

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation  
Département Masso-Kinésithérapie

**Mémoire N°1996**

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

**Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie**

Par

**VILET Léa**

**L'optimisation de la rééducation vestibulaire par la réalité virtuelle dans la prise en charge des troubles de l'équilibre chez des patients atteints d'un syndrome vestibulaire périphérique : une revue de littérature**

**The optimization of vestibular rehabilitation through virtual reality in the care of balance disorders for patients with peripheral vestibular syndrome: a literature review**

Directeur de mémoire

**NICOLO Pierre**

**Année 2023-2024**

**Session 1**

Membres du jury

**NICOLO Pierre**

**MUSSIGMANN Thibaut**

**CHOUVIER Florent**



## CHARTRE ANTI-PLAGIAT DE LA DREETS AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

La Direction Régionale de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités délivre sous l'autorité du préfet de région les diplômes paramédicaux et du travail social.

C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue, que les directives suivantes sont formulées.

Elles concernent l'ensemble des candidats devant fournir un travail écrit dans le cadre de l'obtention d'un diplôme d'État, qu'il s'agisse de formation initiale ou de parcours VAE.

La présente chartre définit les règles à respecter par tout candidat, dans l'ensemble des écrits servant de support aux épreuves de certification du diplôme préparé (mémoire, travail de fin d'études, livret2).

Il est rappelé que « le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable »<sup>1</sup>.

**La contrefaçon** (le plagiat est, en droit, une contrefaçon) **est un délit** au sens des articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle.

### **Article 1 :**

Le candidat au diplôme s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

### **Article 2 :**

Le plagiaire s'expose à des procédures disciplinaires. De plus, en application du Code de l'éducation<sup>2</sup> et du Code de la propriété intellectuelle<sup>3</sup>, il s'expose également à des poursuites et peines pénales.

### **Article 3 :**

Tout candidat s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, cette chartre dûment signée qui vaut engagement :

**Je soussigné(e) : Léa VILET atteste avoir pris connaissance de la charte anti-plagiat élaborée par la DREETS Auvergne-Rhône-Alpes et de m'y être conformé(e).**

**Je certifie avoir rédigé personnellement le contenu du livret/mémoire fourni en vue de l'obtention du diplôme suivant :**

**Fait à Lyon, Le 23/04/2024**

**Signature**



**Zér** 

---

<sup>1</sup> Site Université de Nantes : <http://www.univ-nantes.fr/statuts-et-chartes-usagers/dossier-plagiat-784821.kjsp>

<sup>2</sup> Article L331-3 : « les fraudes commises dans les examens et les concours publics qui ont pour objet l'acquisition d'un diplôme délivré par l'Etat sont réprimées dans les conditions fixées par la loi du 23 décembre 1901 réprimant les fraudes dans les examens et concours publics »

<sup>3</sup> Article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle



Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation  
Département Masso-Kinésithérapie

**Mémoire N°1996**

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie

Présenté pour l'obtention du

**Diplôme d'État en Masso-Kinésithérapie**

Par

**VILET Léa**

**L'optimisation de la rééducation vestibulaire par la réalité virtuelle dans la prise en charge des troubles de l'équilibre chez des patients atteints d'un syndrome vestibulaire périphérique : une revue de littérature**

**The optimization of vestibular rehabilitation through virtual reality in the care of balance disorders for patients with peripheral vestibular syndrome: a literature review**

Directeur de mémoire

**NICOLO Pierre**

**Année 2023-2024**

**Session 1**

Membres du jury

**NICOLO Pierre**

**MUSSIGMANN Thibaut**

**CHOUVIER Florent**

# Université Claude Bernard Lyon 1

Président

**Frédéric FLEURY**

Vice-président CA

**REVEL Didier**

## **Secteur Santé**

Institut des Sciences et Techniques de  
Réadaptation

Directeur

**Jacques LUAUTE**

U.F.R. de Médecine Lyon Est

Directeur

**RODE Gilles**

U.F.R d'Odontologie

Directeur

**Jean Christophe MAURIN**

U.F.R de Médecine Lyon-Sud Charles Mérieux

Directeur

**PAPAREL Philippe**

Institut des Sciences Pharmaceutiques et  
Biologiques

Directeur

**DUSSART Claude**

Département de Formation et Centre de Comité de Coordination des  
Recherche en Biologie Humaine Etudes Médicales (CCEM)

Directrice

**SCHOTT Anne-Marie**

**COCHAT Pierre**



# **Institut Sciences et Techniques de la Réadaptation**

## **Département MASSO-KINESITHERAPIE**

Directeur ISTR

**Jacques LUAUTE**

**Équipe de direction du département de Masso-kinésithérapie :**

Directeur de la formation

**Charles QUESADA**

Responsable des travaux de recherche

**Denis JAUDOIN**

Référents d'années

**Ilona BESANCON (MK3)**

**Edith COMEMALE (MK4)**

**Denis JAUDOIN (MK5)**

**Antoine YAZBECK (MK2)**

Référente de la formation clinique

**Ayodélé MADI**

Responsable de scolarité

**Rachel BOUTARD**

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de mémoire, Monsieur NICOLO Pierre, pour sa disponibilité, son implication ainsi que ses conseils depuis le début de l'élaboration de ce mémoire.

J'aimerais remercier mes parents, sans qui je n'aurais pu suivre cette formation, ainsi que pour leur soutien tout au long de ma scolarité. Merci à eux de m'avoir accompagnée et encouragée pendant mon année de concours PACES.

Merci à Clément et Hugo, mes petits frères, pour leur humour au quotidien.

Merci à mes amis de promotion pour ces beaux moments passés ensemble durant ces 4 années.

Et enfin, je voudrais remercier Axel pour son soutien et sa patience au quotidien. Merci d'avoir su me redonner confiance dans les moments nécessaires.

## Liste des acronymes :

BBS : Berg Balance Scale

CAVE : Cave Automatic Virtual Environment

CdM : Centre de Masse

CdP : Centre de Pression

DCL : Déclin Cognitif Léger

DGI : Dynamic Gait Index

DOI : Digital Object Identifier

ECR : Essai Contrôlé Randomisé

FGA : Functional Gait Assesment

GC : Groupe Contrôle

GE : Groupe Expérimental

HMD : Head Mounted Display

HVU : Hypofonction Vestibulaire Unilatérale

K3 : 3<sup>ème</sup> année de masso-kinésithérapie

L YF : Longueur Yeux Fermés

L YO : Longueur Yeux Ouverts

MMSE : Mini Mental State Examination

NR : Non Renseigné

PA : Personnes Âgées

PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

RVC : Rééducation Vestibulaire Classique

RVI : Réalité Virtuelle Immersive

RVO : Réflexe Vestibulo-Oculaire

RVS : Réflexe Vestibulo-Spinal

SNC : Système Nerveux Central

S YF : Surface Yeux Fermés

S YO : Surface Yeux Ouverts

TUG : Timed Up and Go

vHIT : video Head Impulse Test

VPPB : Vertige Positionnel Paroxystique Bénin

VR : Virtual Reality

YF : Yeux Fermés

YO : Yeux Ouverts

# Table des matières

<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Cadre conceptuel</b> .....	<b>1</b>
<b>2.1. Syndrome vestibulaire périphérique</b> .....	<b>1</b>
2.1.1. Épidémiologie du syndrome vestibulaire périphérique .....	2
2.1.2. Le système vestibulaire .....	2
2.1.3. Pathologies vestibulaires périphériques .....	11
2.1.4. Symptomatologie et conséquences .....	12
<b>2.2. Équilibre</b> .....	<b>14</b>
2.2.1. Système d'équilibre .....	14
2.2.2. Évaluation de l'équilibre .....	16
<b>2.3. Rééducation vestibulaire</b> .....	<b>18</b>
2.3.1. Histoire .....	18
2.3.2. Généralités .....	18
2.3.3. Principes théoriques .....	19
2.3.4. Les moyens .....	20
2.3.5. Rééducation des troubles de l'équilibre statique et dynamique .....	21
<b>2.4. Réalité virtuelle</b> .....	<b>21</b>
2.4.1. Définition .....	21
2.4.2. Stades d'immersion et dispositifs de réalité virtuelle .....	22
2.4.3. Lien réalité virtuelle et système nerveux central .....	23
2.4.4. La réalité virtuelle en kinésithérapie .....	23
2.4.5. La réalité virtuelle en kinésithérapie vestibulaire .....	23
<b>3. Problématique</b> .....	<b>24</b>
<b>4. Question de recherche</b> .....	<b>25</b>
<b>5. Méthodes</b> .....	<b>26</b>
<b>5.1. Stratégies de recherche</b> .....	<b>26</b>
5.1.1. Bases de données .....	26
5.1.2. Mots-clés et équation de recherche .....	26
5.1.3. Critères d'éligibilité .....	27
5.1.4. Stratégies de sélection des articles .....	29
<b>5.2. Analyse des articles</b> .....	<b>29</b>
5.2.1. Extraction des données .....	29
5.2.2. Analyse des données .....	30
5.2.3. Évaluation méthodologique des articles retenus .....	30
<b>6. Résultats</b> .....	<b>31</b>
<b>6.1. Sélection des études</b> .....	<b>31</b>
<b>6.2. Caractéristiques des études sélectionnées</b> .....	<b>33</b>
6.2.1. Population étudiée .....	33
6.2.2. Critères d'éligibilité des participants .....	34
6.2.3. Intervention et comparateur .....	35
6.2.4. Critères de jugements et mesures .....	38
6.2.5. Effets de l'intervention .....	39
<b>6.3. Qualité méthodologique des études sélectionnées</b> .....	<b>43</b>
<b>7. Discussion</b> .....	<b>44</b>
<b>7.1. Analyse et interprétation des résultats</b> .....	<b>44</b>
7.1.1. Efficacité de la réalité virtuelle immersive sur l'équilibre statique .....	44

7.1.2.	Efficacité de la réalité virtuelle immersive sur l'équilibre dynamique .....	47
<b>7.2.</b>	<b>Analyse des caractéristiques des études sélectionnées .....</b>	<b>50</b>
7.2.1.	Population .....	50
7.2.2.	Intervention .....	51
7.2.3.	Comparateur .....	52
<b>7.3.</b>	<b>Biais et limites .....</b>	<b>53</b>
7.3.1.	Limites des études incluses .....	53
7.3.2.	Limites et points forts de la revue .....	55
<b>7.4.</b>	<b>Implications pratiques et théoriques .....</b>	<b>56</b>
<b>7.5.</b>	<b>Suggestions pour de futures recherches .....</b>	<b>58</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>59</b>

## Liste des tableaux

Tableau I : Mots-clés .....	27
Tableau II : PICO .....	28
Tableau III : Présentation des études .....	32
Tableau IV : Objectif et design des études .....	33
Tableau V : Caractéristiques générales des études .....	34
Tableau VI : Critères d'éligibilité des études.....	35
Tableau VII : Description de l'intervention .....	36
Tableau VIII : Description de la séance de rééducation vestibulaire classique.....	37
Tableau IX : Critères de jugements et mesures .....	38
Tableau X : Résultats de la surface et la longueur sur posturographie.....	41
Tableau XI : Score PEDro des études sélectionnées.....	44

## Liste des figures

Figure 1 : Labyrinthe osseux (Netter).....	3
Figure 2 : Plans des canaux semi-circulaires (a) et des organes otolithiques (b) (Pocock et al., 2019) .....	3
Figure 3 : Schéma des compartiments et de la composition des différents liquides de l'oreille interne (Couloigner et al., 2004).....	4
Figure 4 : Structure des ampoules des canaux semi-circulaires (Pocock et al., 2019).....	5
Figure 5 : Mouvement de l'endolymphe lors d'une rotation gauche de la tête (Bear et al., 2016) .....	5
Figure 6 : Mécanisme push-pull des canaux semi-circulaires (Klam, 2003). .....	6
Figure 7 : Disposition des canaux semi-circulaires (Michael et al., 2016).....	6
Figure 8 : Structure de l'épithélium sensoriel du saccule et de l'utricule (Pocock et al., 2019) .....	7
Figure 9 : Fonctionnement de la macule des organes otolithiques (Bear et al., 2016).....	7
Figure 10 : Représentation du nerf vestibulo-cochléaire et ses branches terminales au sein du labyrinthe membraneux (Netter).....	8
Figure 11 : Les noyaux vestibulaires (Bonfils & Chevallier, 2017).....	9
Figure 12 : Les différentes voies vestibulaires (Dutheil et al., 2011) .....	14
Figure 13 : Exercices de réhabilitation de Cawthorne et Cooksey (Blin, 2023b) .....	18
Figure 14 : Diagramme de flux de sélection des articles.....	32
Figure 15 : Graphique représentant la moyenne et l'écart-type du score Dynamic Gait Index en pré, post-intervention et follow-up des groupes contrôle et expérimental des 3 études ...	43

## Résumé :

Introduction : Les troubles vestibulaires périphériques, qui incluent les problèmes d'équilibre, altèrent significativement la qualité de vie des patients. La rééducation vestibulaire est reconnue pour son efficacité dans le traitement de ces troubles. Avec l'arrivée de technologies avancées comme la réalité virtuelle, de nouvelles approches thérapeutiques deviennent disponibles pour les kinésithérapeutes. Cette revue de littérature vise à évaluer l'efficacité de la combinaison de la rééducation vestibulaire et de la réalité virtuelle sur l'équilibre statique et dynamique des patients avec troubles vestibulaires périphériques.

Méthodes : Des recherches ont été effectuées dans les bases de données PubMed, Google Scholar, Embase, et Cochrane de mars à septembre 2023. Les critères d'inclusion comprenaient des articles en français ou en anglais, publiés entre 2013 et 2023, sous forme d'essais contrôlés randomisés. La qualité méthodologique des études incluses a été évaluée via l'échelle PEDro.

Résultats : Sur 623 articles identifiés, 3 ont été retenus incluant au total 141 participants atteints d'hypofonction vestibulaire unilatérale chronique. Ces études examinaient l'efficacité d'un traitement combiné de réalité virtuelle et de rééducation vestibulaire classique sur les atteintes vestibulaires périphériques. Elles ont montré une amélioration significative de l'équilibre statique et dynamique avec cette approche combinée ( $P \leq 0,05$ ), surpassant les résultats de la rééducation vestibulaire seule.

Discussion : Bien que les résultats soient prometteurs, des biais potentiels dus à l'absence de mise en aveugle des participants, des thérapeutes et des évaluateurs ont été identifiés. Les imprécisions dans la transcription des valeurs des tests dans les tableaux ont également été relevées. Ces résultats encouragent l'intégration de la réalité virtuelle dans la pratique clinique, bien qu'il faille définir une durée minimale d'intervention pour garantir des bénéfices optimaux.

Conclusion : Malgré un échantillon limité d'études, les preuves actuelles suggèrent que l'association de la réalité virtuelle à la rééducation vestibulaire offre un avantage significatif pour améliorer l'équilibre chez les patients souffrant d'hypofonction vestibulaire unilatérale chronique. Plus d'études sont nécessaires pour confirmer ces résultats et affiner les protocoles de traitement.

**Mots clés** : équilibre statique, équilibre dynamique, réalité virtuelle, rééducation vestibulaire, syndrome vestibulaire périphérique

## **Abstract :**

**Introduction:** Peripheral vestibular disorders, such as balance problems, have a significant impact on patients' quality of life. Vestibular rehabilitation is recognised for its efficiency in treating these disorders. With the emergence of advanced technologies including virtual reality, new therapeutic approaches are becoming available to physiotherapists. This literature review aims to evaluate the effectiveness of combining vestibular rehabilitation and virtual reality on the static and dynamic balance of patients with peripheral vestibular disorders.

**Methods:** Searches were carried out using PubMed, Google Scholar, Embase, and Cochrane databases between March and September 2023. Inclusion criteria included articles in French or English, published from 2013 to 2023, as randomised controlled trials. Methodological quality of included studies was rated using the PEDro scale.

**Results:** Among 623 articles identified, 3 were selected including 141 participants with chronic unilateral vestibular hypofunction. These studies looked at the efficiency of a combined treatment of virtual reality and traditional vestibular rehabilitation on peripheral vestibular disorders. They revealed a significant improvement in static and dynamic balance with this approach ( $P \leq 0.05$ ), which surpassed the results of rehabilitation alone.

**Discussion:** Even if the results are promising, potential biases due to the lack of blinding of the participants, therapists and assessors were identified.

Furthermore, inaccuracies in the transcription of test values in the tables were also noted. These results support the use of virtual reality in clinical practice, yet a minimum duration of intervention should be defined to ensure optimal benefits.

**Conclusion:** In spite of a limited range of studies, the current evidence suggests that combining virtual reality with vestibular rehabilitation offers a significant benefit in improving balance in patients with chronic unilateral vestibular hypofunction. More studies are needed to confirm these results and refine treatment protocols.

**Keywords :** dynamic balance, peripheral vestibular syndrome, static balance, vestibular rehabilitation, virtual reality



# 1. Introduction

Ayant développé un réel intérêt pour la rééducation vestibulaire lors de mon 1<sup>er</sup> stage en 3<sup>ème</sup> année de masso-kinésithérapie (K3), j'ai choisi de réaliser mon mémoire sur cette spécialité de la kinésithérapie. En explorant la littérature scientifique portant sur ce sujet, j'ai pu découvrir la rééducation proposée aux patients atteints de troubles d'ordre vestibulaire à travers différentes techniques manuelles et exercices actifs, mais aussi plusieurs outils. Parmi les nouveaux outils utilisés lors de la rééducation vestibulaire, j'ai pu découvrir l'utilisation de la réalité virtuelle. C'est ainsi que j'ai choisi de réaliser mon mémoire sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans le traitement kinésithérapique des troubles vestibulaires. Cette nouvelle technologie, à la fois innovante et intrigante, suscite de nombreux questionnements notamment autour de son efficacité. C'est pourquoi, dans ce mémoire de recherche, je m'interroge sur son intérêt ainsi que son efficacité dans la rééducation vestibulaire. La réalité virtuelle permet de rendre la rééducation davantage ludique, divertissante et motivante, mais est-elle réellement efficace en kinésithérapie vestibulaire ?

Lors de ce stage en K3, j'ai pu prendre en charge plusieurs patients ayant des troubles de l'équilibre, d'origine vestibulaire, impactant fortement leur qualité de vie à travers le risque de chute, la peur de sortir, mais aussi leurs capacités fonctionnelles.

Ces affections peuvent être très invalidantes conduisant à un isolement psychologique et social, en particulier lorsqu'elles sont récurrentes. En raison de leurs impacts assez conséquents sur les patients, les troubles de l'équilibre représentent une priorité dans la rééducation vestibulaire.

## 2. Cadre conceptuel

### 2.1. Syndrome vestibulaire périphérique

Le syndrome vestibulaire périphérique désigne une atteinte du système vestibulaire, plus précisément d'un ou plusieurs organes périphériques (Dumas, 2023). Il existe deux types d'atteintes : déficitaire ou irritative, qui se distinguent par leurs symptômes cliniques et leur traitement. Le syndrome vestibulaire périphérique peut se manifester de manière aiguë ou chronique (Dumas, 2023) et peut être unilatéral ou bilatéral (McDonnell & Hillier, 2015).

Le terme « syndrome » sous-entend le fait que cela constitue un ensemble de symptômes et signes résultant d'une atteinte du système vestibulaire que nous détaillerons ci-dessous.

### 2.1.1. Épidémiologie du syndrome vestibulaire périphérique

L'épidémiologie concernant le syndrome vestibulaire périphérique est un domaine assez restreint, mais de plus en plus émergent (Neuhauser, 2016). En effet, l'incidence et la prévalence du syndrome vestibulaire périphérique sont difficiles à déterminer (Hall et al., 2016) car peu d'enquêtes épidémiologiques ont été réalisées. Cependant, une enquête épidémiologique de 2019 réalisée en Allemagne, montre que les femmes sont davantage touchées par les troubles vestibulaires périphériques que les hommes (Hülse et al., 2019). Avec une prévalence de 1,6%, les troubles vestibulaires périphériques sont courants dans les pays industrialisés comme l'Allemagne et sont fréquents à tous les âges et augmentent progressivement. Une étude américaine a mis en évidence que ces atteintes augmentaient avec l'âge jusqu'à atteindre 85% des personnes de plus de 80 ans (Agrawal et al., 2009).

Pour comprendre le lien entre le syndrome vestibulaire périphérique et les troubles de l'équilibre, il semble pertinent de connaître l'anatomie et la physiopathologie du système vestibulaire ainsi que ses différentes pathologies et conséquences sur l'équilibre.

### 2.1.2. Le système vestibulaire

Le système vestibulaire est composé de 3 parties :

- Le système vestibulaire périphérique constitué des différentes structures de l'oreille interne ;
- Le système vestibulaire central constitué des centres intégrateurs du système vestibulaire (noyaux vestibulaires et projections vestibulaires corticales) ;
- Le système efférent permettant des réactions motrices par le biais des réflexes vestibulo-oculaire et vestibulo-spinal.

Dans ce mémoire, nous nous intéresserons uniquement aux atteintes du système vestibulaire périphérique. Cependant, afin de comprendre le fonctionnement du système vestibulaire, il est nécessaire qu'il soit décrit dans son intégralité, c'est pourquoi nous détaillerons par la suite le système vestibulaire périphérique et central.

#### ➤ Le système vestibulaire périphérique

##### ▪ Rappels anatomiques

L'oreille interne est un organe bilatéral situé dans la pyramide pétreuse de l'os temporal (Graf & Klam, 2006). Elle est constituée d'un labyrinthe osseux et d'un labyrinthe membraneux. Le labyrinthe osseux constitue une coque d'os compact autour du labyrinthe membraneux. Ce

labyrinthe osseux contient dans sa partie antérieure, l'organe de l'audition, la cochlée et, dans sa partie postérieure, l'organe de l'équilibre formé par le labyrinthe vestibulaire. Ces deux organes sont en étroite relation. Le labyrinthe vestibulaire est composé de trois canaux semi-circulaires : latéral, antérieur et postérieur ainsi que deux organes otolithiques qui constituent le vestibule : l'utricule et le saccule (*Figure 1*).

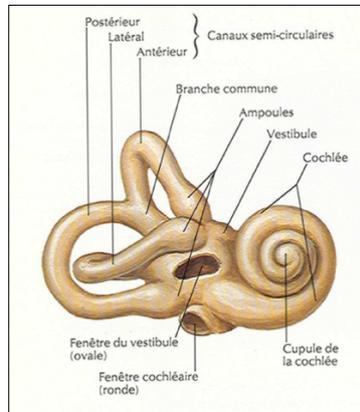


Figure 1 : Labyrinthe osseux (Netter)

Les éléments décrits ci-dessus sont des organes sensoriels permettant de détecter les accélérations (Graf & Klam, 2006).

Les trois canaux semi-circulaires se trouvent dans les 3 plans de l'espace (*Figure 2*). Chaque paire de canaux semi-circulaires est coplanaire. Ils sont positionnés de façon à pouvoir détecter les mouvements angulaires de la tête (rotations). Le canal horizontal est incliné vers le haut de  $30^\circ$  par rapport à l'horizontale. Les canaux verticaux sont orientés à  $45^\circ$  du plan sagittal du crâne (Graf & Klam, 2006).

L'utricule et le saccule sont respectivement disposés horizontalement et verticalement (*Figure 2*) (Pocock et al., 2019) et permettent de détecter les accélérations linéaires telles que la gravité (Hassid et al., 2004). Ces 2 organes jouent un rôle complémentaire de capteur gravito-inertiel.

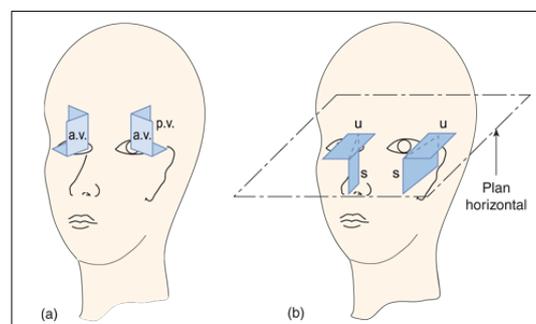


Figure 2 : Plans des canaux semi-circulaires (a) et des organes otolithiques (b) (Pocock et al., 2019)

Une membrane péri-lymphatique tapisse le labyrinthe osseux et contient un liquide, la

pérlimpe, riche en sodium ( $\text{Na}^+$ ) là où flotte le labyrinthe membraneux (Pocock et al., 2019). Le labyrinthe membraneux correspond à un ensemble de cavités à paroi conjonctivo-épithéliale et est rempli d'un liquide, l'endolympe, riche en potassium ( $\text{K}^+$ ) (Figure 3). L'endolympe joue un rôle dans la transduction des informations mécaniques (accélérations) en informations électriques (potentiels d'action) dans le nerf vestibulaire.

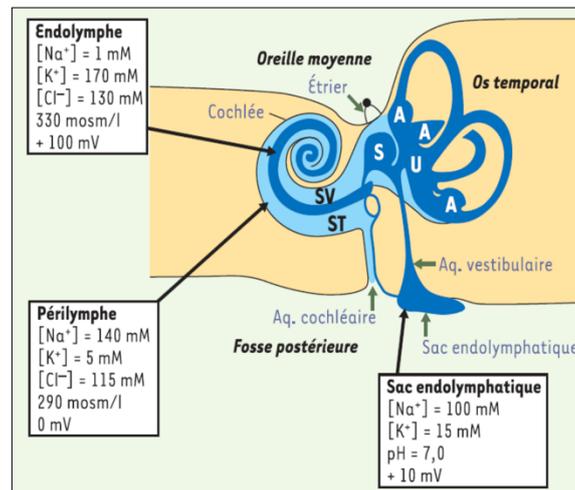


Figure 3 : Schéma des compartiments et de la composition des différents liquides de l'oreille interne (Couloigner et al., 2004)

#### ▪ Physiologie

La fonction de l'appareil vestibulaire est de capter les différents mouvements et positions de la tête. Ils sont détectables dans les 3 plans de l'espace : plan sagittal, plan frontal et plan transversal (Barra & Pérennou, 2013). Le système vestibulaire est sensible aux accélérations linéaires et angulaires et permet de renseigner sur l'orientation de la tête par rapport au vecteur gravitaire (Lévêque et al., 2009).

Pour exécuter cette fonction, le système vestibulaire est composé de 5 capteurs sensoriels, organisés spatialement pour répondre aux mouvements de la tête dans toutes les directions de l'espace. Ils sont situés dans le labyrinthe membraneux. Nous retrouvons :

- Trois capteurs dits ampullaires, qui correspondent à la partie sensorielle des canaux semi-circulaires, situés près de l'utricule dans un gonflement appelé ampoule, et ;
- Deux capteurs dits maculaires, correspondant à la partie sensorielle de l'utricule et du saccule, situés dans une région de leur surface interne appelée macule.

Au niveau de ces capteurs sensoriels, nous retrouvons un neuroépithélium sensoriel composé de cellules ciliées et de leurs fibres nerveuses. Ce sont ces cellules qui génèrent le signal de mouvements angulaires et linéaires de la tête. Les cils sont constitués d'un kinocil et de stéréocils et sont organisés en rangée par ordre croissant, au niveau du pôle apical des

cellules. Le mouvement des cils causé par le mouvement de l'endolymphe va activer ou inhiber le récepteur vestibulaire en fonction du sens du mouvement.

La polarisation morphologique combinée à l'orientation des canaux, de l'utricle et du saccule permet d'interpréter chaque mouvement de tête et sa position dans l'espace.

