., Gueguen, R., & Perrin, P. (2013). The epidemiology of vertigo, dizziness, and unsteadiness and its links to co-morbidities. *Frontiers in Neurology*, 4(MAR(March)), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00029>

- Bisdorff, A. R., Staab, J. P., & Newman-Toker, D. E. (2015). Overview of the International Classification of Vestibular Disorders. *Neurologic Clinics*, 33(3), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2015.04.010>
- Bisdorff, A., Von Brevern, M., Lempert, T., & Newman-Toker, D. E. (2009). Classification of vestibular symptoms: towards an international classification of vestibular disorders. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 19(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0343>
- Bizzo, G., Guillet, N., Patat, A., & Gagey, P. M. (1985). Specifications for building a vertical force platform designed for clinical stabilometry. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 23(5), 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02448937>
- Black, F. O., & Nashner, L. M. (1984). Postural Disturbance in Patients with Benign Paroxysmal Positional Nystagmus. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 93(6), 595–599. <https://doi.org/10.1177/000348948409300612>
- Black, F. O., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Abnormal postural control associated with peripheral vestibular disorders. *Progress in Brain Research*, 76(C), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64513-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64513-6)
- Black, F. O., & Wall, C. (1981). Comparison of vestibulo-ocular and vestibulospinal screening tests. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 89(5), 811–817. <https://doi.org/10.1177/019459988108900523>
- Black, F. O., Wall, C., & Nashner, L. M. (1983). Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 199–210. <https://doi.org/10.3109/00016488309130936>
- Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, 3(5), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1)
- Bloem, B. R., Visser, J. E., & Allum, J. H. J. (2003). Chapter 20 Posturography. In *Handbook of Clinical Neurophysiology* (Vol. 1, Issue C). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1567-4231\(09\)70168-6](https://doi.org/10.1016/S1567-4231(09)70168-6)
- Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Boisgontie, M., Mignardot, J.-B., Nougier, V., Olivier, I., & Palluel, E. (2011). Attentional cost of the executive functions involved in postural control. *Science et Motricite*, 74. <https://doi.org/10.1051/sm/2011106>
- Borel, L., Lopez, C., Péruch, P., & Lacour, M. (2008). Vestibular syndrome: A change in internal spatial representation. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.002>
- Borich, M. R., Brodie, S. M., Gray, W. A., Ionta, S., & Boyd, L. A. (2015). Understanding the role of the primary somatosensory cortex: Opportunities for rehabilitation. *Neuropsychologia*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.007>
- Bosmans, J., Gommeren, H., Mertens, G., Cras, P., Engelborghs, S., Van Ombergen, A., Vereeck, L., Gilles, A.,

- & Van Rompaey, V. (2022). Associations of Bilateral Vestibulopathy with Cognition in Older Adults Matched with Healthy Controls for Hearing Status. *JAMA Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 148(8), 731–739. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2022.1303>
- Bouccara, D., Rubin, F., Bonfils, P., & Lisan, Q. (2018). Management of vertigo and dizziness. In *Revue de Medecine Interne* (Vol. 39, Issue 11, pp. 869–874). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2018.02.004>
- Branco Lopes, A., Leal, G., Malvy, L., Wauquiez, G., Ponchel, A., Rivera, D., & Arango-Lasprilla, J. C. (2021). Neuropsychology in France. *Applied Neuropsychology:Adult*, 28(3), 328–339. <https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1633329>
- Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). The dizzy patient: Don't forget disorders of the central vestibular system. In *Nature Reviews Neurology* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.58>
- Brandt, T., Schautzer, F., Hamilton, D. A., Brüning, R., Markowitsch, H. J., Kalla, R., Darlington, C., Smith, P., & Strupp, M. (2005). Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain*, 128(11), 2732–2741. <https://doi.org/10.1093/brain/awh617>
- Breinbauer, H. A., Contreras, M. D., Lira, J. P., Guevara, C., Castillo, L., Ruëdinger, K., Muñoz, D., & Delano, P. H. (2020). Spatial Navigation Is Distinctively Impaired in Persistent Postural Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01361>
- Bremner, A. J., Holmes, N. P., & Spence, C. (2008). Infants lost in (peripersonal) space? *Trends in Cognitive Sciences*, 12(8), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.05.003>
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Experimental Brain Research*, 63(3). <https://doi.org/10.1007/BF00237488>
- Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., Mon-Williams, M., & Mushtaq, F. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52(2), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
- Browne, J., & O'Hare, N. (2001). Review of the different methods for assessing standing balance. *Physiotherapy*, 87(9), 489–495. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60696-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60696-7)
- Burr, D., & Gori, M. (2011). Multisensory integration develops late in humans. In *The Neural Bases of Multisensory Processes*. <https://doi.org/10.1201/b11092-23>
- Caldwell, A. R. (2022). SimplyAgree: An R package and jamovi Module for Simplifying Agreement and Reliability Analyses. *Journal of Open Source Software*, 7(71). <https://doi.org/10.21105/joss.04148>
- Carrick, F. R., Oggero, E., & Pagnacco, G. (2007). Posturographic changes associated with music listening. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 13(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/acm.2007.7020>
- Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., Sparto, P. J., Perera, S., Redfern, M. S., Fall, P. A., & Furman, J. M. (2010). Longitudinal posturography and rotational testing in children three to

- nine years of age: Normative data. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 142(5), 708–714.
<https://doi.org/10.1016/j.otohns.2010.01.028>
- Castro, P., Bancroft, M. J., Arshad, Q., & Kaski, D. (2022). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) from Brain Imaging to Behaviour and Perception. *Brain Sciences*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/brainsci12060753>
- Cathers, I., Day, B. L., & Fitzpatrick, R. C. (2005). Otolith and canal reflexes in human standing. *The Journal of Physiology*, 563(1), 229–234.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.079525>
- Celis-Aguilar, E., Castro-Urquiza, A., & Mariscal-Castro, J. (2018). Evaluation and interpretation of the bucket test in healthy individuals*. *Acta Otolaryngologica*, 138(5), 458–462.
<https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1410289>
- Cha, Y. H., Golding, J. F., Keshavarz, B., Furman, J., Kim, J. S., Lopez-Escamez, J. A., Magnusson, M., Yates, B. J., Lawson, B. D., Staab, J. P., & Bisdorff, A. (2021). Motion sickness diagnostic criteria: Consensus Document of the Classification Committee of the Bárány Society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(5), 327–344.
<https://doi.org/10.3233/VES-200005>
- Chabbert, C. (2013). New insights into vestibular neuropharmacology: From bench to bedside. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 23(3), 107–111.
<https://doi.org/10.3233/VES-130495>
- Chaikeeree, N., Saengsirisuwan, V., Chinsongkram, B., & Boonsinsukh, R. (2015). Interaction of age and foam types used in Clinical Test for Sensory Interaction and Balance (CTSIB). *Gait and Posture*, 41(1), 313–315.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.011>
- Chander, H., Arachchige, S. N. K. K., Hill, C. M., Turner, A. J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2019). Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behavioral Sciences*, 9(11).
<https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Chari, D. A., Madhani, A., Sharon, J. D., & Lewis, R. F. (2022). Evidence for cognitive impairment in patients with vestibular disorders. *Journal of Neurology*, 269(11), 5831–5842.
<https://doi.org/10.1007/s00415-022-11289-3>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010a). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010b). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Cheng, Y.-Y., Kuo, C.-H., Hsieh, W.-L., Lee, S.-D., Lee, W.-J., Chen, L.-K., & Kao, C.-L. (2012). Anxiety, depression and quality of life (QoL) in patients with chronic dizziness. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 54(1), 131–135.
<https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.04.007>
- Cheng, Z., & Gu, Y. (2018). Vestibular system and self-motion. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12(November), 1–9.
<https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00456>

- Chetana, N., & Jayesh, R. (2015). Subjective visual vertical in various vestibular disorders by using a simple bucket test. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 67(2), 180–184. <https://doi.org/10.1007/s12070-014-0760-0>
- Chiarella, G., Petrolo, C., Riccelli, R., Giofrè, L., Olivadese, G., Gioacchini, F. M., Scarpa, A., Cassandro, E., & Passamonti, L. (2016). Chronic subjective dizziness: Analysis of underlying personality factors. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(4), 403–408. <https://doi.org/10.3233/VES-160590>
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002a). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002b). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiarovano, E., de Waele, C., MacDougall, H. G., Rogers, S. J., Burgess, A. M., & Curthoys, I. S. (2015). Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots or at a virtual reality scene. *Frontiers in Neurology*, 6(JUL). <https://doi.org/10.3389/fneur.2015.00164>
- Chiarovano, E., Wang, W., Reynolds, P., & MacDougall, H. G. (2018). Imbalance: Objective measures versus subjective self-report in clinical practice. *Gait and Posture*, 59, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.10.019>
- Chiarovano, E., Wang, W., Rogers, S. J., MacDougall, H. G., Curthoys, I. S., & de Waele, C. (2017). Balance in virtual reality: Effect of age and bilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, 8(JAN). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00005>
- Clark, R. A., Mentiplay, B. F., Pua, Y. H., & Bower, K. J. (2018). Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review. *Gait and Posture*, 61(December 2017), 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.022>
- Clark, S., Rose, D. J., & Fujimoto, K. (1997). Generalizability of the limits of stability test in the evaluation of dynamic balance among older adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(10), 1078–1084. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90131-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90131-3)
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996a). Changes in Sensory Organization Test Scores with Age. In *Age and Ageing* (Vol. 25). <https://academic.oup.com/ageing/article/25/1/39/35818>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996b). Changes in sensory organization test scores with age. *Age and Ageing*, 25(1), 39–44. <https://doi.org/10.1093/ageing/25.1.39>
- Cohen, H. S. (2019). A review on screening tests for vestibular disorders. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 122, Issue 1, pp. 81–92). American Physiological Society. <https://doi.org/10.1152/jn.00819.2018>
- Cohen, H. S., Mulavara, A. P., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2019). Screening for Vestibular Disorders Using the Modified Clinical Test of Sensory Interaction and

- Balance and Tandem Walking With Eyes Closed. *Otology and Neurotology*, 40(5), 658–665. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002173>
- Cohen, H. S., & Sangi-Haghpeykar, H. (2012). Subjective visual vertical in vestibular disorders measured with the bucket test. *Acta Oto-Laryngologica*, 132(8). <https://doi.org/10.3109/00016489.2012.668710>
- Cohen, H. S., Sangi-Haghpeykar, H., Ricci, N. A., Kampangkaew, J., & Williamson, R. A. (2014). Utility of stepping, walking, and head impulses for screening patients for vestibular impairments. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 151(1), 131–136. <https://doi.org/10.1177/0194599814527724>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018a). Tandem walking as a quick screening test for vestibular disorders. *Laryngoscope*, 128(7), 1687–1691. <https://doi.org/10.1002/lary.27022>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018b). Utility of quick oculomotor tests for screening the vestibular system in the subacute and chronic populations. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(4), 382–386. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1398838>
- Commins, S., Duffin, J., Chaves, K., Leahy, D., Corcoran, K., Caffrey, M., Keenan, L., Finan, D., & Thornberry, C. (2020). NavWell: A simplified virtual-reality platform for spatial navigation and memory experiments. *Behavior Research Methods*, 52(3), 1189–1207. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01310-5>
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "What", "Where", and "How". *Acta Psychologica*, 107(1–3), 43–68. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00021-X)
- Creem-Regehr, S. H., Kelly, J. W., Bodenheimer, B., & Stefanucci, J. K. (2024). Virtual reality as a tool to understand spatial navigation. In *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology* (pp. 103–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820480-1.00011-5>
- Cullen, K. E. (2012). The vestibular system: Multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends in Neurosciences*, 35(3), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.12.001>
- Cullen, K. E. (2016). Physiology of central pathways. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 17–40). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00002-9>
- Curthoys, I. S. (2012). The interpretation of clinical tests of peripheral vestibular function. In *Laryngoscope* (Vol. 122, Issue 6, pp. 1342–1352). <https://doi.org/10.1002/lary.23258>
- Danneels, M., Van Hecke, R., Leyssens, L., van de Berg, R., Dhooge, I., Cambier, D., Delrue, S., Van Rompaey, V., & Maes, L. (2023). The impact of vestibular function on cognitive–motor interference: a case–control study on dual-tasking in persons with bilateral vestibulopathy and normal hearing. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40465-2>
- De Gelder, B., & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.014>

- de Haan, E. H. F., & Dijkerman, H. C. (2020). Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-evaluation and a New Model. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 24, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.04.003>
- de la Torre, J., Marin, J., Marin, J. J., Auria, J. M., & Sanchez-Valverde, M. B. (2017). Balance study in asymptomatic subjects: Determination of significant variables and reference patterns to improve clinical application. *Journal of Biomechanics*, 65, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.013>
- De Valck, C. F. J., Denollet, J., Wuyts, F. L., & Van De Heyning, P. H. (2007). Increased handicap in vertigo patients with a type-D personality. *Audiological Medicine*, 5(3), 169–175. <https://doi.org/10.1080/16513860701497441>
- De Vestel, C., De Hertogh, W., Van Rompaey, V., & Vereeck, L. (2022). Comparison of Clinical Balance and Visual Dependence Tests in Patients With Chronic Dizziness With and Without Persistent Postural-Perceptual Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.880714>
- Denise, P., Paolino, M., & Golding, J. F. (2013). Motion sickness susceptibility in healthy subjects and vestibular patients: Effects of gender, age and trait-anxiety. *Journal of Vestibular Research*, 203–210. <https://doi.org/10.3233/VES-130501>
- Deroualle, D., Borel, L., Tanguy, B., Bernard-Demanze, L., Devèze, A., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2019). Unilateral vestibular deafferentation impairs embodied spatial cognition. *Journal of Neurology*, 266, 149–159. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09433-7>
- Derrington, A. M., Allen, H. A., & Delicato, L. S. (2004). Visual Mechanisms of Motion Analysis and Motion Perception. *Annual Review of Psychology*, 55(1), 181–205. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.141903>
- Dessai, T. D., & Prasannan, A. (2021). Subjective visual vertical and horizontal: bucket test normative. *Hearing, Balance and Communication*, 19(4). <https://doi.org/10.1080/21695717.2021.1943786>
- di Fabio, R. P. (1995). Sensitivity and specificity of platform posturography for identifying patients with vestibular dysfunction. *Physical Therapy*, 75(4), 290–305. <https://doi.org/10.1093/ptj/75.4.290>
- di Fabio, R. P. (1996). Meta-analysis of the sensitivity and specificity of platform posturography. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 122(2), 150–156. <https://doi.org/10.1001/archotol.1996.01890140036008>
- Di Fabio, R. P., & Foudriat, B. A. (1996). Responsiveness and reliability of a pediatric strategy score for balance. *Physiotherapy Research International*, 1(3), 180–194. <https://doi.org/10.1002/pri.57>
- Dickman, J. D. (2018). The Vestibular System. In *Fundamental Neuroscience for Basic and Clinical Applications: Fifth Edition* (Fifth Edit, pp. 320–333). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39632-5.00022-0>
- Dieterich, M. (2007). Central vestibular disorders. In *Journal of Neurology* (Vol. 254, Issue 5, pp. 559–568). <https://doi.org/10.1007/s00415-006-0340-7>

- Dieterich, M., & Brandt, T. (2024). Central vestibular networking for sensorimotor control, cognition, and emotion. *Current Opinion in Neurology*, 37(1), 74–82. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001233>
- Dobbels, B., Lucieer, F., Mertens, G., Gilles, A., Moyaert, J., van de Heyning, P., Guinand, N., Fornos, A. P., Herssens, N., Hallemans, A., Vereeck, L., Vanderveken, O., van Rompaey, V., & van de Berg, R. (2020). Prospective cohort study on the predictors of fall risk in 119 patients with bilateral vestibulopathy. *PLoS ONE*, 15(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228768>
- Dobbels, B., Mertens, G., Gilles, A., Claes, A., Moyaert, J., Van De Berg, R., Van De Heyning, P., Vanderveken, O., & Van Rompaey, V. (2019). Cognitive function in acquired bilateral vestibulopathy: A cross-sectional study on cognition, hearing, and vestibular loss. *Frontiers in Neuroscience*, 13(APR), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00340>
- Dobbels, B., Peetermans, O., Boon, B., Mertens, G., Van de Heyning, P., & Van Rompaey, V. (2019). Impact of bilateral vestibulopathy on spatial and nonspatial cognition: A systematic review. *Ear and Hearing*, 40(4), 757–765. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000679>
- Dobie, T. G. (2019). *Psychological Mechanisms That Exacerbate Motion Sickness* (pp. 113–127). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97493-4_6
- Dolins, F. L., Schweller, K., & Milne, S. (2017). Technology advancing the study of animal cognition: Using virtual reality to present virtually simulated environments to investigate nonhuman primate spatial cognition. *Current Zoology*, 63(1), 97–108. <https://doi.org/10.1093/cz/zow121>
- Domènech-Vadillo, E., Aguilera-Aguilera, G., Sánchez-Blanco, C., Batuecas-Caletrio, Á., Guajardo, C., Pérez, N., Trinidad-Ruiz, G., Gimeno, C., Rama, J., Rossi-Izquierdo, M., San-Roman-Rodriguez, E., Patiño-Castiñeira, B., Espinosa-Sanchez, J. M., Matíñó, E., Barona, R., Krstulovic, C., Benitez-Rosario, J., Santandreu, E., Zuma e Maia, F. C., ... Rey-Martínez, J. (2019). Normative data for static balance testing in healthy individuals using open source computerized posturography. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5170-6>
- Donovan, J., De Silva, L., Cox, H., Palmer, G., & Semciw, A. I. (2023). Vestibular dysfunction in people who fall: A systematic review and meta-analysis of prevalence and associated factors. *Clinical Rehabilitation*, 37(9), 1229–1247. <https://doi.org/10.1177/02692155231162423>
- Doyle, T. L., Newton, R. U., & Burnett, A. F. (2005). Reliability of traditional and fractal dimension measures of quiet stance center of pressure in young, healthy people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(10), 2034–2040. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.05.014>
- Duracinsky, M., Mosnier, I., Bouccara, D., Sterkers, O., Chassany, O., Attal, N., Bertholon, P., Bordure, P., Chays, A., Dubois, B., Dubreuil, C., Ferber, C., Ferran, P., Fraysse, M. J., Garcia-Macé, J., Gehanno, P., Lacour, M., Liard, F., Mari, I., ... Toupet, M. (2007). Literature review of questionnaires assessing vertigo and dizziness, and their impact on patients' quality of life. *Value in Health*, 10(4), 273–284.

- <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2007.00182.x>
- Eikema, D. J. A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2012). Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age*, 34(6), 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9310-9>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). How vestibular dysfunction transforms into symptoms of depersonalization and derealization? *Journal of the Neurological Sciences*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120530>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Hartman, T. G., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). The overarching effects of vestibular deficit: Imbalance, anxiety, and spatial disorientation. *Journal of the Neurological Sciences*, 451. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120723>
- Eriksen, N. D., & Hougaard, D. D. (2023). Age- and gender-specific normative data on computerized dynamic posturography in a cohort of Danish adults. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(5), 2191–2200. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07706-y>
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras, R., & Soto-Varela, A. (2016). Postural changes associated with ageing on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Auris Nasus Larynx*, 43(2), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2015.07.001>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012a). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012b). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Rossi-Izquierdo, M., Lirola-Delgado, A., Vaamonde-Sánchez-Andrade, I., del-Río-Valeiras, M., & Soto-Varela, A. (2016). Posturographic limits of stability can predict the increased risk of falls in elderly patients with instability? *Acta Oto-Laryngologica*, 136(11). <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1201591>
- Farenc, I., Rougier, P., & Berger, L. (2003). The influence of gender and body characteristics on upright stance. *Annals of Human Biology*, 30(3), 279–294. <https://doi.org/10.1080/030144603100068842>
- Fearing, F. S. (1924). The factors influencing static equilibrium. *J Comp Psychol*, 4, 91–121.
- Fong, E., Li, C., Aslakson, R., & Agrawal, Y. (2015). Systematic review of patient-reported outcome measures in clinical vestibular research. In *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 96, Issue 2, pp. 357–365). W.B. Saunders.

- <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.017>
- Formeister, E. J., Krauter, R., Kirk, L., Zhu, T. R., Rizk, H. G., & Sharon, J. D. (2020). Understanding the Dizziness Handicap Inventory (DHI): A Cross Sectional Analysis of Symptom Factors That Contribute to DHI Variance. *Otology & Neurotology*, 41(1), 86–93. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002438>
- Frank, S. M., Mark, X., & Greenlee, W. (2018). The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? *REVIEW Sensory Processing J Neurophysiol*, 120, 1438–1450. <https://doi.org/10.1152/jn.00907.2017>. -Here
- Freeman, E. E., Muñoz, B., Rubin, G., & West, S. K. (2007). Visual field loss increases the risk of falls in older adults: The salisbury eye evaluation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 48(10). <https://doi.org/10.1167/iovs.07-0326>
- Friello, P., Silver, N., Sangi-Haghpeykar, H., & Cohen, H. S. (2022). Screening for balance in children and adults in a community science education setting: Normative data, influence of age, sex, and body mass index, and feasibility. *PLoS ONE*, 17(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268030>
- Fujimoto, C., Murofushi, T., Chihara, Y., Ushio, M., Sugasawa, K., Yamaguchi, T., Yamasoba, T., & Iwasaki, S. (2009). Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: Analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1408–1414. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.002>
- Fukushima, A., Kabaya, K., Minakata, T., Katsumi, S., Esaki, S., & Iwasaki, S. (2024). Age-related differences in the characteristics of persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1378206>
- Furman, J. M. (1995). Role of posturography in the management of vestibular patients. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 112(1), 8–15. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(95\)70300-4](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(95)70300-4)
- Furman, J. M., & Redfern, M. S. (2001). Effect of aging on the otolith-ocular reflex. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 11(2). <https://doi.org/10.3233/ves-2001-11204>
- Gabriel, G. A., Harris, L. R., Gnanasegaram, J. J., Cushing, S. L., Gordon, K. A., Haycock, B. C., & Campos, J. L. (2022). Age-related changes to vestibular heave and pitch perception and associations with postural control. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09807-4>
- Gagey, P. M. (2016). International standardization of clinical stabilometry (Minutes of the meeting of posturologists, Paris 07.10.2015). In *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal* (Vol. 14, Issue September). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.315>
- Gagey, P.-M. (2016). Recording Conditions - Normes13. *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal*, 14(December 2016). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.362>
- Gálvez-García, G., Aldunate, N., Bascour-Sandoval, C., Barramuño, M., Fonseca, F., & Gómez-Milán, E. (2020). Decreasing motion sickness by mixing different techniques. *Applied Ergonomics*, 82.

- <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102931>
- Gammeri, R., Léonard, J., Toupet, M., Hautefort, C., van Nechel, C., Besnard, S., Machado, M. L., Nakul, E., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2022). Navigation strategies in patients with vestibular loss tested in a virtual reality T-maze. *Journal of Neurology*, 269(8), 4333–4348. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11069-z>
- Ganança, F. F., Gazzola, J. M., Aratani, M. C., Perracini, M. R., & Ganança, M. M. (2006). Circumstances and consequences of falls in elderly people with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 72(3), 388–392. [https://doi.org/10.1016/s1808-8694\(15\)30974-5](https://doi.org/10.1016/s1808-8694(15)30974-5)
- García-Soidán, J. L., García-Liñeira, J., Leirós-Rodríguez, R., & Soto-Rodríguez, A. (2020). Physical Activity Practice and Optimal Development of Postural Control in School Children: Are They Related? *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2919. <https://doi.org/10.3390/jcm9092919>
- Garrett, B., Taverner, T., Gromala, D., Tao, G., Cordingley, E., & Sun, C. (2018). Virtual reality clinical research: Promises and challenges. In *JMIR Serious Games* (Vol. 6, Issue 4). JMIR Publications Inc. <https://doi.org/10.2196/10839>
- Gauchard, G. (2003). Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research*, 45(4), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(03\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(03)00008-7)
- Geller, A. S., Schleifer, I. K., Sederberg, P. B., Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2007). *PyEPL: A cross-platform experiment-programming library*.
- Gibbons, C. T., Amazeen, P. G., & Likens, A. D. (2019). Effects of foot placement on postural sway in the anteroposterior and mediolateral directions. *Motor Control*, 23(2), 149–170. <https://doi.org/10.1123/mc.2017-0074>
- Gioacchini, F. M., Alicandri-Ciufelli, M., Kaleci, S., Magliulo, G., & Re, M. (2014). Prevalence and diagnosis of vestibular disorders in children: A review. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(5), 718–724. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.02.009>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018a). *Normative Data for the BTrackS Balance Test of Postural Sway: Results from 16,357 Community-Dwelling Individuals Who Were 5 to 100 Years Old* (Vol. 98). <https://academic.oup.com/ptj/article/98/9/779/4998861>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018b). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225–1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452>
- Goble, D. J., Brar, H., Brown, E. C., Marks, C. R., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the balance tracking system modified clinical test of sensory integration and balance protocol. *Medical Devices: Evidence and Research*, 12, 183–191. <https://doi.org/10.2147/MDER.S206530>
- Goble, D. J., Rauh, M. J., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the btracks balance test concussion-management tool: Results from 10045 athletes aged 8 to 21 years. *Journal of Athletic Training*, 54(4), 439–444. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-178-18>

- Gofrit, S. G., Mayler, Y., Eliashar, R., Bdolah-Abram, T., Ilan, O., & Gross, M. (2017). The Association between Vestibular Physical Examination, Vertigo Questionnaires, and the Electronystagmography in Patients with Vestibular Symptoms: A Prospective Study. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 126(4), 315–321. <https://doi.org/10.1177/0003489417691298>
- Golding, J. F. (2006a). Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 129(1–2), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2006.07.019>
- Golding, J. F. (2006b). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Golding, J. F. (2016). Motion sickness. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 371–390). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00027-3>
- Gómez-Alvarez, F. B., & Jáuregui-Renaud, K. (2011). Psychological Symptoms and Spatial Orientation During the First 3 Months After Acute Unilateral Vestibular Lesion. *Archives of Medical Research*, 42(2), 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.03.004>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2010). Poor Haptic Orientation Discrimination in Nonsighted Children May Reflect Disruption of Cross-Sensory Calibration. *Current Biology*, 20(3). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.069>
- Graf, W., & Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus - Palevol*, 5(3–4), 637–655. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.12.009>
- Grill, E., Darrouzet, V., Mansmann, U., & Chabbert, C. (2024). Prevalence of vestibular disease in France: analysis of prescription data from a national health insurance database. *Journal of Neurology*. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12423-z>
- Grill, E., Heuberger, M., Strobl, R., Saglam, M., Holle, R., Linkohr, B., Ladwig, K. H., Peters, A., Schneider, E., Jahn, K., & Lehen, N. (2018). Prevalence, Determinants, and Consequences of Vestibular Hypofunction. Results From the KORA-FF4 Survey. *Frontiers in Neurology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01076>
- Grill, E., Penger, M., & Kentala, E. (2016). Health care utilization, prognosis and outcomes of vestibular disease in primary care settings: systematic review. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 36–44). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7913-2>
- Guerra-Jiménez, G., Arenas Rodríguez, A., Carlos, J., González, F., Plasencia, D. P., & Ramos Macías, Á. (2017). Epidemiology of Vestibular Disorders in the Otoneurology Unit. In *Acta Otorrinolaringol Esp* (Vol. 68, Issue 6). www.elsevier.es/otorrino
- Hackenberg, B., O'Brien, K., Döge, J., Lackner, K. J., Beutel, M. E., Münzel, T., Wild, P. S., Pfeiffer, N., Chalabi, J., Matthias, C., & Bahr-Hamm, K. (2023). Vertigo and its burden of disease—Results from a population-based cohort study. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 8(6), 1624–1630. <https://doi.org/10.1002/lio2.1169>

- Hageman, P. A., Leibowitz, J. M., & Blanke, D. (1995). Age and gender effects on postural control measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(10), 961–965. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(95\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80075-1)
- Hamid, M. A., & Hughes, G. B. (1991). Specificity and Sensitivity of Dynamic Posturography A Retrospective Analysis. In *Acta Otolaryngol (Stockh)* (Vol. 481).
- Hamid, M. A., Hughes, G. B., & Kinney, S. E. (1991). Specificity and sensitivity of dynamic posturography: A retrospective analysis. *Acta Otolaryngologica*, 111(S481), 596–600. <https://doi.org/10.3109/00016489109131480>
- Harcourt, J. P. (1995). Posturography—applications and limitations in the management of the dizzy patient. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 20(4), 299–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1995.tb00045.x>
- Harro, C. C., Marquis, A., Piper, N., Burdis, C., & Harro, C. C. (2016). Reliability and Validity of Force Platform Measures of Balance Impairment in Individuals With Parkinson's Disease. *Physical Therapy*, 96(12), 1955–1964. <https://doi.org/10.2522/ptj.20160099>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020a). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait and Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020b). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait & Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Henry, N. E., Weart, A. N., Miller, E. M., Feltner, L. D., & Goss, D. L. (2022). Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in United States Military Academy Boxers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(3), 366–377. <https://doi.org/10.26603/001c.32547>
- Herssens, N., Verbecque, E., McCrum, C., Meijer, K., van de Berg, R., Saeys, W., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Hallemans, A. (2020). A Systematic Review on Balance Performance in Patients With Bilateral Vestibulopathy. *Physical Therapy*, 100(9), 1582–1594. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa083>
- Heutink, J., Broekman, M., Brookhuis, K. A., Melis-Dankers, B. J. M., & Cordes, C. (2019). The effects of habituation and adding a rest-frame on experienced simulator sickness in an advanced mobility scooter driving simulator. *Ergonomics*, 62(1), 65–75. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1518543>
- Higgins, J. P. T., Green, S., & Ben Van Den, A. (2020). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *International Coaching Psychology Review*, 15(2). <https://doi.org/10.53841/bpsicpr.2020.15.2.123>
- Hilber, P., Cendelin, J., Le Gall, A., Machado, M.-L., Tuma, J., & Besnard, S. (2018). Cooperation of the vestibular and cerebellar networks in anxiety disorders and depression. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 89, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.004>
- Hill, K. D., Carroll, S. G., Kalogeropoulos, A., & Schwarz, J. A. (1995). Retest Reliability of Centre of Pressure Measures of Standing Balance in

- Healthy Older Women. *Australian Journal on Ageing*, 14(2), 76–80.
<https://doi.org/10.1111/j.1741-6612.1995.tb00701.x>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014a). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014b). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hong, H. R., Shim, D. B., Kim, T. S., Shim, B. S., Ahn, J. H., Chung, J. W., Yoon, T. H., & Park, H. J. (2013). Results of caloric and sensory organization testing of dynamic posturography in migrainous vertigo: Comparison with Meniere's disease and vestibular neuritis. *Acta Oto-Laryngologica*, 133(12), 1236–1241.
<https://doi.org/10.3109/00016489.2013.820343>
- Hong, S. M., Lee, H. J., Lee, B., Park, S. K., Hong, S. K., Park, I. S., Kim, Y. B., & Kim, H. J. (2013). Influence of vestibular disease on psychological distress: A multicenter study. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 148(5), 810–814.
<https://doi.org/10.1177/0194599813476476>
- Horak, F. B., Buchanan, J., Creath, R., & Jeka, J. (2002). Vestibulospinal Control of Posture. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 508, pp. 139–145).
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_17
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381.
<https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369>
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82(1), 167–177.
<https://doi.org/10.1007/BF00230848>
- Hülse, R., Biesdorf, A., Hörmann, K., Stuck, B., Erhart, M., Hülse, M., & Wenzel, A. (2019). Peripheral Vestibular Disorders: An Epidemiologic Survey in 70 Million Individuals. *Otology and Neurotology*, 40(1), 88–95.
<https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002013>
- Im, J. J., Na, S., Kang, S., Jeong, H., Lee, E. S., Lee, T. K., Ahn, W. Y., Chung, Y. A., & Song, I. U. (2022). A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Trial of Transcranial Direct Current Stimulation for the Treatment of Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD). *Frontiers in Neurology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.868976>
- Indovina, I., Bosco, G., Riccelli, R., Maffei, V., Lacquaniti, F., Passamonti, L., & Toschi, N. (2020). Structural connectome and connectivity lateralization of the multimodal vestibular cortical network. *NeuroImage*, 222.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117247>
- Indovina, I., Passamonti, L., Mucci, V., Chiarella, G., Lacquaniti, F., & Staab, J. P. (2021). Brain correlates of persistent postural-perceptual dizziness: A review of neuroimaging studies. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 10, Issue 18).
<https://doi.org/10.3390/jcm10184274>
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart, C. (2005a). Evolution physiologique

- des paramètres d'équilibre sur Equitest chez l'adulte sain âgé de 20 à 60 ans. *Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005b). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005c). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235.
[https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., Vuillerme, N., Amblard, B., & Gresty, M. A. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience*, 169(3), 1199–1215.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.072>
- Jacob, A., Tward, D. J., Resnick, S., Smith, P. F., Lopez, C., Rebello, E., Wei, E. X., Tilak Ratnanather, J., & Agrawal, Y. (2020). Vestibular function and cortical and sub-cortical alterations in an aging population. *Heliyon*, 6(8).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04728>
- Jacobson, G. P., & Newman, C. W. (1990). The Development of the Dizziness Handicap Inventory. *Archives of Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 116(4), 424–427.
<https://doi.org/10.1001/archotol.1990.01870040046011>
- Jamon, M. (2014). The development of vestibular system and related functions in mammals: impact of gravity. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(February), 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00011>
- Jáuregui-Renaud, K., García-Jacuinde, D. M., Bárcenas-Olvera, S. P., Gresty, M. A., & Gutiérrez-Márquez, A. (2024). Spatial anxiety contributes to the dizziness-related handicap of adults with peripheral vestibular disease. *Frontiers in Neurology*, 15.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1365745>
- Jayakaran, P., Johnson, G. M., & Sullivan, S. J. (2011). Test-Retest Reliability of the Sensory Organization Test in Older Persons With a Transtibial Amputation. *PM and R*, 3(8).
<https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.01.005>
- Kammerlind, A. S. C., Ledin, T. E. A., Skargren, E. I. B., & Ödkvist, L. M. (2005). Long-term follow-up after acute unilateral vestibular loss and comparison between subjects with and without remaining symptoms. *Acta Oto-Laryngologica*, 125(9), 946–953.
<https://doi.org/10.1080/00016480510043477>
- Karabulut, M., Van Laer, L., Hallemans, A., Vereeck, L., Van Rompaey, V., Viechtbauer, W., Melliti, A., van Stiphout, L., Mohamad, A., Pérez Fornos, A., Guinand, N., & van de Berg, R. (2023). Chronic symptoms in patients with unilateral vestibular hypofunction: systematic review and meta-analysis. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 14). Frontiers Media SA.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1177314>

- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R., & Roll, J. P. (1999). From balance regulation to body orientation: Two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research*, 124(1). <https://doi.org/10.1007/s002210050602>
- Kerber, K. A., Ishiyama, G. P., & Baloh, R. W. (2006). A longitudinal study of oculomotor function in normal older people. *Neurobiology of Aging*, 27(9), 1346–1353. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.07.009>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009a). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009b). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., Mallinson, A. I., Longridge, N. S., Sinno, S., Petersen, H., & Perrin, P. (2023). Evolution of postural control assessment: From dynamic posturography to virtual reality. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1054346>
- Keshner, E. A., Streepey, J., Dhaher, Y., & Hain, T. (2007). Pairing virtual reality with dynamic posturography serves to differentiate between patients experiencing visual vertigo. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-24>
- Ketola, S., Havia, M., Appelberg, B., & Kentala, E. (2014). Psychiatric symptoms in vertiginous patients. *Nordic Journal of Psychiatry*, 69(4), 287–291. <https://doi.org/10.3109/08039488.2014.972976>
- Khan, S., & Chang, R. (2013a). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Khan, S., & Chang, R. (2013b). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Kingma, H., & van de Berg, R. (2016). Anatomy, physiology, and physics of the peripheral vestibular system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00001-7>
- Kiss, R., Schedler, S., & Muehlbauer, T. (2018). Associations Between Types of Balance Performance in Healthy Individuals Across the Lifespan: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01366>
- Kobel, M. J., Wagner, A. R., & Merfeld, D. M. (2023). Recurrence quantification analysis of postural sway in patients with persistent postural perceptual dizziness. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 4. <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1142018>
- Kollegger, H., Baumgartner, C., Wöber, C., Oder, W., & Deecke, L. (1992). Spontaneous Body Sway as a Function of Sex, Age, and Vision: Posturographic Study in 30 Healthy Adults. *European Neurology*, 32(5), 253–259. <https://doi.org/10.1159/000116836>
- Kollegger, H., Wöber, C., Baumgartner, C., & Deecke, L. (1989). Stabilizing and destabilizing effects of vision and foot position on body sway of healthy young subjects: A posturographic study. *European Neurology*, 29(5),

- 241–245.
<https://doi.org/10.1159/000116420>
- Konukseven, O., Satıcı, S., Adalı, I., Yıldız, Y., Doğru, L., & Duruoğlu, S. (2022). Vestibulospinal system findings caused by ageing between 40 and 55 years. *Hearing, Balance and Communication*, 20(4), 257–262. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2087310>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kovacs, E., Wang, X., & Grill, E. (2019). Economic burden of vertigo: A systematic review. *Health Economics Review*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13561-019-0258-2>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwiwat, N. (2016). Comparison of Balance Performance between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, 20(2), 72–78. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lacour, M., Helmchen, C., & Vidal, P. P. (2016). Vestibular compensation: the neuro-otologist's best friend. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 54–64). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7903-4>
- Lacroix, E., Deggouj, N., Salvaggio, S., Wiener, V., Debue, M., & Edwards, M. G. (2016). The development of a new questionnaire for cognitive complaints in vertigo: the Neuropsychological Vertigo Inventory (NVI). *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 273(12), 4241–4249. <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4135-x>
- Lafond, D., Corriveau, H., Hébert, R., & Prince, F. (2004). Intrassession reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.08.089>
- Lahmann, C., Henningsen, P., Brandt, T., Strupp, M., Jahn, K., Dieterich, M., Eckhardt-Henn, A., Feuerecker, R., Dinkel, A., & Schmid, G. (2014). Psychiatric comorbidity and psychosocial impairment among patients with vertigo and dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 86(3), 302–308. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2014-307601>
- Lara, S., Graup, S., De Souza Balk, R., Teixeira, L. P., Farias, A. D., Alves, G. B., & Leiria, V. B. (2018). Association between postural balance and anthropometric indexes in elementary schoolchildren. *Revista Paulista de Pediatria*, 36(1), 59–65. <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00011>
- Layman, A. J., Li, C., Simonsick, E., Ferrucci, L., Carey, J. P., & Agrawal, Y. (2015). Association between saccular function and gait speed: Data from the Baltimore Longitudinal study of aging. *Otology and Neurotology*, 36(2). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000544>
- Leitner, C., Mair, P., Paul, B., Wick, F., Mittermaier, C., Sycha, T., & Ebenbichler, G. (2009). Reliability of posturographic measurements in the

- assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.09.007>
- Lelard, T., & Ahmaidi, S. (2015). Effects of physical training on age-related balance and postural control. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4–5), 357–369. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCLI.2015.09.008>
- Lempert, T., & Neuhauser, H. (2009). Epidemiology of vertigo, migraine and vestibular migraine. *Journal of Neurology*, 256(3), 333–338. <https://doi.org/10.1007/s00415-009-0149-2>
- Lempert, T., Olesen, J., Furman, J., Waterston, J., Seemungal, B., Carey, J., Bisdorff, A., Versino, M., Evers, S., Kheradmand, A., & Newman-Toker, D. (2022). Vestibular migraine: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.3233/VES-201644>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R Package Version 1.10.2.090002.
- Lentz, M., & Collins, W. E. (1976). *Three studies of motion sickness susceptibility* (Vol. 7, Issue 2).
- Leong, A. T. L., Gu, Y., Chan, Y. S., Zheng, H., Dong, C. M., Chan, R. W., Wang, X., Liu, Y., Tan, L. H., & Wu, E. X. (2019). Optogenetic fMRI interrogation of brain-wide central vestibular pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 10122–10129. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812453116>
- Letz, R., Gerr, F., Deborah Harris-abbott, F., Dick, R., Gerr, F., Harris-abbott, D., & Dick, R. (1996). A Comparison of Standing Steadiness Measurements from Two Devices: Covariates and Normal Values. In *Neurotoxicology and Teratology* (Vol. 18, Issue 1).
- Lewkowicz, D. J., & Bremner, A. J. (2020). The development of multisensory processes for perceiving the environment and the self. In *Multisensory Perception* (Vol. 49, Issue 5, pp. 89–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00004-8>
- Liang, H. W., Chi, S. Y., Chen, B. Y., & Hwang, Y. H. (2021). Reliability and Validity of a Virtual Reality-Based System for Evaluating Postural Stability. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 85–91. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3034876>
- Libardoni, T. de C., Silveira, C. B. da, Sinhorim, L. M. B., Oliveira, A. S. de, Santos, M. J. dos, & Santos, G. M. (2018). Reference values and equations reference of balance for children of 8 to 12 years. *Gait and Posture*, 60, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.004>
- Lim, R., & Brichta, A. M. (2016). Anatomical and physiological development of the human inner ear. *Hearing Research*, 338, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.02.004>
- Lindell, E., Kollén, L., Johansson, M., Karlsson, T., Rydén, L., Zettergren, A., Frändin, K., Skoog, I., & Finizia, C. (2020). Dizziness and its association with walking speed and falls efficacy among older men and women in an urban population. *Aging Clinical and Experimental Research*, 32(6), 1049–1056. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01303-6>

- Liston, R. A. L., & Brouwer, B. J. (1996). Reliability and validity of measures obtained from stroke patients using the balance master. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(5), 425–430. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(96\)90028-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(96)90028-3)
- Liu, Y. F., Locklear, T. D., Sharon, J. D., Lacroix, E., Nguyen, S. A., & Rizk, H. G. (2019). Quantification of Cognitive Dysfunction in Dizzy Patients Using the Neuropsychological Vertigo Inventory. *Otology and Neurotology*, 40(7), E723–E731. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002311>
- Lopez, C. (2013). A neuroscientific account of how vestibular disorders impair bodily self-consciousness. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00091>
- Lopez, C., Lacour, M., & Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. In *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (pp. 35–86).
- Lopez-Escamez, J. A., Carey, J., Chung, W. H., Goebel, J. A., Magnusson, M., Mandalà, M., Newman-Toker, D. E., Strupp, M., Suzuki, M., Trabalzini, F., & Bisdorff, A. (2015). Diagnostic criteria for Menière's disease. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(1), 1–7. <https://doi.org/10.3233/VES-150549>
- Lubetzky, A. V., Aharoni, M. M. H., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). People with persistent postural-perceptual dizziness demonstrate altered postural strategies in complex visual and cognitive environments. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(6), 505–517. <https://doi.org/10.3233/VES-201552>
- Lucertini, M., Verde, P., & Trivelloni, P. (2013). Rehabilitation from airsickness in military pilots: Long-term treatment effectiveness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 84(11), 1196–1200. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3509.2013>
- Macedo, C., Gazzola, J. M., Ricci, N. A., Doná, F., & Ganança, F. F. (2015). Influence of sensory information on static balance in older patients with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 81(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.11.004>
- Madrigal, J., Arbelaez-Lelion, D., Candelo, E., Valencia Ramírez, S., Franco Sanchez, I., Castillo-Bustamante, M., Andalon-Dueñas, E., & García, A. (2023). Clinical and otopathologic findings on age-related vestibular loss: state of the art review. *International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery*, 9(7), 602–612. <https://doi.org/10.18203/issn.2454-5929.ijohns20231822>
- Maresova, P., Penhaker, M., Selamat, A., & Kuca, K. (2015). The potential of medical device industry in technological and economical context. In *Therapeutics and Clinical Risk Management* (Vol. 11, pp. 1505–1514). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S88574>
- Marsh, A. P., & Geel, S. E. (2000). The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait and Posture*, 12(2). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00074-6)
- Massingale, S. L., Alexander, A. D., Erickson, S. M., McQueary, E. S., Gerkin, R. D., Schodrof, S. B., Kisana, H. M., & Pardini, J. E. (2018). Assessing balance in an athletic population: Normative data for the

- concussion balance test (COBALT®). *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 23(3), 96–100. <https://doi.org/10.1123/ijatt.2017-0042>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877–887.
- Mast, F. W., Preuss, N., Hartmann, M., & Grabherr, L. (2014). Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(May), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00044>
- Masui, T., Hasegawa, Y., Matsuyama, Y., Sakano, S., Kawasaki, M., & Suzuki, S. (2005). Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41(2), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.02.003>
- Matsuda, S., Demura, S., & Demura, T. (2010). Examining differences between center of pressure sway in one-legged and two-legged stances for soccer players and typical adults. *Perceptual and Motor Skills*, 110(3), 751–760. <https://doi.org/10.2466/pms.110.3.751-760>
- McCall, A. A., Miller, D. M., & Yates, B. J. (2017). Descending influences on vestibulospinal and vestibulosympathetic reflexes. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 8, Issue MAR). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00112>
- McCaslin, D. L., Shepard, N. T., Hollman, J. H., & Staab, J. P. (2022). Characterization of Postural Sway in Patients With Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) Using Wearable Motion Sensors. *Otology & Neurotology*, 43(2), e243–e251. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000003393>
- McCollum, G., Shupert, C. L., & Nashner, L. M. (1996). Organizing sensory information for postural control in altered sensory environments. *Journal of Theoretical Biology*, 180(3), 257–270. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0101>
- Mendel, B., Bergenius, J., & Langius, A. (1999). Dizziness symptom severity and impact on daily living as perceived by patients suffering from peripheral vestibular disorder. *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 24(4), 286–293. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2273.1999.00261.x>
- Micarelli, A., Vizziano, A., Augimeri, I., Micarelli, B., & Alessandrini, M. (2020). Age-related Assessment of Postural Control Development: A Cross-sectional Study in Children and Adolescents. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 418–426. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>
- Michelson, P. L., McCaslin, D. L., Jacobson, G. P., Petrak, M., English, L., & Hatton, K. (2018). Assessment of subjective visual vertical (SVV) using the “bucket test” and the virtual SVV system. *American Journal of Audiology*, 27(3). https://doi.org/10.1044/2018_AJA-17-0019
- Mirka, Alar., & Black, F. O. (1990). Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 8, 351–359.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6(C), 414–417.

- [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mnejja, K., Fendri, T., Chaari, F., Harrabi, M. A., & Sahli, S. (2022). Reference values of postural balance in preschoolers: Age and gender differences for 4–5 years old Tunisian children. *Gait and Posture*, 92, 401–406.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.12.015>
- Monsell, E. M., Furman, J. M., Herdman, S. J., Konrad, H. R., & Shepard, N. T. (1997). Computerized dynamic platform posturography. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 117(4), 394–398.
[https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(97\)70132-3](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(97)70132-3)
- Müller, M. M., Scherer, J., Unterbrink, P., Bertrand, O. J. N., Egelhaaf, M., & Boeddeker, N. (2023). The Virtual Navigation Toolbox: Providing tools for virtual navigation experiments. *PLoS ONE*, 18(11 November).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293536>
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes: A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567–579.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nagymáté, G., Orlovits, Z., & Kiss, R. M. (2018). Reliability analysis of a sensitive and independent stabilometry parameter set. *PLoS ONE*, 13(4), 1–14.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195995>
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. In *Biological Reviews* (Vol. 82, Issue 4, pp. 591–605).
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Nakayama, M., Suzuki, M., Inagaki, A., Takemura, K., Watanabe, N., Tanigawa, T., Okamoto, K., Hattori, H., Brodie, H., & Murakami, S. (2010). Impaired quality of sleep in Ménière's disease patients. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 6(5), 445–449.
- Nashner, L., & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 150(2).
[https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3)
- Nashner, L., Black, F. O., & Lilly, D. J. (1994). *Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology*.
- Nashner, L., Black, F., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *The Journal of Neuroscience*, 2(5), 536–544.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.02-05-00536.1982>
- Nashner, L. M. (1982). Adaptation of human movement to altered environments. *Trends in Neurosciences*, 5(C), 358–361.
[https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1)
- Nashner, L. M. (1985). The organisation of human postural movements A formal basis and experimental synthesis. *THE BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES*, 8, 135–172.
- Nashner, L. M., & Peters, J. F. (1990). Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics*, 8(2), 331–349.
- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Black, F. O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80(C), 411–418.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)62237-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)62237-2)

- Negrillo-Cárdenas, J., Rueda-Ruiz, A. J., Ogayar-Anguita, C. J., Lomas-Vega, R., & Segura-Sánchez, R. J. (2018). A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device. *Journal of Medical Systems*, 42(7). <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0981-y>
- Negu, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Negut, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Neuhauser, H. K. (2016). The epidemiology of dizziness and vertigo. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 137, pp. 67–82). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00005-4>
- Nishino, L. K., Rocha, G. D., de Souza, T. S. A., de Andrade Quintanilha Ribeiro, F., & Cóser, P. L. (2021). Protocol for static posturography with dynamic tests in individuals without vestibular complaints using the Horus system. *CODAS*, 33(3), 1–13. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20202019270>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1997). Contribution of central and peripheral vision to the regulation of stance. *Gait and Posture*, 5(1). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01071-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01071-5)
- Nyabenda, A., Briart, C., Deggouj, N., & Gersdorff, M. (2004). A normative study of the vestibulospinal and rotational tests. *Advances in Physiotherapy*, 6(3), 122–129. <https://doi.org/10.1080/14038190310012052>
- Obrero-Gaitán, E., Molina, F., Montilla-Ibañez, M. de A., Del-Pino-Casado, R., Rodríguez-Almagro, D., & Lomas-Vega, R. (2021). Misperception of Visual Vertical in Peripheral Vestibular Disorders. A Systematic Review With Meta-Analysis. In *Laryngoscope* (Vol. 131, Issue 5, pp. 1110–1121). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/lary.29124>
- Ohlmann, T. (2018). Vicariences: La flexibilité du vivant. *Orientation Scolaire et Professionnelle*, 47(1), 173–203. <https://doi.org/10.4000/osp.5626>
- Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection/control of frames of reference and spatial aspects of field dependence-independence. *Field Dependence-Independence: Cognitive Style across the Life Span.*, 95, 105–129. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001691896000157>
- Oka, M., Ichijo, K., Koda, K., Kamogashira, T., Kinoshita, M., Igarashi, K., Kawahara, T., Takashima, I., Yamasoba, T., & Fujimoto, C. (2023). Preceding Balance Disorders Affect Vestibular Function in Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Journal of Clinical Medicine*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/jcm12072589>
- Olabi, B., Bergquist, F., & Dutia, M. B. (2009). Rebalancing the commissural system: Mechanisms of vestibular compensation. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 19(5–6), 201–207. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0367>

- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Owen, N., Leadbetter, A. G., & Yardley, L. (1998). Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00101-4)
- Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/891390>
- Paplou, V. G., Schubert, N. M. A., van Tuinen, M., Vijayakumar, S., & Pyott, S. J. (2023). Functional, Morphological and Molecular Changes Reveal the Mechanisms Associated with Age-Related Vestibular Loss. *Biomolecules*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/biom13091429>
- Paquet, N., Jehu, D. A., & Lajoie, Y. (2017). Age-related differences in Fukuda stepping and Babinski-Weil tests, within-day variability and test–retest reliability. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s40520-016-0544-3>
- Paredis, S., van Stiphout, L., Remmen, E., Strupp, M., Gerards, M. C., Kingma, H., Van Rompaey, V., Fornos, A. P., Guinand, N., & van de Berg, R. (2021). DISCOHAT: An Acronym to Describe the Spectrum of Symptoms Related to Bilateral Vestibulopathy. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.771650>
- Patti, A., Bianco, A., Şahin, N., Sekulic, D., Paoli, A., Iovane, A., Messina, G., Gagey, P. M., & Palma, A. (2018). Postural control and balance in a cohort of healthy people living in Europe An observational study. *Medicine (United States)*, 97(52). <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013835>
- Pedalini, M. E. B., Cruz, O. L. M., Bittar, R. S. M., Lorenzi, M. C., & Grasel, S. S. (2009). Sensory organization test in elderly patients with and without vestibular dysfunction. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(9), 962–965. <https://doi.org/10.1080/00016480802468930>
- Perucca, L., Robecchi Majnardi, A., Frau, S., & Scarano, S. (2021). Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.761262>
- Peterka, R. J. (2018). Sensory integration for human balance control. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 159). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990a). Age-related changes in human posture control: Motor coordination tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 87–96.
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990b). Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 73–85.
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *Journal of Neurophysiology*, 91(1), 410–423. <https://doi.org/10.1152/jn.00516.2003>
- Pick, H. L., & Warren, D. H. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial

- direction. In *Perception & Psychophysics* (Vol. 6, Issue 4).
- Pineault, K., Pearson, D., Wei, E., Kamil, R., Klatt, B., & Agrawal, Y. (2020). Association between Saccule and Semicircular Canal Impairments and Cognitive Performance among Vestibular Patients. *Ear and Hearing*, 41(3), 686–692. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000795>
- Pinsault, N., & Vuillerme, N. (2009). Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Medical Engineering and Physics*, 31(2), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.08.003>
- Pletcher, E. R., Williams, V., Abt, J. P., Morgan, P. M., Parr, J. J., Wohleber, M. F., Lovalekar, M., & Sell, T. C. (2017). Normative data for the neurocom sensory organization test in us military special operations forces. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 129–136. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>
- Podsiadlo, J. D., Bscpt, S., & Richardson, M. D. J. (1991). The Timed “Up & Go”: A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. In *J Am Geriatr SOC* (Vol. 39).
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000a). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000b). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Popp, P., Wulff, M., Finke, K., Rühl, M., Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). Cognitive deficits in patients with a chronic vestibular failure. *Journal of Neurology*, 264(3). <https://doi.org/10.1007/s00415-016-8386-7>
- Powell, G., Derry-Sumner, H., Rajenderkumar, D., Rushton, S. K., & Sumner, P. (2020). Persistent postural perceptual dizziness is on a spectrum in the general population. *Neurology*, 94(18), E1929–E1938. <https://doi.org/10.1212/WNL.00000000000009373>
- Previc, F. H., Krueger, W. W., Ross, R. A., Roman, M. A., & Siegel, G. (2014). The relationship between vestibular function and topographical memory in older adults. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(JUNE). <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00046>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Probst, T., Dinkel, A., Schmid-Mühlbauer, G., Radziej, K., Limburg, K., Pieh, C., & Lahmann, C. (2017). Psychological distress longitudinally mediates the effect of vertigo symptoms on vertigo-related handicap. *Journal of Psychosomatic Research*, 93, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2016.11.013>
- Quijoux, F., Nicolaï, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code*. In *Physiological Reports* (Vol. 9, Issue 22). American Physiological Society. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>

- Quijoux, F., Vienne-Jumeau, A., Bertin-Hugault, F., Zawieja, P., Lefevre, M., Vidal, P.-P., & Ricard, D. (2020). *Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: a systematic review with meta-analysis*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156816372030252X>
- Radtke, A., Von Brevern, M., Feldmann, M., Lezius, F., Ziese, T., Lempert, T., & Neuhauser, H. (2008). Screening for Menière's disease in the general population - The needle in the haystack. *Acta Oto-Laryngologica*, 128(3), 272–276.
<https://doi.org/10.1080/00016480701509933>
- Raphan, T., & Cohen, B. (2002). The vestibulo-ocular reflex in three dimensions. In *Experimental Brain Research* (Vol. 145, Issue 1, pp. 1–27). <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1067-z>
- Rauch, S. D., Velazquez-Villaseñor, L., Dimitri, P. S., & Merchant, S. N. (2001). Decreasing hair cell counts in aging humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 220–227.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03748.x>
- Raymakers, J. A., Samson, M. M., & Verhaar, H. J. J. (2005). The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait and Posture*, 21(1), 48–58.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.11.006>
- Reason, J. T. (1978). Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829.
<https://doi.org/10.1177/014107687807101109>
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thiebaut, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(8).
<https://doi.org/10.1076/jcen.25.8.1169.16733>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5).
<https://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Rey, M. C. B., Clark, T. K., Wang, W., Leeder, T., Bian, Y., & Merfeld, D. M. (2016). Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. *Frontiers in Neurology*, 7(OCT).
<https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00162>
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195–240.
https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Rizzolatti, G., & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: Anatomy and functions. *Experimental Brain Research*, 153(2), 146–157.
<https://doi.org/10.1007/s00221-003-1588-0>
- Roberts, H. J., Hoppes, C. W., Del Toro, Y. M., Lambert, K. H., & Springer, B. A. (2021). Normative values for the Sensory Organization Test in an active duty military cohort. *Gait and Posture*, 85, 31–37.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.014>
- Rocchi, L., Chiari, L., & Cappello, A. (2004). Feature selection of stabilometric parameters based on principal component analysis. *Medical and Biological Engineering and*

- Computing*, 42(1), 71–79.
<https://doi.org/10.1007/BF02351013>
- Rode, G., Pérennou, D., & Azouvi, P. (2017). Spatial cognition. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 60(3), 123.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.05.003>
- Roh, K. J., Kim, M. K., Kim, J. H., & Son, E. J. (2018). Role of Emotional Distress in Prolongation of Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Journal of Audiology and Otology*, 22(1), 6–12.
<https://doi.org/10.7874/jao.2017.00290>
- Rosa, T. S. M., de Moraes, A. B., & dos Santos Filha, V. A. V. (2016). The institutionalized elderly: Sociodemographic and clinical-functional profiles related to dizziness. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 82(2), 159–169.
<https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.12.014>
- Rouhana, J. (2008). *Flexibilité de l'intégration multi-sensorielle : aspects spatiaux et temporels*.
- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010). The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions - A systematic review of the literature. In *Gait and Posture* (Vol. 32, Issue 4, pp. 436–445).
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>
- Russell, N. A., Horii, A., Smith, P. F., Darlington, C. L., & Bilkey, D. K. (2003). Long-Term Effects of Permanent Vestibular Lesions on Hippocampal Spatial Firing. *The Journal of Neuroscience*, 23(16), 6490–6498.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-16-06490.2003>
- Sackley, C. M., & Lincoln, N. B. (1991). Weight distribution and postural sway in healthy adults. *Clinical Rehabilitation*, 5(3), 181–186.
<https://doi.org/10.1177/02692155910500302>
- San Pedro Murillo, E., Bancroft, M. J., Koohi, N., Castro, P., & Kaski, D. (2023). Postural misperception: a biomarker for persistent postural perceptual dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 94(2), 165–166.
<https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-329321>
- Saniasiaya, J., Islam, M. A., & Salim, R. (2023). The global prevalence of vestibular dysfunction in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. In *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* (Vol. 280, Issue 6, pp. 2663–2674). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1007/s00405-023-07842-z>
- Santos, B. R., Delisle, A., Larivière, C., Plamondon, A., & Imbeau, D. (2008). Reliability of centre of pressure summary measures of postural steadiness in healthy young adults. *Gait and Posture*, 27(3), 408–415.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.05.008>
- Scaglioni-Solano, P., & Aragón-Vargas, L. F. (2014). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board to assess standing balance and sensory integration in highly functional older adults. *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(2), 138–143.
<https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000046>
- Schmidt, J. D., Register-Mihalik, J. K., Mihalik, J. P., Kerr, Z. Y., & Guskiewicz, K. M. (2012). Identifying impairments after concussion: Normative data versus individualized baselines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1621–1628.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318258a9fb>