Pour rappel, les canaux semi-circulaires répondent aux rotations de la tête et présentent à une de leur extrémité, l'ampoule. Dans cette ampoule, la paroi du canal forme une crête ampullaire. Cette crête est tapissée d'une couche épithéliale de cellules ciliées et est surmontée d'une masse gélatineuse nommée cupule (*Figure 4*). Cette masse joue un rôle de barrière qui ferme la lumière du canal et empêche la circulation de l'endolymphe. De la crête ampullaire naît les fibres du nerf vestibulaire afin de transmettre l'information, générée par les cellules ciliées, vers les noyaux vestibulaires.

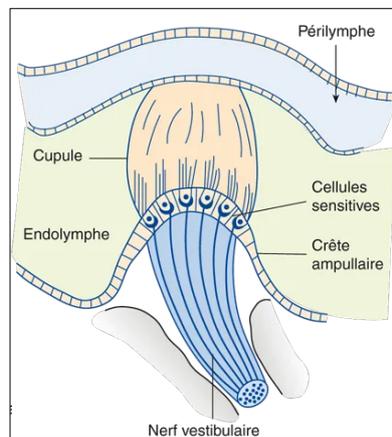


Figure 4 : Structure des ampoules des canaux semi-circulaires (Pocock et al., 2019)

Dû à l'inertie du liquide endolympathique, celui-ci est en retard lors des mouvements de la tête quand la paroi du labyrinthe se déplace. C'est ce retard qui crée le mouvement de la cupule et qui est responsable du phénomène de transduction des cellules ciliées (excitation ou inhibition). Les mouvements des stéréocils se font dans le mouvement inverse de la direction du mouvement de la tête (*Figure 5*).

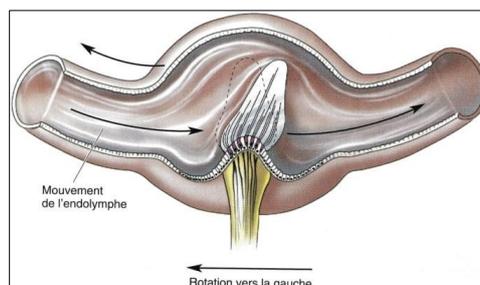


Figure 5 : Mouvement de l'endolymphe lors d'une rotation gauche de la tête (Bear et al., 2016)

Tous les canaux semi-circulaires sont stimulés par paire. Par exemple, lors d'une rotation

de tête à droite ou à gauche, les deux canaux horizontaux, coplanaires, sont stimulés, mais l'un est excité, l'autre inhibé. Ce type d'excitation-inhibition est appelé push pull ou interaction réciproque (Figure 6).

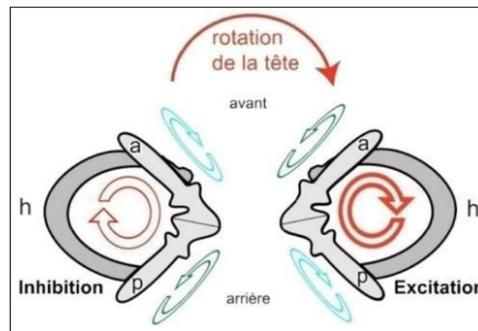


Figure 6 : Mécanisme push-pull des canaux semi-circulaires (Klam, 2003).

En conclusion, il y a 3 paires de canaux possédant chacun son plan de stimulation (Figure 7).

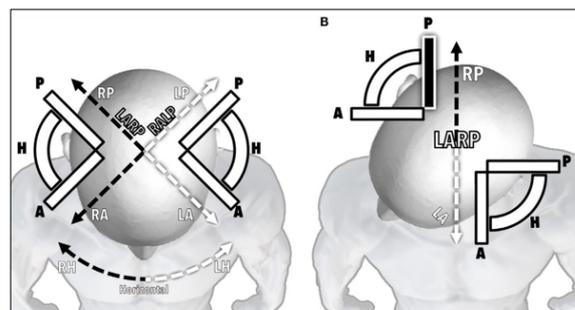


Figure 7 : Disposition des canaux semi-circulaires (Michael et al., 2016)

Pour rappel, les organes otolithiques sont sensibles aux accélérations linéaires telles que la gravité. L'utricule est particulièrement sensible aux accélérations dans le plan horizontal tandis que le saccule dans le plan vertical (Girard & Roi, 2013).

Le neuroépithélium sensoriel de ces organes est constitué d'une membrane otolithique gélatineuse recouvrant les cellules ciliées, située sur la macule (Pocock et al., 2019). Sur cette membrane se trouve des cristaux de carbonate de calcium appelés otoconies, otolithes, statoconies ou statolithes (Figure 8). Ces cristaux augmentent la densité de la membrane la rendant plus sensible à la position de la tête. Les stéréocils se situent dans la membrane otolithique et lorsqu'un mouvement de la tête a lieu, ils sont déviés d'un côté ou d'un autre permettant l'excitation ou l'inhibition des cellules.

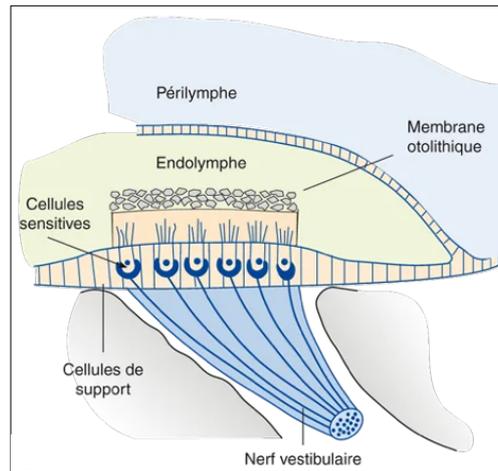


Figure 8 : Structure de l'épithélium sensoriel du saccule et de l'utricule (Pocock et al., 2019)

Le mécanisme d'excitation est le même que celui des canaux semi-circulaires mais c'est le glissement inertiel de la membrane otolithique, sur la macule, qui engendre le mouvement de ces cils sensoriels (Figure 9). Une inclinaison de la tête ou une accélération linéaire de celle-ci provoque l'inclinaison des cils.

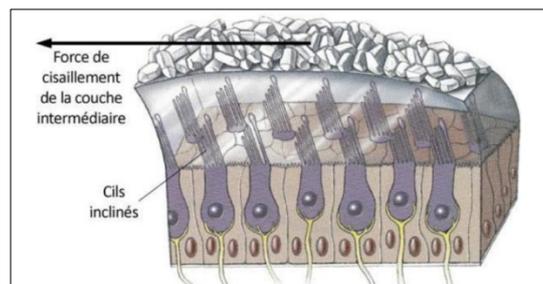


Figure 9 : Fonctionnement de la macule des organes otolithiques (Bear et al., 2016)

Au sein d'une macule, les kinocils sont orientés vers le centre de la macule pour l'utricule et vers l'extérieur pour la macule sacculaire. Ainsi, dans chaque demi-macule, les cellules ciliées se font face. Par conséquent, toute accélération linéaire provoque l'excitation d'une demi-macule et l'inhibition de la demi-macule opposée. À l'instar des canaux semi-circulaires, ces organes fonctionnent donc en push-pull.

- Innervation du système vestibulaire périphérique

L'innervation du système vestibulaire se fait par la branche vestibulaire du huitième nerf crânien : vestibulo-cochléaire (VIII) et son ganglion associé, le ganglion de Scarpa (Pocock et al., 2019). Le nerf VIII émerge au niveau du sillon bulbo-pontique dans le tronc cérébral, puis entre dans l'oreille interne par le conduit auditif interne et se divise en 2 branches : cochléaire pour les informations auditives et vestibulaires pour les informations de mouvement. Au niveau

du conduit auditif interne, le nerf VIII est en étroite relation avec le nerf facial. Après le ganglion vestibulaire, elle se divise en 2 : le nerf vestibulaire supérieur et inférieur (*Figure 10*).

La branche vestibulaire du VIII permet la jonction entre le système vestibulaire périphérique et les noyaux centraux situés dans le tronc cérébral.

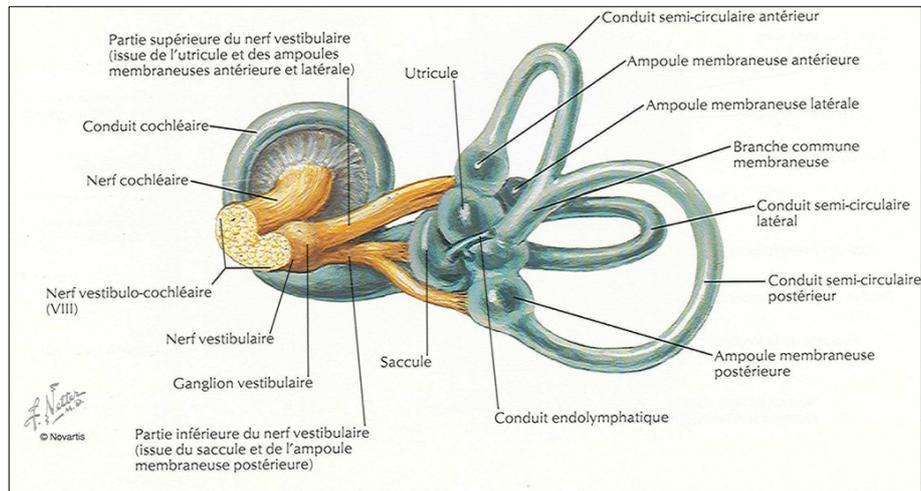


Figure 10 : Représentation du nerf vestibulo-cochléaire et ses branches terminales au sein du labyrinthe membraneux (Netter)

Les neurones vestibulaires primaires partent des épithéliums neurosensoriels, transitent au niveau du ganglion de Scarpa et projettent sur les noyaux vestibulaires. Certaines fibres sont également projetées directement au niveau du cervelet, traduisant une relation étroite avec celui-ci (Pocock et al., 2019).

- Vascularisation artérielle du système vestibulaire périphérique

La vascularisation du système vestibulaire est issue du système vertébro-basilaire. Celui-ci donne naissance à différentes artères permettant la vascularisation de l'oreille interne, du cervelet ainsi que du tronc cérébral là où se situent les noyaux vestibulaires.

L'artère auditive interne vascularise l'oreille interne. Elle naît de l'artère cérébelleuse antéro-inférieure (AICA) et suit les nerfs vestibulo-cochléaire et facial dans le conduit auditif interne. Cette artère auditive se divise en 2 branches terminales : l'artère vestibulaire antérieure et l'artère cochléaire (Sauvage et al., 1999).

Le vestibule et la cochlée bénéficient d'une vascularisation de type terminal (Sauvage, 2015).

- Le système vestibulaire central

Pour assurer une bonne fonction d'équilibration, le système vestibulaire périphérique interagit avec le système vestibulaire central, qui est composé des noyaux vestibulaires, du

tronc cérébral, du cortex et du thalamus.

La grande majorité des fibres du nerf vestibulaire se projette dans le tronc cérébral, sur les noyaux vestibulaires (Yelnik, 2021). Ces noyaux sont situés dans le plancher du 4<sup>ème</sup> ventricule et sont composés du noyau vestibulaire supérieur, inférieur, latéral et médial (*Figure 11*). Ils permettent une première intégration multisensorielle à partir des afférences vestibulaires, cérébelleuses, visuelles et proprioceptives (Schwarz et al., 1975).

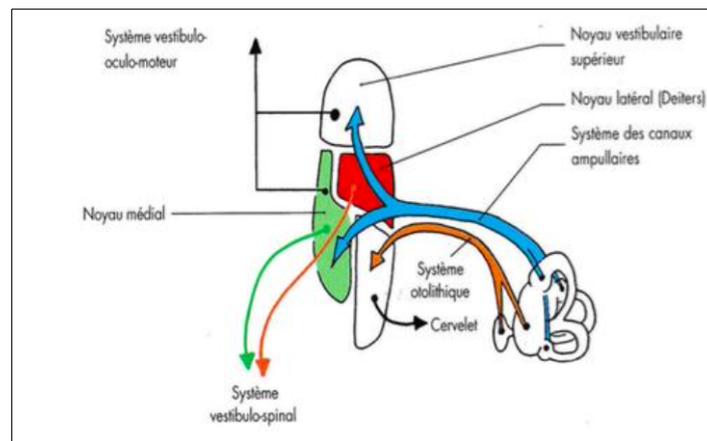


Figure 11 : Les noyaux vestibulaires (Bonfils & Chevallier, 2017)

Ces noyaux vestibulaires établissent ensuite des connexions par l'intermédiaire de neurones vestibulaires secondaires avec la moelle épinière, le cervelet, les noyaux oculomoteurs, le thalamus et le cortex, permettant de réagir aux stimuli sensoriels provenant des récepteurs vestibulaires périphériques.

Il existe donc un système effecteur qui s'active par l'intermédiaire des réflexes vestibulo-oculaire, vestibulo-spinal, vestibulo-cortical mais aussi vestibulo-sympathique.

#### ➤ Le système effecteur

Le système effecteur agit en réponse aux informations de mouvement détectées par le système vestibulaire périphérique et à ses récepteurs détectant les positions et mouvements de la tête et du corps.

##### ▪ Le réflexe vestibulo-oculaire (RVO) :

Les neurones vestibulaires établissent des connexions avec les noyaux extra-oculomoteurs par l'intermédiaire des voies vestibulo-oculaires, c'est le réflexe vestibulo-oculaire (RVO). Ce réflexe permet de stabiliser l'image de l'environnement sur la rétine lors

des mouvements de la tête. Il permet à l'homme de voir clairement l'environnement dans lequel sa tête tourne. C'est un mouvement de compensation où les yeux se déplacent toujours dans le sens inverse du mouvement de la tête. Le déplacement des yeux se réalise à amplitude et vitesse égales au déplacement de la tête (Dutheil et al., 2011). C'est un réflexe très rapide (Baker et al., 1981), de l'ordre de 5 à 10 millisecondes.

Dans une atteinte vestibulaire, nous retrouvons fréquemment une atteinte du RVO où le mouvement compensatoire des yeux se fait plus lentement et provoque donc un décalage entre le mouvement de la tête et celui des yeux.

- Le réflexe vestibulo-spinal (RVS) :

La seconde voie est la voie vestibulo-spinale par le biais des faisceaux vestibulo-spinaux latéral et médian. Ils permettent respectivement des mouvements d'adaptation en extension du rachis (muscles antigravitaires) et des membres ainsi que le contrôle de la position de la tête dans l'espace (Wilson & Peterson, 2011). L'interaction entre ces 2 systèmes met en jeu le réflexe vestibulo-spinal (RVS) qui contribue au contrôle de la posture en mettant en place des réactions d'adaptation et de rééquilibration ainsi qu'une stabilisation et une coordination de la tête sur le tronc (Iles & Pisini, 1992). Ce réflexe joue un rôle majeur dans le maintien de l'équilibre statique et dynamique (Boyle, 2001).

- Autres connexions :

Le système vestibulaire permet l'intégration et la perception de la position du corps et de la tête par l'intermédiaire des voies neuronales centrales se projetant sur le cervelet, le cortex et le thalamus.

Il existe des connexions entre les noyaux vestibulaires et le cervelet par le biais de la voie vestibulo-cérébelleuse. Ils existent des afférences sensorielles et des efférences entre le système vestibulaire et le cervelet (Yelnik, 2021). Ces voies vestibulo-cérébelleuses permettent l'ajustement de la posture, du tonus musculaire axial, le maintien de l'équilibre et la coordination. Le cervelet joue un rôle de contrôle inhibiteur sur les différentes structures avec lesquelles il interagit.

Les noyaux vestibulaires se projettent sur le cortex, par l'intermédiaire de la voie thalamique, pour atteindre plusieurs aires cérébrales impliquées dans la connaissance de l'orientation du corps ainsi que ses déplacements dans l'espace (Lacour, 2009). Ces projections sur les noyaux thalamiques contribuent à la cognition sociale (Yelnik, 2021).

Pour terminer, le système vestibulaire présente des connexions nerveuses avec le

système végétatif (Yates et al., 2014) et le système limbique. Les structures du système limbique jouent un rôle considérable dans la régulation émotionnelle (Rajagopalan et al., 2017).

### 2.1.3. Pathologies vestibulaires périphériques

Le syndrome vestibulaire périphérique résulte de plusieurs causes. Les causes virales, pressionnelles et vasculaires sont les plus fréquentes. Il existe aussi d'autres causes telles que des causes infectieuses, traumatiques, tumorales...(McDonnell & Hillier, 2015). 50% des troubles vestibulaires périphériques identifiés se concentrent sur 3 pathologies : le vertige positionnel paroxystique bénin (VPPB) (28%), la maladie de Ménière (13%) et la névrite vestibulaire (10%), les 50% restants représentent le reste des troubles vestibulaires périphériques (Hülse et al., 2019).

Ci-dessous, nous allons détailler les pathologies vestibulaires périphériques les plus fréquentes (Murdin & Schilder, 2015).

#### - VPPB :

Le VPPB est une des causes les plus fréquentes de vertiges (Miséré, 2023). D'après la Haute Autorité de Santé, ce trouble est défini comme « *un vertige rotatoire vrai, déclenché par les changements de positions de la tête, durant moins de 60 secondes, associés à un nystagmus, sans signe cochléaire ni neurologique* » (HAS, 2017). Ces vertiges positionnels sont provoqués par un déplacement d'otoconies dans les canaux semi-circulaires (Miséré, 2023). Il existe 3 formes de VPPB : postérieure, antérieure et horizontale. La forme postérieure est la plus fréquente, elle représente 90% des cas (Sauvage, 2015). La cause reste généralement inconnue, bien que certains cas sont associés à un traumatisme crânien, à une position allongée prolongée ou à divers troubles impliquant l'oreille interne (Baloh et al., 1987). Le diagnostic est clinique par des tests et manœuvres diagnostiques positionnelles dont la manœuvre de Dix-Hallpike (Kim et al., 2021). Son traitement est basé sur une manœuvre libératrice, mais le VPPB peut aussi disparaître spontanément (Toupet, 2005).

#### - Maladie de Ménière :

La maladie de Ménière est une pathologie périphérique pressionnelle chronique, d'étiologie inconnue pouvant atteindre les personnes âgées comme jeunes, les femmes comme les hommes (Sauvage, 2015). L'endolymphe situé dans le labyrinthe est en excès, phénomène appelé hydrops endolymphatique, et provoque une augmentation de pression du labyrinthe antérieur puis postérieur. Cette augmentation pressionnelle génère des vertiges

ainsi que des déséquilibres avec des symptômes neurovégétatifs et des signes auditifs associés (acouphènes). C'est une maladie très invalidante en raison de la répétitivité de ces crises accompagnées de vomissements et d'instabilité majeure. Il est nécessaire d'avoir la triade symptomatique suivante pour fixer le diagnostic d'une maladie de Ménière : vertiges, baisse d'audition, acouphènes. Le traitement est essentiellement médical (Sauvage, 2015).

- Névrite vestibulaire :

La névrite vestibulaire se caractérise par l'apparition brutale d'une asymétrie permanente entre les deux labyrinthes due à une désafférentation aiguë unilatérale du nerf vestibulaire (Sauvage, 2015). Elle est due à une inflammation du nerf vestibulaire sans atteinte auditive. La cause n'est pas vraiment établie pour le moment, mais une inflammation d'origine virale est souvent évoquée (Reinhard & Maire, 2013). La névrite vestibulaire peut se manifester sous 3 formes (Taylor et al., 2016). Elle donne lieu à un déficit vestibulaire périphérique unilatéral isolé et se manifeste par une crise de vertige giratoire intense et d'une durée de plusieurs heures souvent accompagnés de nausées et vomissements. Le traitement est basé sur le principe de la compensation centrale que nous détaillerons ensuite.

- Neurinome de l'acoustique :

Le neurinome de l'acoustique, également appelé schwannome vestibulaire, est une tumeur bénigne qui se développe dans le conduit auditif interne aux dépens de la gaine de Schwann, qui entoure les cellules nerveuses, de la VIIIème paire crânienne. Les symptômes provoqués sont proportionnels au volume de la tumeur et sont donc associés à des lésions des structures adjacentes. Les premières manifestations sont le plus souvent d'ordre auditif se manifestant par un déficit auditif unilatéral progressif pouvant être accompagné d'acouphènes. Les troubles de l'équilibre restent discrets.

- Atteintes vestibulaires d'origine vasculaire :

Comme vu précédemment, le système vestibulaire est vascularisé essentiellement par le système vertébro-basilaire. Étant donné que cette vascularisation est de type terminal et donc sans suppléance (Sauvage, 2015), toute souffrance vasculaire entraînera des lésions vestibulaires. La topologie des lésions est variable selon le siège lésionnel.

#### 2.1.4. Symptomatologie et conséquences

Lorsque l'appareil vestibulaire est endommagé par une quelconque pathologie, plusieurs manifestations cliniques apparaissent et impliquent les principales voies afférentes et

efférentes du système vestibulaire décrites ci-dessus.

Comme expliqué précédemment, le système vestibulaire établit des connexions avec les systèmes nerveux afin d'intégrer les informations sensorielles et de réagir par le biais de son système effecteur. Chaque centre neurologique permet d'expliquer les symptômes vestibulaires. Après une atteinte du système périphérique, nous retrouvons des altérations des voies : vestibulo-oculaire, vestibulo-spinale, vestibulo-thalamo-corticale, neurovégétative et vestibulo-limbique (*Figure 12*).

Dans un déficit de la voie vestibulo-oculaire, nous retrouvons des symptômes oculomoteurs avec par exemple un RVO altéré, un nystagmus, une cyclo torsion ou une oscillographie (Dutheil et al., 2011). Le nystagmus est un symptôme fréquent dans les atteintes vestibulaires et se définit comme un mouvement des yeux involontaires lié à une asymétrie de fréquence de potentiels d'action au niveau des noyaux vestibulaires. L'oscillographie est caractérisée par une perception erronée d'une instabilité de la scène visuelle aussi liée à une insuffisance du RVO (Hautefort & Toupet, 2016).

Lors d'un déficit de la voie vestibulo-spinale, les symptômes sont posturo-locomoteurs avec un tonus musculaire asymétrique, des RVS asymétriques et une surface du polygone de sustentation élargie permettant de compenser les déséquilibres (Dutheil et al., 2011). L'asymétrie du tonus musculaire est à l'origine d'une déviation posturale ainsi que de troubles de l'équilibre avec un risque de chute (Hautefort & Toupet, 2016) impactant la mobilité des patients (McDonnell & Hillier, 2015).

Un déficit de la voie vestibulo-thalamo-corticale se traduit par des symptômes perceptivo-cognitifs créant une dérive de la représentation mentale provoquée par la partie corticale (Hautefort & Toupet, 2016). Nous retrouvons une désorientation spatiale, accompagnée de vertiges ainsi qu'une altération de la verticale subjective (Dutheil et al., 2011). Le vertige se définit comme une illusion de déplacement de l'environnement autour de soi ou de déplacement de soi-même dans l'espace (Hautefort & Toupet, 2016). Ces vertiges peuvent entraîner des troubles de l'équilibre avec un risque de chute.

Ces symptômes invalidants, cités précédemment, sont souvent accompagnés de troubles végétatifs (Dutheil et al., 2011) tels que des nausées, des vomissements, des salivations, des sueurs, pâleurs, diarrhées par atteinte de la voie neuro-végétative (Hautefort & Toupet, 2016). Chez certains patients, nous pouvons retrouver des perturbations psychologiques telles qu'une anxiété liée à une atteinte de la voie vestibulo-limbique (Hautefort

& Toupet, 2016).

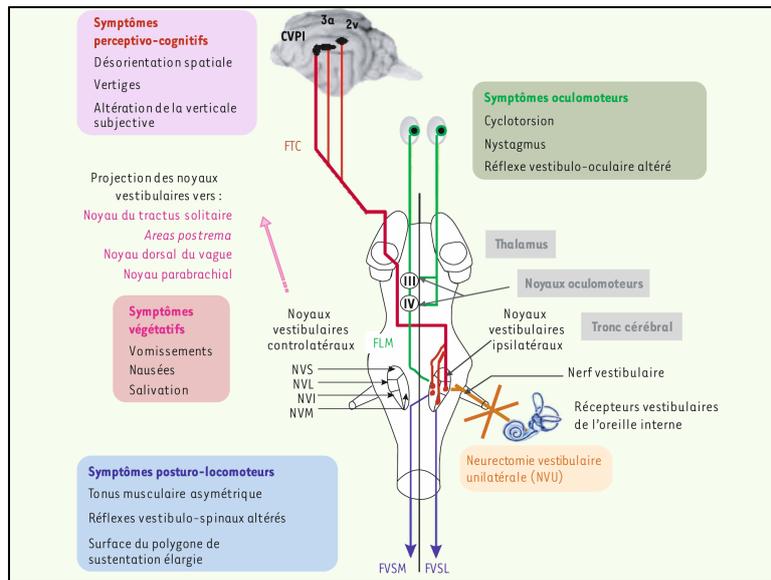


Figure 12 : Les différentes voies vestibulaires (Dutheil et al., 2011)

## 2.2. Équilibre

L'équilibre est un concept complexe que l'on peut diviser en 2 parties : l'équilibre statique et l'équilibre dynamique. H.Wallon définit ces 2 notions comme « *l'équilibre qui maintient le corps immobile et l'équilibre qui maintient le corps en mouvement* » (Wallon et al., 1958)

Selon le dictionnaire de kinésithérapie et de réadaptation, l'équilibre est défini comme « *une fonction sensorimotrice permettant à l'homme de compenser les effets de la gravité sur tout ou partie de son corps* » (Dufour et al., 2007). Concrètement, il correspond à la capacité à maintenir le centre de masse du corps au-dessus de sa base de sustentation.

Les troubles de l'équilibre constituent un obstacle majeur dans les activités de la vie quotidienne (Blin, 2023a). Ils ont un impact considérable sur la qualité de vie que ce soit par la peur de chuter (Grill et al., 2018) mais aussi par la fatigue intense qu'ils peuvent engendrer (Blin, 2023).

### 2.2.1. Système d'équilibre

La fonction d'équilibration est une fonction multisensorielle (Bouccara et al., 2018). Elle résulte de l'intégration des informations afférentes transmises au système nerveux central par le biais de systèmes sensoriels. L'intégration de ces informations donne lieu à une réponse oculomotrice et musculaire efférente par l'action des muscles antigravitaires. Pour obtenir un

état d'équilibre adapté, il est nécessaire de posséder :

- Des systèmes d'informations sensorielles ;
- Des systèmes d'intégration sensorielle : noyaux et cortex vestibulaires ;
- Des centres contrôles moteurs : cervelet, tronc cérébral et ganglions de la base ;
- Un système musculaire efférent permettant l'adaptation posturale : synergies musculaires, mouvements oculaires (RVO).