- Schöne, C. G., Vibert, D., & Mast, F. W. (2024). Executive functions in patients with bilateral and unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Journal of Neurology*, 271(6), 3291–3308. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12267-7>
- Scoppa, F., Gallamini, M., Belloni, G., & Messina, G. (2017). Clinical stabilometry standardization: Feet position in the static stabilometric assessment of postural stability. *Acta Medica Mediterranea*, 33(May), 707–713. https://doi.org/10.19193/0393-6384_2017_4_105
- Semenov, Y. R., Bigelow, R. T., Xue, Q. L., Lac, S. Du, & Agrawal, Y. (2016). Association between Vestibular and Cognitive Function in U.S. Adults: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 71(2), 243–250. <https://doi.org/10.1093/gerona/glv069>
- Sevilla-Garcia, M. A., Boleas-Aguirre, M. S., & Perez-Fernandez, N. (2009). The limits of stability in patients with Ménière's disease. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(3). <https://doi.org/10.1080/00016480802226171>
- Shams, A., Vameghi, R., Shamsipour Dehkordi, P., Allafan, N., & Bayati, M. (2020). The development of postural control among children: Repeatability and normative data for computerized dynamic posturography system. *Gait and Posture*, 78, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>
- Shapcott, K. A., Weigand, M., Glukhova, I., Havenith, M. N., & Schölvinck, M. L. (n.d.). *DomeVR: A setup for experimental control of an immersive dome virtual environment created with Unreal Engine* 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2022.04.04.486889>
- Sharif, M., Saman, Y., Burling, R., Rea, O., Patel, R., Barrett, D. J. K., Rea, P., Kheradmand, A., & Arshad, Q. (2023). Altered visual conscious awareness in patients with vestibular dysfunctions; a cross-sectional observation study. *Journal of the Neurological Sciences*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120617>
- Sharma, K. (1997). Prevalence and correlates of susceptibility to motion sickness. *Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae*, 46(2), 105–121. <https://doi.org/10.1017/S000156600000660>
- Shim, D. B., Song, M. H., & Park, H. J. (2018). Typical sensory organization test findings and clinical implication in acute vestibular neuritis. *Auris Nasus Larynx*, 45(5), 916–921. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.11.018>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: The effect of sensory context. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(1), 10–16. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.1.M10>
- Sibley, K. M., Beauchamp, M. K., Van Ooteghem, K., Straus, S. E., & Jaglal, S. B. (2015). Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(1), 122-132.e29. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.021>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021a). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*,

- 32(2), 122–136.
<https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021b). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136.
<https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Siu, K. C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait and Posture*, 25(1).
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Sjoberg, D., Whiting, K., Curry, M., Lavery, J., & Larmarange, J. (2021). Reproducible Summary Tables with the gtsummary Package. *The R Journal*, 13(1), 570.
<https://doi.org/10.32614/RJ-2021-053>
- Smith, P. F., & Darlington, C. L. (2013). Personality changes in patients with vestibular dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(October), 1–7.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00678>
- Smith, P. F., Horii, A., Russell, N., Bilkey, D. K., Zheng, Y., Liu, P., Kerr, D. S., & Darlington, C. L. (2005). The effects of vestibular lesions on hippocampal function in rats. In *Progress in Neurobiology* (Vol. 75, Issue 6, pp. 391–405).
<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2005.04.004>
- Smith, P. F., & Zheng, Y. (2013). From ear to uncertainty: vestibular contributions to cognitive function. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00084>
- Smith, P. F., Zheng, Y., Horii, A., & Darlington, C. L. (2005). Does vestibular damage cause cognitive dysfunction in humans? *Journal of Vestibular Research*, 15, 1–9.
- Sohsten, E., Bittar, R. S. M., & Staab, J. P. (2016). Posturographic profile of patients with persistent postural-perceptual dizziness on the sensory organization test. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(3).
<https://doi.org/10.3233/VES-160583>
- Solway, A., Miller, J. F., & Kahana, M. J. (2013). PandaEPL: A library for programming spatial navigation experiments. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1293–1312.
<https://doi.org/10.3758/s13428-013-0322-5>
- Son, E. J., Lee, D. H., Oh, J. H., Seo, J. H., & Jeon, E. J. (2015). Correlation between the dizziness handicap inventory and balance performance during the acute phase of unilateral vestibulopathy. *American Journal of Otolaryngology - Head and Neck Medicine and Surgery*, 36(6), 823–827.
<https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2015.07.011>
- Soto, A., Labella, T., Santos, S., Río, M. Del, Lirola, A., Cabanas, E., & Elhendi, W. (2004). The usefulness of computerized dynamic posturography for the study of equilibrium in patients with Meniere's disease: Correlation with clinical and audiologic data. *Hearing Research*, 196(1–2), 26–32.
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.06.010>
- Staab, J. P. (2020). Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Seminars in Neurology*, 40(1), 130–137.
<https://doi.org/10.1055/s-0039-3402736>
- Staab, J. P., Eckhardt-Henn, A., Horii, A., Jacob, R., Strupp, M., Brandt, T., &

- Bronstein, A. (2017). Diagnostic criteria for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD): Consensus document of the committee for the classification of vestibular disorders of the barany society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 27(4), 191–208. <https://doi.org/10.3233/VES-170622>
- Staab, J. P., Rohe, D. E., Eggers, S. D. Z., & Shepard, N. T. (2014). Anxious, introverted personality traits in patients with chronic subjective dizziness. *Journal of Psychosomatic Research*, 76(1), 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2013.11.008>
- Stackman, R. W., Clark, A. S., & Taube, J. S. (2002). Hippocampal spatial representations require vestibular input. In *Hippocampus* (Vol. 12, Issue 3, pp. 291–303). <https://doi.org/10.1002/hipo.1112>
- Starrett, M. J., McAvan, A. S., Huffman, D. J., Stokes, J. D., Kyle, C. T., Smuda, D. N., Kolarik, B. S., Laczko, J., & Ekstrom, A. D. (2021). Landmarks: A solution for spatial navigation and memory experiments in virtual reality. *Behavior Research Methods*, 53(3), 1046–1059. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01481-6>
- Steensnaes, M. H., Knapstad, M. K., Goplen, F. K., & Berge, J. E. (2023). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) and quality of life: a cross-sectional study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(12), 5285–5292. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08040-7>
- Stewart, M. G., Chen, A. Y., Wyatt, J. R., Favrot, S., Beinart, S., Coker, N. J., & Jenkins, H. A. (1999). Cost-effectiveness of the diagnostic evaluation of vertigo. *Laryngoscope*, 109(4), 600–605. <https://doi.org/10.1097/00005537-199904000-00015>
- Stewart, V. M., Mendis, M. D., & Low Choy, N. (2018). A systematic review of patient-reported measures associated with vestibular dysfunction. *Laryngoscope*, 128(4), 971–981. <https://doi.org/10.1002/lary.26641>
- Strupp, M., Bisdorff, A., Furman, J., Hornibrook, J., Jahn, K., Maire, R., Newman-Toker, D., & Magnusson, M. (2022). Acute unilateral vestibulopathy/vestibular neuritis: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(5), 389–406. <https://doi.org/10.3233/VES-220201>
- Strupp, M., & Brandt, T. (2013). Peripheral vestibular disorders. *Current Opinion in Neurology*, 26(1), 81–89. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32835c5fd4>
- Strupp, M., Kim, J.-S., Murofushi, T., Straumann, D., Jen, J. C., Rosengren, S. M., Della Santina, C. C., & Kingma, H. (2017). Bilateral vestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society¹. *Journal of Vestibular Research*, 27(4), 177–189. <https://doi.org/10.3233/VES-170619>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017a). The effect of sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(1), 47–52. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1213418>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017b). The effect of vestibular rehabilitation on sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(3), 275–278. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1244859>
- Summers, S. J., Antcliff, S., Waddington, G., & Wallwork, S. (2022). Reliability and learning effects of repeated

- exposure to the Bertec Balance Advantage sensory organisation test in healthy individuals. *Gait and Posture*, 93, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.02.004>
- Swain, S., & Dubey, D. (2023). Vestibulo-ocular reflex – A narrative review. *Matrix Science Medica*, 7(4), 90. https://doi.org/10.4103/mtsm.mtsm_24_22
- Tahmosybayat, R., Baker, K., Godfrey, A., Caplan, N., & Barry, G. (2018). Movements of older adults during exergaming interventions that are associated with the Systems Framework for Postural Control: A systematic review. In *Maturitas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.03.005>
- Takeda, N., Matsuda, K., Fukuda, J., Sato, G., Uno, A., & Kitahara, T. (2024). Vestibular compensation: Neural mechanisms and clinical implications for the treatment of vertigo. In *Auris Nasus Larynx* (Vol. 51, Issue 2, pp. 328–336). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2023.11.009>
- Taneda, K., Mani, H., Kato, N., Komizunai, S., Ishikawa, K., Maruya, T., Hasegawa, N., Takamatsu, Y., & Asaka, T. (2021). Effects of simulated peripheral visual field loss on the static postural control in young healthy adults. *Gait and Posture*, 86, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.011>
- Thoumie, P. (2012). Intérêts et limites de la posturographie pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *Lettre de Medecine Physique et de Readaptation*, 28(3), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0300-9>
- Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 34(2), 119–126. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x>
- Tiwari, K., Kyrki, V., Cheung, A., & Yamamoto, N. (2021). DeFINE: Delayed feedback-based immersive navigation environment for studying goal-directed human navigation. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2668–2688. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01586-6>
- Tossavainen, T., Toppila, E., Pyykkö, I., Forsman, P. M., Juhola, M., & Starck, J. (2006). Virtual reality in posturography. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10(2), 282–292. <https://doi.org/10.1109/TITB.2005.859874>
- Toupet, M., Chassany, O., Rothoft, J.-M., & Bremaud des Ouillères, L. (2002). Vertiginous Complaints: Usual Presentation in Private Practice and Concrete Aspects of Care and Management. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 12(6), 276–281. <https://doi.org/10.1159/000083116>
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302). <https://doi.org/10.1126/science.301659>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023a). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11), 904–915. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J.

- (2023b). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11). <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018a). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10, pp. 1291–1303). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018b). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018a). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhurst, N. (2018b). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: Passenger behaviour and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444–461. <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- Ukaegbu, C. I. (2014). Kinetosis: All you need to know. *Journal of Biotechnology Science Research*, 1(3), 63–74.
- Vanderkam, P., Blanchard, C., Naudet, F., Pouchain, D., Roussel, H. V., Perault-pochat, M. C., Jaafari, N., & Boussageon, R. (2019). *Efficacy of acetylleucine in vertigo and dizziness: a systematic review of randomised controlled trials*.
- Vasser, M., Kängsepp, M., Magomedkerimov, M., Kilvits, K., Stafinjak, V., Kivisik, T., Vicente, R., & Aru, J. (2017). VREX: An open-source toolbox for creating 3D virtual reality experiments. *BMC Psychology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-017-0173-4>
- Verbecque, E., Costa, P. H. L. da, Meyns, P., Desloovere, K., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016). Age-related changes in postural sway in preschoolers. *Gait and Posture*, 44, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016a). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016b). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Vereeck, L., Wuyts, F., Truijen, S., & Van De Heyning, P. (2008). Clinical assessment of balance: Normative data, and gender and age effects. *International Journal of Audiology*,

- 47(2), 67–75.
<https://doi.org/10.1080/14992020701689688>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 36). <http://www.jstatsoft.org/>
- Visser, J. E., Carpenter, M. G., van der Kooij, H., & Bloem, B. R. (2008). The clinical utility of posturography. *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2424–2436.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.07.220>
- Von Brevern, M., Bertholon, P., Brandt, T., Fife, T., Imai, T., Nuti, D., & Newman-Toker, D. (2015). Benign paroxysmal positional vertigo: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(3–4), 105–117.
<https://doi.org/10.3233/VES-150553>
- Voorhees, R. L. (1990). Dynamic posturography findings in central nervous system disorders. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 103(1), 96–101.
<https://doi.org/10.1177/019459989010300114>
- Vorhees, R. L. (1989). The role of dynamic posturography in neurotologic diagnosis. *Laryngoscope*, 99, 995–1001.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 71(2).
<https://doi.org/10.1007/s00426-005-0018-2>
- Wall, C., Black, F. O., & Wall, C. (1983). Postural stability and rotational tests: Their effectiveness for screening dizzy patients. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 235–246.
<https://doi.org/10.3109/00016488309130940>
- Webster, K. E., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023(3).
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD015188.pub2>
- Webster, K. E., Kamo, T., Smith, L., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Non-pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2023, Issue 3). John Wiley and Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD015333.pub2>
- Weech, S., Moon, J., & Troje, N. F. (2018). Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLoS ONE*, 13(3), 1–21.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>
- Wei, Y., Zheng, J., & So, R. H. Y. (2018). Allocating less attention to central vision duringvection is correlated with less motion sickness. *Ergonomics*, 61(7), 933–946.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1427805>
- Weidt, S., Bruehl, A. B., Straumann, D., Hegemann, S. C. A., Krautstrunk, G., & Rufer, M. (2014). Health-related quality of life and emotional distress in patients with dizziness: A cross-sectional approach to disentangle their relationship. *BMC Health Services Research*, 14(1).
<https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-317>
- Weismiller, S. A., Monaco, R., Womack, J., Alderman, B., Esopenko, C., Conway, F. N., Brostrand, K., Brown, A., de

- Souza, N. L., & Buckman, J. F. (2021). Individual baseline balance assessments in a large sample of incoming NCAA division I athletes using a force plate system. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.26603/001c.18713>
- Whiting, P. F., Weswood, M. E., Rutjes, A. W. S., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. N. M., & Kleijnen, J. (2006). Evaluation of QUADAS, a tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. In *BMC Medical Research Methodology* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-6-9>
- Whiting, P., Rutjes, A. W., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. M., & Kleijnen, J. (2003). *The development of QUADAS: a tool for the quality assessment of studies of diagnostic accuracy included in systematic reviews*. <http://www.biomedcentral.com/1471-2288/3/25>
- Wiener-Vacher, S. R., Hamilton, D. A., & Wiener, S. I. (2013). Vestibular activity and cognitive development in children: perspectives. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00092>
- Wiener-Vacher, S. R., Obeid, R., & Abou-Elew, M. (2012). Vestibular impairment after bacterial meningitis delays infant posturo-motor development. *Journal of Pediatrics*, 161(2). <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.02.009>
- Wolfel, M., Hepperle, D., Purps, C. F., Deuchler, J., & Hettmann, W. (2021). Entering a new Dimension in Virtual Reality Research: An Overview of Existing Toolkits, their Features and Challenges. 2021 *International Conference on Cyberworlds (CW)*, 180–187. <https://doi.org/10.1109/CW52790.2021.00038>
- Wolfson, L., Whipple, R., Derby, C. A., Amerman, P., & Nashner, L. (1994). Gender differences in the balance of healthy elderly as demonstrated by dynamic posturography. *Journals of Gerontology*, 49(4). <https://doi.org/10.1093/geronj/49.4.M160>
- Worden, B. F., & Blevins, N. H. (2007). Pediatric vestibulopathy and pseudovestibulopathy: Differential diagnosis and management. *Current Opinion in Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 15(5), 304–309. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e3282bf139e>
- Xie, Y., Bigelow, R. T., Frankenthaler, S. F., Studenski, S. A., Moffat, S. D., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular loss in older adults is associated with impaired spatial navigation: Data from the triangle completion task. *Frontiers in Neurology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00173>
- Yagi, C., Morita, Y., Kitazawa, M., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., & Horii, A. (2021). Subtypes of Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.652366>
- Yagi, C., Morita, Y., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., Itoh, K., Suzuki, Y., Igarashi, H., & Horii, A. (2022). Gaze instability after exposure to moving visual stimuli in patients with persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1056556>
- Yardley, L., Luxon, L. M., & Haacke, N. P. (1994). A longitudinal study of symptoms, anxiety and subjective well-being in patients with vertigo. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 19(2), 109–116.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1994.tb01192.x>

Yardley, L., Owen, N., Nazareth, I., & Luxon, L. (1998). Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *British Journal of General Practice*, 48(429), 1131–1135.

Zhang, X., Huang, Y., Xia, Y., Yang, X., Zhang, Y., Wei, C., Ying, H., & Liu, Y.

(2022). Vestibular dysfunction is an important contributor to the aging of visuospatial ability in older adults—Data from a computerized test system. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1049806>

Chapitre 3

| Troubles fonctionnels et chroniques

Le troisième chapitre a pour objectif de mettre en place une méthode d'évaluation multimodale, appliquée à une pathologie vestibulaire chronique et de désensibilisation au mal des transports, afin de déterminer des profils sensoriels.

Etude n° 1 : Etude comparative de la performance posturale sur la plateforme.

Etude exploratoire complémentaire de la composante sensorielle.

Etude n°2 : Efficacité de la désensibilisation au mal des transports.

3

– Chapitre 3 –

Application à une population symptomatique : Efficacité de la désensibilisation au mal des transports & Evaluation de l'équilibre d'une vestibulopathie chronique

Dans le deuxième chapitre, nous avons établi une base de données normatives pour une nouvelle plateforme de posturographie dynamique MotionVR, démontrant des qualités métrologiques de fiabilité modérées à bonnes et de validité. D'une manière générale, nos résultats ont permis de montrer que le contrôle postural différait en fonction de l'âge et du genre lorsque des perturbations visuelles et proprioceptives complexes étaient intégrées dans l'évaluation de la fonction d'équilibration. Ces observations constituent une base essentielle à la compréhension des altérations sensori-motrices.

Dans le cadre de la thématique de recherche de l'UR VERTEX 7480 portant sur le domaine neurosensoriel de l'oreille interne, nous cherchons à mieux explorer les mécanismes et conséquences de l'instabilité induite par une atteinte vestibulaire fonctionnelle ou organique par un prisme multisensoriel et cognitif. Les troubles vestibulaires comprennent des syndromes sans atteinte vestibulaire lors d'environnements en mouvement réel (mal des transports) ou virtuel (mal des simulateurs) ou après exposition longue à un environnement en mouvement réel (mal du débarquement). Ils comprennent également des pathologies relatives à une atteinte organique vestibulaire (otoconies, anomalies anatomiques, hyperpression endolymphatique, inflammation, infection, traumatisme, tumeur, toxique) induisant un syndrome vestibulaire aigu (vertige, instabilité, trouble de l'équilibre, troubles végétatifs et cognitifs associés). Ce syndrome évolue vers une guérison complète (récupération de la fonction vestibulaire atteinte) ou une compensation complète de la perte de la fonction vestibulaire par l'autre organe vestibulaire sain (compensation) permettant une récupération complète et disparition des symptômes du patient. L'évolution peut également déboucher vers une compensation partielle de la fonction vestibulaire, ou la progression de l'atteinte au côté controlatéral (maladie de Ménière, aréflexie vestibulaire bilatérale d'autre étiologie) rentrant alors dans un syndrome ou maladie chronique avec des symptômes ou des tableaux cliniques différents (instabilité permanente, troubles de la cognition spatiale, etc...). Les patients souffrant de pathologie vestibulaire peuvent présenter également un mal des transports, avec une prévalence qui sera différente suivant le type et le mécanisme de l'atteinte (réduit en cas d'aréflexie vestibulaire bilatérale, ou aggravé en cas d'atteinte vestibulaire centrale) (Platel et Golding 2016).

L'exploration vestibulaire médicale reste actuellement restreinte aux explorations vestibulaires pures (épreuves caloriques, Headshaking test, VEMPS, etc...) alors que les troubles fonctionnels ou pathologie vestibulaire déstabilisent l'ensemble du réseau de l'équilibration visuo-vestibulo-somesthésique (voire chapitre 1). Ainsi, l'exploration d'une pathologie vestibulaire doit s'accompagner d'une exploration complète de l'équilibration mais également de la cognition spatiale. Le bilan d'équilibration est plutôt réalisé par les kinésithérapeutes vestibulaires pour évaluer et orienter leurs protocoles thérapeutiques, mais pas ou peu pris en compte par les ORL. L'évaluation cognitive reste quant à elle non réalisée dans la majorité des cas. Or, l'exploration multisensorielle est une des clefs de la compréhension du mal des transports et d'amélioration de la thérapeutique dans la pathologie vestibulaire chronique. En intégrant des méthodes d'évaluation avancées et des solutions technologiques, il est possible d'améliorer les résultats cliniques et la qualité de vie des personnes affectées par ces troubles. Faire appel aux industriels dans le domaine de la santé pour développer des solutions innovantes, notamment dans le cadre de syndromes comme le PPPD et le mal des transports, présente plusieurs avantages stratégiques et technologiques. Les industriels disposent des moyens techniques et financiers pour développer des technologies de pointe, apportant ainsi des solutions plus ciblées et personnalisées. L'industrie joue un rôle crucial dans la conception et la validation de dispositifs médicaux avancés, répondant aux exigences réglementaires tout en étant centrés sur les besoins des patients. Les entreprises disposent de processus standardisés pour transformer rapidement des prototypes en produits commercialisables. Les industriels sont souvent pionniers dans l'innovation technologique, et leur collaboration avec des scientifiques permet de transférer ces innovations vers des applications cliniques. Ces collaborations permettent aussi de réduire les coûts des technologies de santé et d'en améliorer l'accessibilité. Grâce à la flexibilité et à la modularité des solutions développées par l'industrie, il devient plus facile de personnaliser les programmes de soins. Nous avons donc souhaité utiliser la plateforme MotionVR, à visée multimodale sensorielle, dans deux études cliniques : l'une portant sur l'exploration et les effets d'une désensibilisation de sujets souffrant d'un mal des transports sévères (SENSORIEL 1) et la seconde portant sur l'évaluation posturale de patients souffrant d'une pathologie vestibulaire chronique (PPPD). Cette dernière a été complétée par une étude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale. En raison de sa forte prévalence et de ses conséquences sur la qualité de vie, nous avons souhaité étudier un syndrome vestibulaire chronique qui sont les étourdissements posturaux-perceptifs persistants ou le PPPD (en anglais, persistent postural-perceptual dizziness). Les processus maladaptatifs de ce syndrome demeurent encore mal compris en raison l'hétérogénéité symptomatologique. L'examen clinique du patient ne permet pas de révéler les particularités individuelles qui sont souvent prédominantes et non négligeables pour le parcours de soin. Cela est d'autant plus vrai que les facteurs provocateurs

(flux visuels complexes, la position debout et/ou des mouvements actifs ou passifs) et les prédicteurs (anxiété, trouble de la personnalité dépendante, vigilance accrue face à des événements perturbateurs, dépendance visuelle) ne sont pas pris en compte lors de l'évaluation et de la prise en charge. Ainsi, ces facteurs nécessiteraient une plus grande attention lors de l'examen clinique du patient souffrant de PPPD. De ce fait, notre objectif était de contribuer à la compréhension de cette population pathologique en proposant une méthode d'évaluation multimodale, afin de déterminer des profils sensoriels en travaillant par réseau de symptômes. Nous nous intéresserons également au syndrome du mal des transports, pour lequel les profils sensoriels sont caractérisés par une grande variabilité inter-individuelle liée à la flexibilité de l'intégration multisensorielle. Un des facteurs explicatifs résiderait dans la manière avec laquelle les individus combinent les différents signaux sensoriels dont ils disposent pour une adaptation comportementale adéquate. A ce jour, les thérapies comportementales, respiratoires ou médicamenteuses restent partiellement efficaces. Dans une deuxième partie, nous avons souhaité évaluer l'efficacité de la plateforme MotionVR dans un programme de rééducation. De ce fait, nous avons réalisé une étude observationnelle des effets de la désensibilisation au mal des transports en utilisant cette plateforme.

Ce troisième chapitre est donc organisé en deux études, complétées par une étude de la composante sensorielle : (1) une étude comparative explorant les capacités posturales de patients atteints de PPPD sur la plateforme, complétée par une étude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale, et (2) une étude observationnelle des effets de la désensibilisation au mal des transports en utilisant la plateforme MotionVR

1. Etude 1 : Etude explorant les capacités posturales de patients atteints de PPPD sur la plateforme de MotionVR.

[En préparation] Julienne A., Besnard S., 2024. Postural control in adults with and without Persistent Postural Perceptual Dizziness on the MotionVR platform.

Nous nous sommes intéressés aux mécanismes maladaptatifs chez des patients souffrant de PPPD, en proposant une approche intégrative et multimodale. Il a été noté qu'un biomarqueur clinique de ce syndrome était un défaut de perception posturale (San Pedro Murillo et al., 2023). Cette perception posturale erronée pourrait s'accompagner d'un problème de stabilisation du regard chez certains patients, exposés à un environnement visuel dynamique (Yagi et al., 2022). Il existerait donc des sous-types de PPPD caractérisés par une exacerbation des symptômes à cause de facteurs visuels et/ou, de mouvements actifs ou mixtes (visuel-mouvements actifs et passifs) (Yagi et al., 2021). Les troubles de la personnalité (anxiété, dépendance psychologique persistante, hypervigilance) et la dépendance visuelle sont des prédicteurs de ce syndrome. Ces facteurs doivent ainsi être considérés dans la prise en charge de ces patients. Nous avons également vu que les caractéristiques cliniques pouvaient varier en fonction de l'âge, avec un profil anxieux observé chez les sujets jeunes et un profil d'instabilité posturale chez les sujets âgés (Fukushima et al., 2024). La compréhension des caractéristiques individuelles qui modulent le contrôle postural peut permettre de mieux distinguer les différences entre les patients en termes de vulnérabilité et de qualité de vie. Il est donc important de s'intéresser à ces différences interindividuelles pour la médecine dite 5P (préventives, personnalisées, participatives, prédictives, basée sur les preuves). Nous avons réalisé une analyse par réseau de symptômes pour mieux comprendre les mécanismes sous-tendant ces profils de patients souffrant de PPPD. Cette exploration requiert une évaluation multimodale réalisée sur la plateforme MotionVR mais également une évaluation cognitive large ainsi qu'une évaluation neuropsychologique incluant la dimension émotionnelle et la personnalité. La plateforme de posturographie dynamique offre la possibilité, grâce à son support visuel et mécanique, de révéler des marqueurs cliniques pertinents pour établir des profils sensoriels liés aux conséquences du PPPD. Dans un premier temps, nous avons souhaité réaliser une étude comparative de la performance posturale des patients et des sujets sains sur la plateforme MotionVR. Dans un deuxième temps, nous nous sommes interrogés sur les facteurs psycho-cognitifs et leur degré d'importance dans le contrôle postural chez les patients en réalisant une étude complémentaire.

Nous avons analysé les données des 48 sujets inclus dans l'étude 2 du deuxième chapitre. Ces sujets représentaient 24 sujets sains (âge : $52,48 \pm 14,08$ ans ; poids : $72,87 \pm 13,89$ kg ; taille : $1,69 \pm 0,10$ m) et 24 patients vestibulaires chroniques (âge : $52,45 \pm 14,04$ ans ; poids : $73,16 \pm 24,09$ kg ; taille : $1,67 \pm 0,09$ m). Les capacités posturales des participants ont été

comparées pour les mêmes tests standardisés, le SOT, l'ADT et le LOS, pour évaluer la performance posturale entre les patients et les sujets sains qui ont été appariés en fonction de l'âge et du genre. Nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes pour étudier les effets du groupe et de la condition sur performance posturale au cours du SOT, de l'ADT et du LOS. Le groupe, la condition (ou les essais) et leur interaction ont été considérés comme des effets fixes dans les modèles. Les participants ont été considérés comme des effets aléatoires. Nous avons aussi utilisé une méthode de Tukey pour les comparaisons multiples post-hoc.

Les résultats ont révélé que les sujets sains étaient significativement plus stables pendant le SOT par comparaison aux patients lorsque les conditions visuelles et proprioceptives étaient perturbées (SOT 2 à 6). Cette différence était davantage importante pour les conditions plus complexes (SOT 4, 5, 6), c'est-à-dire avec des mouvements asservis de la scène visuelle et de la plateforme. Nous avons observé une instabilité accrue à mesure que la difficulté de la condition augmentait. Ces observations démontrent un défaut de repondération visuelle et vestibulaire entraînant une incapacité à maintenir l'équilibre dans des conditions sensorielles contraignantes. Ce défaut de repondération peut être expliqué par une utilisation inefficace des informations somesthésiques, vestibulaires et visuelles que nous avons observé chez les patients par comparaison aux sujets sains. Nous avons également observé des scores composites significativement plus faibles chez les patients. Face à des perturbations sensorielles, les patients adoptent donc des réponses posturales maladaptatives qui seraient expliquées par un défaut de repondération visuelle et vestibulaire. Ces différences ont été observées sur la plateforme de MotionVR qui offre une approche plus écologique de l'analyse posturale en intégrant la réalité virtuelle et un mouvement à 360° modulable à différents niveaux de sensibilité. Dans cette étude, nous avons opté pour un niveau de sensibilité à 50 %, ce qui a permis de confronter les patients à un environnement plus difficile. Nous n'avons pas observé de différence significative entre les patients et les sujets sains pour les scores individuels et composite de l'ADT. Cependant, les sujets sains se sont adaptés progressivement aux inclinaisons de la plateforme, réglée à 25 % de sensibilité, contrairement aux patients. Ce défaut d'adaptation démontre que les patients sont incapables de minimiser les oscillations posturales antéro-postérieures après des inclinaisons inattendues et brusques. De plus, nous avons démontré que les patients étaient plus lents à exécuter des mouvements et présentaient une trajectoire déformée vers l'arrière comparé aux sujets sains pendant le LOS. D'autres sous-paramètres du LOS différaient entre les sujets sains et les patients, indiquant des limites de stabilité réduite chez les patients.

Dans cette étude comparative, nous avons démontré une instabilité posturale, un défaut d'adaptation ainsi que des limites de stabilité réduite chez des patients atteints de PPPD, sur la plateforme de MotionVR.

Résultats complémentaires : Etude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale.

Pour compléter les précédentes observations sur l'exploration posturale, nous avons réalisé une évaluation cognitive et neuropsychologique de 30 patients vestibulaires chroniques (âge : 52.35 ± 13.12 ans ; poids : 73.16 ± 24.09 kg ; taille : 1.67 ± 0.09 m), dont 22 femmes (âge : 54.72 ± 11.85 ans ; poids : 65.65 ± 16.60 kg ; taille : 1.63 ± 0.06 m) et 8 hommes (âge : 45.82 ± 15.00 ans ; poids : 91.40 ± 30.67 kg ; taille : 1.78 ± 0.04 m). Les patients ont complété des questionnaires permettant de déterminer le nombre d'anomalies cervicales, dentaires, orthopédiques et visuelles perçues (Anomalies_T) ainsi que la susceptibilité au mal des transports (fMSSQ_T) et visuellement induits (VIMS_T). Les patients ont aussi réalisé une batterie de tests évaluant les composantes suivantes, avec l'aide et l'expertise du Professeur Eric Bui pour les dimensions psycho-psychiatriques :

Tableau 6. Les différentes composantes du bilan multimodal.

Composantes	Description	Evaluation
Dimension des caractéristiques psychologiques	Ensemble des caractéristiques personnelles (ex : personnalité) et des processus psychologiques (ex. : gestion particulière du stress et de l'anxiété) qui relèvent du fonctionnement normal de la personne	L'Index de sensibilité à l'anxiété (version française de l'Anxiety Sensitivity Index, Peterson et Reiss, 1992; Reiss et al., 1986) ou ASI permet d'évaluer la peur des sensations corporelles liées à l'anxiété. Il est composé de 36 items (échelle de type likert à cinq points) évaluant l'impact négatif d'une situation anxiogène (peur, embarras, perte de contrôle...).
		Dizziness Handicap Inventory ou DHI évalue les patients vertigineux avec ou sans troubles de l'équilibre qui comprend 25 items répartis en 3 dimensions : – Fonctionnel (9 questions) – Emotionnel (9 questions) – Physique (9 questions)
		Life Events Checklist (version DSM-5) ou LEC-5 permet de déterminer les événements potentiellement traumatisants vécues par une personne au cours de sa vie. Il y a six réponses nominales proposées (Cela m'est arrivé ; J'en ai été témoin ; Appris à ce sujet ; Une partie de mon travail ; Pas sûr ; Ne s'applique pas).
		Post-traumatic Stress Disorder Checklist (version DSM-5) ou PCL-5 est composée de 20 items permettant d'évaluer les symptômes de l'état de stress post-traumatique, au cours du dernier mois, d'après le DSM-5.
Dimension des habiletés cognitives	Déficit qui empêche la personne de s'adapter à son environnement ou à une situation particulière	Perception de la verticale : Verticale Visuelle Subjective (VVS) et le Rod Frame Test (RFT) permettent d'évaluer la perception de la verticale. Le participant doit ajuster une barre lumineuse dévié à gauche et à droit dans un environnement dévié

		(RFT) et sans cadre (VVS), par détermination visuelle de la verticale.
Dimension des habiletés motrices	Problèmes de la fonction motrice ou toutes autres sensations physiques	Bilan posturologique : SOT, ADT, LOS

L'étude 3 du précédent chapitre nous a permis de démontrer que les scores du SOT, de l'ADT et les scores globaux du LOS présentaient une fiabilité modérée à bonne. Or, nous retiendrons dans cette partie complémentaire seulement les paramètres ayant démontré une bonne valeur discriminante. Parmi ces derniers, nous avons observé que les scores individuels 2 à 6 et les scores composites du SOT, les ratios sensoriels somesthésique, vestibulaire et visuel ainsi que les scores globaux pour le temps de réaction et le contrôle directionnel permettaient de distinguer entre les individus sains et des patients. Cette réduction du nombre de paramètres fiables et valides représente une étape cruciale dans notre démarche qui facilitera leur utilisation et interprétation dans la pratique clinique. Ce sont les composites du SOT et les scores globaux pour le temps de réaction et le contrôle directionnel que nous utiliserons en tant que variable dépendante pour l'analyse des profils de la composante posturale.

Nous avons adopté une approche basée sur les données, dite data-driven, visant à révéler des relations entre les variables décrites. Cette approche data-driven a été réalisée en utilisant la méthode de Boruta qui permet de sélectionner les variables les plus importantes. Cette sélection va classer après plusieurs itérations, les variables en trois catégories : zone de refus, zone d'indécision et zone d'acceptation. Les variables dans la zone d'acceptation sont considérées comme prédictives pour la variable dépendante. Pour déterminer les prédicteurs potentiels du contrôle postural, nous avons donc intégré les variables des composantes psycho-cognitives et des informations médicales complémentaires dans nos modèles. Nous avons réalisé une imputation de données en utilisant une méthode non-paramétrique par forêts aléatoires (non-parametric imputation by chained random forest) pour traiter les données manquantes. L'imputation permet d'augmenter la taille de l'échantillon en prédisant les valeurs, avec précision et robustesse.

Nous avons observé que l'anxiété liée aux inquiétudes physiques (ASI_SubP) et les ratios somesthésiques (SOM), vestibulaires (VEST) et visuels (VIS) sont considérés comme prédictifs pour le score composite du SOT (Figure 16). Pour le temps de réaction global du LOS, nous avons observé une seule variable dans la zone d'indécision : le score total pour la susceptibilité au mal des transports (Figure 17). Pour le contrôle directionnel du LOS, le score total pour la susceptibilité au mal des transports (fMSSQ_T) était une variable prédictive (Figure 18).

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une analyse corrélacionnelle pour étudier les relations entre les variables. Les résultats significatifs sont présentés sur la figure 19. L'analyse corrélacionnelle montre des corrélacions positives modérées entre plusieurs variables clés :

- Entre les ratios visuel (VIS), vestibulaire (VEST) et somesthésique (SOM) et le score composite (EQL_Comp), reflétant une interconnexion entre ces systèmes sensoriels dans les capacités posturales.
- Entre l'anxiété liée aux inquiétudes physiques (ASI_SubP), l'anxiété générale (ASI_T) et le ratio visuel (VIS), indiquant que les personnes plus anxieuses étaient plus dépendantes des informations visuelles pour maintenir l'équilibre.
- Entre le score total pour la susceptibilité au mal des transports (fMSSQ_T) et le nombre d'anomalies rapportées, et entre la susceptibilité au mal des transports visuellement induits (VIMS_T) et au mal des transports en général (fMSSQ_T), suggérant que les personnes plus sensibles au mal des transports ont rapporté plus d'anomalies et peuvent être plus vulnérables dans des environnements virtuels nécessitant un contrôle postural efficace.
- Entre les symptômes de l'état de stress post-traumatique (PCL_T), l'anxiété liée aux inquiétudes physiques (ASI_SubP) et l'anxiété générale (ASI_T), soulignant qu'un état de stress élevé peut amplifier l'anxiété générale et celle liée à la santé physique. De même, nous avons observé une corrélation entre l'anxiété liée à la santé physique (ASI_SubP) et l'anxiété liée aux symptômes cognitifs (ASI_SubC) qui reflète une interaction entre les dimensions physiques et cognitives de l'anxiété.

En conclusion, cette étude complémentaire a permis de mettre en lumière certaines variables psycho-cognitives pouvant influencer les capacités posturales des patients atteints de PPPD, sur la plateforme MotionVR. Parmi ces variables, nous avons observé que les ratios sensoriels (SOM, VIS, VEST) étaient les plus prédictifs des capacités posturales pendant le SOT, corroborant les résultats issus de la littérature sur le rôle crucial des systèmes somesthésique, vestibulaire et visuel pour la fonction d'équilibration. De plus, les résultats ont démontré que l'anxiété liée à la santé physique (ASI_SubP) avait un impact notable sur les capacités posturales, c'est-à-dire qu'une anxiété élevée pourrait réduire la capacité à bien gérer les situations posturales contraignantes. Concernant le temps de réaction global, seul le score total pour la susceptibilité au mal des transports (fMSSQ_T) se trouvait dans la zone d'indécision. Cela signifierait que, même si ce facteur pourrait avoir une certaine importance, son impact n'était pas clair. Pour le contrôle directionnel global, la susceptibilité au mal des transports (fMSSQ_T) était prédictive, ce qui suggère que les personnes ayant une plus grande sensibilité au mal des transports pourraient avoir plus de difficultés à gérer leur contrôle directionnel lors de mouvements volontaires.

Ainsi, les informations sensorielles et l'état émotionnel influencent fortement les capacités posturales. Ces variables doivent être considérées lors de l'exploration posturale de patients atteints de PPPD et pour faciliter le développement des programmes personnalisés de rééducation.

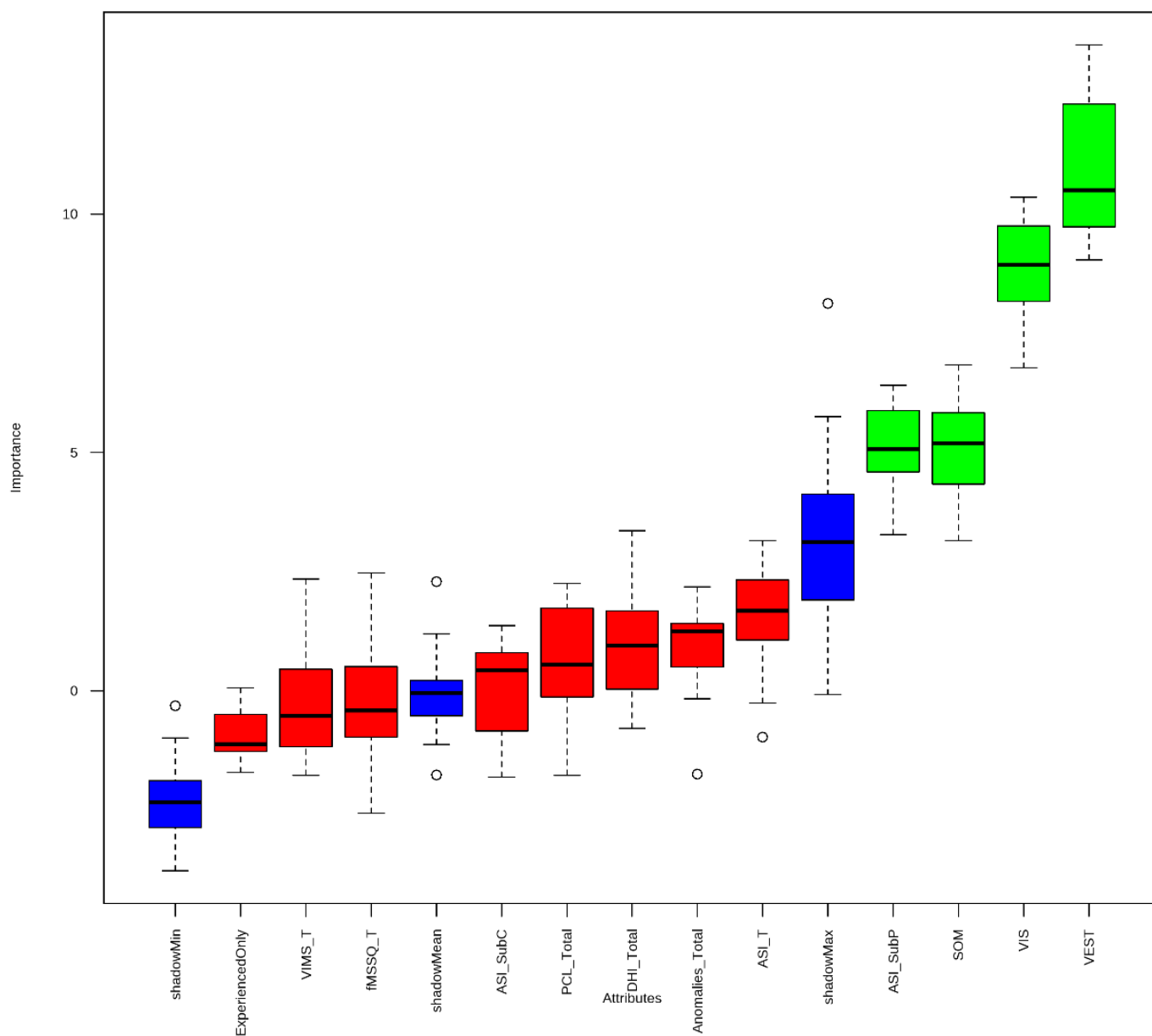


Figure 16. La méthode Boruta pour le score composite du SOT.

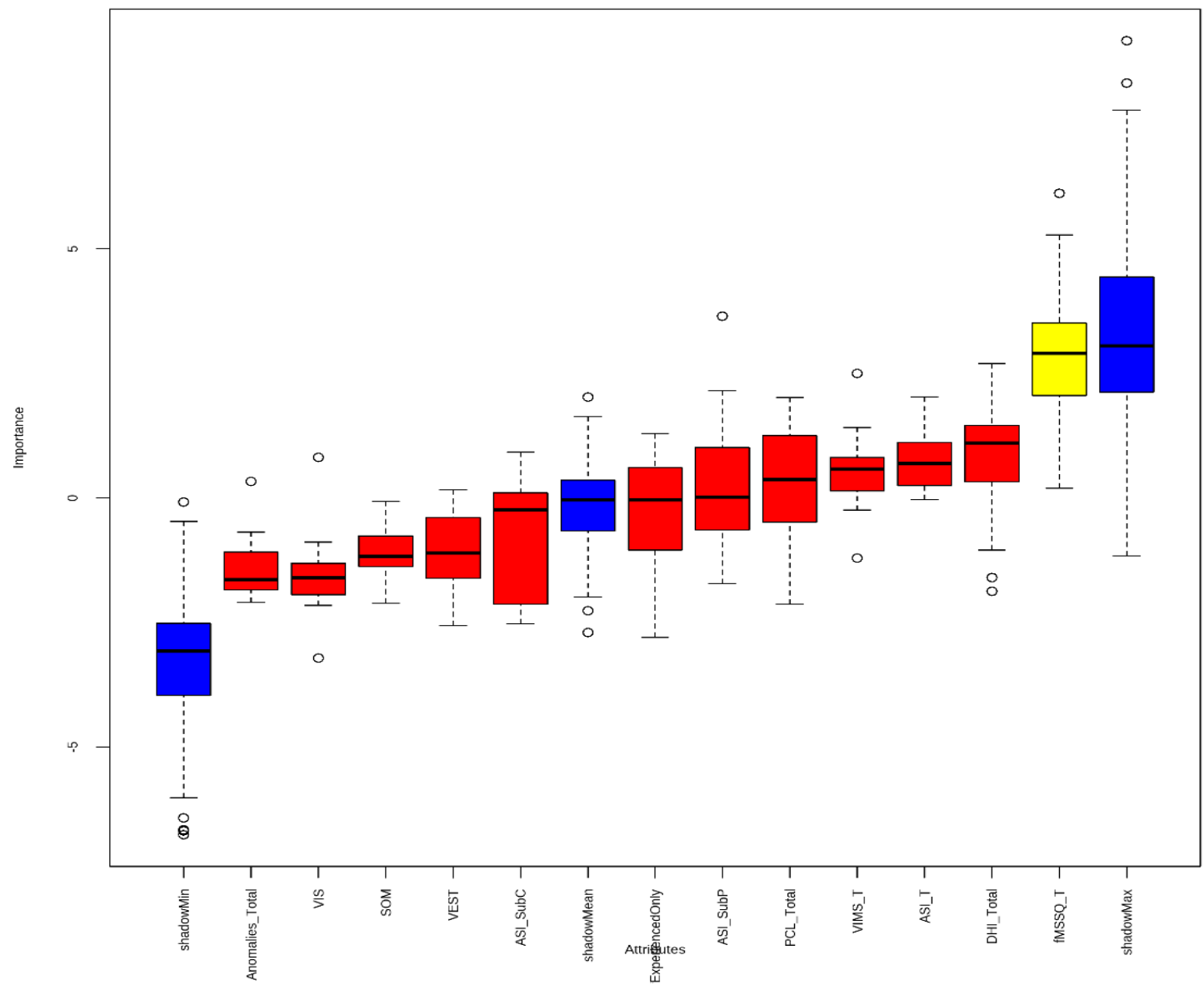


Figure 17. La méthode Boruta pour le temps de réaction global du LOS.

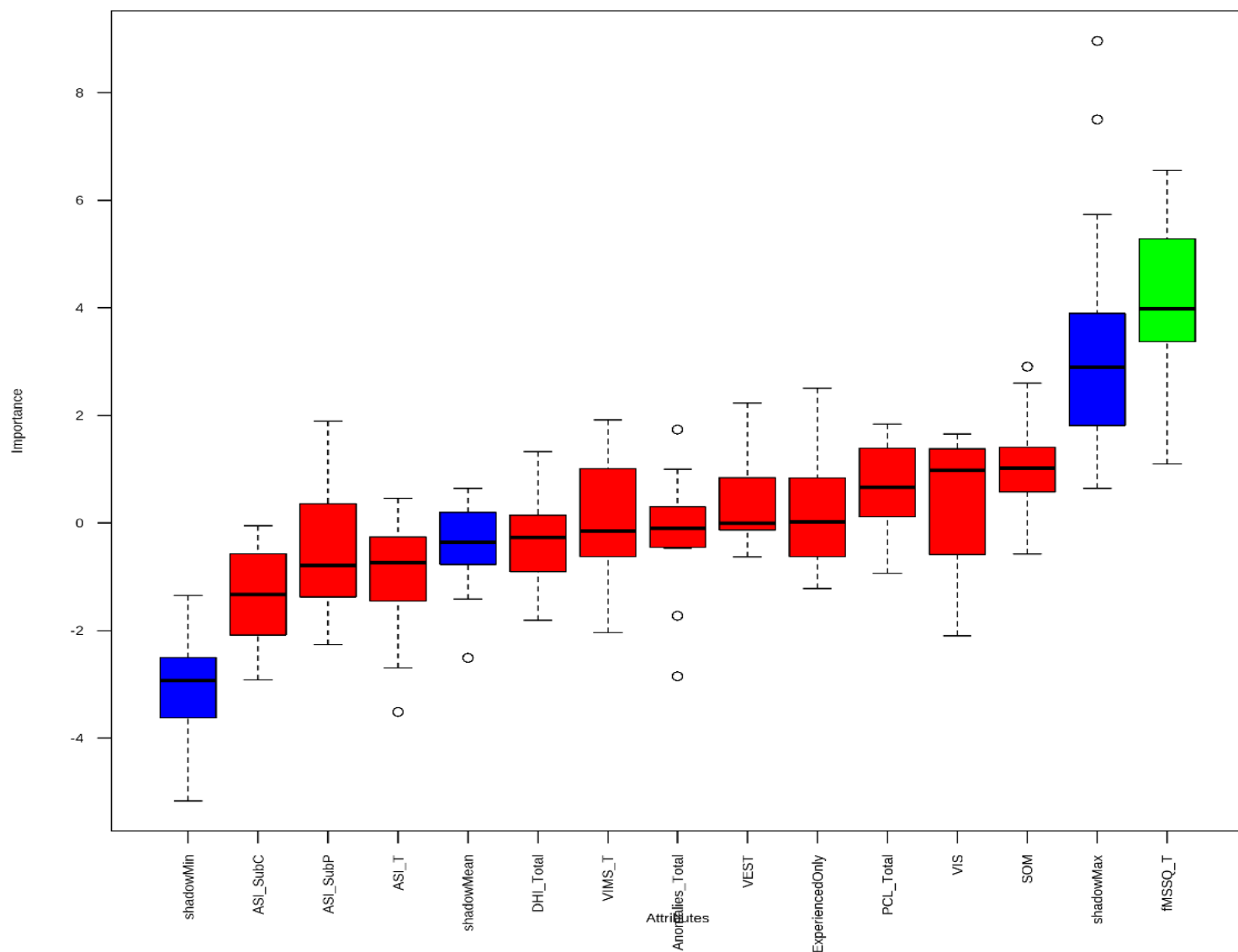


Figure 18. La méthode Boruta pour le contrôle directionnel global du LOS.

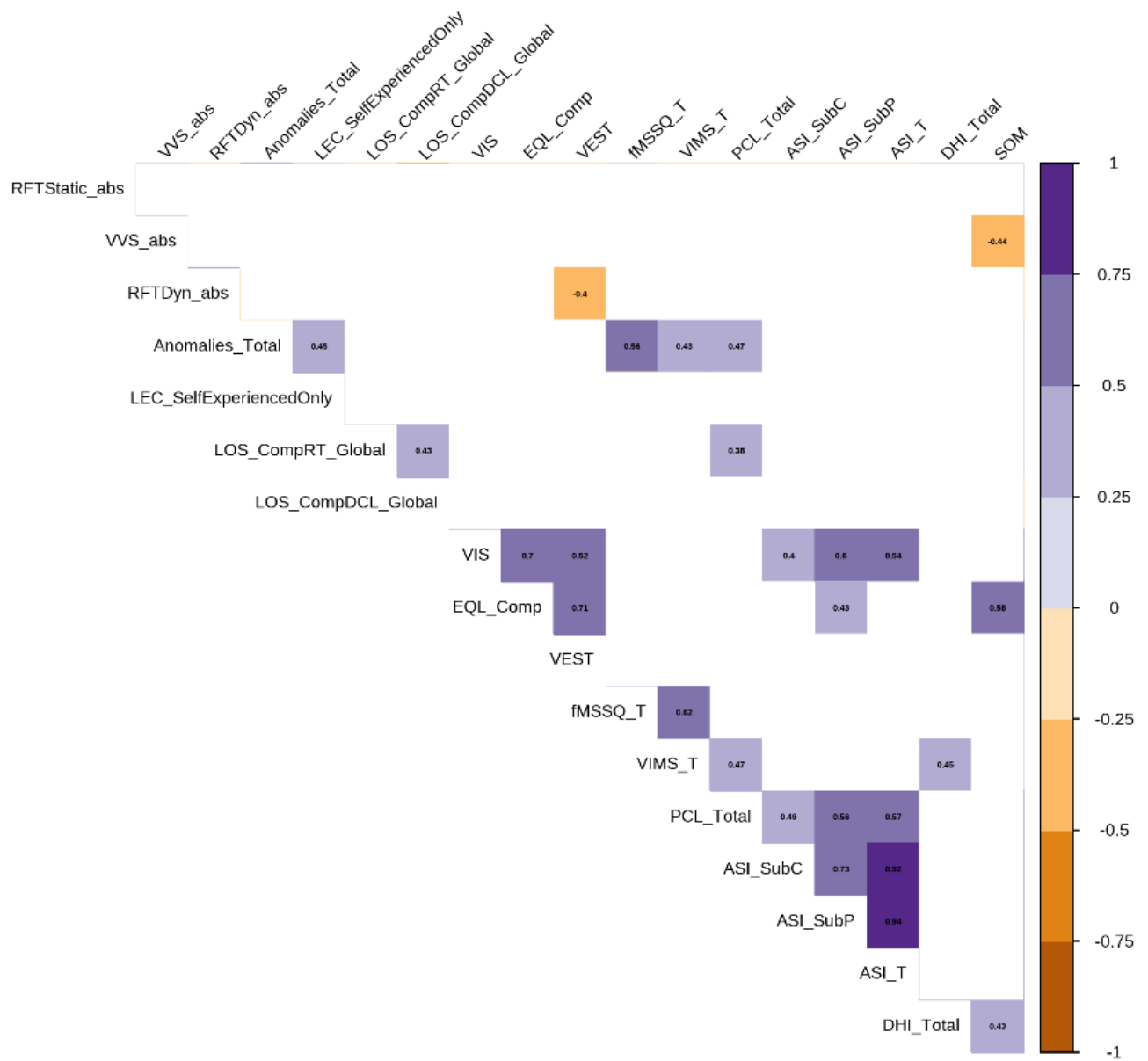


Figure 19. Corrélation entre les différentes variables.

Postural control in adults with and without Persistent Postural Perceptual Dizziness on the MotionVR platform

Angela Julienne¹, Laetitia Plisson², Stéphane Besnard^{1(*)}

¹ VERTEX Research Lab, Caen University, Caen, France

² Service ORL, CHU de Caen, France

ABSTRACT

Persistent postural perceptual dizziness (PPPD) is the commonest chronic functional vestibular disorder. It is characterized by one or more persistent symptoms of dizziness, unsteadiness or non-spinning vertigo lasting at least three months. Previous studies have reported impaired postural control, reach, and ambulation as well as abnormal sensory reweighting and strategies. Postural misperception has been suggested to be a biomarker and balance could be a potential rehabilitation outcome. Thus, dynamic posturography is a clinical useful tool to assess varying degrees of functional impairments in patients with PPPD. While there are several standardized methods to characterize balance patterns, methodological disparities exist which limit understanding of such mechanisms in PPPD. Recently, computerized posturography systems using VR have become available to provide an ecologically valid alternative to traditional posturography tools. However, studies quantifying balance in patients with PPPD using CDP integrated with VR are limited. No studies have investigated clinical utility of the MotionVR system, which is a newly developed CDP device paired with VR and moveable platform. Differences may exist due to the MotionVR's platform differing from traditional systems. This study aimed at investigating postural patterns in chronic vestibular patients and healthy subjects using the MotionVR platform.

A total of 48 participants were recruited: 24 chronic vestibular patients and 24 healthy subjects. The participants completed (1) comprehensive clinical examination, (2) quantitative posturographic evaluation using the MotionVR system (Virtualis, Montpellier) that included the sensory organisation test (SOT), the adaptation test (ADT) and the limits of stability test (LOS). Results revealed poorer stability in patients compared to controls for the SOT individuals and composite scores as well as lower sub-parameters scores for the LOS. Increases sway was observed for condition 2 through 6 for the SOT and altered sensory reweighting for balance in patients. No significant differences were reported for the ADT between both groups inside from a learning effect in healthy subjects. Only a few individual parameters of the LOS were impaired in mainly backward quadrants in patients.

This is the first study to investigate postural patterns in patients with PPPD using the SOT, ADT and LOS on the MotionVR system. Our findings revealed impaired postural control and ability to progressively reduce postural oscillation as well as reduced limits of stability. Future studies should pursue investigations in larger samples for better understanding of the clinical utility such CDP tools and their potential for differential diagnosis of vestibular disorders.

Keywords: clinical utility, postural patterns, computerized dynamic posturography, virtual reality

Funding statement: This study was funded as part of a CIFRE thesis under a public-private contract by the ANRT with Virtualis SAS, grant number 2019/1807.

1. Introduction

Persistent postural perceptual dizziness (PPPD) is a common chronic functional vestibular disorder that is characterized by one or more persistent symptoms of dizziness, unsteadiness or non-spinning vertigo lasting at least three months (Staab, 2020; Staab et al., 2017). These symptoms are exacerbated by environmental or psychological factors such as active or passive self-motion, exposure to complex visual environments and depersonalization or derealization. Currently, the pathophysiology of PPPD remains poorly understood since its diagnostic criteria was established quite recently. In recent decades, an increasing number of studies have shed light on clinical and neurophysiological characteristics (Adamec et al., 2020), key mechanisms and predictors (Breinbauer et al., 2020; Lubetzky et al., 2021; Oka et al., 2023; Powell et al., 2020; San Pedro Murillo et al., 2023; Trinidad et al., 2023b; Trinidad & Goebel, 2018b; Yagi et al., 2022), brain mechanisms (Indovina et al., 2021) and potential therapeutic interventions (Webster, Harrington-Benton, et al., 2023; Webster, Kamo, et al., 2023). Important predictors that have been identified are maladaptive behavior following a vestibular disorder, hypervigilance, visual dependence or alternate anxiety or traumatic events. Postural misperception has been suggested to be a biomarker (San Pedro Murillo et al., 2023). Furthermore, impaired balance could be a potential rehabilitation outcome (Kobel et al., 2023). Previous studies have reported altered postural strategies in complex visual and cognitive environments (Lubetzky et al., 2021), impaired postural control, reach, and ambulation as well as abnormal sensory reweighting (McCaslin et al., 2022; Sohsten et al., 2016). These studies have demonstrated that patients had lower individual scores in more difficult conditions and composite scores compared to healthy subjects for the Sensory Organization Test (SOT). Over more, these patients swayed more in the anteroposterior axis, which was associated with high visual dependence. During static posturography, increased instability is also observed for patients compared to healthy controls (Yagi et al., 2022). Interestingly, a passive-motion dominant subtype was observed in older individuals (Yagi et al., 2021). Fukushima et al. (2024) showed that elderly patients exhibited a balance specific profile compared to younger patients who had an anxiety-related profile.