L'équilibre est maintenu par un ensemble de systèmes de contrôle sensorimoteur (Luxon & Bamiou, 2007). Ils ont un rôle complémentaire dans la stabilisation du corps et du regard (Huy & Charfi, 2008) permettant de moduler l'adaptation posturale. Ils participent à l'orientation spatiale et permettent un comportement sensorimoteur adapté aux contraintes imposées par l'environnement (Massion, 1994). Nous retrouvons 3 systèmes de contrôle sensorimoteur :

- Le système vestibulaire : défini comme un capteur de mouvement et de position tridimensionnel de la tête et du corps (Lévêque et al., 2009) par l'intermédiaire des organes vestibulaires (Strominger et al., 2012). Il a une place fondamentale dans l'orientation posturale et spatiale par rapport au vecteur gravitaire (Barra & Pérennou, 2013) ;
- Le système somesthésique : intervient dans l'équilibre par l'intermédiaire du système proprioceptif et extéroceptif. La proprioception, appelée aussi sensibilité profonde, permet de percevoir des informations de position (statesthésie) et de mouvement (kinesthésie) provenant du système musculo-ostéo-tendineux (Blin, 2023). Elle réunit 3 propriétés : la statesthésie, la kinesthésie et la sensibilité à la force (LAMY, 2006). Son efficacité repose sur des neurones sensoriels appelés « propriocepteurs » (Tuthill & Azim, 2018). La sensibilité superficielle ou extéroception intervient dans le maintien de l'équilibre par l'intermédiaire de récepteurs cutanés appelés « mécanorécepteurs » ;
- Le système visuel contribue à l'orientation du corps par rapport à l'environnement (Blin, 2023a). Ce système permet d'avoir un référentiel visuel de la verticale et d'une connaissance anticipée de l'environnement.

Ainsi, le bon fonctionnement des sens vestibulaire, somatosensoriel et visuel est nécessaire au maintien de l'équilibre du corps (Matsumura & Murofushi, 2021). La redondance informationnelle, permet de lever les ambiguïtés inhérentes à chacune des modalités sensorielles prises isolément et d'améliorer la perception et le codage des déplacements. Les informations sensorielles interagissent entre elles (Lacour et al., 2009).

Par conséquent, lorsqu'un ou plusieurs de ces 3 systèmes est déficient, les mécanismes d'équilibration sont atteints et peuvent provoquer des troubles de l'équilibre (Pierrot-Deseilligny & Burke, 2005).

### 2.2.2. Évaluation de l'équilibre

Lorsque les troubles de l'équilibre sont liés à un déficit vestibulaire, il est nécessaire de les quantifier par des tests dédiés (Blin, 2023a). Pour cela, l'évaluateur possède différents outils d'évaluation de l'équilibre postural tels que des bilans cliniques, instrumentaux ainsi que des questionnaires.

Pour évaluer l'équilibre statique, les tests fréquemment utilisés en kinésithérapie vestibulaire sont :

- La posturographie statique (Blin, 2023a) : La posturographie est un outil d'évaluation objective du système d'équilibre postural (Mancini & Horak, 2010). L'évaluation par posturographie se réalise sur une plateforme de force dite de « stabilométrie ». Le système informatisé enregistre l'évolution de la position du centre de pression (CdP) des pieds représentant le déplacement du centre de masse (CdM) sur le polygone de sustentation, selon les axes antéro-postérieur (Y) et médio-latéral (X) en fonction du temps (Gorski et al., 2019). Le statokinésigramme correspond au tracé des oscillations du patient et permet un calcul automatisé des paramètres de la stabilité posturale. Nous retrouvons la surface, en mm<sup>2</sup>, sur laquelle se déplace la projection du centre de masse et est mesurée par le calcul de l'ellipse de confiance. Ensuite, nous retrouvons la longueur, en mm, qui représente les déplacements successifs du centre de pression à l'intérieur de la surface.
- Clinical Test of Sensory Interaction and Balance (CTSIB) (Cohen et al., 1993) : le CTSIB est un test clinique validé possédant une bonne fiabilité (Cohen et al., 1993). Il permet de quantifier le poids des informations sensorielles de façon clinique (Cohen et al., 1993). Il propose une évaluation de l'équilibre bipodale en ajustant les entrées sensorielles selon 6 conditions (SFORL, 2023).
- Le test de Romberg (Rogers, 1980) : il permet d'évaluer l'équilibre statique en position debout et est chronométré (Kammerlind et al., 2005). Plus le score est élevé, plus le participant possède un bon équilibre (Yardley, Beech, et al., 1998). Il communique des informations sur le potentiel côté de la lésion. Ce test présente un manque de sensibilité et spécificité pour distinguer les atteintes vestibulaires des personnes saines (SFORL, 2023) ;

L'examen des activités fonctionnelles en lien avec l'équilibre est primordial pour déterminer le handicap ainsi que le potentiel risque de chute (Whitney et al., 2016). Pour

évaluer l'équilibre dynamique, les tests fréquemment utilisés sont :

- Dynamic Gait Index (DGI) (Shumway-Cook & Woollacott, 1995) : L'indice de marche dynamique (IMD), version francophone du DGI, a été développé pour évaluer la démarche, l'équilibre lors de la marche ainsi que le risque de chute (Herman et al., 2009). Diverses activités de marche sont évaluées, comportant des déstabilisations externes variables sur l'équilibre et le contrôle postural telles que la marche avec des changements de vitesse, des mouvements droite-gauche et haut-bas de la tête, des changements de directions et des passages d'obstacles (Wrisley et al., 2003). Ce test est très informatif chez les patients souffrant d'atteintes vestibulaires (Wrisley et al., 2003). Cette évaluation comprend 8 items, cotés de 0 à 3 (0 signifie une déficience grave et 3 une déficience normale). Le score optimal est de 24. Si le score est inférieur ou égal à 19 alors le participant présente un risque de chute plus élevé (Hall et al., 2004) (Whitney et al., 2000). La sensibilité de ce score varie de 59 à 67% et la spécificité de 64 à 86% en fonction de l'atteinte (Forsberg et al., 2013). Cette échelle est validée et reproductible pour les patients souffrant de pathologies vestibulaires (Marchetti et al., 2008) ;
- Functional Gait Assesment (FGA) : est un dérivé du DGI qui combine ces 8 items à la marche en aveugle, la marche arrière et la marche en tandem. Il est validé et reproductible (Wrisley et al., 2004) ;
- Timed Up and Go (TUG) : est un test fonctionnel universel de marche et d'ajustements posturaux anticipés. Ce test est validé et reproductible pour les atteintes vestibulaires (Whitney et al., 2004) avec une sensibilité et une spécificité élevée de 87% dans la prédiction des chutes chez la personne âgée (Shumway-Cook et al., 2000) ;
- Le test de Fukuda (Bonanni & Newton, 1998) : ce test vestibulo-spinal permet d'apprécier le côté de la lésion vestibulaire, mais reste peu fiable (Hickey et al., 1990), peu sensible et peu spécifique (Honaker et al., 2009) ;
- Berg Balance Scale (BBS) : cette échelle évalue l'équilibre statique et dynamique ainsi que le risque de chute en 14 items. Elle permet de mesurer quantitativement l'équilibre lors d'activités fonctionnelles (SFORL, 2023).

## 2.3. Rééducation vestibulaire

### 2.3.1. Histoire

Le terme de rééducation vestibulaire est né dans les années 1940, de deux médecins anglais, Cawthorne et Cooksey. Ils décrivent cette rééducation comme un traitement par le mouvement et élaborent un ensemble de techniques de mouvements de la tête et du corps (Blin, 2023). Ces techniques ont été établies pour un programme de réhabilitation pour des soldats anglais atteints de commotion cérébrale lors de la Seconde Guerre mondiale. L'objectif de ce traitement basé sur l'exercice est de réduire les vertiges, d'améliorer la stabilisation du regard, le contrôle postural, les activités fonctionnelles et donc la qualité de vie (Figure 13).

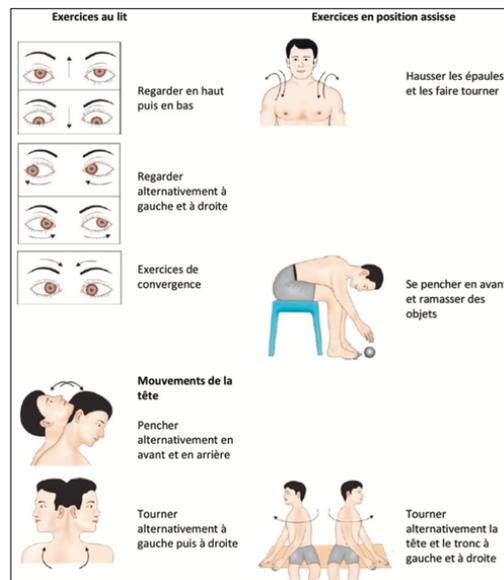


Figure 13 : Exercices de réhabilitation de Cawthorne et Cooksey (Blin, 2023b)

### 2.3.2. Généralités

- Fonctionnement et efficacité

La rééducation en kinésithérapie vestibulaire est une thérapie basée sur des exercices qui associent des mouvements oculaires, de la tête et du corps afin de favoriser la compensation vestibulaire (Solis, 2023). L'objectif principal de la rééducation vestibulaire est l'entraînement cérébral pour compenser les informations vestibulaires défectueuses ou anormales (Teggi et al., 2009). Le phénomène de compensation vestibulaire permet la restauration fonctionnelle du contrôle postural, de la stabilisation du regard et la réduction des sensations de vertiges et d'instabilité (Whitney et al., 2016). Les mécanismes de compensation

centrale engendrent une surpondération des informations visuelles et proprioceptives pour le contrôle de l'équilibre (Mira, 2008). Ce phénomène peut se produire de manière naturelle, mais peut aussi être facilité par des exercices spécifiques.

Cette thérapie est décrite comme un moyen efficace de traiter les patients en diminuant voire supprimant les symptômes vestibulaires (Solis, 2023). Les études démontrent actuellement l'efficacité de cette rééducation pour le traitement de troubles vestibulaires centraux et périphériques. Il existe un haut niveau de preuve soutenant que la rééducation vestibulaire est efficace et sans risque pour les patients atteints d'un déficit vestibulaire périphérique (McDonnell & Hillier, 2015). De nombreuses études soutiennent l'efficacité de la rééducation vestibulaire dans diverses atteintes périphériques : le VPPB (Helminski et al., 2010), la névrite vestibulaire (Halmagyi et al., 2010), la labyrinthite (Clendaniel, 2010), le schwannome vestibulaire (Enticott et al., 2005) ainsi que la maladie de Ménière (Gottshall et al., 2010). Selon les directives de pratique, la rééducation vestibulaire pour les atteintes vestibulaires périphériques est considérée comme un niveau de preuve 1 et une recommandation A (Hall et al., 2022). Elle améliore, chez ces patients, « *la fonction d'équilibration, le risque de chute, la récupération fonctionnelle et la qualité de vie* » et apporte « *un bénéfice à long terme* » (Dunlap et al., 2019). Cela contribue à améliorer l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne (Kumar, 2015).

Afin d'optimiser l'efficacité, la rééducation doit s'effectuer à un stade précoce et favoriser le réentraînement actif (Lacour, 2006). Les exercices doivent être adaptés à chaque patient en lien avec ses déficits. Afin d'évaluer de manière optimale les patients, les environnements d'évaluation doivent être standardisés et les tests à utiliser doivent être des tests statiques et dynamiques (Lacour, 2006).

- Plasticité du cerveau

La rééducation vestibulaire repose sur le principe de compensation vestibulaire mettant en jeu un phénomène de plasticité du système nerveux central (Lacour, 2022), notamment des noyaux vestibulaires (Solis, 2023). Cette plasticité correspond à la capacité à développer de nouvelles stratégies d'équilibration et de stabilisation du regard face à un déficit du système vestibulaire périphérique (Tran Ba Huy et al., 2006). Elle permet de récupérer fonctionnellement après un déficit vestibulaire périphérique.

### 2.3.3. Principes théoriques

Pour éliminer les symptômes vestibulaires, la rééducation s'appuie sur trois types de stratégies : l'adaptation, la substitution et l'habituation (Whitney et al., 2016). Ces 3 stratégies

se basent sur le mécanisme de récupération de la fonction vestibulaire (Solis, 2023).

L'adaptation est définie comme un phénomène d'ajustement d'un récepteur sensoriel face à des stimulations d'intensités différentes. Elle fait référence à des modifications ou des augmentations permanentes, notamment du réflexe vestibulo-oculaire et vestibulo-spinal (Solis, 2023).

La substitution se traduit par la sollicitation de systèmes tels que le système visuel et/ou somesthésique pour remplacer la fonction vestibulaire déficitaire (Lacour et al., 2016). Elle implique une repondération sensorielle des afférences non vestibulaires (Solis, 2023).

La stratégie d'habituation est un processus central d'apprentissage qui utilise la réduction des symptômes et des réponses par répétition du stimuli déclencheur (Solis, 2023).

#### 2.3.4. Les moyens

- Les exercices

En kinésithérapie vestibulaire, les différents exercices sont décrits selon leur finalité plutôt qu'en décrivant les stratégies mises en jeu (Solis, 2023). Nous retrouvons 3 grandes catégories d'exercices de rééducation vestibulaire pouvant possiblement solliciter plusieurs mécanismes (adaptation, substitution et habituation) simultanément. Il y a les exercices de :

- Stabilisation du regard entraînant une adaptation ou une substitution du RVO et permet d'obtenir une meilleure coordination œil-tête (Whitney et al., 2016) ;
- Habituation, qui sont davantage utilisés lors d'atteinte chronique (Whitney et al., 2016) ;
- D'équilibre utilisant en permanence la fonction vestibulaire afin de solliciter les différents ajustements posturaux pour permettre le maintien de l'équilibre (Blin, 2023).

Ces exercices de rééducation sont réalisés de manière active le plus souvent, mais peuvent être accompagnés de certains outils.

- Les outils

Les différents outils de la rééducation vestibulaire sont nombreux et sont basés sur les stratégies décrites précédemment.

Les moyens techniques vont du matériel simple comme les surfaces en mousse ou le trampoline au plus spécifique comme le fauteuil rotatoire, les générateurs optocinétiques, la réalité virtuelle (Huy & Charfi, 2008).

### 2.3.5. Rééducation des troubles de l'équilibre statique et dynamique

Une méta-analyse datant de 2015 a permis de démontrer l'efficacité de la rééducation vestibulaire sur les troubles de l'équilibre statique ainsi que dynamique notamment lors de la marche (McDonnell & Hillier, 2015). Les exercices de rééducation de l'équilibre se réalisent en statique ou en dynamique et font appel à différents ajustements posturaux (Blin, 2023). Le choix des exercices reposera sur un bilan inventariant les déficits analytiques et fonctionnels afin de fixer les objectifs (SFORL, 2023). Ces exercices se réalisent en progression avec des déstabilisations fluctuantes mettant en difficultés les patients (surface instable, vision asservie, données visuelles absentes, modification du polygone de sustentation, mouvements de tête, des yeux, du corps, double tâche motrice ou cognitive ...) (Klatt et al., 2016).

La prévalence croissante de la technologie offre des possibilités d'amélioration de la rééducation, en termes de récupération des performances, mais aussi d'adhésion et d'observance du patient. La rééducation vestibulaire, malgré son efficacité, peut paraître fastidieuse pour les patients rendant difficile la poursuite de la prise en soin. De ce fait, leur motivation est primordiale pour obtenir de bons résultats en termes de récupération. Ainsi, la réalité virtuelle peut être une solution pour pallier à ce manque de motivation et rendre le patient plus actif (Matsumura & Murofushi, 2021). Son utilisation pourrait potentiellement accroître l'efficacité du traitement de rééducation vestibulaire tout en permettant une meilleure adhésion et observance du patient.

## 2.4. Réalité virtuelle

La réalité virtuelle émerge progressivement dans le domaine de la kinésithérapie notamment en kinésithérapie vestibulaire, où elle présente 2 avantages principaux (Lopez, 2018) :

- L'exposition des patients à des situations complexes qui déclenchent chez eux des vertiges et instabilités, et ;
- Un environnement stimulant et ludique permettant de motiver le patient dans sa rééducation pour le rendre davantage actif et acteur.

### 2.4.1. Définition

La réalité virtuelle est une technologie de simulation informatique d'environnements réels (Piette & Pasquier, 2012). D'après le Ministère de la Culture et le site Légifrance, la réalité virtuelle est un « *environnement créé à l'aide d'un ordinateur et donnant la sensation d'être*

*immergé dans un univers artificiel* » (Amber et al., 2021). Elle constitue une interface entre les humains et les ordinateurs incluant la stimulation, mais aussi l'interaction en temps réel par l'intermédiaire de divers canaux sensoriels (Song, 2019). La réalité virtuelle reproduit les stimulations sensorielles d'un environnement. Ainsi, plus il y a de stimulations plus l'environnement est immersif (Piette & Pasquier, 2012).

#### 2.4.2. Stades d'immersion et dispositifs de réalité virtuelle

La réalité virtuelle existe sous différentes formes en fonction du degré d'immersion et de la conscience de l'utilisateur de l'environnement réel qui l'entoure. Plus la réalité virtuelle est immersive, plus la couverture sensorielle de l'utilisateur est importante (Piette & Pasquier, 2012).

Tout d'abord, il y a la réalité virtuelle non-immersive qui représente le plus bas degré d'immersion. Nous la retrouvons dans la visualisation d'écrans haute résolution, où seule une partie des sens de l'utilisateur est stimulée. L'utilisateur est conscient de son environnement réel qui l'entoure. Les jeux vidéo sont un exemple de réalité virtuelle non-immersive.

Ensuite, il y a la réalité virtuelle semi-immersive, qui correspond à l'immersion partielle dans un environnement virtuel comme dans les simulateurs de vol ou de conduite.

Et enfin, la réalité virtuelle immersive (RVI) représentant le stade le plus immersif. Elle est composée de dispositifs d'immersion, d'interaction et d'interfaces informatiques pour le traitement des informations. Nous la retrouvons dans les casques d'immersion ou visiocasque, HMD (head mounted display) en anglais, ainsi que dans les systèmes CAVE (cave automatic virtual environment). Ce type de réalité virtuelle provoque une rupture avec la réalité physique, offrant une véritable immersion sensorielle, avec un sentiment de présence dans l'environnement virtuel avec lequel le participant peut interagir. Dans le domaine de la kinésithérapie vestibulaire, ce dispositif permet de simuler des situations de déséquilibre pouvant être gênantes pour le patient et de reproduire ses symptômes. La réalité virtuelle immersive induit 3 types d'illusion : une illusion de propriété corporelle, de place et d'évènements (Slater, 2018). Étant donné que ce type de réalité virtuelle offre la meilleure immersion (Brahnam & Jain, 2011), nous allons nous intéresser à celle-ci dans ce mémoire. Plusieurs logiciels de réalité virtuelle fournissent des programmes vestibulaires. Il existe des programmes représentant des activités de la vie quotidienne avec des stimulations assez réalistes comme la foule sur le quai du métro, les rayons d'un supermarché, les escalators... Les logiciels offrent un côté ludique avec des jeux de cible permettant des mouvements de tête dans toutes les amplitudes. Il est possible aussi de faire des séances d'optocinétique à travers le casque de réalité virtuelle avec plusieurs environnements possibles (ciel avec

étoiles...). Les piliers de la réalité virtuelle sont l'immersion, l'interaction et le concept de présence.

### 2.4.3. Lien réalité virtuelle et système nerveux central

La connexion neuroanatomique entre la rétine et le cortex vestibulaire soutient l'utilisation de la réalité virtuelle en rééducation vestibulaire (Matsumura & Murofushi, 2021). En effet, les informations produites par l'entrée visuelle sur la rétine sont diffusées aux régions cérébrales vestibulaires pouvant impacter l'activité neuronale dans le système vestibulaire, créant une modulation vestibulaire (Ashiri et al., 2020). Cette modulation vestibulaire, provoquée par les informations visuelles, s'appuie sur l'idée que les régions cérébrales vestibulaires sont multisensorielles et réagissent à la fois aux stimuli visuels et physiques.

De plus, la vection est une notion importante permettant de comprendre le mécanisme de la réalité virtuelle (Matsumura & Murofushi, 2021). Elle se définit comme une sensation illusoire d'automouvements en l'absence de tout mouvement de la tête ou du corps, ressentie dans un monde réel ou virtuel (Palmisano et al., 2015). Les sens mis en jeu dans la perception de cette sensation sont la vision et l'équilibre (Ashiri et al., 2021).

### 2.4.4. La réalité virtuelle en kinésithérapie

La réalité virtuelle a montré son efficacité dans le domaine de la kinésithérapie, notamment dans la gestion de la douleur chez les patients atteints de lombalgie chronique et fibromyalgie (Trost et al., 2021), dans la rééducation motrice chez le patient parkinsonien ou hémiparétique (Tierl et al., 2018). Cet outil de rééducation permet aussi de favoriser la récupération des patients atteints de troubles musculosquelettiques chroniques que ce soit dans la mobilité articulaire comme dans les fonctions motrices (Lin et al., 2019).

Outre son efficacité en rééducation kinésithérapique, la réalité virtuelle permet aussi l'évaluation des patients de manière précise et fiable (Piette & Pasquier, 2012).

### 2.4.5. La réalité virtuelle en kinésithérapie vestibulaire

La réalité virtuelle, dans la rééducation vestibulaire, a été utilisée pour la première fois dans les années 1990 par Viire et Kramer (Kramer et al., 1998; Viire, 1996). Une étude a permis de montrer l'efficacité de la réalité virtuelle immersive dans le gain du RVO ainsi que dans la diminution des étourdissements en induisant une adaptation (Viire & Sitarz, 2002).

Lors du port du casque de réalité virtuelle, les messages nerveux générés par l'entrée

visuelle sur la rétine sont transmis aux régions vestibulaires du cortex cérébral et peuvent moduler l'activité neuronale du système vestibulaire (Ashiri et al., 2020).

Les exercices de rééducation basés sur la réalité virtuelle permettent une amélioration du contrôle de l'équilibre chez les patients présentant un dysfonctionnement vestibulaire (Yeh et al., 2014).

Comme évoqué précédemment, cet outil de rééducation permet une immersion dans un environnement proche du réel tout en imitant des situations de déséquilibre dans un but de reproduire les sensations gênantes permettant la rééducation des troubles de l'équilibre.

Il est pertinent et nécessaire d'étudier l'efficacité de la réalité virtuelle dans la rééducation vestibulaire afin « *d'éviter les effets de mode et de ruée idiote sur tout ce qui relève des nouvelles technologies* » (Lacour, 2022). Les traitements de rééducation basés sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans les troubles vestibulaires périphériques ont un potentiel prometteur. Néanmoins, d'après une méta-analyse de 2015, il est nécessaire de déterminer si la rééducation utilisant la réalité virtuelle doit être intégrée à un programme de rééducation vestibulaire classique (Bergeron et al., 2015).

### 3. Problématique

Tout au long de la vie, certaines situations ou pathologies peuvent entraîner des troubles de l'équilibre. Leur prévalence est estimée entre 17% et 30% (Murdin & Schilder, 2015). Les troubles de l'équilibre d'origine vestibulaire affecteraient chaque année 5% de la population (Neuhauser et al., 2005).

Ces troubles sont fréquents et d'origines multiples (Bouccara et al., 2018). Dans 50% des cas, ils sont causés par des atteintes vestibulaires périphériques et sont très invalidants pour les personnes atteintes (Brandt & Dieterich, 2017). Ils ont un impact significatif et considérable sur la qualité de vie notamment sur la capacité à réaliser des activités de la vie quotidienne, à travailler (Yardley, Owen, et al., 1998) ainsi que sur l'autonomie (Murdin & Schilder, 2015). De plus, ces troubles de l'équilibre constituent un facteur de risque de chutes majeur (Agrawal et al., 2009). Ils engendrent des conséquences socio-économiques importantes du fait des consultations médicales multiples, de l'interruption des activités quotidiennes et professionnelles des patients (Neuhauser et al., 2005). Aux États-Unis, les troubles de l'équilibre entraînent chaque année plus de 2 millions de visites aux urgences (Newman-Toker et al., 2008). Les coûts associés à ces visites sont estimés à plus de 4 milliards de dollars par an (Hülse et al., 2019).

Ainsi, l'importance de traiter les conséquences de ces dysfonctions vestibulaires est majeure : d'un côté pour le patient, afin d'améliorer sa qualité de vie, et de l'autre, pour limiter

les dépenses liées au coût de la santé. Pour cela, les patients ont recours à la rééducation vestibulaire réalisée par un masseur-kinésithérapeute spécialisé (Tran Ba Huy et al., 2006).

Selon la littérature scientifique, la rééducation vestibulaire présente un haut niveau de preuve (Solis, 2023). Elle affirme que cette rééducation constitue une thérapie sûre et efficace dans la prise en charge des patients vestibulaires (Hall et al., 2022). Plusieurs études ont permis de démontrer l'efficacité de la rééducation vestibulaire dans les atteintes vestibulaires (McDonnell & Hillier, 2015) (Hall et al., 2022) (Regrain et al., 2013) (SFORL, 2023). Cette rééducation permet d'améliorer la performance à la marche, l'équilibre et par conséquent les activités de la vie quotidienne chez les personnes souffrant de troubles vestibulaires périphériques (McDonnell & Hillier, 2015). Elle apporte des bénéfices à long terme sur les symptômes vestibulaires (Dunlap et al., 2019).

À mesure que la technologie progresse, la réalité virtuelle est une nouvelle piste de rééducation.

La réalité virtuelle étant un secteur en plein essor, son utilisation dans le domaine thérapeutique de la santé a été démontrée, notamment dans la réduction de la douleur, physique ou psychique (Villemin et al., 2021), du stress et de l'anxiété (Korba Alakhras & Abi Nader, 2023). Elle est utilisée depuis une vingtaine d'années en rééducation kinésithérapique en ayant pour objectif l'amélioration des performances (Rose et al., 2018). Cette technique de rééducation propose aux patients une approche immersive, davantage ludique et divertissante (Rose et al., 2018). Depuis quelques années, plusieurs méta-analyses sont publiées avec pour objectif d'évaluer l'effet de la réalité virtuelle dans la rééducation vestibulaire (Xie et al., 2021). Les études examinaient l'efficacité de programmes d'intervention de réalité virtuelle en tant que méthode de rééducation vestibulaire, peu importe le niveau d'immersion, sur les symptômes de vertiges, les troubles de l'équilibre, le nystagmus et la qualité de vie (Hazzaa et al., 2023). Elles ont pu confirmer que l'utilisation de la réalité virtuelle dans un contexte de troubles vestibulaires pouvait être une approche utile (Bergeron et al., 2015). Comme vu précédemment, les études ne différenciaient pas les niveaux d'immersion dans le cadre de la rééducation. Cependant, selon (Rose et al., 2018), l'augmentation de l'immersion permet d'améliorer la performance de la tâche ainsi que l'instabilité posturale. Par conséquent, après avoir réalisé un état des lieux sur la réalité virtuelle dans le cadre de la rééducation vestibulaire des troubles de l'équilibre, nous nous sommes demandé si la rééducation vestibulaire combinée à la réalité virtuelle immersive pouvait être plus efficace que la rééducation vestibulaire seule.

## 4. Question de recherche

Au regard de la démarche présentée, la question de recherche proposée est : existe-t-il

une efficacité supérieure de l'utilisation de la réalité virtuelle combinée à la rééducation vestibulaire classique en comparaison à la rééducation vestibulaire seule, dans la rééducation des troubles de l'équilibre chez des patients atteints d'un syndrome vestibulaire périphérique ?

L'hypothèse est que l'utilisation de la réalité virtuelle immersive combinée à la rééducation vestibulaire classique permet de réduire plus efficacement les troubles de l'équilibre que la rééducation vestibulaire classique, chez des patients atteints d'un syndrome vestibulaire périphérique.

## 5. Méthodes

Pour répondre à notre question de recherche, nous avons réalisé une revue de la littérature afin d'interroger l'ensemble de la littérature scientifique. Pour rédiger cette revue, la méthodologie utilisée suivait les lignes directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses guidelines) traduites en français (Gedda, 2015) (Annexe I). Cette méthode a permis de recueillir un ensemble de données scientifiques portant sur un sujet prédéfini afin de les analyser et de présenter l'évolution scientifique en lien avec ce sujet.

### 5.1. Stratégies de recherche

#### 5.1.1. Bases de données

Les quatre bases de données scientifiques interrogées pour sélectionner les études, sur une période allant de mars à septembre 2023, étaient :

- PubMed : principale base de références d'articles dans les domaines des sciences biomédicales et de la santé, dont la kinésithérapie ;
- Google Scholar : base de données d'articles scientifiques, de thèses, de citations et de livres scientifiques ;
- Embase : base de données documentaire internationale en sciences médicales et biomédicales ;
- Cochrane : base de données spécialisée dans la médecine factuelle (evidence-based medicine).

Ces 4 bases de données ont été les seules sources d'informations de recherche.

#### 5.1.2. Mots-clés et équation de recherche

Pour obtenir des résultats concluants sur notre questionnement, nous avons déterminé

des mots-clés présentés dans le Tableau I ci-dessous (*Tableau I*). Ils ont d'abord été formulés en français puis ont été traduits en anglais par le biais de l'outil HeTop.

Nous avons choisi des synonymes pour les mots-clés suivants : réalité virtuelle immersive, syndrome vestibulaire périphérique et équilibre. Ces synonymes se traduisent par l'utilisation des OR dans notre équation de recherche.

Tableau I : Mots-clés

Mots-clés principaux	Mots-clés français	Mots-clés anglais
Réalité virtuelle immersive	Réalité virtuelle, Réalité virtuelle immersive, Visiocasque	virtual reality, VR, virtual reality immersive, head-mounted display, HMD cave automatic virtual environment, CAVE
Syndrome vestibulaire périphérique	Syndrome vestibulaire périphérique, atteinte vestibulaire périphérique	peripheral vestibular syndrome, peripheral vestibular syndrome, vestibular disorders
	Rééducation vestibulaire	Vestibular rehabilitation
Équilibre	Équilibre, Équilibre statique, Équilibre dynamique, Troubles de l'équilibre	Balance, Static balance, Dynamic balance, Imbalance

Après élaboration de ces mots-clés, nous avons défini une équation de recherche présentée ci-dessous et dans la partie annexe (Annexe II):

(VR OR virtual reality OR virtual reality immersive OR head-mounted display OR HMD OR CAVE) AND (peripheral vestibular syndrome OR vestibular OR peripheral vestibular OR vestibular syndrome OR peripheral vestibular dysfunction) AND (static balance or dynamic balance or imbalance)

### 5.1.3. Critères d'éligibilité

La sélection des articles a été effectuée selon des critères de sélection établis au préalable et qui sont les suivants :

- Article en anglais ou en français ;
- Essai contrôlé randomisé (ECR), ce type d'essai est adapté pour évaluer l'efficacité d'un traitement, comme énoncé dans cette revue. D'après les recommandations de bonnes pratiques de l'HAS, les essais contrôlés randomisés présentent un haut niveau de preuve scientifique de niveau 1 ou 2 ainsi qu'un grade A ou B de recommandations représentant respectivement une preuve scientifique établie ou une présomption scientifique (HAS,

2013) (Annexe III);

- Année de publication à partir de 2013.

La période de sélection des articles ( $\geq 2013$ ) a été déterminée ainsi, car, étant donné que la réalité virtuelle est une nouvelle technologie en pleine croissance, peu d'études s'intéressaient à son efficacité il y a une dizaine d'années. 2013 est une année charnière en termes d'études scientifiques sur la réalité virtuelle en kinésithérapie. En 2013, un article scientifique a été publié justifiant des effets positifs de la réalité virtuelle en rééducation et thérapie (Matijević et al., 2013). Une méta-analyse de 2013 (débutée en 2013, publiée en 2014) s'est intéressée à l'efficacité de la réalité virtuelle dans l'amélioration de l'équilibre chez des patients instables (Booth et al., 2014). Ainsi, depuis 2013 davantage de chercheurs s'intéressent à l'efficacité de la réalité virtuelle dans les différents domaines de la santé, dont la kinésithérapie vestibulaire.

Pour répondre de manière pertinente à notre problématique, des critères d'inclusion ont été mis en place afin de retenir les articles en lien avec cette dernière. Pour être inclus, les articles devaient respecter les critères PICO ainsi que les critères de sélection. Ils devaient y avoir une pertinence avec notre problématique notamment sur l'évaluation de l'équilibre statique et dynamique après un traitement basé sur la réalité virtuelle associée à la rééducation vestibulaire classique.

L'acronyme PICO a été utilisé pour déterminer et formuler précisément ma question de recherche. Ce modèle m'a permis également de définir mon cadre et de sélectionner les articles scientifiques. Le détail des critères PICO est présenté dans le Tableau II ci-dessous (*Tableau II*).

Tableau II : PICO

Population (P)	Hommes et/ou femmes Adultes >18 ans Ayant des troubles de l'équilibre dans le cadre d'une atteinte vestibulaire périphérique
Intervention (I)	Réalité virtuelle immersive et rééducation vestibulaire classique
Comparaison (C)	Rééducation vestibulaire classique
Outcomes (O)	Critère de jugement principal : Équilibre statique évalué par posturographie statique en post-intervention et/ou en follow-up (à long terme) ; Critère de jugement secondaire : Équilibre dynamique à la marche par le DGI (Annexe IV) en post-intervention et/ou en follow-up (à long terme).

La rééducation vestibulaire classique comprend les exercices basés sur les 3 principes décrits ci-dessus (cf chapitre 2.3.3) : adaptation, substitution et habitude. Cette pratique est basée sur les recommandations de 2022 et 2023 (Hall et al., 2022; SFORL, 2023).

La mise en place de critères de non-inclusion et d'exclusion a permis d'éliminer les articles ne faisant pas partie du sujet de recherche. Après lecture du titre et du résumé, les articles n'ont pas été inclus s'ils ne respectaient pas les critères PICO, si la date de publication était antérieure à 2013, si l'article n'était ni en français ni en anglais et enfin si le design de l'étude était différent d'un ECR. Puis, lorsque le texte intégral de l'article n'était pas accessible alors celui-ci était exclu.

#### 5.1.4. Stratégies de sélection des articles

La stratégie de sélection a été effectuée par une unique personne (Léa Vilet LV) à l'aide de la méthode PRISMA (Mateo, 2020).

La première étape de cette sélection a été d'interroger les bases de données scientifiques avec l'équation de recherche décrite ci-dessus (cf chapitre 5.1.2). Puis, afin de permettre de mener à bien cette sélection d'articles, l'utilisation du logiciel Zotero a été nécessaire afin d'importer les articles puis de les trier. Enfin, le processus de sélection a été effectué en plusieurs étapes : triage, éligibilité et inclusion dans notre revue de la littérature. Dans un premier temps, a eu lieu l'élimination des doublons. Ensuite, la seconde étape concernait l'identification des articles éligibles après lecture du titre, de la date et du résumé. Pour finir, la dernière étape portait sur l'éligibilité des articles après lecture intégrale de celui-ci et en prenant en compte les critères fixés ci-dessus. Par la suite, nous sommes parvenus à obtenir notre sélection finale d'études pour une synthèse qualitative.

Pour faciliter la transcription de sélection des articles, nous avons utilisé le diagramme de flux PRISMA 2020 (Annexe V).

## 5.2. Analyse des articles

### 5.2.1. Extraction des données

L'extraction des données a été réalisée de manière libre et indépendante. L'objectif de cette étape était de relever les caractéristiques générales des études pour répondre de manière pertinente à la recherche. Afin de permettre une extraction optimale, nous avons réalisé une fiche de lecture, résumée dans un tableau, pour chacun des articles retenus. Cette fiche nous a permis de recueillir les informations essentielles en lien avec l'article telles que le titre, les auteurs et la date, le lieu de publication, ainsi que le design et l'objectif de l'étude.

Concernant la population de chaque étude, nous avons recensé la taille de l'échantillon, le genre et l'âge moyen des participants. La taille de l'échantillon a été reportée sous forme d'une variable quantitative. Le genre des participants a été reporté sous forme de variables

catégorielles (H/F). L'âge étant une variable quantitative, nous l'avons reporté sous forme de moyenne et d'écart-type.

Nous avons ensuite relevé les différentes pathologies vestibulaires de chaque participant.

Puis, les critères d'inclusion et d'exclusion de la population de chaque étude ont été recueillis.

Concernant l'intervention de chaque étude, nous avons recueilli la taille de l'échantillon répartie dans chaque groupe (contrôle et expérimental), l'outil de réalité virtuelle utilisé, la durée du protocole de rééducation basé sur la réalité virtuelle ainsi que sa fréquence, la durée des sessions et son contenu.

Puis, nous avons fait de même avec le groupe contrôle, en relevant le contenu des séances de rééducation vestibulaire avec le programme d'exercices ainsi que sa durée, sa fréquence et la durée des sessions.

Ensuite, nous avons listé les critères de jugement des études en lien avec ceux déterminés pour notre revue, l'outil d'évaluation et les paramètres mesurés, ainsi que leur période d'évaluation (à court ou à long terme).

Pour terminer, nous avons décrit les résultats de chaque étude ainsi que le risque de biais en lien avec le score PEDro.

### 5.2.2. Analyse des données

Après lecture des articles, les données ont été analysées et synthétisées par une seule et même personne, dans des tableaux récapitulatifs et sous forme d'un texte narratif. Les tableaux sont présentés dans la partie des résultats de cette revue de littérature. En corrélation avec les critères de jugements recueillis dans les articles, nous avons réalisé une analyse descriptive des résultats en hiérarchisant les informations, de la plus importante à la moins importante. Nous avons ensuite reporté sous forme de graphiques et de tableaux les effets sur les critères de jugements afin de faciliter leur compréhension.

### 5.2.3. Évaluation méthodologique des articles retenus

Afin d'étudier la qualité méthodologique de ces différentes études sélectionnées, nous avons utilisé l'échelle PEDro contenant 11 items (Maher et al., 2003). Cette échelle est validée pour l'étude de la qualité des essais contrôlés randomisés (de Morton, 2009). Ces 11 critères d'évaluation permettaient de relever l'existence de potentiels biais dans l'étude (biais de sélection, biais d'attrition, biais de mesure, biais de performance...). Cette échelle a permis d'évaluer la validité de l'étude avec 8 critères destinés à la validité interne (critères 2 à 9) et 2 critères (critères 10 à 11) pour l'interprétation des résultats. Le premier critère était relatif à la

validité externe, c'est-à-dire l'applicabilité de l'étude, mais n'était pas comptabilisé dans le score PEDro. Ainsi, les études ont été notées sur 10. Pour chaque critère, nous avons attribué des points uniquement s'il était clairement respecté. Si, ce critère n'était pas explicitement rédigé lors de la lecture de l'étude, alors le point n'était pas attribué. Le détail du score PEDro est à retrouver en annexe (Annexe VI).

Un résultat de score inférieur à 6 était considéré comme faible (4) à moyen (5). Si le score total se situait entre 6 et 8, alors celui-ci était caractérisé comme bon. Et enfin, un score entre 9 et 10 était qualifié d'excellent. (Cashin & McAuley, 2020).

## 6. Résultats

### 6.1. Sélection des études

La recherche dans les bases de données (PubMed, Google Scholar, Embase, Cochrane) a permis d'identifier 623 articles. À la suite de la suppression des doublons, 428 articles ont été examinés. Après une sélection initiale des titres, dates et résumés, 407 articles ont été exclus. Les raisons pour lesquelles ces articles ont été exclus sont résumées dans la figure ci-dessous et comprennent principalement la langue de l'article, le type de population (< 18 ans), l'étiologie des troubles de l'équilibre (neurologique ou vestibulaire centrale) ainsi qu'une absence de lien avec la problématique (*Figure 14*). Les 21 articles restants ont été évalués dans leur intégralité et 3 articles ont finalement été inclus, répondant aux critères d'éligibilité. Sur les 18 articles exclus, 4 articles n'utilisaient pas la réalité virtuelle immersive (Nintendo Wii Fit Plus), 10 articles ne comparaient pas la réalité virtuelle et la rééducation vestibulaire kinésithérapique à de la rééducation vestibulaire kinésithérapique seule, 2 articles évaluaient de manière subjective l'équilibre et enfin 2 articles ne précisaient pas l'étiologie des troubles de l'équilibre.

Au total, cette démarche de sélection nous a permis d'inclure 3 études contrôlées randomisées correspondant à tous les critères PICO. Ci-dessous, la figure 14 retrace l'ensemble du processus de sélection (*Figure 14*).

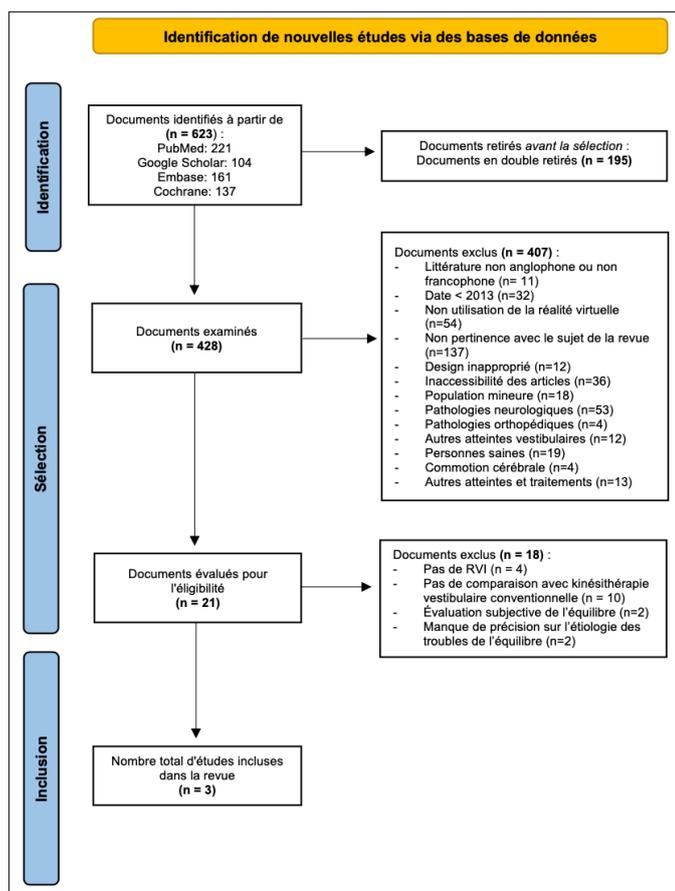


Figure 14 : Diagramme de flux de sélection des articles

Les 3 études sélectionnées sont présentées dans le Tableau III ci-dessous (*Tableau III*).

Tableau III : Présentation des études

Titre	Auteurs et date	Journal de publication	DOI
Three-dimensional head-mounted gaming task procedure maximizes effects of vestibular rehabilitation in unilateral vestibular hypofunction: a randomized controlled pilot trial	(Micarelli et al., 2017)	International Journal of Rehabilitation Research	<a href="https://doi.org/10.1097/MRR.000000000000244">https://doi.org/10.1097/MRR.000000000000244</a>
Vestibular rehabilitation in older adults with and without mild cognitive impairment: Effects of virtual reality using a head-mounted display	(Micarelli et al., 2019)	Archives of Gerontology and Geriatrics	<a href="https://doi.org/10.1016/j.archger.2019.05.008">https://doi.org/10.1016/j.archger.2019.05.008</a>
Long-term effects of vestibular rehabilitation and head-mounted gaming task procedure in unilateral vestibular hypofunction: a 12-month follow-up of a randomized controlled trial	(Viziano et al., 2019)	Clinical Rehabilitation	<a href="https://doi.org/10.1177/0269215518788598">https://doi.org/10.1177/0269215518788598</a>

Abréviations : DOI, Digital Object Identifier

## 6.2. Caractéristiques des études sélectionnées

Les trois études sélectionnées pour cette revue sont des essais contrôlés randomisés et ont été publiées en anglais entre 2013 et 2023. Elles ont toutes été réalisées en Italie. Ces trois études souhaitent étudier l'efficacité d'un programme, combinant la réalité virtuelle immersive et la rééducation vestibulaire classique, chez des patients atteints d'hypofonction vestibulaire unilatérale, par rapport à l'utilisation de la rééducation vestibulaire seule.

Tableau IV : Objectif et design des études

Études	Lieu	Design	Objectif
(Micarelli et al., 2017)	Italie	Étude pilote contrôlée randomisée	Découvrir les éventuelles améliorations possibles chez les patients souffrant d'hypofonction vestibulaire unilatérale dans le cadre d'un protocole combinant la réalité virtuelle immersive et la rééducation vestibulaire classique par rapport à un groupe ne suivant que la rééducation vestibulaire.
(Micarelli et al., 2019)	Italie	Étude contrôlée randomisée	Étudier l'efficacité d'un casque de réalité virtuelle immersive chez les personnes âgées et chez des patients atteints de troubles cognitifs légers (DCL) souffrant d'une hypofonction vestibulaire unilatérale.
(Viziano et al., 2019)	Italie	Étude contrôlée randomisée	Étudier les effets à long terme de l'ajout d'exercices à domicile de réalité virtuelle à la rééducation vestibulaire classique chez des patients souffrant d'hypofonction vestibulaire unilatérale.

Abréviations : DCL, déclin cognitif léger

### 6.2.1. Population étudiée

Au total, les trois études comportent 141 patients atteints d'hypofonction vestibulaire unilatérale. La taille de l'échantillon de patients pour chaque étude est de 47 participants.

Dans l'étude de (Micarelli et al., 2017) et (Viziano et al., 2019), il y a 27 hommes et 20 femmes, ainsi que 21 hommes et 26 femmes dans l'étude de (Micarelli et al., 2019). Il y a en moyenne 25 hommes pour 22 femmes.

À travers ces 3 études, la moyenne d'âge pour cette revue est de 58 ans. La moyenne d'âge des patients de l'étude de (Micarelli et al., 2019) est de 75 ans, tandis que celle des études de (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019) est de 50 ans.

Les pathologies retrouvées à travers ces 3 études sont au nombre de 5 et sont identiques entre chaque étude avec une fréquence particulièrement élevée pour la névrite vestibulaire, qui représente plus de 50% de la population de chaque étude. Au total, 83 patients sont atteints d'une névrite vestibulaire représentant alors 58,8% de l'effectif total, 24 sont atteints d'un neurinome de l'acoustique soit 17%, 17 ayant des antécédents de chirurgie de l'os pétreux (12%) et 9 de chirurgie de la cochlée (6%). 8 patients sont atteints du syndrome de Ramsay-Hunt, cette pathologie représente 5% de l'échantillon total et est la moins fréquente dans

chaque étude. Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), 24 patients sont atteints d'un hypofonctionnement vestibulaire unilatéral associé à un déclin cognitif léger.

Les caractéristiques de la population sont résumées dans le Tableau V ci-dessous (Tableau V).

Tableau V : Caractéristiques générales des études

Études	Taille de l'échantillon (n=)	Genre (H/F)	Âge (années)	Atteintes vestibulaires (N/%)
(Micarelli et al., 2017)06/05/2024 21:07:00	47	27/20	50±9,7	Hypofonctionnement vestibulaire unilatéral droit (47) : - Névrite vestibulaire (27/57) - Neurinome de l'acoustique (9/19) - Ancienne chirurgie de l'os pétreux (5/10) - Ancienne chirurgie de la cochlée (3/6) - Syndrome de Ramsay-Hunt (3/6)
(Micarelli et al., 2019)	47	21/26	75±4,6	Hypofonctionnement vestibulaire unilatéral (47) : - Névrite vestibulaire (29/61) - Neurinome de l'acoustique (6/12) - Antécédents de chirurgie de l'os pétreux (7/14) - Antécédents de chirurgie de la cochlée (3/6) - Syndrome de Ramsay-Hunt (2/4)
(Viziano et al., 2019)	47	27/20	50±9,7	Hypofonctionnement vestibulaire unilatéral droit (47) : - Névrite vestibulaire (27/57) - Neurinome de l'acoustique (9/19) - Ancienne chirurgie de l'os pétreux (5/10) - Ancienne chirurgie de la cochlée (3/6) - Syndrome de Ramsay-Hunt (3/6)

### 6.2.2. Critères d'éligibilité des participants

Les trois études possèdent des critères d'inclusion équivalents avec principalement une atteinte vestibulaire unilatérale accompagnée d'une réduction, d'au moins 25% selon la formule de Jongkees, de la réponse vestibulaire aux irrigations caloriques à l'eau bithermique, au moins 3 mois après l'apparition des symptômes. Le gain du RVO doit être inférieur à 0,83 pour le côté droit et inférieur à 0,84 à gauche pour participer à l'étude de (Micarelli et al., 2019). Ce seuil de référence du RVO a été calculé lors d'une évaluation au video Head Impulse Test. Si ce gain est supérieur à 0,83, dans l'étude de (Micarelli et al., 2017), alors le patient est exclu. L'étude de (Micarelli et al., 2019) comprend 24 patients atteints d'un hypofonctionnement vestibulaire unilatéral associé à un déclin cognitif léger (DCL). Pour être inclus dans l'étude, les patients DCL doivent avoir 55 ans ou plus, avec un diagnostic de déclin cognitif léger associé à un score MMSE  $\geq 11$ , une maîtrise de l'italien ainsi que d'avoir la capacité de donner leur consentement éclairé ou qu'un de ses représentants puissent le donner (Tableau VI).

Les personnes étant en incapacité de comprendre les consignes du protocole ou atteintes de troubles réduisant leur capacité de participer au protocole (troubles neurologiques, orthopédiques ou déficience physique générale) sont exclues de l'étude de (Micarelli et al.,

2019). Les patients ayant des antécédents diabétiques sont exclus des études de (Micarelli et al., 2017) et (Viziano et al., 2019). Les critères d'exclusion détaillés de l'étude de (Viziano et al., 2019) sont à retrouver dans la partie annexe (Annexe VII).

Tableau VI : Critères d'éligibilité des études

Études	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
(Micarelli et al., 2017)	HVU chronique : réduction de la réponse vestibulaire aux irrigations caloriques à l'eau bithermique d'au moins 25 % d'un côté, calculée au moyen de la formule de Jongkees, au minimum 3 mois après l'apparition des symptômes	Antécédents diabétiques, prise d'anti-dépresseurs, gain du RVO supérieur à la plage de référence calculée lors d'une vHIT (0,83).
(Micarelli et al., 2019)	<p>HVU chronique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Une réduction d'au moins 25 % de la réponse vestibulaire à l'irrigation calorique à l'eau bithermique d'un côté, calculée à l'aide de la formule de Jongkees, au moins 3 mois après le début des symptômes</li> <li>- Gain de RVO &lt; 0,83 pour le côté droit et &lt; 0,84 pour le côté gauche</li> </ul> <p>Pour les patients DCL (n=24) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Âge ≥ 55 ans</li> <li>- Diagnostic de déclin cognitif léger <ul style="list-style-type: none"> <li>- MMSE ≥ 11</li> <li>- Maîtrise de l'italien</li> </ul> </li> <li>- Capacité à obtenir le consentement éclairé du patient ou de ses représentants légalement autorisés</li> </ul>	Incapacité à comprendre les procédures du protocole, troubles neurologiques, orthopédiques, ou déficience physique générale réduisant leur capacité d'exécuter correctement le protocole.
(Viziano et al., 2019)	HVU chronique : réduction d'au moins 25% de la réponse vestibulaire d'un côté, calculée au moyen de la formule de Jongkees, aux irrigations caloriques à l'eau bithermique	Diabète, cancer, troubles neurologiques, psychiatriques, respiratoires, traitement affectant les voies auditives ou visuo-vestibulaires

Abréviations : DCL, déclin cognitif léger ; HVU, hypofonction vestibulaire unilatérale ; MMSE, Mini-Mental State Examination ; RVO réflexe vestibulo-oculaire ; vHIT, vidéo Head Impulse Test.

### 6.2.3. Intervention et comparateur

Les patients sont répartis en 2 groupes dans chaque étude : groupe contrôle et groupe expérimental. Le groupe expérimental correspond à celui qui reçoit l'intervention en plus du comparateur et le groupe contrôle reçoit uniquement le comparateur. Au total, à travers les 3 études, il y a 72 participants dans le groupe contrôle contre 69 dans le groupe expérimental.

Au travers des trois études, les interventions sont similaires. Le programme d'intervention est décrit dans le Tableau VII ci-dessous (*Tableau VII*). Chacune d'entre elles compare un programme de rééducation vestibulaire classique associée à la réalité virtuelle immersive à un programme de rééducation vestibulaire classique chez des patients atteints

d'hypofonctionnement vestibulaire unilatéral.

Dans ces 3 études, les programmes de réalité virtuelle et de rééducation vestibulaire classique sont réalisés à domicile. Pour chacune des 3 études, le programme de réalité virtuelle immersive à domicile a nécessité l'installation d'un écran de téléphone Windows sur le casque 3D VR 'Revelation'. Au début du protocole, les participants sont spécifiquement formés sur le fonctionnement du casque ainsi que sur son ajustement. Pour réaliser les séances, le jeu Track Speed Racing 3D a été téléchargé sur le téléphone. Les séances ont une durée de 20 minutes par jour et doivent être réalisées sans interruption. Les patients doivent être assis sur une chaise ou un canapé. Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), les patients ont la possibilité d'être assisté par leurs proches pour la surveillance à domicile. Le but du jeu est de diriger une voiture, pendant une course, à l'aide d'inclinaisons de tête (droite ou gauche) en évitant les obstacles sur la route et en atteignant tous les objectifs avant de terminer le tour. Lors de l'exécution du jeu, l'arrière-plan et le scénario pouvaient se modifier en fonction des mouvements d'inclinaison de la tête. L'objectif de cet exercice est d'induire un conflit visuo-vestibulaire. L'observance et les performances des patients sont évaluées chaque semaine lors d'une visite à la clinique par 2 formateurs expérimentés.

Tableau VII : Description de l'intervention

Études	Taille de l'échantillon par groupe (n=)	Durée du programme (semaines)	Description de l'intervention : réalité virtuelle immersive		
			Fréquence du programme (fois/jour)	Durée de la session (minutes)	Contenu
(Micarelli et al., 2017)	GC = 24 GE = 23	4	1	20	Jeu Track Speed Racing 3D à réaliser sans interruption assis sur une chaise ou un canapé : inclinaisons de tête (droite ou gauche)
(Micarelli et al., 2019)	GC = 12 HVU + 12 HVU DCL GE = 11 HVU + 12 HVU DCL	4	1	20	Jeu Track Speed Racing 3D à réaliser sans interruption assis sur une chaise ou un canapé : course de voiture sans fin avec point de vue dans laquelle la voiture est dirigée par les mouvements d'inclinaison de la tête
(Viziano et al., 2019)	GC = 24 GE = 23	4	1	20	Jeu Track Speed Racing 3D à réaliser sans interruption assis sur une chaise ou un canapé : inclinaisons de tête (droite ou gauche)

Abréviations : DCL, déclin cognitif léger ; GC, groupe contrôle ; GE, groupe expérimental ; HVU, hypofonction vestibulaire unilatérale.