Thus, posturography can reveal varying degrees of functional impairments in patients with PPPD. Static and dynamic posturography are commonly used to quantify postural control using different sensory perturbations and postural support configurations. Unexpected and difficult perturbations in the dynamic assessment allows for in depth investigation of postural strategies and sensory reweighting, adaptive capacities and motor coordination (McCollum et al., 1996; L. M. Nashner et al., 1989; L. M. Nashner & Peters, 1990). Such findings on varied posturography profiles in PPPD could be potential indicators for better patient management. While there are several standardized methods to characterize balance patterns, including the Sensory Organization Test, the Adaptation Test, the Motor Control Test and the Limits of Stability test, methodological disparities exist which limit interpretation and generalizability of these findings. Computerized posturography systems (CDP) using VR have recently become available to provide an ecologically valid alternative to traditional posturography tools. Actually, these traditional tools fail to capture dynamic aspects of postural control in a more complex and realistic environment compared to immersive technologies. However, studies quantifying balance in patients with PPPD using CDP integrated with VR are limited.

The MotionVR® system is a computerized posturography system integrated with paired VR and platform movement to provide a wide range of sensory perturbations. Unlike the NeuroCom and Bertec systems, which rely only on sagittal plane movements, the movements of the force platform are controlled and quantifiable at 360°. The head mounted display combined with the moveable platform creates immersive dynamic constraints. The MotionVR platform is commercially available and utilized worldwide. Recently, psychometric properties

and reference values have been reported for the MotionVR platform. When compared to the Bertec and Neurocom systems, MotionVR seemed to be more sensitive in assessing postural strategies and motor responses as well as sensory reweighting during perturbed conditions. The platform can be used to propose a more reliable and unique insight into postural control in immersive and dynamic environments. Such constraints could further reveal differences in postural performance existing in patients with PPPD using recent technological tools developed in posturography. As such, these differences have yet to be determined in this context.

Therefore, this study aimed to explore the clinical utility of MotionVR to identify changes in postural control and strategies, sensory reweighting in complex visual and proprioceptive environments as well as adaptive capacities and voluntary motor control in patients with PPPD and healthy controls during the SOT, ADT and LOS tests. We hypothesized that the CDP paired with VR and moveable platform would reveal changes in balance modulated by task difficulty, associated with platform sensitivity, and sensory perturbations and patients with PPPD would exhibit greater impaired balance compared to age and gender-matched healthy subjects.

2. Materials and methods

2.1. Participants

We included 24 chronic vestibular patients (age: 52.48 ± 14.08 years; weight: 72.87 ± 13.89 kg ; height: 1.69 ± 0.10 m) who were matched to healthy controls (age: 52.45 ± 14.04 years ; weight: 73.16 ± 2409 kg ; height: 1.67 ± 0.09 m) based on age and gender. These patients aged 20 to 89 years old had participated in the study registered at Clinical Trials (clinicaltrials.gov) with identifier NCT05525728. Patients were recruited from the ENT department and were consulted during a medical visit regarding their symptoms. Vestibulopathy diagnosis was established using the Barany Society criteria. Participants were asked to provide written informed consent prior to the study, in accordance with the Declaration of Helsinki. All participants were able to ask questions and were informed that withdrawal from the study, without requiring a specific reason, was possible. Personal information was pseudonymized.

2.2. Procedure

Three tests were conducted on the MotionVR CDP platform (Virtualis, Montpellier; <https://virtualisvr.com/>). HTC Vive VR head-mounted display was used during the Sensory Organization Test (SOT), the Adaptation Test (ADT), and the Limits of Stability (LOS). To reduce error, the same tester was used to conduct all three examinations. Sociodemographic, anthropometric, general health questionnaire data were recorded.

Participants stood on the platform with bare feet while the researcher aligned their medial malleolus into the standardized position, parallel to the horizontal line on the force platform. Detailed explanations of each test or trial were provided to each participant prior to beginning any test. Participants were asked to stand quietly, with their arms along their sides and to look straight ahead. The healthy participants performed the CDT tests during two sessions one week apart.

The SOT was the first test performed. It consists of 6 different sensory conditions averaged over three trials lasting 20 seconds each: 1) eyes open with stable platform, 2) eyes closed with stable platform, 3) sway-referenced visual surround, 4) eyes open with sway-referenced platform, 5) closed eyes with sway-referenced platform and 6) sway-referenced visual support and platform. Sway-referenced platform was quantifiable at 360° and set at 50 % of movement sensitivity. The SOT objectively identifies visual, vestibular, and proprioceptive sensory reweighting during movement in different conditions. Equilibrium scores (ES) for each

condition, sensory ratios and a composite score are provided in percentages. Better postural performance was measured as a score of 100.

The Adaptation Test (ADT) consisted of five trials with two unexpected platform rotations (upwards or downwards). The ADT is used to analyse the adaptive capacity to reduce postural oscillation and maintain balance when the platform undergoes irregular and unexpected rotations. Platform rotations were set at 25 % of movement sensitivity. Values are provided for each rotation trial (five toes up, five toes down) and measured as sway energy, a non-dimensional score. The sway energy measures the force produced to minimize the anterior-posterior oscillation and progressively recovers after the rotations. Abnormal responses can signal possible falls.

The Limits of Stability Test (LOS) is composed of eight trials during which an individual will voluntarily lean in eight directions from a midpoint as follows: forward, forward right, right, backward right, backward, backward left, left, forward left. Values are provided for target direction, each cardinal direction (forward, backward, right, and left), as well as a composite score. The LOS is used to assess voluntary motor control and determine the cone of stability. The theoretical stability limits in the antero-posterior axis correspond approximately to 12.5 degrees and 16 degrees in the mediolateral axis in healthy individuals. The parameters reported are Directional Control (DCL), Reaction Time (RT), End Point Excursion (EPE), Maximum Excursion (MXE) and Movement Velocity (MVL). DCL provides information about the quality of movement control used to move in the target direction. Normal performance (straight path) is represented by values approaching 100%. However, lower values can indicate a distorted path toward the target. RT reflects the onset of movement after start cue. Increased values indicate response delays due to aging or psycho-cognitive factors. EPE indicates the magnitude of movement on the first attempt. MXE indicates the farthest distance during the trial. Reduced excursion parameters reflect limited range of motion. MVL reflects the speed of movement. Lower values indicate slowed movement due to neuromuscular impairments.

2.3. Instrumentation

The MotionVR dynamic platforms are composed of two independent platforms, with eight force sensors (four sensors per foot) integrated. Regarding the responsiveness of the platform, the dynamic platform is characterized by three degrees of freedom (anteroposterior, mediolateral, and top/bottom), 2G acceleration, and a speed of 280 mm/s, as well as amplitudes of 24 ° front/back, 26° left/right, and a height of 15 cm (top/bottom). Movements are controlled and quantifiable at 360° (adjustable height of the moving plate). Platform movement sensitivity can also be set at various percentages ranging from 0 (less movement) to 100 % (more movement). The dynamic platform guardrail is also adjustable, providing the ability to work with people of various sizes. The computerized dynamic posturography device is depicted in Figure 1.



Figure 1. Illustration of the MotionVR system.

3. Statistical Analysis

Data were extracted from the MotionVR system and analysed using R software (version R.4.4.1). For sociodemographic characteristics, descriptive statistics are presented as marginal means and standard error (SEM) unless stated otherwise. LMM assumptions were checked using the performance package (Lüdtke et al., 2021). To fit and test the LMMs, the lme4 (Bates et al., 2015), lmerConvenienceFunction (Tremblay and Ransijn, 2015) and lmerTest (Kuznetsova et al., 2017) packages were used. P-values were obtained by likelihood ratio tests of the full model with the effect in question against the model without the effect ($\alpha = 0.05$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons were calculated using the emmeans package for interaction effects, if no main effect were found (Lenth, 2024). Models were adjusted for Age, Gender, Weight and Height.

4. Results

Sensory Organization test. The LMMs on the SOT scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(6) = 12.888$, $p = 0.045$.) as well as main effects of Group ($\chi^2(1) = 18.184$, $p < 0.000$) and Condition ($\chi^2(6) = 583.212$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups (per conditions) showed that healthy participants were more stable than patients for SOT 2 ($p = 0.001$), for SOT 3 ($p < 0.000$), for SOT 4 ($p < 0.000$), for SOT 5 ($p = 0.005$), for SOT 6 ($p = 0.044$) and for the composite score ($p < 0.000$). Between conditions both groups swayed more in SOT 4 - SOT 6 compared to SOT 1 - SOT 3 ($p < 0.000$). Healthy subjects were more stable in SOT 4 than SOT 6 ($p < 0.000$). Patients were more stable in SOT 1 than SOT 3 ($p = 0.024$).

The LMMs on the SOT ratios revealed a significant 2-way interaction between Group and Ratio ($\chi^2(3) = 24.831$, $p < 0.000$.) as well as main effects of Group ($\chi^2(1) = 24.941$, $p < 0.000$) and Ratio ($\chi^2(3) = 364.226$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups (per ratio) showed that healthy participants were able to use somatosensory, vestibular and visual information more efficiently than patients (SOM, $p = 0.02$; VEST, $p < 0.001$; VIS < 0.000). Between ratios, both groups used somaesthetic information more compared to vestibular and visual inputs ($p < 0.000$). Healthy subjects used more appropriately vestibular inputs compared to visual cues ($p = 0.023$). Visual dependence was higher than vestibular and visual ratios for both groups ($p < 0.000$). The SOT results are illustrated on Figure 2 and Figure 3.

Adaptation test. The LMMs on the mean ADT scores did not reveal significant differences between healthy subjects and patients. The LMMs on the ADT individual scores revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(9) = 26.570$, $p = 0.002$.) and of Condition ($\chi^2(9) = 39.775$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups (per conditions) showed no significant differences between patients and healthy subjects. For healthy subjects, sway energy was higher in TU 1 compared to TU 4 ($p = 0.006$), TU5 ($p < 0.000$) as well as in TD 6 compared to TD 8 ($p = 0.038$), ADT TD 9 ($p = 0.001$) and TD 10 ($p < 0.000$).

Limits of Stability. The LMMs on the LOS reaction time revealed main effects of Group ($\chi^2(1) = 6.072$, $p = 0.014$) and Condition ($\chi^2(7) = 16.578$, $p = 0.020$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups showed that healthy subjects had shorter response delays after cue onset than patients ($p = 0.021$). Between conditions, results did not reveal any significant differences between for both groups. Figure 4 illustrates the differences between healthy subjects and patients for reaction time.

The LMMs on the LOS directional control revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(7) = 35.172$, $p < 0.000$.) as well as main effects of Group ($\chi^2(1) =$

6.569, $p < 0.000$) and of Condition ($\chi^2(9) = 127.378$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups showed that patients had more distorted paths toward the target in backward ($p < 0.000$), backward-right ($p < 0.000$) and backward-left ($p = 0.012$) directions than healthy subjects ($p = 0.021$). Between conditions, healthy subjects had straighter leaning paths in forward vs. backward-left ($p = 0.009$) as well as in right direction compared to backward-right ($p = 0.034$), backward ($p = 0.037$) and backward-left ($p = 0.001$). However, a more distorted path was observed in backward-left direction compared to left ($p = 0.007$) for these participants. For patients, straighter paths toward the target were observed in forward direction compared to backward-right, backward, backward-left (for all, $p < 0.000$) as well as in forward-right compared to backward-right, backward, backward-left (for all, $p < 0.000$). Leaning paths were more distorted in backward-right compared to left and forward-left (for both, $p < 0.000$) as well as in backward compared to left and forward-left (for both, $p < 0.000$). These differences were also observed between backward-left vs. left and forward-left (for both, $p < 0.000$). Figure 5 illustrates these results for directional control.

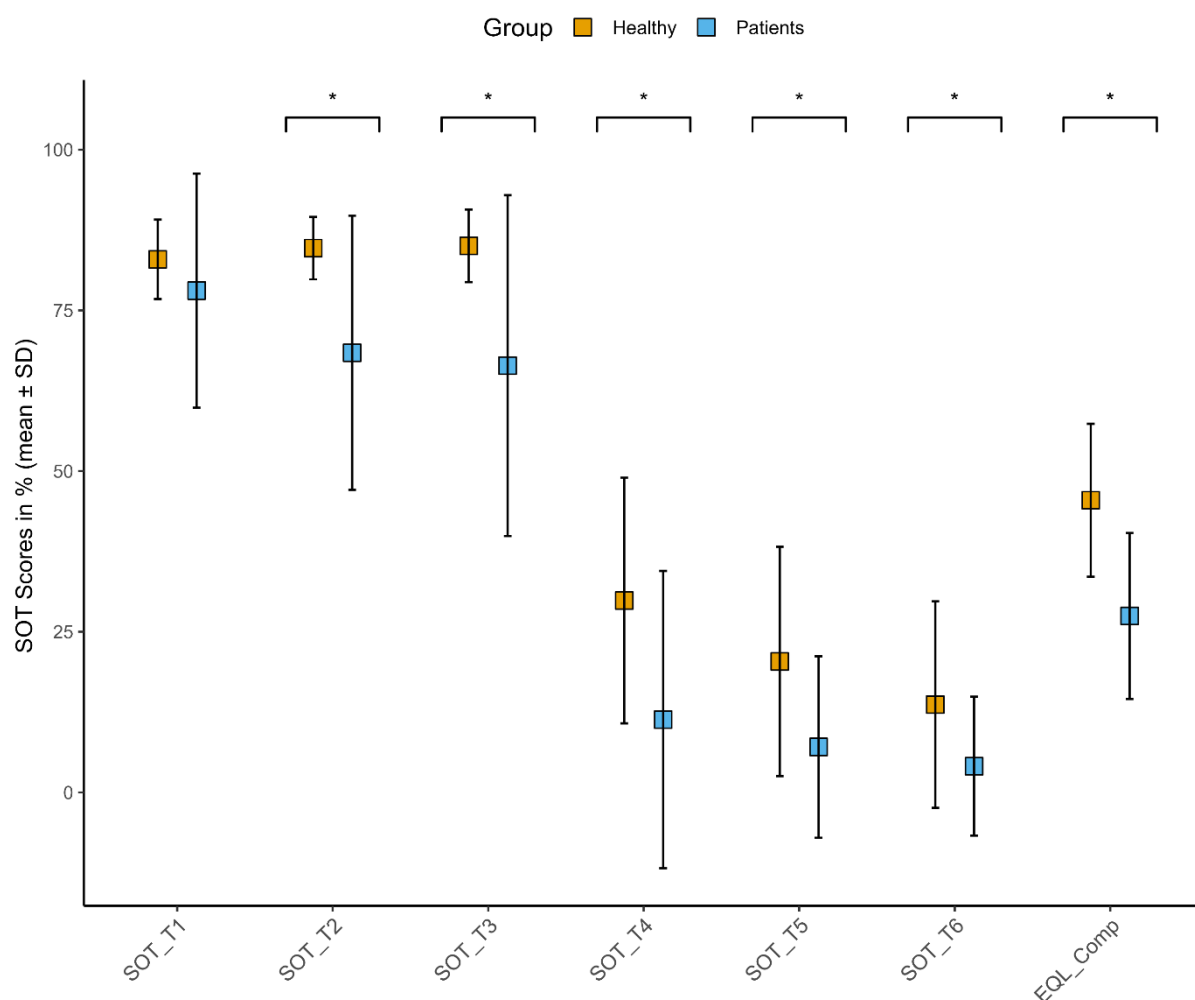


Figure 2. Individual and composite SOT scores between patients and healthy subjects. Plots showing the SOT scores of healthy subjects and patients with PPPD. Scores of 100% represent better balance. The plots indicate the mean and standard error deviations (SD). Patients' scores that are significantly different from those of healthy subjects are indicated with asterisks and brackets.

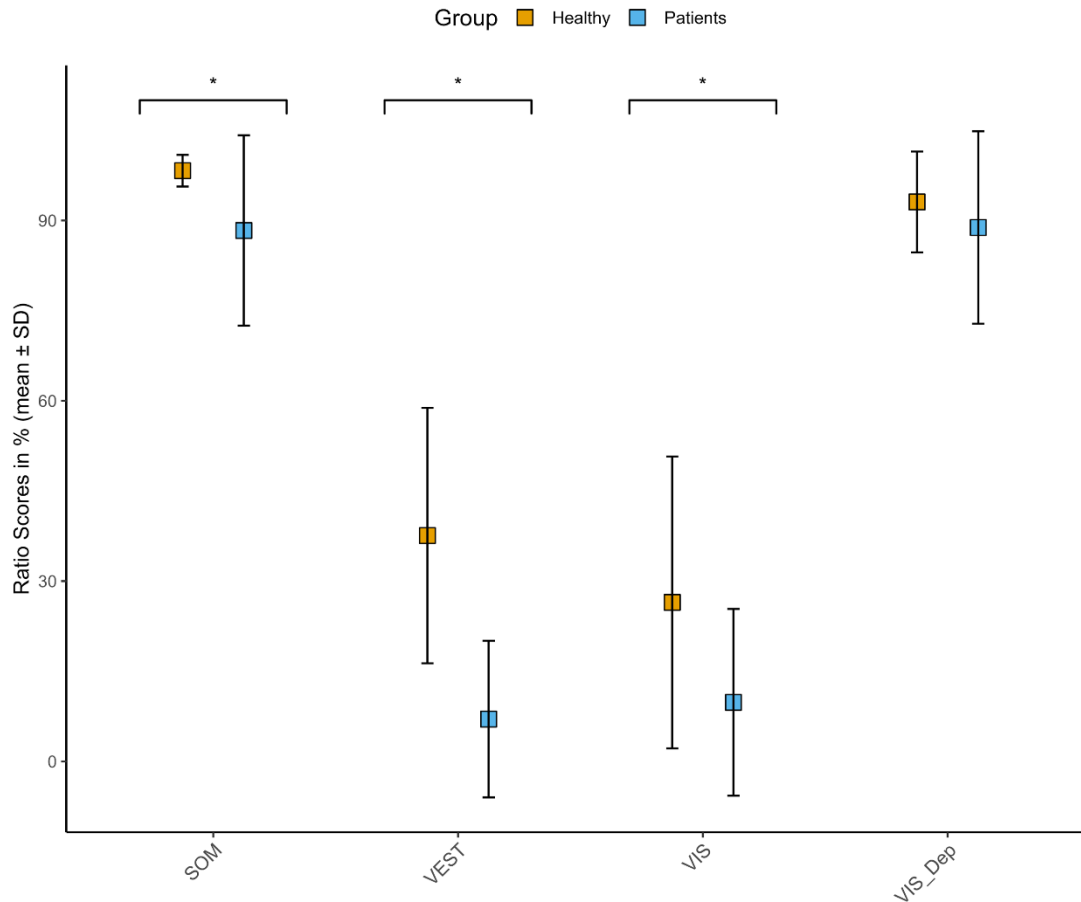


Figure 3. Ratio scores between patients and healthy subjects. Plots showing the sensory ratio SOT scores of healthy subjects and patients with PPPD. Scores of 100% represent better use of sensory information. The plots indicate the mean and standard error deviations (SD). Patients' scores that are significantly different from those of healthy subjects are indicated with asterisks and brackets.

The LMMs on the LOS movement velocity revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(7) = 24.543$, $p = 0.001$) as well as main effects of Condition ($\chi^2(9) = 83.708$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups showed that patients had slowed movement compared to healthy subjects in forward-left direction only ($p = 0.008$). Between condition, healthy subjects were slower in forward direction vs. forward-right ($p < 0.000$), right ($p = 0.023$), left ($p < 0.000$) and forward-right ($p < 0.000$). They were faster in forward-right direction vs. backward-right ($p < 0.000$), backward ($p = 0.001$) and backward-left ($p = 0.018$). Faster movements were also observed in right direction compared to backward-right ($p = 0.018$) and backward ($p = 0.027$). Slower movements were observed in backward-left compared to left and forward-left (for both, $p < 0.000$) as well as in backward compared to left direction ($p = 0.001$), forward-left ($p < 0.000$), in backward-left compared to left ($p = 0.021$) and forward-left ($p = 0.001$). Patients were faster in forward direction vs. backward ($p = 0.050$) and in right direction vs. backward ($p = 0.032$). Slower movements were observed for patients in backward-right vs. backward-left ($p = 0.002$), left ($p < 0.000$), forward-left ($p < 0.010$) as well as in backward vs. backward-left, left and forward-left (for all, $p < 0.000$).

The LMMs on the LOS maximum excursion revealed a main effect of Condition ($\chi^2(7) = 70.209$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between conditions showed individuals were reduced maximum excursion in the forward direction compared to forward-right ($p < 0.000$), right ($p = 0.002$), left ($p = 0.003$) and forward-left ($p < 0.000$) directions. Longer excursions were observed in the forward-right compared to backward-right ($p = 0.001$) and backward ($p < 0.000$) as well as in the right compared to backward-right ($p = 0.027$) and backward ($p < 0.000$). Shorter excursions were also observed in backward-right direction compared to left ($p = 0.035$), forward-left ($p < 0.000$) as well as in backward compared to backward-left ($p = 0.018$), left ($p < 0.000$) and forward-left ($p < 0.000$).

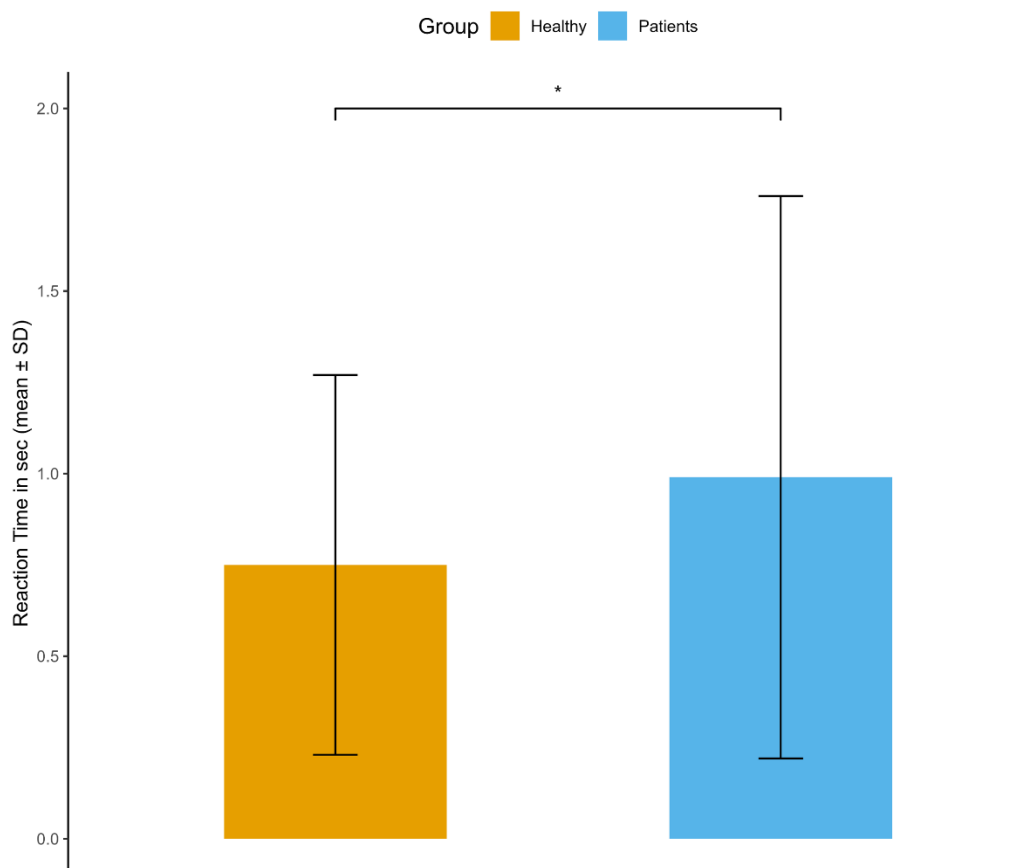


Figure 4. LOS sub-parameter scores for reaction time between patients and healthy subjects. Histogram plots showing the individual reaction LOS scores of healthy subjects and patients with PPPD. The error bars indicate the mean and standard deviations (SD). Patients' scores that are significantly different from those of healthy subjects are indicated with asterisks and brackets.

The LMMs on the LOS endpoint excursion revealed a significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(7) = 18.070$, $p = 0.012$) as well as a main effect of Condition ($\chi^2(7) = 70.539$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups (per conditions) revealed that healthy participants had larger movement magnitude in the backward-right direction compared to patients ($p = 0.001$). Between conditions, results showed that reduced magnitude of movement on the first attempt in forward direction compared to forward-right ($p = 0.026$), left ($p < 0.000$) and forward-left ($p = 0.001$) for healthy subjects. Less movement magnitude was also observed for these participants in backward direction

compared left ($p = 0.002$) and forward-left ($p = 0.009$). For patients, magnitude of movement was lower in forward direction compared to forward-left ($p = 0.036$) as well as in backward-right vs. backward-left ($p = 0.007$), left and forward-left (for both, $p < 0.000$). In backward direction reduced magnitude was observed compared to backward-left ($p = 0.008$), left and forward-left (for both, $p < 0.000$). The LMMs on the LOS global scores revealed a main effect of Condition ($\chi^2(7) = 504.139$, $p < 0.000$). No further analysis was planned for this effect. The LMMs on the LOS composite scores revealed significant 2-way interaction between Group and Condition ($\chi^2(19) = 60.372$, $p < 0.000$) as well as a main effect of Condition ($\chi^2(19) = 1,857.033$, $p < 0.000$). Tukey adjusted post-hoc pairwise comparisons between groups (per conditions) revealed that healthy participants had larger global movement magnitude in the backward ($p = 0.031$) and right directions compared to patients ($p = 0.002$). Better composite directional control in the right ($p = 0.011$) and backward ($p < 0.000$) directions was also observed for healthy subjects compared to patients. Between conditions, results showed that larger composite magnitude of movement on the first attempt in forward direction compared to backward ($p = 0.005$) but reduced composite magnitude in backward compared to the left ($p < 0.000$) for patients. Larger composite maximal excursion in the forward compared to backward

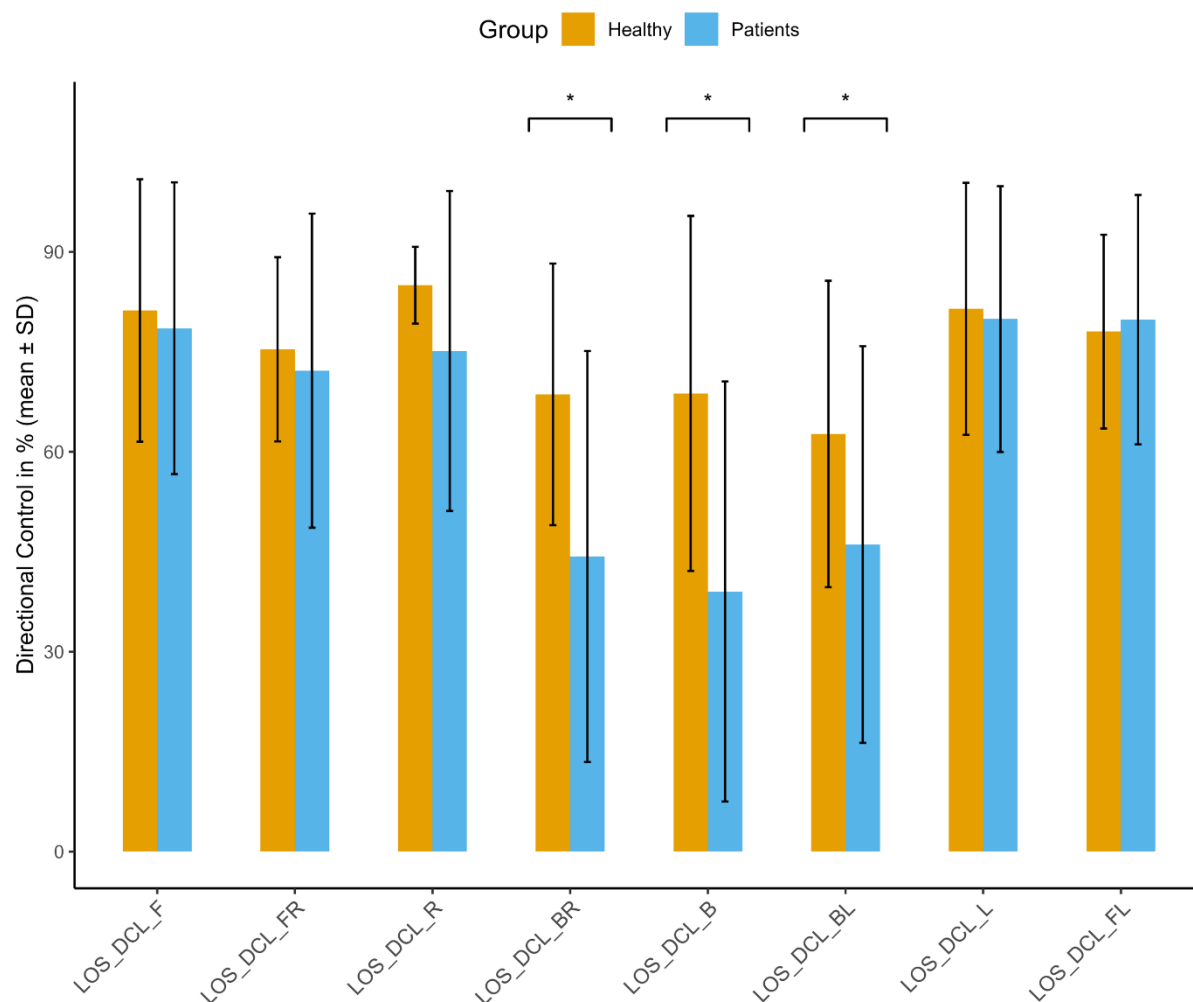


Figure 5. LOS sub-parameter scores for directional control between patients and healthy subjects. Histogram plots showing the individual reaction time, directional control, movement velocity and endpoint excursion LOS scores of healthy subjects and patients with PPPD. The error bars indicate the mean and standard deviations (SD). Patients' scores that are significantly different from those of healthy subjects are indicated with asterisks and brackets.

directions ($p = 0.021$) as well as reduced composite excursion in the backward compared to left directions ($p = 0.003$) were also observed in patients. Patients had better composite directional in the forward, right, left directions compared to backward (for all, $p < 0.000$).

5. Discussion

We studied postural control and strategies, sensory reweighting in complex visual and proprioceptive environments as well as adaptive capacities and voluntary motor control in adults with PPPD and healthy controls on the MotionVR platform. Our purpose was to shed light on the balance in patients with PPPD using CDP integrated with VR, a relatively new tool derived from traditional systems and explore its ability to quantify postural patterns in this population.

Our findings showed that people with PPPD swayed more than healthy subjects under conditions 2 through 6 of the Sensory Organisation Test. Patients were more instable as task difficulty increased from condition 4 to 6 during which patients are exposed to sway-referenced platform and three visual conditions (eyes open, closed and sway-referenced vision). These postural patterns suggest multisensory abnormalities and inefficient use of either visual or vestibular information (Black et al., 1983, 1988; L. Nashner et al., 1982; L. M. Nashner & Peters, 1990). Compared to healthy subject, we found that patients used less efficiently somatosensory, vestibular and visual information. These results are in agreement with previous studies that have demonstrated altered postural control and sensory reweighting in patients with vestibular disorders (Black et al., 1983, 1988; Black & Nashner, 1984; Mirka & Black, 1990; L. Nashner et al., 1982; Sohsten et al., 2016). We did not observe significant differences between patients and healthy subjects for mean and individual sway energy for the Adaptation Test. However, a learning effect was noted for healthy controls, particularly from the first to the last two toes up trials and last three toes down trials.

These differences were not observed for patients, reflecting their inability to minimize anterior-posterior oscillation and progressively recover after the rotations. There is a paucity of studies related to the adaptation test in vestibular patients, particularly adults with PPPD. Furthermore, healthy subjects had shorter response delays, less distorted paths in backward quadrants, faster movement in forward-left direction and larger magnitude in backward-right than patients. Only composite movement magnitude in the backward and right directions was better for healthy subjects compared to patients. Sevilla-Garcia et al. (2009) found that patients with Menière's disease had lower anterior and contra-anterior movement velocity, higher ipsi-anterior and contra-anterior response delays, reduced anterior and posterior movement magnitude, distorted anterior, posterior, contra-anterior and contra-posterior maximal excursion than healthy controls. Reduced directional control was observed in posterior and contra-posterior directions in patients compared to healthy subjects. Previous studies have revealed reduced limits of stability, such as Alvarez-Otero & Perez-Fernandez (2017) who reported a symmetric reduction for patients with unilateral vestibulopathy. One study found significant differences only in movement velocity for elderly patients (Faraldo-García, Santos-Pérez, Rossi-Izquierdo, et al., 2016). These findings support the hypotheses that patients with PPPD have impaired postural control and ability to progressively reduce postural oscillation as well as reduced limits of stability.

These results have demonstrated that MotionVR device paired with VR and moveable platform can be used to reveal balance mechanisms in patients with PPPD. The MotionVR platform is a reliable and valid tool for which normative data has been reported. Movements are controlled and quantifiable at 360°, with modulable sensitivity levels. Explanatory factors of these altered

postural patterns should be investigated in future research accounting for predictors such as hypervigilance, visual dependence or alternate anxiety or traumatic events. Moreover, investigations should integrate more ecologically valid paradigms to provide better understanding of such mechanisms associated with postural misperception in patients' daily lives.

In conclusion, MotionVR is a clinically valid computerized dynamic device that can provide complementary insights into postural control and strategies, adaptive and voluntary motor control responses between people with PPPD and controls such that healthy subjects demonstrated better postural performance with increased task difficulty using VR unlike the PPPD group. These altered postural patterns were particularly observed during the sensory organisation test where additionally sensory constraints are provided through virtual reality paired with platform movements at 360°. Head-mounted displays and modifiable platform movements can provide adequate postural assessment in people with PPPD. These findings need to be replicated in larger samples for better understanding of the clinical utility such CDP tools and their potential for differential diagnosis of vestibular disorders.

- Adamec, I., Juren Meaški, S., Krbot Skorić, M., Jažić, K., Crnošija, L., Milivojević, I., & Habek, M. (2020). Persistent postural-perceptual dizziness: Clinical and neurophysiological study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 72, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.01.043>
- Agrawal, Y., Pineault, K. G., & Semenov, Y. R. (2018). Health-related quality of life and economic burden of vestibular loss in older adults. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 3(1), 8–15. <https://doi.org/10.1002/lio2.129>
- Agrawal, Y., Zuniga, M. G., Davalos-Bichara, M., Schubert, M. C., Walston, J. D., Hughes, J., & Carey, J. P. (2012). Decline in semicircular canal and otolith function with age. *Otology and Neurotology*, 33(5). <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3182545061>
- Aharoni, M. M. H., Lubetzky, A. V., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). Factors associated with dynamic balance in people with Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD): a cross-sectional study using a virtual-reality Four Square Step Test. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00852-0>
- Ak, A. K., Çelebisoy, N., Özdemir, H. N., & Gökçay, F. (2022). Vestibular migraine and persistent postural perceptual dizziness: Handicap, emotional comorbidities, quality of life and personality traits. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 221, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2022.107409>
- Akis, E., Gurses, E., & Aksoy, S. (2023). Vestibulo-spinal reflex tests to determine unilateral vestibular loss. *Hearing, Balance and Communication*, 21(1), 61–66. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2125243>
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Alburquerque-Sendín, F., Fernández-de-las-Peñas, C., Santos-del-Rey, M., & Martín-Vallejo, F. J. (2009). Immediate effects of bilateral manipulation of talocrural joints on standing stability in healthy subjects. *Manual Therapy*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.11.005>
- Alghwiri, A. A., Whitney, S. L., Baker, C. E., Sparto, P. J., Marchetti, G. F., Rogers, J. C., & Furman, J. M. (2012). The development and validation of the vestibular activities and participation measure. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(10). <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.017>
- Alonso, A. C., Luna, N. M. S., Mochizuki, L., Barbieri, F., Santos, S., & Greve, J. M. D. (2012). The influence of anthropometric factors on postural balance: the relationship between body composition and posturographic measurements in young adults. *Clinics*, 67(12), 1433–1441. [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(12\)14](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(12)14)
- Alvarez-Otero, R., & Perez-Fernandez, N. (2017). The limits of stability in patients with unilateral vestibulopathy. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(10). <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1339326>
- Amblard, B., & Cremieux, J. (1976). [Role of visual information concerning

- movement in the maintenance of postural equilibrium in man]. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquees Aux Effets de l'agression*, 17(C Spec No).
- Angelaki, D. E. (2004). Eyes on target: What neurons must do for the vestibuloocular reflex during linear motion. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 92, Issue 1, pp. 20–35). <https://doi.org/10.1152/jn.00047.2004>
- Angelaki, D. E., & Cullen, K. E. (2008). Vestibular System: The Many Facets of a Multimodal Sense. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 125–150. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125555>
- Angelaki, D. E., Green, A. M., & Dickman, J. D. (2001). *Differential Sensorimotor Processing of Vestibulo-Ocular Signals during Rotation and Translation*.
- Anson, E. R., Ehrenburg, M. R., Wei, E. X., Bakar, D., Simonsick, E., & Agrawal, Y. (2019). Saccular function is associated with both angular and distance errors on the triangle completion test. *Clinical Neurophysiology*, 130(11), 2137–2143. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.08.027>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993a). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Otolaryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993b). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Otolaryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Assländer, L., & Streuber, S. (2020). Virtual reality as a tool for balance research: Eyes open body sway is reproduced in photo-realistic, but not in abstract virtual scenes. *PLoS ONE*, 15(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241479>
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Curtin, A., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2011). Using MazeSuite and functional near infrared spectroscopy to study learning in spatial navigation. *Journal of Visualized Experiments*, 56. <https://doi.org/10.3791/3443>
- Baek, J. H., Zheng, Y., Darlington, C. L., & Smith, P. F. (2010). Evidence that spatial memory deficits following bilateral vestibular deafferentation in rats are probably permanent. *Neurobiology of Learning and Memory*, 94(3), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.08.007>
- Balduzzi, S., Rücker, G., Nikolakopoulou, A., Papakonstantinou, T., Salanti, G., Efthimiou, O., & Schwarzer, G. (2023). netmeta: An R Package for Network Meta-Analysis Using Frequentist Methods. *Journal of Statistical Software*, 106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i02>
- Baloh, R. W., Enrietto, J., Jacobson, K. M., & Lin, A. (2001). Age-related changes in vestibular function a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 210–219. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03747.x>
- Baloh, R. W., Jacobson, K. M., Beykirch, K., & Honrubia, V. (1998). Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of Neurology*, 55(5), 649–654.

- <https://doi.org/10.1001/archneur.55.5.649>
- Baloh, R. W., Ying, S. H., & Jacobson, K. M. (2003). A longitudinal study of gait and balance dysfunction in normal older people. *Archives of Neurology*, 60(6). <https://doi.org/10.1001/archneur.60.6.835>
- Barozzi, S., Socci, M., Soi, D., Di Berardino, F., Fabio, G., Forti, S., Gasbarre, A. M., Brambilla, D., & Cesarani, A. (2014). Reliability of postural control measures in children and young adolescents. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(7), 2069–2077. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9883-4>
- Ben Achour Lebib, S., Missaoui, B., Miri, I., Ben Salah, F. Z., & Dziri, C. (2006). Rôle du Neurocom Balance Master® dans l'évaluation des troubles de l'équilibre et du risque de chute chez le sujet âgé. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*, 49(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2006.03.005>
- Berg, K. O., Maki, B. E., Williams, J. I., Holliday, P. J., & Wood-Dauphinee, S. L. (1992). Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(11), 1073–1080.
- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1444775>
- Besnard, S., Lopez, C., Brandt, T., Denise, P., & Smith, P. F. (2015). Editorial: The Vestibular System in Cognitive and Memory Processes in Mammals. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9(November), 7–10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00055>
- Besnard, S., Machado, M. L., Vignaux, G., Boulouard, M., Coquerel, A., Bouet, V., Freret, T., Denise, P., & Lelong-Boulouard, V. (2011). Influence of vestibular input on spatial and nonspatial memory and on hippocampal NMDA receptors. *Hippocampus*, 22(4), 814–826. <https://doi.org/10.1002/hipo.20942>
- Besnard, S., Tighilet, B., Chabbert, C., Hitier, M., Toulouse, J., Le Gall, A., Machado, M. L., & Smith, P. F. (2018). The balance of sleep: Role of the vestibular sensory system. In *Sleep Medicine Reviews* (Vol. 42, pp. 220–228). W.B. Saunders Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2018.09.001>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Du Lac, S., Hoffman, H. J., & Agrawal, Y. (2015). Vestibular vertigo and comorbid cognitive and psychiatric impairment: The 2008 National Health Interview Survey. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 87(4), 367–372. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2015-310319>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Trevino, C., Ferrucci, L., Resnick, S. M., Simonsick, E. M., Xue, Q. L., & Agrawal, Y. (2015). Association between visuospatial ability and vestibular function in the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(9), 1837–1844. <https://doi.org/10.1111/jgs.13609>

- Bisdorff, A., Bosser, G., Gueguen, R., & Perrin, P. (2013). The epidemiology of vertigo, dizziness, and unsteadiness and its links to co-morbidities. *Frontiers in Neurology*, 4 MAR(March), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00029>
- Bisdorff, A. R., Staab, J. P., & Newman-Toker, D. E. (2015). Overview of the International Classification of Vestibular Disorders. *Neurologic Clinics*, 33(3), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2015.04.010>
- Bisdorff, A., Von Brevern, M., Lempert, T., & Newman-Toker, D. E. (2009). Classification of vestibular symptoms: towards an international classification of vestibular disorders. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 19(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0343>
- Bizzo, G., Guillet, N., Patat, A., & Gagey, P. M. (1985). Specifications for building a vertical force platform designed for clinical stabilometry. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 23(5), 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02448937>
- Black, F. O., & Nashner, L. M. (1984). Postural Disturbance in Patients with Benign Paroxysmal Positional Nystagmus. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 93(6), 595–599. <https://doi.org/10.1177/000348948409300612>
- Black, F. O., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Abnormal postural control associated with peripheral vestibular disorders. *Progress in Brain Research*, 76(C), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64513-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64513-6)
- Black, F. O., & Wall, C. (1981). Comparison of vestibulo-ocular and vestibulospinal screening tests. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 89(5), 811–817. <https://doi.org/10.1177/019459988108900523>
- Black, F. O., Wall, C., & Nashner, L. M. (1983). Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 199–210. <https://doi.org/10.3109/00016488309130936>
- Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, 3(5), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1)
- Bloem, B. R., Visser, J. E., & Allum, J. H. J. (2003). Chapter 20 Posturography. In *Handbook of Clinical Neurophysiology* (Vol. 1, Issue C). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1567-4231\(09\)70168-6](https://doi.org/10.1016/S1567-4231(09)70168-6)
- Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Boisgontie, M., Mignardot, J.-B., Nougier, V., Olivier, I., & Palluel, E. (2011). Attentional cost of the executive functions involved in postural control. *Science et Motricite*, 74. <https://doi.org/10.1051/sm/2011106>
- Borel, L., Lopez, C., Péruch, P., & Lacour, M. (2008). Vestibular syndrome: A change in internal spatial representation. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.002>
- Borich, M. R., Brodie, S. M., Gray, W. A., Ionta, S., & Boyd, L. A. (2015).

- Understanding the role of the primary somatosensory cortex: Opportunities for rehabilitation. *Neuropsychologia*, 79.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.007>
- Bosmans, J., Gommeren, H., Mertens, G., Cras, P., Engelborghs, S., Van Ombergen, A., Vereeck, L., Gilles, A., & Van Rompaey, V. (2022). Associations of Bilateral Vestibulopathy with Cognition in Older Adults Matched with Healthy Controls for Hearing Status. *JAMA Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 148(8), 731–739.
<https://doi.org/10.1001/jamaoto.2022.1303>
- Bouccara, D., Rubin, F., Bonfils, P., & Lisan, Q. (2018). Management of vertigo and dizziness. In *Revue de Medecine Interne* (Vol. 39, Issue 11, pp. 869–874). Elsevier Masson SAS.
<https://doi.org/10.1016/j.revmed.2018.02.004>
- Branco Lopes, A., Leal, G., Malvy, L., Wauquiez, G., Ponchel, A., Rivera, D., & Arango-Lasprilla, J. C. (2021). Neuropsychology in France. *Applied Neuropsychology:Adult*, 28(3), 328–339.
<https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1633329>
- Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). The dizzy patient: Don't forget disorders of the central vestibular system. In *Nature Reviews Neurology* (Vol. 13, Issue 6).
<https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.58>
- Brandt, T., Schautzer, F., Hamilton, D. A., Brüning, R., Markowitsch, H. J., Kalla, R., Darlington, C., Smith, P., & Strupp, M. (2005). Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain*, 128(11), 2732–2741.
<https://doi.org/10.1093/brain/awh617>
- Breinbauer, H. A., Contreras, M. D., Lira, J. P., Guevara, C., Castillo, L., Ruëdlinger, K., Muñoz, D., & Delano, P. H. (2020). Spatial Navigation Is Distinctively Impaired in Persistent Postural Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01361>
- Bremner, A. J., Holmes, N. P., & Spence, C. (2008). Infants lost in (peripersonal) space? *Trends in Cognitive Sciences*, 12(8), 298–305.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.05.003>
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Experimental Brain Research*, 63(3).
<https://doi.org/10.1007/BF00237488>
- Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., Mon-Williams, M., & Mushtaq, F. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52(2), 455–463.
<https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
- Browne, J., & O'Hare, N. (2001). Review of the different methods for assessing standing balance. *Physiotherapy*, 87(9), 489–495.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60696-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60696-7)
- Burr, D., & Gori, M. (2011). Multisensory integration develops late in humans. In *The Neural Bases of Multisensory Processes*.
<https://doi.org/10.1201/b11092-23>
- Caldwell, A. R. (2022). SimplyAgree: An R package and jamovi Module for Simplifying Agreement and Reliability Analyses. *Journal of Open Source Software*, 7(71).
<https://doi.org/10.21105/joss.04148>
- Carrick, F. R., Oggero, E., & Pagnacco, G. (2007). Posturographic changes associated with music listening. *Journal of Alternative and*

- Complementary Medicine*, 13(5), 519–526.
<https://doi.org/10.1089/acm.2007.7020>
- Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., Sparto, P. J., Perera, S., Redfern, M. S., Fall, P. A., & Furman, J. M. (2010). Longitudinal posturography and rotational testing in children three to nine years of age: Normative data. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 142(5), 708–714.
<https://doi.org/10.1016/j.otohns.2010.01.028>
- Castro, P., Bancroft, M. J., Arshad, Q., & Kaski, D. (2022). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) from Brain Imaging to Behaviour and Perception. *Brain Sciences*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/brainsci12060753>
- Cathers, I., Day, B. L., & Fitzpatrick, R. C. (2005). Otolith and canal reflexes in human standing. *The Journal of Physiology*, 563(1), 229–234.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.079525>
- Celis-Aguilar, E., Castro-Urquiza, A., & Mariscal-Castro, J. (2018). Evaluation and interpretation of the bucket test in healthy individuals*. *Acta Otolaryngologica*, 138(5), 458–462.
<https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1410289>
- Cha, Y. H., Golding, J. F., Keshavarz, B., Furman, J., Kim, J. S., Lopez-Escamez, J. A., Magnusson, M., Yates, B. J., Lawson, B. D., Staab, J. P., & Bisdorff, A. (2021). Motion sickness diagnostic criteria: Consensus Document of the Classification Committee of the Bárány Society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(5), 327–344.
<https://doi.org/10.3233/VES-200005>
- Chabbert, C. (2013). New insights into vestibular neuropharmacology: From bench to bedside. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 23(3), 107–111.
<https://doi.org/10.3233/VES-130495>
- Chaikeeree, N., Saengsirisuwan, V., Chinsongkram, B., & Boonsinsukh, R. (2015). Interaction of age and foam types used in Clinical Test for Sensory Interaction and Balance (CTSIB). *Gait and Posture*, 41(1), 313–315.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.011>
- Chander, H., Arachchige, S. N. K. K., Hill, C. M., Turner, A. J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2019). Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behavioral Sciences*, 9(11).
<https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Chari, D. A., Madhani, A., Sharon, J. D., & Lewis, R. F. (2022). Evidence for cognitive impairment in patients with vestibular disorders. *Journal of Neurology*, 269(11), 5831–5842.
<https://doi.org/10.1007/s00415-022-11289-3>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010a). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010b). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210.
<https://doi.org/10.1159/000255338>
- Cheng, Y.-Y., Kuo, C.-H., Hsieh, W.-L., Lee, S.-D., Lee, W.-J., Chen, L.-K., & Kao, C.-L. (2012). Anxiety, depression and quality of life (QoL) in patients with chronic dizziness. *Archives of*

- Gerontology and Geriatrics*, 54(1), 131–135.
<https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.04.007>
- Cheng, Z., & Gu, Y. (2018). Vestibular system and self-motion. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12(November), 1–9.
<https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00456>
- Chetana, N., & Jayesh, R. (2015). Subjective visual vertical in various vestibular disorders by using a simple bucket test. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 67(2), 180–184.
<https://doi.org/10.1007/s12070-014-0760-0>
- Chiarella, G., Petrolo, C., Riccelli, R., Giofrè, L., Olivadese, G., Gioacchini, F. M., Scarpa, A., Cassandro, E., & Passamonti, L. (2016). Chronic subjective dizziness: Analysis of underlying personality factors. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(4), 403–408.
<https://doi.org/10.3233/VES-160590>
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002a). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677.
[https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002b). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677.
[https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiarovano, E., de Waele, C., MacDougall, H. G., Rogers, S. J., Burgess, A. M., & Curthoys, I. S. (2015). Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots or at a virtual reality scene. *Frontiers in Neurology*, 6(JUL).
<https://doi.org/10.3389/fneur.2015.00164>
- Chiarovano, E., Wang, W., Reynolds, P., & MacDougall, H. G. (2018). Imbalance: Objective measures versus subjective self-report in clinical practice. *Gait and Posture*, 59, 217–221.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.10.019>
- Chiarovano, E., Wang, W., Rogers, S. J., MacDougall, H. G., Curthoys, I. S., & de Waele, C. (2017). Balance in virtual reality: Effect of age and bilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, 8(JAN).
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00005>
- Clark, R. A., Mentiplay, B. F., Pua, Y. H., & Bower, K. J. (2018). Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review. *Gait and Posture*, 61(December 2017), 40–54.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.022>
- Clark, S., Rose, D. J., & Fujimoto, K. (1997). Generalizability of the limits of stability test in the evaluation of dynamic balance among older adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(10), 1078–1084.
[https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90131-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90131-3)
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996a). Changes in Sensory Organization Test Scores with Age. In *Age and Ageing* (Vol. 25).
<https://academic.oup.com/ageing/article/25/1/39/35818>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996b). Changes in sensory organization test scores with age. *Age and Ageing*, 25(1), 39–44.
<https://doi.org/10.1093/ageing/25.1.39>
- Cohen, H. S. (2019). A review on screening tests for vestibular disorders. In

- Journal of Neurophysiology* (Vol. 122, Issue 1, pp. 81–92). American Physiological Society. <https://doi.org/10.1152/jn.00819.2018>
- Cohen, H. S., Mulavara, A. P., Stitz, J., Sangi-Haghighi, H., Williams, S. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2019). Screening for Vestibular Disorders Using the Modified Clinical Test of Sensory Interaction and Balance and Tandem Walking With Eyes Closed. *Otology and Neurotology*, 40(5), 658–665. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002173>
- Cohen, H. S., & Sangi-Haghighi, H. (2012). Subjective visual vertical in vestibular disorders measured with the bucket test. *Acta Oto-Laryngologica*, 132(8). <https://doi.org/10.3109/00016489.2012.668710>
- Cohen, H. S., Sangi-Haghighi, H., Ricci, N. A., Kampaengkaew, J., & Williamson, R. A. (2014). Utility of stepping, walking, and head impulses for screening patients for vestibular impairments. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 151(1), 131–136. <https://doi.org/10.1177/0194599814527724>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghighi, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018a). Tandem walking as a quick screening test for vestibular disorders. *Laryngoscope*, 128(7), 1687–1691. <https://doi.org/10.1002/lary.27022>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghighi, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018b). Utility of quick oculomotor tests for screening the vestibular system in the subacute and chronic populations. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(4), 382–386. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1398838>
- Commins, S., Duffin, J., Chaves, K., Leahy, D., Corcoran, K., Caffrey, M., Keenan, L., Finan, D., & Thornberry, C. (2020). NavWell: A simplified virtual-reality platform for spatial navigation and memory experiments. *Behavior Research Methods*, 52(3), 1189–1207. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01310-5>
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "What", "Where", and "How". *Acta Psychologica*, 107(1–3), 43–68. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00021-X)
- Creem-Regehr, S. H., Kelly, J. W., Bodenheimer, B., & Stefanucci, J. K. (2024). Virtual reality as a tool to understand spatial navigation. In *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology* (pp. 103–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820480-1.00011-5>
- Cullen, K. E. (2012). The vestibular system: Multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends in Neurosciences*, 35(3), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.12.001>
- Cullen, K. E. (2016). Physiology of central pathways. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 17–40). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00002-9>
- Curthoys, I. S. (2012). The interpretation of clinical tests of peripheral vestibular function. In *Laryngoscope* (Vol. 122, Issue 6, pp. 1342–1352). <https://doi.org/10.1002/lary.23258>
- Danneels, M., Van Hecke, R., Leyssens, L., van de Berg, R., Dhooze, I., Cambier, D., Delrue, S., Van Rompaey, V., & Maes, L. (2023). The impact of vestibular function on cognitive–motor interference: a case–control study on dual-tasking in persons with bilateral vestibulopathy and normal hearing.

- Scientific Reports*, 13(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-40465-2>
- De Gelder, B., & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 460–467.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.014>
- de Haan, E. H. F., & Dijkerman, H. C. (2020). Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-evaluation and a New Model. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 24, Issue 7).
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.04.003>
- de la Torre, J., Marin, J., Marin, J. J., Auria, J. M., & Sanchez-Valverde, M. B. (2017). Balance study in asymptomatic subjects: Determination of significant variables and reference patterns to improve clinical application. *Journal of Biomechanics*, 65, 161–168.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.013>
- De Valck, C. F. J., Denollet, J., Wuyts, F. L., & Van De Heyning, P. H. (2007). Increased handicap in vertigo patients with a type-D personality. *Audiological Medicine*, 5(3), 169–175.
<https://doi.org/10.1080/16513860701497441>
- De Vestel, C., De Hertogh, W., Van Rompaey, V., & Vereeck, L. (2022). Comparison of Clinical Balance and Visual Dependence Tests in Patients With Chronic Dizziness With and Without Persistent Postural-Perceptual Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Frontiers in Neurology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.880714>
- Denise, P., Paolino, M., & Golding, J. F. (2013). Motion sickness susceptibility in healthy subjects and vestibular patients: Effects of gender, age and trait-anxiety. *Journal of Vestibular Research*, 203–210.
<https://doi.org/10.3233/VES-130501>
- Deroualle, D., Borel, L., Tanguy, B., Bernard-Demanze, L., Devèze, A., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2019). Unilateral vestibular deafferentation impairs embodied spatial cognition. *Journal of Neurology*, 266, 149–159.
<https://doi.org/10.1007/s00415-019-09433-7>
- Derrington, A. M., Allen, H. A., & Delicato, L. S. (2004). Visual Mechanisms of Motion Analysis and Motion Perception. *Annual Review of Psychology*, 55(1), 181–205.
<https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.141903>
- Dessai, T. D., & Prasannan, A. (2021). Subjective visual vertical and horizontal: bucket test normative. *Hearing, Balance and Communication*, 19(4).
<https://doi.org/10.1080/21695717.2021.1943786>
- di Fabio, R. P. (1995). Sensitivity and specificity of platform posturography for identifying patients with vestibular dysfunction. *Physical Therapy*, 75(4), 290–305.
<https://doi.org/10.1093/ptj/75.4.290>
- di Fabio, R. P. (1996). Meta-analysis of the sensitivity and specificity of platform posturography. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 122(2), 150–156.
<https://doi.org/10.1001/archotol.1996.01890140036008>
- Di Fabio, R. P., & Foudriat, B. A. (1996). Responsiveness and reliability of a pediatric strategy score for balance. *Physiotherapy Research International*, 1(3), 180–194.
<https://doi.org/10.1002/pri.57>
- Dickman, J. D. (2018). The Vestibular System. In *Fundamental Neuroscience for Basic and Clinical*

- Applications: Fifth Edition* (Fifth Edit, pp. 320–333). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39632-5.00022-0>
- Dieterich, M. (2007). Central vestibular disorders. In *Journal of Neurology* (Vol. 254, Issue 5, pp. 559–568). <https://doi.org/10.1007/s00415-006-0340-7>
- Dieterich, M., & Brandt, T. (2024). Central vestibular networking for sensorimotor control, cognition, and emotion. *Current Opinion in Neurology*, 37(1), 74–82. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001233>
- Dobbels, B., Lucieer, F., Mertens, G., Gilles, A., Moyaert, J., van de Heyning, P., Guinand, N., Fornos, A. P., Herssens, N., Hallemans, A., Vereeck, L., Vanderveken, O., van Rompaey, V., & van de Berg, R. (2020). Prospective cohort study on the predictors of fall risk in 119 patients with bilateral vestibulopathy. *PLoS ONE*, 15(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228768>
- Dobbels, B., Mertens, G., Gilles, A., Claes, A., Moyaert, J., Van De Berg, R., Van De Heyning, P., Vanderveken, O., & Van Rompaey, V. (2019). Cognitive function in acquired bilateral vestibulopathy: A cross-sectional study on cognition, hearing, and vestibular loss. *Frontiers in Neuroscience*, 13(APR), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00340>
- Dobbels, B., Peetermans, O., Boon, B., Mertens, G., Van de Heyning, P., & Van Rompaey, V. (2019). Impact of bilateral vestibulopathy on spatial and nonspatial cognition: A systematic review. *Ear and Hearing*, 40(4), 757–765. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000679>
- Dobie, T. G. (2019). *Psychological Mechanisms That Exacerbate Motion Sickness* (pp. 113–127). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97493-4_6
- Dolins, F. L., Schweller, K., & Milne, S. (2017). Technology advancing the study of animal cognition: Using virtual reality to present virtually simulated environments to investigate nonhuman primate spatial cognition. *Current Zoology*, 63(1), 97–108. <https://doi.org/10.1093/cz/zow121>
- Domènech-Vadillo, E., Aguilera-Aguilera, G., Sánchez-Blanco, C., Batuecas-Caletrio, Á., Guajardo, C., Pérez, N., Trinidad-Ruiz, G., Gimeno, C., Rama, J., Rossi-Izquierdo, M., San-Roman-Rodriguez, E., Patiño-Castiñeira, B., Espinosa-Sanchez, J. M., Matíñó, E., Barona, R., Krstulovic, C., Benitez-Rosario, J., Santandreu, E., Zuma e Maia, F. C., ... Rey-Martínez, J. (2019). Normative data for static balance testing in healthy individuals using open source computerized posturography. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5170-6>
- Donovan, J., De Silva, L., Cox, H., Palmer, G., & Semciw, A. I. (2023). Vestibular dysfunction in people who fall: A systematic review and meta-analysis of prevalence and associated factors. *Clinical Rehabilitation*, 37(9), 1229–1247. <https://doi.org/10.1177/02692155231162423>
- Doyle, T. L., Newton, R. U., & Burnett, A. F. (2005). Reliability of traditional and fractal dimension measures of quiet stance center of pressure in young, healthy people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(10), 2034–2040. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.05.014>

- Duracinsky, M., Mosnier, I., Bouccara, D., Sterkers, O., Chassany, O., Attal, N., Bertholon, P., Bordure, P., Chays, A., Dubois, B., Dubreuil, C., Ferber, C., Ferran, P., Fraysse, M. J., Garcia-Macé, J., Gehanno, P., Lacour, M., Liard, F., Mari, I., ... Toupet, M. (2007). Literature review of questionnaires assessing vertigo and dizziness, and their impact on patients' quality of life. *Value in Health*, 10(4), 273–284. <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2007.00182.x>
- Eikema, D. J. A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2012). Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age*, 34(6), 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9310-9>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). How vestibular dysfunction transforms into symptoms of depersonalization and derealization? *Journal of the Neurological Sciences*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120530>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Hartman, T. G., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). The overarching effects of vestibular deficit: Imbalance, anxiety, and spatial disorientation. *Journal of the Neurological Sciences*, 451. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120723>
- Eriksen, N. D., & Hougaard, D. D. (2023). Age- and gender-specific normative data on computerized dynamic posturography in a cohort of Danish adults. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(5), 2191–2200. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07706-y>
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras, R., & Soto-Varela, A. (2016). Postural changes associated with ageing on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Auris Nasus Larynx*, 43(2), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2015.07.001>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012a). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012b). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Rossi-Izquierdo, M., Lirola-Delgado, A., Vaamonde-Sánchez-Andrade, I., del-Río-Valeiras, M., & Soto-Varela, A. (2016). Posturographic limits of stability can predict the increased risk of falls in elderly patients with instability? *Acta Oto-Laryngologica*, 136(11). <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1201591>
- Farenc, I., Rougier, P., & Berger, L. (2003). The influence of gender and body characteristics on upright stance. *Annals of Human Biology*, 30(3), 279–294. <https://doi.org/10.1080/030144603100068842>

- Fearing, F. S. (1924). The factors influencing static equilibrium. *J Comp Psychol*, 4, 91–121.
- Fong, E., Li, C., Aslakson, R., & Agrawal, Y. (2015). Systematic review of patient-reported outcome measures in clinical vestibular research. In *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 96, Issue 2, pp. 357–365). W.B. Saunders.
<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.017>
- Formeister, E. J., Krauter, R., Kirk, L., Zhu, T. R., Rizk, H. G., & Sharon, J. D. (2020). Understanding the Dizziness Handicap Inventory (DHI): A Cross Sectional Analysis of Symptom Factors That Contribute to DHI Variance. *Otology & Neurotology*, 41(1), 86–93.
<https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002438>
- Frank, S. M., Mark, X., & Greenlee, W. (2018). The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? *REVIEW Sensory Processing J Neurophysiol*, 120, 1438–1450.
<https://doi.org/10.1152/jn.00907.2017>.
-Here
- Freeman, E. E., Muñoz, B., Rubin, G., & West, S. K. (2007). Visual field loss increases the risk of falls in older adults: The salisbury eye evaluation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 48(10).
<https://doi.org/10.1167/iovs.07-0326>
- Friello, P., Silver, N., Sangi-Haghpeykar, H., & Cohen, H. S. (2022). Screening for balance in children and adults in a community science education setting: Normative data, influence of age, sex, and body mass index, and feasibility. *PLoS ONE*, 17(5 May).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268030>
- Fujimoto, C., Murofushi, T., Chihara, Y., Ushio, M., Sugawara, K., Yamaguchi, T., Yamasoba, T., & Iwasaki, S. (2009). Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: Analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1408–1414.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.002>
- Fukushima, A., Kabaya, K., Minakata, T., Katsumi, S., Esaki, S., & Iwasaki, S. (2024). Age-related differences in the characteristics of persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Neurology*, 15.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1378206>
- Furman, J. M. (1995). Role of posturography in the management of vestibular patients. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 112(1), 8–15.
[https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(95\)70300-4](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(95)70300-4)
- Furman, J. M., & Redfern, M. S. (2001). Effect of aging on the otolith-ocular reflex. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 11(2).
<https://doi.org/10.3233/ves-2001-11204>
- Gabriel, G. A., Harris, L. R., Gnanasegaram, J. J., Cushing, S. L., Gordon, K. A., Haycock, B. C., & Campos, J. L. (2022). Age-related changes to vestibular heave and pitch perception and associations with postural control. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09807-4>
- Gagey, P. M. (2016). International standardization of clinical stabilometry (Minutes of the meeting of posturologists, Paris 07.10.2015). In *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal* (Vol. 14, Issue September).
<https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.315>
- Gagey, P.-M. (2016). Recording Conditions - Normes13. *Manual Therapy*,

- Posturology & Rehabilitation Journal*, 14(December 2016). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.362>
- Gálvez-García, G., Aldunate, N., Bascour-Sandoval, C., Barramuño, M., Fonseca, F., & Gómez-Milán, E. (2020). Decreasing motion sickness by mixing different techniques. *Applied Ergonomics*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102931>
- Gammeri, R., Léonard, J., Toupet, M., Hautefort, C., van Nechel, C., Besnard, S., Machado, M. L., Nakul, E., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2022). Navigation strategies in patients with vestibular loss tested in a virtual reality T-maze. *Journal of Neurology*, 269(8), 4333–4348. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11069-z>
- Ganança, F. F., Gazzola, J. M., Aratani, M. C., Perracini, M. R., & Ganança, M. M. (2006). Circumstances and consequences of falls in elderly people with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 72(3), 388–392. [https://doi.org/10.1016/s1808-8694\(15\)30974-5](https://doi.org/10.1016/s1808-8694(15)30974-5)
- García-Soidán, J. L., García-Liñeira, J., Leirós-Rodríguez, R., & Soto-Rodríguez, A. (2020). Physical Activity Practice and Optimal Development of Postural Control in School Children: Are They Related? *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2919. <https://doi.org/10.3390/jcm9092919>
- Garrett, B., Taverner, T., Gromala, D., Tao, G., Cordingley, E., & Sun, C. (2018). Virtual reality clinical research: Promises and challenges. In *JMIR Serious Games* (Vol. 6, Issue 4). JMIR Publications Inc. <https://doi.org/10.2196/10839>
- Gauchard, G. (2003). Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research*, 45(4), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(03\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(03)00008-7)
- Geller, A. S., Schleifer, I. K., Sederberg, P. B., Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2007). *PyEPL: A cross-platform experiment-programming library*.
- Gibbons, C. T., Amazeen, P. G., & Likens, A. D. (2019). Effects of foot placement on postural sway in the anteroposterior and mediolateral directions. *Motor Control*, 23(2), 149–170. <https://doi.org/10.1123/mc.2017-0074>
- Gioacchini, F. M., Alicandri-Ciufelli, M., Kaleci, S., Magliulo, G., & Re, M. (2014). Prevalence and diagnosis of vestibular disorders in children: A review. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(5), 718–724. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.02.009>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018a). *Normative Data for the BTrackS Balance Test of Postural Sway: Results from 16,357 Community-Dwelling Individuals Who Were 5 to 100 Years Old* (Vol. 98). <https://academic.oup.com/ptj/article/98/9/779/4998861>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018b). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225–1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452>
- Goble, D. J., Brar, H., Brown, E. C., Marks, C. R., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the balance tracking system modified clinical test of sensory integration and balance protocol. *Medical Devices: Evidence and Research*, 12, 183–191.

- <https://doi.org/10.2147/MDER.S206530>
- Goble, D. J., Rauh, M. J., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the btracks balance test concussion-management tool: Results from 10045 athletes aged 8 to 21 years. *Journal of Athletic Training*, 54(4), 439–444. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-178-18>
- Gofrit, S. G., Mayler, Y., Eliashar, R., Bdolah-Abram, T., Ilan, O., & Gross, M. (2017). The Association between Vestibular Physical Examination, Vertigo Questionnaires, and the Electronystagmography in Patients with Vestibular Symptoms: A Prospective Study. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 126(4), 315–321. <https://doi.org/10.1177/0003489417691298>
- Golding, J. F. (2006a). Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 129(1–2), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2006.07.019>
- Golding, J. F. (2006b). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Golding, J. F. (2016). Motion sickness. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 371–390). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00027-3>
- Gómez-Alvarez, F. B., & Jáuregui-Renaud, K. (2011). Psychological Symptoms and Spatial Orientation During the First 3 Months After Acute Unilateral Vestibular Lesion. *Archives of Medical Research*, 42(2), 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.03.004>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2010). Poor Haptic Orientation Discrimination in Nonsighted Children May Reflect Disruption of Cross-Sensory Calibration. *Current Biology*, 20(3). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.069>
- Graf, W., & Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus - Palevol*, 5(3–4), 637–655. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.12.009>
- Grill, E., Darrouzet, V., Mansmann, U., & Chabbert, C. (2024). Prevalence of vestibular disease in France: analysis of prescription data from a national health insurance database. *Journal of Neurology*. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12423-z>
- Grill, E., Heuberger, M., Strobl, R., Saglam, M., Holle, R., Linkohr, B., Ladwig, K. H., Peters, A., Schneider, E., Jahn, K., & Lehnert, N. (2018). Prevalence, Determinants, and Consequences of Vestibular Hypofunction. Results From the KORA-FF4 Survey. *Frontiers in Neurology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01076>
- Grill, E., Penger, M., & Kentala, E. (2016). Health care utilization, prognosis and outcomes of vestibular disease in primary care settings: systematic review. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 36–44). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7913-2>
- Guerra-Jiménez, G., Arenas Rodríguez, A., Carlos, J., González, F., Plasencia, D. P., & Ramos Macías, Á. (2017). Epidemiology of Vestibular Disorders in the Otoneurology Unit. In *Acta Otorrinolaringol Esp* (Vol. 68, Issue 6). www.elsevier.es/otorrino

- Hackenberg, B., O'Brien, K., Döge, J., Lackner, K. J., Beutel, M. E., Münzel, T., Wild, P. S., Pfeiffer, N., Chalabi, J., Matthias, C., & Bahr-Hamm, K. (2023). Vertigo and its burden of disease—Results from a population-based cohort study. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 8(6), 1624–1630. <https://doi.org/10.1002/lio2.1169>
- Hageman, P. A., Leibowitz, J. M., & Blanke, D. (1995). Age and gender effects on postural control measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(10), 961–965. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(95\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80075-1)
- Hamid, M. A., & Hughes, G. B. (1991). Specificity and Sensitivity of Dynamic Posturography A Retrospective Analysis. In *Acta Otolaryngol (Stockh)* (Vol. 481).
- Hamid, M. A., Hughes, G. B., & Kinney, S. E. (1991). Specificity and sensitivity of dynamic posturography: A retrospective analysis. *Acta Otolaryngologica*, 111(S481), 596–600. <https://doi.org/10.3109/00016489109131480>
- Harcourt, J. P. (1995). Posturography—applications and limitations in the management of the dizzy patient. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 20(4), 299–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1995.tb00045.x>
- Harro, C. C., Marquis, A., Piper, N., Burdis, C., & Harro, C. C. (2016). Reliability and Validity of Force Platform Measures of Balance Impairment in Individuals With Parkinson's Disease. *Physical Therapy*, 96(12), 1955–1964. <https://doi.org/10.2522/ptj.20160099>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020a). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait and Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020b). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait & Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Henry, N. E., Weart, A. N., Miller, E. M., Feltner, L. D., & Goss, D. L. (2022). Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in United States Military Academy Boxers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(3), 366–377. <https://doi.org/10.26603/001c.32547>
- Herssens, N., Verbecque, E., McCrum, C., Meijer, K., van de Berg, R., Saeys, W., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Hallemans, A. (2020). A Systematic Review on Balance Performance in Patients With Bilateral Vestibulopathy. *Physical Therapy*, 100(9), 1582–1594. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa083>
- Heutink, J., Broekman, M., Brookhuis, K. A., Melis-Dankers, B. J. M., & Cordes, C. (2019). The effects of habituation and adding a rest-frame on experienced simulator sickness in an advanced mobility scooter driving simulator. *Ergonomics*, 62(1), 65–75. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1518543>
- Higgins, J. P. T., Green, S., & Ben Van Den, A. (2020). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *International Coaching Psychology Review*, 15(2). <https://doi.org/10.53841/bpsicpr.2020.15.2.123>
- Hilber, P., Cendelin, J., Le Gall, A., Machado, M.-L., Tuma, J., & Besnard, S. (2018). Cooperation of the vestibular and cerebellar networks in anxiety disorders and depression.

- Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 89, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.004>
- Hill, K. D., Carroll, S. G., Kalogeropoulos, A., & Schwarz, J. A. (1995). Retest Reliability of Centre of Pressure Measures of Standing Balance in Healthy Older Women. *Australian Journal on Ageing*, 14(2), 76–80. <https://doi.org/10.1111/j.1741-6612.1995.tb00701.x>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014a). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014b). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hong, H. R., Shim, D. B., Kim, T. S., Shim, B. S., Ahn, J. H., Chung, J. W., Yoon, T. H., & Park, H. J. (2013). Results of caloric and sensory organization testing of dynamic posturography in migrainous vertigo: Comparison with Meniere's disease and vestibular neuritis. *Acta Oto-Laryngologica*, 133(12), 1236–1241. <https://doi.org/10.3109/00016489.2013.820343>
- Hong, S. M., Lee, H. J., Lee, B., Park, S. K., Hong, S. K., Park, I. S., Kim, Y. B., & Kim, H. J. (2013). Influence of vestibular disease on psychological distress: A multicenter study. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 148(5), 810–814. <https://doi.org/10.1177/0194599813476476>
- Horak, F. B., Buchanan, J., Creath, R., & Jeka, J. (2002). Vestibulospinal Control of Posture. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 508, pp. 139–145). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_17
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381. <https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369>
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82(1), 167–177. <https://doi.org/10.1007/BF00230848>
- Hülse, R., Biesdorf, A., Hörmann, K., Stuck, B., Erhart, M., Hülse, M., & Wenzel, A. (2019). Peripheral Vestibular Disorders: An Epidemiologic Survey in 70 Million Individuals. *Otology and Neurotology*, 40(1), 88–95. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002013>
- Im, J. J., Na, S., Kang, S., Jeong, H., Lee, E. S., Lee, T. K., Ahn, W. Y., Chung, Y. A., & Song, I. U. (2022). A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Trial of Transcranial Direct Current Stimulation for the Treatment of Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD). *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.868976>
- Indovina, I., Bosco, G., Riccelli, R., Maffei, V., Lacquaniti, F., Passamonti, L., & Toschi, N. (2020). Structural connectome and connectivity lateralization of the multimodal vestibular cortical network. *NeuroImage*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117247>

- Indovina, I., Passamonti, L., Mucci, V., Chiarella, G., Lacquaniti, F., & Staab, J. P. (2021). Brain correlates of persistent postural-perceptual dizziness: A review of neuroimaging studies. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 10, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/jcm10184274>
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005a). Evolution physiologique des paramètres d'équilibre sur Equitest chez l'adulte sain âgé de 20 à 60 ans. *Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005b). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005c). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., Vuillerme, N., Amblard, B., & Gresty, M. A. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience*, 169(3), 1199–1215. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.072>
- Jacob, A., Tward, D. J., Resnick, S., Smith, P. F., Lopez, C., Rebello, E., Wei, E. X., Tilak Ratnanather, J., & Agrawal, Y. (2020). Vestibular function and cortical and sub-cortical alterations in an aging population. *Heliyon*, 6(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04728>
- Jacobson, G. P., & Newman, C. W. (1990). The Development of the Dizziness Handicap Inventory. *Archives of Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 116(4), 424–427. <https://doi.org/10.1001/archotol.1990.01870040046011>
- Jamon, M. (2014). The development of vestibular system and related functions in mammals: impact of gravity. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00011>
- Jáuregui-Renaud, K., García-Jacuinde, D. M., Bárcenas-Olvera, S. P., Gresty, M. A., & Gutiérrez-Márquez, A. (2024). Spatial anxiety contributes to the dizziness-related handicap of adults with peripheral vestibular disease. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1365745>
- Jayakaran, P., Johnson, G. M., & Sullivan, S. J. (2011). Test-Retest Reliability of the Sensory Organization Test in Older Persons With a Transtibial Amputation. *PM and R*, 3(8). <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.01.005>
- Kammerlind, A. S. C., Ledin, T. E. A., Skargren, E. I. B., & Ödkvist, L. M. (2005). Long-term follow-up after acute unilateral vestibular loss and comparison between subjects with and without remaining symptoms. *Acta Oto-Laryngologica*, 125(9), 946–953. <https://doi.org/10.1080/00016480510043477>
- Karabulut, M., Van Laer, L., Hallemans, A., Vereeck, L., Van Rompaey, V., Viechtbauer, W., Melliti, A., van

- Stiphout, L., Mohamad, A., Pérez Fornos, A., Guinand, N., & van de Berg, R. (2023). Chronic symptoms in patients with unilateral vestibular hypofunction: systematic review and meta-analysis. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 14). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1177314>
- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R., & Roll, J. P. (1999). From balance regulation to body orientation: Two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research*, 124(1). <https://doi.org/10.1007/s002210050602>
- Kerber, K. A., Ishiyama, G. P., & Baloh, R. W. (2006). A longitudinal study of oculomotor function in normal older people. *Neurobiology of Aging*, 27(9), 1346–1353. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.07.009>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009a). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009b). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., Mallinson, A. I., Longridge, N. S., Sinno, S., Petersen, H., & Perrin, P. (2023). Evolution of postural control assessment: From dynamic posturography to virtual reality. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1054346>
- Keshner, E. A., Streepey, J., Dhaher, Y., & Hain, T. (2007). Pairing virtual reality with dynamic posturography serves to differentiate between patients experiencing visual vertigo. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-24>
- Ketola, S., Havia, M., Appelberg, B., & Kentala, E. (2014). Psychiatric symptoms in vertiginous patients. *Nordic Journal of Psychiatry*, 69(4), 287–291. <https://doi.org/10.3109/08039488.2014.972976>
- Khan, S., & Chang, R. (2013a). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Khan, S., & Chang, R. (2013b). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Kingma, H., & van de Berg, R. (2016). Anatomy, physiology, and physics of the peripheral vestibular system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00001-7>
- Kiss, R., Schedler, S., & Muehlbauer, T. (2018). Associations Between Types of Balance Performance in Healthy Individuals Across the Lifespan: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01366>
- Kobel, M. J., Wagner, A. R., & Merfeld, D. M. (2023). Recurrence quantification analysis of postural sway in patients with persistent postural perceptual dizziness. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 4. <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1142018>
- Kollegger, H., Baumgartner, C., Wöber, C., Oder, W., & Deecke, L. (1992). Spontaneous Body Sway as a Function of Sex, Age, and Vision: Posturographic Study in 30 Healthy

- Adults. *European Neurology*, 32(5), 253–259.
<https://doi.org/10.1159/000116836>
- Kollegger, H., Wöber, C., Baumgartner, C., & Deecke, L. (1989). Stabilizing and destabilizing effects of vision and foot position on body sway of healthy young subjects: A posturographic study. *European Neurology*, 29(5), 241–245.
<https://doi.org/10.1159/000116420>
- Konukseven, O., Satıcı, S., Adalı, I., Yıldız, Y., Doğru, L., & Duruoğlu, S. (2022). Vestibulospinal system findings caused by ageing between 40 and 55 years. *Hearing, Balance and Communication*, 20(4), 257–262.
<https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2087310>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163.
<https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kovacs, E., Wang, X., & Grill, E. (2019). Economic burden of vertigo: A systematic review. *Health Economics Review*, 9(1).
<https://doi.org/10.1186/s13561-019-0258-2>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwiwat, N. (2016). Comparison of Balance Performance between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, 20(2), 72–78. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421.
<https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lacour, M., Helmchen, C., & Vidal, P. P. (2016). Vestibular compensation: the neuro-otologist's best friend. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 54–64). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG.
<https://doi.org/10.1007/s00415-015-7903-4>
- Lacroix, E., Deggouj, N., Salvaggio, S., Wiener, V., Debue, M., & Edwards, M. G. (2016). The development of a new questionnaire for cognitive complaints in vertigo: the Neuropsychological Vertigo Inventory (NVI). *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 273(12), 4241–4249.
<https://doi.org/10.1007/s00405-016-4135-x>
- Lafond, D., Corriveau, H., Hébert, R., & Prince, F. (2004). Intrasection reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 896–901.
<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.08.089>
- Lahmann, C., Henningsen, P., Brandt, T., Strupp, M., Jahn, K., Dieterich, M., Eckhardt-Henn, A., Feuerecker, R., Dinkel, A., & Schmid, G. (2014). Psychiatric comorbidity and psychosocial impairment among patients with vertigo and dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 86(3), 302–308.
<https://doi.org/10.1136/jnnp-2014-307601>
- Lara, S., Graup, S., De Souza Balk, R., Teixeira, L. P., Farias, A. D., Alves, G. B., & Leiria, V. B. (2018). Association between postural balance and anthropometric indexes in elementary schoolchildren. *Revista Paulista de Pediatria*, 36(1), 59–65.
<https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00011>
- Layman, A. J., Li, C., Simonsick, E., Ferrucci, L., Carey, J. P., & Agrawal, Y.

- (2015). Association between saccular function and gait speed: Data from the Baltimore Longitudinal study of aging. *Otology and Neurotology*, 36(2). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000544>
- Leitner, C., Mair, P., Paul, B., Wick, F., Mittermaier, C., Sycha, T., & Ebenbichler, G. (2009). Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.09.007>
- Lelard, T., & Ahmaidi, S. (2015). Effects of physical training on age-related balance and postural control. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4–5), 357–369. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCLI.2015.09.008>
- Lempert, T., & Neuhauser, H. (2009). Epidemiology of vertigo, migraine and vestibular migraine. *Journal of Neurology*, 256(3), 333–338. <https://doi.org/10.1007/s00415-009-0149-2>
- Lempert, T., Olesen, J., Furman, J., Waterston, J., Seemungal, B., Carey, J., Bisdorff, A., Versino, M., Evers, S., Kheradmand, A., & Newman-Toker, D. (2022). Vestibular migraine: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.3233/VES-201644>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R Package Version 1.10.2.090002.
- Lentz, M., & Collins, W. E. (1976). *Three studies of motion sickness susceptibility* (Vol. 7, Issue 2).
- Leong, A. T. L., Gu, Y., Chan, Y. S., Zheng, H., Dong, C. M., Chan, R. W., Wang, X., Liu, Y., Tan, L. H., & Wu, E. X. (2019). Optogenetic fMRI interrogation of brain-wide central vestibular pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 10122–10129. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812453116>
- Letz, R., Gerr, F., Deborah Harris-abbott, F., Dick, R., Gerr, F., Harris-abbott, D., & Dick, R. (1996). A Comparison of Standing Steadiness Measurements from Two Devices: Covariates and Normal Values. In *Neurotoxicology and Teratology* (Vol. 18, Issue 1).
- Lewkowicz, D. J., & Bremner, A. J. (2020). The development of multisensory processes for perceiving the environment and the self. In *Multisensory Perception* (Vol. 49, Issue 5, pp. 89–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00004-8>
- Liang, H. W., Chi, S. Y., Chen, B. Y., & Hwang, Y. H. (2021). Reliability and Validity of a Virtual Reality-Based System for Evaluating Postural Stability. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 85–91. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3034876>
- Libardoni, T. de C., Silveira, C. B. da, Sinhorim, L. M. B., Oliveira, A. S. de, Santos, M. J. dos, & Santos, G. M. (2018). Reference values and equations reference of balance for children of 8 to 12 years. *Gait and Posture*, 60, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.004>
- Lim, R., & Brichta, A. M. (2016). Anatomical and physiological development of the human inner ear. *Hearing Research*, 338, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.02.004>

- Lindell, E., Kollén, L., Johansson, M., Karlsson, T., Rydén, L., Zettergren, A., Frändin, K., Skoog, I., & Finizia, C. (2020). Dizziness and its association with walking speed and falls efficacy among older men and women in an urban population. *Aging Clinical and Experimental Research*, 32(6), 1049–1056. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01303-6>
- Liston, R. A. L., & Brouwer, B. J. (1996). Reliability and validity of measures obtained from stroke patients using the balance master. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(5), 425–430. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(96\)90028-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(96)90028-3)
- Liu, Y. F., Locklear, T. D., Sharon, J. D., Lacroix, E., Nguyen, S. A., & Rizk, H. G. (2019). Quantification of Cognitive Dysfunction in Dizzy Patients Using the Neuropsychological Vertigo Inventory. *Otology and Neurotology*, 40(7), E723–E731. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000002311>
- Lopez, C. (2013). A neuroscientific account of how vestibular disorders impair bodily self-consciousness. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00091>
- Lopez, C., Lacour, M., & Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. In *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (pp. 35–86).
- Lopez-Escamez, J. A., Carey, J., Chung, W. H., Goebel, J. A., Magnusson, M., Mandalà, M., Newman-Toker, D. E., Strupp, M., Suzuki, M., Trabalzini, F., & Bisdorff, A. (2015). Diagnostic criteria for Menière's disease. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(1), 1–7. <https://doi.org/10.3233/VES-150549>
- Lubetzky, A. V., Aharoni, M. M. H., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). People with persistent postural-perceptual dizziness demonstrate altered postural strategies in complex visual and cognitive environments. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(6), 505–517. <https://doi.org/10.3233/VES-201552>
- Lucertini, M., Verde, P., & Trivelloni, P. (2013). Rehabilitation from airsickness in military pilots: Long-term treatment effectiveness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 84(11), 1196–1200. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3509.2013>
- Macedo, C., Gazzola, J. M., Ricci, N. A., Doná, F., & Ganança, F. F. (2015). Influence of sensory information on static balance in older patients with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 81(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.11.004>
- Madrigal, J., Arbelaez-Lelion, D., Candelo, E., Valencia Ramírez, S., Franco Sanchez, I., Castillo-Bustamante, M., Andalon-Dueñas, E., & García, A. (2023). Clinical and otopathologic findings on age-related vestibular loss: state of the art review. *International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery*, 9(7), 602–612. <https://doi.org/10.18203/issn.2454-5929.ijohns20231822>
- Maresova, P., Penhaker, M., Selamat, A., & Kuca, K. (2015). The potential of medical device industry in technological and economical context. In *Therapeutics and Clinical Risk Management* (Vol. 11, pp. 1505–1514). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S88574>
- Marsh, A. P., & Geel, S. E. (2000). The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait and*

- Posture*, 12(2).
[https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00074-6)
- Massingale, S. L., Alexander, A. D., Erickson, S. M., McQueary, E. S., Gerkin, R. D., Schodrof, S. B., Kisana, H. M., & Pardini, J. E. (2018). Assessing balance in an athletic population: Normative data for the concussion balance test (COBALT®). *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 23(3), 96–100.
<https://doi.org/10.1123/ijatt.2017-0042>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877–887.
- Mast, F. W., Preuss, N., Hartmann, M., & Grabherr, L. (2014). Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(May), 1–14.
<https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00044>
- Masui, T., Hasegawa, Y., Matsuyama, Y., Sakano, S., Kawasaki, M., & Suzuki, S. (2005). Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41(2), 201–209.
<https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.02.003>
- Matsuda, S., Demura, S., & Demura, T. (2010). Examining differences between center of pressure sway in one-legged and two-legged stances for soccer players and typical adults. *Perceptual and Motor Skills*, 110(3), 751–760.
<https://doi.org/10.2466/pms.110.3.751-760>
- McCall, A. A., Miller, D. M., & Yates, B. J. (2017). Descending influences on vestibulospinal and vestibulosympathetic reflexes. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 8, Issue MAR). Frontiers Research Foundation.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00112>
- McCaslin, D. L., Shepard, N. T., Hollman, J. H., & Staab, J. P. (2022). Characterization of Postural Sway in Patients With Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) Using Wearable Motion Sensors. *Otology & Neurotology*, 43(2), e243–e251.
<https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000003393>
- McCollum, G., Shupert, C. L., & Nashner, L. M. (1996). Organizing sensory information for postural control in altered sensory environments. *Journal of Theoretical Biology*, 180(3), 257–270.
<https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0101>
- Mendel, B., Bergenius, J., & Langius, A. (1999). Dizziness symptom severity and impact on daily living as perceived by patients suffering from peripheral vestibular disorder. *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 24(4), 286–293.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2273.1999.00261.x>
- Micarelli, A., Viziano, A., Augimeri, I., Micarelli, B., & Alessandrini, M. (2020). Age-related Assessment of Postural Control Development: A Cross-sectional Study in Children and Adolescents. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 418–426.
<https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>
- Michelson, P. L., McCaslin, D. L., Jacobson, G. P., Petrak, M., English, L., & Hatton, K. (2018). Assessment of subjective visual vertical (SVV) using the “bucket test” and the virtual SVV system. *American Journal of Audiology*, 27(3).
https://doi.org/10.1044/2018_AJA-17-0019

- Mirka, Alar., & Black, F. O. (1990). Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 8, 351–359.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6(C), 414–417. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mnejja, K., Fendri, T., Chaari, F., Harrabi, M. A., & Sahli, S. (2022). Reference values of postural balance in preschoolers: Age and gender differences for 4–5 years old Tunisian children. *Gait and Posture*, 92, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.12.015>
- Monzell, E. M., Furman, J. M., Herdman, S. J., Konrad, H. R., & Shepard, N. T. (1997). Computerized dynamic platform posturography. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 117(4), 394–398. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(97\)70132-3](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(97)70132-3)
- Müller, M. M., Scherer, J., Unterbrink, P., Bertrand, O. J. N., Egelhaaf, M., & Boeddeker, N. (2023). The Virtual Navigation Toolbox: Providing tools for virtual navigation experiments. *PLoS ONE*, 18(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293536>
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes: A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nagymáté, G., Orlovits, Z., & Kiss, R. M. (2018). Reliability analysis of a sensitive and independent stabilometry parameter set. *PLoS ONE*, 13(4), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195995>
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. In *Biological Reviews* (Vol. 82, Issue 4, pp. 591–605). <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Nakayama, M., Suzuki, M., Inagaki, A., Takemura, K., Watanabe, N., Tanigawa, T., Okamoto, K., Hattori, H., Brodie, H., & Murakami, S. (2010). Impaired quality of sleep in Ménière's disease patients. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 6(5), 445–449.
- Nashner, L., & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 150(2). [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3)
- Nashner, L., Black, F. O., & Lilly, D. J. (1994). *Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology*.
- Nashner, L., Black, F., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *The Journal of Neuroscience*, 2(5), 536–544. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.02-05-00536.1982>
- Nashner, L. M. (1982). Adaptation of human movement to altered environments. *Trends in Neurosciences*, 5(C), 358–361. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1)
- Nashner, L. M. (1985). The organisation of human postural movements A formal basis and experimental synthesis. *THE BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES*, 8, 135–172.
- Nashner, L. M., & Peters, J. F. (1990). Dynamic posturography in the diagnosis and management of

- dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics*, 8(2), 331–349.
<https://doi.org/10.1590/2317-1782/20202019270>
- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Black, F. O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80(C), 411–418.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)62237-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)62237-2)
- Negrillo-Cárdenas, J., Rueda-Ruiz, A. J., Ogayar-Anguita, C. J., Lomas-Vega, R., & Segura-Sánchez, R. J. (2018). A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device. *Journal of Medical Systems*, 42(7).
<https://doi.org/10.1007/s10916-018-0981-y>
- Negu, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge.
<https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Negut, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge.
<https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Neuhauser, H. K. (2016). The epidemiology of dizziness and vertigo. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 137, pp. 67–82). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00005-4>
- Nishino, L. K., Rocha, G. D., de Souza, T. S. A., de Andrade Quintanilha Ribeiro, F., & Cóser, P. L. (2021). Protocol for static posturography with dynamic tests in individuals without vestibular complaints using the Horus system. *CODAS*, 33(3), 1–13.
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1997). Contribution of central and peripheral vision to the regulation of stance. *Gait and Posture*, 5(1).
[https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01071-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01071-5)
- Nyabenda, A., Briart, C., Deggouj, N., & Gersdorff, M. (2004). A normative study of the vestibulospinal and rotational tests. *Advances in Physiotherapy*, 6(3), 122–129.
<https://doi.org/10.1080/1403819031012052>
- Obrero-Gaitán, E., Molina, F., Montilla-Ibañez, M. de A., Del-Pino-Casado, R., Rodríguez-Almagro, D., & Lomas-Vega, R. (2021). Misperception of Visual Vertical in Peripheral Vestibular Disorders. A Systematic Review With Meta-Analysis. In *Laryngoscope* (Vol. 131, Issue 5, pp. 1110–1121). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/lary.29124>
- Ohlmann, T. (2018). Vicariences: La flexibilité du vivant. *Orientation Scolaire et Professionnelle*, 47(1), 173–203.
<https://doi.org/10.4000/osp.5626>
- Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection/control of frames of reference and spatial aspects of field dependence-independence. *Field Dependence-Independence: Cognitive Style across the Life Span.*, 95, 105–129.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001691896000157>
- Oka, M., Ichijo, K., Koda, K., Kamogashira, T., Kinoshita, M., Igarashi, K., Kawahara, T., Takashima, I., Yamasoba, T., & Fujimoto, C. (2023). Preceding Balance Disorders Affect Vestibular Function in Persistent Postural-Perceptual Dizziness.

- Journal of Clinical Medicine*, 12(7).
<https://doi.org/10.3390/jcm12072589>
- Olabi, B., Bergquist, F., & Dutia, M. B. (2009). Rebalancing the commissural system: Mechanisms of vestibular compensation. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 19(5–6), 201–207.
<https://doi.org/10.3233/VES-2009-0367>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1).
<https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Owen, N., Leadbetter, A. G., & Yardley, L. (1998). Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 471–474.
[https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00101-4)
- Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, 2015.
<https://doi.org/10.1155/2015/891390>
- Paplou, V. G., Schubert, N. M. A., van Tuinen, M., Vijayakumar, S., & Pyott, S. J. (2023). Functional, Morphological and Molecular Changes Reveal the Mechanisms Associated with Age-Related Vestibular Loss. *Biomolecules*, 13(9).
<https://doi.org/10.3390/biom13091429>
- Paquet, N., Jehu, D. A., & Lajoie, Y. (2017). Age-related differences in Fukuda stepping and Babinski-Weil tests, within-day variability and test-retest reliability. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(2).
<https://doi.org/10.1007/s40520-016-0544-3>
- Paredis, S., van Stiphout, L., Remmen, E., Strupp, M., Gerards, M. C., Kingma, H., Van Rompaey, V., Fornos, A. P., Guinand, N., & van de Berg, R. (2021). DISCOHAT: An Acronym to Describe the Spectrum of Symptoms Related to Bilateral Vestibulopathy. *Frontiers in Neurology*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2021.771650>
- Patti, A., Bianco, A., Şahin, N., Sekulic, D., Paoli, A., Iovane, A., Messina, G., Gagey, P. M., & Palma, A. (2018). Postural control and balance in a cohort of healthy people living in Europe An observational study. *Medicine (United States)*, 97(52).
<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013835>
- Pedalini, M. E. B., Cruz, O. L. M., Bittar, R. S. M., Lorenzi, M. C., & Grasel, S. S. (2009). Sensory organization test in elderly patients with and without vestibular dysfunction. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(9), 962–965.
<https://doi.org/10.1080/00016480802468930>
- Perucca, L., Robecchi Majnardi, A., Frau, S., & Scarano, S. (2021). Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.761262>
- Peterka, R. J. (2018). Sensory integration for human balance control. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 159). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990a). Age-related changes in human posture control: Motor coordination tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 87–96.
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990b). Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests.

- Journal of Vestibular Research*, 1(1), 73–85.
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *Journal of Neurophysiology*, 91(1), 410–423. <https://doi.org/10.1152/jn.00516.2003>
- Pick, H. L., & Warren, D. H. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial direction. In *Perception & Psychophysics* (Vol. 6, Issue 4).
- Pineault, K., Pearson, D., Wei, E., Kamil, R., Klatt, B., & Agrawal, Y. (2020). Association between Saccule and Semicircular Canal Impairments and Cognitive Performance among Vestibular Patients. *Ear and Hearing*, 41(3), 686–692. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000795>
- Pinsault, N., & Vuillerme, N. (2009). Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Medical Engineering and Physics*, 31(2), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.08.003>
- Pletcher, E. R., Williams, V., Abt, J. P., Morgan, P. M., Parr, J. J., Wohleber, M. F., Lovalekar, M., & Sell, T. C. (2017). Normative data for the neurocom sensory organization test in us military special operations forces. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 129–136. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>
- Podsiadlo, J. D., Bscpt, S., & Richardson, M. D. J. (1991). The Timed “Up & Go”: A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. In *J Am Geriatr SOC* (Vol. 39).
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000a). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000b). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Popp, P., Wulff, M., Finke, K., Rühl, M., Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). Cognitive deficits in patients with a chronic vestibular failure. *Journal of Neurology*, 264(3). <https://doi.org/10.1007/s00415-016-8386-7>
- Powell, G., Derry-Sumner, H., Rajenderkumar, D., Rushton, S. K., & Sumner, P. (2020). Persistent postural perceptual dizziness is on a spectrum in the general population. *Neurology*, 94(18), E1929–E1938. <https://doi.org/10.1212/WNL.00000000000009373>
- Previc, F. H., Krueger, W. W., Ross, R. A., Roman, M. A., & Siegel, G. (2014). The relationship between vestibular function and topographical memory in older adults. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(JUNE). <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00046>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Probst, T., Dinkel, A., Schmid-Mühlbauer, G., Radziej, K., Limburg, K., Pieh, C., & Lahmann, C. (2017). Psychological distress longitudinally mediates the effect of vertigo symptoms on vertigo-related handicap. *Journal of Psychosomatic Research*, 93, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2016.11.013>

- Quijoux, F., Nicolai, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code*. In *Physiological Reports* (Vol. 9, Issue 22). American Physiological Society. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>
- Quijoux, F., Vienne-Jumeau, A., Bertin-Hugault, F., Zawieja, P., Lefevre, M., Vidal, P.-P., & Ricard, D. (2020). *Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: a systematic review with meta-analysis*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156816372030252X>
- Radtke, A., Von Brevern, M., Feldmann, M., Lezius, F., Ziese, T., Lempert, T., & Neuhauser, H. (2008). Screening for Menière's disease in the general population - The needle in the haystack. *Acta Oto-Laryngologica*, 128(3), 272–276. <https://doi.org/10.1080/00016480701509933>
- Raphan, T., & Cohen, B. (2002). The vestibulo-ocular reflex in three dimensions. In *Experimental Brain Research* (Vol. 145, Issue 1, pp. 1–27). <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1067-z>
- Rauch, S. D., Velazquez-Villaseñor, L., Dimitri, P. S., & Merchant, S. N. (2001). Decreasing hair cell counts in aging humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 220–227. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03748.x>
- Raymakers, J. A., Samson, M. M., & Verhaar, H. J. J. (2005). The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait and Posture*, 21(1), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.11.006>
- Reason, J. T. (1978). Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829. <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thiebaut, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(8). <https://doi.org/10.1076/jcen.25.8.1169.16733>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5). <https://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Rey, M. C. B., Clark, T. K., Wang, W., Leeder, T., Bian, Y., & Merfeld, D. M. (2016). Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. *Frontiers in Neurology*, 7(OCT). <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00162>
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195–240. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Rizzolatti, G., & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: Anatomy and functions. *Experimental Brain Research*, 153(2), 146–157. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1588-0>
- Roberts, H. J., Hoppes, C. W., Del Toro, Y. M., Lambert, K. H., & Springer, B. A. (2021). Normative values for the

- Sensory Organization Test in an active duty military cohort. *Gait and Posture*, 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.014>
- Rocchi, L., Chiari, L., & Cappello, A. (2004). Feature selection of stabilometric parameters based on principal component analysis. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 42(1), 71–79. <https://doi.org/10.1007/BF02351013>
- Rode, G., Pérennou, D., & Azouvi, P. (2017). Spatial cognition. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 60(3), 123. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.05.003>
- Roh, K. J., Kim, M. K., Kim, J. H., & Son, E. J. (2018). Role of Emotional Distress in Prolongation of Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Journal of Audiology and Otology*, 22(1), 6–12. <https://doi.org/10.7874/jao.2017.00290>
- Rosa, T. S. M., de Moraes, A. B., & dos Santos Filha, V. A. V. (2016). The institutionalized elderly: Sociodemographic and clinical-functional profiles related to dizziness. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 82(2), 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.12.014>
- Rouhana, J. (2008). *Flexibilité de l'intégration multi-sensorielle : aspects spatiaux et temporels*.
- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010). The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions - A systematic review of the literature. In *Gait and Posture* (Vol. 32, Issue 4, pp. 436–445). <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>
- Russell, N. A., Horii, A., Smith, P. F., Darlington, C. L., & Bilkey, D. K. (2003). Long-Term Effects of Permanent Vestibular Lesions on Hippocampal Spatial Firing. *The Journal of Neuroscience*, 23(16), 6490–6498. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-16-06490.2003>
- Sackley, C. M., & Lincoln, N. B. (1991). Weight distribution and postural sway in healthy adults. *Clinical Rehabilitation*, 5(3), 181–186. <https://doi.org/10.1177/02692155910500302>
- San Pedro Murillo, E., Bancroft, M. J., Koohi, N., Castro, P., & Kaski, D. (2023). Postural misperception: a biomarker for persistent postural perceptual dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 94(2), 165–166. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-329321>
- Saniasiaya, J., Islam, M. A., & Salim, R. (2023). The global prevalence of vestibular dysfunction in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. In *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* (Vol. 280, Issue 6, pp. 2663–2674). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-07842-z>
- Santos, B. R., Delisle, A., Larivière, C., Plamondon, A., & Imbeau, D. (2008). Reliability of centre of pressure summary measures of postural steadiness in healthy young adults. *Gait and Posture*, 27(3), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.05.008>
- Scaglioni-Solano, P., & Aragón-Vargas, L. F. (2014). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board to assess standing balance and sensory integration in highly functional older adults. *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(2), 138–143.

- <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000046>
- Schmidt, J. D., Register-Mihalik, J. K., Mihalik, J. P., Kerr, Z. Y., & Guskiewicz, K. M. (2012). Identifying impairments after concussion: Normative data versus individualized baselines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1621–1628. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318258a9fb>
- Schöne, C. G., Vibert, D., & Mast, F. W. (2024). Executive functions in patients with bilateral and unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Journal of Neurology*, 271(6), 3291–3308. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12267-7>
- Scoppa, F., Gallamini, M., Belloni, G., & Messina, G. (2017). Clinical stabilometry standardization: Feet position in the static stabilometric assessment of postural stability. *Acta Medica Mediterranea*, 33(May), 707–713. https://doi.org/10.19193/0393-6384_2017_4_105
- Semenov, Y. R., Bigelow, R. T., Xue, Q. L., Lac, S. Du, & Agrawal, Y. (2016). Association between Vestibular and Cognitive Function in U.S. Adults: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 71(2), 243–250. <https://doi.org/10.1093/gerona/glv069>
- Sevilla-Garcia, M. A., Boleas-Aguirre, M. S., & Perez-Fernandez, N. (2009). The limits of stability in patients with Ménière's disease. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(3). <https://doi.org/10.1080/00016480802226171>
- Shams, A., Vameghi, R., Shamsipour Dehkordi, P., Allafan, N., & Bayati, M. (2020). The development of postural control among children: Repeatability and normative data for computerized dynamic posturography system. *Gait and Posture*, 78, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>
- Shapcott, K. A., Weigand, M., Glukhova, I., Havenith, M. N., & Schölvinc, M. L. (n.d.). *DomeVR: A setup for experimental control of an immersive dome virtual environment created with Unreal Engine 4*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2022.04.04.486889>
- Sharif, M., Saman, Y., Burling, R., Rea, O., Patel, R., Barrett, D. J. K., Rea, P., Kheradmand, A., & Arshad, Q. (2023). Altered visual conscious awareness in patients with vestibular dysfunctions; a cross-sectional observation study. *Journal of the Neurological Sciences*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120617>
- Sharma, K. (1997). Prevalence and correlates of susceptibility to motion sickness. *Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae*, 46(2), 105–121. <https://doi.org/10.1017/S0001566000000660>
- Shim, D. B., Song, M. H., & Park, H. J. (2018). Typical sensory organization test findings and clinical implication in acute vestibular neuritis. *Auris Nasus Larynx*, 45(5), 916–921. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.11.018>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: The effect of sensory context. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(1), 10–16. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.1.M10>
- Sibley, K. M., Beauchamp, M. K., Van Ooteghem, K., Straus, S. E., & Jaglal, S. B. (2015). Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance

- evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(1), 122-132.e29. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.021>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021a). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021b). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Siu, K. C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait and Posture*, 25(1). <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Sjoberg, D., Whiting, K., Curry, M., Lavery, J., & Larmarange, J. (2021). Reproducible Summary Tables with the gtsummary Package. *The R Journal*, 13(1), 570. <https://doi.org/10.32614/RJ-2021-053>
- Smith, P. F., & Darlington, C. L. (2013). Personality changes in patients with vestibular dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(October), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00678>
- Smith, P. F., Horii, A., Russell, N., Bilkey, D. K., Zheng, Y., Liu, P., Kerr, D. S., & Darlington, C. L. (2005). The effects of vestibular lesions on hippocampal function in rats. In *Progress in Neurobiology* (Vol. 75, Issue 6, pp. 391–405). <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2005.04.004>
- Smith, P. F., & Zheng, Y. (2013). From ear to uncertainty: vestibular contributions to cognitive function. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00084>
- Smith, P. F., Zheng, Y., Horii, A., & Darlington, C. L. (2005). Does vestibular damage cause cognitive dysfunction in humans? *Journal of Vestibular Research*, 15, 1–9.
- Sohsten, E., Bittar, R. S. M., & Staab, J. P. (2016). Posturographic profile of patients with persistent postural-perceptual dizziness on the sensory organization test. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(3). <https://doi.org/10.3233/VES-160583>
- Solway, A., Miller, J. F., & Kahana, M. J. (2013). PandaEPL: A library for programming spatial navigation experiments. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1293–1312. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0322-5>
- Son, E. J., Lee, D. H., Oh, J. H., Seo, J. H., & Jeon, E. J. (2015). Correlation between the dizziness handicap inventory and balance performance during the acute phase of unilateral vestibulopathy. *American Journal of Otolaryngology - Head and Neck Medicine and Surgery*, 36(6), 823–827. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2015.07.011>
- Soto, A., Labella, T., Santos, S., Río, M. Del, Lirola, A., Cabanas, E., & Elhendi, W. (2004). The usefulness of computerized dynamic posturography

- for the study of equilibrium in patients with Meniere's disease: Correlation with clinical and audiologic data. *Hearing Research*, 196(1–2), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.06.010>
- Staab, J. P. (2020). Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Seminars in Neurology*, 40(1), 130–137. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3402736>
- Staab, J. P., Eckhardt-Henn, A., Horii, A., Jacob, R., Strupp, M., Brandt, T., & Bronstein, A. (2017). Diagnostic criteria for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD): Consensus document of the committee for the classification of vestibular disorders of the barany society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 27(4), 191–208. <https://doi.org/10.3233/VES-170622>
- Staab, J. P., Rohe, D. E., Eggers, S. D. Z., & Shepard, N. T. (2014). Anxious, introverted personality traits in patients with chronic subjective dizziness. *Journal of Psychosomatic Research*, 76(1), 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2013.11.008>
- Stackman, R. W., Clark, A. S., & Taube, J. S. (2002). Hippocampal spatial representations require vestibular input. In *Hippocampus* (Vol. 12, Issue 3, pp. 291–303). <https://doi.org/10.1002/hipo.1112>
- Starrett, M. J., McAvan, A. S., Huffman, D. J., Stokes, J. D., Kyle, C. T., Smuda, D. N., Kolarik, B. S., Laczko, J., & Ekstrom, A. D. (2021). Landmarks: A solution for spatial navigation and memory experiments in virtual reality. *Behavior Research Methods*, 53(3), 1046–1059. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01481-6>
- Steensnaes, M. H., Knapstad, M. K., Goplen, F. K., & Berge, J. E. (2023). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) and quality of life: a cross-sectional study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(12), 5285–5292. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08040-7>
- Stewart, M. G., Chen, A. Y., Wyatt, J. R., Favrot, S., Beinart, S., Coker, N. J., & Jenkins, H. A. (1999). Cost-effectiveness of the diagnostic evaluation of vertigo. *Laryngoscope*, 109(4), 600–605. <https://doi.org/10.1097/00005537-199904000-00015>
- Stewart, V. M., Mendis, M. D., & Low Choy, N. (2018). A systematic review of patient-reported measures associated with vestibular dysfunction. *Laryngoscope*, 128(4), 971–981. <https://doi.org/10.1002/lary.26641>
- Strupp, M., Bisdorff, A., Furman, J., Hornibrook, J., Jahn, K., Maire, R., Newman-Toker, D., & Magnusson, M. (2022). Acute unilateral vestibulopathy/vestibular neuritis: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(5), 389–406. <https://doi.org/10.3233/VES-220201>
- Strupp, M., & Brandt, T. (2013). Peripheral vestibular disorders. *Current Opinion in Neurology*, 26(1), 81–89. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32835c5fd4>
- Strupp, M., Kim, J.-S., Murofushi, T., Straumann, D., Jen, J. C., Rosengren, S. M., Della Santina, C. C., & Kingma, H. (2017). Bilateral vestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society¹. *Journal of Vestibular Research*, 27(4), 177–189. <https://doi.org/10.3233/VES-170619>

- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017a). The effect of sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(1), 47–52. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1213418>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017b). The effect of vestibular rehabilitation on sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(3), 275–278. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1244859>
- Summers, S. J., Antcliff, S., Waddington, G., & Wallwork, S. (2022). Reliability and learning effects of repeated exposure to the Bertec Balance Advantage sensory organisation test in healthy individuals. *Gait and Posture*, 93, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.02.004>
- Swain, S., & Dubey, D. (2023). Vestibulo-ocular reflex – A narrative review. *Matrix Science Medica*, 7(4), 90. https://doi.org/10.4103/mtsm.mtsm_24_22
- Tahmosybayat, R., Baker, K., Godfrey, A., Caplan, N., & Barry, G. (2018). Movements of older adults during exergaming interventions that are associated with the Systems Framework for Postural Control: A systematic review. In *Maturitas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.03.005>
- Takeda, N., Matsuda, K., Fukuda, J., Sato, G., Uno, A., & Kitahara, T. (2024). Vestibular compensation: Neural mechanisms and clinical implications for the treatment of vertigo. In *Auris Nasus Larynx* (Vol. 51, Issue 2, pp. 328–336). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2023.11.009>
- Taneda, K., Mani, H., Kato, N., Komizunai, S., Ishikawa, K., Maruya, T., Hasegawa, N., Takamatsu, Y., & Asaka, T. (2021). Effects of simulated peripheral visual field loss on the static postural control in young healthy adults. *Gait and Posture*, 86, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.011>
- Thoumie, P. (2012). Intérêts et limites de la posturographie pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *Lettre de Medecine Physique et de Readaptation*, 28(3), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0300-9>
- Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 34(2), 119–126. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x>
- Tiwari, K., Kyrki, V., Cheung, A., & Yamamoto, N. (2021). DeFINE: Delayed feedback-based immersive navigation environment for studying goal-directed human navigation. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2668–2688. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01586-6>
- Tossavainen, T., Toppila, E., Pyykkö, I., Forsman, P. M., Juhola, M., & Starck, J. (2006). Virtual reality in posturography. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10(2), 282–292. <https://doi.org/10.1109/TITB.2005.859874>
- Toupet, M., Chassany, O., Rothoft, J.-M., & Bremaud des Ouillères, L. (2002). Vertiginous Complaints: Usual Presentation in Private Practice and Concrete Aspects of Care and Management. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 12(6), 276–281. <https://doi.org/10.1159/000083116>
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*,

- 197(4302).
<https://doi.org/10.1126/science.301659>
- Trinidad, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023a). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11), 904–915. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidad, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023b). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11). <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018a). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10, pp. 1291–1303). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trinidad, A., & Goebel, J. A. (2018b). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhorst, N. (2018a). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhorst, N. (2018b). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: Passenger behaviour and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444–461. <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- Ukaegbu, C. I. (2014). Kinetosis: All you need to know. *Journal of Biotechnology Science Research*, 1(3), 63–74.
- Vanderkam, P., Blanchard, C., Naudet, F., Pouchain, D., Roussel, H. V., Perault-pochat, M. C., Jaafari, N., & Boussageon, R. (2019). *Efficacy of acetylleucine in vertigo and dizziness: a systematic review of randomised controlled trials*.
- Vasser, M., Kängsepp, M., Magomedkerimov, M., Kilvits, K., Stafinjak, V., Kivisik, T., Vicente, R., & Aru, J. (2017). VREX: An open-source toolbox for creating 3D virtual reality experiments. *BMC Psychology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-017-0173-4>
- Verbecque, E., Costa, P. H. L. da, Meyns, P., Desloovere, K., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016). Age-related changes in postural sway in preschoolers. *Gait and Posture*, 44, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>

- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016a). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016b). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Vereeck, L., Wuyts, F., Truijen, S., & Van De Heyning, P. (2008). Clinical assessment of balance: Normative data, and gender and age effects. *International Journal of Audiology*, 47(2), 67–75. <https://doi.org/10.1080/14992020701689688>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 36). <http://www.jstatsoft.org/>
- Visser, J. E., Carpenter, M. G., van der Kooij, H., & Bloem, B. R. (2008). The clinical utility of posturography. *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2424–2436. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.07.220>
- Von Brevern, M., Bertholon, P., Brandt, T., Fife, T., Imai, T., Nuti, D., & Newman-Toker, D. (2015). Benign paroxysmal positional vertigo: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(3–4), 105–117. <https://doi.org/10.3233/VES-150553>
- Voorhees, R. L. (1990). Dynamic posturography findings in central nervous system disorders. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 103(1), 96–101. <https://doi.org/10.1177/019459989010300114>
- Vorhees, R. L. (1989). The role of dynamic posturography in neurologic diagnosis. *Laryngoscope*, 99, 995–1001.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 71(2). <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0018-2>
- Wall, C., Black, F. O., & Wall, C. (1983). Postural stability and rotational tests: Their effectiveness for screening dizzy patients. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 235–246. <https://doi.org/10.3109/00016488309130940>
- Webster, K. E., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023(3). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015188.pub2>
- Webster, K. E., Kamo, T., Smith, L., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Non-pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2023, Issue 3). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015333.pub2>
- Weech, S., Moon, J., & Troje, N. F. (2018). Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLoS ONE*, 13(3), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>
- Wei, Y., Zheng, J., & So, R. H. Y. (2018). Allocating less attention to central

- vision during vection is correlated with less motion sickness. *Ergonomics*, 61(7), 933–946. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1427805>
- Weidt, S., Bruehl, A. B., Straumann, D., Hegemann, S. C. A., Krautstrunk, G., & Rufer, M. (2014). Health-related quality of life and emotional distress in patients with dizziness: A cross-sectional approach to disentangle their relationship. *BMC Health Services Research*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-317>
- Weismiller, S. A., Monaco, R., Womack, J., Alderman, B., Esopenko, C., Conway, F. N., Brostrand, K., Brown, A., de Souza, N. L., & Buckman, J. F. (2021). Individual baseline balance assessments in a large sample of incoming NCAA division I athletes using a force plate system. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.26603/001c.18713>
- Whiting, P. F., Weswood, M. E., Rutjes, A. W. S., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. N. M., & Kleijnen, J. (2006). Evaluation of QUADAS, a tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. In *BMC Medical Research Methodology* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-6-9>
- Whiting, P., Rutjes, A. W., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. M., & Kleijnen, J. (2003). *The development of QUADAS: a tool for the quality assessment of studies of diagnostic accuracy included in systematic reviews*. <http://www.biomedcentral.com/1471-2288/3/25>
- Wiener-Vacher, S. R., Hamilton, D. A., & Wiener, S. I. (2013). Vestibular activity and cognitive development in children: perspectives. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00092>
- Wiener-Vacher, S. R., Obeid, R., & Abou-Elew, M. (2012). Vestibular impairment after bacterial meningitis delays infant posturo-motor development. *Journal of Pediatrics*, 161(2). <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.02.009>
- Wolfel, M., Hepperle, D., Purps, C. F., Deuchler, J., & Hettmann, W. (2021). Entering a new Dimension in Virtual Reality Research: An Overview of Existing Toolkits, their Features and Challenges. *2021 International Conference on Cyberworlds (CW)*, 180–187. <https://doi.org/10.1109/CW52790.2021.00038>
- Wolfson, L., Whipple, R., Derby, C. A., Amerman, P., & Nashner, L. (1994). Gender differences in the balance of healthy elderly as demonstrated by dynamic posturography. *Journals of Gerontology*, 49(4). <https://doi.org/10.1093/geronj/49.4.M160>
- Worden, B. F., & Blevins, N. H. (2007). Pediatric vestibulopathy and pseudovestibulopathy: Differential diagnosis and management. *Current Opinion in Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 15(5), 304–309. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e3282bf139e>
- Xie, Y., Bigelow, R. T., Frankenthaler, S. F., Studenski, S. A., Moffat, S. D., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular loss in older adults is associated with impaired spatial navigation: Data from the triangle completion task. *Frontiers in Neurology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00173>
- Yagi, C., Morita, Y., Kitazawa, M., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., & Horii, A. (2021). Subtypes of Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 12.