Avant la réalisation des séances de rééducation vestibulaire classique, les patients ont

reçu une formation portant sur les fonctions du système d'équilibre, les causes des vertiges et les raisons et contre-indications de l'exécution des exercices (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019). Les patients des groupes contrôle et expérimental reçoivent chacun une rééducation vestibulaire classique composée d'exercices à domicile à réaliser 2 fois par jour pour une durée totale de 30 à 40 minutes (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019) (*Tableau VIII*). Les auteurs des 3 études se sont inspirés de 2 anciens protocoles pour déterminer leur séance (Giray et al., 2009; Herdman et al., 2015). Les détails des exercices sont à retrouver en annexe (*Annexe VIII*). Ce programme comprend des exercices d'adaptation, de substitution, d'habituation et d'équilibre. Entre les séances à domicile, les patients de l'étude doivent se rendre 2 fois par semaine à la clinique pour des séances supervisées avec 2 kinésithérapeutes d'une durée de 30 à 45 minutes ayant pour but de surveiller leur observance et le respect des consignes (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019).

Les programmes à domicile de réalité virtuelle immersive et de rééducation vestibulaire classique ont duré 4 semaines chacun.

Les études de (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019) ne précisent pas la fréquence par semaine, du programme de séances à domicile de rééducation vestibulaire classique et de réalité virtuelle.

Tableau VIII : Description de la séance de rééducation vestibulaire classique

Études	Durée du programme (semaines)	Description de la comparaison : rééducation vestibulaire classique		
		Fréquence du programme (fois/jour à domicile) (fois/semaine à la clinique)	Durée de la session (minutes)	Contenu
(Micarelli et al., 2017)	4	2	30 à 40	Exercices à domicile d'adaptation, de substitution, d'habituation et d'équilibre
		2	30 à 45	Séances supervisées à la clinique : surveillance adhésion
(Micarelli et al., 2019)	4	2	30 à 40	Exercices à domicile d'adaptation, de substitution, d'habituation, d'équilibre et de marche
		2	30 à 45	Séances supervisées à la clinique : évaluation adhésion
(Viziano et al., 2019)	4	2	30 à 40	Exercices à domicile personnalisés et adaptés aux patients (adaptation, substitution, habituation et équilibre)
		2	30 à 45	Séances supervisées à la clinique : surveillance respect des consignes et observance

#### 6.2.4. Critères de jugements et mesures

Aucune des 3 études ne présente de critères de jugements principaux étant donné leur objectif assez large.

Les critères de jugements sont détaillés dans le Tableau IX ci-dessous et sont identiques entre les 3 études avec notamment l'équilibre statique et dynamique à la marche (*Tableau IX*).

Pour les 3 études, l'équilibre statique est évalué par posturographie statique sur une période d'enregistrement de 60 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 25 Hz. Le test se réalise les yeux ouverts et fermés. Les patients ont reçu comme instruction de maintenir une position verticale pendant les 2 tests. Les paramètres de posturographie retenus sont : la longueur de la trace et la surface de l'ellipse de confiance (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019).

L'équilibre dynamique lors de la marche est évalué par le DGI dans les 3 études. Ce test est utilisé pour évaluer les performances des patients lors de diverses activités de marche.

Les 3 études évaluent les patients 1 semaine avant la mise en place du programme. L'évaluation des participants des études de (Micarelli et al., 2017, 2019) est réalisée à court terme, soit une semaine après l'arrêt des protocoles. Quant à l'étude de (Viziano et al., 2019), elle évalue les participants 12 mois après la fin de l'intervention, à plus ou moins 10 jours.

Tableau IX : Critères de jugements et mesures

Études	Effet immédiat ou à long-terme	Paramètres mesurés
(Micarelli et al., 2017)	Évaluation 1 semaine après le programme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équilibre statique évalué par posturographie statique Période d'enregistrement de 60 secondes pour chaque test (YO/YF), fréquence d'échantillonnage de 25 Hz, tests réalisés YO et YF. Paramètres posturographiques : la longueur de la trace, la surface de l'ellipse de confiance.</li> <li>- Équilibre dynamique évalué par le DGI</li> </ul>
(Micarelli et al., 2019)	Évaluation 1 semaine après le programme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équilibre statique évalué par posturographie statique Paramètres de posturographie : fréquence d'échantillonnage de 25Hz, tests yeux ouverts et fermés à intervalle de 60 secondes. Mesures posturographiques évaluées : déplacement du CdP avec la longueur de la trace, la surface de l'ellipse.</li> <li>- Équilibre dynamique évalué par le DGI</li> </ul>
(Viziano et al., 2019)	Évaluation 12 mois après le programme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équilibre statique évalué par posturographie statique Période d'enregistrement de 60 secondes pour chaque test (YO/YF), fréquence d'échantillonnage de 25Hz, tests réalisés YO et YF. Paramètres posturographiques : déplacement du CdP avec la longueur de la trace et la surface de l'ellipse de confiance.</li> <li>- Équilibre dynamique évalué par le DGI</li> </ul>

Abréviations : CdP, Centre de Pression ; DGI, Dynamic Gait Index ; YF, yeux fermés ; YO, yeux ouverts.

### 6.2.5. Effets de l'intervention

Cette revue de littérature prend en considération les résultats concernant l'équilibre. Les trois articles inclus ont défini leur seuil significatif ( $\alpha$ ) à une valeur de  $P=0,05$ . Cela signifie que les résultats des études sont considérés statistiquement significatifs lorsque la valeur de  $P$  est inférieure ou égale à  $0,05$  ( $P \leq 0,05$ ).

Dans l'étude de (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019), les groupes sont considérés comme comparables puisqu'aucune différence significative n'a été relevée sur les paramètres posturographiques et le score DGI entre le groupe expérimental et contrôle en baseline.

Ces 3 études montrent des résultats inter-groupes statistiquement significatifs en post-intervention concernant les mesures de posturographie (longueur de la trace et surface de l'ellipse de confiance) et de performance (DGI) avec une valeur de  $P \leq 0,05$  en faveur des groupes expérimentaux par rapport aux groupes contrôles.

#### ➤ Effets sur l'équilibre statique

Pour rappel, l'équilibre statique est évalué dans les 3 études par la posturographie statique déterminant le déplacement du CoP en termes d'oscillations en surface et en longueur. Les valeurs moyennes et écart-type de ces mesures ainsi que les valeurs de  $P$ -intra et  $P$ -inter sont décrites dans le tableau X ci-dessous (*Tableau X*). Les 3 études ont appliqué la correction de Bonferroni pour tester les principaux effets significatifs post-hoc. Tout d'abord, nous avons décrit les résultats concernant la surface de l'ellipse de confiance dans les 2 conditions (yeux ouverts et fermés) puis la longueur de la trace dans les 2 conditions.

Premièrement, l'étude de (Micarelli et al., 2017), évaluant en post-intervention immédiat, ne présente aucune donnée concernant le paramètre posturographique de la surface en condition les yeux ouverts. L'étude de (Viziano et al., 2019), évaluant à 12 mois, mentionne qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative dans les analyses intra-groupes et inter-groupes pour ce paramètre posturographique en condition les yeux ouverts. Tandis que l'étude de (Micarelli et al., 2019), présente son analyse intra-groupe uniquement. Elle montre une amélioration statistiquement significative de la surface de l'ellipse de confiance les yeux ouverts avec une valeur de  $P \leq 0,05$  dans les 2 groupes d'études (expérimental et contrôle) chez les patients âgés et DCL. L'étude ne transmet pas d'informations concernant l'analyse inter-groupe de la surface de l'ellipse de confiance les yeux ouverts.

Deuxièmement, l'analyse intra-groupe de l'étude de (Micarelli et al., 2017), comparant les valeurs pré et post-intervention, montre des résultats statistiquement significatifs, en faveur d'une diminution, dans tous les groupes pour la surface en condition les yeux fermés ( $P \leq$

0,05). De plus, elle montre, en analyse inter-groupe, une réduction significative de la surface les yeux fermés pour une valeur de  $P=0,004$  dans les conditions du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. À 12 mois après l'intervention (Viziano et al., 2019), nous retrouvons une réduction significative de la surface les yeux fermés avec une valeur de  $P=0,003$  en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. Aucune différence significative n'a été constatée lors de la comparaison des valeurs obtenues à 1 semaine après l'arrêt de l'intervention et celles obtenues à 12 mois (Viziano et al., 2019). L'analyse intra-groupe de l'étude de (Micarelli et al., 2019) montre une amélioration statistiquement significative de la surface de l'ellipse de confiance les yeux fermés avec une valeur de  $P \leq 0,05$  dans les 2 groupes d'études (expérimental et contrôle). Quant à l'analyse inter-groupe, nous retrouvons une amélioration statistiquement significative dans le groupe des personnes âgées, 1 semaine après l'intervention, en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle avec une valeur de  $P=0,008$ . Cette amélioration est retrouvée aussi dans le groupe expérimental des participants DCL, dans les mêmes conditions d'évaluation, par rapport au groupe contrôle avec une valeur de  $P=0,007$ .

En troisième lieu, l'étude de (Micarelli et al., 2017) montre qu'à une semaine de l'intervention, seul le groupe expérimental possède une diminution statistiquement significatif de la longueur de la trace les yeux ouverts ( $P \leq 0,05$ ). L'analyse inter-groupe montre qu'il existe une amélioration statistiquement significative de la longueur de la trace les yeux ouverts avec une valeur de  $P$  à  $0,003$  en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. A 12 mois après l'intervention, il existe toujours une réduction significative de la longueur les yeux ouverts avec une valeur de  $P=0,002$  en faveur du groupe expérimental. Cependant, aucune différence significative entre les valeurs, pour la longueur les yeux ouverts, mesurées à une semaine et 12 mois après le traitement, n'a été constatée dans l'un ou l'autre groupe. L'analyse intra-groupe de l'étude de (Micarelli et al., 2019) montre une amélioration statistiquement significative de la surface de la longueur les yeux ouverts avec une valeur de  $P \leq 0,05$  dans les 2 groupes d'études (expérimental et contrôle) chez les PA et les DCL. L'étude ne transmet pas d'informations de l'analyse inter-groupe concernant la longueur de la trace les yeux ouverts.

Enfin, l'analyse intra-groupe de l'étude de (Micarelli et al., 2017), comparant les valeurs pré et post-intervention, montre des résultats statistiquement significatifs, en faveur d'une diminution, dans tous les groupes d'études pour la longueur les yeux fermés ( $P \leq 0,05$ ). De plus, cette étude montre qu'à une semaine de l'intervention, il existe une amélioration statistiquement significative de la longueur de la trace les yeux fermés avec une valeur de  $P=0,003$  en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. L'étude de (Viziano et al., 2019) ne présente pas les valeurs concernant la longueur les yeux fermés à 12 mois

après l'intervention, étant donné qu'elle mentionne le fait qu'il n'existe pas de différence intra-groupe et inter-groupe statistiquement significative. L'analyse intra-groupe de l'étude de (Micarelli et al., 2019) montre une amélioration statistiquement significative de la surface de la longueur les yeux fermés avec une valeur de  $P \leq 0,05$  dans les 2 groupes d'études (expérimental et contrôle). Quant à l'analyse inter-groupe, nous retrouvons une amélioration statistiquement significative dans le groupe des personnes âgées, 1 semaine après l'intervention, entre le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle avec une valeur de  $P = 0,007$ . Cette amélioration est retrouvée aussi dans le groupe expérimental des patients atteints d'un déficit cognitif léger, dans les mêmes conditions d'évaluation, par rapport au groupe contrôle avec une valeur de  $P = 0,008$ . Les données ont été retranscrites, telles que retrouvées dans l'article, dans le Tableau X ci-dessous (*Tableau X*).

Tableau X : Résultats de la surface et la longueur sur posturographie

Études	Mesures	Pré-intervention		Post-intervention		Follow-up		P-intra		P-inter
		GC	GE	GC	GE	GC	GE	GC	GE	
1	S YF	1701,3± 505,3	1696,1± 446,4	1365,0± 452,5	1077,6± 341,5	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,004•
	L YF	964,0± 182,6	968,2± 180,5	785,4± 162,5	665,6± 165,7	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,003•
	L YO	639,8±119 ,9	644,7±1 12,5	568,5±1 13,0	395,6*±9 8,3	NR	NR	>0,05	≤0,05*	P = 0,003•
2 (PA)	S YF	1742,9±32 4,0	1645,1± 563,4	1154,4± 214,8	831,9±35 7,5	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,008•
	S YO	721,4±188 ,8	773,4±2 72,5	499,7±2 10,7	481,9±23 6,6	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	NR
	L YF	942,0±190 ,5	996,9±1 73,2	642,3±1 80,9	471,9±11 3,8	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,007•
	L YO	654,9±109 ,4	633,5±1 20,0	407,9±9 9,55	338,51±9 3,2	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	NR
2 (DCL)	S YF	183,81±28 7,9	2121,1± 346,4	133,8±2 80,9	1537,8±3 27,4	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,007•
	S YO	918,8±206 2,83	865,6±1 65,8	703,1±1 855,4	591,1±17 3,3	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	NR
	L YF	105±126,6	1165,9± 125,6	110,2±1 08,4	807,3±19 2,9	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,008•
	L YO	768,5±110 0,4	743,6±1 25,2	634,0±9 68,9	550,2±10 1,7	NR	NR	≤0,05*	≤0,05*	NR
3	S YF	1701,3±50 5,3*	1696,1± 446,4	1365,0± 452,5	1077,6±3 41,5	1436, 6±44 9,5	1108,4 ±345,2	≤0,05*	≤0,05*	P = 0,003•
	L YO	639,8±119 ,9	644,7±1 12,5	568,5±1 13,0	395,6±98, 3	604,1 ±112, 8	431,5± 99,2	>0,05	≤0,05*	P = 0,002•

Abréviations : DCL, déclin cognitif léger ; GC, groupe contrôle ; GE, groupe expérimental ; L YF, longueur yeux fermés ; L YO, longueur yeux ouverts ; NR, non renseigné ; PA, personnes âgées ; S YF, surface yeux fermés ; S YO, surface yeux ouverts ; \*, significativité intra-groupe ; •, significativité inter-groupe.

Légende : 1, (Micarelli et al., 2017) ; 2, (Micarelli et al., 2019); 3, (Viziano et al., 2019).

- Effets sur l'équilibre dynamique

L'évaluation de l'équilibre dynamique montre une augmentation statistiquement significative du DGI une semaine après le traitement dans les 3 études avec une valeur de  $P \leq 0,05$  (Figure 15). Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), nous retrouvons dans les 2 groupes d'études une amélioration statistiquement significative après le traitement ( $P \leq 0,05$ ). De plus, nous avons constaté, chez les participants âgés du groupe expérimental, des changements statistiquement significatifs dans le score DGI en post-traitement par rapport aux participants âgés du groupe contrôle avec une valeur de  $P = 0,008$ . Les mêmes changements significatifs ont été observés pour le groupe de participants avec un déclin cognitif léger en faveur du groupe expérimental avec une valeur de  $P = 0,008$ . Dans l'étude de (Micarelli et al., 2017), les données concernant le DGI n'ont pas été publiées, mais sont décrites dans l'étude de (Viziano et al., 2019). Les résultats intra-groupes, en post-traitement immédiat, montrent une augmentation statistiquement significative dans les 2 groupes (contrôle et expérimental) par rapport aux valeurs du pré-traitement avec un  $P \leq 0,05$ . De plus, une augmentation significative du score DGI a été constatée, 12 mois après l'intervention, en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle avec une valeur de  $P = 0,003$  (Viziano et al., 2019). Cependant, aucune différence statistique significative n'a été relevée lors de la comparaison entre les scores obtenus en post-traitement (1 semaine) et les scores obtenus en follow-up (12 mois) dans les 2 groupes (contrôle et expérimental).

Néanmoins, il nous semble important de prendre en compte le fait qu'après analyse des données du score DGI, un doute se présente quant à la fiabilité des valeurs. En effet, ce doute va constituer une limite dans l'interprétation de nos résultats. Lors de la lecture du graphique ci-dessous, nous pouvons remarquer que les valeurs du score du groupe expérimental en post-intervention à court et long terme dans les études de (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019) sont supérieures à 24. En effet, ces valeurs génèrent des complications puisque le score maximal du DGI pouvant être obtenu est de 24.

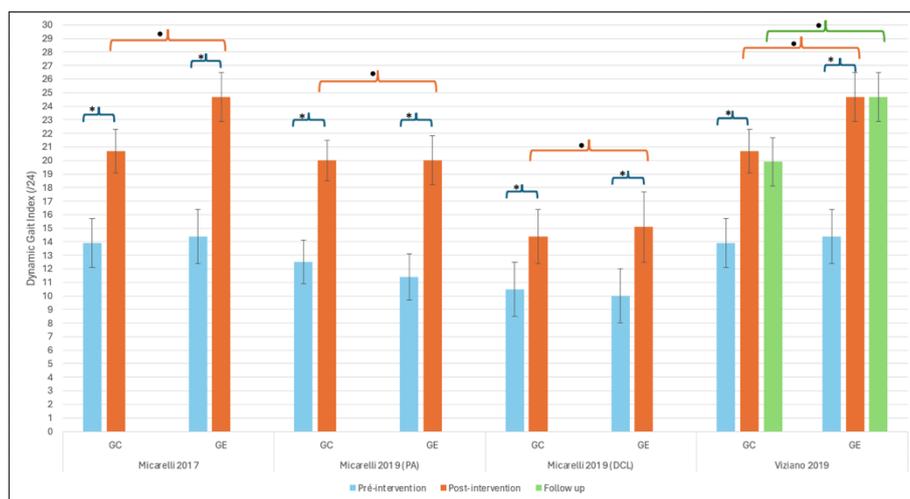


Figure 15 : Graphique représentant la moyenne et l'écart-type du score Dynamic Gait Index en pré, post-intervention et follow-up des groupes contrôle et expérimental des 3 études

Abréviations : DCL, déclin cognitif léger ; GC, groupe contrôle ; GE, groupe expérimental ; PA, personnes âgées ; \*, significativité intra-groupe ( $P \leq 0,05$ ) ; •, significativité inter-groupe ( $P \leq 0,05$ ).

### 6.3. Qualité méthodologique des études sélectionnées

Le Tableau XI présente le score PEDro représentant la qualité méthodologique des trois études incluses de notre revue (Tableau XI). L'utilisation du score PEDro pour évaluer ces études est pertinent, car ce sont des essais contrôlés randomisés. Les scores sont compris entre 6 et 8, ce qui signifie que les 3 études ont une bonne qualité méthodologique (cf chapitre 5.2.3). Chacune des études sélectionnées répondait aux critères concernant la présence des critères d'éligibilité, la randomisation, la similitude des groupes, les mesures chez 85% des participants, l'analyse en intention de traiter, les résultats des comparaisons statistiques inter-groupes et les estimations des effets et de leur variabilité pour au moins un des critères de jugements essentiels. Il existe un risque de biais dans l'étude de (Micarelli et al., 2017), par le fait que les participants, les thérapeutes et les évaluateurs ne soient pas en aveugle. Dans l'étude de (Viziano et al., 2019), le risque de biais est aussi présent puisqu'entre ces 3 groupes (participants, thérapeutes et examinateurs) seuls les examinateurs étaient en aveugle de l'attribution des traitements (clinicien chercheur). Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), seul les patients ne sont pas en insu du traitement. L'évaluation est réalisée par un otoneurologue expert en aveugle de l'étude.

Tableau XI : Score PEDro des études sélectionnées

Critères Études	1. Critères d'éligibilité	2. Randomisation	3. Assignation en aveugle	4. Groupe similaire	5. Participants s en aveugle	6. Thérapeutes en aveugle	7. Examineurs en aveugle	8. Mesures chez 85% des participants	9. Intention de traiter	10. Résultats inter-groupes	11. Estimation des effets et de leur variabilité	Score PEDro
(Micarelli et al., 2017)	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	6/10
(Micarelli et al., 2019)	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	8/10
(Viziano et al., 2019)	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	7/10

Abréviations : +, critère validé ; -, critère non validé.

## 7. Discussion

Pour rappel, cette revue de littérature avait pour objectif d'étudier l'efficacité de la réalité virtuelle immersive associée à la rééducation vestibulaire classique, dans la prise en charge des troubles de l'équilibre chez des patients ayant une atteinte vestibulaire périphérique, par rapport à la rééducation vestibulaire classique utilisée seule. Trois essais contrôlés randomisés ont été inclus pour cette revue.

Dans un premier temps, nous allons analyser et interpréter les résultats sur l'équilibre statique, notre critère de jugement principal, puis les résultats sur l'équilibre dynamique, notre critère de jugement secondaire. Notre objectif est de mettre en perspective chacun des résultats en lien avec notre hypothèse initiale, la littérature et les conséquences cliniques. Ensuite, nous décrivons les limites et les points forts de notre travail de recherche. Par la suite, nous discuterons de l'applicabilité des résultats en pratique clinique. Et pour terminer, nous dégagerons les perspectives de notre travail.

### 7.1. Analyse et interprétation des résultats

#### 7.1.1. Efficacité de la réalité virtuelle immersive sur l'équilibre statique

Pour rappel, les 3 études ont utilisé la posturographie statique pour évaluer l'équilibre statique.

Dans cette revue, les 3 études incluses se rejoignent dans leurs résultats sur l'équilibre statique. En effet, elles ont rapporté une amélioration statistiquement significative des paramètres posturographiques lors de la mise en place d'un protocole de réalité virtuelle immersive à domicile en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle. Les études de (Micarelli et al., 2017, 2019) ont relevé que l'amélioration des paramètres posturographiques, représentant le balancement postural des participants, était significativement plus importante dans les groupes expérimentaux que celle des groupes contrôles à court terme (1 semaine après l'intervention). Dans l'étude de (Viziano et al., 2019), les auteurs ont constaté que la différence significative d'amélioration des paramètres posturographiques entre les 2 groupes perdurait dans le temps lors du suivi à long terme (12 mois après l'intervention). Après un an, l'utilisation de la réalité virtuelle combinée à la rééducation vestibulaire a donné de meilleurs résultats posturographiques que la rééducation vestibulaire seule. De plus, les résultats des paramètres posturographiques, obtenus 12 mois après l'intervention ne montre aucune différence significative avec ceux obtenus 1 semaine après l'intervention dans chaque groupe d'études (Viziano et al., 2019). L'analyse intra-groupe des trois études incluses a permis de démontrer une amélioration statistiquement significative de l'équilibre quel que soit la technique utilisée (rééducation vestibulaire classique ou réalité virtuelle immersive associée à la rééducation vestibulaire classique). Ces résultats signifient que ce protocole associant la réalité virtuelle immersive à la rééducation vestibulaire classique permet de maximiser les effets sur l'équilibre statique, puisque l'équilibre statique s'améliore plus efficacement dans le groupe utilisant un protocole de réalité virtuelle associé à une rééducation vestibulaire classique et que ces résultats se prolongent à long terme.

En condition les yeux fermés, le système vestibulaire est davantage mis en jeu pour maintenir l'équilibre statique, puisque cette condition élimine la contribution visuelle (Strupp et al., 1998). En modifiant les entrées sensorielles, cela permet de tester plus spécifiquement le réflexe vestibulo-spinal (Norré, 1993) et par conséquent l'équilibre statique. Les résultats concernant la surface de l'ellipse de confiance et la longueur de la trace en conditions les yeux fermés permettent de conclure de manière pertinente à une amélioration de l'équilibre liée à la récupération des capacités du système vestibulaire. De plus, selon certaines études, la surface de l'ellipse de confiance semble être plus associée à la fonction vestibulaire que la longueur de la trace (Yasuda et al., 1999). Ainsi, son amélioration en conditions les yeux fermés pourrait potentiellement appuyer l'hypothèse de maximisation de l'entrée vestibulaire dans l'intégration corticale des informations d'équilibration. Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), les auteurs ont réalisé une analyse inter-groupe uniquement pour les paramètres de posturographie en condition yeux fermés, nous pouvons alors nous demander s'ils n'ont pas utilisé l'argument ci-dessus pour justifier leurs analyses.

Premièrement, les 3 études rapportent qu'un protocole de réalité virtuelle associé à la rééducation vestibulaire classique, réalisé à domicile pendant une durée de 4 semaines permet d'améliorer plus efficacement la surface de l'ellipse de confiance en conditions les yeux fermés par rapport à la rééducation vestibulaire classique (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019). Nous notons cette amélioration à court terme (1 semaine après la fin de l'intervention), et qui perdure à long terme (12 mois). Cette amélioration reste stable dans le temps puisqu'il n'existe pas de différence significative entre les valeurs en post-intervention immédiat et en follow-up (Viziano et al., 2019).

Deuxièmement, les résultats des 2 études suivantes montrent qu'à une semaine après l'intervention, le protocole de réalité virtuelle associée à la rééducation vestibulaire réalisé à domicile est plus efficace dans la diminution de la longueur les yeux fermés que la rééducation vestibulaire classique (Micarelli et al., 2017, 2019). En revanche, à 12 mois de l'intervention, ce protocole ne se montre ni plus efficace que la rééducation vestibulaire classique ni plus efficace que par rapport au début de l'étude (Viziano et al., 2019).

En conditions les yeux ouverts sur sol stable, les 3 entrées sensorielles participent au maintien de l'équilibre (Yasuda et al., 1999) .

Concernant la surface les yeux ouverts, les résultats des 3 études ne permettent pas de conclure ni de valider ou invalider l'hypothèse du fait du manque de données des 2 études (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019) et du manque d'analyse inter-groupe dans l'étude de (Micarelli et al., 2019). Nous pouvons observer uniquement une amélioration de la surface en conditions yeux ouverts, peu importe le traitement, dans les 2 groupes expérimentaux et contrôles. Cela signifie que la rééducation vestibulaire utilisée seule paraît tout aussi efficace que l'association de la réalité virtuelle à la rééducation vestibulaire classique sur le paramètre posturographique de la surface en conditions yeux ouverts.

Seulement 2 études s'accordent pour dire que le protocole de réalité virtuelle associée à la rééducation vestibulaire classique diminue de manière plus efficace la longueur de la trace en conditions les yeux ouverts à court et long terme (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019). La diminution reste stable dans le temps et ne diffère pas entre les valeurs obtenues à 1 semaine et à 12 mois (Viziano et al., 2019). L'étude de (Micarelli et al., 2019), quant à elle, permet de conclure uniquement à une efficacité, peu importe la technique, sur la longueur de la trace les yeux ouverts dans les 2 groupes d'études quelle que soit la population (PA ou DCL).

Nous avons remarqué que les 2 techniques de rééducation étaient significativement efficaces sur l'équilibre statique et plus précisément sur les paramètres posturographiques : surface et longueur, à court et à long terme. L'amélioration de l'équilibre pourrait résulter de la rééducation vestibulaire reçue par les 2 groupes d'intervention (Teggi et al., 2009). Cependant,

il semble important de noter que l'amélioration présente après l'intervention dans les 2 groupes est plus importante dans les groupes expérimentaux (RVI) de ces 3 études que dans les groupes contrôles.

Ces résultats convergent avec ceux de l'étude de (Hsu et al., 2017). Cette étude pilote s'est intéressée à l'oscillation du Centre de Pression (CdP) chez des patients atteints d'une pathologie vestibulaire au stade chronique. L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets de la réalité virtuelle dans la rééducation vestibulaire des patients atteints d'une maladie de Ménière incurable et de dysfonctionnement vestibulaire chronique. Les exercices de réalité virtuelle duraient 30 minutes et comprenaient 4 tâches d'entraînement (exercices visuels, de mouvements de tête, d'extension et de coordination). Ce protocole avait une durée de 4 semaines pour 6 séances. Les participants du groupe contrôle effectuaient des exercices vestibulaires, inspirés de ceux de Cawthorne-Cooksey, à domicile pendant 4 semaines. Les auteurs ont conclu que le groupe expérimental, qui utilisait la réalité virtuelle, présentait une amélioration significative plus importante de la surface et la longueur que le groupe contrôle. Cependant, cette étude n'évalue pas les effets à long terme d'un protocole de réalité virtuelle. De plus, les résultats sont valables uniquement pour les paramètres posturographiques en condition les yeux ouverts.