<https://doi.org/10.3389/fneur.2021.652366>

- Yagi, C., Morita, Y., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., Itoh, K., Suzuki, Y., Igarashi, H., & Horii, A. (2022). Gaze instability after exposure to moving visual stimuli in patients with persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1056556>
- Yardley, L., Luxon, L. M., & Haacke, N. P. (1994). A longitudinal study of symptoms, anxiety and subjective well-being in patients with vertigo. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 19(2), 109–116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1994.tb01192.x>
- Yardley, L., Owen, N., Nazareth, I., & Luxon, L. (1998). Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *British Journal of General Practice*, 48(429), 1131–1135.
- Zhang, X., Huang, Y., Xia, Y., Yang, X., Zhang, Y., Wei, C., Ying, H., & Liu, Y. (2022). Vestibular dysfunction is an important contributor to the aging of visuospatial ability in older adults—Data from a computerized test system. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1049806>

2. Etude 2 : Etude observationnelle des effets de la désensibilisation au mal des transports en utilisant la plateforme MotionVR.

En parallèle, nous nous sommes intéressés à la désensibilisation au mal des transports, en proposant un protocole qui utilise, de manière combinée, la réalité virtuelle et les mouvements de la plateforme MotionVR. Les passations cliniques ont été réalisées par une étudiante en master 1 de Neurosciences, **Perrine HAUCHECORNE**, sous ma supervision et celle du Dr Besnard. Ce syndrome se manifeste lorsque des discordances sensorielles surviennent pendant des mouvements physiques ou visuels. Il existe trois théories principales proposant une explication de la pathophysiologie de ce syndrome : (1) la théorie du conflit sensoriel de Reason, (2) la théorie de l'évolution de Treisman et (3) la théorie de l'instabilité posturale de Riccio & Stoffregen. De ces théories, il en ressort un défaut d'adaptation par rapport aux processus perception-action entraînant une sensibilité anormale aux mouvements. Les symptômes, incluant des nausées et/ou problèmes gastro-intestinaux, une thermorégulation perturbée, des vertiges et/ou étourdissements, maux de tête et/ou fatigue oculaire, sont exacerbés par une exposition prolongée. Un désordre est diagnostiqué lorsque ces derniers persistent après au moins cinq épisodes et sont accompagnées de signes psychologiques ou comportementaux, tels qu'une restriction des activités quotidiennes, un comportement d'évitement et des émotions aversives d'anticipation. Les différences inter-individuelles sont influencées par le genre, l'âge et la personnalité. Or, toutes ces théories ne s'appuient pas sur les réseaux neurophysiologiques sous-jacents encore insuffisamment explorés dans le cadre du mal des transports. Notre hypothèse de travail est que le profil sensoriel de chaque individu et son adaptation aux environnements en mouvement constitue un facteur clef dans la compréhension et la cause du mal des transports. De même, les facteurs neuropsychologiques sont également importants mais non explorés dans le cadre de cette thèse. En raison des capacités immersives et contrôlées de la plateforme MotionVR, qui permet de proposer des mouvements précis associés à des environnements virtuels nous l'avons utilisée pour l'évaluation de sujets souffrant de mal des transports. Des perturbations sensorielles proches de la réalité ont été intégrées permettant une meilleure compréhension de la qualité et de la flexibilité de l'intégration multisensorielle chez ces individus et ce, avant et après un protocole de désensibilisation par stimulation visuelle écologique en réalité virtuelle. Ainsi, nous avons réalisé une étude pilote en exposant progressivement des individus à des scénarios intégrant (1) un mouvement détecté physiquement mais pas visuellement, (2) un mouvement visuellement perçu mais non détecté par les systèmes vestibulaire et proprioceptifs, et (3) une discordance entre les informations sensorielles et nous avons évalué les modifications du profil sensoriel et les effets sur le moyen-terme.

Nous avons analysé les capacités posturales et la perception de la verticalité avant et après le protocole de désensibilisation chez 10 sujets rapportant une sensibilité sévère au mal des transports (Score MSSQ > 25,9). Ces sujets représentaient 7 femmes (âge : 35.43 ± 10 ans ; taille : $1,65 \pm 0,05$ m ; MSSQ : 43.14 ± 5.70) et 3 hommes (âge : $36 \pm 11,31$ ans ; taille : $1,84 \pm 0,01$ m ; MSSQ : 34.00 ± 6.56). Les capacités posturales des participants ont été comparées pour les mêmes tests standardisés, le SOT, le RFT, la VVS et la VVS dynamique avant et après le protocole de désensibilisation. Ils ont également complété le questionnaire sur les cybermalaises (Simulator Sickness Questionnaire ; SSQ) et le niveau d'anxiété ressenti (échelle sur 10, score élevé étant un état très prononcé) après chaque séance. Le protocole était composé d'une simulation routière, adoptant le point de vue du passager avant ou arrière, et d'une simulation maritime en eau calme avec une amplitude variable des vagues. En s'appuyant sur la littérature et eu égard au temps imparti de cette étude préliminaire, nous avons défini un nombre de cinq séances qui se sont déroulées sur une période de trois semaines. Un arrêt en cours de séance était possible selon le ressenti du participant pour augmenter sa motivation à poursuivre le protocole et, in fine, réduire l'anxiété anticipatoire induite. Un questionnaire relevant les effets ressentis 1 mois après la fin du protocole a été également complété par les participants pour avoir un aperçu des effets à moyen-terme.

Les résultats n'ont révélé aucune différence significative entre le début et la fin du protocole de désensibilisation pour les tests du SOT, la VVS, la VVS dynamique et la RFT (Tableau 1). Les réponses au questionnaire obtenues 1 mois après le protocole ont montré que seulement deux personnes sur 10, ayant repris la voiture, ont ressenti un changement positif alors qu'une amélioration a été perçue par une seule personne ayant repris le bus.

Tableau 7. Comparaison entre les scores pour le SOT, la VVS, la VVS dynamique et la RFT avant et après le protocole de désensibilisation.

Characteristic	Pre N = 10	95% CI ¹	Post N = 10	95% CI ¹	p-value ²
SOT 1		79, 86		81, 91	0.10
Mean (SD)	82.47 (4.93)		86.30 (6.83)		
SOT 2		81, 87		77, 89	0.73
Mean (SD)	84.07 (3.98)		82.97 (8.82)		
SOT 3		79, 87		77, 89	0.57
Mean (SD)	82.53 (5.61)		83.07 (8.65)		
SOT 4		36, 64		32, 65	0.97
Mean (SD)	49.90 (19.56)		48.27 (22.76)		
SOT 5		26, 55		28, 53	0.91
Mean (SD)	40.70 (20.35)		40.63 (17.62)		

Characteristic	Pre N = 10	95% CI ¹	Post N = 10	95% CI ¹	p-value ²
SOT 6		18, 50		22, 51	0.94
Mean (SD)	33.70 (22.34)		36.47 (20.59)		
Composite Score		46, 66		47, 67	0.88
Mean (SD)	56.10 (13.92)		56.90 (14.01)		
PREF		84, 97		89, 99	0.47
Mean (SD)	90.80 (9.20)		94.00 (6.34)		
SOM		95, 101		89, 99	0.12
Mean (SD)	97.70 (3.97)		94.30 (6.83)		
VEST		43, 78		38, 74	0.65
Mean (SD)	60.30 (24.77)		56.00 (25.73)		
VIS		31, 68		33, 60	0.68
Mean (SD)	49.60 (25.95)		46.70 (19.15)		
VVS - Absolute Angle		0.90, 1.9		1.1, 2.2	0.58
Mean (SD)	1.38 (0.68)		1.63 (0.81)		
VVS Dynamic - Absolute Angle		3.1, 5.4		2.3, 5.0	0.53
Mean (SD)	4.28 (1.62)		3.64 (1.85)		
RFT - Absolute Angle		2.7, 5.7		2.6, 5.7	0.74
Mean (SD)	4.24 (2.10)		4.14 (2.22)		
¹ CI = Confidence Interval					
² Wilcoxon rank sum test; Wilcoxon rank sum exact test					

Cette étude pilote sur l'efficacité du protocole de désensibilisation au mal des transports sur la plateforme MotionVR présente des limites, qui incluent une taille d'échantillon réduite, un nombre de séances insuffisant et un manque de validité thérapeutique. On peut également discuter de la modalité de désensibilisation proposée (stimulation visuelle) possiblement non adapté à tous les profils sensoriels de la cohorte. Les caractéristiques méthodologiques doivent être améliorées, avec des échantillons plus larges et des protocoles de stimulation plus longs, en prenant en compte la variabilité individuelle pour améliorer l'efficacité à long terme. Ces éléments pourraient expliquer le manque de significativité observé dans cette étude observationnelle. D'autres études intégrant une chaise rotatoire ont pu observer des différences après un protocole de désensibilisation. Les effets de l'habituation ont été étudiés par Heutink et al. (2019). Dans leur étude, les participants devaient réaliser une tâche de conduite de scooter dans différents types d'environnement. Cette tâche était réalisée lors deux visites, au cours desquelles les participants étaient assignés à un groupe (avec et sans

stabilisation de la tête) différent à chaque fois. Les auteurs ont observé une diminution significative des scores au questionnaire des cybermalaises (Simulator Sickness questionnaire). Ces résultats ont permis de montrer que l'habituation est une méthode prometteuse pour réduire les symptômes au mal des transports. De même, les individus qui sont capables d'allouer moins d'attention au champ visuel central pendant un mouvement étaient moins sensibles au mal des transports (Wei et al., 2018). Le changement d'attention visuelle peut impliquer une fiabilité accrue des entrées visuelles et une réduction relative des pondérations vestibulaires dans l'intégration multisensorielle, ce qui peut réduire le conflit sensoriel. Lucertini et al. (2013) ont observé un effet positif d'une désensibilisation sur chaise rotatoire chez des pilotes militaires, avec 85 % de cas désensibilisés. Weech et al. (2018) ont évalué l'efficacité de la stimulation galvanique dans la désensibilisation au cyber-malaise. Dans leur étude, les participants devaient réaliser une tâche virtuelle d'intensité modérée ou élevée (sans référence gravitationnelle). Ils étaient attribués soit au groupe GVS (stimulation galvanique à une amplitude de $\pm 1750 \mu\text{A}$ pendant 15 secondes) soit au groupe sham (stimulation à une amplitude de $0 \mu\text{A}$ pendant 15 secondes). La susceptibilité au cyber-malaise a été mesurée en utilisant le Fast Motion Sickness scale, FMS; (Keshavarz and Hecht 2011) pendant la réalisation de la tâche et le Simulator Sickness Questionnaire, SSQ; (Kennedy et al. 1993) à la fin du protocole. Ils ont observé une diminution des scores FMS, qui mesurent la sensation de malaise au cours de la tâche, pour le groupe GVS. Dans l'ensemble, les résultats ont démontré la faisabilité d'une désensibilisation transitoire par le biais d'une méthode de stimulation sensorielle non invasive. Dans une étude récente, Gálvez-García et al. (2020) ont démontré l'efficacité d'un protocole de stimulation combinée dans la désensibilisation au mal des transports. Ils ont étudié les effets de la stimulation galvanique cutanée (GCS) et de la stimulation auditive (AS), de manière séparée et combinée, selon les conditions suivantes : GCS, AS (bruit blanc), GCS-AS mixte et contrôle. Les participants devaient réaliser une tâche sur un simulateur de conduite. Leurs scores au questionnaire sur les cybermalaises (Simulator Sickness questionnaire) ont révélé des différences. Pour les conditions non mixtes, les résultats ont montré une réduction de 50,47% et de 47,91% pour la stimulation galvanique et la stimulation auditive, respectives. Pour la condition mixte, une réduction de 73,16% a été observée. Etant donné leurs observations, les auteurs ont souligné l'importance de l'utilisation de techniques combinées dans la désensibilisation au mal des transports.

Dans cette étude pilote, un programme de désensibilisation a été proposé, comportant différents scénarios provocateurs combinant des stimulations routières et maritimes. , a été proposée comme protocole global pour réduire le plus possible la variabilité individuelle, mais seule la modalité visuelle pouvant être utilisée. Néanmoins, la manque de différence entre le

début et la fin du protocole démontre la nécessité de développer des protocoles plus personnalisés, en se basant sur des profils sensoriels individuels, qui intègrent des stimulations visuelles et haptiques, voire auditives, afin de proposer une désensibilisation plus efficace et écologique. Nous notons également un besoin d'intégrer la dimension psychologique dans les protocoles pour réduire l'anxiété avant les expositions et favoriser une pratique régulière et continue.

CONCLUSION GENERALE

L'innovation technologique et industrielle représente un investissement attractif pour les entreprises dans le domaine de la santé. D'ailleurs, un budget conséquent a été consacré à la pérennisation de l'investissement des industriels dans le cadre de l'Innovation Santé 2030. Le dernier rapport de France Biotech²⁰ souligne l'envergure et la cadence des projets R&D, avec 60 % des dépenses mobilisées pour faciliter l'optimisation de la prise en charge et des traitements. Dans une perspective de R&D, l'entreprise Virtualis a conçu un nouvel outil numérique (logiciel et plateforme) à destination du système de santé, nommé la plateforme MotionVR, pour un positionnement dans la course mondiale à l'innovation technologique. Pour cela, une compréhension de l'influence des besoins des utilisateurs et des parties prenantes sur son adoption et utilisation a été considérée afin de proposer un équipement de pointe fiable et valide. Il s'agit d'une plateforme de posturographie dynamique qui intègre la réalité virtuelle et une technologie de mouvements avancés pour offrir la possibilité d'évaluer des réponses posturales dans un cadre proche de la réalité. Sa validation clinique repose sur la distinction de profil pathologique à partir d'une base de données normatives provenant d'une procédure méthodologique rigoureuse. Avec une vision orientée vers l'avenir, l'implantation de cet outil met l'accent sur l'importance de l'amélioration des fonctionnalités et l'élargissement des applications dans le domaine de la posturologie.

Ce travail doctoral visait au développement et à la validation de la plateforme de posturographie dynamique MotionVR. L'élargissement des applications de MotionVR nécessitait une approche multidimensionnelle pour positionner la plateforme comme un outil incontournable pour l'identification et le suivi des troubles de l'équilibre, la rééducation personnalisée et la recherche clinique. Cette approche multidimensionnelle offre la possibilité d'améliorer les fonctionnalités de MotionVR en se concentrant sur plusieurs axes de développement : optimisation de protocoles immersifs, intégration de dispositions haptiques ou mouvements propres, développement d'algorithmes, suivi biométrique avancé (fréquence cardiaque par exemple) et ajout de systèmes de feedback visuel ou sonore. Ces facteurs sont essentiels pour faire face à la concurrence technologique, l'évolution constante des réglementations et des normes et à l'acceptation clinique de nouvelles technologies sans preuves robustes. Pour répondre aux besoins des utilisateurs, il a fallu adopter une démarche multidimensionnelle pour la validation clinique de la plateforme MotionVR afin de faciliter son

²⁰ Dechaud C. & Evans C. France Biotech. Dossier Panorama France Healthtech 2023. 21^{ème} édition.

intégration dans les pratiques existantes. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement au cas de la pathologie vestibulaire et du mal des transports qui sont des syndromes partageant des mécanismes sous-jacents impliquant une intégration multisensorielle perturbée. Plus spécifiquement, cette perturbation concerne les contributions du système vestibulaire dans les processus perception-action, tels que la perception du mouvement propre, de l'orientation spatiale, la stabilisation du regard et de la posture ainsi que le maintien de l'équilibre. La complexité de l'intégration multisensorielle met en évidence la nécessité de proposer un cadre multidimensionnel pour mieux comprendre la pathophysiologie vestibulaire. De plus, un dysfonctionnement chronique peut entraîner des symptômes variés allant des vertiges persistants aux troubles de l'équilibre. Malgré un traitement, une chronicisation de ces symptômes peut provoquer des lésions centrales permanentes, une adaptation comportementale perturbée et des comorbidités.

Les méthodes d'évaluation subjectives présentent de nombreuses limitations (variabilité inter-individuelle, sensibilité) malgré leur simplicité et leur rapidité d'utilisation dans la pratique clinique. Avec l'informatisation croissante, des outils objectifs à destination du système de santé sont de plus en plus développés pour optimiser la prise en charge des patients. Les étourdissements posturaux-perceptifs persistants et le mal des transports, connus pour présenter un dysfonctionnement particulier des fonctions perceptives, sensori-motrices et cognitives, ont été retenus en raison de leur complexité clinique et leurs conséquences sur la qualité de vie des personnes atteintes. L'évolution des technologies, comme la plateforme de posturographie dynamique MotionVR, permet d'étudier ces syndromes caractérisés par des crises vertigineuses et des troubles de l'équilibre, de manière plus précise et interactive.

Dans ce contexte, ce travail doctoral permet de contribuer à la compréhension des profils sensoriels au sein d'une population saine et pathologique, en laboratoire, afin de proposer une mise en perspective thérapeutique. Il explore les diverses applications de MotionVR, en mettant l'accent sur ses contributions dans la recherche clinique sur les étourdissements posturaux-perceptifs persistants (en anglais, *persistent postural-perceptual dizziness*) et éventuellement son utilité dans les programmes de rééducation, tels que ceux pour le mal des transports. Dans un premier temps, nous avons adopté une démarche méthodologique visant la mise en place d'une méthode de standardisation, de normalisation et de validation métrologique de cet outil. Dans un deuxième temps, nous avons exploré les diverses applications de cet outil, en mettant l'accent sur l'évaluation des profils sensoriels. De ce fait, notre travail s'est articulé autour de trois axes impliquants un volet développement méthodologique (section A) et un volet validation clinique (sections B, C, D).

A) Une évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration auprès d'une population saine fournissant des preuves de la fiabilité et de la validité de la plateforme ainsi que des valeurs de référence solides.

Dans le cadre d'une analyse posturographique instrumentée, nous avons réalisé un premier compte-rendu des caractéristiques méthodologiques des études rapportant des valeurs de référence. Ce compte-rendu a révélé une grande hétérogénéité méthodologique des études existantes avec un risque élevé de biais et une variabilité importante des définitions et des paramètres utilisés. Cette analyse critique de la littérature a souligné la nécessité de définir des protocoles standardisés en fournissant une documentation précise des caractéristiques de la population, du protocole et des facteurs influençant la performance posturale pour faciliter la reproduction expérimentale. De plus, une méta-analyse sur les effets de l'âge et du genre a démontré une meilleure stabilité posturale, en condition statique avec les yeux ouverts et fermés, à partir de 8 ans associée au développement sensoriel, suivie d'un déclin au-delà de 50 ans lié au vieillissement physiologique. Cependant, ces observations peuvent être en grande partie spéculatives étant donné le degré de variabilité méthodologique et de faible certitude des preuves. Néanmoins, nous pouvons retenir que ces résultats démontrent l'intérêt d'établir des valeurs de référence de l'ordre de l'âge biologique pour les enfants et de la décennie pour les adultes afin de garantir une meilleure estimation des troubles de l'équilibre dans la pratique clinique. Ainsi, cette première étude a permis de rendre compte des études existantes portant sur l'analyse posturographique instrumentée et des valeurs de référence publiées, tout en soulignant les lacunes dans les connaissances actuelles.

Cet état des lieux nous a permis de mettre l'accent sur l'importance d'une démarche transparente et robuste pour la mise en place de MotionVR, comme outil posturographique. Cette démarche a consisté à déterminer la validité métrologique de cet outil, par une étude de la fiabilité test-retest et de la validité par groupes extrêmes, étant donné les différences en termes d'environnement sensoriel, de population et de matériel utilisé. Dans leur ensemble, les résultats ont démontré une fiabilité modérée à bonne, mais dépendante du paramètre, pour les tests standardisés et communément utilisés dans la pratique clinique et dans la recherche. La validité par groupes extrêmes variait en fonction du paramètre également, avec une meilleure discrimination observée pour le SOT entre les patients vestibulaires et les sujets sains. Ces qualités métrologiques ouvrent de nouvelles perspectives pour une évaluation plus précise et immersive sur la MotionVR. Par la suite, nous avons réalisé une étude complémentaire sur les niveaux de sensibilité de la plateforme pour le SOT. Nous avons démontré que les niveaux influaient sur la performance en augmentant l'instabilité, caractérisée par une capacité réduite à intégrer les informations vestibulaires et visuelles. Ces résultats ont mis en évidence l'importance de calibrer l'amplitude des mouvements pour une

optimisation de l'évaluation. Cette standardisation du protocole doit être envisagée avec attention du fait de la variabilité des protocoles et des populations dans le domaine de la posturologie. Ainsi, la validation métrologique et la standardisation constituaient une étape préalable fondamentale pour la mise en place de cet équipement de pointe. Il était également nécessaire d'établir un échantillonnage représentatif afin de faciliter son utilisation dans la pratique clinique. Pour se faire, nous avons établi pour la première fois des valeurs de référence en fonction de l'âge et du genre pour les tests SOT, ADT et LOS sur la plateforme MotionVR. Cet échantillonnage représentatif nous a permis d'évaluer les effets de l'âge et du genre sur le contrôle postural dans des conditions visuelles et proprioceptives complexes. Les résultats ont révélé un déclin postural significatif à partir de la cinquième décennie pendant le SOT et le LOS, suggérant un impact du vieillissement physiologique sur la fonction d'équilibration, particulièrement marqué dans les conditions plus complexes. Les scores aux sous-paramètres mesurant les limites de stabilité étaient dépendants de la direction du mouvement, avec une meilleure performance observée dans les quadrants antérieurs. Pendant le SOT, des oscillations plus importantes ont été observées chez les femmes par comparaison des hommes, qui présentaient moins de difficultés à intégrer efficacement les informations vestibulaires et visuelles pour s'adapter. Au-delà de 70 ans, les femmes présentaient un temps de réaction plus long et un contrôle directionnel moins efficace que les hommes pendant le LOS. Pour finir, nous avons comparé les performances posturales sur la plateforme MotionVR à celles sur les plateformes communément utilisées, Neurocom et Bertec. Nos observations nous ont permis de démontrer que les participants étaient plus instables sur la plateforme MotionVR comparé aux plateformes Neurocom et Bertec, révélant un niveau de sensibilité et un sentiment de présence plus importants pour la MotionVR.

Les études dans ce premier chapitre expérimental nous ont permis de mettre en place une standardisation du protocole et de déterminer les qualités métrologiques pour une nouvelle plateforme de posturographie dynamique, la MotionVR. Nous avons pu établir des valeurs de référence, offrant un outil fiable et adapté aux besoins cliniques mais aussi pour la compréhension des profils sensoriels dans les syndromes induits par un dysfonctionnement vestibulaire. Cette problématique a été l'objet du deuxième axe de ce projet doctoral.

B) Une évaluation intégrative d'une vestibulopathie chronique pour une meilleure compréhension des déficits posturaux et sensoriels chez des patients atteints de PPPD.

Nous avons réalisé une étude de la performance posturale de patients atteints de PPPD (les étourdissements posturaux-perceptifs persistants) sur la plateforme MotionVR. Les patients présentaient une instabilité posturale, des déficits d'adaptation et des limites de stabilité réduite comparé à des sujets sains sur la plateforme. Ces observations ont permis de

confirmer l'utilité de la MotionVR pour détecter les troubles de l'équilibre chez des patients vestibulaires, offrant ainsi un outil pertinent pour le suivi clinique. De plus, une étude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale nous a permis de souligner l'importance des facteurs psychocognitifs et sensoriels dans la perception posturale erronée, biomarqueur clinique du PPPD. Les résultats ont révélé que l'anxiété liée aux inquiétudes physiques ainsi que les ratios somesthésiques, vestibulaires et visuels étaient des variables importantes pour le score composite du SOT. Pour les sous-paramètres du LOS, à savoir les temps de réaction et contrôle directionnel globaux, la susceptibilité au mal des transports était une variable importante. En effet, cette étude a mis en évidence l'importance de certaines variables psycho-cognitives dans les capacités posturales des patients atteints de PPPD sur la plateforme MotionVR. Nous avons constaté que les systèmes sensoriels (somesthésique, visuel et vestibulaire) sont les meilleurs prédicteurs des capacités posturales, confirmant leur rôle essentiel dans l'équilibre. L'anxiété liée à la santé physique a également un impact sur la capacité des patients à gérer des situations posturales difficiles, ce qui montre qu'il est important de considérer l'état émotionnel des patients dans l'évaluation posturale. Enfin, pour le contrôle directionnel des mouvements, la susceptibilité au mal des transports a été identifiée comme un facteur prédictif, suggérant que les personnes sensibles au mal des transports peuvent avoir plus de mal à contrôler leurs mouvements. Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer des perturbations sensorielles et de prendre en compte l'état émotionnel des patients atteints de PPPD, afin d'optimiser lors de l'évaluation posturale et les programmes de rééducation.

C) Une proposition de désensibilisation au mal des transports pour montrer l'efficacité thérapeutique de la plateforme.

Nous avons également souhaité proposer un protocole de désensibilisation au mal des transports afin de démontrer l'utilité de la plateforme MotionVR, à travers sa technologie avancée, dans les programmes de rééducation. Malgré l'exposition combinée à des stimulations routières et maritimes, intégrant différents scénarios sensoriels, les performances perceptivo-motrices n'ont significativement pas été améliorées. Les réponses sur la perception subjective 1 mois après le protocole ont montré un faible taux de succès.

Mise en perspective technologique et clinique

Ce projet doctoral souligne l'intérêt d'une démarche expérimentale graduelle pour la mise en place d'un outil à destination du domaine de la santé. Ce travail suit une progression méthodologique, depuis les bases théoriques jusqu'aux applications cliniques, en passant par les évaluations sur différentes populations. Dans l'ensemble, ces études permettent une mise en perspective tant technologique que scientifique. Dans un premier temps, nous pouvons

considérer que la plateforme MotionVR représente une avancée technologique, en termes de fonctionnalités et d'applications, dans le domaine de l'exploration posturologique multisensorielle. C'est un outil à destination du domaine de la santé qui intègre des stimulations immersives modulables par le contrôle des paramètres modifiables dans le logiciel associé (niveau de difficulté, durée, amplitude). Ce contrôle permet non seulement de simuler des environnements écologiques complexes pour des études scientifiques, mais aussi de créer des scénarios pour des applications variées. Les études menées dans le volet méthodologique ont permis de proposer un outil fiable et valide pour l'évaluation posturologique en utilisant les tests standardisés. La validation métrologique et les valeurs de référence obtenues chez la population saine soulignent l'utilité et la robustesse de cet outil pour la recherche clinique, avec des applications potentielles étendues au-delà des pathologies vestibulaires et du mal des transports. Ce volet méthodologique met en lumière de nouvelles perspectives technologiques en termes d'optimisation de protocoles immersifs par l'intégration sous forme de double tâches de dispositions haptiques ou de mouvements propres et de systèmes de feedback visuel ou sonore. Une autre possibilité est d'étudier ces processus en conditions réelles, dans l'environnement naturel, pour refléter les stratégies d'adaptation réelles, transitoires et durables, dans des conditions perturbation ou de privation sensorielle. Prenons l'exemple de l'expédition Deeptime. Dans une étude annexe, nous avons exploré les profils sensoriels, mettant en évidence les mécanismes de repondération sensorielle, en conditions naturelles. Cette étude présente les variations comportementales observées chez des sujets sains à la suite d'un isolement total en milieu souterrain. Cet environnement naturel a été choisi comme modèle car il offre la possibilité d'étudier les processus perception-action dans un cadre riche et divers sur le plan sensoriel. Nous avons observé des changements au niveau des profils sensoriels, impliquant les fonctions perceptives, sensori-motrices et cognitives. En effet, cet isolement a eu un impact négatif sur les capacités posturales et mnésiques, conduisant à une repondération sensorielle inadaptée. Ces observations ont mis en lumière la nécessité de développer des protocoles qui reproduisent fidèlement les conditions naturelles pour mieux comprendre et traiter les pathologies provoquant des déficits sensoriels et/ou moteurs. A plus forte raison, ces conditions complexes présentent des caractéristiques similaires à celles des études spatiales soulevant une myriade d'enjeux pour la société. Ces protocoles peuvent être combinées à des algorithmes prédictifs pour une meilleure quantification des profils sensoriels chez les personnes souffrant de troubles perceptivo-moteurs. L'intégration des modèles d'apprentissage automatique pourrait transformer la prise en charge des vestibulopathies, en analysant les réponses individuelles des patients, en identifiant des schémas prédictifs et en permettant d'adapter les traitements de manière plus précise et personnalisée en fonction des besoins spécifiques de chaque patient. En effet, ces modèles sont de plus en plus utilisés dans

le domaine de la santé pour optimiser les démarches diagnostiques et thérapeutiques. Ahmadi et al. (2020) ont montré que les méthodes d'apprentissage automatique étaient plus performantes pour discriminer entre les patients atteints d'une pathologie vestibulaire centrale et ceux atteints d'une pathologie vestibulaire périphérique, comparé à d'autres scores cliniques. De plus, Miettinen & Juhola, (2010) ont réalisé une classification des profils otoneurologiques en utilisant les modèles bayésiens. Ils ont observé que les classifieurs bayésiens présentaient des valeurs de sensibilité, de prédiction et de précision supérieures à 90 % ; démontrant la fiabilité de cette approche dans le diagnostic. En effet, ces modèles attribuent un poids à différentes composantes, chacune étant pertinente d'un point de vue clinique. Le volet clinique souligne l'intérêt d'intégrer des environnements virtuels dans la quantification de déficits perceptivo-moteurs. La plateforme MotionVR est particulièrement utile pour l'exposition progressive à des scénarios induisant des perturbations visuelles et haptiques. Les résultats observés dans ce volet, bien que nécessitant des études supplémentaires pour établir des conclusions définitives, indiquent une perspective prometteuse pour une prise en charge plus personnalisée et efficace. Ainsi, les retombés de ce projet vont permettre d'apporter des connaissances supplémentaires sur les profils sensoriels qui pourront éventuellement être intégrés, par la suite, dans un modèle de classification pour mieux différencier les profils sensoriels des patients. Ces informations permettront d'augmenter la puissance et sensibilité/spécificité de l'algorithme afin d'améliorer la composante personnelle de la médecine dite 5P (préventives, personnalisées, participatives, prédictives, basée sur les preuves). La poursuite des recherches permettra de maximiser l'impact de MotionVR et de favoriser son adoption et son utilisation dans la pratique clinique.

BIBLIOGRAPHIE

- Adamec, I., Juren Meaški, S., Krbot Skorić, M., Jažić, K., Crnošija, L., Milivojević, I., & Habek, M. (2020). Persistent postural-perceptual dizziness: Clinical and neurophysiological study. *Journal of Clinical Neuroscience*, 72, 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.01.043>
- Agrawal, Y., Pineault, K. G., & Semenov, Y. R. (2018). Health-related quality of life and economic burden of vestibular loss in older adults. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 3(1), 8–15. <https://doi.org/10.1002/lio2.129>
- Agrawal, Y., Zuniga, M. G., Davalos-Bichara, M., Schubert, M. C., Walston, J. D., Hughes, J., & Carey, J. P. (2012). Decline in semicircular canal and otolith function with age. *Otology and Neurotology*, 33(5). <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3182545061>
- Aharoni, M. M. H., Lubetzky, A. V., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). Factors associated with dynamic balance in people with Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD): a cross-sectional study using a virtual-reality Four Square Step Test. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00852-0>
- Ak, A. K., Çelebisoy, N., Özdemir, H. N., & Gökçay, F. (2022). Vestibular migraine and persistent postural perceptual dizziness: Handicap, emotional comorbidities, quality of life and personality traits. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 221, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2022.107409>
- Akis, E., Gurses, E., & Aksoy, S. (2023). Vestibulo-spinal reflex tests to determine unilateral vestibular loss. *Hearing, Balance and Communication*, 21(1), 61–66. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2125243>
- Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., & Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
- Albuquerque-Sendín, F., Fernández-de-las-Peñas, C., Santos-del-Rey, M., & Martín-Vallejo, F. J. (2009). Immediate effects of bilateral manipulation of talocrural joints on standing stability in healthy subjects. *Manual Therapy*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.math.2007.11.005>
- Alghwiri, A. A., Whitney, S. L., Baker, C. E., Sparto, P. J., Marchetti, G. F., Rogers, J. C., & Furman, J. M. (2012). The development and validation of the vestibular activities and participation measure. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(10). <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.03.017>
- Alonso, A. C., Luna, N. M. S., Mochizuki, L., Barbieri, F., Santos, S., & Greve, J. M. D. (2012). The influence of anthropometric factors on postural balance: the relationship between body composition and posturographic measurements in young adults. *Clinics*, 67(12), 1433–1441. [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(12\)14](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(12)14)
- Alvarez-Otero, R., & Perez-Fernandez, N. (2017). The limits of stability in patients with unilateral vestibulopathy. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(10). <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1339326>

- Amblard, B., & Cremieux, J. (1976). [Role of visual information concerning movement in the maintenance of postural equilibrium in man]. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquees Aux Effets de l'agression*, 17(C Spec No).
- Angelaki, D. E. (2004). Eyes on target: What neurons must do for the vestibuloocular reflex during linear motion. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 92, Issue 1, pp. 20–35). <https://doi.org/10.1152/jn.00047.2004>
- Angelaki, D. E., & Cullen, K. E. (2008). Vestibular System: The Many Facets of a Multimodal Sense. *Annual Review of Neuroscience*, 31(1), 125–150. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125555>
- Angelaki, D. E., Green, A. M., & Dickman, J. D. (2001). *Differential Sensorimotor Processing of Vestibulo-Ocular Signals during Rotation and Translation*.
- Anson, E. R., Ehrenburg, M. R., Wei, E. X., Bakar, D., Simonsick, E., & Agrawal, Y. (2019). Saccular function is associated with both angular and distance errors on the triangle completion test. *Clinical Neurophysiology*, 130(11), 2137–2143. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.08.027>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993a). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Asai, M., Watanabe, Y., Ohashi, N., & Mizukoshi, K. (1993b). Evaluation of vestibular function by dynamic posturography and other equilibrium examinations. *Acta Oto-Laryngologica*, 113(S504), 120–124. <https://doi.org/10.3109/00016489309128136>
- Assländer, L., & Streuber, S. (2020). Virtual reality as a tool for balance research: Eyes open body sway is reproduced in photo-realistic, but not in abstract virtual scenes. *PLoS ONE*, 15(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241479>
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Curtin, A., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2011). Using MazeSuite and functional near infrared spectroscopy to study learning in spatial navigation. *Journal of Visualized Experiments*, 56. <https://doi.org/10.3791/3443>
- Baek, J. H., Zheng, Y., Darlington, C. L., & Smith, P. F. (2010). Evidence that spatial memory deficits following bilateral vestibular deafferentation in rats are probably permanent. *Neurobiology of Learning and Memory*, 94(3), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2010.08.007>
- Balduzzi, S., Rücker, G., Nikolakopoulou, A., Papakonstantinou, T., Salanti, G., Efthimiou, O., & Schwarzer, G. (2023). netmeta: An R Package for Network Meta-Analysis Using Frequentist Methods. *Journal of Statistical Software*, 106. <https://doi.org/10.18637/jss.v106.i02>
- Baloh, R. W., Enrietto, J., Jacobson, K. M., & Lin, A. (2001). Age-related changes in vestibular function a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 210–219. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03747.x>
- Baloh, R. W., Jacobson, K. M., Beykirch, K., & Honrubia, V. (1998). Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. *Archives of Neurology*, 55(5), 649–654. <https://doi.org/10.1001/archneur.55.5.649>
- Baloh, R. W., Ying, S. H., & Jacobson, K. M. (2003). A longitudinal study of gait and balance dysfunction in normal older people. *Archives of Neurology*, 60(6). <https://doi.org/10.1001/archneur.60.6.835>

- Barozzi, S., Socci, M., Soi, D., Di Berardino, F., Fabio, G., Forti, S., Gasbarre, A. M., Brambilla, D., & Cesarani, A. (2014). Reliability of postural control measures in children and young adolescents. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 271(7), 2069–2077. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Beauchet, O., Barden, J., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Szturm, T., & Allali, G. (2016). The relationship between hippocampal volume and static postural sway: results from the GAIT study. *Age*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9883-4>
- Ben Achour Lebib, S., Missaoui, B., Miri, I., Ben Salah, F. Z., & Dziri, C. (2006). Rôle du Neurocom Balance Master® dans l'évaluation des troubles de l'équilibre et du risque de chute chez le sujet âgé. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*, 49(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2006.03.005>
- Berg, K. O., Maki, B. E., Williams, J. I., Holliday, P. J., & Wood-Dauphinee, S. L. (1992). Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(11), 1073–1080. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1444775>
- Besnard, S., Lopez, C., Brandt, T., Denise, P., & Smith, P. F. (2015). Editorial: The Vestibular System in Cognitive and Memory Processes in Mammals. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9(November), 7–10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00055>
- Besnard, S., Machado, M. L., Vignaux, G., Boulouard, M., Coquerel, A., Bouet, V., Freret, T., Denise, P., & Lelong-Boulouard, V. (2011). Influence of vestibular input on spatial and nonspatial memory and on hippocampal NMDA receptors. *Hippocampus*, 22(4), 814–826. <https://doi.org/10.1002/hipo.20942>
- Besnard, S., Tighilet, B., Chabbert, C., Hitier, M., Toulouse, J., Le Gall, A., Machado, M. L., & Smith, P. F. (2018). The balance of sleep: Role of the vestibular sensory system. In *Sleep Medicine Reviews* (Vol. 42, pp. 220–228). W.B. Saunders Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2018.09.001>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Du Lac, S., Hoffman, H. J., & Agrawal, Y. (2015). Vestibular vertigo and comorbid cognitive and psychiatric impairment: The 2008 National Health Interview Survey. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 87(4), 367–372. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2015-310319>
- Bigelow, R. T., Semenov, Y. R., Trevino, C., Ferrucci, L., Resnick, S. M., Simonsick, E. M., Xue, Q. L., & Agrawal, Y. (2015). Association between visuospatial ability and vestibular function in the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(9), 1837–1844. <https://doi.org/10.1111/jgs.13609>
- Bisdorff, A., Bosser, G., Gueguen, R., & Perrin, P. (2013). The epidemiology of vertigo, dizziness, and unsteadiness and its links to co-morbidities. *Frontiers in Neurology*, 4 MAR(March), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00029>
- Bisdorff, A. R., Staab, J. P., & Newman-Toker, D. E. (2015). Overview of the International Classification of Vestibular Disorders. *Neurologic Clinics*, 33(3), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2015.04.010>
- Bisdorff, A., Von Brevern, M., Lempert, T., & Newman-Toker, D. E. (2009). Classification of vestibular symptoms: towards an international classification of vestibular disorders. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 19(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0343>

- Bizzo, G., Guillet, N., Patat, A., & Gagey, P. M. (1985). Specifications for building a vertical force platform designed for clinical stabilometry. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 23(5), 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02448937>
- Black, F. O., & Nashner, L. M. (1984). Postural Disturbance in Patients with Benign Paroxysmal Positional Nystagmus. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, 93(6), 595–599. <https://doi.org/10.1177/000348948409300612>
- Black, F. O., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1988). Abnormal postural control associated with peripheral vestibular disorders. *Progress in Brain Research*, 76(C), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)64513-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)64513-6)
- Black, F. O., & Wall, C. (1981). Comparison of vestibulo-ocular and vestibulospinal screening tests. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 89(5), 811–817. <https://doi.org/10.1177/019459988108900523>
- Black, F. O., Wall, C., & Nashner, L. M. (1983). Effects of visual and support surface orientation references upon postural control in vestibular deficient subjects. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 199–210. <https://doi.org/10.3109/00016488309130936>
- Black, F. O., Wall, C., Rockette, H. E., & Kitch, R. (1982). Normal subject postural sway during the romberg test. *American Journal of Otolaryngology*, 3(5), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1)
- Bloem, B. R., Visser, J. E., & Allum, J. H. J. (2003). Chapter 20 Posturography. In *Handbook of Clinical Neurophysiology* (Vol. 1, Issue C). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1567-4231\(09\)70168-6](https://doi.org/10.1016/S1567-4231(09)70168-6)
- Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
- Boisgontie, M., Mignardot, J.-B., Nougier, V., Olivier, I., & Palluel, E. (2011). Attentional cost of the executive functions involved in postural control. *Science et Motricité*, 74. <https://doi.org/10.1051/sm/2011106>
- Borel, L., Lopez, C., Péruch, P., & Lacour, M. (2008). Vestibular syndrome: A change in internal spatial representation. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.002>
- Borich, M. R., Brodie, S. M., Gray, W. A., Ionta, S., & Boyd, L. A. (2015). Understanding the role of the primary somatosensory cortex: Opportunities for rehabilitation. *Neuropsychologia*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.007>
- Bosmans, J., Gommeren, H., Mertens, G., Cras, P., Engelborghs, S., Van Ombergen, A., Vereeck, L., Gilles, A., & Van Rompaey, V. (2022). Associations of Bilateral Vestibulopathy with Cognition in Older Adults Matched with Healthy Controls for Hearing Status. *JAMA Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 148(8), 731–739. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2022.1303>
- Bouccara, D., Rubin, F., Bonfils, P., & Lisan, Q. (2018). Management of vertigo and dizziness. In *Revue de Medecine Interne* (Vol. 39, Issue 11, pp. 869–874). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2018.02.004>
- Branco Lopes, A., Leal, G., Malvy, L., Wauquiez, G., Ponchel, A., Rivera, D., & Arango-Lasprilla, J. C. (2021). Neuropsychology in France. *Applied Neuropsychology:Adult*, 28(3), 328–339. <https://doi.org/10.1080/23279095.2019.1633329>

- Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). The dizzy patient: Don't forget disorders of the central vestibular system. In *Nature Reviews Neurology* (Vol. 13, Issue 6). <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.58>
- Brandt, T., Schautzer, F., Hamilton, D. A., Brüning, R., Markowitsch, H. J., Kalla, R., Darlington, C., Smith, P., & Strupp, M. (2005). Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain*, 128(11), 2732–2741. <https://doi.org/10.1093/brain/awh617>
- Breinbauer, H. A., Contreras, M. D., Lira, J. P., Guevara, C., Castillo, L., Ruëdinger, K., Muñoz, D., & Delano, P. H. (2020). Spatial Navigation Is Distinctively Impaired in Persistent Postural Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01361>
- Bremner, A. J., Holmes, N. P., & Spence, C. (2008). Infants lost in (peripersonal) space? *Trends in Cognitive Sciences*, 12(8), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.05.003>
- Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Experimental Brain Research*, 63(3). <https://doi.org/10.1007/BF00237488>
- Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., Mon-Williams, M., & Mushtaq, F. (2020). Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework. *Behavior Research Methods*, 52(2), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
- Browne, J., & O'Hare, N. (2001). Review of the different methods for assessing standing balance. *Physiotherapy*, 87(9), 489–495. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60696-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60696-7)
- Burr, D., & Gori, M. (2011). Multisensory integration develops late in humans. In *The Neural Bases of Multisensory Processes*. <https://doi.org/10.1201/b11092-23>
- Caldwell, A. R. (2022). SimplyAgree: An R package and jamovi Module for Simplifying Agreement and Reliability Analyses. *Journal of Open Source Software*, 7(71). <https://doi.org/10.21105/joss.04148>
- Carrick, F. R., Oggero, E., & Pagnacco, G. (2007). Posturographic changes associated with music listening. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 13(5), 519–526. <https://doi.org/10.1089/acm.2007.7020>
- Casselbrant, M. L., Mandel, E. M., Sparto, P. J., Perera, S., Redfern, M. S., Fall, P. A., & Furman, J. M. (2010). Longitudinal posturography and rotational testing in children three to nine years of age: Normative data. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 142(5), 708–714. <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2010.01.028>
- Castro, P., Bancroft, M. J., Arshad, Q., & Kaski, D. (2022). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) from Brain Imaging to Behaviour and Perception. *Brain Sciences*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/brainsci12060753>
- Cathers, I., Day, B. L., & Fitzpatrick, R. C. (2005). Otolith and canal reflexes in human standing. *The Journal of Physiology*, 563(1), 229–234. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.079525>
- Celis-Aguilar, E., Castro-Urquiza, A., & Mariscal-Castro, J. (2018). Evaluation and interpretation of the bucket test in healthy individuals*. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(5), 458–462. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1410289>
- Cha, Y. H., Golding, J. F., Keshavarz, B., Furman, J., Kim, J. S., Lopez-Escamez, J. A., Magnusson, M., Yates, B. J., Lawson, B. D., Staab, J. P., & Bisdorff, A. (2021). Motion sickness diagnostic criteria: Consensus Document of the Classification Committee of the

- Bárány Society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(5), 327–344. <https://doi.org/10.3233/VES-200005>
- Chabbert, C. (2013). New insights into vestibular neuropharmacology: From bench to bedside. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 23(3), 107–111. <https://doi.org/10.3233/VES-130495>
- Chaikereee, N., Saengsirisuwan, V., Chinsongkram, B., & Boonsinsukh, R. (2015). Interaction of age and foam types used in Clinical Test for Sensory Interaction and Balance (CTSIB). *Gait and Posture*, 41(1), 313–315. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.011>
- Chander, H., Arachchige, S. N. K. K., Hill, C. M., Turner, A. J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2019). Virtual-reality-induced visual perturbations impact postural control system behavior. *Behavioral Sciences*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Chari, D. A., Madhani, A., Sharon, J. D., & Lewis, R. F. (2022). Evidence for cognitive impairment in patients with vestibular disorders. *Journal of Neurology*, 269(11), 5831–5842. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11289-3>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010a). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210. <https://doi.org/10.1159/000255338>
- Charpiot, A., Tringali, S., Ionescu, E., Vital-Durand, F., & Ferber-Viart, C. (2010b). Vestibulo-ocular reflex and balance maturation in healthy children aged from six to twelve years. *Audiology and Neurotology*, 15(4), 203–210. <https://doi.org/10.1159/000255338>
- Cheng, Y.-Y., Kuo, C.-H., Hsieh, W.-L., Lee, S.-D., Lee, W.-J., Chen, L.-K., & Kao, C.-L. (2012). Anxiety, depression and quality of life (QoL) in patients with chronic dizziness. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 54(1), 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.04.007>
- Cheng, Z., & Gu, Y. (2018). Vestibular system and self-motion. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12(November), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00456>
- Chetana, N., & Jayesh, R. (2015). Subjective visual vertical in various vestibular disorders by using a simple bucket test. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 67(2), 180–184. <https://doi.org/10.1007/s12070-014-0760-0>
- Chiarella, G., Petrolo, C., Riccelli, R., Giofrè, L., Olivadese, G., Gioacchini, F. M., Scarpa, A., Cassandro, E., & Passamonti, L. (2016). Chronic subjective dizziness: Analysis of underlying personality factors. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(4), 403–408. <https://doi.org/10.3233/VES-160590>
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002a). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiari, L., Rocchi, L., & Cappello, A. (2002b). Stabilometric parameters are affected by anthropometry and foot placement. *Clinical Biomechanics*, 17(9–10), 666–677. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00107-9)
- Chiarovano, E., de Waele, C., MacDougall, H. G., Rogers, S. J., Burgess, A. M., & Curthoys, I. S. (2015). Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots or at a virtual reality scene. *Frontiers in Neurology*, 6(JUL). <https://doi.org/10.3389/fneur.2015.00164>

- Chiarovano, E., Wang, W., Reynolds, P., & MacDougall, H. G. (2018). Imbalance: Objective measures versus subjective self-report in clinical practice. *Gait and Posture*, 59, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.10.019>
- Chiarovano, E., Wang, W., Rogers, S. J., MacDougall, H. G., Curthoys, I. S., & de Waele, C. (2017). Balance in virtual reality: Effect of age and bilateral vestibular loss. *Frontiers in Neurology*, 8(JAN). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00005>
- Clark, R. A., Mentiplay, B. F., Pua, Y. H., & Bower, K. J. (2018). Reliability and validity of the Wii Balance Board for assessment of standing balance: A systematic review. *Gait and Posture*, 61(December 2017), 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.12.022>
- Clark, S., Rose, D. J., & Fujimoto, K. (1997). Generalizability of the limits of stability test in the evaluation of dynamic balance among older adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78(10), 1078–1084. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(97\)90131-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(97)90131-3)
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996a). Changes in Sensory Organization Test Scores with Age. In *Age and Ageing* (Vol. 25). <https://academic.oup.com/ageing/article/25/1/39/35818>
- Cohen, H., Heaton, L. G., Congdon, S. L., & Jenkins, H. A. (1996b). Changes in sensory organization test scores with age. *Age and Ageing*, 25(1), 39–44. <https://doi.org/10.1093/ageing/25.1.39>
- Cohen, H. S. (2019). A review on screening tests for vestibular disorders. In *Journal of Neurophysiology* (Vol. 122, Issue 1, pp. 81–92). American Physiological Society. <https://doi.org/10.1152/jn.00819.2018>
- Cohen, H. S., Mulavara, A. P., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2019). Screening for Vestibular Disorders Using the Modified Clinical Test of Sensory Interaction and Balance and Tandem Walking With Eyes Closed. *Otology and Neurotology*, 40(5), 658–665. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002173>
- Cohen, H. S., & Sangi-Haghpeykar, H. (2012). Subjective visual vertical in vestibular disorders measured with the bucket test. *Acta Oto-Laryngologica*, 132(8). <https://doi.org/10.3109/00016489.2012.668710>
- Cohen, H. S., Sangi-Haghpeykar, H., Ricci, N. A., Kampangkaew, J., & Williamson, R. A. (2014). Utility of stepping, walking, and head impulses for screening patients for vestibular impairments. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 151(1), 131–136. <https://doi.org/10.1177/0194599814527724>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018a). Tandem walking as a quick screening test for vestibular disorders. *Laryngoscope*, 128(7), 1687–1691. <https://doi.org/10.1002/lary.27022>
- Cohen, H. S., Stitz, J., Sangi-Haghpeykar, H., Williams, S. P., Mulavara, A. P., Peters, B. T., & Bloomberg, J. J. (2018b). Utility of quick oculomotor tests for screening the vestibular system in the subacute and chronic populations. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(4), 382–386. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1398838>
- Commings, S., Duffin, J., Chaves, K., Leahy, D., Corcoran, K., Caffrey, M., Keenan, L., Finan, D., & Thornberry, C. (2020). NavWell: A simplified virtual-reality platform for spatial navigation and memory experiments. *Behavior Research Methods*, 52(3), 1189–1207. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01310-5>

- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "What", "Where", and "How". *Acta Psychologica*, 107(1–3), 43–68. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(01\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(01)00021-X)
- Creem-Regehr, S. H., Kelly, J. W., Bodenheimer, B., & Stefanucci, J. K. (2024). Virtual reality as a tool to understand spatial navigation. In *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology* (pp. 103–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820480-1.00011-5>
- Cullen, K. E. (2012). The vestibular system: Multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends in Neurosciences*, 35(3), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.12.001>
- Cullen, K. E. (2016). Physiology of central pathways. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 17–40). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00002-9>
- Curthoys, I. S. (2012). The interpretation of clinical tests of peripheral vestibular function. In *Laryngoscope* (Vol. 122, Issue 6, pp. 1342–1352). <https://doi.org/10.1002/lary.23258>
- Danneels, M., Van Hecke, R., Leyssens, L., van de Berg, R., Dhooge, I., Cambier, D., Delrue, S., Van Rompaey, V., & Maes, L. (2023). The impact of vestibular function on cognitive–motor interference: a case–control study on dual-tasking in persons with bilateral vestibulopathy and normal hearing. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40465-2>
- De Gelder, B., & Bertelson, P. (2003). Multisensory integration, perception and ecological validity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.014>
- de Haan, E. H. F., & Dijkerman, H. C. (2020). Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-evaluation and a New Model. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 24, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.04.003>
- de la Torre, J., Marin, J., Marin, J. J., Auria, J. M., & Sanchez-Valverde, M. B. (2017). Balance study in asymptomatic subjects: Determination of significant variables and reference patterns to improve clinical application. *Journal of Biomechanics*, 65, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.013>
- De Valck, C. F. J., Denollet, J., Wuyts, F. L., & Van De Heyning, P. H. (2007). Increased handicap in vertigo patients with a type-D personality. *Audiological Medicine*, 5(3), 169–175. <https://doi.org/10.1080/16513860701497441>
- De Vestel, C., De Hertogh, W., Van Rompaey, V., & Vereeck, L. (2022). Comparison of Clinical Balance and Visual Dependence Tests in Patients With Chronic Dizziness With and Without Persistent Postural-Perceptual Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.880714>
- Denise, P., Paolino, M., & Golding, J. F. (2013). Motion sickness susceptibility in healthy subjects and vestibular patients: Effects of gender, age and trait-anxiety. *Journal of Vestibular Research*, 203–210. <https://doi.org/10.3233/VES-130501>
- Deroualle, D., Borel, L., Tanguy, B., Bernard-Demanze, L., Devèze, A., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2019). Unilateral vestibular deafferentation impairs embodied spatial cognition. *Journal of Neurology*, 266, 149–159. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09433-7>

- Derrington, A. M., Allen, H. A., & Delicato, L. S. (2004). Visual Mechanisms of Motion Analysis and Motion Perception. *Annual Review of Psychology*, 55(1), 181–205. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.141903>
- Dessai, T. D., & Prasannan, A. (2021). Subjective visual vertical and horizontal: bucket test normative. *Hearing, Balance and Communication*, 19(4). <https://doi.org/10.1080/21695717.2021.1943786>
- di Fabio, R. P. (1995). Sensitivity and specificity of platform posturography for identifying patients with vestibular dysfunction. *Physical Therapy*, 75(4), 290–305. <https://doi.org/10.1093/ptj/75.4.290>
- di Fabio, R. P. (1996). Meta-analysis of the sensitivity and specificity of platform posturography. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 122(2), 150–156. <https://doi.org/10.1001/archotol.1996.01890140036008>
- Di Fabio, R. P., & Foudriat, B. A. (1996). Responsiveness and reliability of a pediatric strategy score for balance. *Physiotherapy Research International*, 1(3), 180–194. <https://doi.org/10.1002/pri.57>
- Dickman, J. D. (2018). The Vestibular System. In *Fundamental Neuroscience for Basic and Clinical Applications: Fifth Edition* (Fifth Edit, pp. 320–333). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39632-5.00022-0>
- Dieterich, M. (2007). Central vestibular disorders. In *Journal of Neurology* (Vol. 254, Issue 5, pp. 559–568). <https://doi.org/10.1007/s00415-006-0340-7>
- Dieterich, M., & Brandt, T. (2024). Central vestibular networking for sensorimotor control, cognition, and emotion. *Current Opinion in Neurology*, 37(1), 74–82. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001233>
- Dobbels, B., Lucieer, F., Mertens, G., Gilles, A., Moyaert, J., van de Heyning, P., Guinand, N., Fornos, A. P., Herssens, N., Hallemans, A., Vereeck, L., Vanderveken, O., van Rompaey, V., & van de Berg, R. (2020). Prospective cohort study on the predictors of fall risk in 119 patients with bilateral vestibulopathy. *PLoS ONE*, 15(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228768>
- Dobbels, B., Mertens, G., Gilles, A., Claes, A., Moyaert, J., Van De Berg, R., Van De Heyning, P., Vanderveken, O., & Van Rompaey, V. (2019). Cognitive function in acquired bilateral vestibulopathy: A cross-sectional study on cognition, hearing, and vestibular loss. *Frontiers in Neuroscience*, 13(APR), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00340>
- Dobbels, B., Peetermans, O., Boon, B., Mertens, G., Van de Heyning, P., & Van Rompaey, V. (2019). Impact of bilateral vestibulopathy on spatial and nonspatial cognition: A systematic review. *Ear and Hearing*, 40(4), 757–765. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000679>
- Dobie, T. G. (2019). *Psychological Mechanisms That Exacerbate Motion Sickness* (pp. 113–127). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97493-4_6
- Dolins, F. L., Schweller, K., & Milne, S. (2017). Technology advancing the study of animal cognition: Using virtual reality to present virtually simulated environments to investigate nonhuman primate spatial cognition. *Current Zoology*, 63(1), 97–108. <https://doi.org/10.1093/cz/zow121>
- Domènech-Vadillo, E., Aguilera-Aguilera, G., Sánchez-Blanco, C., Batuecas-Caletrio, Á., Guajardo, C., Pérez, N., Trinidad-Ruiz, G., Gimeno, C., Rama, J., Rossi-Izquierdo, M., San-Roman-Rodriguez, E., Patiño-Castiñeira, B., Espinosa-Sanchez, J. M., Matión, E.,

- Barona, R., Krstulovic, C., Benitez-Rosario, J., Santandreu, E., Zuma e Maia, F. C., ... Rey-Martínez, J. (2019). Normative data for static balance testing in healthy individuals using open source computerized posturography. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 276(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5170-6>
- Donovan, J., De Silva, L., Cox, H., Palmer, G., & Semciw, A. I. (2023). Vestibular dysfunction in people who fall: A systematic review and meta-analysis of prevalence and associated factors. *Clinical Rehabilitation*, 37(9), 1229–1247. <https://doi.org/10.1177/02692155231162423>
- Doyle, T. L., Newton, R. U., & Burnett, A. F. (2005). Reliability of traditional and fractal dimension measures of quiet stance center of pressure in young, healthy people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(10), 2034–2040. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.05.014>
- Duracinsky, M., Mosnier, I., Bouccara, D., Sterkers, O., Chassany, O., Attal, N., Bertholon, P., Bordure, P., Chays, A., Dubois, B., Dubreuil, C., Ferber, C., Ferran, P., Fraysse, M. J., Garcia-Macé, J., Gehanno, P., Lacour, M., Liard, F., Mari, I., ... Toupet, M. (2007). Literature review of questionnaires assessing vertigo and dizziness, and their impact on patients' quality of life. *Value in Health*, 10(4), 273–284. <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2007.00182.x>
- Eikema, D. J. A., Hatzitaki, V., Tzovaras, D., & Papaxanthis, C. (2012). Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment. *Age*, 34(6), 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9310-9>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). How vestibular dysfunction transforms into symptoms of depersonalization and derealization? *Journal of the Neurological Sciences*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120530>
- Elyoseph, Z., Geisinger, D., Zaltzman, R., Hartman, T. G., Gordon, C. R., & Mintz, M. (2023). The overarching effects of vestibular deficit: Imbalance, anxiety, and spatial disorientation. *Journal of the Neurological Sciences*, 451. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120723>
- Eriksen, N. D., & Hougaard, D. D. (2023). Age- and gender-specific normative data on computerized dynamic posturography in a cohort of Danish adults. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(5), 2191–2200. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07706-y>
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras, R., & Soto-Varela, A. (2016). Postural changes associated with ageing on the sensory organization test and the limits of stability in healthy subjects. *Auris Nasus Larynx*, 43(2), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2015.07.001>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012a). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>
- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Crujeiras-Casais, R., Labella-Caballero, T., & Soto-Varela, A. (2012b). Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(2), 673–677. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>

- Faraldo-García, A., Santos-Pérez, S., Rossi-Izquierdo, M., Lirola-Delgado, A., Vaamonde-Sánchez-Andrade, I., del-Río-Valeiras, M., & Soto-Varela, A. (2016). Posturographic limits of stability can predict the increased risk of falls in elderly patients with instability? *Acta Oto-Laryngologica*, 136(11). <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1201591>
- Farenc, I., Rougier, P., & Berger, L. (2003). The influence of gender and body characteristics on upright stance. *Annals of Human Biology*, 30(3), 279–294. <https://doi.org/10.1080/0301446031000068842>
- Fearing, F. S. (1924). The factors influencing static equilibrium. *J Comp Psychol*, 4, 91–121.
- Fong, E., Li, C., Aslakson, R., & Agrawal, Y. (2015). Systematic review of patient-reported outcome measures in clinical vestibular research. In *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 96, Issue 2, pp. 357–365). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.017>
- Formeister, E. J., Krauter, R., Kirk, L., Zhu, T. R., Rizk, H. G., & Sharon, J. D. (2020). Understanding the Dizziness Handicap Inventory (DHI): A Cross Sectional Analysis of Symptom Factors That Contribute to DHI Variance. *Otology & Neurotology*, 41(1), 86–93. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002438>
- Frank, S. M., Mark, X., & Greenlee, W. (2018). The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? *REVIEW Sensory Processing J Neurophysiol*, 120, 1438–1450. <https://doi.org/10.1152/jn.00907.2017.-Here>
- Freeman, E. E., Muñoz, B., Rubin, G., & West, S. K. (2007). Visual field loss increases the risk of falls in older adults: The salisbury eye evaluation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 48(10). <https://doi.org/10.1167/iovs.07-0326>
- Friello, P., Silver, N., Sangi-Haghpeykar, H., & Cohen, H. S. (2022). Screening for balance in children and adults in a community science education setting: Normative data, influence of age, sex, and body mass index, and feasibility. *PLoS ONE*, 17(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268030>
- Fujimoto, C., Murofushi, T., Chihara, Y., Ushio, M., Sugawara, K., Yamaguchi, T., Yamasoba, T., & Iwasaki, S. (2009). Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: Analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1408–1414. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.05.002>
- Fukushima, A., Kabaya, K., Minakata, T., Katsumi, S., Esaki, S., & Iwasaki, S. (2024). Age-related differences in the characteristics of persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1378206>
- Furman, J. M. (1995). Role of posturography in the management of vestibular patients. *Otolaryngology- Head and Neck Surgery*, 112(1), 8–15. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(95\)70300-4](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(95)70300-4)
- Furman, J. M., & Redfern, M. S. (2001). Effect of aging on the otolith-ocular reflex. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 11(2). <https://doi.org/10.3233/ves-2001-11204>
- Gabriel, G. A., Harris, L. R., Gnanasegaram, J. J., Cushing, S. L., Gordon, K. A., Haycock, B. C., & Campos, J. L. (2022). Age-related changes to vestibular heave and pitch perception and associations with postural control. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09807-4>

- Gagey, P. M. (2016). International standardization of clinical stabilometry (Minutes of the meeting of posturologists, Paris 07.10.2015). In *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal* (Vol. 14, Issue September). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.315>
- Gagey, P.-M. (2016). Recording Conditions - Normes13. *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal*, 14(December 2016). <https://doi.org/10.17784/mtprehabjournal.2016.14.362>
- Gálvez-García, G., Aldunate, N., Bascour-Sandoval, C., Barramuño, M., Fonseca, F., & Gómez-Milán, E. (2020). Decreasing motion sickness by mixing different techniques. *Applied Ergonomics*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102931>
- Gammeri, R., Léonard, J., Toupet, M., Hautefort, C., van Nechel, C., Besnard, S., Machado, M. L., Nakul, E., Montava, M., Lavieille, J. P., & Lopez, C. (2022). Navigation strategies in patients with vestibular loss tested in a virtual reality T-maze. *Journal of Neurology*, 269(8), 4333–4348. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11069-z>
- Ganança, F. F., Gazzola, J. M., Aratani, M. C., Perracini, M. R., & Ganança, M. M. (2006). Circumstances and consequences of falls in elderly people with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 72(3), 388–392. [https://doi.org/10.1016/s1808-8694\(15\)30974-5](https://doi.org/10.1016/s1808-8694(15)30974-5)
- García-Soidán, J. L., García-Liñeira, J., Leirós-Rodríguez, R., & Soto-Rodríguez, A. (2020). Physical Activity Practice and Optimal Development of Postural Control in School Children: Are They Related? *Journal of Clinical Medicine*, 9(9), 2919. <https://doi.org/10.3390/jcm9092919>
- Garrett, B., Taverner, T., Gromala, D., Tao, G., Cordingley, E., & Sun, C. (2018). Virtual reality clinical research: Promises and challenges. In *JMIR Serious Games* (Vol. 6, Issue 4). JMIR Publications Inc. <https://doi.org/10.2196/10839>
- Gauchard, G. (2003). Physical activity improves gaze and posture control in the elderly. *Neuroscience Research*, 45(4), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(03\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(03)00008-7)
- Geller, A. S., Schleifer, I. K., Sederberg, P. B., Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2007). *PyEPL: A cross-platform experiment-programming library*.
- Gibbons, C. T., Amazeen, P. G., & Likens, A. D. (2019). Effects of foot placement on postural sway in the anteroposterior and mediolateral directions. *Motor Control*, 23(2), 149–170. <https://doi.org/10.1123/mc.2017-0074>
- Gioacchini, F. M., Alicandri-Ciufelli, M., Kaleci, S., Magliulo, G., & Re, M. (2014). Prevalence and diagnosis of vestibular disorders in children: A review. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(5), 718–724. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.02.009>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018a). *Normative Data for the BTrackS Balance Test of Postural Sway: Results from 16,357 Community-Dwelling Individuals Who Were 5 to 100 Years Old* (Vol. 98). <https://academic.oup.com/ptj/article/98/9/779/4998861>
- Goble, D. J., & Baweja, H. S. (2018b). Postural sway normative data across the adult lifespan: Results from 6280 individuals on the Balance Tracking System balance test. *Geriatrics and Gerontology International*, 18(8), 1225–1229. <https://doi.org/10.1111/ggi.13452>
- Goble, D. J., Brar, H., Brown, E. C., Marks, C. R., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the balance tracking system modified clinical test of sensory integration and balance

- protocol. *Medical Devices: Evidence and Research*, 12, 183–191. <https://doi.org/10.2147/MDER.S206530>
- Goble, D. J., Rauh, M. J., & Baweja, H. S. (2019). Normative data for the btracks balance test concussion-management tool: Results from 10045 athletes aged 8 to 21 years. *Journal of Athletic Training*, 54(4), 439–444. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-178-18>
- Gofrit, S. G., Mayler, Y., Eliashar, R., Bdolah-Abram, T., Ilan, O., & Gross, M. (2017). The Association between Vestibular Physical Examination, Vertigo Questionnaires, and the Electronystagmography in Patients with Vestibular Symptoms: A Prospective Study. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 126(4), 315–321. <https://doi.org/10.1177/0003489417691298>
- Golding, J. F. (2006a). Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 129(1–2), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2006.07.019>
- Golding, J. F. (2006b). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Golding, J. F. (2016). Motion sickness. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, pp. 371–390). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00027-3>
- Gómez-Alvarez, F. B., & Jáuregui-Renaud, K. (2011). Psychological Symptoms and Spatial Orientation During the First 3 Months After Acute Unilateral Vestibular Lesion. *Archives of Medical Research*, 42(2), 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.03.004>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2010). Poor Haptic Orientation Discrimination in Nonsighted Children May Reflect Disruption of Cross-Sensory Calibration. *Current Biology*, 20(3). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.069>
- Graf, W., & Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus - Palevol*, 5(3–4), 637–655. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.12.009>
- Grill, E., Darrouzet, V., Mansmann, U., & Chabbert, C. (2024). Prevalence of vestibular disease in France: analysis of prescription data from a national health insurance database. *Journal of Neurology*. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12423-z>
- Grill, E., Heuberger, M., Strobl, R., Saglam, M., Holle, R., Linkohr, B., Ladwig, K. H., Peters, A., Schneider, E., Jahn, K., & Lehnen, N. (2018). Prevalence, Determinants, and Consequences of Vestibular Hypofunction. Results From the KORA-FF4 Survey. *Frontiers in Neurology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01076>
- Grill, E., Penger, M., & Kentala, E. (2016). Health care utilization, prognosis and outcomes of vestibular disease in primary care settings: systematic review. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 36–44). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7913-2>
- Guerra-Jiménez, G., Arenas Rodríguez, A., Carlos, J., González, F., Plasencia, D. P., & Ramos Macías, Á. (2017). Epidemiology of Vestibular Disorders in the Otoneurology Unit. In *Acta Otorrinolaringol Esp* (Vol. 68, Issue 6). www.elsevier.es/otorrino
- Hackenberg, B., O'Brien, K., Döge, J., Lackner, K. J., Beutel, M. E., Münzel, T., Wild, P. S., Pfeiffer, N., Chalabi, J., Matthias, C., & Bahr-Hamm, K. (2023). Vertigo and its burden of disease—Results from a population-based cohort study. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, 8(6), 1624–1630. <https://doi.org/10.1002/lio2.1169>

- Hageman, P. A., Leibowitz, J. M., & Blanke, D. (1995). Age and gender effects on postural control measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(10), 961–965. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(95\)80075-1](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80075-1)
- Hamid, M. A., & Hughes, G. B. (1991). Specificity and Sensitivity of Dynamic Posturography A Retrospective Analysis. In *Acta Otolaryngol (Stockh)* (Vol. 481).
- Hamid, M. A., Hughes, G. B., & Kinney, S. E. (1991). Specificity and sensitivity of dynamic posturography: A retrospective analysis. *Acta Oto-Laryngologica*, 111(S481), 596–600. <https://doi.org/10.3109/00016489109131480>
- Harcourt, J. P. (1995). Posturography—applications and limitations in the management of the dizzy patient. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 20(4), 299–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1995.tb00045.x>
- Harro, C. C., Marquis, A., Piper, N., Burdis, C., & Harro, C. C. (2016). Reliability and Validity of Force Platform Measures of Balance Impairment in Individuals With Parkinson's Disease. *Physical Therapy*, 96(12), 1955–1964. <https://doi.org/10.2522/ptj.20160099>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020a). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait and Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Hébert-Losier, K., & Murray, L. (2020b). Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review. *Gait & Posture*, 75(May 2019), 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.027>
- Henry, N. E., Weart, A. N., Miller, E. M., Feltner, L. D., & Goss, D. L. (2022). Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in United States Military Academy Boxers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 17(3), 366–377. <https://doi.org/10.26603/001c.32547>
- Herssens, N., Verbecque, E., McCrum, C., Meijer, K., van de Berg, R., Saeys, W., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Hallemans, A. (2020). A Systematic Review on Balance Performance in Patients With Bilateral Vestibulopathy. *Physical Therapy*, 100(9), 1582–1594. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa083>
- Heutink, J., Broekman, M., Brookhuis, K. A., Melis-Dankers, B. J. M., & Cordes, C. (2019). The effects of habituation and adding a rest-frame on experienced simulator sickness in an advanced mobility scooter driving simulator. *Ergonomics*, 62(1), 65–75. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1518543>
- Higgins, J. P. T., Green, S., & Ben Van Den, A. (2020). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *International Coaching Psychology Review*, 15(2). <https://doi.org/10.53841/bpsicpr.2020.15.2.123>
- Hilber, P., Cendelin, J., Le Gall, A., Machado, M.-L., Tuma, J., & Besnard, S. (2018). Cooperation of the vestibular and cerebellar networks in anxiety disorders and depression. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 89, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2018.10.004>
- Hill, K. D., Carroll, S. G., Kalogeropoulos, A., & Schwarz, J. A. (1995). Retest Reliability of Centre of Pressure Measures of Standing Balance in Healthy Older Women. *Australian Journal on Ageing*, 14(2), 76–80. <https://doi.org/10.1111/j.1741-6612.1995.tb00701.x>
- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014a). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>

- Hitier, M., Besnard, S., & Smith, P. F. (2014b). Vestibular pathways involved in cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(July), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00059>
- Hong, H. R., Shim, D. B., Kim, T. S., Shim, B. S., Ahn, J. H., Chung, J. W., Yoon, T. H., & Park, H. J. (2013). Results of caloric and sensory organization testing of dynamic posturography in migrainous vertigo: Comparison with Meniere's disease and vestibular neuritis. *Acta Oto-Laryngologica*, 133(12), 1236–1241. <https://doi.org/10.3109/00016489.2013.820343>
- Hong, S. M., Lee, H. J., Lee, B., Park, S. K., Hong, S. K., Park, I. S., Kim, Y. B., & Kim, H. J. (2013). Influence of vestibular disease on psychological distress: A multicenter study. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, 148(5), 810–814. <https://doi.org/10.1177/0194599813476476>
- Horak, F. B., Buchanan, J., Creath, R., & Jeka, J. (2002). Vestibulospinal Control of Posture. In *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 508, pp. 139–145). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_17
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381. <https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369>
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82(1), 167–177. <https://doi.org/10.1007/BF00230848>
- Hülse, R., Biesdorf, A., Hörmann, K., Stuck, B., Erhart, M., Hülse, M., & Wenzel, A. (2019). Peripheral Vestibular Disorders: An Epidemiologic Survey in 70 Million Individuals. *Otology and Neurotology*, 40(1), 88–95. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002013>
- Im, J. J., Na, S., Kang, S., Jeong, H., Lee, E. S., Lee, T. K., Ahn, W. Y., Chung, Y. A., & Song, I. U. (2022). A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Trial of Transcranial Direct Current Stimulation for the Treatment of Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD). *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.868976>
- Indovina, I., Bosco, G., Riccelli, R., Maffei, V., Lacquaniti, F., Passamonti, L., & Toschi, N. (2020). Structural connectome and connectivity lateralization of the multimodal vestibular cortical network. *NeuroImage*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117247>
- Indovina, I., Passamonti, L., Mucci, V., Chiarella, G., Lacquaniti, F., & Staab, J. P. (2021). Brain correlates of persistent postural-perceptual dizziness: A review of neuroimaging studies. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 10, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/jcm10184274>
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005a). Evolution physiologique des paramètres d'équilibre sur Equitest chez l'adulte sain âgé de 20 à 60 ans. *Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005b). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale : Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)
- Ionescu, E., Dubreuil, C., & Ferber-Viart C, C. (2005c). Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest. *Annales d'oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico Faciale : Bulletin de La Société d'oto-Laryngologie Des Hôpitaux de Paris*, 122(5), 231–235. [https://doi.org/10.1016/S0003-438X\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/S0003-438X(05)82354-0)

- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., Vuillerme, N., Amblard, B., & Gresty, M. A. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience*, 169(3), 1199–1215. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.072>
- Jacob, A., Tward, D. J., Resnick, S., Smith, P. F., Lopez, C., Rebello, E., Wei, E. X., Tilak Ratnanather, J., & Agrawal, Y. (2020). Vestibular function and cortical and sub-cortical alterations in an aging population. *Heliyon*, 6(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04728>
- Jacobson, G. P., & Newman, C. W. (1990). The Development of the Dizziness Handicap Inventory. *Archives of Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 116(4), 424–427. <https://doi.org/10.1001/archotol.1990.01870040046011>
- Jamon, M. (2014). The development of vestibular system and related functions in mammals: impact of gravity. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00011>
- Jáuregui-Renaud, K., García-Jacuinde, D. M., Bárcenas-Olvera, S. P., Gresty, M. A., & Gutiérrez-Márquez, A. (2024). Spatial anxiety contributes to the dizziness-related handicap of adults with peripheral vestibular disease. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1365745>
- Jayakaran, P., Johnson, G. M., & Sullivan, S. J. (2011). Test-Retest Reliability of the Sensory Organization Test in Older Persons With a Transtibial Amputation. *PM and R*, 3(8). <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.01.005>
- Kammerlind, A. S. C., Ledin, T. E. A., Skargren, E. I. B., & Ödkvist, L. M. (2005). Long-term follow-up after acute unilateral vestibular loss and comparison between subjects with and without remaining symptoms. *Acta Oto-Laryngologica*, 125(9), 946–953. <https://doi.org/10.1080/00016480510043477>
- Karabulut, M., Van Laer, L., Hallemans, A., Vereeck, L., Van Rompaey, V., Viechtbauer, W., Melliti, A., van Stiphout, L., Mohamad, A., Pérez Fornos, A., Guinand, N., & van de Berg, R. (2023). Chronic symptoms in patients with unilateral vestibular hypofunction: systematic review and meta-analysis. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 14). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1177314>
- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R., & Roll, J. P. (1999). From balance regulation to body orientation: Two goals for muscle proprioceptive information processing? *Experimental Brain Research*, 124(1). <https://doi.org/10.1007/s002210050602>
- Kerber, K. A., Ishiyama, G. P., & Baloh, R. W. (2006). A longitudinal study of oculomotor function in normal older people. *Neurobiology of Aging*, 27(9), 1346–1353. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.07.009>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009a). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., & Kenyon, R. V. (2009b). Postural and spatial orientation driven by virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 145, 209–228. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-018-6-209>
- Keshner, E. A., Mallinson, A. I., Longridge, N. S., Sinno, S., Petersen, H., & Perrin, P. (2023). Evolution of postural control assessment: From dynamic posturography to virtual reality. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1054346>

- Keshner, E. A., Streepey, J., Dhaher, Y., & Hain, T. (2007). Pairing virtual reality with dynamic posturography serves to differentiate between patients experiencing visual vertigo. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-24>
- Ketola, S., Havia, M., Appelberg, B., & Kentala, E. (2014). Psychiatric symptoms in vertiginous patients. *Nordic Journal of Psychiatry*, 69(4), 287–291. <https://doi.org/10.3109/08039488.2014.972976>
- Khan, S., & Chang, R. (2013a). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Khan, S., & Chang, R. (2013b). Anatomy of the vestibular system: A review. *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437–443. <https://doi.org/10.3233/NRE-130866>
- Kingma, H., & van de Berg, R. (2016). Anatomy, physiology, and physics of the peripheral vestibular system. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00001-7>
- Kiss, R., Schedler, S., & Muehlbauer, T. (2018). Associations Between Types of Balance Performance in Healthy Individuals Across the Lifespan: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01366>
- Kobel, M. J., Wagner, A. R., & Merfeld, D. M. (2023). Recurrence quantification analysis of postural sway in patients with persistent postural perceptual dizziness. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 4. <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1142018>
- Kollegger, H., Baumgartner, C., Wöber, C., Oder, W., & Deecke, L. (1992). Spontaneous Body Sway as a Function of Sex, Age, and Vision: Posturographic Study in 30 Healthy Adults. *European Neurology*, 32(5), 253–259. <https://doi.org/10.1159/000116836>
- Kollegger, H., Wöber, C., Baumgartner, C., & Deecke, L. (1989). Stabilizing and destabilizing effects of vision and foot position on body sway of healthy young subjects: A posturographic study. *European Neurology*, 29(5), 241–245. <https://doi.org/10.1159/000116420>
- Konukseven, O., Satıcı, S., Adalı, I., Yıldız, Y., Doğru, L., & Duruoğlu, S. (2022). Vestibulospinal system findings caused by ageing between 40 and 55 years. *Hearing, Balance and Communication*, 20(4), 257–262. <https://doi.org/10.1080/21695717.2022.2087310>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kovacs, E., Wang, X., & Grill, E. (2019). Economic burden of vertigo: A systematic review. *Health Economics Review*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13561-019-0258-2>
- Krityakiarana, W., & Jongkamonwiwat, N. (2016). Comparison of Balance Performance between Thai Classical Dancers and Non-Dancers. *Journal of Dance Medicine and Science*, 20(2), 72–78. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.20.2.72>
- Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.005>
- Lacour, M., Helmchen, C., & Vidal, P. P. (2016). Vestibular compensation: the neuro-otologist's best friend. In *Journal of Neurology* (Vol. 263, pp. 54–64). Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH and Co. KG. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7903-4>

- Lacroix, E., Deggouj, N., Salvaggio, S., Wiener, V., Debue, M., & Edwards, M. G. (2016). The development of a new questionnaire for cognitive complaints in vertigo: the Neuropsychological Vertigo Inventory (NVI). *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 273(12), 4241–4249. <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4135-x>
- Lafond, D., Corriveau, H., Hébert, R., & Prince, F. (2004). Intrassession reliability of center of pressure measures of postural steadiness in healthy elderly people. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(6), 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.08.089>
- Lahmann, C., Henningsen, P., Brandt, T., Strupp, M., Jahn, K., Dieterich, M., Eckhardt-Henn, A., Feuerecker, R., Dinkel, A., & Schmid, G. (2014). Psychiatric comorbidity and psychosocial impairment among patients with vertigo and dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 86(3), 302–308. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2014-307601>
- Lara, S., Graup, S., De Souza Balk, R., Teixeira, L. P., Farias, A. D., Alves, G. B., & Leiria, V. B. (2018). Association between postural balance and anthropometric indexes in elementary schoolchildren. *Revista Paulista de Pediatria*, 36(1), 59–65. <https://doi.org/10.1590/1984-0462/2018;36;1;00011>
- Layman, A. J., Li, C., Simonsick, E., Ferrucci, L., Carey, J. P., & Agrawal, Y. (2015). Association between saccular function and gait speed: Data from the Baltimore Longitudinal study of aging. *Otology and Neurotology*, 36(2). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000544>
- Leitner, C., Mair, P., Paul, B., Wick, F., Mittermaier, C., Sycha, T., & Ebenbichler, G. (2009). Reliability of posturographic measurements in the assessment of impaired sensorimotor function in chronic low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.09.007>
- Lelard, T., & Ahmaidi, S. (2015). Effects of physical training on age-related balance and postural control. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4–5), 357–369. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCLI.2015.09.008>
- Lempert, T., & Neuhauser, H. (2009). Epidemiology of vertigo, migraine and vestibular migraine. *Journal of Neurology*, 256(3), 333–338. <https://doi.org/10.1007/s00415-009-0149-2>
- Lempert, T., Olesen, J., Furman, J., Waterston, J., Seemungal, B., Carey, J., Bisdorff, A., Versino, M., Evers, S., Kheradmand, A., & Newman-Toker, D. (2022). Vestibular migraine: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.3233/VES-201644>
- Lenth, R. V. (2024). *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R Package Version 1.10.2.090002.
- Lentz, M., & Collins, W. E. (1976). *Three studies of motion sickness susceptibility* (Vol. 7, Issue 2).
- Leong, A. T. L., Gu, Y., Chan, Y. S., Zheng, H., Dong, C. M., Chan, R. W., Wang, X., Liu, Y., Tan, L. H., & Wu, E. X. (2019). Optogenetic fMRI interrogation of brain-wide central vestibular pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 10122–10129. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812453116>
- Letz, R., Gerr, F., Deborah Harris-abbott, F., Dick, R., Gerr, F., Harris-abbott, D., & Dick, R. (1996). A Comparison of Standing Steadiness Measurements from Two Devices: Covariates and Normal Values. In *Neurotoxicology and Teratology* (Vol. 18, Issue 1).

- Lewkowicz, D. J., & Bremner, A. J. (2020). The development of multisensory processes for perceiving the environment and the self. In *Multisensory Perception* (Vol. 49, Issue 5, pp. 89–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00004-8>
- Liang, H. W., Chi, S. Y., Chen, B. Y., & Hwang, Y. H. (2021). Reliability and Validity of a Virtual Reality-Based System for Evaluating Postural Stability. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 85–91. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3034876>
- Libardoni, T. de C., Silveira, C. B. da, Sinhorim, L. M. B., Oliveira, A. S. de, Santos, M. J. dos, & Santos, G. M. (2018). Reference values and equations reference of balance for children of 8 to 12 years. *Gait and Posture*, 60, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.004>
- Lim, R., & Brichta, A. M. (2016). Anatomical and physiological development of the human inner ear. *Hearing Research*, 338, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.02.004>
- Lindell, E., Kollén, L., Johansson, M., Karlsson, T., Rydén, L., Zettergren, A., Frändin, K., Skoog, I., & Finizia, C. (2020). Dizziness and its association with walking speed and falls efficacy among older men and women in an urban population. *Aging Clinical and Experimental Research*, 32(6), 1049–1056. <https://doi.org/10.1007/s40520-019-01303-6>
- Liston, R. A. L., & Brouwer, B. J. (1996). Reliability and validity of measures obtained from stroke patients using the balance master. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(5), 425–430. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(96\)90028-3](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(96)90028-3)
- Liu, Y. F., Locklear, T. D., Sharon, J. D., Lacroix, E., Nguyen, S. A., & Rizk, H. G. (2019). Quantification of Cognitive Dysfunction in Dizzy Patients Using the Neuropsychological Vertigo Inventory. *Otology and Neurotology*, 40(7), E723–E731. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002311>
- Lopez, C. (2013). A neuroscientific account of how vestibular disorders impair bodily self-consciousness. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00091>
- Lopez, C., Lacour, M., & Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. In *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (pp. 35–86).
- Lopez-Escamez, J. A., Carey, J., Chung, W. H., Goebel, J. A., Magnusson, M., Mandalà, M., Newman-Toker, D. E., Strupp, M., Suzuki, M., Trabalzini, F., & Bisdorff, A. (2015). Diagnostic criteria for Menière's disease. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(1), 1–7. <https://doi.org/10.3233/VES-150549>
- Lubetzky, A. V., Aharoni, M. M. H., Arie, L., & Krasovsky, T. (2021). People with persistent postural-perceptual dizziness demonstrate altered postural strategies in complex visual and cognitive environments. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 31(6), 505–517. <https://doi.org/10.3233/VES-201552>
- Lucertini, M., Verde, P., & Trivelloni, P. (2013). Rehabilitation from airsickness in military pilots: Long-term treatment effectiveness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 84(11), 1196–1200. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3509.2013>
- Macedo, C., Gazzola, J. M., Ricci, N. A., Doná, F., & Ganança, F. F. (2015). Influence of sensory information on static balance in older patients with vestibular disorder. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 81(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.11.004>

- Madrigal, J., Arbelaiez-Lelion, D., Candelo, E., Valencia Ramírez, S., Franco Sanchez, I., Castillo-Bustamante, M., Andalon-Deñas, E., & García, A. (2023). Clinical and otopathologic findings on age-related vestibular loss: state of the art review. *International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery*, 9(7), 602–612. <https://doi.org/10.18203/issn.2454-5929.ijohns20231822>
- Maresova, P., Penhaker, M., Selamat, A., & Kuca, K. (2015). The potential of medical device industry in technological and economical context. In *Therapeutics and Clinical Risk Management* (Vol. 11, pp. 1505–1514). Dove Medical Press Ltd. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S88574>
- Marsh, A. P., & Geel, S. E. (2000). The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait and Posture*, 12(2). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(00)00074-6)
- Massingale, S. L., Alexander, A. D., Erickson, S. M., McQueary, E. S., Gerkin, R. D., Schodrof, S. B., Kisana, H. M., & Pardini, J. E. (2018). Assessing balance in an athletic population: Normative data for the concussion balance test (COBALT®). *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 23(3), 96–100. <https://doi.org/10.1123/ijatt.2017-0042>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877–887.
- Mast, F. W., Preuss, N., Hartmann, M., & Grabherr, L. (2014). Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(May), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00044>
- Masui, T., Hasegawa, Y., Matsuyama, Y., Sakano, S., Kawasaki, M., & Suzuki, S. (2005). Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41(2), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2005.02.003>
- Matsuda, S., Demura, S., & Demura, T. (2010). Examining differences between center of pressure sway in one-legged and two-legged stances for soccer players and typical adults. *Perceptual and Motor Skills*, 110(3), 751–760. <https://doi.org/10.2466/pms.110.3.751-760>
- McCall, A. A., Miller, D. M., & Yates, B. J. (2017). Descending influences on vestibulospinal and vestibulosympathetic reflexes. In *Frontiers in Neurology* (Vol. 8, Issue MAR). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00112>
- McCaslin, D. L., Shepard, N. T., Hollman, J. H., & Staab, J. P. (2022). Characterization of Postural Sway in Patients With Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) Using Wearable Motion Sensors. *Otology & Neurotology*, 43(2), e243–e251. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003393>
- McCollum, G., Shupert, C. L., & Nashner, L. M. (1996). Organizing sensory information for postural control in altered sensory environments. *Journal of Theoretical Biology*, 180(3), 257–270. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0101>
- Mendel, B., Bergenius, J., & Langius, A. (1999). Dizziness symptom severity and impact on daily living as perceived by patients suffering from peripheral vestibular disorder. *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 24(4), 286–293. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2273.1999.00261.x>
- Micarelli, A., Viziano, A., Augimeri, I., Micarelli, B., & Alessandrini, M. (2020). Age-related Assessment of Postural Control Development: A Cross-sectional Study in Children and Adolescents. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 418–426. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>

- Michelson, P. L., McCaslin, D. L., Jacobson, G. P., Petrak, M., English, L., & Hatton, K. (2018). Assessment of subjective visual vertical (SVV) using the “bucket test” and the virtual SVV system. *American Journal of Audiology*, 27(3). https://doi.org/10.1044/2018_AJA-17-0019
- Mirka, Alar., & Black, F. O. (1990). Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction. *Neurologic Clinics*, 8, 351–359.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6(C), 414–417. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mnejja, K., Fendri, T., Chaari, F., Harrabi, M. A., & Sahli, S. (2022). Reference values of postural balance in preschoolers: Age and gender differences for 4–5 years old Tunisian children. *Gait and Posture*, 92, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.12.015>
- Monsell, E. M., Furman, J. M., Herdman, S. J., Konrad, H. R., & Shepard, N. T. (1997). Computerized dynamic platform posturography. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 117(4), 394–398. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(97\)70132-3](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(97)70132-3)
- Müller, M. M., Scherer, J., Unterbrink, P., Bertrand, O. J. N., Egelhaaf, M., & Boeddeker, N. (2023). The Virtual Navigation Toolbox: Providing tools for virtual navigation experiments. *PLoS ONE*, 18(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293536>
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes: A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nagymáté, G., Orlovits, Z., & Kiss, R. M. (2018). Reliability analysis of a sensitive and independent stabilometry parameter set. *PLoS ONE*, 13(4), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195995>
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: A practical guide for biologists. In *Biological Reviews* (Vol. 82, Issue 4, pp. 591–605). <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
- Nakayama, M., Suzuki, M., Inagaki, A., Takemura, K., Watanabe, N., Tanigawa, T., Okamoto, K., Hattori, H., Brodie, H., & Murakami, S. (2010). Impaired quality of sleep in Ménière's disease patients. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 6(5), 445–449.
- Nashner, L., & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 150(2). [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3)
- Nashner, L., Black, F. O., & Lilly, D. J. (1994). *Apparatus and method for determining the presence of vestibular pathology*.
- Nashner, L., Black, F., & Wall, C. (1982). Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits. *The Journal of Neuroscience*, 2(5), 536–544. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.02-05-00536.1982>
- Nashner, L. M. (1982). Adaptation of human movement to altered environments. *Trends in Neurosciences*, 5(C), 358–361. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1)
- Nashner, L. M. (1985). The organisation of human postural movements A formal basis and experimental synthesis. *THE BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES*, 8, 135–172.
- Nashner, L. M., & Peters, J. F. (1990). Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders. *Neurologic Clinics*, 8(2), 331–349.

- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Black, F. O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80(C), 411–418. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)62237-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)62237-2)
- Negrillo-Cárdenas, J., Rueda-Ruiz, A. J., Ogayar-Anguita, C. J., Lomas-Vega, R., & Segura-Sánchez, R. J. (2018). A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device. *Journal of Medical Systems*, 42(7). <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0981-y>
- Negu, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Negut, A., Matu, S. A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Virtual reality measures in neuropsychological assessment: A meta-analytic review. In *Clinical Neuropsychologist* (Vol. 30, Issue 2, pp. 165–184). Routledge. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1144793>
- Neuhauser, H. K. (2016). The epidemiology of dizziness and vertigo. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 137, pp. 67–82). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00005-4>
- Nishino, L. K., Rocha, G. D., de Souza, T. S. A., de Andrade Quintanilha Ribeiro, F., & Cóser, P. L. (2021). Protocol for static posturography with dynamic tests in individuals without vestibular complaints using the Horus system. *CODAS*, 33(3), 1–13. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20202019270>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1997). Contribution of central and peripheral vision to the regulation of stance. *Gait and Posture*, 5(1). [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01071-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01071-5)
- Nyabenda, A., Briart, C., Deggouj, N., & Gersdorff, M. (2004). A normative study of the vestibulospinal and rotational tests. *Advances in Physiotherapy*, 6(3), 122–129. <https://doi.org/10.1080/14038190310012052>
- Obrero-Gaitán, E., Molina, F., Montilla-Ibañez, M. de A., Del-Pino-Casado, R., Rodríguez-Almagro, D., & Lomas-Vega, R. (2021). Misperception of Visual Vertical in Peripheral Vestibular Disorders. A Systematic Review With Meta-Analysis. In *Laryngoscope* (Vol. 131, Issue 5, pp. 1110–1121). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/lary.29124>
- Ohlmann, T. (2018). Vicariances: La flexibilité du vivant. *Orientation Scolaire et Professionnelle*, 47(1), 173–203. <https://doi.org/10.4000/osp.5626>
- Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection/control of frames of reference and spatial aspects of field dependence-independence. *Field Dependence-Independence: Cognitive Style across the Life Span.*, 95, 105–129. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001691896000157>
- Oka, M., Ichijo, K., Koda, K., Kamogashira, T., Kinoshita, M., Igarashi, K., Kawahara, T., Takashima, I., Yamasoba, T., & Fujimoto, C. (2023). Preceding Balance Disorders Affect Vestibular Function in Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Journal of Clinical Medicine*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/jcm12072589>
- Olabi, B., Bergquist, F., & Dutia, M. B. (2009). Rebalancing the commissural system: Mechanisms of vestibular compensation. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 19(5–6), 201–207. <https://doi.org/10.3233/VES-2009-0367>

- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Owen, N., Leadbetter, A. G., & Yardley, L. (1998). Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00101-4)
- Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and Methods for Testing the Postural Function in Healthy and Pathological Subjects. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/891390>
- Paplou, V. G., Schubert, N. M. A., van Tuinen, M., Vijayakumar, S., & Pyott, S. J. (2023). Functional, Morphological and Molecular Changes Reveal the Mechanisms Associated with Age-Related Vestibular Loss. *Biomolecules*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/biom13091429>
- Paquet, N., Jehu, D. A., & Lajoie, Y. (2017). Age-related differences in Fukuda stepping and Babinski-Weil tests, within-day variability and test–retest reliability. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s40520-016-0544-3>
- Paredis, S., van Stiphout, L., Remmen, E., Strupp, M., Gerards, M. C., Kingma, H., Van Rompaey, V., Fornos, A. P., Guinand, N., & van de Berg, R. (2021). DISCOHAT: An Acronym to Describe the Spectrum of Symptoms Related to Bilateral Vestibulopathy. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.771650>
- Patti, A., Bianco, A., Şahin, N., Sekulic, D., Paoli, A., Iovane, A., Messina, G., Gagey, P. M., & Palma, A. (2018). Postural control and balance in a cohort of healthy people living in Europe An observational study. *Medicine (United States)*, 97(52). <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013835>
- Pedalini, M. E. B., Cruz, O. L. M., Bittar, R. S. M., Lorenzi, M. C., & Grasel, S. S. (2009). Sensory organization test in elderly patients with and without vestibular dysfunction. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(9), 962–965. <https://doi.org/10.1080/00016480802468930>
- Perucca, L., Robecchi Majnardi, A., Frau, S., & Scarano, S. (2021). Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.761262>
- Peterka, R. J. (2018). Sensory integration for human balance control. In *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 159). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990a). Age-related changes in human posture control: Motor coordination tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 87–96.
- Peterka, R. J., & Black, F. O. (1990b). Age-related changes in human posture control: Sensory organization tests. *Journal of Vestibular Research*, 1(1), 73–85.
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *Journal of Neurophysiology*, 91(1), 410–423. <https://doi.org/10.1152/jn.00516.2003>
- Pick, H. L., & Warren, D. H. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial direction. In *Perception & Psychophysics* (Vol. 6, Issue 4).
- Pineault, K., Pearson, D., Wei, E., Kamil, R., Klatt, B., & Agrawal, Y. (2020). Association between Saccule and Semicircular Canal Impairments and Cognitive Performance

- among Vestibular Patients. *Ear and Hearing*, 41(3), 686–692. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000795>
- Pinsault, N., & Vuillerme, N. (2009). Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Medical Engineering and Physics*, 31(2), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.08.003>
- Pletcher, E. R., Williams, V., Abt, J. P., Morgan, P. M., Parr, J. J., Wohleber, M. F., Lovalekar, M., & Sell, T. C. (2017). Normative data for the neurocom sensory organization test in us military special operations forces. *Journal of Athletic Training*, 52(2), 129–136. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>
- Podsiadlo, J. D., Bscpt, S., & Richardson, M. D. J. (1991). The Timed “Up & Go”: A Test of Basic Functional Mobility for Frail Elderly Persons. In *J Am Geriatr SOC* (Vol. 39).
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000a). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2000b). What is balance? *Clinical Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
- Popp, P., Wulff, M., Finke, K., Rühl, M., Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). Cognitive deficits in patients with a chronic vestibular failure. *Journal of Neurology*, 264(3). <https://doi.org/10.1007/s00415-016-8386-7>
- Powell, G., Derry-Sumner, H., Rajenderkumar, D., Rushton, S. K., & Sumner, P. (2020). Persistent postural perceptual dizziness is on a spectrum in the general population. *Neurology*, 94(18), E1929–E1938. <https://doi.org/10.1212/WNL.00000000000009373>
- Previc, F. H., Krueger, W. W., Ross, R. A., Roman, M. A., & Siegel, G. (2014). The relationship between vestibular function and topographical memory in older adults. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8(JUNE). <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00046>
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. <https://doi.org/10.1109/10.532130>
- Probst, T., Dinkel, A., Schmid-Mühlbauer, G., Radziej, K., Limburg, K., Pieh, C., & Lahmann, C. (2017). Psychological distress longitudinally mediates the effect of vertigo symptoms on vertigo-related handicap. *Journal of Psychosomatic Research*, 93, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2016.11.013>
- Quijoux, F., Nicolai, A., Chairi, I., Bargiotas, I., Ricard, D., Yelnik, A., Oudre, L., Bertin-Hugault, F., Vidal, P. P., Vayatis, N., Buffat, S., & Audiffren, J. (2021). A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code*. In *Physiological Reports* (Vol. 9, Issue 22). American Physiological Society. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>
- Quijoux, F., Vienne-Jumeau, A., Bertin-Hugault, F., Zawieja, P., Lefevre, M., Vidal, P.-P., & Ricard, D. (2020). Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: a systematic review with meta-analysis. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156816372030252X>
- Radtke, A., Von Brevern, M., Feldmann, M., Lezius, F., Ziese, T., Lempert, T., & Neuhauser, H. (2008). Screening for Menière’s disease in the general population - The needle in the haystack. *Acta Oto-Laryngologica*, 128(3), 272–276. <https://doi.org/10.1080/00016480701509933>

- Raphan, T., & Cohen, B. (2002). The vestibulo-ocular reflex in three dimensions. In *Experimental Brain Research* (Vol. 145, Issue 1, pp. 1–27). <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1067-z>
- Rauch, S. D., Velazquez-Villaseñor, L., Dimitri, P. S., & Merchant, S. N. (2001). Decreasing hair cell counts in aging humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 220–227. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03748.x>
- Raymakers, J. A., Samson, M. M., & Verhaar, H. J. J. (2005). The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait and Posture*, 21(1), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.11.006>
- Reason, J. T. (1978). Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829. <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>
- Reger, G. M., McGee, J. S., Van der Zaag, C., Thiebaut, M., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2003). A 3D Virtual Environment Rod and Frame Test: The Reliability and Validity of Four Traditional Scoring Methods for Older Adults. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 25(8). <https://doi.org/10.1076/jcen.25.8.1169.16733>
- Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., & Bilodeau, M. (2012). Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5). <https://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
- Rey, M. C. B., Clark, T. K., Wang, W., Leeder, T., Bian, Y., & Merfeld, D. M. (2016). Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. *Frontiers in Neurology*, 7(OCT). <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00162>
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195–240. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2
- Rizzolatti, G., & Matelli, M. (2003). Two different streams form the dorsal visual system: Anatomy and functions. *Experimental Brain Research*, 153(2), 146–157. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1588-0>
- Roberts, H. J., Hoppes, C. W., Del Toro, Y. M., Lambert, K. H., & Springer, B. A. (2021). Normative values for the Sensory Organization Test in an active duty military cohort. *Gait and Posture*, 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.014>
- Rocchi, L., Chiari, L., & Cappello, A. (2004). Feature selection of stabilometric parameters based on principal component analysis. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 42(1), 71–79. <https://doi.org/10.1007/BF02351013>
- Rode, G., Pérennou, D., & Azouvi, P. (2017). Spatial cognition. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 60(3), 123. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.05.003>
- Roh, K. J., Kim, M. K., Kim, J. H., & Son, E. J. (2018). Role of Emotional Distress in Prolongation of Dizziness: A Cross-Sectional Study. *Journal of Audiology and Otology*, 22(1), 6–12. <https://doi.org/10.7874/jao.2017.00290>
- Rosa, T. S. M., de Moraes, A. B., & dos Santos Filha, V. A. V. (2016). The institutionalized elderly: Sociodemographic and clinical-functional profiles related to dizziness. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 82(2), 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2014.12.014>
- Rouhana, J. (2008). *Flexibilité de l'intégration multi-sensorielle : aspects spatiaux et temporels*

- Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2010). The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions - A systematic review of the literature. In *Gait and Posture* (Vol. 32, Issue 4, pp. 436–445). <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>
- Russell, N. A., Horii, A., Smith, P. F., Darlington, C. L., & Bilkey, D. K. (2003). Long-Term Effects of Permanent Vestibular Lesions on Hippocampal Spatial Firing. *The Journal of Neuroscience*, 23(16), 6490–6498. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-16-06490.2003>
- Sackley, C. M., & Lincoln, N. B. (1991). Weight distribution and postural sway in healthy adults. *Clinical Rehabilitation*, 5(3), 181–186. <https://doi.org/10.1177/026921559100500302>
- San Pedro Murillo, E., Bancroft, M. J., Koohi, N., Castro, P., & Kaski, D. (2023). Postural misperception: a biomarker for persistent postural perceptual dizziness. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 94(2), 165–166. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-329321>
- Saniasiaya, J., Islam, M. A., & Salim, R. (2023). The global prevalence of vestibular dysfunction in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. In *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* (Vol. 280, Issue 6, pp. 2663–2674). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-07842-z>
- Santos, B. R., Delisle, A., Larivière, C., Plamondon, A., & Imbeau, D. (2008). Reliability of centre of pressure summary measures of postural steadiness in healthy young adults. *Gait and Posture*, 27(3), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.05.008>
- Scaglioni-Solano, P., & Aragón-Vargas, L. F. (2014). Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board to assess standing balance and sensory integration in highly functional older adults. *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(2), 138–143. <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000046>
- Schmidt, J. D., Register-Mihalik, J. K., Mihalik, J. P., Kerr, Z. Y., & Guskiewicz, K. M. (2012). Identifying impairments after concussion: Normative data versus individualized baselines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1621–1628. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318258a9fb>
- Schöne, C. G., Vibert, D., & Mast, F. W. (2024). Executive functions in patients with bilateral and unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Journal of Neurology*, 271(6), 3291–3308. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12267-7>
- Scoppa, F., Gallamini, M., Belloni, G., & Messina, G. (2017). Clinical stabilometry standardization: Feet position in the static stabilometric assessment of postural stability. *Acta Medica Mediterranea*, 33(May), 707–713. https://doi.org/10.19193/0393-6384_2017_4_105
- Semenov, Y. R., Bigelow, R. T., Xue, Q. L., Lac, S. Du, & Agrawal, Y. (2016). Association between Vestibular and Cognitive Function in U.S. Adults: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 71(2), 243–250. <https://doi.org/10.1093/gerona/glv069>
- Sevilla-Garcia, M. A., Boleas-Aguirre, M. S., & Perez-Fernandez, N. (2009). The limits of stability in patients with Ménière's disease. *Acta Oto-Laryngologica*, 129(3). <https://doi.org/10.1080/00016480802226171>
- Shams, A., Vameghi, R., Shamsipour Dehkordi, P., Allafan, N., & Bayati, M. (2020). The development of postural control among children: Repeatability and normative data for

- computerized dynamic posturography system. *Gait and Posture*, 78, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>
- Shapcott, K. A., Weigand, M., Glukhova, I., Havenith, M. N., & Schölvink, M. L. (n.d.). *DomeVR: A setup for experimental control of an immersive dome virtual environment created with Unreal Engine 4*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2022.04.04.486889>
- Sharif, M., Saman, Y., Burling, R., Rea, O., Patel, R., Barrett, D. J. K., Rea, P., Kheradmand, A., & Arshad, Q. (2023). Altered visual conscious awareness in patients with vestibular dysfunctions; a cross-sectional observation study. *Journal of the Neurological Sciences*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120617>
- Sharma, K. (1997). Prevalence and correlates of susceptibility to motion sickness. *Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae*, 46(2), 105–121. <https://doi.org/10.1017/S0001566000000660>
- Shim, D. B., Song, M. H., & Park, H. J. (2018). Typical sensory organization test findings and clinical implication in acute vestibular neuritis. *Auris Nasus Larynx*, 45(5), 916–921. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.11.018>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: The effect of sensory context. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 55(1), 10–16. <https://doi.org/10.1093/gerona/55.1.M10>
- Sibley, K. M., Beauchamp, M. K., Van Ooteghem, K., Straus, S. E., & Jaglal, S. B. (2015). Using the systems framework for postural control to analyze the components of balance evaluated in standardized balance measures: A scoping review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(1), 122–132.e29. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.06.021>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021a). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Sinno, S., Dumas, G., Mallinson, A., Najem, F., Abouchacra, K. S., Nashner, L., & Perrin, P. (2021b). Changes in the Sensory Weighting Strategies in Balance Control throughout Maturation in Children. *Journal of the American Academy of Audiology*, 32(2), 122–136. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718706>
- Siu, K. C., & Woollacott, M. H. (2007). Attentional demands of postural control: The ability to selectively allocate information-processing resources. *Gait and Posture*, 25(1). <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.02.002>
- Sjoberg, D., Whiting, K., Curry, M., Lavery, J., & Larmarange, J. (2021). Reproducible Summary Tables with the gtsummary Package. *The R Journal*, 13(1), 570. <https://doi.org/10.32614/RJ-2021-053>
- Smith, P. F., & Darlington, C. L. (2013). Personality changes in patients with vestibular dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(October), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00678>
- Smith, P. F., Horii, A., Russell, N., Bilkey, D. K., Zheng, Y., Liu, P., Kerr, D. S., & Darlington, C. L. (2005). The effects of vestibular lesions on hippocampal function in rats. In *Progress in Neurobiology* (Vol. 75, Issue 6, pp. 391–405). <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2005.04.004>

- Smith, P. F., & Zheng, Y. (2013). From ear to uncertainty: vestibular contributions to cognitive function. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00084>
- Smith, P. F., Zheng, Y., Horii, A., & Darlington, C. L. (2005). Does vestibular damage cause cognitive dysfunction in humans? *Journal of Vestibular Research*, 15, 1–9.
- Sohsten, E., Bittar, R. S. M., & Staab, J. P. (2016). Posturographic profile of patients with persistent postural-perceptual dizziness on the sensory organization test. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 26(3). <https://doi.org/10.3233/VES-160583>
- Solway, A., Miller, J. F., & Kahana, M. J. (2013). PandaEPL: A library for programming spatial navigation experiments. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1293–1312. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0322-5>
- Son, E. J., Lee, D. H., Oh, J. H., Seo, J. H., & Jeon, E. J. (2015). Correlation between the dizziness handicap inventory and balance performance during the acute phase of unilateral vestibulopathy. *American Journal of Otolaryngology - Head and Neck Medicine and Surgery*, 36(6), 823–827. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2015.07.011>
- Soto, A., Labella, T., Santos, S., Río, M. Del, Lirola, A., Cabanas, E., & Elhendi, W. (2004). The usefulness of computerized dynamic posturography for the study of equilibrium in patients with Meniere's disease: Correlation with clinical and audiologic data. *Hearing Research*, 196(1–2), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.06.010>
- Staab, J. P. (2020). Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Seminars in Neurology*, 40(1), 130–137. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3402736>
- Staab, J. P., Eckhardt-Henn, A., Horii, A., Jacob, R., Strupp, M., Brandt, T., & Bronstein, A. (2017). Diagnostic criteria for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD): Consensus document of the committee for the classification of vestibular disorders of the barany society. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 27(4), 191–208. <https://doi.org/10.3233/VES-170622>
- Staab, J. P., Rohe, D. E., Eggers, S. D. Z., & Shepard, N. T. (2014). Anxious, introverted personality traits in patients with chronic subjective dizziness. *Journal of Psychosomatic Research*, 76(1), 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2013.11.008>
- Stackman, R. W., Clark, A. S., & Taube, J. S. (2002). Hippocampal spatial representations require vestibular input. In *Hippocampus* (Vol. 12, Issue 3, pp. 291–303). <https://doi.org/10.1002/hipo.1112>
- Starrett, M. J., McAvan, A. S., Huffman, D. J., Stokes, J. D., Kyle, C. T., Smuda, D. N., Kolarik, B. S., Laczko, J., & Ekstrom, A. D. (2021). Landmarks: A solution for spatial navigation and memory experiments in virtual reality. *Behavior Research Methods*, 53(3), 1046–1059. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01481-6>
- Steensnaes, M. H., Knapstad, M. K., Goplen, F. K., & Berge, J. E. (2023). Persistent Postural-Perceptual Dizziness (PPPD) and quality of life: a cross-sectional study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 280(12), 5285–5292. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08040-7>
- Stewart, M. G., Chen, A. Y., Wyatt, J. R., Favrot, S., Beinart, S., Coker, N. J., & Jenkins, H. A. (1999). Cost-effectiveness of the diagnostic evaluation of vertigo. *Laryngoscope*, 109(4), 600–605. <https://doi.org/10.1097/00005537-199904000-00015>

- Stewart, V. M., Mendis, M. D., & Low Choy, N. (2018). A systematic review of patient-reported measures associated with vestibular dysfunction. *Laryngoscope*, 128(4), 971–981. <https://doi.org/10.1002/lary.26641>
- Strupp, M., Bisdorff, A., Furman, J., Hornibrook, J., Jahn, K., Maire, R., Newman-Toker, D., & Magnusson, M. (2022). Acute unilateral vestibulopathy/vestibular neuritis: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 32(5), 389–406. <https://doi.org/10.3233/VES-220201>
- Strupp, M., & Brandt, T. (2013). Peripheral vestibular disorders. *Current Opinion in Neurology*, 26(1), 81–89. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32835c5fd4>
- Strupp, M., Kim, J.-S., Murofushi, T., Straumann, D., Jen, J. C., Rosengren, S. M., Della Santina, C. C., & Kingma, H. (2017). Bilateral vestibulopathy: Diagnostic criteria Consensus document of the Classification Committee of the Bárány Society¹. *Journal of Vestibular Research*, 27(4), 177–189. <https://doi.org/10.3233/VES-170619>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017a). The effect of sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(1), 47–52. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1213418>
- Sugaya, N., Arai, M., & Goto, F. (2017b). The effect of vestibular rehabilitation on sleep disturbance in patients with chronic dizziness. *Acta Oto-Laryngologica*, 137(3), 275–278. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1244859>
- Summers, S. J., Antcliff, S., Waddington, G., & Wallwork, S. (2022). Reliability and learning effects of repeated exposure to the Bertec Balance Advantage sensory organisation test in healthy individuals. *Gait and Posture*, 93, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.02.004>
- Swain, S., & Dubey, D. (2023). Vestibulo-ocular reflex – A narrative review. *Matrix Science Medica*, 7(4), 90. https://doi.org/10.4103/mtsm.mtsm_24_22
- Tahmosybayat, R., Baker, K., Godfrey, A., Caplan, N., & Barry, G. (2018). Movements of older adults during exergaming interventions that are associated with the Systems Framework for Postural Control: A systematic review. In *Maturitas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.03.005>
- Takeda, N., Matsuda, K., Fukuda, J., Sato, G., Uno, A., & Kitahara, T. (2024). Vestibular compensation: Neural mechanisms and clinical implications for the treatment of vertigo. In *Auris Nasus Larynx* (Vol. 51, Issue 2, pp. 328–336). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2023.11.009>
- Taneda, K., Mani, H., Kato, N., Komizunai, S., Ishikawa, K., Maruya, T., Hasegawa, N., Takamatsu, Y., & Asaka, T. (2021). Effects of simulated peripheral visual field loss on the static postural control in young healthy adults. *Gait and Posture*, 86, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.011>
- Thoumie, P. (2012). Intérêts et limites de la posturographie pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *Lettre de Medecine Physique et de Readaptation*, 28(3), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0300-9>
- Tinetti, M. E. (1986). Performance-Oriented Assessment of Mobility Problems in Elderly Patients. *Journal of the American Geriatrics Society*, 34(2), 119–126. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1986.tb05480.x>

- Tiwari, K., Kyrki, V., Cheung, A., & Yamamoto, N. (2021). DeFINE: Delayed feedback-based immersive navigation environment for studying goal-directed human navigation. *Behavior Research Methods*, 53(6), 2668–2688. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01586-6>
- Tossavainen, T., Toppila, E., Pyykkö, I., Forsman, P. M., Juhola, M., & Starck, J. (2006). Virtual reality in posturography. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10(2), 282–292. <https://doi.org/10.1109/TITB.2005.859874>
- Toupet, M., Chassany, O., Rothoft, J.-M., & Bremaud des Ouillères, L. (2002). Vertiginous Complaints: Usual Presentation in Private Practice and Concrete Aspects of Care and Management. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 12(6), 276–281. <https://doi.org/10.1159/000083116>
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302). <https://doi.org/10.1126/science.301659>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023a). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11), 904–915. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidade, A., Cabreira, V., Goebel, J. A., Staab, J. P., Kaski, D., & Stone, J. (2023b). Predictors of persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) and similar forms of chronic dizziness precipitated by peripheral vestibular disorders: A systematic review. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 94(11). <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330196>
- Trinidade, A., & Goebel, J. A. (2018a). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10, pp. 1291–1303). Lippincott Williams and Wilkins. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trinidade, A., & Goebel, J. A. (2018b). Persistent postural-perceptual dizziness—a systematic review of the literature for the balance specialist. In *Otology and Neurotology* (Vol. 39, Issue 10). <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002010>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhorst, N. (2018a). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Trueblood, P. R., Rivera, M., Lopez, C., Bentley, C., & Wubenhorst, N. (2018b). Age-based normative data for a computerized dynamic posturography system that uses a virtual visual surround environment. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(7), 597–602. <https://doi.org/10.1080/00016489.2018.1429653>
- Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: Passenger behaviour and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444–461. <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- Ukaegbu, C. I. (2014). Kinetosis : All you need to know . *Journal of Biotechnology Science Research*, 1(3), 63–74.
- Vanderkam, P., Blanchard, C., Naudet, F., Pouchain, D., Roussel, H. V., Perault-pochat, M. C., Jaafari, N., & Boussageon, R. (2019). *Efficacy of acetylleucine in vertigo and dizziness : a systematic review of randomised controlled trials.*

- Vasser, M., Kängsepp, M., Magomedkerimov, M., Kilvits, K., Stafinjak, V., Kivisik, T., Vicente, R., & Aru, J. (2017). VREX: An open-source toolbox for creating 3D virtual reality experiments. *BMC Psychology*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-017-0173-4>
- Verbecque, E., Costa, P. H. L. da, Meyns, P., Desloovere, K., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016). Age-related changes in postural sway in preschoolers. *Gait and Posture*, 44, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016a). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Verbecque, E., Vereeck, L., & Hallemans, A. (2016b). Postural sway in children: A literature review. In *Gait and Posture* (Vol. 49, pp. 402–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.003>
- Vereeck, L., Wuyts, F., Truijen, S., & Van De Heyning, P. (2008). Clinical assessment of balance: Normative data, and gender and age effects. *International Journal of Audiology*, 47(2), 67–75. <https://doi.org/10.1080/14992020701689688>
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 36). <http://www.jstatsoft.org/>
- Visser, J. E., Carpenter, M. G., van der Kooij, H., & Bloem, B. R. (2008). The clinical utility of posturography. *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2424–2436. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.07.220>
- Von Brevern, M., Bertholon, P., Brandt, T., Fife, T., Imai, T., Nuti, D., & Newman-Toker, D. (2015). Benign paroxysmal positional vertigo: Diagnostic criteria. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 25(3–4), 105–117. <https://doi.org/10.3233/VES-150553>
- Voorhees, R. L. (1990). Dynamic posturography findings in central nervous system disorders. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 103(1), 96–101. <https://doi.org/10.1177/019459989010300114>
- Vorhees, R. L. (1989). The role of dynamic posturography in neurotologic diagnosis. *Laryngoscope*, 99, 995–1001.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 71(2). <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0018-2>
- Wall, C., Black, F. O., & Wall, C. (1983). Postural stability and rotational tests: Their effectiveness for screening dizzy patients. *Acta Oto-Laryngologica*, 95(1–4), 235–246. <https://doi.org/10.3109/00016488309130940>
- Webster, K. E., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023(3). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015188.pub2>
- Webster, K. E., Kamo, T., Smith, L., Harrington-Benton, N. A., Judd, O., Kaski, D., Maarsingh, O. R., MacKeith, S., Ray, J., Van Vugt, V. A., & Burton, M. J. (2023). Non-pharmacological interventions for persistent postural-perceptual dizziness (PPPD). In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2023, Issue 3). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015333.pub2>

- Weech, S., Moon, J., & Troje, N. F. (2018). Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLoS ONE*, 13(3), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>
- Wei, Y., Zheng, J., & So, R. H. Y. (2018). Allocating less attention to central vision during vection is correlated with less motion sickness. *Ergonomics*, 61(7), 933–946. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1427805>
- Weidt, S., Bruehl, A. B., Straumann, D., Hegemann, S. C. A., Krautstrunk, G., & Rufer, M. (2014). Health-related quality of life and emotional distress in patients with dizziness: A cross-sectional approach to disentangle their relationship. *BMC Health Services Research*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-317>
- Weismiller, S. A., Monaco, R., Womack, J., Alderman, B., Esopenko, C., Conway, F. N., Brostrand, K., Brown, A., de Souza, N. L., & Buckman, J. F. (2021). Individual baseline balance assessments in a large sample of incoming NCAA division I athletes using a force plate system. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.26603/001c.18713>
- Whiting, P. F., Weswood, M. E., Rutjes, A. W. S., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. N. M., & Kleijnen, J. (2006). Evaluation of QUADAS, a tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. In *BMC Medical Research Methodology* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-6-9>
- Whiting, P., Rutjes, A. W., Reitsma, J. B., Bossuyt, P. M., & Kleijnen, J. (2003). *The development of QUADAS: a tool for the quality assessment of studies of diagnostic accuracy included in systematic reviews*. <http://www.biomedcentral.com/1471-2288/3/25>
- Wiener-Vacher, S. R., Hamilton, D. A., & Wiener, S. I. (2013). Vestibular activity and cognitive development in children: perspectives. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00092>
- Wiener-Vacher, S. R., Obeid, R., & Abou-Elew, M. (2012). Vestibular impairment after bacterial meningitis delays infant posturomotor development. *Journal of Pediatrics*, 161(2). <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.02.009>
- Wolfel, M., Hepperle, D., Purps, C. F., Deuchler, J., & Hettmann, W. (2021). Entering a new Dimension in Virtual Reality Research: An Overview of Existing Toolkits, their Features and Challenges. *2021 International Conference on Cyberworlds (CW)*, 180–187. <https://doi.org/10.1109/CW52790.2021.00038>
- Wolfson, L., Whipple, R., Derby, C. A., Amerman, P., & Nashner, L. (1994). Gender differences in the balance of healthy elderly as demonstrated by dynamic posturography. *Journals of Gerontology*, 49(4). <https://doi.org/10.1093/geronj/49.4.M160>
- Worden, B. F., & Blevins, N. H. (2007). Pediatric vestibulopathy and pseudovestibulopathy: Differential diagnosis and management. *Current Opinion in Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 15(5), 304–309. <https://doi.org/10.1097/MOO.0b013e3282bf139e>
- Xie, Y., Bigelow, R. T., Frankenthaler, S. F., Studenski, S. A., Moffat, S. D., & Agrawal, Y. (2017). Vestibular loss in older adults is associated with impaired spatial navigation: Data from the triangle completion task. *Frontiers in Neurology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00173>
- Yagi, C., Morita, Y., Kitazawa, M., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., & Horii, A. (2021). Subtypes of Persistent Postural-Perceptual Dizziness. *Frontiers in Neurology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.652366>

- Yagi, C., Morita, Y., Yamagishi, T., Ohshima, S., Izumi, S., Takahashi, K., Itoh, K., Suzuki, Y., Igarashi, H., & Horii, A. (2022). Gaze instability after exposure to moving visual stimuli in patients with persistent postural-perceptual dizziness. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1056556>
- Yardley, L., Luxon, L. M., & Haacke, N. P. (1994). A longitudinal study of symptoms, anxiety and subjective well-being in patients with vertigo. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*, 19(2), 109–116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.1994.tb01192.x>
- Yardley, L., Owen, N., Nazareth, I., & Luxon, L. (1998). Prevalence and presentation of dizziness in a general practice community sample of working age people. *British Journal of General Practice*, 48(429), 1131–1135.
- Zhang, X., Huang, Y., Xia, Y., Yang, X., Zhang, Y., Wei, C., Ying, H., & Liu, Y. (2022). Vestibular dysfunction is an important contributor to the aging of visuospatial ability in older adults—Data from a computerized test system. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1049806>

ANNEXES

ANNEXE n°1 : SUPPLEMENTARY INFORMATION PAPER N°1

Normative data for computerized posturography: a systematic review and meta-analysis

SECTIONS	PAGES
Section A. Supplementary details on participant characteristics.	
Table S1. Methodological characteristics of studies included in systematic review.	2-6
Table S2. Quality assessment, using the QUADAS, of studies included in systematic review.	7-8
Figure S2. Frequency of studies reporting other variables.	9
Section B. Multilevel meta-analysis using robust variance estimation (RVE) results.	
Table S4. Sensitivity of meta-analysis parameters estimates in EO and EC.	10
Figure S3. Funnel plot in EO condition.	11
Table S5. Subgroup analyses for EO condition.	11
Section C. Frequentist network meta-analysis.	
Table S6. Distribution of potential effect modifiers in EO and EC conditions.	12-15
Figure S4. Subnetworks for different age comparisons A) in EO and B) EC conditions.	16
Table S7. Direct and indirect evidence and network meta-analysis summary table of the first subnetwork for both conditions.	16
Table S8. Direct and indirect evidence and network meta-analysis summary table of the second subnetwork for both conditions.	17-19
Table S9. The analysis of Separate indirect from direct evidence (SIDE) (back-calculation method).	19-22
Table S10. CINeMA grading of the certainty of the evidence.	23-32

Section A. Supplementary details on participant characteristics

Table S1. Methodological characteristics of studies included in systematic review.