La motivation et d'autres facteurs psychologiques doivent être pris en compte lors de l'interprétation des résultats. Les résultats des groupes expérimentaux de chaque étude pourraient être liés à une plus grande implication du patient ainsi qu'à son adhésion au traitement basé sur la réalité virtuelle. Il se pourrait que la mise en place d'exercices de jeu basés sur la réalité virtuelle ait provoqué un effet thérapeutique placebo.

En conclusion, les résultats des 3 études sur la posturographie statique suggèrent que les exercices de réalité virtuelle immersive associés à la rééducation vestibulaire classique provoquent une amélioration significative et durable sur l'équilibre statique en lien avec une maximisation des informations vestibulaires.

### 7.1.2. Efficacité de la réalité virtuelle immersive sur l'équilibre dynamique

Les 3 études incluses s'accordent pour dire, qu'avec un protocole de réalité virtuelle immersive associée à la rééducation vestibulaire classique réalisé à domicile pendant 4 semaines, l'équilibre dynamique s'améliore. En effet, ce protocole a permis d'améliorer l'indice de marche dynamique de manière plus importante que la rééducation vestibulaire seule à court-terme (1 semaine après la fin de l'intervention). Deux études mettent en avant une amélioration significative plus importante du score DGI dans les groupes expérimentaux recevant la réalité virtuelle immersive que dans les groupes contrôles (Micarelli et al., 2017,

2019). L'analyse entre les groupes a constaté des différences significatives dans le score de l'indice dynamique de marche, tout en démontrant une amélioration significative dans les deux groupes par rapport aux scores obtenus avant le traitement. Cette amélioration est présente dans les 3 études, soit pour une population adulte, de personnes âgées et de patients avec un déclin cognitif léger (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019). Ces résultats se rejoignent avec ceux d'un essai contrôlé récent de (Kanyılmaz et al., 2022). Cette étude comparait l'utilisation d'un programme d'exercices de rééducation vestibulaire soutenus par la réalité virtuelle (groupe expérimental) à une rééducation vestibulaire seule (groupe contrôle) sur l'équilibre statique et dynamique à court et long terme chez les personnes âgées présentant des vertiges. Dans cette étude, l'équilibre dynamique a été évalué par l'intermédiaire du test TUG (Time Up and Go), après un protocole de réalité virtuelle associée à la rééducation vestibulaire classique. En effet, les résultats de l'analyse inter-groupe ont montré une amélioration significative du TUG en faveur du groupe expérimental en post-traitement immédiat. Cette étude a montré une amélioration significative de l'équilibre dynamique en post-intervention en faveur du groupe expérimental utilisant la réalité virtuelle par rapport au groupe contrôle (rééducation vestibulaire classique). Comme dans cette revue, les auteurs ont constaté que les 2 techniques étaient significativement efficaces dans l'amélioration de la stabilité posturale, mais ont relevé que le protocole de réalité virtuelle immersive semblait davantage efficace sur l'équilibre dynamique.

À 12 mois de l'intervention, l'amélioration reste toujours plus importante dans le groupe utilisant le protocole de réalité virtuelle par rapport au groupe subissant la rééducation vestibulaire seule (Viziano et al., 2019). En effet, il n'y a aucune différence significative lors de la comparaison des valeurs du score DGI obtenues à 12 mois et celles obtenues à 1 semaine. Cela signifie qu'un an après l'exécution du protocole à domicile, l'amélioration de l'équilibre dynamique retrouvée à 1 semaine post-intervention se conserve à long terme même si les 2 groupes ont interrompu le protocole. Ces résultats diffèrent avec ceux de l'étude de (Kanyılmaz et al., 2022). En effet, cette étude s'est intéressée, comme nous, aux effets de la réalité virtuelle associée à la rééducation vestibulaire sur l'équilibre dynamique à court et à long terme. Nous avons observé qu'à long terme (6 mois) il n'y avait plus aucune différence significative en termes de stabilité posturale en faveur du groupe expérimental. Cela pourrait s'expliquer par une durée plus courte du traitement (3 semaines), par un nombre plus faible de patients évalués (26), par un âge plus élevé (70 ans) mais aussi par le fait que les tests utilisés sont différents (TUG). Contrairement aux études de (Micarelli et al., 2017, 2019; Viziano et al., 2019), le contenu des protocoles était différent puisque les exercices ont été effectués dans un environnement virtuel au lieu d'un jeu dans le groupe expérimental des 3 études de cette revue.

Lors d'une atteinte vestibulaire, les mécanismes de compensation centrale permettent de récupérer l'équilibre et peuvent entraîner une sur utilisation des informations visuelles et proprioceptives pour le maintien de l'équilibre (Mira, 2008). Cette sur utilisation peut entraîner des dépendances à ces 2 autres systèmes d'équilibration, et le plus fréquemment une dépendance visuelle. Le jeu de RVI reproduit les conflits sensoriels visuo-vestibulaires et induit un phénomène d'habituation, nécessaire à la récupération vestibulaire, qui pourrait éventuellement expliquer les résultats. Ce phénomène aurait limité cette dépendance à un système sensoriel tout en désensibilisant les participants au conflit visuo-vestibulaire permettant la réduction des instabilités et d'améliorer les activités quotidiennes.

Ces résultats suggèrent un rôle complémentaire entre les mécanismes bien connus d'habituation, de substitution et d'adaptation fournis par la rééducation vestibulaire et les informations envoyées via la réalité virtuelle immersive, dans la restauration de la fonction d'équilibre. Les avantages de l'utilisation d'exercices de rééducation basée sur la réalité virtuelle immersive comme la proximité de l'œil, les images à haute résolution ainsi que le suivi des mouvements de l'utilisateur, donnant l'impression à celui-ci de faire partie de l'environnement peuvent expliquer les résultats des 3 études. Comme évoqué précédemment, le jeu TrackSpeed 3D reproduit des conflits sensoriels visuo-vestibulaires. Les inclinaisons de tête durant la réalisation du jeu avec le casque de réalité virtuelle immersive provoquent une inadéquation sensorielle au niveau du système nerveux central qui doit alors s'adapter aux informations sans créer d'inconfort. Le jeu Track Speed Racing permettant l'association d'un environnement visuel enrichi et de mouvements de tête est représentatif des principes généraux de la rééducation vestibulaire, puisque les patients sont encouragés à bouger la tête pendant les activités quotidiennes. Le mouvement est nécessaire pour l'adaptation et la repondération des informations sensorielles (Alahmari et al., 2014). Effectivement, l'association d'inclinaisons de tête et d'environnement visuellement enrichi permet d'augmenter la difficulté des exercices par l'ajout d'une stimulation vestibulaire. Ce fonctionnement permet la reproduction des phénomènes d'adaptation et d'habituation entraînant le mécanisme de compensation centrale.

En conclusion, les 3 études analysées ci-dessus, ont mis en place un protocole d'exercices de réalité virtuelle associés à des exercices de substitution, d'adaptation, d'habituation et d'équilibre. Elles suggèrent que ce protocole, réalisé pendant 4 semaines à domicile, améliore le score DGI de manière significativement plus importante que la rééducation vestibulaire seule à 1 semaine après l'intervention. Et ces résultats sont conformes à d'autres études réalisées (Kanyılmaz et al., 2022). Par ailleurs, ces 3 protocoles sont identiques entre chaque étude avec les mêmes modalités de durée, de fréquence et de contenu. Les résultats de ces 3 études convergent pour dire que la mise en œuvre d'un

protocole de réalité virtuelle améliore plus efficacement l'équilibre dynamique que la rééducation vestibulaire seule, et qu'il permettrait de maximiser les effets de la rééducation vestibulaire classique. Nous pouvons nous interroger sur la cause des résultats, qui pourraient être potentiellement liés aux modalités du protocole de réalité virtuelle.

Les 3 études de cette revue présentent des résultats positifs à long terme en faveur d'un protocole de réalité virtuelle sur la prise en charge des troubles de l'équilibre puisque nous avons relevé une amélioration significative du score DGI dans les 3 études. Cependant, ces résultats divergent avec une autre étude scientifique (Kanyılmaz et al., 2022). À l'avenir, il conviendrait d'étudier et de documenter la durée des effets, et ce, à long terme.

Néanmoins, nous ne pouvons ni valider ni invalider l'hypothèse initiale de notre question de recherche puisque comme énoncé dans la partie résultats de cette revue, la majorité des résultats concernant le score DGI sont potentiellement biaisés puisque les scores en post-intervention sont supérieurs à la valeur maximale possible du DGI (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019).

## 7.2. Analyse des caractéristiques des études sélectionnées

### 7.2.1. Population

L'âge de la population des 3 études est plutôt similaire à ce que nous pouvons retrouver en clinique. Les troubles vestibulaires sont retrouvés plus fréquemment chez les adultes et augmentent au fil du temps. Néanmoins, la répartition des genres dans les 3 études n'est pas représentative de ce que nous pouvons retrouver en pratique puisque le syndrome vestibulaire périphérique est à prédominance féminine. Dans ces 3 études, il y a autant d'hommes que de femmes. La taille de l'échantillon de chaque étude paraît faible, avec 47 patients, ce qui limite l'obtention de résultats applicables à une large population.

Comme vu précédemment, les troubles vestibulaires périphériques ont différentes et nombreuses étiologies. Effectivement, un des points forts de cette revue est que les études incluses ont réuni une population de patients atteints de multiples pathologies vestibulaires périphériques, identiques à celles que l'on trouve en milieu clinique, notamment la névrite vestibulaire. Les différentes pathologies retrouvées dans ces 3 études représentent des atteintes déficitaires se traduisant par une hypofonction d'un ou plusieurs organes vestibulaires. Cependant, nous savons qu'il existe un autre type de syndrome, le syndrome irritatif. Après avoir étudié l'épidémiologie de ce syndrome, il serait intéressant d'étudier son comportement après la mise en place d'un protocole de réalité virtuelle, identique à celui rencontré à travers ces 3 études, étant donné que le traitement de ces 2 syndromes est

différent (Dumas, 2023).

Les 3 articles étudient l'efficacité du protocole de réalité virtuelle immersive sur différentes pathologies vestibulaires. Dans les critères d'inclusion de chaque étude, l'atteinte vestibulaire était évaluée au moyen d'irrigations caloriques à l'eau bithermique. Pour être inclus dans l'étude, la réduction de la réponse vestibulaire à cette épreuve devait être d'au moins 25% d'un côté, au minimum 3 mois après l'apparition des symptômes. Cela signifie que les atteintes vestibulaires, peu importe la pathologie, étaient de type chronique. Or, la gêne maximale ressentie par les patients est plutôt présente lors de la phase aiguë de la pathologie (<3 mois). Une étude de (Teggi et al., 2009) montre que les patients atteints d'une perturbation vestibulaire aiguë souffrent souvent de déséquilibre, de vertiges induits et de flou visuel. Ils ont souligné l'importance de la composante psychologique (anxiété, dépression...) dans les atteintes vestibulaires aiguës ainsi que son impact sur la rééducation, ce qui justifierait une prise en charge précoce. Pour les études futures, il serait intéressant d'étudier la phase aiguë des pathologies ainsi que l'efficacité d'un protocole de réalité virtuelle immersive. Une étude a déjà montré les effets des exercices d'habituation et de Cawthorne-Cooksey, réalisés pendant 1 mois, sur l'amélioration de l'équilibre, par rapport à un groupe témoin non traité (Strupp et al., 1998). Cette étude suggère que ces exercices pourraient accélérer et améliorer la compensation centrale par les mécanismes d'adaptation, de substitution et d'habituation (Strupp et al., 1998). De plus, l'étude de (Hsu et al., 2017) soutient l'idée d'une prise en charge précoce puisque qu'elle a démontré que le degré d'amélioration, après une rééducation vestibulaire, était significativement plus important au stade précoce de la maladie de Ménière. Ce qui permettrait de justifier l'intérêt d'une prise en charge précoce des troubles vestibulaires. Les données d'une étude de (Strupp et al., 1998), ont permis de fournir des preuves quant à une période critique d'adaptation et de compensation centrale permettant de conclure à une réalisation précoce des exercices de rééducation vestibulaire, peu de temps après l'apparition des symptômes.

### 7.2.2. Intervention

Le protocole combinant la réalité virtuelle immersive à la rééducation vestibulaire classique est réalisé à domicile par les patients eux-mêmes. Or, ces patients sont atteints d'une pathologie vestibulaire et peuvent être sujets aux instabilités. Par conséquent, ils présentent un risque de chute majeur. Nous pouvons alors nous poser la question du potentiel risque de chute lors des séances ainsi que de la bonne réalisation des exercices à domicile, sans supervision et sans sécurité. Par conséquent, nous pouvons aussi nous questionner sur le rôle du kinésithérapeute dans la réalisation d'un tel protocole. Les auteurs ont précisé que

les exercices de réalité virtuelle immersive devaient être réalisés en position assise sûrement pour assurer la sécurité des participants. Or, pour obtenir des résultats optimaux sur l'équilibre, il semble davantage pertinent de travailler dans les situations gênantes reproduisant les instabilités, qui sont le plus souvent debout et à la marche, afin d'habituer son corps à ces situations (Hsu et al., 2017). Puisque les exercices ont été réalisés à domicile, nous pouvons nous interroger sur le respect des consignes sur la réalisation des exercices. Pour un protocole comme celui utilisé dans les 3 études, il serait intéressant d'étudier l'observance et l'adhésion des participants. Dans ces 3 études, le kinésithérapeute rencontre les patients pour leur expliquer le fonctionnement du casque de réalité virtuelle et les différents exercices de rééducation vestibulaire puis les revoit de temps en temps pour évaluer leur bonne réalisation en clinique. Il serait possible que par manque de temps dans une journée certains patients n'aient pas effectués les exercices. Ainsi, nous pouvons nous questionner sur le rôle du kinésithérapeute qui permettrait une meilleure disciplinarité et régularité dans la rééducation. Une étude a démontré que l'encadrement et le soutien du kinésithérapeute constitue vraisemblablement un facteur de guérison chez des patients présentant des troubles vestibulaires (Whitney et al., 2016).

Les patients des groupes expérimentaux, recevant l'intervention, bénéficient d'une durée de traitement supérieure à ceux des groupes contrôles puisqu'en plus de la rééducation vestibulaire classique, ils utilisent le casque de réalité virtuelle immersive. Les auteurs ont fait le choix éthique de traiter tous les patients avec la rééducation vestibulaire classique conduisant à une différence de temps passé en rééducation entre les 2 groupes dans chacune des 3 études. L'exposition à la rééducation est plus longue puisque l'ajout du protocole de réalité virtuelle est de 20 minutes par jour. Par conséquent, les résultats dans le groupe expérimental auraient pu être biaisés par les participants recevant la réalité virtuelle en plus de la rééducation vestibulaire avec une durée supplémentaire importante de rééducation. Ainsi, nous pouvons nous demander si l'effet du traitement pourrait être lié à une exposition plus importante des participants.

### 7.2.3. Comparateur

Dans cette revue de la littérature, les 3 études utilisaient la même équation de comparaison : réalité virtuelle immersive associée à la rééducation vestibulaire classique opposée à la rééducation vestibulaire seule. Le comparateur est la rééducation vestibulaire classique, qui, dans les 3 études se basent sur les 3 mécanismes de neuroplasticité centrale (Bergeron et al., 2015) : adaptation, substitution et habituation. Ces exercices étaient identiques pour chaque patient quel que soit le groupe d'étude. À l'avenir, il serait pertinent de

personnaliser et d'adapter la rééducation à chaque patient afin d'optimiser l'efficacité de la rééducation vestibulaire (Giray et al., 2009).

### 7.3. Biais et limites

Il est important de prendre en considération les biais et limites afin d'interpréter les résultats avec précautions, aussi bien dans les études sélectionnées que dans la réalisation de cette revue.

#### 7.3.1. Limites des études incluses

Les études incluses souffrent de certaines limites qui doivent être prises en compte afin d'interpréter au mieux les résultats.

Tout d'abord, nous allons nous intéresser à l'analyse de la qualité méthodologique par l'intermédiaire du score PEDro. Ce score permet d'évaluer la qualité méthodologique des essais contrôlés randomisés et ainsi de relever les différents biais pouvant limiter la pertinence des résultats. Après analyse du score PEDro, les trois études sont qualifiées de bonnes avec un score entre 6 et 8. Il est nécessaire de prendre en compte le fait que 2 des critères de l'échelle PEDro sont difficilement validables dans des études scientifiques de kinésithérapie : les critères de mise en insu des participants et des thérapeutes. Les études de (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019) ne valident pas ces critères, ce qui signifie que les participants des différents groupes ont connaissance du traitement qu'ils reçoivent et que les thérapeutes ont connaissance des traitements qu'ils prodiguent. L'invalidation de ces deux critères constitue un risque de biais élevé. En effet, cela entraîne un biais de performance ou biais de réalisation. L'étude de (Micarelli et al., 2019), quant à elle, diminue le biais de performance puisque les thérapeutes sont en aveugle, mais le biais reste présent pour les participants qui ne sont pas en insu. Dans le score PEDro, pour obtenir un score assez élevé, il faut entre autres respecter le triple insu : participant, thérapeute et examinateur. L'étude de (Micarelli et al., 2017) présente un biais de détection puisque, en plus des participants et des thérapeutes, les évaluateurs ne sont pas en aveugle. La mise en insu des évaluateurs permettrait de ne pas influencer les mesures et de limiter le biais d'évaluation.

Dans ces 3 études, la puissance statistique ainsi que des paramètres permettant de la calculer n'étaient pas renseignés. Nous ne pouvons donc pas déterminer si le nombre de participants inclus dans ces 3 études était suffisant pour observer les résultats attendus avec une puissance élevée (>80%). De ce fait, la validité de l'étude ainsi que les effets de l'intervention pourraient être remis en question et cela engendrerait un impact sur la

significativité des résultats, si celui-ci s'avère être négatif. Cependant, nos résultats sont en faveur du traitement testé ce qui pourrait signifier que les études possèdent une taille d'échantillon suffisante pour observer une différence significative entre les 2 groupes. De plus, l'objectif des 3 études était de mettre en évidence les effets de la réalité virtuelle sur des patients atteints d'hypofonction vestibulaire unilatérale sans déterminer un objectif principal et donc de critère de jugement principal. Sachant que le critère de jugement principal correspond au paramètre qui mesure la puissance statistique, il paraît donc nécessaire d'en déterminer un afin d'obtenir la puissance statistique et donc la taille de l'échantillon nécessaire.

Dans les 3 études de cette revue, l'évaluation de l'équilibre dynamique est réalisée à travers le score DGI, qui, comme précisé dans notre cadre conceptuel est un score contenant 8 items avec des réponses allant de 0 à 3 pour chaque item, faisant un score total maximal de 24. Dans l'article de (Viziano et al., 2019), étudiant les effets d'un protocole de réalité virtuelle immersive à long terme, les données concernant le score DGI sont rapportées sous forme de moyenne de chaque participant en 3 temps (pré-intervention, post-intervention et follow-up). Les données exactes sont à retrouver en annexe. Nous pouvons remarquer que les moyennes d'évaluation en post-intervention et follow-up sont de 24,69 (Annexe IX). Or, comme évoqué précédemment le score maximal est de 24. Dans la méthode de leur article, les auteurs affirment que le score est compris entre 0 et 24 en s'appuyant sur de la littérature décrivant le score. Plusieurs articles, principalement celui de (Wrisley et al., 2003) confirment que le score total maximal possible est 24. Nous avons donc pris l'initiative de contacter les auteurs par mail afin d'obtenir davantage d'explications sur une potentielle erreur. Le mail est à retrouver en annexe (Annexe X). Cependant, nous n'avons obtenu aucune réponse, ce qui nous laisse assez dubitatif vis-à-vis des données du DGI. L'interprétation des résultats sur l'équilibre dynamique est alors biaisée.

Un autre détail concernant les données d'évaluation de posturographie nous a interpellé. L'étude de (Micarelli et al., 2019) étudie la surface de l'ellipse de confiance et la longueur de la trace, en conditions yeux ouverts et fermés, chez des patients âgés (70 ans) et des patients DCL. Lors de l'analyse des données chez les patients DCL, nous avons relevé une différence importante dans les valeurs de surface et longueur les yeux fermés, en pré-intervention, entre le groupe contrôle et le groupe expérimental. Le détail des valeurs est à retrouver en annexe (Annexe XI). Cette différence rend les groupes incomparables et nous empêche ainsi de conclure à une efficacité supérieure du protocole de RVI et rééducation vestibulaire classique par rapport à la rééducation vestibulaire seule. Bien que non analysées et malgré le fait que nous n'ayons aucune certitude, les valeurs en baseline des groupes contrôle et expérimental des participants DCL semblent différentes au préalable. Cette non-équivalence des groupes comparés est susceptible de compromettre la validité interne de cette étude.

Ainsi, après avoir analysé les potentiels biais présents dans les études, nous pouvons conclure au fait que les différences significatives observées entre les 2 groupes (contrôle et expérimental) de chaque étude pourraient être due à un autre facteur que le traitement étudié.

### 7.3.2. Limites et points forts de la revue

La recherche, la sélection des articles ainsi que l'extraction et l'analyse des données ont été effectuées par une seule personne, tout comme l'évaluation des limites et points forts de la revue. Idéalement, ces différents processus devraient être réalisés par au moins 2 personnes pour éviter une potentielle perte de données ainsi qu'une subjectivité dans les résultats. Étant donné que cette revue de littérature est un mémoire de fin d'études de masso-kinésithérapie, nous n'avons pu éviter ce biais.

Un des principaux points faibles de cette revue est le faible nombre d'études incluses. En effet, après recherche dans plusieurs bases de données, nous avons obtenu seulement 3 articles correspondant aux critères d'éligibilité établis dans la méthode. De plus, ces 3 études incluses ont été réalisées par le même groupe d'études ce qui constitue un biais de publication ainsi qu'un biais dans l'interprétation des résultats. Par ailleurs, le faible nombre d'études incluses a conduit à l'obtention d'une seule étude, sur les 3 sélectionnées, étudiant les effets à long terme de la réalité virtuelle immersive associée à la rééducation vestibulaire classique.

Un des points forts de cette revue de littérature est le fait que les 3 études sélectionnées possédaient le même design, elles étaient toutes des essais contrôlés randomisés. Ce type d'étude fournit le meilleur niveau de preuve lorsqu'elles sont réalisées correctement (HAS, 2013). L'utilisation d'un essai contrôlé randomisé est adaptée à notre question de recherche et à notre hypothèse puisque nous étudions l'efficacité d'un traitement. De plus, ces 3 études possèdent un score PEDro qualifié de bon. Ces 3 études ont évalué l'équilibre statique et dynamique par le biais de mesures objectives. L'utilisation de mesures objectives a permis d'améliorer la qualité des études. En effet, la preuve d'améliorations des résultats objectifs peut renforcer la validité interne des études (Hazzaa et al., 2023).

Un second point fort de cette revue concerne la similitude du protocole d'intervention (modalités, fréquence, durée) ainsi que du protocole comparateur (CF. Tableau VII Tableau VIII) permettant une meilleure comparaison. De plus, le nombre de participants était identique dans chaque étude avec plus ou moins le même effectif dans chaque groupe d'études (contrôle/expérimental). Les populations des 3 études étaient similaires sur les caractéristiques démographiques et cliniques, excepté pour l'âge et les comorbidités. Dans l'étude de (Micarelli et al., 2019), les participants de l'étude étaient plus âgés que ceux des études de (Micarelli et al., 2017; Viziano et al., 2019). La moitié de ces participants âgés

avaient une atteinte cognitive (déclin cognitif léger). Ces 2 critères, qui diffèrent entre les études, pourraient avoir un impact sur l'amélioration des critères de l'équilibre statique et dynamique.

#### 7.4. Implications pratiques et théoriques

Les résultats de ces 3 études sont en faveur de l'association de la réalité virtuelle immersive et de la rééducation vestibulaire classique. Or, le protocole de réalité virtuelle immersive devait être réalisé pendant 20 minutes par jour, sans interruption, sur 5 jours pendant 4 semaines. Comme évoqué précédemment dans cette revue et dans plusieurs articles, la rééducation vestibulaire est assez « *chronophage, longue, répétitive et monotone* » pour les patients, les rendant alors moins observants (Bergeron et al., 2015; Hsu et al., 2017). Ce type de protocole de réalité virtuelle peut paraître chronophage, c'est pourquoi, nous nous posons la question de la faisabilité d'un tel protocole en réalité. La société actuelle néglige son bien-être et sa santé, par manque de temps ou par manque de motivation. Il serait intéressant de se demander si des séances plus longues et moins fréquentes dans la même semaine pourraient obtenir des résultats similaires. D'un point de vue pratique, il serait pertinent de s'interroger sur le nombre de séances et le temps consacré aux exercices de réalité virtuelle qui pourrait être un paramètre essentiel pour optimiser l'effet thérapeutique. De plus, le dosage des interventions des 3 études actuelles ne reflète pas le modèle de pratique typique, puisqu'en général, les séances de kinésithérapie sont espacées dans le temps et ont lieu 1 à 2 fois maximum par semaine pour ce type de pathologies. La réalité virtuelle facilite l'adhésion au traitement ainsi qu'une meilleure observance en augmentant la motivation des patients par rapport à la rééducation vestibulaire classique. Dans l'évaluation de l'équilibre dynamique, nous avons pu voir que de mêmes effets sont obtenus plus rapidement dans le protocole de réalité virtuelle immersive, ce qui pourrait potentiellement permettre de diminuer le nombre de séances de prise en charge. Pour conclure à l'efficacité de séances plus longues et moins fréquentes, il conviendrait de déterminer la durée d'exposition aux environnements de réalité virtuelle, nécessaire pour l'obtention d'effets thérapeutiques. Au vu de la durée des séances de réalité virtuelle, il serait intéressant de déterminer un protocole avec une durée optimale d'efficacité à court et long terme. Cette notion a déjà été abordée dans la méta-analyse de (Bergeron et al., 2015), qui suggérait que les traitements basés sur la réalité virtuelle devaient durer au moins de 120 à 150 min pour assurer des résultats positifs et quantifiables pour le patient. Elle doit être approfondie dans d'autres études afin d'apporter à la science davantage de données portant sur une durée optimale d'exposition aux dispositifs de réalité virtuelle. De plus, il est important de prendre en compte la fatigue engendrée par la rééducation vestibulaire

ainsi que tous les symptômes neuro-végétatifs associés (nausées, migraines, vomissements...), mais aussi les potentiels effets secondaires de la réalité virtuelle immersive. Certains patients seront plus sujets à ces effets et devront prendre du temps pour se reposer à la suite des séances et ne pourront pas forcément reprendre les séances le jour suivant. Effectivement, la durée totale d'une séance ainsi que son efficacité dépend de l'état physique du patient (Bergeron et al., 2015). Il serait donc intéressant de proposer un protocole adapté à des adultes, potentiellement sujets aux réactions neuro-végétatives, avec des activités quotidiennes et professionnelles chronophages et donc un temps disponible pour leur santé bien inférieur à ce qui a été proposé à travers ces 3 études. Par ailleurs, une notion est essentielle à prendre en compte, celle du « cybersickness ». Le « cybersickness » se traduit en français par « cybermaladie » ou « mal des transports virtuel » (Bonato et al., 2009). Il se manifeste par des symptômes similaires au mal des transports comme les nausées, les vomissements, les vertiges, les maux de tête, les malaises ou les sueurs et résulte d'un conflit sensoriel entre les 3 systèmes d'équilibre en raison de stimuli contradictoires (Kiryu & So, 2007). Ce conflit provoque un décalage entre ce que perçoivent l'œil et le système vestibulaire. Ces événements, caractérisés d'indésirables, doivent être recherchés, au moyen d'un questionnaire validé, et documentés davantage dans les études puisqu'ils constituent une limite non négligeable à l'utilisation de la réalité virtuelle en séance de kinésithérapie. De plus, un point important a été négligé dans les 3 études : le temps entre 2 séances consécutives. En effet, les 3 études ont décrit leur protocole d'intervention en précisant les modalités de réalisation de celui-ci (fréquence, durée) sans donner d'importance au repos nécessaire entre 2 séances. À l'avenir, il conviendrait effectivement d'étudier ce paramètre permettant d'aboutir à une durée optimale d'un protocole.