Reference	Population	Country	Region	Sample size	Female	Males	Age groups	Equipment	Tasks	Characteristics	Sway parameters	Equations	Psychometric properties
Albertsen et al., 2017	Both	Regular	France	Europe	96	58	38 NR	Bertec 6-component forceplate (60x40 cm, strain gaugebased device, Bertec Corporation, Columbus, OH, USA)	8 conditions: C1) FA_EO_ST, C2) FA_EO_DT, C3) FA_EC_ST, C4) FA_EC_DT, C5) FT_EO_ST, C6) FT_EO_DT, C7) FT_EC_ST, C8) FT_EC_DT	Ap: arms along side Fp: Barefoot - FT & for FA, distance of 16 cm & angle of 17° Vt: point at 3 m (eye level) Nt: 3 for ST & 1 for DT Td: 60 s Sc: randomized	COP_rangeAP, COP_rangeML, COP_area & COP_vel	NR	Test-retest reliability: Two-way mixed average measures ICC and corresponding 95 % confidence intervals (in brackets) Between 3 consecutive trials in 4 ST conditions (n = 96): ICC_rangeAP: FAEO = 0.77 [0.67–0.84], FAEC = 0.73 [0.61–0.81], FTEO = 0.85 [0.79–0.90], FTEC = 0.83 [0.76–0.88] ICC_rangeML: FAEO = 0.84 [0.77–0.89], FAEC = 0.80 [0.72–0.86], FTEO = 0.86 [0.80–0.90], FTEC = 0.87 [0.81–0.91] ICC_Area: FAEO = 0.85 [0.79–0.90], FAEC = 0.82 [0.74–0.87], FTEO = 0.90 [0.86–0.93], FTEC = 0.89 [0.85–0.93] ICC_vel: FAEO = 0.96 [0.95–0.97], FAEC = 0.94 [0.92–0.96], FTEO = 0.96 [0.94–0.97], FTEC = 0.95 [0.93–0.97] Reliability study: n=10 healthy subjects ICC = 0.75 [0.7–0.81]
Albuquerque et al., 2009	Both	Regular	Spain	Europe	62	46	16 18-32 (n=32), 18-24 (n=30)	Diagnostic Support Force Platform (Modular electronic baropodometer, Diasu SRL, Italy)	Quiet standing position (EO)	Ap: NR Fp: NR Vt: point at 5m (eye level) Nt: NR Td: 5min Sc: NR	COP_area, COP_vel, COP_velAP, COP_velML, COP_rangeML, COP_rangeAP, COP_pathML, COP_pathAP, COP_path	NR	Reliability study: n=10 healthy subjects ICC = 0.75 [0.7–0.81]
Barozzi et al., 2014	Both	Regular	Italy	Europe	319	139	180 6 (n = 20), 7 (n = 43), 8 (n = 38), 9 (n = 27), 10 (n = 45), 11 (n = 29), 12 (n = 41), 13 (n = 35), 14 (n = 11), adults (n = 30)	sVeP stabilometric platform (Politecnica-Amplifon, Modena, Italy)	4 conditions: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM Foam: 8 cm thickness, 100kg/m3 density	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - heels together, abducted Vt: at 1.20 m (eye level) Nt: 1 (2 for retest) Td: 52 s Sc: NR	COP_vel, COP_area	NR	Test-retest reliability: ICC and corresponding 95 % confidence intervals (in brackets) 2 consecutive trials in 4 conditions (n =279): ICC_Area: EO = 0.57 [0.48–0.64], EC = 0.61 [0.53–0.68], USEO = 0.50 [0.41–0.58], USEC = 0.55 [0.47–0.63] ICC_vel: EO = 0.75 [0.65–0.78], EC = 0.76 [0.70–0.80], USEO = 0.75 [0.70–0.80], USEC = 0.72 [0.65–0.77]
Beauchet et al., 2016	Adults	Regular	France	Europe	70	29	41 NR	Force platform (101 × 101 cm; BioRescue, Dune®, France)	Quiet standing position (EO & EC)	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - distance of 8.4 cm & angle of 9° Vt: at 5 m (eye level) Nt: NR Td: 30s Sc: NR	COP_area, COP_pathAP, COP_pathML	NR	NR
Black et al., 1982	Adults	Regular	USA	North America	132	66	66 20 - 29, 30 - 39, 40 - 49	Kistler Model 9261A forceplate (Kistler, France)	4 conditions: C1) EO_FT (standard Romberg), C2) EC_FT, C3) EO_HTT (tandem Romberg), C4) EC_HTT	Ap: hooking fingers together and arms laterally extended Fp: Barefoot - depending on conditions (FT or HTT) Vt: NR Nt: 2 Td: 15 s Sc: NR	Mean squared displacement (MSD)	NR	Test-retest reliability: CV Daily over 5 consecutive days (n = 12) CV (average ± SD): FTEO = 0.42 (0.16), FTEC = 0.45 (0.16), HTEO = 0.42 (0.2) and HTTEC = 0.39 (0.13)
Carrick et al., 2007	Adults	Regular	USA & Canada	North America	210		NR	Component force platform (CAPS)	Quiet standing position (EC)	NR	CAPS score	NR	NR
Casselbrant et al., 2010	Children	Regular	USA	North America	127	57	70 4 (n = 51), 5 (n = 76), 6 (n = 74), 7 (n = 69), 8 (n = 38), 9 (n = 18)	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FIRM_SrefS, C4) EO_SrefP, C5) EC_SrefP, C6) EO_SrefP & Surround	Ap: NR (harness) Fp: NR Vt: at 1 m Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	Falls %, SOT_eq1 & SOT_comp	NR	NR
Charpiot et al., 2009	Children	Regular	France	Europe	147	73	74 6-8 (n=17), 9-10 (n=58), 11-12 (n=72)	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: harness Fp: NR Vt: NR Nt: NR Td: 20 s Sc: NR	SOT_eq1, SOT_comp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST	NR	NR
de la Torre et al., 2017	Both	Regular	Spain	Europe	30	12	18 NR	MoveHuman-Dyna@UZ platform (IDERGO group, University of Zaragoza, Spain)	Static Romberg test: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM LOS RWS No precision on Foam pad characteristics	Romberg test Ap: arms along sides Fp: Barefoot - heels together, angle 30° Vt: NR Nt: 1 Td: 40 s Sc: NR Practice run done	COP_rangeAP, COP_rangeML, COP_area, COP_vel, COP_rms, COP_limits, Success %, DRA & CEM	NR	NR

Supplementary Materials

Julienne et al.

DiFabio et al., 1996	Children	Regular	USA	North America	81	41	40	3 (n = 21), 4 (n = 21), 5 (n = 20), 6 (n = 19)	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	C1) SrefS_FIRM C2) EO_SrefP C3) EC_SrefP C4) SrefS & P	Ap: arms crossed on the chest (harness) Fp: distance of 3-6 cm Vt: NR Nt: 3 Td: NR Sc: NR	SOT_eqI, SOT_eqI pediatric		NR
Domènech-Vadillo et al., 2019	Both	Regular	Spain	Europe	350	198	152	18 - 33, 34 - 45, 46 - 54, 55 - 68	Nintendo® Wii Balance Board™ (WBB) (Nintendo, Kyoto, Japan)	mCTSIB: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM Foam: 50cm width x 40 cm length x 14 cm thickness, 40 kg/m3 density	Ap: arms along sides Fp: With socks - FA Vt: NR Nt: 1 Td: 40 s Sc: NR	Global equilibrium score (GES)	Using the values of Confidence Ellipse Area (CEAx), CEA 5th and 95th percentiles, a mathematical model was used to calculate the equilibrium score for each condition: $ESX = \frac{P_{95}CEAx - CEA_x - P_5CEAx}{P_{95}CEAx}$ ed: And a global equilibrium score (GES) from the ES in each condition was calculated :	NR
Eriksen et al, 2023	Adults	Regular	Denmark	Europe	120	60	60	20 - 29 (n=20), 30 - 39 (n=20), 40 - 49 (n=20), 50 - 59 (n=20), 60 - 69 (n=20), 70-79 (n=20)	Bertec Balance Advantage device (Bertec Incorporated, Columbus,OH)	SOT, MCT, ADT	Ap: arms along sides (harness) Fp: barefoot - standardized Vt:NR Nt: 3 (SOT), 3 (MCT), 5 (ADT) Td: 20 s (SOT) Sc:NR	SOT_eqI, SOT_comp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF, MCT_latBM/BL/FM/FL, MCT_comp, ADT_TU/TD	NR	NR
Faraldo-Garcia et al., 2012	Both	Regular	Spain	Europe	70	35	35	16-20 (n=10), 20 - 29 (n=10), 30 - 39 (n=10), 40 - 49 (n=10), 50 - 59 (n=10), 60 - 69 (n=10), 70-81 (n=10)	Balance Master system (NeuroCom, Clackamas,OR, USA)	SOT	Ap: NR Fp: NR Vt:NR Nt: 3 (SOT) Td: NR Sc:NR	SOT_rat_SOM/VIS/VEST		NR
Faraldo-Garcia et al., 2016	Both	Regular	Spain	Europe	70	35	35	16-20 (n=10), 20 - 29 (n=10), 30 - 39 (n=10), 40 - 49 (n=10), 50 - 59 (n=10), 60 - 69 (n=10), 70-81 (n=10)	Balance Master system (NeuroCom, Clackamas,OR, USA)	SOT, LOS	Ap: arms along sides (harness) Fp: Barefoot Vt:NR Nt: Td: 20 s Sc:NR	SOT_eqI, SOT_comp, Strategy analysis, LOS_RT/MV/EXC/DC	NR	NR
Goble & Baweja, 2018	Both	Regular	USA & Canada	North America	16,357		5 - 9, 10 - 14, 15 - 19, 20 - 29, 30 - 39, 40 - 49, 50 - 59, 60 - 64, 65 - 69, 70 - 74, 75 - 79, 80+	BTrackS (Balance Tracking Systems, SanDiego, CA, USA)	Quiet standing position (EC)	Ap: hands on hips Fp: No shoes - shoulder width apart Vt: NNRA Nt: 4 Td: 20 s Sc: NR Practice run done	COP_path	Total path length was calculated by adding up all distances between successive registered COP locations, where COPx2 and COPx1 are adjacent time points in the COPx (medial/lateral) time series: $distance = \sqrt{(COP_{x2} - COP_{x1})^2 + (COP_{y2} - COP_{y1})^2}$ r1 are adjacent time points series: $distance = \sqrt{(COP_{x2} - COP_{x1})^2 + (COP_{y2} - COP_{y1})^2}$	NR	
Goble & Baweja, 2018	Adults	Regular	USA & Canada	North America	6280	4292	1988	20 - 29 (n = 697), 30 - 39 (n = 571), 40 - 49 (n = 725), 50 - 59 (n = 1,134), 60 - 69 (n = 1,577), 70 - 79 (n = 1,123), 80+ (n = 453)	BTrackS (Balance Tracking Systems, SanDiego, CA, USA)	Quiet standing position (EC)	Ap: hands on hips Fp: No shoes - shoulder width apart Vt: NNRA Nt: 4 Td: 20 s Sc: NR Practice run done	COP_path	Same as [11]	NR
Goble et al., 2019	Both	Regular	USA	North America	604	308	296	NR	BTrackS (Balance Tracking Systems, SanDiego, CA, USA)	mCTSIB No precision on Foam pad characteristics	Ap: hands on hips Fp: No shoes - shoulder width apart Vt: NR Nt: 4 Td: 20 s Sc: NR	COP_path	Same as [11]	NR
Goble et al., 2019	Both	Athletic	USA	North America	10045	3421	6624	8 - 9 (n=140), 10 - 11 (n = 310), 12 - 13 (n = 311), 14 - 15 (n = 1,333), 16 - 17 (n = 1,240), 18 - 19 (n = 2,064), 20 - 21 (n = 1,226)	BTrackS (Balance Tracking Systems, SanDiego, CA, USA)	Quiet standing position (EC)	Ap: hands on hips Fp: No shoes - shoulder width apart Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	COP_path	Same as [11]	NR
Henry et al., 2022	Both	Military	USA	North America	253	70	183	NR	Balance Master system (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: arms along sides (harness) Fp: Barefoot - standardized Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	SOT_eqI, SOT_comp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF	NR	NR

Supplementary Materials

Julienne et al.

Ionescu et al., 2006	Both	Regular	France	Europe	97	52	45 12 (n = 29), 20 (n = 68)	BalanceQuest (BQ) (Multitest Equilibre, Framiral, Cannes France).	6 conditions: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) Opto_FIRM, C4) EO_SrefP, C5) EC_SrefP, C6) Opto_SrefP	Ap: NR Fp: parallel and shoulder-width apart (between 10 and 32 cm) Vt: Opto at 250 cm (eye level) Nt: 1 Td: 30 s Sc: NR	Stability %, COP_vel, COP_area, Sensory analysis ratios	Percentage stability (θ) was calculated, where x, y represents the subjects deviations in anterior - posterior and lateral direction : Sensory analysis ratios :	NR
Kolleger et al., 1992	Adults	Regular	Austria	Europe	30	15	15 21-35 (n=10), 36-50 (n=10), 51-65 (n=10)	/	Quiet standing position (EO & EC)	Ap : arms along sides Fp : barefoot - distance of 4cm Vt : 2m (eye level) Nt: 20 Td : 20 sec Sc : randomized	COP_path, COP_pathAP, COP_pathML	NR	NR
Krityakiarana et al.	Both	Mixed	Thailand	Asia	50	50	0 NR	Balance Master system (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT, with dynamics head tilt (DHT), for instance, requires active pitch (flexion-extension) and roll (lateral bending to right-left) head movements during upright stance.	Ap : arms along sides Fp : barefoot - standardized Vt : NR Nt: 3 Td : 20 sec Sc : NR	SOT_eq1	NR	NR
Lara et al., 2018	Children	Regular	Brazil	Central/South Ame	80	47	33 NR	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: arms along sides Fp: barefoot - standardized Vt: NR Nt: 3 Td: 20 sec Sc: NR	SOT_eq1, SOT_comp	NR	NR
Letz et al., 1996	Both	Regular	USA	North America	174	60	114 NR	Model OR6-3 platform (Advanced Medical Technology Inc., Massachusetts, USA)	Quiet standing position (EO & EC)	Ap : arms along sides Fp : NR - standardized Vt : 3 m Nt: 4 Td : 60 sec Sc : NR	COP_vel	NR	NR
Libardoni et al., 2018	Children	Regular	Brazil	Central/South Ame	165	82	83 8 (n = 33), 9 (n = 33), 10 (n = 33), 11 (n = 33), 12 (n = 33)	Smart EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: NR (harness) Fp: FA Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	SOT_eq1	NR	NR
Massingale et al., 2018	Children	Athletic	USA	North America	514	158	356 10 - 12 (n = 183), 13 - 15 (n = 245), 16 - 18 (n = 86)	Bertec Essential force plate (Bertec Corporation, Columbus, OH)	Concussion Balance Test (COBALT): C1): EO_FIRM C2): EC_FIRM C3): EC_FIRM with head shake. C4): FIRM_FT with visual motion sensitivity. C5-C8): Correspond to C1-C4, respectively, but on FOAM.	Ap: depending on test conditions Fp: Barefoot and depending on test conditions Vt: NR Nt: 2 Td: 20 s Sc: NR	COG_vel, Error/loss of balance frequency	NR	NR
Masui et al., 2005	Adults	Regular	Japan	Asia	341	236	105 55 - 64 (n = 119), 65 - 69 (n = 102), 70 - 74 (n = 81), 75 - 84 (n = 39)	GS-30 platform (Anima Co., Tokyo, Japan)	Quiet standing position (EO & EC)	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - FT Vt: black dot (1cm) at 2 m Nt: 2 Td: 30 s Sc: NR	COP_area, COP_vel, COP_pathAP, COP_pathML, RombQ	NR	NR
Matsuda et al., 201	Adults	Mixed	Japan	Asia	50	0	50 NR	stabilometer (Gravidorder G5500, ANIMA, Japan)	2 legs stance	Ap : arms along sides Fp: NR - heels together Vt: NR Nt : 3 Td : 1 min Sc : NR	COP_vel, COP_pathAP, COP_pathML, high frequency	Raw data from 32 variables obtained from the center of pressure sway measurement were converted to z scores, calculated by multiplying the z-score into the factor score coefficient which Kitabayashi, et al. (2003) calculated using data from 200 subjects.	NR
Micarelli et al., 2020	Both	Regular	Italy	Europe	182	91	91 4 (n = 10), 5 (n = 10), 6 (n = 10), 7 (n = 10), 8 (n = 10), 9 (n = 10), 10 (n = 10), 11 (n = 10), 12 (n = 10), 13 (n = 10), 14 (n = 10), 15 (n = 10), 16 (n = 10), 17 (n = 10), 18 (n = 10), adults (n = 32)	Stabilometric Platform (EUROCLINIC®, Medi-Care Solutions s.r.l, Italy)	Quiet standing position (EO & EC)	Ap: NR Fp: NR Vt: NR Nt: 1 Td: 60 s Sc: NR	COP_path, COP_area, Power spectra (Fourier Transform)	NR	NR

Supplementary Materials

Julienne et al.

Mnejja et al., 2022	Children	Regular	Tunisia	Africa	410	205	205	4 (n = 205), 5 (n = 205)	PostureWin platform (Techno Concept, Cereste, France)	4 conditions: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM Foam: 466 mm length x 467 mm width x 134 mm height, 21.3kg/m3 density, elastic modulus 20.90N/m2	Ap: arms along sides Fp: NR Vt: at 2 m (eye level) Nt: 1 Td: 25.6 s Sc: randomised	COP_vel	NR	Test-retest reliability: ICC and corresponding 95 % confidence intervals NR (n = 20) ICC_vel: EO = 0.998 [0.994–0.999], EC = 0.999 [0.998–1.000], USEO = 0.999 [0.998–1.000] and USEC = 0.994 [0.986–0.996]
Nishino et al., 2021	Adults	Regular	Brazil	Central/South Am	297	172	125	20 - 59 (n = 141), 60 - 69 (n = 82), 70 - 89 (n = 74)	Horus platform (Contronic Automatic Systems Ltd, Brazil)	Sensory integration test : C1-C2) FIRM, EO & EC C3-C4) FOAM, EO & EC C5-C6) FOAM, Opto to the right & left respectively with the speed set to 16% C7) FOAM, dynamic tunnel made up of thin bars, with forwarding direction and 4% speed without rotation No precision on Foam pad characteristics	Ap: NR Fp: standardised (for 59 year olds angle between 0 and 15 degrees & those aged 60 and over angle between 0 and 20 degrees) Vt: TV or projector at 1 m Nt: 1 Td: 30 s Sc: NR	COP_area, COP_velAP, COP_velML, frequency band FB1 (80%) in AP & ML, Residual Functional Balance (RFB) %, Sensory analysis (for SOM/VIS/VEST/left & right PREF) & Composite Balance Index (CBI) %	Residual Functional Balance & Sensory analysis were calculated (somatosensory (SOM); visual (VIS); vestibular (VEST); right visual dependence (RVDP); left visual dependence (LVDP); visual tunnel dependence (VTDP); and composite balance index (CBI) :	NR
Owen et al., 1998	Adults	Regular	UK	Europe	34	20	14	NR	/	6 conditions: C1) EO, C2) EC, C3) VR display, C4) EO_Vibrators (calf muscle vibration), C5) EC_Vibrators, C6) VR_Vibrators	Ap : arms along sides Fp : barefoot - NR Vt : NR Nt: 3 Td : 20 sec Sc : NR	COP_maxAP, COP_maxML, COP_path	NR	NR
Patti et al., 2018	Both	Regular	Italy	Europe	914	510	404	5 - 10 (n = 21), 11 - 15 (n = 103), 16 - 20 (n = 66), 21 - 25 (n = 73), 26 - 30 (n = 85), 31 - 35 (n = 38), 36 - 40 (n = 31), 41 - 45 (n = 35), 46 - 50 (n = 28), 51 - 55 (n = 37), 56 - 60 (n = 37), 61 - 65 (n = 96), 66 - 70 (n = 115), 71 - 75 (n = 56), 76 - 80 (n = 51), 81 - 85 (n = 42)	FreeMed baropodometric platform (Sensor Medica, Guidonia Montecello, Roma, Italy)	Romberg test	Ap: NR Fp: Barefoot - FA, distance of 4 cm & angle of 30° Vt: NR Nt: 2 Td: NR Sc: NR Practice run done	COP_path, COP_area	NR	NR
Perucca et al., 2021	Adults	Regular	Italy	Europe	53	25	28	80 - 84 (n = 35), 85 - 89 (n = 18)	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: NR (harness) Fp: Barefoot - standardised Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	SOT_eq, SOT_comp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF	NR	Test-retest reliability: ICC 2 weeks later (±2 days) (n = 39) ICC_SOT: C1 = 0.52, C2 = 0.79, C3 = 0.55, C4 = 0.73, C5 = 0.71, C6 = 0.67, cmp = 0.76
Pletcher et al., 2017	Adults	Military	USA	North America	542	0	542	NR	Balance Master system (NeuroCom, Clackamas, OR, USA)	SOT	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - standardised Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: standardised	SOT_eq, SOT_comp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF	NR	NR
Roberts et al., 2021	Both	Military	USA	North America	237	53	184	18 - 26 (n = 85), 27 - 35 (n = 100), 36 - 45 (n = 52)	EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT MCT eSOT with increasing SrefS & SrefP gain of 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, or 2.0.	Ap: arms along sides Fp: No shoes - standardised Vt: NR Sc: randomized SOT Nt: 3 Td: 20 s eSOT Nt: 2 Td: 20 s	SOT_eq, SOT_comp, MCT_comp, eSOT_comp	NR	NR
Sackley & Lincoln, 1991	Both	Regular	UK	Europe	403	269	134	18 - 29 (n = 67), 30 - 39 (n = 47), 40 - 49 (n = 60), 50 - 59 (n = 96), 60 - 69 (n = 89), 70 - 79 (n = 38), 80 - 89 (n = 6)	Nottingham Balance Platform	Quiet standing position (EO)	Ap: arms along sides Fp: Shoes (except for those in high heels) - comfortable, natural Vt: blue cross (eye level) Nt: 1 Td: 30 s Sc: NR	Balance Coefficient, Sway Coefficient	Using the difference from the midline BC2, a Balance Coefficient was calculated from the proportion $\frac{BC2}{\sqrt{BC^2 - 0.5P}}$ - the left leg (BC) :	NR
Scaglioni et al., 2014	Adults	Athletic	Costa Rica	Central/South Am	37			NR	Wii Balance Board (WiiBB) (Nintendo, Kyoto, Japan), Force plate model 4090NC (Bertec Corporation, Columbus, OH)	Quiet standing position with 4 conditions : C1) EO_FIRM C2) EC_FIRM C3) EO_FOAM C4) EC_FOAM	Ap : arms along sides Fp: barefoot - HTT Vt: NR Nt: 3 Td : 30 sec Sc : NR	COP_path	NR	Relative reliability : ICC 3 weeks later (n=20) An ICC between 0.75 and 1 = excellent 0.4 and 0.74 = modest less than 0.39 = poor
Schmidt et al., 2012	Children	Athletic	USA	North America	673	227	446	NR	Smart EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap : arms along sides Fp : barefoot - standardized Vt : NR Nt : 3 Td : 20 sec Sc : NR	SOT_cmp	NR	NR

Supplementary Materials

Julienne et al.

Shams et al., 2020	Both	Regular	Iran	Asia	900	450	450 2 - 4 (n = 100), 4 - 6 (n = 100), 6 - 8 (n = 100), 8 - 10 (n = 100), 10 - 12 (n = 100) 12 - 14 (n = 100), 14 - 16 (n = 100), 16 - 18 (n = 100), 22 - 25 (n = 100)	Smart EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - standardised Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	COP_max, COP_vel, COP_velAP, COP_velML	<p>The parameters were calculated as follows :</p> $SOT_{eq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $SOT_{vel} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$	<p>Relative reliability: ICC</p> <p>Absolute reliability: SEM and CV</p> <p>1 week later (n = 108 per age group)</p> <p>ICC_SOT (SEM):</p> <p>COP_range: C1 = 0.84 (0.06), C2 = 0.82 (0.14), C3 = 0.76 (0.09), C4 = 0.86 (0.18), C5 = 0.76 (0.18), C6 = 0.82 (0.10)</p> <p>COP_vel: C1 = 0.87 (0.08), C2 = 0.83 (0.14), C3 = 0.83 (0.11), C4 = 0.85 (0.13), C5 = 0.80 (0.07), C6 = 0.87 (0.16)</p> <p>COP_velAP: C1 = 0.88 (0.06), C2 = 0.82 (0.11), C3 = 0.86 (0.10), C4 = 0.88 (0.15), C5 = 0.81 (0.06), C6 = 0.89 (0.18)</p> <p>COP_velML: C1 = 0.86 (0.08), C2 = 0.84 (0.17), C3 = 0.80 (0.12), C4 = 0.80 (0.11), C5 = 0.80 (0.08), C6 = 0.85 (0.12)</p> <p>CV_SOT:</p> <p>COP_range: C1 = 0.34, C2 = 0.40, C3 = 0.38, C4 = 0.32, C5 = 0.49, C6 = 0.48</p> <p>COP_vel: C1 = 0.36, C2 = 0.29, C3 = 0.45, C4 = 0.48, C5 = 0.57, C6 = 0.49</p> <p>COP_velAP: C1 = 0.31, C2 = 0.27, C3 = 0.49, C4 = 0.51, C5 = 0.53, C6 = 0.62</p> <p>COP_velML: C1 = 0.41, C2 = 0.31, C3 = 0.34, C4 = 0.56, C5 = 0.43, C6 = 0.56</p>
Sinno et al., 2021	Both	Regular	Lebanon	Asia	140	70	70 5-8 (n=30), 9-11 (n=30), 12-14 (n=30), 15-17 (n=30), 20-25 (n=20)	Smart EquiTest device (NeuroCom, Int., Clackamas, OR)	SOT	Ap: NR Fp: NR - standardised Vt: NR Nt: 2 Td: 20 s Sc: NR	SOT_eq, SOT_cmp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF	NR	NR
Trueblood et al., 2018	Adults	Regular	USA	North America	50	33	17-20 - 29 (n = 10), 30 - 39 (n = 10), 40 - 49 (n = 10), 50 - 59 (n = 10), 60 - 69 (n = 10)	Bertec Balance Advantage device (Bertec Incorporated, Columbus, OH)	SOT MCT ADT	Ap: NR (harness) Fp: Barefoot - standardised Vt: NR Nt: 3 Td: 20 s Sc: NR	SOT_eq, SOT_cmp, SOT_rat_SOM/VIS/VEST/PREF, MCT_latBM/BL/FM/FL, %CT_comp, ADT_TU/TD	NR	<p>Test-retest reliability: Pearson's correlation coefficient (r)</p> <p>7 days later (n = 5)</p> <p>r_SOT: C1 = 0.24, C2 = 0.10, C3 = 0.33, C4 = 0.89, C5 = 0.76, C6 = 0.99, cmp = 0.98</p> <p>r_MCTlatBMNRBLNRFMNRFL: 0.60 to 0.95, cmp = 0.95</p> <p>r_ADAT: TU = 0.71, TD = 0.04</p>
Verbecque et al., 2016	Children	Regular	Belgium	Europe	79	39	40 3 (n = 24), 4 (n = 27), 5 (n = 28)	Model OR6-5-2000 platform (Advanced Medical Technology Inc., Massachusetts, USA)	4 conditions: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM Foam: 12 x 45 x 45cm, 60kg/cm3 (NeuroCom International Inc)	Ap: arms along sides Fp: Barefoot - FA, distance 10 cm Vt: watching a film Nt: 1 Td: 40 s Sc: non-randomised	COP_rangeAP, COP_rangeML, COP_velAP, COP_velML, COP_area, COP_rmsAP, COP_rmsML & COP_path, RombQ	<p>Parameters were calculated as follows :</p> $COP_{max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{min} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{vel} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{velAP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{velML} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{area} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{rmsAP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{rmsML} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $COP_{path} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$ $RombQ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{COP_{max} - COP_{min}}{R} \right]^2$	NR
Weismiller et al., 2021	Both	Athletic	USA	North America	533	239	294 NR	Biodex BioSway Portable Balance System (Biodex Medical Systems, Shirley NY)	mCTSIB: C1) EO_FIRM, C2) EC_FIRM, C3) EO_FOAM, C4) EC_FOAM No precision on Foam pad characteristics	Ap: NR Fp: NR Vt: NR Nt: 1 Td: 20 s Sc: NR	Sway Index scores (root mean squared difference of the X, Y coordinates)	NR	NR

Table S2. Quality assessment, using the QUADAS, of studies included in systematic review.

References	Q1	Q2	Q5	Q9	Q12	Q13	Total	Quality
Albertsen et al., 2017	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
Albuquerque et al., 2009	N	Y	N	N	Y	unclear	2	low
Barozzi et al., 2014	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Beauchet et al., 2016	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Black et al., 1982	N	Y	N	unclear	Y	unclear	2	low
Carrick et al., 2007	N	N	N	N	Y	N	1	low
Casselbrant et al., 2010	N	Y	N	unclear	Y	Y	3	low
Charpiot et al., 2009	N	Y	N	N	Y	N	2	low
de la Torre et al., 2017	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
DiFabio et al., 1996	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
Domènech-Vadillo et al., 2019	unclear	Y	N	Y	Y	Y	4	high
Eriksen et al, 2023	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Faraldo-Garcia et al., 2012	N	Y	Y	N	Y	N	3	low
Faraldo-Garcia et al., 2016	N	Y	Y	N	Y	N	3	low
Goble & Baweja, 2018	Y	N	N	Y	Y	unclear	3	low
Goble & Baweja, 2018	Y	N	N	Y	Y	unclear	3	low
Goble et al., 2019	N	N	N	Y	Y	Y	3	low
Goble et al., 2019	Y	N	N	Y	Y	unclear	3	low
Henry et al., 2022	N	N	N	Y	Y	unclear	2	low
Ionescu et al., 2006	N	Y	N	Y	Y	Y	4	high
Kolleger et al., 1992	N	Y	unclear	Y	Y	unclear	3	low
Krityakiarana et al., 2016	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Lara et al., 2018	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Letz et al., 1996	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
Libardoni et al., 2018	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
Massingale et al., 2018	N	N	unclear	unclear	Y	Y	2	low
Masui et al., 2005	Y	Y	Y	Y	Y	Y	6	high
Matsuda et al., 2010	N	N	N	Y	Y	unclear	2	low
Micarelli et al., 2020	N	Y	Y	unclear	Y	unclear	3	low
Mnejja et al., 2022	Y	Y	Y	Y	Y	unclear	5	high

Nishino et al., 2021	Y	Y	N	Y	Y	Y	5	high
Owen et al., 2008	N	N	N	Y	Y	unclear	2	low
Patti et al., 2018	Y	Y	N	Y	Y	Y	5	high
Perucca et al., 2021	N	Y	Y	Y	Y	unclear	4	high
Pletcher et al., 2017	Y	N	N	unclear	Y	Y	3	low
Roberts et al., 2021	N	Y	N	Y	Y	N	3	low
Sackley & Lincoln, 1991	N	Y	N	unclear	Y	N	2	low
Scaglioni et al., 2014	N	Y	N	unclear	N	unclear	1	low
Schmidt et al., 2012	N	Y	N	Y	Y	Y	4	high
Shams et al., 2020	Y	Y	N	Y	Y	Y	5	high
Sinno et al., 2021	N	Y	Y	unclear	Y	unclear	3	low
Trueblood et al., 2018	N	Y	N	Y	Y	unclear	3	low
Verbecque et al., 2016	N	Y	N	Y	Y	Y	4	high
Weismiller et al., 2021	N	Y	N	unclear	Y	unclear	2	low

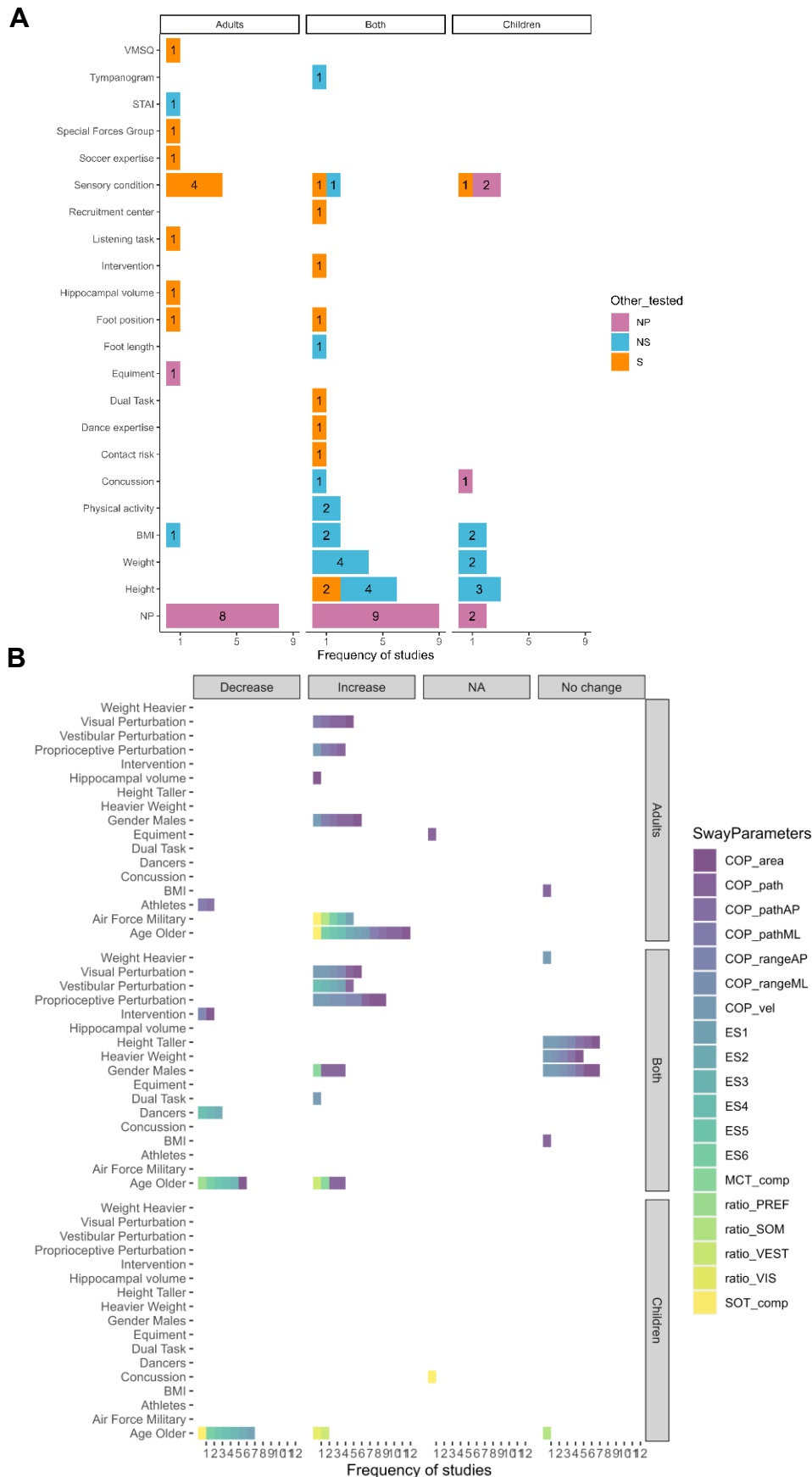


Figure S2. Frequency of studies reporting other variables for studies included in A) the systematic review and B) excluded from meta-analyses. The other variables reported are plotted according to the number of studies and grouped by population (children, adults, or both). The effects of each factor were categorized as “NS” for non-significant or “S” for significant and not reported information was scored as “NP”. A decrease represented less sway. When the effects were non applicable, it was noted as ‘NA’.

Section B. Multilevel meta-analysis using robust variance estimation (RVE) results.

Table S4. Sensitivity of meta-analysis parameters estimates in EO and EC.

Table a. Sensitivity of meta-analysis parameter estimates to assumed value of the sampling correlation between effect size estimates.

ρ	Average ES	SE	CI(lo)	CI(hi)	Study-level SD	Outcome-level SD	ES-level SD	Total SD
0.0	-0.187	0.085	-0.382	0.008	0.220	0.000	0.000	0.220
0.1	-0.185	0.084	-0.378	0.008	0.217	0.000	0.000	0.217
0.2	-0.183	0.083	-0.375	0.009	0.214	0.000	0.000	0.214
0.3	-0.181	0.085	-0.378	0.016	0.189	0.092	0.092	0.229
0.4	-0.179	0.086	-0.378	0.020	0.175	0.111	0.111	0.235
0.5	-0.177	0.086	-0.377	0.023	0.161	0.126	0.126	0.240
0.6	-0.175	0.086	-0.376	0.027	0.147	0.138	0.138	0.244
0.7	-0.172	0.087	-0.375	0.030	0.132	0.148	0.148	0.248
0.8	-0.170	0.087	-0.373	0.033	0.115	0.158	0.158	0.251
0.9	-0.168	0.087	-0.372	0.036	0.096	0.167	0.167	0.255

Table b. Sensitivity of meta-analysis parameter estimates to assumed value of the sampling correlation between effect size estimates.

ρ	Average ES	SE	CI(lo)	CI(hi)	Study-level SD	Outcome-level SD	ES-level SD	Total SD
0.0	-0.233	0.064	-0.396	-0.069	0.110	0.000	0.000	0.110
0.1	-0.231	0.061	-0.388	-0.074	0.096	0.000	0.000	0.096
0.2	-0.228	0.059	-0.380	-0.077	0.081	0.000	0.000	0.081
0.3	-0.227	0.056	-0.373	-0.080	0.066	0.000	0.000	0.066
0.4	-0.225	0.054	-0.369	-0.082	0.051	0.000	0.000	0.051
0.5	-0.224	0.053	-0.366	-0.082	0.037	0.000	0.000	0.037
0.6	-0.221	0.053	-0.359	-0.082	0.000	0.040	0.040	0.056
0.7	-0.216	0.053	-0.352	-0.080	0.000	0.067	0.067	0.095
0.8	-0.213	0.053	-0.349	-0.078	0.000	0.085	0.085	0.121
0.9	-0.211	0.053	-0.347	-0.076	0.000	0.100	0.100	0.141

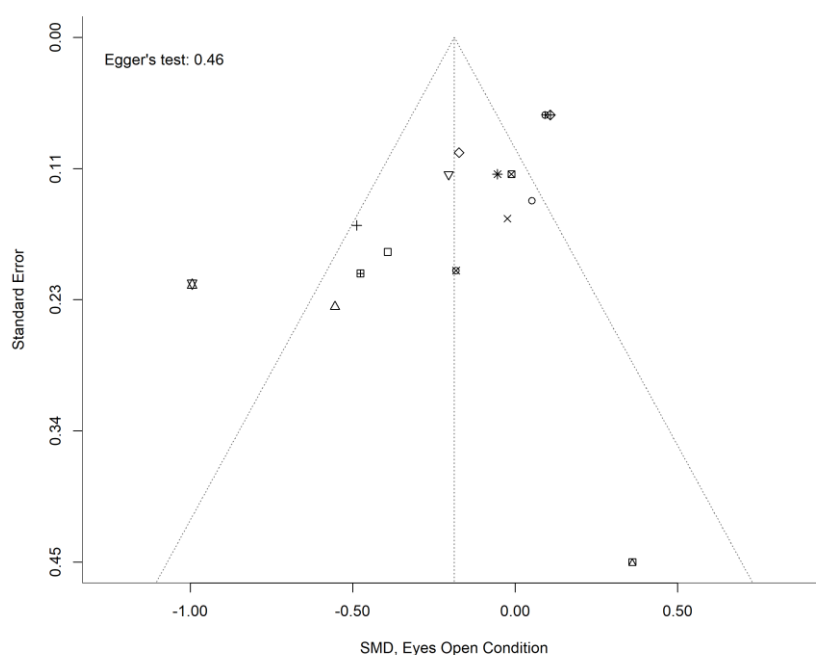


Figure S3. Funnel plot for EO condition of gender comparisons. Funnel plot showing the relationships between the gender and postural sway in EO condition of the 10 studies. The standard errors of those SMDs express the precision. The outer dashed lines indicate the triangular region within which 95% of studies are expected to lie in the absence of both biases and heterogeneity. The small-study effect is quantified using Egger's test. SMD, Standardized mean difference.

Moderator	n of experiments	Test for subgroup differences	Overall I ²	QE
Population Group	15	$F(2, 7) = 0.046, p = 0.955$	80.5%	$p < 0.001$
Region	15	$F(4, 5) = 0.055, p = 0.993$	84.5%	$p < 0.001$
RoB	15	$F(1, 8) = 0.12, p = 0.741$	78.1%	$p < 0.001$

Section C. Frequentist network meta-analysis.

Table S6. Distribution of potential effect modifiers in EO and EC conditions.

STUDY INFORMATION			POPULATION CHARACTERISTICS				INTERVENTION				Risk of Bias
References	Groups	Region	Population Group	Sample size	Females (n)	Males (n)	Posturography Type	Movement Control Type	Tasks	Sway Parameters	
Barozzi et al., 2014	6 (n = 20), 7 (n = 43), 8 (n = 38), 9 (n = 27), 10 (n = 45), 11 (n = 29), 12 (n = 41), 13 (n = 35), 14 (n = 11), adults (n = 30)	Europe	Both	319	139	180	Static	Static	mCTSIB	COP_vel, COP_area	High
Casselbrant et al., 2010	4 (n = 51), 5 (n = 76), 6 (n = 74), 7 (n = 69), 8 (n = 38), 9 (n = 18)	North America	Children	127	57	70	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES, SOT_comp	High

Supplementary Materials
Julienne et al.

Eriksen et al., 2023	20 - 29 (n= 20), 30 - 39 (n= 20), 40 - 49 (n= 20), 50 - 59 (n= 20), 60 - 69 (n= 20), 70-79 (n= 20) F, M	Europe	Adults	120	60	60	Dynamic	Static	SOT, MCT	SOT_ES, SOT_comp, SOT_ratios	High
Faraldo-Garcia et al., 2016	16-20 (n =10), 20 - 29 (n =10), 30 - 39 (n =10), 40 - 49 (n =10), 50 - 59 (n =10), 60 - 69 (n =10), 70-81 (n =10)	Europe	Adults	70	35	35	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES	High
Henry et al., 2022	F, M	North America	Both	253	70	183	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES, SOT_comp, SOT_ratios	Low
Lara et al., 2018	F, M	Central/South America	Children	80	47	33	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES, SOT_comp	Low
Letz et al., 1996	F, M	Europe	Both	174	60	114	Static	Static	EC_FIRM	COP_vel	Low

Supplementary Materials
Julienne et al.

Libardoni et al., 2018	8 (n = 33), 9 (n = 33), 10 (n = 33), 11 (n = 33), 12 (n = 33) F, M	Central/South America	Children	165	82	83	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES	High
Micarelli et al., 2020	4 (n = 10), 5 (n = 10), 6 (n = 10), 7 (n = 10), 8 (n = 10), 9 (n = 10), 10 (n = 10), 11 (n = 10), 12 (n = 10), 13 (n = 10), 14 (n = 10), 15 (n = 10), 16 (n = 10), 17 (n = 10), 18 (n = 10), adults (n = 32)	Europe	Both	182	91	91	Static	Static			
Mnejja et al., 2022	4 (n = 205), 5 (n = 205)	Africa	Children	410	205	205	Static	Static	mCTSIB	COP_vel	Low

Supplementary Materials
Julienne et al.

	F, M										
Nishino et al., 2021	20 - 59 (n = 141), 60 - 69 (n = 82), 70 - 89 (n = 74) F, M	Central/South America	Adults	297	172	125	Dynamic	Static	Vision_Support	COP_area, COP_velML	Low
Patti et al., 2018	F, M	Europe	Both	914	510	404	Static	Static	EO_FIRM	COP_path, COP_area	Low
Shams et al., 2020	F, M	Asia	Both	900	450	450	Dynamic	Static	SOT	COP_vel, COP_velAP, COP_velML	Low
Sinno et al., 2021	F, M	Asia	Both	140	70	70	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES, SOT_comp, SOT_ratios	Low
Trueblood et al., 2018	20 - 29 (n = 10), 30 - 39 (n = 10), 40 - 49 (n = 10), 50 - 59 (n = 10), 60 - 69 (n = 10)	North America	Adults	50	33	17	Dynamic	Static	SOT	SOT_ES, SOT_comp, SOT_ratios, MCT_comp	High
Verbecque et al., 2016	3 (n = 24), 4 (n = 27), 5 (n = 28)	Europe	Children	79	39	40	Static	Static	mCTSIB	COP_rangeAP, COP_rangeML, COP_velAP,	Low

										COP_velML, COP_area, COP_path	
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------------------------------	--

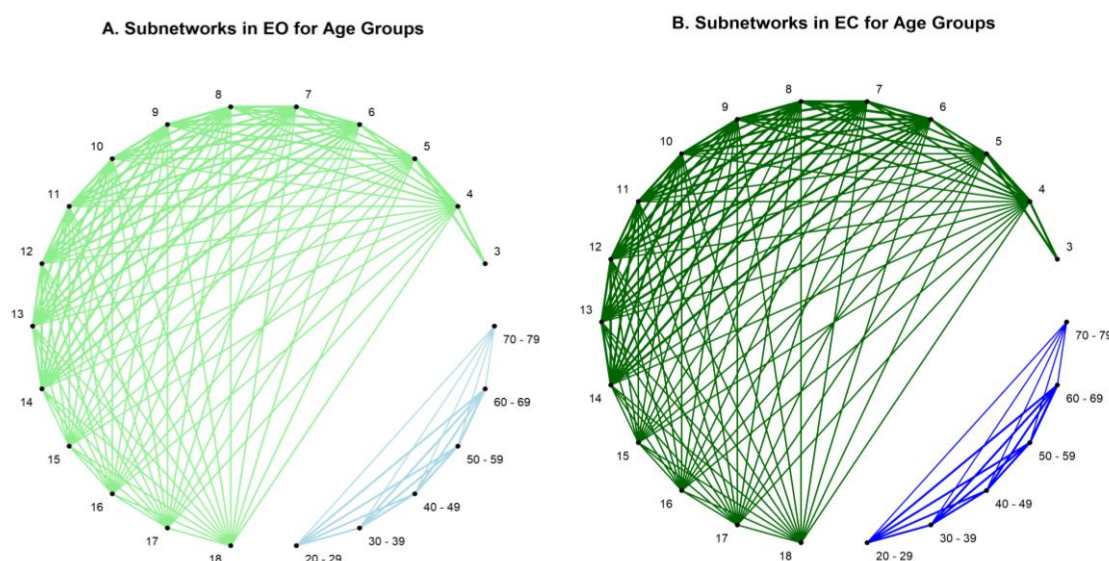


Figure S4. Subnetworks for different age comparisons for A) EO and B) EC conditions. Network meta-analysis included 10 studies and revealed two subnetworks, which consisted of 22 treatments, 358 comparisons and 9 study designs. A) The first subnetwork represents adults aged between 20 and 79 years old and is colored in A) light blue and B) dark blue. The second subnetwork represents children aged between 3 and 18

Table S7. Direct and indirect evidence and network meta-analysis summary table of the first subnetwork for both conditions.

Comparisons		Direct estimate	Indirect estimate	Network meta-analysis
EO CONDITION				
70 - 79	60 - 69	0.06 [-0.56;0.68]	0.63 [-0.33;1.60]	0.22 [-0.30;0.75]
70 - 79	50 - 59	0.23 [-0.39;0.85]	0.24 [-0.73;1.20]	0.23 [-0.29;0.75]
70 - 79	40 - 49	0.73 [0.11;1.36]	0.00 [-1.24;1.24]	0.59 [0.03;1.15]
70 - 79	30 - 39	0.45 [-0.17;1.07]	0.86 [-0.39;2.11]	0.53 [-0.02;1.09]
70 - 79	20 - 29	0.79 [0.16;1.42]	0.15 [-1.09;1.39]	0.66 [0.10;1.22]
60 - 69	50 - 59	0.01 [-0.21;0.22]	.	0.01 [-0.21;0.22]
60 - 69	40 - 49	0.37 [-0.07;0.81]	0.34 [-0.58;1.25]	0.36 [-0.04;0.76]
60 - 69	30 - 39	0.32 [-0.12;0.76]	0.28 [-0.63;1.18]	0.31 [-0.09;0.70]
60 - 69	20 - 29	0.44 [0.00;0.88]	0.41 [-0.51;1.32]	0.44 [0.04;0.83]
50 - 59	40 - 49	0.36 [-0.09;0.80]	0.36 [-0.55;1.26]	0.36 [-0.04;0.75]
50 - 59	30 - 39	0.31 [-0.13;0.75]	0.29 [-0.61;1.20]	0.30 [-0.09;0.70]
50 - 59	20 - 29	0.43 [-0.01;0.87]	0.43 [-0.48;1.34]	0.43 [0.03;0.83]
40 - 49	30 - 39	-0.05 [-0.49;0.38]	.	-0.05 [-0.49;0.39]
40 - 49	20 - 29	0.08 [-0.36;0.51]	.	0.07 [-0.36;0.51]
30 - 39	20 - 29	0.13 [-0.31;0.57]	.	0.13 [-0.31;0.57]

EC CONDITION				
70 - 79	60 - 69	0.24 [-0.38;0.86]	-0.26 [-1.23;0.72]	0.09 [-0.43;0.62]
70 - 79	50 - 59	0.14 [-0.48;0.76]	0.83 [-0.14;1.81]	0.34 [-0.18;0.86]
70 - 79	40 - 49	0.76 [0.13;1.39]	0.47 [-0.78;1.72]	0.70 [0.14;1.26]
70 - 79	30 - 39	0.85 [0.22;1.48]	0.80 [-0.45;2.05]	0.84 [0.28;1.40]
70 - 79	20 - 29	0.85 [0.22;1.48]	0.85 [-0.40;2.11]	0.85 [0.29;1.42]
60 - 69	50 - 59	0.25 [0.03;0.46]	.	0.25 [0.03;0.46]
60 - 69	40 - 49	0.43 [-0.01;0.87]	1.38 [0.47;2.30]	0.61 [0.21;1.00]
60 - 69	30 - 39	0.57 [0.13;1.02]	1.52 [0.59;2.45]	0.75 [0.35;1.15]
60 - 69	20 - 29	0.59 [0.14;1.03]	1.53 [0.60;2.46]	0.76 [0.36;1.16]
50 - 59	40 - 49	0.55 [0.11;0.99]	-0.44 [-1.35;0.46]	0.36 [-0.04;0.76]
50 - 59	30 - 39	0.69 [0.25;1.14]	-0.30 [-1.21;0.61]	0.50 [0.10;0.90]
50 - 59	20 - 29	0.70 [0.26;1.15]	-0.28 [-1.20;0.63]	0.51 [0.11;0.91]
40 - 49	30 - 39	0.15 [-0.29;0.58]	.	0.14 [-0.30;0.58]
40 - 49	20 - 29	0.16 [-0.28;0.60]	.	0.15 [-0.29;0.59]
30 - 39	20 - 29	0.01 [-0.43;0.45]	.	0.01 [-0.43;0.45]

Table S8. Direct and indirect evidence and network meta-analysis summary table of the second subnetwork for both conditions.

Comparisons		Direct estimate	Indirect estimate	Network meta-analysis
EO CONDITION				
3	4	0.11 [-0.37; 0.60]	-2.76 [-4.40;-1.13]	-0.12 [-0.59;0.35]
3	5	-0.58 [-1.07;-0.09]	2.29 [0.66; 3.92]	-0.35 [-0.81;0.12]
3	6	.	0.08 [-0.76; 0.91]	0.08 [-0.76;0.91]
3	7	.	0.43 [-0.40; 1.26]	0.43 [-0.40;1.26]
3	8	.	0.75 [-0.08; 1.59]	0.75 [-0.08;1.59]
3	9	.	1.01 [0.16; 1.87]	1.01 [0.16;1.87]
3	10	.	0.98 [0.03; 1.93]	0.98 [0.03;1.93]
3	11	.	1.16 [0.20; 2.12]	1.16 [0.20;2.12]
3	12	.	1.33 [0.38; 2.28]	1.33 [0.38;2.28]
3	13	.	1.45 [0.50; 2.41]	1.45 [0.50;2.41]
3	14	.	1.43 [0.41; 2.45]	1.43 [0.41;2.45]
4	5	-0.23 [-0.62; 0.17]	.	-0.23 [-0.62;0.17]
4	6	0.88 [-0.12; 1.89]	-0.67 [-1.80; 0.46]	0.20 [-0.55;0.95]
4	7	1.03 [0.03; 2.04]	-0.04 [-1.15; 1.07]	0.55 [-0.20;1.29]
4	8	1.18 [0.15; 2.21]	0.52 [-0.58; 1.63]	0.87 [0.12;1.63]

4	9	1.62 [0.54; 2.71]	0.63 [-0.47; 1.73]	1.13 [0.36;1.90]
4	10	.	1.10 [0.23; 1.97]	1.10 [0.23;1.97]
4	11	.	1.28 [0.39; 2.16]	1.28 [0.39;2.16]
4	12	.	1.45 [0.58; 2.33]	1.45 [0.58;2.33]
4	13	.	1.57 [0.69; 2.45]	1.57 [0.69;2.45]
4	14	.	1.55 [0.60; 2.50]	1.55 [0.60;2.50]
5	6	0.15 [-0.84; 1.14]	0.79 [-0.35; 1.93]	0.42 [-0.32;1.17]
5	7	0.29 [-0.70; 1.29]	1.38 [0.26; 2.50]	0.77 [0.03;1.51]
5	8	0.44 [-0.57; 1.46]	1.89 [0.78; 3.01]	1.10 [0.35;1.85]
5	9	0.88 [-0.18; 1.95]	1.87 [0.76; 2.97]	1.36 [0.59;2.13]
5	10	.	1.33 [0.46; 2.20]	1.33 [0.46;2.20]
5	11	.	1.50 [0.62; 2.39]	1.50 [0.62;2.39]
5	12	.	1.68 [0.81; 2.55]	1.68 [0.81;2.55]
5	13	.	1.80 [0.92; 2.68]	1.80 [0.92;2.68]
5	14	.	1.78 [0.83; 2.72]	1.78 [0.83;2.72]
6	7	0.36 [-0.25; 0.96]	-6.95 [-25.87;11.98]	0.35 [-0.25;0.95]
6	8	0.68 [0.07; 1.29]	-0.75 [-14.93;13.43]	0.68 [0.07;1.29]
6	9	0.95 [0.32; 1.58]	-3.12 [-12.89; 6.65]	0.93 [0.31;1.56]
6	10	1.03 [0.27; 1.79]	0.24 [-1.50; 1.98]	0.90 [0.20;1.60]
6	11	1.20 [0.43; 1.98]	0.39 [-1.43; 2.21]	1.08 [0.36;1.79]
6	12	1.38 [0.62; 2.15]	0.58 [-1.18; 2.34]	1.26 [0.55;1.96]
6	13	1.50 [0.73; 2.28]	0.69 [-1.10; 2.47]	1.38 [0.67;2.08]
6	14	1.48 [0.64; 2.33]	0.51 [-1.67; 2.69]	1.35 [0.57;2.14]
7	8	0.33 [-0.27; 0.92]	.	0.33 [-0.26;0.92]
7	9	0.59 [-0.02; 1.20]	-1.08 [-21.27;19.11]	0.59 [-0.03;1.20]
7	10	0.55 [-0.18; 1.27]	0.58 [-1.32; 2.48]	0.55 [-0.12;1.23]
7	11	0.73 [-0.02; 1.47]	0.76 [-1.23; 2.75]	0.73 [0.03;1.42]
7	12	0.90 [0.18; 1.63]	0.93 [-0.99; 2.84]	0.91 [0.23;1.59]
7	13	1.03 [0.29; 1.76]	1.04 [-0.91; 2.99]	1.03 [0.34;1.72]
7	14	1.00 [0.19; 1.81]	1.03 [-1.39; 3.44]	1.00 [0.23;1.77]
8	9	0.25 [-0.36; 0.87]	.	0.26 [-0.36;0.87]
8	10	0.13 [-0.60; 0.86]	0.89 [-1.03; 2.81]	0.23 [-0.46;0.91]
8	11	0.31 [-0.44; 1.05]	1.10 [-0.92; 3.11]	0.40 [-0.30;1.10]
8	12	0.48 [-0.25; 1.22]	1.24 [-0.70; 3.19]	0.58 [-0.11;1.26]
8	13	0.61 [-0.13; 1.34]	1.37 [-0.60; 3.35]	0.70 [0.01;1.39]
8	14	0.58 [-0.23; 1.40]	1.52 [-0.92; 3.96]	0.68 [-0.10;1.45]
9	10	-0.04 [-0.78; 0.71]	-0.00 [-1.96; 1.95]	-0.03 [-0.73;0.66]
9	11	0.14 [-0.62; 0.90]	0.17 [-1.88; 2.21]	0.14 [-0.57;0.86]

9	12	0.32 [-0.43; 1.06]	0.34 [-1.63; 2.31]	0.32 [-0.38;1.02]
9	13	0.44 [-0.31; 1.19]	0.46 [-1.55; 2.47]	0.44 [-0.26;1.15]
9	14	0.42 [-0.41; 1.24]	0.44 [-2.02; 2.91]	0.42 [-0.36;1.20]
10	11	0.18 [-0.56; 0.92]	.	0.18 [-0.56;0.92]
10	12	0.36 [-0.37; 1.08]	.	0.35 [-0.37;1.08]
10	13	0.48 [-0.26; 1.21]	.	0.47 [-0.26;1.21]
10	14	0.45 [-0.36; 1.26]	.	0.45 [-0.36;1.26]
11	12	0.18 [-0.56; 0.92]	.	0.18 [-0.56;0.92]
11	13	0.30 [-0.45; 1.05]	.	0.30 [-0.45;1.05]
11	14	0.27 [-0.55; 1.10]	.	0.27 [-0.55;1.10]
12	13	0.12 [-0.61; 0.85]	.	0.12 [-0.61;0.85]
12	14	0.10 [-0.71; 0.91]	.	0.10 [-0.71;0.91]
13	14	-0.02 [-0.84; 0.79]	.	-0.02 [-0.84;0.79]
EC CONDITION				
3	4	-0.02 [-0.31; 0.27]	-1.59 [-2.41;-0.76]	-0.19 [-0.46; 0.09]
3	5	-0.47 [-0.76;-0.17]	1.12 [0.29; 1.95]	-0.29 [-0.57;-0.02]
3	6	.	0.20 [-0.24; 0.65]	0.20 [-0.24; 0.65]
3	7	.	0.51 [0.07; 0.96]	0.51 [0.07; 0.96]
3	8	.	0.72 [0.26; 1.18]	0.72 [0.26; 1.18]
3	9	.	0.86 [0.37; 1.34]	0.86 [0.37; 1.34]
3	10	.	0.65 [0.13; 1.16]	0.65 [0.13; 1.16]
3	11	.	0.99 [0.45; 1.52]	0.99 [0.45; 1.52]
3	12	.	1.06 [0.54; 1.58]	1.06 [0.54; 1.58]
3	13	.	1.01 [0.48; 1.53]	1.01 [0.48; 1.53]
3	14	.	1.26 [0.63; 1.89]	1.26 [0.63; 1.89]
4	5	-0.10 [-0.31; 0.11]	.	-0.10 [-0.31; 0.11]
4	6	0.71 [0.21; 1.21]	-0.08 [-0.69; 0.53]	0.39 [0.01; 0.78]
4	7	0.83 [0.32; 1.33]	0.53 [-0.05; 1.12]	0.70 [0.32; 1.08]
4	8	1.19 [0.63; 1.74]	0.60 [0.02; 1.18]	0.91 [0.51; 1.31]
4	9	1.42 [0.77; 2.07]	0.75 [0.17; 1.33]	1.05 [0.62; 1.48]
4	10	.	0.84 [0.38; 1.30]	0.84 [0.38; 1.30]
4	11	.	1.18 [0.69; 1.66]	1.18 [0.69; 1.66]
4	12	.	1.25 [0.78; 1.72]	1.25 [0.78; 1.72]
4	13	.	1.19 [0.72; 1.67]	1.19 [0.72; 1.67]
4	14	.	1.45 [0.86; 2.04]	1.45 [0.86; 2.04]
5	6	0.36 [-0.12; 0.83]	0.76 [0.11; 1.40]	0.50 [0.12; 0.88]
5	7	0.47 [-0.00; 0.95]	1.34 [0.74; 1.95]	0.81 [0.43; 1.18]
5	8	0.83 [0.30; 1.35]	1.24 [0.65; 1.83]	1.01 [0.62; 1.40]

5	9	1.07 [0.44; 1.69]	1.22 [0.64; 1.80]	1.15 [0.72; 1.57]
5	10	.	0.94 [0.48; 1.39]	0.94 [0.48; 1.39]
5	11	.	1.28 [0.80; 1.76]	1.28 [0.80; 1.76]
5	12	.	1.35 [0.89; 1.81]	1.35 [0.89; 1.81]
5	13	.	1.30 [0.83; 1.77]	1.30 [0.83; 1.77]
5	14	.	1.56 [0.97; 2.14]	1.56 [0.97; 2.14]
6	7	0.30 [-0.03; 0.63]	1.28 [-2.38; 4.94]	0.31 [-0.02; 0.64]
6	8	0.53 [0.19; 0.87]	-0.39 [-2.84; 2.06]	0.51 [0.17; 0.85]
6	9	0.69 [0.31; 1.07]	-0.29 [-2.14; 1.57]	0.65 [0.28; 1.02]
6	10	0.51 [0.07; 0.96]	0.23 [-0.54; 1.00]	0.44 [0.06; 0.83]
6	11	0.86 [0.38; 1.33]	0.54 [-0.34; 1.42]	0.78 [0.37; 1.20]
6	12	0.93 [0.48; 1.38]	0.64 [-0.16; 1.43]	0.86 [0.46; 1.25]
6	13	0.87 [0.41; 1.33]	0.57 [-0.26; 1.40]	0.80 [0.40; 1.20]
6	14	1.13 [0.55; 1.71]	0.66 [-0.71; 2.02]	1.06 [0.53; 1.59]
7	8	0.20 [-0.12; 0.51]	3.82 [-4.19; 11.82]	0.20 [-0.11; 0.52]
7	9	0.33 [-0.01; 0.68]	1.58 [-2.31; 5.47]	0.34 [-0.00; 0.69]
7	10	0.05 [-0.33; 0.43]	0.67 [-0.30; 1.64]	0.13 [-0.22; 0.49]
7	11	0.39 [-0.02; 0.81]	1.11 [-0.04; 2.26]	0.47 [0.09; 0.86]
7	12	0.46 [0.07; 0.86]	1.10 [0.09; 2.11]	0.55 [0.18; 0.91]
7	13	0.41 [0.01; 0.81]	1.08 [0.02; 2.15]	0.49 [0.12; 0.87]
7	14	0.67 [0.14; 1.20]	1.84 [-0.09; 3.77]	0.75 [0.24; 1.26]
8	9	0.15 [-0.21; 0.50]	-1.92 [-8.77; 4.93]	0.14 [-0.22; 0.50]
8	10	-0.06 [-0.45; 0.33]	-0.14 [-1.15; 0.87]	-0.07 [-0.44; 0.29]
8	11	0.28 [-0.14; 0.70]	0.18 [-1.00; 1.37]	0.27 [-0.13; 0.67]
8	12	0.36 [-0.04; 0.75]	0.27 [-0.78; 1.31]	0.34 [-0.03; 0.72]
8	13	0.30 [-0.11; 0.71]	0.21 [-0.89; 1.31]	0.29 [-0.09; 0.67]
8	14	0.56 [0.02; 1.09]	0.39 [-1.57; 2.36]	0.55 [0.03; 1.06]
9	10	-0.17 [-0.58; 0.25]	-0.50 [-1.57; 0.58]	-0.21 [-0.60; 0.18]
9	11	0.17 [-0.27; 0.62]	-0.21 [-1.44; 1.03]	0.13 [-0.29; 0.55]
9	12	0.25 [-0.17; 0.67]	-0.10 [-1.20; 1.01]	0.20 [-0.19; 0.60]
9	13	0.19 [-0.24; 0.62]	-0.17 [-1.32; 0.99]	0.15 [-0.26; 0.55]
9	14	0.45 [-0.10; 1.00]	-0.15 [-2.11; 1.82]	0.41 [-0.13; 0.94]
10	11	0.34 [-0.07; 0.75]	.	0.34 [-0.07; 0.75]
10	12	0.41 [0.03; 0.80]	.	0.41 [0.03; 0.80]
10	13	0.36 [-0.04; 0.76]	.	0.36 [-0.04; 0.76]
10	14	0.62 [0.09; 1.14]	.	0.62 [0.09; 1.14]
11	12	0.07 [-0.34; 0.49]	.	0.07 [-0.34; 0.49]
11	13	0.02 [-0.41; 0.44]	.	0.02 [-0.41; 0.44]

11	14	0.28 [-0.27; 0.82]	.	0.28 [-0.27; 0.82]
12	13	-0.06 [-0.46; 0.35]	.	-0.06 [-0.46; 0.35]
12	14	0.20 [-0.33; 0.73]	.	0.20 [-0.33; 0.73]
13	14	0.26 [-0.28; 0.80]	.	0.26 [-0.28; 0.80]

Table S9. The analysis of Separate indirect from direct evidence (SIDE) (back-calculation method).

A) First subnetwork for EO condition.

Separate indirect from direct evidence (SIDE) using back-calculation method

Random effects model:

	comparison	k	prop	nma	95%-CI direct	95%-CI indir.	95%-CI Diff	95%-CI	z	p-value
70	79:60 - 69	1	0.71	0.22 [-0.30; 0.75]	0.06 [-0.56; 0.68]	0.63 [-0.33; 1.60]	-0.57 [-1.72; 0.57]	-0.98	0.33	
70	79:50 - 59	1	0.71	0.23 [-0.29; 0.75]	0.23 [-0.39; 0.85]	0.24 [-0.73; 1.20]	-0.01 [-1.16; 1.13]	-0.02	0.98	
70	79:40 - 49	1	0.80	0.59 [0.03; 1.15]	0.73 [0.11; 1.36]	0.00 [-1.24; 1.24]	0.73 [-0.66; 2.13]	1.03	0.30	
70	79:30 - 39	1	0.80	0.53 [-0.02; 1.09]	0.45 [-0.17; 1.07]	0.86 [-0.39; 2.11]	-0.41 [-1.81; 0.99]	-0.57	0.57	
70	79:20 - 29	1	0.80	0.66 [0.10; 1.22]	0.79 [0.16; 1.42]	0.15 [-1.09; 1.39]	0.64 [-0.75; 2.03]	0.91	0.36	
60	69:50 - 59	4	1.00	0.01 [-0.21; 0.22]	0.01 [-0.21; 0.22]	.	.	.	.
60	69:40 - 49	3	0.81	0.36 [-0.04; 0.76]	0.37 [-0.07; 0.81]	0.34 [-0.58; 1.25]	0.03 [-0.99; 1.04]	0.05	0.96	
60	69:30 - 39	3	0.81	0.31 [-0.09; 0.70]	0.32 [-0.12; 0.76]	0.28 [-0.63; 1.18]	0.04 [-0.96; 1.04]	0.08	0.94	
60	69:20 - 29	3	0.81	0.44 [0.04; 0.83]	0.44 [0.00; 0.88]	0.41 [-0.51; 1.32]	0.04 [-0.98; 1.05]	0.07	0.94	
50	59:40 - 49	3	0.81	0.36 [-0.04; 0.75]	0.36 [-0.09; 0.80]	0.36 [-0.55; 1.26]	-0.00 [-1.01; 1.01]	-0.00	1.00	
50	59:30 - 39	3	0.81	0.30 [-0.09; 0.70]	0.31 [-0.13; 0.75]	0.29 [-0.61; 1.20]	0.01 [-0.99; 1.02]	0.03	0.98	
50	59:20 - 29	3	0.81	0.43 [0.03; 0.83]	0.43 [-0.01; 0.87]	0.43 [-0.48; 1.34]	-0.00 [-1.01; 1.01]	-0.00	1.00	
40	49:30 - 39	3	1.00	-0.05 [-0.49; 0.39]	-0.05 [-0.49; 0.38]	.	.	.	.
40	49:20 - 29	3	1.00	0.07 [-0.36; 0.51]	0.08 [-0.36; 0.51]	.	.	.	.
30	39:20 - 29	3	1.00	0.13 [-0.31; 0.57]	0.13 [-0.31; 0.57]	.	.	.	.

Legend:

comparison - Treatment comparison
k - Number of studies providing direct evidence
prop - Direct evidence proportion
nma - Estimated treatment effect (SMD) in network meta-analysis
direct - Estimated treatment effect (SMD) derived from direct evidence
indir. - Estimated treatment effect (SMD) derived from indirect evidence
Diff - Difference between direct and indirect treatment estimates
z - z-value of test for disagreement (direct versus indirect)
p-value - p-value of test for disagreement (direct versus indirect)

B) First subnetwork for EC condition.

Separate indirect from direct evidence (SIDE) using back-calculation method

Random effects model:

	comparison	k	prop	nma	95%-CI	direct	95%-CI	indir.	95%-CI	Diff	95%-CI	z	p-value
70	- 79:60	- 69	1	0.71	0.09 [-0.43; 0.62]	0.24 [-0.38; 0.86]	-0.26 [-1.23; 0.72]	0.49 [-0.66; 1.65]	0.84	0.40			
70	- 79:50	- 59	1	0.71	0.34 [-0.18; 0.86]	0.14 [-0.48; 0.76]	0.83 [-0.14; 1.81]	-0.69 [-1.85; 0.47]	-1.17	0.24			
70	- 79:40	- 49	1	0.80	0.70 [0.14; 1.26]	0.76 [0.13; 1.39]	0.47 [-0.78; 1.72]	0.29 [-1.11; 1.68]	0.40	0.69			
70	- 79:30	- 39	1	0.80	0.84 [0.28; 1.40]	0.85 [0.22; 1.48]	0.80 [-0.45; 2.05]	0.05 [-1.35; 1.45]	0.07	0.94			
70	- 79:20	- 29	1	0.80	0.85 [0.29; 1.42]	0.85 [0.22; 1.48]	0.85 [-0.40; 2.11]	-0.00 [-1.40; 1.40]	-0.00	1.00			
60	- 69:50	- 59	4	1.00	0.25 [0.03; 0.46]	0.25 [0.03; 0.46]	.	.	.	.	.	.	.
60	- 69:40	- 49	3	0.81	0.61 [0.21; 1.00]	0.43 [-0.01; 0.87]	1.38 [0.47; 2.30]	-0.96 [-1.98; 0.06]	-1.84	0.07			
60	- 69:30	- 39	3	0.82	0.75 [0.35; 1.15]	0.57 [0.13; 1.02]	1.52 [0.59; 2.45]	-0.95 [-1.98; 0.08]	-1.80	0.07			
60	- 69:20	- 29	3	0.82	0.76 [0.36; 1.16]	0.59 [0.14; 1.03]	1.53 [0.60; 2.46]	-0.94 [-1.98; 0.09]	-1.79	0.07			
50	- 59:40	- 49	3	0.81	0.36 [-0.04; 0.76]	0.55 [0.11; 0.99]	-0.44 [-1.35; 0.46]	0.99 [-0.01; 2.00]	1.93	0.05			
50	- 59:30	- 39	3	0.81	0.50 [0.10; 0.90]	0.69 [0.25; 1.14]	-0.30 [-1.21; 0.61]	0.99 [-0.02; 2.01]	1.92	0.06			
50	- 59:20	- 29	3	0.81	0.51 [0.11; 0.91]	0.70 [0.26; 1.15]	-0.28 [-1.20; 0.63]	0.98 [-0.03; 2.00]	1.90	0.06			
40	- 49:30	- 39	3	1.00	0.14 [-0.30; 0.58]	0.15 [-0.29; 0.58]	.	.	.	.	.	.	.
40	- 49:20	- 29	3	1.00	0.15 [-0.29; 0.59]	0.16 [-0.28; 0.60]	.	.	.	.	.	.	.
30	- 39:20	- 29	3	1.00	0.01 [-0.43; 0.45]	0.01 [-0.43; 0.45]	.	.	.	.	.	.	.

Legend:

- comparison - Treatment comparison
- k - Number of studies providing direct evidence
- prop - Direct evidence proportion
- nma - Estimated treatment effect (SMD) in network meta-analysis
- direct - Estimated treatment effect (SMD) derived from direct evidence
- indir. - Estimated treatment effect (SMD) derived from indirect evidence
- diff - Difference between direct and indirect treatment estimates
- z - z-value of test for disagreement (direct versus indirect)
- p-value - p-value of test for disagreement (direct versus indirect)

c) Second subnetwork for EO condition.

Separate indirect from direct evidence (SIDE) using back-calculation method

Random effects model:

comparison	k	prop	nma	95%-CI	direct	95%-CI	indir.	95%-CI	Diff	95%-CI	z	p-value
3:4	5	0.92	-0.12	[-0.59; 0.35]	0.11	[-0.37; 0.60]	-2.76	[-4.40; -1.13]	2.88	[1.17; 4.58]	3.30	< 0.01
3:5	5	0.92	-0.35	[-0.81; 0.12]	-0.58	[-1.07; -0.09]	2.29	[0.66; 3.92]	-2.87	[-4.57; -1.17]	-3.30	< 0.01
3:6	0	0	0.08	[-0.76; 0.91]	.	.	0.08	[-0.76; 0.91]	.	.	.	.
3:7	0	0	0.43	[-0.40; 1.26]	.	.	0.43	[-0.40; 1.26]	.	.	.	.
3:8	0	0	0.75	[-0.08; 1.59]	.	.	0.75	[-0.08; 1.59]	.	.	.	.
3:9	0	0	1.01	[0.16; 1.87]	.	.	1.01	[0.16; 1.87]	.	.	.	.
3:10	0	0	0.98	[0.03; 1.93]	.	.	0.98	[0.03; 1.93]	.	.	.	.
3:11	0	0	1.16	[0.20; 2.12]	.	.	1.16	[0.20; 2.12]	.	.	.	.
3:12	0	0	1.33	[0.38; 2.28]	.	.	1.33	[0.38; 2.28]	.	.	.	.
3:13	0	0	1.45	[0.50; 2.41]	.	.	1.45	[0.50; 2.41]	.	.	.	.
3:14	0	0	1.43	[0.41; 2.45]	.	.	1.43	[0.41; 2.45]	.	.	.	.
4:5	7	1.00	-0.23	[-0.62; 0.17]	-0.23	[-0.62; 0.17]	.	.	.	.	.	.
4:6	1	0.56	0.20	[-0.55; 0.95]	0.88	[-0.12; 1.89]	-0.67	[-1.80; 0.46]	1.56	[0.05; 3.07]	2.02	0.04
4:7	1	0.55	0.55	[-0.20; 1.29]	1.03	[0.03; 2.04]	-0.04	[-1.15; 1.07]	1.07	[-0.42; 2.57]	1.41	0.16
4:8	1	0.53	0.87	[0.12; 1.63]	1.18	[0.15; 2.21]	0.52	[-0.58; 1.63]	0.65	[-0.85; 2.16]	0.85	0.39
4:9	1	0.51	1.13	[0.36; 1.90]	1.62	[0.54; 2.71]	0.63	[-0.47; 1.73]	0.99	[-0.55; 2.53]	1.26	0.21
4:10	0	0	1.10	[0.23; 1.97]	.	.	1.10	[0.23; 1.97]	.	.	.	.
4:11	0	0	1.28	[0.39; 2.16]	.	.	1.28	[0.39; 2.16]	.	.	.	.
4:12	0	0	1.45	[0.58; 2.33]	.	.	1.45	[0.58; 2.33]	.	.	.	.
4:13	0	0	1.57	[0.69; 2.45]	.	.	1.57	[0.69; 2.45]	.	.	.	.
4:14	0	0	1.55	[0.60; 2.50]	.	.	1.55	[0.60; 2.50]	.	.	.	.
5:6	1	0.57	0.42	[-0.32; 1.17]	0.15	[-0.84; 1.14]	0.79	[-0.35; 1.93]	-0.64	[-2.15; 0.86]	-0.84	0.40
5:7	1	0.56	0.77	[0.03; 1.51]	0.29	[-0.70; 1.29]	1.38	[0.26; 2.50]	-1.09	[-2.58; 0.41]	-1.43	0.15
5:8	1	0.55	1.10	[0.35; 1.85]	0.44	[-0.57; 1.46]	1.89	[0.78; 3.01]	-1.45	[-2.96; 0.05]	-1.89	0.06
5:9	1	0.52	1.36	[0.59; 2.13]	0.88	[-0.18; 1.95]	1.87	[0.76; 2.97]	-0.98	[-2.52; 0.56]	-1.25	0.21
5:10	0	0	1.33	[0.46; 2.20]	.	.	1.33	[0.46; 2.20]	.	.	.	.
5:11	0	0	1.50	[0.62; 2.39]	.	.	1.50	[0.62; 2.39]	.	.	.	.
5:12	0	0	1.68	[0.81; 2.55]	.	.	1.68	[0.81; 2.55]	.	.	.	.
5:13	0	0	1.80	[0.92; 2.68]	.	.	1.80	[0.92; 2.68]	.	.	.	.
5:14	0	0	1.78	[0.83; 2.72]	.	.	1.78	[0.83; 2.72]	.	.	.	.
6:7	3	1.00	0.35	[-0.25; 0.95]	0.36	[-0.25; 0.96]	-6.95	[-25.87; 11.98]	7.30	[-11.63; 26.24]	0.76	0.45
6:8	3	1.00	0.68	[0.07; 1.29]	0.68	[0.07; 1.29]	-0.75	[-14.93; 13.43]	1.43	[-12.77; 15.62]	0.20	0.84
6:9	3	1.00	0.93	[0.31; 1.56]	0.95	[0.32; 1.58]	-3.12	[-12.89; 6.65]	4.07	[-5.72; 13.86]	0.81	0.42
6:10	2	0.84	0.90	[0.20; 1.60]	1.03	[0.27; 1.79]	0.24	[-1.50; 1.98]	0.79	[-1.11; 2.69]	0.82	0.42
6:11	2	0.85	1.08	[0.36; 1.79]	1.20	[0.43; 1.98]	0.39	[-1.43; 2.21]	0.82	[-1.16; 2.80]	0.81	0.42
6:12	2	0.84	1.26	[0.55; 1.96]	1.38	[0.62; 2.15]	0.58	[-1.18; 2.34]	0.80	[-1.11; 2.72]	0.82	0.41
6:13	2	0.84	1.38	[0.67; 2.08]	1.50	[0.73; 2.28]	0.69	[-1.10; 2.47]	0.82	[-1.13; 2.76]	0.82	0.41
6:14	2	0.87	1.35	[0.57; 2.14]	1.48	[0.64; 2.33]	0.51	[-1.67; 2.69]	0.97	[-1.36; 3.31]	0.82	0.41
7:8	3	1.00	0.33	[-0.26; 0.92]	0.33	[-0.27; 0.92]	.	.	.	.	.	.
7:9	3	1.00	0.59	[-0.03; 1.20]	0.59	[-0.02; 1.20]	-1.08	[-21.27; 19.11]	1.66	[-18.54; 21.87]	0.16	0.87
7:10	2	0.87	0.55	[-0.12; 1.23]	0.55	[-0.18; 1.27]	0.58	[-1.32; 2.48]	-0.03	[-2.06; 2.00]	-0.03	0.98
7:11	2	0.88	0.73	[0.03; 1.42]	0.73	[-0.02; 1.47]	0.76	[-1.23; 2.75]	-0.04	[-2.16; 2.09]	-0.03	0.97
7:12	2	0.87	0.91	[0.23; 1.59]	0.90	[0.18; 1.63]	0.93	[-0.99; 2.84]	-0.02	[-2.07; 2.03]	-0.02	0.98
7:13	2	0.88	1.03	[0.34; 1.72]	1.03	[0.29; 1.76]	1.04	[-0.91; 2.99]	-0.02	[-2.10; 2.07]	-0.02	0.99
7:14	2	0.90	1.00	[0.23; 1.77]	1.00	[0.19; 1.81]	1.03	[-1.39; 3.44]	-0.03	[-2.58; 2.52]	-0.02	0.98
8:9	3	1.00	0.26	[-0.36; 0.87]	0.25	[-0.36; 0.87]	.	.	.	.	.	.
8:10	2	0.87	0.23	[-0.46; 0.91]	0.13	[-0.60; 0.86]	0.89	[-1.03; 2.81]	-0.76	[-2.81; 1.29]	-0.72	0.47
8:11	2	0.88	0.40	[-0.30; 1.10]	0.31	[-0.44; 1.05]	1.10	[-0.92; 3.11]	-0.79	[-2.94; 1.36]	-0.72	0.47
8:12	2	0.88	0.58	[-0.11; 1.26]	0.48	[-0.25; 1.22]	1.24	[-0.70; 3.19]	-0.76	[-2.83; 1.32]	-0.72	0.47
8:13	2	0.88	0.70	[0.01; 1.39]	0.61	[-0.13; 1.34]	1.37	[-0.60; 3.35]	-0.77	[-2.88; 1.34]	-0.71	0.48
8:14	2	0.90	0.68	[-0.10; 1.45]	0.58	[-0.23; 1.40]	1.52	[-0.92; 3.96]	-0.94	[-3.51; 1.63]	-0.72	0.47
9:10	2	0.87	-0.03	[-0.73; 0.66]	-0.04	[-0.78; 0.71]	-0.00	[-1.96; 1.95]	-0.03	[-2.12; 2.06]	-0.03	0.98
9:11	2	0.88	0.14	[-0.57; 0.86]	0.14	[-0.62; 0.90]	0.17	[-1.88; 2.21]	-0.03	[-2.21; 2.16]	-0.02	0.98
9:12	2	0.88	0.32	[-0.38; 1.02]	0.32	[-0.43; 1.06]	0.34	[-1.63; 2.31]	-0.02	[-2.13; 2.09]	-0.02	0.98
9:13	2	0.88	0.44	[-0.26; 1.15]	0.44	[-0.31; 1.19]	0.46	[-1.55; 2.47]	-0.02	[-2.16; 2.13]	-0.02	0.99
9:14	2	0.90	0.42	[-0.36; 1.20]	0.42	[-0.41; 1.24]	0.44	[-2.02; 2.91]	-0.03	[-2.63; 2.57]	-0.02	0.98
10:11	2	1.00	0.18	[-0.56; 0.92]	0.18	[-0.56; 0.92]	.	.	.	.	.	.
10:12	2	1.00	0.35	[-0.37; 1.08]	0.36	[-0.37; 1.08]	.	.	.	.	.	.
10:13	2	1.00	0.47	[-0.26; 1.21]	0.48	[-0.26; 1.21]	.	.	.	.	.	.
10:14	2	1.00	0.45	[-0.36; 1.26]	0.45	[-0.36; 1.26]	.	.	.	.	.	.
11:12	2	1.00	0.18	[-0.56; 0.92]	0.18	[-0.56; 0.92]	.	.	.	.	.	.
11:13	2	1.00	0.30	[-0.45; 1.05]	0.30	[-0.45; 1.05]	.	.	.	.	.	.
11:14	2	1.00	0.27	[-0.55; 1.10]	0.27	[-0.55; 1.10]	.	.	.	.	.	.
12:13	2	1.00	0.12	[-0.61; 0.85]	0.12	[-0.61; 0.85]	.	.	.	.	.	.
12:14	2	1.00	0.10	[-0.71; 0.91]	0.10	[-0.71; 0.91]	.	.	.	.	.	.
13:14	2	1.00	-0.02	[-0.84; 0.79]	-0.02	[-0.84; 0.79]	.	.	.	.	.	.

d) Second subnetwork for EC condition.

Separate indirect from direct evidence (SIDE) using back-calculation method

Random effects model:

comparison	k	prop	nma	95%-CI	direct	95%-CI	indir.	95%-CI	Diff	95%-CI	z	p-value
3:4	5	0.89	-0.19	[-0.46; 0.09]	-0.02	[-0.31; 0.27]	-1.59	[-2.41; -0.76]	1.57	[0.69; 2.45]	3.51	< 0.01
3:5	5	0.89	-0.29	[-0.57; -0.02]	-0.47	[-0.76; -0.17]	1.12	[0.29; 1.95]	-1.58	[-2.46; -0.70]	-3.52	< 0.01
3:6	0	0	0.20	[-0.24; 0.65]	.	.	0.20	[-0.24; 0.65]	.	.	.	.
3:7	0	0	0.51	[0.07; 0.96]	.	.	0.51	[0.07; 0.96]	.	.	.	.
3:8	0	0	0.72	[0.26; 1.18]	.	.	0.72	[0.26; 1.18]	.	.	.	.
3:9	0	0	0.86	[0.37; 1.34]	.	.	0.86	[0.37; 1.34]	.	.	.	.
3:10	0	0	0.65	[0.13; 1.16]	.	.	0.65	[0.13; 1.16]	.	.	.	.
3:11	0	0	0.99	[0.45; 1.52]	.	.	0.99	[0.45; 1.52]	.	.	.	.
3:12	0	0	1.06	[0.54; 1.58]	.	.	1.06	[0.54; 1.58]	.	.	.	.
3:13	0	0	1.01	[0.48; 1.53]	.	.	1.01	[0.48; 1.53]	.	.	.	.
3:14	0	0	1.26	[0.63; 1.89]	.	.	1.26	[0.63; 1.89]	.	.	.	.
4:5	7	1.00	-0.10	[-0.31; 0.11]	-0.10	[-0.31; 0.11]	.	.	.	.	.	.
4:6	1	0.60	0.39	[0.01; 0.78]	0.71	[0.21; 1.21]	-0.08	[-0.69; 0.53]	0.79	[0.00; 1.58]	1.97	0.05
4:7	1	0.57	0.70	[0.32; 1.08]	0.83	[0.32; 1.33]	0.53	[-0.05; 1.12]	0.30	[-0.48; 1.07]	0.75	0.45
4:8	1	0.52	0.91	[0.51; 1.31]	1.19	[0.63; 1.74]	0.60	[0.02; 1.18]	0.59	[-0.21; 1.39]	1.44	0.15
4:9	1	0.44	1.05	[0.62; 1.48]	1.42	[0.77; 2.07]	0.75	[0.17; 1.33]	0.67	[-0.19; 1.54]	1.52	0.13
4:10	0	0	0.84	[0.38; 1.30]	.	.	0.84	[0.38; 1.30]	.	.	.	.
4:11	0	0	1.18	[0.69; 1.66]	.	.	1.18	[0.69; 1.66]	.	.	.	.
4:12	0	0	1.25	[0.78; 1.72]	.	.	1.25	[0.78; 1.72]	.	.	.	.
4:13	0	0	1.19	[0.72; 1.67]	.	.	1.19	[0.72; 1.67]	.	.	.	.
4:14	0	0	1.45	[0.86; 2.04]	.	.	1.45	[0.86; 2.04]	.	.	.	.
5:6	1	0.65	0.50	[0.12; 0.88]	0.36	[-0.12; 0.83]	0.76	[0.11; 1.40]	-0.40	[-1.20; 0.40]	-0.99	0.32
5:7	1	0.62	0.81	[0.43; 1.18]	0.47	[0.00; 0.95]	1.34	[0.74; 1.95]	-0.87	[-1.64; -0.10]	-2.21	0.03
5:8	1	0.56	1.01	[0.62; 1.40]	0.83	[0.30; 1.35]	1.24	[0.65; 1.83]	-0.41	[-1.20; 0.38]	-1.01	0.31
5:9	1	0.46	1.15	[0.72; 1.57]	1.07	[0.44; 1.69]	1.22	[0.64; 1.80]	-0.15	[-1.01; 0.70]	-0.36	0.72
5:10	0	0	0.94	[0.48; 1.39]	.	.	0.94	[0.48; 1.39]	.	.	.	.
5:11	0	0	1.28	[0.80; 1.76]	.	.	1.28	[0.80; 1.76]	.	.	.	.
5:12	0	0	1.35	[0.89; 1.81]	.	.	1.35	[0.89; 1.81]	.	.	.	.
5:13	0	0	1.30	[0.83; 1.77]	.	.	1.30	[0.83; 1.77]	.	.	.	.
5:14	0	0	1.56	[0.97; 2.14]	.	.	1.56	[0.97; 2.14]	.	.	.	.
6:7	3	0.99	0.31	[-0.02; 0.64]	0.30	[-0.03; 0.63]	1.28	[-2.38; 4.94]	-0.98	[-4.65; 2.70]	-0.52	0.60
6:8	3	0.98	0.51	[0.17; 0.85]	0.53	[0.19; 0.87]	-0.39	[-2.84; 2.06]	0.92	[-1.55; 3.39]	0.73	0.47
6:9	3	0.96	0.65	[0.28; 1.02]	0.69	[0.31; 1.07]	-0.29	[-2.14; 1.57]	0.98	[-0.91; 2.87]	1.01	0.31
6:10	2	0.75	0.44	[0.06; 0.83]	0.51	[0.07; 0.96]	0.23	[-0.54; 1.00]	0.28	[-0.61; 1.18]	0.62	0.53
6:11	2	0.78	0.78	[0.37; 1.20]	0.86	[0.38; 1.33]	0.54	[-0.34; 1.42]	0.32	[-0.68; 1.32]	0.62	0.53
6:12	2	0.75	0.86	[0.46; 1.25]	0.93	[0.48; 1.38]	0.64	[-0.16; 1.43]	0.29	[-0.62; 1.21]	0.62	0.53
6:13	2	0.76	0.80	[0.40; 1.20]	0.87	[0.41; 1.33]	0.57	[-0.26; 1.40]	0.30	[-0.65; 1.25]	0.63	0.53
6:14	2	0.85	1.06	[0.53; 1.59]	1.13	[0.55; 1.71]	0.66	[-0.71; 2.02]	0.47	[-1.01; 1.96]	0.63	0.53
7:8	3	1.00	0.20	[-0.11; 0.52]	0.20	[-0.12; 0.51]	3.82	[-4.19; 11.82]	-3.62	[-11.63; 4.39]	-0.89	0.38
7:9	3	0.99	0.34	[0.00; 0.69]	0.33	[-0.01; 0.68]	1.58	[-2.31; 5.47]	-1.25	[-5.16; 2.66]	-0.63	0.53
7:10	2	0.87	0.13	[-0.22; 0.49]	0.05	[-0.33; 0.43]	0.67	[-0.30; 1.64]	-0.62	[-1.67; 0.43]	-1.16	0.25
7:11	2	0.88	0.47	[0.09; 0.86]	0.39	[-0.02; 0.81]	1.11	[-0.04; 2.26]	-0.72	[-1.94; 0.50]	-1.15	0.25
7:12	2	0.87	0.55	[0.18; 0.91]	0.46	[0.07; 0.86]	1.10	[0.09; 2.11]	-0.64	[-1.72; 0.45]	-1.15	0.25
7:13	2	0.88	0.49	[0.12; 0.87]	0.41	[0.01; 0.81]	1.08	[0.02; 2.15]	-0.67	[-1.81; 0.47]	-1.16	0.25
7:14	2	0.93	0.75	[0.24; 1.26]	0.67	[0.14; 1.20]	1.84	[-0.09; 3.77]	-1.17	[-3.17; 0.83]	-1.15	0.25
8:9	3	1.00	0.14	[-0.22; 0.50]	0.15	[-0.21; 0.50]	-1.92	[-8.77; 4.93]	2.07	[-4.80; 8.93]	0.59	0.56
8:10	2	0.87	-0.07	[-0.44; 0.29]	-0.06	[-0.45; 0.33]	-0.14	[-1.15; 0.87]	0.08	[-1.00; 1.17]	0.15	0.88
8:11	2	0.89	0.27	[-0.13; 0.67]	0.28	[-0.14; 0.70]	0.18	[-1.00; 1.37]	0.10	[-1.16; 1.35]	0.15	0.88
8:12	2	0.87	0.34	[-0.03; 0.72]	0.36	[-0.04; 0.75]	0.27	[-0.78; 1.31]	0.09	[-1.03; 1.21]	0.15	0.88
8:13	2	0.88	0.29	[-0.09; 0.67]	0.30	[-0.11; 0.71]	0.21	[-0.89; 1.31]	0.09	[-1.08; 1.27]	0.15	0.88
8:14	2	0.93	0.55	[0.03; 1.06]	0.56	[0.02; 1.09]	0.39	[-1.57; 2.36]	0.17	[-1.87; 2.20]	0.16	0.87
9:10	2	0.87	-0.21	[-0.60; 0.18]	-0.17	[-0.58; 0.25]	-0.50	[-1.57; 0.58]	0.33	[-0.82; 1.48]	0.56	0.57
9:11	2	0.89	0.13	[-0.29; 0.55]	0.17	[-0.27; 0.62]	-0.21	[-1.44; 1.03]	0.38	[-0.93; 1.69]	0.57	0.57
9:12	2	0.87	0.20	[-0.19; 0.60]	0.25	[-0.17; 0.67]	-0.10	[-1.20; 1.01]	0.34	[-0.84; 1.53]	0.57	0.57
9:13	2	0.88	0.15	[-0.26; 0.55]	0.19	[-0.24; 0.62]	-0.17	[-1.32; 0.99]	0.36	[-0.88; 1.59]	0.57	0.57
9:14	2	0.93	0.41	[-0.13; 0.94]	0.45	[-0.10; 1.00]	-0.15	[-2.11; 1.82]	0.60	[-1.44; 2.64]	0.57	0.57
10:11	2	1.00	0.34	[-0.07; 0.75]	0.34	[-0.07; 0.75]	.	.	.	.	.	.
10:12	2	1.00	0.41	[0.03; 0.80]	0.41	[0.03; 0.80]	.	.	.	.	.	.
10:13	2	1.00	0.36	[-0.04; 0.76]	0.36	[-0.04; 0.76]	.	.	.	.	.	.
10:14	2	1.00	0.62	[0.09; 1.14]	0.62	[0.09; 1.14]	.	.	.	.	.	.
11:12	2	1.00	0.07	[-0.34; 0.49]	0.07	[-0.34; 0.49]	.	.	.	.	.	.
11:13	2	1.00	0.02	[-0.41; 0.44]	0.02	[-0.41; 0.44]	.	.	.	.	.	.
11:14	2	1.00	0.28	[-0.27; 0.82]	0.28	[-0.27; 0.82]	.	.	.	.	.	.
12:13	2	1.00	-0.06	[-0.46; 0.35]	-0.06	[-0.46; 0.35]	.	.	.	.	.	.
12:14	2	1.00	0.20	[-0.33; 0.73]	0.20	[-0.33; 0.73]	.	.	.	.	.	.
13:14	2	1.00	0.26	[-0.28; 0.80]	0.26	[-0.28; 0.80]	.	.	.	.	.	.

Table S10. CINeMA grading of the certainty of the evidence.

A) Certainty of the evidence of the first subnetwork for EO condition.

Comparison	Number of studies	Within-study bias	Reporting bias	Indirectness	Imprecision	Heterogeneity	Incoherence	Confidence rating	Reason(s) for downgrading
20 - 29:30 - 39	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
20 - 29:40 - 49	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
20 - 29:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity"]
20 - 29:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
20 - 29:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
30 - 39:40 - 49	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
30 - 39:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity"]
30 - 39:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
30 - 39:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
40 - 49:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
40 - 49:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
40 - 49:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
50 - 59:60 - 69	4	Some concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity"]

50 - 59:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	Some concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision", "Heterogeneity"]
60 - 69:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]

B) Certainty of the evidence of the first subnetwork for EC condition.

Comparison	Number of studies	Within-study bias	Reporting bias	Indirectness	Imprecision	Heterogeneity	Incoherence	Confidence rating	Reason(s) for downgrading
20 - 29:30 - 39	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
20 - 29:40 - 49	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
20 - 29:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
20 - 29:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Incoherence"]
20 - 29:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
30 - 39:40 - 49	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]
30 - 39:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
30 - 39:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Incoherence"]
30 - 39:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]

40 - 49:50 - 59	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision", "Incoherence"]
40 - 49:60 - 69	3	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Incoherence"]
40 - 49:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Reporting bias"]
50 - 59:60 - 69	4	Some concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Heterogeneity"]
50 - 59:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	Some concerns	Some concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision", "Heterogeneity"]
60 - 69:70 - 79	1	Major concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	No concerns	Very low	["Within-study bias", "Reporting bias", "Imprecision"]

C) Certainty of the evidence of the second subnetwork for EO condition.

Comparison	Number of studies	Within-study bias	Reporting bias	Indirectness	Imprecision	Heterogeneity	Incoherence	Confidence rating	Reason(s) for downgrading
03:04	5	No concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Low	["Heterogeneity", "Incoherence"]
03:05	5	No concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Low	["Heterogeneity", "Incoherence"]
04:05	7	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
04:06	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
04:07	1	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Imprecision"]

04:08	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
04:09	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
05:06	1	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
05:07	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
05:08	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
05:09	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
06:07	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
06:08	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
06:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
07:08	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
07:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
08:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
06:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
07:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
08:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]

09:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
10:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
10:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]
10:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]
10:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]
06:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
07:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
08:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
09:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
11:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
11:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]
11:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Heterogeneity","Incoherence"]
06:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
08:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]

09:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
12:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
12:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
06:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
08:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
09:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
13:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
06:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
08:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
09:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Imprecision"]
03:06	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Major concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
03:07	0	Some concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]
03:08	0	Some concerns	Low risk	No concerns	Some concerns	No concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Imprecision","Incoherence"]

03:09	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
03:10	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
03:11	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
03:12	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
03:13	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
03:14	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
04:10	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
04:11	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
04:12	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
04:13	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
04:14	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
05:10	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
05:11	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
05:12	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
05:13	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]

05:14	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
-------	---	----------------	----------	-------------	-------------	-------------	----------------	-----	-------------------------------------

D) Certainty of the evidence of the second subnetwork for EC condition.

Comparison	Number of studies	Within-study bias	Reporting bias	Indirectness	Imprecision	Heterogeneity	Incoherence	Confidence rating	Reason(s) for downgrading
03:04	5	No concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Moderate	["Incoherence"]
03:05	5	No concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Moderate	["Incoherence"]
04:05	7	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:06	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:07	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
04:08	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
04:09	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
05:06	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
05:07	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Some concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:08	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
05:09	1	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
06:07	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]

06:08	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Heterogeneity"]
06:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:08	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
08:09	3	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
06:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
08:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
09:10	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
10:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
10:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
10:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
10:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias", "Heterogeneity", "Incoherence"]
06:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Heterogeneity"]

08:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
09:11	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
11:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
11:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
11:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
06:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Heterogeneity"]
08:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
09:12	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
12:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
12:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias", "Incoherence"]
06:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias", "Heterogeneity"]
08:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
09:13	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]

13:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
06:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
07:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	No concerns	Moderate	["Within-study bias"]
08:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
09:14	2	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	No concerns	Low	["Within-study bias","Heterogeneity"]
03:06	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:07	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
03:08	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:09	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:10	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	Some concerns	Major concerns	Very low	["Within-study bias","Heterogeneity","Incoherence"]
03:11	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:12	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:13	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
03:14	0	Some concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:10	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]

04:11	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:12	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:13	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
04:14	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:10	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:11	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:12	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:13	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]
05:14	0	Major concerns	Low risk	No concerns	No concerns	No concerns	Major concerns	Low	["Within-study bias","Incoherence"]

RÉSUMÉ

« Développement et validation d'une plateforme d'exploration multisensorielle appliquée à la pathologie vestibulaire et au mal des transports. »

Au cours des dernières décennies, une nouvelle ère technologique a émergé menant à une convergence vers l'intégration de dispositifs innovants et automatisés dans notre quotidien, tels que les systèmes robotisés, l'intelligence artificielle et la réalité virtuelle ou augmentée. Le domaine de la santé n'a pas été épargné par cette révolution numérique, qui représente un univers d'opportunités tant pour les industriels que pour les scientifiques. Ce domaine offre des perspectives d'investissement pour le développement de traitements innovants et de dispositifs médicaux de pointe. En Europe, l'industrie technologique médicale a connu une croissance considérable, avec un impact économique estimé à environ 100 milliards d'euros (Maresova et al., 2015). En France, le développement R&D demeure l'activité principale, représentant 60 % des dépenses. Ainsi, l'implantation de nouvelles technologies innovantes et flexibles représente un investissement attractif pour les entreprises dans le secteur de la santé.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'unité de recherche UR 7480 Vertiges Extrêmes (VERTEX) et la société Virtualis. Dans une perspective de R&D, l'entreprise Virtualis a conçu un nouvel outil (logiciel et plateforme) à destination du système de santé, une plateforme de posturographie dynamique MotionVR, qui intègre la réalité virtuelle et une technologie de mouvements avancés. Les outils, comme la réalité virtuelle, sont de plus en plus utilisés dans l'évaluation et le traitement thérapeutique. La VR est un outil prometteur pour étudier le comportement humain en interaction directe avec un environnement proche de la réalité. Combinée à des mouvements avancés, cet environnement virtuel permet d'évaluer les réponses motrices dans différents scénarios congruents ou incongruents et avec un niveau de difficulté variable. De ce fait, la plateforme MotionVR est un dispositif médical de pointe qui a été développé pour évaluer des réponses posturales dans un cadre proche de la réalité, à des fins cliniques et thérapeutiques. Dans ce contexte, ce travail doctoral a visé au développement et à la validation de ce dispositif médical de pointe permettant l'analyse posturale, du sujet sain et de personnes souffrant de troubles sensori-moteurs, dans différents contextes sensoriels. Ce projet comporte un volet méthodologique, visant à la standardisation, la validation métrologique et la normalisation d'un outil, ainsi qu'un volet clinique, évaluant des profils sensoriels liés à un dysfonctionnement du système vestibulaire (vestibulopathie chronique, cinétose).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le cadre scientifique et industriel, en lien avec les applications cliniques de la plateforme MotionVR. Dans le chapitre suivant, nous nous sommes focalisés sur le volet méthodologique, comportant trois études distinctes mais complémentaires sur l'analyse posturographique instrumentée du sujet sain. Dans ce volet, nous avons parcouru l'état de l'art de la posturographie dans la quantification du sujet asymptomatique, en mettant l'accent sur les aspects méthodologiques et les valeurs de référence. Cette première étude a permis d'identifier des limites méthodologiques existantes liées à une hétérogénéité importante, un risque de biais élevé et une forte variabilité dans les définitions des tâches et paramètres. L'état de l'art a révélé un manque de cohérence dans les valeurs de références établies en posturographie instrumentée. Ce manque de cohérence limité la pertinence de ces valeurs pour une utilisation clinique efficace. Or, elles sont essentielles pour identifier des troubles de l'équilibre chez des patients. Par la suite, nous avons établi des valeurs de référence sur la plateforme de posturographie MotionVR, en prenant en compte les recommandations issues de cet état de l'art. Ainsi, des valeurs de référence ont été établies en fonction de l'âge, de l'ordre de la décennie, et du genre pour le test d'Organisation Sensoriel (SOT), le test d'Adaptation (ADT) et le test des Limites de Stabilité (LOS), représentant des tests standardisés communément utilisés dans la pratique clinique. Nous avons observé des variations liées à l'âge et au genre. En effet, les résultats ont démontré une instabilité accrue, un défaut d'adaptation et une réduction des limites de stabilité avec l'âge, particulièrement après la cinquantaine. De plus, ces capacités posturales étaient influencées par le genre. Dans ce chapitre, nous avons également déterminé les qualités métrologiques de la plateforme MotionVR. Nous avons démontré une fiabilité test-retest modérée pour le SOT, bonne pour l'ADT et variable pour le LOS. Cependant, les résultats ont révélé que la validité par groupes extrêmes, appliquée à une vestibulopathie chronique, a été confirmée uniquement pour le SOT et certains sous-paramètres du LOS. Ces résultats suggèrent une distinction des réponses posturales entre les patients souffrant de vestibulopathie chronique et les sujets sains, notamment dans des conditions contraignantes, telles que celles observées lors du test de l'organisation sensorielle (SOT) sur la plateforme. Le volet clinique a représenté l'objet des prochains chapitres impliquant une analyse des profils sensoriels dans les domaines de la santé. Ce volet a comporté quatre études cliniques permettant de mettre en avant les différentes applications de la plateforme MotionVR : 1) pour détecter des troubles et explorer la sensorialité chez des sujets atteints de vestibulopathie chronique et 3) pour désensibiliser au mal des transports. Les résultats de l'exploration posturale des patients vestibulaires chroniques ont révélé des différences significatives par rapport aux sujets sains, notamment dans le SOT et le LOS sur la plateforme. Ces observations soutiennent l'hypothèse d'un défaut d'adaptation

posturale chez ces patients, particulièrement dans des environnements complexes. Nous avons complété ces observations par une étude exploratoire cognitivo-émotionnelle des profils individuels de la composante posturale. Les résultats ont mis en évidence l'importance d'intégrer des perturbations sensorielles spécifiques et de prendre en compte l'état émotionnel dans patients atteints de PPPD. Dans le cadre d'une étude pilote sur les effets d'un programme de désensibilisation au mal des transports sur la plateforme, nous n'avons observé aucune amélioration symptomatologique significative. Ces résultats soulignent la nécessité de prolonger la durée des protocoles de désensibilisation, de prendre en compte la variabilité des réponses et la validité thérapeutique.

En conclusion, nous avons réalisé une synthèse des différentes applications possibles de la plateforme MotionVR qui ont été présentés dans les volets méthodologiques et cliniques. Nous avons présenté également les lacunes méthodologiques actuelles et les observations issues des études pour proposer une mise en perspective technologique et clinique.

Mots-clés : plateforme de posturographie, développement méthodologique, validation clinique, pathologie vestibulaire, mal des transports.

ABSTRACT

“Development and validation of a multisensory exploration platform applied to vestibular pathology and motion sickness.”

In recent decades, a new technological era has emerged leading to a convergence towards the integration of innovative and automated devices in our daily lives, such as robotic systems, artificial intelligence and virtual or augmented reality. The healthcare sector has not been spared by this digital revolution, which represents a universe of opportunities for both manufacturers and scientists. This sector offers investment prospects for the development of innovative treatments and cutting-edge medical devices. In Europe, the medical technology industry has experienced considerable growth, with an economic impact estimated at around 100 billion euros (Maresova et al., 2015). In France, R&D development remains the main activity, representing 60% of expenditure. Thus, the implementation of new innovative and flexible technologies represents an attractive investment for companies in the healthcare sector.

This work is part of a collaboration between the UR 7480 Vertiges Extrêmes (VERTEX) research unit and the Virtualis company. From an R&D perspective, the Virtualis company has designed a new tool (software and platform) for the healthcare system, a dynamic posturography platform MotionVR that integrates virtual reality and advanced movement technologies. Tools, such as virtual reality, are increasingly used in assessment and therapeutic treatment. VR is a promising tool for studying human behavior in direct interaction with an environment resembling reality. Combined with advanced movements, this virtual environment makes it possible to evaluate motor responses in different congruent or incongruent scenarios and with a variable level of difficulty. As a result, the MotionVR platform is a cutting-edge medical device that has been developed to evaluate postural responses in a setting resembling reality, for clinical and therapeutic purposes. In this context, this doctoral work aimed at the development and validation of a cutting-edge medical device allowing postural analysis, of the healthy subject and of people suffering from sensorimotor disorders, in different sensory contexts. This project includes a methodological component, aiming at the standardization, metrological validation and normalization of a tool, as well as a clinical component, evaluating sensory profiles linked to a dysfunction of the vestibular system (chronic vestibulopathy, kinetosis).

In the first chapter, we presented the scientific and industrial framework related to the clinical applications of the MotionVR platform. In the following chapter, we focused on the methodological

aspect, which included three distinct but complementary studies on the posturographic analysis of healthy subjects. In this section, we reviewed the state of the art of posturography in quantifying asymptomatic subjects, emphasizing methodological aspects and reference values. This first study allowed us to identify existing methodological limitations due to significant heterogeneity, high risk of bias, and high variability in task and parameter definitions. The state of the art revealed a lack of coherence in the reference values established in instrumented posturography. This lack of consistency limits the relevance of these values for effective clinical use, although they are essential for identifying balance disorders in patients. Subsequently, we established reference values on the MotionVR posturography platform and evaluated the metrological qualities of MotionVR, taking into account the recommendations derived from this state of the art. Reference values were established according to age (in decades) and gender for the Sensory Organization Test (SOT), the Adaptation Test (ADT), and the Limits of Stability Test (LOS), all of which are standardized tests commonly used in clinical practice. We observed variations related to age and gender. Indeed, the results showed increased instability, adaptation deficits, and reduced stability limits with age, particularly after the age of fifty. Moreover, these postural capabilities were influenced by gender. In this chapter, we also determined the metrological qualities of the MotionVR platform. We demonstrated moderate test-retest reliability for the SOT, good reliability for the ADT, and variable reliability for the LOS. However, the results revealed that extreme-group validity, applied to chronic vestibulopathy, was only confirmed for the SOT and certain sub-parameters of the LOS. These findings suggest a distinction in postural responses between patients with chronic vestibulopathy and healthy subjects, particularly in challenging conditions such as those observed in the Sensory Organization Test (SOT) on the platform. The clinical section comprised the following chapters, involving the analysis of sensory profiles in health contexts. This section included four clinical studies that highlighted the various applications of the MotionVR platform: 1) to detect disorders, 2) to explore sensory capabilities in subjects with chronic vestibulopathy, and 3) to desensitize motion sickness. The postural exploration results of patients with chronic vestibular disorders revealed significant differences compared to healthy subjects, particularly in the SOT and LOS on the platform. These observations support the hypothesis of postural adaptation deficits in these patients, especially in complex environments. We supplemented these findings with a cognitive-emotional exploratory study on the individual postural component profiles. The results emphasized the importance of integrating specific sensory disturbances and considering emotional states in patients with PPPD. As part of a pilot study on the effects of a motion sickness desensitization program on the platform, no significant

symptomatic improvement was observed. These results highlight the need to extend the duration of desensitization protocols, account for response variability, and validate therapeutic efficacy.

In conclusion, we summarized the different possible applications of the MotionVR platform that were presented in the methodological and clinical components. We also presented the current methodological gaps and observations from the studies to provide a technological and clinical perspective.

Keywords: posturography platform, methodological development, clinical validation, vestibular pathology, motion sickness.