La réalité virtuelle présente des avantages au niveau de la motivation du patient et de la personnalisation de la prise en charge. En effet, nous savons que la rééducation vestibulaire peut paraître ennuyeuse pour les patients ainsi la réalité virtuelle peut constituer une alternative d'un point de vue motivationnel et d'adhésion du patient au traitement. Les différents logiciels de réalité virtuelle permettent de diversifier les séances tout en évitant la redondance des exercices. Les différents environnements virtuels proposés par les logiciels permettent une meilleure personnalisation de la prise en charge en s'adaptant aux situations gênantes pour le patient. Pour exemple, les logiciels de rééducation vestibulaire proposent de multiples environnements tels que des environnements avec de la foule (métro, rue...), des environnements avec un défilement visuel (flux optique, optocinétique, tunnel, escalator, rayons d'un supermarché...) qui reproduisent les problématiques des patients. De plus, l'étude de (Hsu et al., 2017) a démontré que les symptômes d'instabilités pouvaient être atténués par une exposition progressive aux mouvements qui provoquent les symptômes. Cela pourrait

signifier que lors des séances de réalité virtuelle, si celles-ci sont réalisées dans un environnement représentant les situations provoquant les symptômes de chaque patient, alors leurs instabilités pourraient davantage diminuer. Plusieurs études ont démontré que les programmes d'exercices personnalisés et adaptés aux patients sont bénéfiques pour le traitement du dysfonctionnement vestibulaire chronique (Giray et al., 2009). Il conviendrait alors de cibler les problématiques de chaque patient afin de déterminer une prise en charge individualisée et adaptée aux déficiences et limitations d'activité de chacun. Il serait intéressant d'adapter chaque protocole aux symptômes et plaintes de chaque patient.

## 7.5. Suggestions pour de futures recherches

Dans un but d'évaluer l'équilibre statique et dynamique dans les pathologies vestibulaires, il serait intéressant, dans de futures études, de les définir comme critères de jugement principaux, ce qui n'était pas le cas à travers les 3 études. Les différents auteurs se consacraient davantage aux améliorations globales du système vestibulaire après l'utilisation de la réalité virtuelle. De plus, il serait intéressant de calculer la puissance statistique pour un critère de jugement principal permettant ainsi l'applicabilité des résultats obtenus à la population.

Dans de futures études sur l'équilibre statique, il serait pertinent de se focaliser sur un des paramètres posturographiques : la longueur de la trace dans les plans médio-latéraux ou antéro-postérieur afin d'établir un lien entre les différentes stratégies d'équilibration (stratégies de cheville, de pas ou de hanche) et les troubles de l'équilibre d'origine vestibulaire.

Il serait, par la suite, pertinent d'utiliser plusieurs tests d'équilibre, puisque les tests cliniques d'équilibre utilisés séparément sont peu sensibles pour le diagnostic et le suivi. Il conviendrait alors d'utiliser conjointement plusieurs tests permettant d'augmenter leur sensibilité et spécificité (SFORL, 2023). En effet, l'utilisation de plusieurs tests validés et spécifiques aux atteintes vestibulaires serait nécessaire pour relever avec précision les effets de la réalité virtuelle immersive sur l'équilibre. En plus du DGI, qui représente un outil valide pour évaluer la performance de la marche chez les personnes atteintes de troubles de l'équilibre d'origine vestibulaire, les futures recherches pourraient utiliser le m-CTSIB afin de détecter un déficit des entrées vestibulaires. Elles pourraient aussi utiliser le TUG, comme dans l'étude de (Kanyilmaz et al., 2022), qui est validé et reproductible pour les atteintes vestibulaires (SFORL, 2023).

Le rapport coût-bénéfice économique n'a été abordé dans aucune des études. Pourtant, cela semble nécessaire puisque notre système de santé actuel tente de réduire les coûts en santé. À l'avenir, il serait pertinent de s'y intéresser, en menant d'autres études, puisque

d'après les résultats de cette revue, nous observons que les mêmes résultats sont obtenus plus rapidement dans le groupe utilisant le protocole de réalité virtuelle ce qui pourrait permettre de réduire les coûts en santé de rééducation vestibulaire puisque les troubles de l'équilibre des patients diminueraient plus rapidement. Les résultats de (Stankiewicz et al., 2020) sont conformes aux résultats de notre étude pour dire que les effets thérapeutiques positifs sont ressentis plus tôt avec la réalité virtuelle qu'avec la kinésithérapie vestibulaire classique. De plus, dans cette revue, il n'y avait qu'une seule étude qui s'intéressait aux effets à long terme d'un protocole de réalité virtuelle. Si des études supplémentaires démontrent que les effets perdurent à long terme, cela permettrait aux patients de ne pas avoir recours de nouveau à de la rééducation. Il serait donc pertinent de réaliser plusieurs études à long terme en rééducation vestibulaire. Cela permettrait d'avoir une vision plus globale sur la rééducation basée sur la réalité virtuelle et ainsi en tirer des conclusions sur le rapport coût-bénéfice économique. Par ailleurs, la mise en place d'un protocole de réalité virtuelle immersive en cabinet entraînerait un coût supplémentaire, en termes de matériel et de logiciel pour le praticien, difficile à estimer. Il serait donc intéressant de se pencher sur cet aspect économique afin d'en déduire un rapport d'efficacité (coût-efficacité). Pour cela, il serait nécessaire de documenter le coût de l'appareil, du logiciel ainsi que celui de chaque séance, et de mettre ces informations en lien avec les données d'efficacité des protocoles.

Les 3 protocoles étaient similaires dans cette revue. Il serait intéressant de confronter ce protocole, à d'autres protocoles utilisés dans différentes études, afin d'en définir un comme optimal dans la rééducation vestibulaire basée sur la réalité virtuelle tout en s'adaptant aux différentes pathologies rencontrées. En lien avec le protocole de l'étude de (Kanyılmaz et al., 2022), il serait intéressant d'étudier les différences d'efficacité entre un protocole reproduisant davantage les environnements de la vie quotidienne (rue, supermarché...) à un protocole de jeu comme dans les 3 présentes études.

Pour les futures études, il conviendrait de documenter clairement la fréquence de réalisation des séances par semaine, ainsi que le temps entre chaque séance consécutive nécessaire pour obtenir une efficacité. En effet, les études présentes dans cette revue ont négligé ces 2 points, essentiels à la compréhension du lien entre le temps d'exposition aux dispositifs de réalité virtuelle et l'ampleur de l'effet thérapeutique.

## 8. Conclusion

Cette revue de la littérature a permis de mettre en évidence l'intérêt de la réalité virtuelle immersive comme une opportunité d'améliorer les effets de la rééducation vestibulaire classique dans le cadre de troubles de l'équilibre d'origine vestibulaire. En effet, nous avons observé que la réalité virtuelle, associée à la rééducation vestibulaire classique, présente des

avantages cliniques sur l'équilibre statique et provoque une amélioration des capacités d'équilibre dynamique des patients atteints de troubles vestibulaires périphériques. Nous avons pu confirmer que l'utilisation de la réalité virtuelle immersive dans un contexte d'hypofonction vestibulaire unilatérale s'avère être une approche utile puisqu'elle présente des améliorations supplémentaires à la rééducation vestibulaire seule.

Cette revue a permis de répondre à une question présente dans plusieurs articles et méta-analyses précédentes, celle de savoir si la rééducation vestibulaire basée sur la réalité virtuelle devait être effectuée seule ou en combinaison avec la rééducation vestibulaire classique.

Par conséquent, la rééducation vestibulaire associée à la réalité virtuelle représente une nouvelle piste dans la prise en charge des troubles vestibulaires périphériques tout en réduisant potentiellement les coûts dans les systèmes de soins de santé.

Cependant, de futures études sont nécessaires afin de déterminer avec davantage de fiabilité et de précision les effets de la réalité virtuelle sur les troubles de l'équilibre en rééducation vestibulaire (calcul de puissance statistique, taille d'échantillon nécessaire, critère de jugement principal...).



## Références bibliographiques

- Agrawal, Y., Carey, J. P., Della Santina, C. C., Schubert, M. C., & Minor, L. B. (2009). Disorders of Balance and Vestibular Function in US Adults: Data From the National Health and Nutrition Examination Survey, 2001-2004. *Archives of Internal Medicine*, 169(10), 938. <https://doi.org/10.1001/archinternmed.2009.66>
- Alahmari, K. A., Sparto, P. J., Marchetti, G. F., Redfern, M. S., Furman, J. M., & Whitney, S. L. (2014). Comparison of Virtual Reality Based Therapy With Customized Vestibular Physical Therapy for the Treatment of Vestibular Disorders. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(2), 389-399. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2294904>
- Amber, M., Benkhaled, M., Pincemail, M., Verebi, E., & Claude, I. (2021). Apports et limites de la réalité virtuelle dans les pratiques médicales en 2020. *IRBM News*, 42(3), 100325. <https://doi.org/10.1016/j.irbmnw.2021.100325>
- Ashiri, M., Lithgow, B., Mansouri, B., & Moussavi, Z. (2020). Comparison between vestibular responses to a physical and virtual reality rotating chair. *Proceedings of the 11th Augmented Human International Conference*, 1-4. <https://doi.org/10.1145/3396339.3396392>
- Ashiri, M., Lithgow, B., Suleiman, A., Mansouri, B., & Moussavi, Z. (2021). Quantitative measures of the visually evoked sensation of body movement in space (vection) using Electrovestibulography (EVestG). *Virtual Reality*, 25(3), 731-744. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00488-w>
- Baker, R., Evinger, C., & McCrea, R. A. (1981). Some Thoughts About the Three Neurons in the Vestibular Ocular Reflex\*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 374(1), 171-188. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1981.tb30869.x>

- Baloh, R. W., Honrubia, V., & Jacobson, K. (1987). Benign positional vertigo. *Neurology*, 37(3), 371-371. <https://doi.org/10.1212/WNL.37.3.371>
- Barra, J., & Pérennou, D. (2013). Le sens de verticalité est-il vestibulaire ? *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 43(3), 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.02.001>
- Bergeron, M., Lortie, C. L., & Guitton, M. J. (2015). Use of Virtual Reality Tools for Vestibular Disorders Rehabilitation : A Comprehensive Analysis. *Advances in Medicine*, 2015, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/916735>
- Blin, É. (2023a). Ataxie vestibulaire : Physiologie, bilans et rééducation. *Kinésithérapie, la Revue*, 23(260-261), 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.05.019>
- Blin, É. (2023b). Petite histoire de la rééducation vestibulaire. *Kinésithérapie, la Revue*, 23(260-261), 4-9. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.05.006>
- Bonanni, M., & Newton, R. A. (1998). Test–retest reliability of the Fukuda Stepping Test. *Physiotherapy Research International*, 3(1), 58-68. <https://doi.org/10.1002/pri.122>
- Bonato, F., Bubka, A., & Palmisano, S. (2009). Combined Pitch and Roll and Cybersickness in a Virtual Environment. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80(11), 941-945. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2394.2009>
- Bonfils, P.-J., & Chevallier, J.-M. (2017). In *Anatomie 3. ORL*. (4ème). Medecine Sciences Publications.
- Booth, V., Masud, T., Connell, L., & Bath-Hextall, F. (2014). The effectiveness of virtual reality interventions in improving balance in adults with impaired balance compared with standard or no treatment: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*, 28(5), 419-431. <https://doi.org/10.1177/0269215513509389>

- Bouccara, D., Rubin, F., Bonfils, P., & Lisan, Q. (2018). Vertiges et troubles de l'équilibre : Démarche diagnostique. *La Revue de Médecine Interne*, 39(11), 869-874. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2018.02.004>
- Boyle, R. (2001). Vestibulospinal control of reflex and voluntary head movement. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 942, 364-380. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb03760.x>
- Brahnam, S., & Jain, L. C. (Éds.). (2011). *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment* (Vol. 337). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17824-5>
- Brandt, T., & Dieterich, M. (2017). The dizzy patient : Don't forget disorders of the central vestibular system. *Nature Reviews. Neurology*, 13(6), 352-362. <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2017.58>
- Cashin, A. G., & McAuley, J. H. (2020). Clinimetrics : Physiotherapy Evidence Database (PEDro) Scale. *Journal of Physiotherapy*, 66(1), 59. <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2019.08.005>
- Clendaniel, R. A. (2010). The Effects of Habituation and Gaze Stability Exercises in the Treatment of Unilateral Vestibular Hypofunction : A Preliminary Results. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 34(2), 111-116. <https://doi.org/10.1097/NPT.0b013e3181deca01>
- Cohen, H., Blatchly, C. A., & Gombash, L. L. (1993). A Study of the Clinical Test of Sensory Interaction and Balance. *Physical Therapy*, 73(6), 346-351. <https://doi.org/10.1093/ptj/73.6.346>
- de Morton, N. A. (2009). The PEDro scale is a valid measure of the methodological quality of clinical trials : A demographic study. *Australian Journal of*

*Physiotherapy*, 55(2), 129-133. [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(09\)70043-](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(09)70043-1)

1

Dufour, M., Gedda, M., Samuel, J., & Ivernois, J. F. D. (2007). *Dictionnaire de kinésithérapie et réadaptation*.

Dumas, O. (2023). Rééducation du syndrome vestibulaire déficitaire périphérique unilatéral. *Kinésithérapie, la Revue*, 23(260-261), 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.05.010>

Dunlap, P. M., Holmberg, J. M., & Whitney, S. L. (2019). Vestibular rehabilitation : Advances in peripheral and central vestibular disorders. *Current Opinion in Neurology*, 32(1), 137-144. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000632>

Dutheil, S., Lacour, M., & Tighilet, B. (2011). Une nouvelle zone de neurogenèse fonctionnelle—Les noyaux vestibulaires du tronc cérébral. *médecine/sciences*, 27(6-7), Article 6-7. <https://doi.org/10.1051/medsci/2011276012>

Enticott, J. C., O'leary, S. J., & Briggs, R. J. S. (2005). Effects of vestibulo-ocular reflex exercises on vestibular compensation after vestibular schwannoma surgery. *Otology & Neurotology: Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 26(2), 265-269. <https://doi.org/10.1097/00129492-200503000-00024>

Forsberg, A., Andreasson, M., & Nilsagård, Y. E. (2013). Validity of the Dynamic Gait Index in People With Multiple Sclerosis. *Physical Therapy*, 93(10), 1369-1376. <https://doi.org/10.2522/ptj.20120284>

Gedda, M. (2015). Traduction française des lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. *Kinésithérapie, la Revue*, 15(157), Article 157.

- Giray, M., Kirazli, Y., Karapolat, H., Celebisoy, N., Bilgen, C., & Kirazli, T. (2009). Short-Term Effects of Vestibular Rehabilitation in Patients With Chronic Unilateral Vestibular Dysfunction : A Randomized Controlled Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(8), 1325-1331. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.01.032>
- Gorski, L. P., Silva, A. M. da, Cusin, F. S., Cesaroni, S., Ganança, M. M., & Caovilla, H. H. (2019). Body balance at static posturography in vestibular migraine. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 85(2), 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2017.12.001>
- Gottshall, K. R., Topp, S. G., & Hoffer, M. E. (2010). Early Vestibular Physical Therapy Rehabilitation for Meniere's Disease. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 43(5), 1113-1119. <https://doi.org/10.1016/j.otc.2010.05.006>
- Graf, W., & Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : Anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus Palevol*, 5(3), 637-655. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.12.009>
- 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, 1076. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01076>
- Hall, C. D., Herdman, S. J., Whitney, S. L., Anson, E. R., Carender, W. J., Hoppes, C. W., Cass, S. P., Christy, J. B., Cohen, H. S., Fife, T. D., Furman, J. M., Shepard, N. T., Clendaniel, R. A., Dishman, J. D., Goebel, J. A., Meldrum, D., Ryan, C., Wallace, R. L., & Woodward, N. J. (2022). Vestibular Rehabilitation for Peripheral Vestibular Hypofunction : An Updated Clinical Practice Guideline

From the Academy of Neurologic Physical Therapy of the American Physical Therapy Association. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 46(2), 118-177.  
<https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000382>

Hall, C. D., Herdman, S. J., Whitney, S. L., Cass, S. P., Clendaniel, R. A., Fife, T. D., Furman, J. M., Getchius, T. S. D., Goebel, J. A., Shepard, N. T., & Woodhouse, S. N. (2016). Vestibular Rehabilitation for Peripheral Vestibular Hypofunction : An Evidence-Based Clinical Practice Guideline FROM THE AMERICAN PHYSICAL THERAPY ASSOCIATION NEUROLOGY SECTION. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 40(2), 124-155.  
<https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000120>

Hall, C. D., Schubert, M. C., & Herdman, S. J. (2004). Prediction of fall risk reduction as measured by dynamic gait index in individuals with unilateral vestibular hypofunction. *Otology & Neurotology: Official Publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology*, 25(5), 746-751. <https://doi.org/10.1097/00129492-200409000-00017>

Halmagyi, G. M., Weber, K. P., & Curthoys, I. S. (2010). Vestibular function after acute vestibular neuritis. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28(1), 37-46.  
<https://doi.org/10.3233/RNN-2010-0533>

HAS. (2013). *Etat des lieux : Niveau de preuve et gradation des recommandations de bonne pratique.*

HAS. (2017). *Vertiges positionnels paroxystiques bénins : Manoeuvres diagnostiques et thérapeutiques.*

Hassid, N., Henneaux, C., & Van Nechel, C. (2004). *La rééducation vestibulaire.*

- Hautefort, C., & Toupet, M. (2016). *Rappels anatomophysiologiques : Ce qu'il faut savoir*. 29(2).
- Hazzaa, N. M., Manzour, A. F., Yahia, E., & Mohamed Galal, E. (2023). Effectiveness of virtual reality-based programs as vestibular rehabilitative therapy in peripheral vestibular dysfunction : A meta-analysis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. <https://doi.org/10.1007/s00405-023-07911-3>
- Helminski, J. O., Zee, D. S., Janssen, I., & Hain, T. C. (2010). Effectiveness of Particle Repositioning Maneuvers in the Treatment of Benign Paroxysmal Positional Vertigo : A Systematic Review. *Physical Therapy*, 90(5), 663-678. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090071>
- Herdman, S. J., Hall, C. D., Maloney, B., Knight, S., Ebert, M., & Lowe, J. (2015). Variables associated with outcome in patients with bilateral vestibular hypofunction : Preliminary study. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 25(3-4), 185-194. <https://doi.org/10.3233/VES-150556>
- Hickey, S. A., Ford, G. R., Buckley, J. G., & O'connor, A. F. F. (1990). Unterberger stepping test: A useful indicator of peripheral vestibular dysfunction? *The Journal of Laryngology & Otology*, 104(8), 599-602. <https://doi.org/10.1017/S0022215100113337>
- Honaker, J. A., Boismier, T. E., Shepard, N. P., & Shepard, N. T. (2009). Fukuda Stepping Test : Sensitivity and Specificity. *Journal of the American Academy of Audiology*, 20(05), 311-314. <https://doi.org/10.3766/jaaa.20.5.4>
- Hsu, S.-Y., Fang, T.-Y., Yeh, S.-C., Su, M.-C., Wang, P.-C., & Wang, V. Y. (2017). Three-dimensional, virtual reality vestibular rehabilitation for chronic imbalance problem caused by Ménière's disease: A pilot study. *Disability and*

*Rehabilitation*, 39(16), 1601-1606.

<https://doi.org/10.1080/09638288.2016.1203027>

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 & Neurotology*, 40(1), 88-95. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002013>

Huy, P. T. B., & Charfi, S. (2008). Bases physiopathologiques et pratiques de la rééducation vestibulaire. *Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-faciale*, 125(5), 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.aorl.2008.06.003>

Iles, J. F., & Pisini, J. V. (1992). Vestibular-evoked postural reactions in man and modulation of transmission in spinal reflex pathways. *The Journal of Physiology*, 455(1), 407-424. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1992.sp019308>

Kammerlind, A.-S. C., Ledin, T. E., Ödkvist, L. M., & Skargren, E. I. (2005). Effects of home training and additional physical therapy on recovery after acute unilateral vestibular loss- a randomized study. *Clinical Rehabilitation*, 19(1), 54-62. <https://doi.org/10.1191/0269215505cr830oa>

Kanyılmaz, T., Topuz, O., Ardiç, F. N., Alkan, H., Öztekin, S. N. S., Topuz, B., & Ardiç, F. (2022). Effectiveness of conventional versus virtual reality-based vestibular rehabilitation exercises in elderly patients with dizziness: A randomized controlled study with 6-month follow-up. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 88 Suppl 3(Suppl 3), S41-S49. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2021.08.010>

Kim, H.-J., Park, J., & Kim, J.-S. (2021). Update on benign paroxysmal positional vertigo. *Journal of Neurology*, 268(5), 1995-2000. <https://doi.org/10.1007/s00415-020-10314-7>

- Kiryu, T., & So, R. H. (2007). Sensation of presence and cybersickness in applications of virtual reality for advanced rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4(1), 34, 1743-0003-4-34. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-34>
- Klatt, B., Carender, W., Lin, C., Alsubaie, S., Kinnaird, C., Sienko, K., & Whitney, S. (2016). *A Conceptual Framework for the Progression of Balance Exercises in Persons with Balance and Vestibular Disorders*.
- Korba Alakhras, E., & Abi Nader, J. (2023). *Les effets de la relaxation par l'intermédiaire de la réalité virtuelle sur le stress et l'anxiété des adultes : Une revue systématique*.
- Kramer, P. D., Roberts, D. C., Shelhamer, M., & Zee, D. S. (1998). A Versatile Stereoscopic Visual Display System for Vestibular and Oculomotor Research. *Journal of Vestibular Research*, 8(5), 363-379. <https://doi.org/10.3233/VES-1998-8503>
- Kumar, S. (2015). EFFECT OF VESTIBULAR REHABILITATION IN IMPROVING DAILY LIFE FUNCTIONS IN ELDERLY. *International Journal of Advanced Research*, 3, 1350-1362.
- La rééducation vestibulaire des vertiges et troubles de l'équilibre chroniques | Elsevier Enhanced Reader*. (s. d.). [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)33176-0](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)33176-0)
- Lacour, M. (2006). Restoration of vestibular function : Basic aspects and practical advances for rehabilitation. *Current Medical Research and Opinion*, 22(9), 1651-1659. <https://doi.org/10.1185/030079906X115694>
- Lacour, M. (2009). Locomotion et navigation spatiale en pathologie vestibulaire. *Annales de Gériatrie*, 2(2), 83-91. <https://doi.org/10.1684/age.2009.0046>
- Lacour, M. (2022). Ce que l'on sait et ce que l'on ignore encore. *LA NEWSLETTER*, 7.

- Lacour, M., Dutheil, S., Tighilet, B., Lopez, C., & Borel, L. (2009). Tell Me Your Vestibular Deficit, and I'll Tell You How You'll Compensate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1164(1), 268-278. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2008.03731.x>
- Lacour, M., Helmchen, C., & Vidal, P.-P. (2016). Vestibular compensation : The neuro-otologist's best friend. *Journal of Neurology*, 263(S1), 54-64. <https://doi.org/10.1007/s00415-015-7903-4>
- LAMY, J.-C. (2006). Bases neurophysiologiques de la proprioception. *Bases neurophysiologiques de la proprioception*, 472, 15-23.
- Lévêque, M., Seidermann, L., Ulmer, E., & Chays, A. (2009). Physiologie vestibulaire : Bases anatomiques, cellulaires, immunohistochimiques et électrophysiologiques. *EMC - Oto-rhino-laryngologie*, 4(3), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0246-0351\(09\)46960-5](https://doi.org/10.1016/S0246-0351(09)46960-5)
- Lin, H.-T., Li, Y.-I., Hu, W.-P., Huang, C.-C., & Du, Y.-C. (2019). A Scoping Review of The Efficacy of Virtual Reality and Exergaming on Patients of Musculoskeletal System Disorder. *Journal of Clinical Medicine*, 8(6), 791. <https://doi.org/10.3390/jcm8060791>
- Lopez, C. (2018). *Nouvelles avancées dans l'étude de la symptomatologie vestibulaire et sa prise en charge fonctionnelle*.
- Luxon, L. M., & Bamiou, D.-E. (2007). « CHAPTER 27—VESTIBULAR SYSTEM DISORDERS, » in Neurology and Clinical Neuroscience. In *Vestibular system disorders* (p. 337-352).
- Maher, C. G., Sherrington, C., Herbert, R. D., Moseley, A. M., & Elkins, M. (2003). Reliability of the PEDro Scale for Rating Quality of Randomized Controlled Trials. *Physical Therapy*, 83(8), Article 8.

- Mancini, M., & Horak, F. B. (2010). The relevance of clinical balance assessment tools to differentiate balance deficits. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 46(2), 239-248.
- Marchetti, G. F., Whitney, S. L., Blatt, P. J., Morris, L. O., & Vance, J. M. (2008). Temporal and Spatial Characteristics of Gait During Performance of the Dynamic Gait Index in People With and People Without Balance or Vestibular Disorders. *Physical Therapy*, 88(5), 640-651.  
<https://doi.org/10.2522/ptj.20070130>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877-887. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6)
- Mateo, S. (2020). Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA. *Kinésithérapie, la Revue*, 20(226), 29-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.kine.2020.05.019>
- Matijević, V., Secić, A., Masić, V., Sunić, M., Kolak, Z., & Znika, M. (2013). Virtual reality in rehabilitation and therapy. *Acta Clinica Croatica*, 52(4), 453-457.
- Matsumura, M., & Murofushi, T. (2021). Vestibular Rehabilitation after Vestibulopathy Focusing on the Application of Virtual Reality. *Journal of Otorhinolaryngology, Hearing and Balance Medicine*, 2(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.3390/ohbm2020005>
- McDonnell, M. N., & Hillier, S. L. (2015). Vestibular rehabilitation for unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Cochrane Database of Systematic Reviews*.  
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD005397.pub4>
- Micarelli, A., Viziano, A., Augimeri, I., Micarelli, D., & Alessandrini, M. (2017). Three-dimensional head-mounted gaming task procedure maximizes effects of vestibular rehabilitation in unilateral vestibular hypofunction: A randomized

controlled pilot trial. *International Journal of Rehabilitation Research. Internationale Zeitschrift Fur Rehabilitationsforschung. Revue Internationale De Recherches De Readaptation*, 40(4), 325-332.  
<https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000244>

Micarelli, A., Viziano, A., Micarelli, B., Augimeri, I., & Alessandrini, M. (2019). Vestibular rehabilitation in older adults with and without mild cognitive impairment : Effects of virtual reality using a head-mounted display. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 83, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2019.05.008>

Mira, E. (2008). Improving the quality of life in patients with vestibular disorders : The role of medical treatments and physical rehabilitation. *International Journal of Clinical Practice*, 62(1), 109-114. <https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2006.01091.x>

Misére, T. (2023). VPPB pour les nuls. *Kinésithérapie, la Revue*, 23(260-261), 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.05.012>

Murdin, L., & Schilder, A. G. M. (2015). Epidemiology of Balance Symptoms and Disorders in the Community : A Systematic Review. *Otology & Neurotology*, 36(3), 387. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000691>

Neuhauser, H. K. (2016). The epidemiology of dizziness and vertigo. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, p. 67-82). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00005-4>

Neuhauser, H. K., von Brevern, M., Radtke, A., Lezius, F., Feldmann, M., Ziese, T., & Lempert, T. (2005). Epidemiology of vestibular vertigo. *Neurology*, 65(6), 898-904. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000175987.59991.3d>

Newman-Toker, D. E., Hsieh, Y.-H., Camargo, C. A., Pelletier, A. J., Butchy, G. T., & Edlow, J. A. (2008). Spectrum of Dizziness Visits to US Emergency

- Departments : Cross-Sectional Analysis From a Nationally Representative Sample. *Mayo Clinic Proceedings*, 83(7), 765-775.  
<https://doi.org/10.4065/83.7.765>
- Norré, M. E. (1993). Sensory interaction testing in platform posturography. *The Journal of Laryngology & Otology*, 107(6), 496-501.  
<https://doi.org/10.1017/S0022215100123564>
- Palmisano, S., Allison, R. S., Schira, M. M., & Barry, R. J. (2015). Future challenges for vection research : Definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Frontiers in Psychology*, 6.  
<https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2015.00193>
- Pierrot-Deseilligny, E., & Burke, D. (2005). *The Circuitry of the Human Spinal Cord : Its Role in Motor Control and Movement Disorders*. Cambridge University Press.
- Piette, P., & Pasquier, J. (2012). Réalité virtuelle et rééducation. *Kinésithérapie, la Revue*, 12(128-129), 38-41. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2012.07.003>
- Pocock, G., Richards, C. D., Richards, D. A., Richalet, J.-P., & Vandewalle, H. (2019). *Physiologie humaine et physiopathologie : Les fondements de la médecine*. Elsevier Masson.
- Rajagopalan, A., Jinu, K. V., Sailesh, K. S., Mishra, S., Reddy, U. K., & Mukkadan, J. K. (2017). Understanding the links between vestibular and limbic systems regulating emotions. *Journal of Natural Science, Biology, and Medicine*, 8(1), 11-15. <https://doi.org/10.4103/0976-9668.198350>
- Regrain, E., Boyer, F. C., & Chays, A. (2013). Efficacité de la rééducation des troubles de l'équilibration suite à une atteinte vestibulaire périphérique : État de l'art.

- Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 56, e151.  
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2013.07.320>
- Reinhard, A., & Maire, R. (2013). [Vestibular neuritis : Treatment and prognosis]. *Revue Medicale Suisse*, 9(400), 1775-1779.
- Rogers, J. H. (1980). Romberg and his test. *The Journal of Laryngology & Otology*, 94(12), 1401-1404. <https://doi.org/10.1017/S002221510009023X>
- Rose, T., Nam, C. S., & Chen, K. B. (2018). Immersion of virtual reality for rehabilitation—Review. *Applied Ergonomics*, 69, 153-161.  
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.01.009>
- Sauvage, J.-P. (2015). *Guide de rééducation vestibulaire* (Bibliothèque en ligne). Elsevier Masson.
- Sauvage, J.-P., Puyraud, S., Roche, O., & Rahman, A. (1999). Anatomie de l'oreille interne. *EMC-Oto-rhino-laryngologie*, 1-16.
- Schwarz, D. W., Rubin, A. M., Tomlinson, R. D., Milne, A. C., & Fredrickson, J. M. (1975). Studies on the integrative activity of the vestibular nuclei complex. *Canadian Journal of Otolaryngology*, 4(2), 378-382.
- SFORL. (2023). *RECOMMANDATION DE PRATIQUE CLINIQUE DE LA SFORL 2023*. <https://www.sforl.org/wp-content/uploads/2023/08/Texte-Reco-Place-de-la-reeducation-dans-la-prise-en-charge-des-vertiges-dorigine-vestibulaire-28-08-2023.pdf>
- Shumway-Cook, A., Brauer, S., & Woollacott, M. (2000). Predicting the Probability for Falls in Community-Dwelling Older Adults Using the Timed Up & Go Test. *Physical Therapy*, 80(9), 896-903. <https://doi.org/10.1093/ptj/80.9.896>
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. (1995). *Motor control theory and applications?*

- Slater, M. (2018). Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, 109(3), 431-433.  
<https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- Solis, J. O. (2023). Les principes théoriques et types d'exercices utilisés dans la kinésithérapie vestibulaire. *Kinésithérapie, la Revue*, 23(260-261), 37-40.  
<https://doi.org/10.1016/j.kine.2023.05.009>
- Stankiewicz, T., Gujski, M., Niedzielski, A., & Chmielik, L. P. (2020). Virtual Reality Vestibular Rehabilitation in 20 Patients with Vertigo Due to Peripheral Vestibular Dysfunction. *Medical Science Monitor*, 26.  
<https://doi.org/10.12659/MSM.930182>
- Strominger, N. L., Demarest, R. J., & Laemle, L. B. (2012). Auditory and Vestibular Systems. In N. L. Strominger, R. J. Demarest, & L. B. Laemle (Éds.), *Noback's Human Nervous System, Seventh Edition : Structure and Function* (p. 277-296). Humana Press. [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-779-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-779-8_16)
- Strupp, M., Arbusow, V., Maag, K. P., Gall, C., & Brandt, T. (1998). Vestibular exercises improve central vestibulospinal compensation after vestibular neuritis. *Neurology*, 51(3), 838-844. <https://doi.org/10.1212/WNL.51.3.838>
- Taylor, R. L., McGarvie, L. A., Reid, N., Young, A. S., Halmagyi, G. M., & Welgampola, M. S. (2016). Vestibular neuritis affects both superior and inferior vestibular nerves. *Neurology*, 87(16), 1704-1712.  
<https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000003223>
- Teggi, R., Caldirola, D., Fabiano, B., Recanati, P., & Bussi, M. (2009). Rehabilitation after acute vestibular disorders. *The Journal of Laryngology & Otology*, 123(4), 397-402. <https://doi.org/10.1017/S0022215108002983>

- Tieri, G., Morone, G., Paolucci, S., & Iosa, M. (2018). Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: Facts, fiction and fallacies. *Expert Review of Medical Devices*, 15(2), 107-117. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1425613>
- Toupet, M. (2005). Vertiges positionnels paroxystiques bénins. *EMC - Neurologie*, 2(4), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.emcn.2005.08.004>
- Tran Ba Huy, P., Tran ba huy, MM., Chouard, Legent, Chays, Maison-Neuve, & Yelnik. (2006). La rééducation vestibulaire des vertiges et troubles de l'équilibre chroniques. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 190(8), 1791-1802. [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)33176-0](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)33176-0)
- Trost, Z., France, C., Anam, M., & Shum, C. (2021). Virtual reality approaches to pain : Toward a state of the science. *Pain*, 162(2), 325-331. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000002060>
- Tuthill, J. C., & Azim, E. (2018). Proprioception. *Current Biology*, 28(5), R194-R203. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.01.064>
- Viirre, E. (1996). Vestibular telemedicine and rehabilitation. Applications for virtual reality. *Studies in Health Technology and Informatics*, 29, 299-305.
- Viirre, E., & Sitarz, R. (2002). Vestibular Rehabilitation Using Visual Displays : Preliminary Study. *The Laryngoscope*, 112(3), 500-503. <https://doi.org/10.1097/00005537-200203000-00017>
- Villemin, C., Abel, F., Dispersyn, G., Cotty-Eslous, M., & Marchand, S. (2021). La réalité virtuelle comme antidouleur : Une revue systématique de la littérature. *Douleur et Analgésie*, 34(3), Article 3. <https://doi.org/10.3166/dea-2021-0171>
- Viziano, A., Micarelli, A., Augimeri, I., Micarelli, D., & Alessandrini, M. (2019). Long-term effects of vestibular rehabilitation and head-mounted gaming task procedure in unilateral vestibular hypofunction : A 12-month follow-up of a

- randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 33(1), 24-33.  
<https://doi.org/10.1177/0269215518788598>
- Wallon, H., Chmielniski, E., & Sauterey, R. (1958). Equilibre statique, équilibre en mouvement : Double latéralisation (entre 5 et 15 ans). *Enfance*, 11(1), 1-29.  
<https://doi.org/10.3406/enfan.1958.1385>
- Whitney, S. L., Alghwiri, A. A., & Alghadir, A. (2016). An overview of vestibular rehabilitation. In *Handbook of Clinical Neurology* (Vol. 137, p. 187-205). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00013-3>
- Whitney, S. L., Hudak, M. T., & Marchetti, G. F. (2000). The dynamic gait index relates to self-reported fall history in individuals with vestibular dysfunction. *Journal of Vestibular Research*, 10(2), 99-105. <https://doi.org/10.3233/VES-2000-10205>
- Whitney, S. L., Marchetti, G. F., Schade, A., & Wrisley, D. M. (2004). The sensitivity and specificity of the Timed « Up & Go » and the dynamic gait index for self-reported falls in persons with vestibular disorders. *Journal of Vestibular Research*, 14(5), 397-409. <https://doi.org/10.3233/VES-2004-14506>
- Wilson, V. J., & Peterson, B. W. (2011). Vestibulospinal and Reticulospinal Systems. In *Comprehensive Physiology* (p. 667-702). John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/cphy.cp010214>
- Wrisley, D. M., Marchetti, G. F., Kuharsky, D. K., & Whitney, S. L. (2004). Reliability, Internal Consistency, and Validity of Data Obtained With the Functional Gait Assessment. *Physical Therapy*, 84(10), 906-918.  
<https://doi.org/10.1093/ptj/84.10.906>
- Wrisley, D. M., Walker, M. L., Echternach, J. L., & Strasnick, B. (2003). Reliability of the dynamic gait index in people with vestibular disorders<sup>11</sup>No commercial party having a direct financial interest in the results of the research supporting

this article has or will confer a benefit upon the author(s) or upon any organization with which the author(s) is/are associated. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 84(10), 1528-1533. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(03\)00274-0](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(03)00274-0)

Xie, M., Zhou, K., Patro, N., Chan, T., Levin, M., Gupta, M. K., & Archibald, J. (2021). Virtual Reality for Vestibular Rehabilitation : A Systematic Review. *Otology & Neurotology*, 42(7), 967. <https://doi.org/10.1097/MAO.00000000000003155>

Yardley, L., Beech, S., Zander, L., Evans, T., & Weinman, J. (1998). A randomized controlled trial of exercise therapy for dizziness and vertigo in primary care. *British Journal of General Practice*.

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

Yasuda, T., Nakagawa, T., Inoue, H., Iwamoto, M., & Inokuchi, A. (1999). The role of the labyrinth, proprioception and plantar mechanosensors in the maintenance of an upright posture. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology: Official Journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): Affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery*, 256 Suppl 1, S27-32. <https://doi.org/10.1007/pl00014149>

Yates, B. J., Bolton, P. S., & Macefield, V. G. (2014). Vestibulo-Sympathetic Responses. *Comprehensive Physiology*, 4(2), 851-887. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130041>

Yeh, S.-C., Chen, S., Wang, P.-C., Su, M.-C., Chang, C.-H., & Tsai, P.-Y. (2014). Interactive 3-dimensional virtual reality rehabilitation for patients with chronic

imbalance and vestibular dysfunction. *Technology and Health Care*, 22(6), 915-921. <https://doi.org/10.3233/THC-140855>

Yelnik, A. (2021). *Troubles de l'équilibre : Aspects sensoriels: De la physiologie à la rééducation*. Elsevier Health Sciences.

# **ANNEXES**

## Liste des annexes

Annexe I : Lignes directrices PRISMA (Gedda, 2015)

Annexe II : Équation de recherche

Annexe III : Niveau de preuves HAS (HAS, 2013)

Annexe IV : Dynamic Gait Index (DGI)

Annexe V : Diagramme de flux vierge

Annexe VI : Échelle PEDro

Annexe VII : Liste des critères d'exclusion de l'étude de (Viziano et al., 2019)

Annexe VIII : Précisions sur les exercices de rééducation vestibulaire classique (Giray et al., 2009)

Annexe IX : Score DGI de l'étude de (Viziano et al., 2019)

Annexe X : Demande d'informations par mail

Annexe XI : Données de posturographie de la surface et la longueur en condition les yeux fermés de l'étude de (Micarelli et al., 2019)

## Annexe I : Lignes directrices PRISMA (Gedda, 2015)

<b>Tableau I. Traduction française originale de la liste de contrôle PRISMA 2009.</b>			
Section/sujet	N°	Critères de contrôle	Page N°
<b>TITRE</b>			
Titre	1	Identifier le rapport comme une revue systématique, une méta-analyse, ou les deux.	
<b>RÉSUMÉ</b>			
Résumé structuré	2	Fournir un résumé structuré incluant, si applicable : contexte ; objectifs ; sources des données ; critères d'éligibilité des études, populations, et interventions ; évaluation des études et méthodes de synthèse ; résultats ; limites ; conclusions et impacts des principaux résultats ; numéro d'enregistrement de la revue systématique.	
<b>INTRODUCTION</b>			
Contexte	3	Justifier la pertinence de la revue par rapport à l'état actuel des connaissances.	
Objectifs	4	Déclarer explicitement les questions traitées en se référant aux participants, interventions, comparaisons, résultats, et à la conception de l'étude ( <i>PICOS</i> <sup>a</sup> ).	
<b>MÉTHODE</b>			
Protocole et enregistrement	5	Indiquer si un protocole de revue de la littérature existe, s'il peut être consulté et où (par exemple, l'adresse web), et, le cas échéant, fournir des informations d'identification, y compris le numéro d'enregistrement.	
Critères d'éligibilité	6	Spécifier les caractéristiques de l'étude (par exemple, <i>PICOS</i> , durée de suivi) et les caractéristiques du rapport (par exemple, années considérées, langues, statuts de publication) utilisées comme critères d'éligibilité, et justifier ce choix.	
Sources d'information	7	Décrire toutes les sources d'information (par exemple : bases de données avec la période couverte, échange avec les auteurs pour identifier des études complémentaires) de recherche et la date de la dernière recherche.	
Recherche	8	Présenter la stratégie complète de recherche automatisée d'au moins une base de données, y compris les limites décidées, de sorte qu'elle puisse être reproduite.	
Sélection des études	9	Indiquer le processus de sélection des études (c.-à-d. : triage, éligibilité, inclusion dans la revue systématique, et, le cas échéant, inclusion dans la méta-analyse).	
Extraction des données	10	Décrire la méthode d'extraction de données contenues dans les rapports (par exemple : formulaires pré-établis, librement, en double lecture) et tous les processus d'obtention et de vérification des données auprès des investigateurs.	
Données	11	Lister et définir toutes les variables pour lesquelles des données ont été recherchées (par exemple : <i>PICOS</i> , sources de financement) et les suppositions et simplifications réalisées.	
Risque de biais inhérent à chacune des études	12	Décrire les méthodes utilisées pour évaluer le risque de biais de chaque étude (en spécifiant si celui-ci se situe au niveau de l'étude ou du résultat), et comment cette information est utilisée dans la synthèse des données.	
Quantification des résultats	13	Indiquer les principales métriques de quantification des résultats (par exemple : <i>risk ratio</i> , différence entre les moyennes).	
Synthèse des résultats	14	Décrire les méthodes de traitement des données et de combinaison des résultats des études, si effectué, y compris les tests d'hétérogénéité (par exemple : $I^2$ ) pour chaque méta-analyse.	
Risque de biais transversal aux études	15	Spécifier toute quantification du risque de biais pouvant altérer le niveau de preuve global (par exemple : biais de publication, rapport sélectif au sein des études).	
Analyses complémentaires	16	Décrire les méthodes des analyses complémentaires (par exemple : analyses de sensibilité ou en sous-groupes, méta-régression), si effectuées, en indiquant celles qui étaient prévues <i>a priori</i> .	

**Tableau I. Traduction française originale de la liste de contrôle PRISMA 2009 (suite).**

Section/sujet	N°	Critères de contrôle	Page N°
<b>RÉSULTATS</b>			
Sélection des études	17	Indiquer le nombre d'études triées, examinées en vue de l'éligibilité, et incluses dans la revue, avec les raisons d'exclusion à chaque étape, de préférence sous forme d'un diagramme de flux.	
Caractéristiques des études sélectionnées	18	Pour chaque étude, présenter les caractéristiques pour lesquelles des données ont été extraites (par exemple : taille de l'étude, PICOS, période de suivi) et fournir les références.	
Risque de biais relatif aux études	19	Présenter les éléments sur le risque de biais de chaque étude et, si possible, toute évaluation des conséquences sur les résultats (voir item 12).	
Résultats de chaque étude	20	Pour tous les résultats considérés (positifs ou négatifs), présenter, pour chaque étude : (a) une brève synthèse des données pour chaque groupe d'intervention ; (b) les ampleurs d'effets estimés et leurs intervalles de confiance, idéalement avec un graphique en forêt ( <i>forest plot</i> ).	
Synthèse des résultats	21	Présenter les principaux résultats de chaque méta-analyse réalisée, incluant les intervalles de confiance et les tests d'hétérogénéité.	
Risque de biais transversal aux études	22	Présenter les résultats de l'évaluation du risque de biais transversal aux études (voir item 15).	
Analyse complémentaire	23	Le cas échéant, donner les résultats des analyses complémentaires (par exemple : analyses de sensibilité ou en sous-groupes, méta-régression [voir item 16]).	
<b>DISCUSSION</b>			
Synthèse des niveaux de preuve	24	Résumer les principaux résultats, ainsi que leur niveau de preuve pour chacun des principaux critères de résultat ; examiner leur pertinence selon les publics concernés (par exemple : établissements ou professionnels de santé, usagers et décideurs).	
Limites	25	Discuter des limites au niveau des études et de leurs résultats (par exemple : risque de biais), ainsi qu'au niveau de la revue (par exemple : récupération incomplète de travaux identifiés, biais de notification).	
Conclusions	26	Fournir une interprétation générale des résultats dans le contexte des autres connaissances établies, et les impacts pour de futures études.	
<b>FINANCEMENT</b>			
Financement	27	Indiquer les sources de financement de la revue systématique et toute autre forme d'aide (par exemple : fourniture de données) ; rôle des financeurs pour la revue systématique.	

<sup>a</sup>Note du traducteur : *Patient, problem or population, Intervention, Comparison, control or comparator, Outcomes, Study design*

Annexe II : Équation de recherche

(VR OR virtual reality OR virtual reality immersive OR head-mounted display OR HMD OR CAVE) AND (peripheral vestibular syndrome OR vestibular OR peripheral vestibular OR vestibular syndrome OR peripheral vestibular dysfunction) AND (static balance or dynamic balance or imbalance)

Annexe III : Niveau de preuves HAS (HAS, 2013)

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
<p>A</p> <p>Preuve scientifique établie</p>	<p>Niveau 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- essais comparatifs randomisés de forte puissance ;</li> <li>- méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ;</li> <li>- analyse de décision fondée sur des études bien menées.</li> </ul>
<p>B</p> <p>Présomption scientifique</p>	<p>Niveau 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- essais comparatifs randomisés de faible puissance ;</li> <li>- études comparatives non randomisées bien menées ;</li> <li>- études de cohortes.</li> </ul>
<p>C</p> <p>Faible niveau de preuve scientifique</p>	<p>Niveau 3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- études cas-témoins.</li> </ul>
	<p>Niveau 4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- études comparatives comportant des biais importants ;</li> <li>- études rétrospectives ;</li> <li>- séries de cas ;</li> <li>- études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).</li> </ul>

## Annexe IV : Dynamic Gait Index (DGI)

### Index de marche dynamique *Dynamic Gait Index*

Consignes :

- Lire le verbatim et démontrer ensuite l'épreuve.
- Ne pas lire les distances indiquées aux épreuves 2 et 7
- Si la personne n'accomplit pas tous les critères liés à un niveau de cotation, l'évaluateur doit noter la cotation plus la plus faible, même si la personne dépasse les attentes de cette dernière.

#### \_\_\_\_ 1. Marche sur terrain plat

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel d'ici jusqu'à la prochaine marque (6 m [20 pieds]).*

Cotation : Notez la catégorie la plus faible qui s'applique.

- (3) Normal – Peut marcher 6 m (20 pieds), sans aide technique, à une bonne vitesse, sans signe de déséquilibre, avec un patron de marche normal.
- (2) Incapacité légère – Peut marcher 6 m (20 pieds), en utilisant une aide à la marche, à une vitesse plus lente, avec un patron de marche légèrement déficient.
- (1) Incapacité modérée – Peut marcher 6 m (20 pieds) lentement, avec un patron de marche anormal, avec des signes de déséquilibre.
- (0) Incapacité sévère – Ne peut marcher 6 m (20 pieds) sans assistance, présente des déséquilibres sévères ou des altérations sévères du patron de marche.

#### \_\_\_\_ 2. Changements de vitesse de marche

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel (sur une distance de 1,5 m [5 pieds]). Lorsque je vous dirai « rapide », marchez aussi vite que vous le pouvez (sur une distance de 1,5 m [5 pieds]). Lorsque je vous dirai « lentement », marchez le plus lentement possible (sur une distance de 1,5 m [5 pieds]).*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

- (3) Normal – Peut changer de vitesse de marche sans perte d'équilibre ni irrégularité de la démarche. Démonstre une différence significative entre la vitesse de marche habituelle, rapide et lente.
- (2) Incapacité légère – Peut changer de vitesse de marche, mais démontre de légères irrégularités de son patron de marche, ne démontre pas d'irrégularités de son patron de marche, mais ne peut faire varier significativement sa vitesse de marche ou utilise une aide à la marche.
- (1) Incapacité modérée – Peut modifier seulement légèrement sa vitesse de marche, ou peut la faire varier en altérant significativement son patron de marche, ou change sa vitesse de marche mais perd

l'équilibre, ou change sa vitesse de marche tout en étant capable de se reprendre et de poursuivre son déplacement.

(0) Incapacité sévère – Ne peut changer sa vitesse de marche, ou perd l'équilibre et doit étendre la main pour s'appuyer au mur ou doit être soutenu par une personne.

### **\_\_\_ 3. Marche avec rotations de la tête.**

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel. Lorsque je vous dis « regardez à droite », continuez à marcher en ligne droite en tournant la tête vers la droite. Continuez à regarder vers la droite jusqu'à ce que je vous dise « regardez à gauche », continuez à marcher en ligne droite en tournant la tête vers la gauche. Gardez la tête tournée vers la gauche jusqu'à ce que je vous dise « regardez droit devant », continuez à marcher en ligne droite, en ramenant la tête vers l'avant.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

(3) Normal – Peut tourner la tête aisément, sans altération de sa démarche.

(2) Incapacité légère – Peut tourner la tête aisément, en changeant légèrement sa vitesse de déplacement (par exemple, légère altération de son patron de marche), ou utilise une aide à la marche.

(1) Incapacité modérée – Peut tourner la tête en changeant de façon modérée sa vitesse de déplacement, ralentit, chancelle, mais se rattrape et poursuit sa marche.

(0) Incapacité sévère – Accomplit la tâche avec une altération sévère de sa démarche (par exemple, chancelle hors des limites du 15 po, perd l'équilibre, s'arrête ou étend la main pour s'appuyer au mur).

### **\_\_\_ 4. Marche avec déplacements de la tête vers le haut et vers le bas.**

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel. Lorsque je vous dis « regardez vers le haut », continuez à marcher en ligne droite, en penchant la tête vers l'arrière. Continuez à regarder vers le haut jusqu'à ce que je vous dise « regardez vers le bas », continuez à marcher en ligne droite en penchant la tête vers le bas. Gardez la tête penchée vers le bas jusqu'à ce que je vous dise « regardez droit devant », continuez à marcher en ligne droite, en ramenant la tête vers l'avant.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

(3) Normal – Peut pencher la tête vers l'avant et vers l'arrière sans changer sa démarche.

(2) Incapacité légère – Peut faire les mouvements de la tête en changeant légèrement sa vitesse de déplacement (par exemple, légère altération de son patron de marche), ou utilise une aide à la marche.

(1) Incapacité modérée – Peut faire les mouvements de la tête en changeant de façon modérée sa vitesse de déplacement, ralentit, chancelle, mais se rattrape et poursuit sa marche.

(0) Incapacité sévère – Accomplit la tâche avec une altération sévère de sa démarche (par exemple, chancelle hors des limites du 15 po, perd l'équilibre, s'arrête, étend la main pour s'appuyer au mur).

### **\_\_\_ 5. Marche et pivots**

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel. Lorsque je vous dirai « Tournez et arrêtez », tournez le plus rapidement possible pour aller en direction opposée et arrêtez-vous.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

- (3) Normal – Pivote de façon sécuritaire en moins de 3 secondes et s'arrête promptement sans perdre l'équilibre.
- (2) Incapacité légère – Pivote de façon sécuritaire en plus de 3 secondes et s'arrête sans perdre l'équilibre.
- (1) Incapacité modérée – Pivote lentement, nécessite des indications verbales, doit faire de petits pas pour retrouver son équilibre après le pivot et l'arrêt.
- (0) Incapacité sévère – Ne peut pivoter de façon sécuritaire, a besoin d'assistance pour pivoter et s'arrêter.

### **\_\_\_ 6. Marche par-dessus un obstacle**

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel. Lorsque vous arrivez à la boîte de chaussures, enjambez la boîte, ne la contournez pas, et continuez à marcher.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

- (3) Normal – Peut enjambez la boîte à chaussures sans changer sa vitesse de marche; aucun signe de déséquilibre.
- (2) Incapacité légère – Peut enjambez la boîte à chaussures, mais doit ralentir et ajuster ses pas pour la franchir de façon sécuritaire.
- (1) Incapacité modérée – Peut enjambez la boîte à chaussures, mais doit s'arrêter et ensuite l'enjambez. Peut nécessiter des indications verbales.
- (0) Incapacité sévère – Ne peut réussir l'épreuve sans assistance.

### **\_\_\_ 7. Marche en contournant des obstacles**

Consignes : *Marchez à votre rythme habituel. Lorsque vous atteignez le premier cône (à une distance d'environ 1,8 m [6 pieds]), contournez-le par la droite. Lorsque vous atteignez le deuxième cône (1,8 m ou 6 pieds plus loin), contournez-le par la gauche.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

- (3) Normal – Peut contourner les cônes sans changement de vitesse ni perte d'équilibre.
- (2) Incapacité légère – Peut contourner les deux cônes, mais doit ralentir et ajuster ses pas pour les éviter.

(1) Incapacité modérée – Peut contourner les cônes, mais doit ralentir significativement pour accomplir la tâche, ou nécessite des indications verbales.

(0) Incapacité sévère – Ne peut contourner les cônes, entre en collision avec l'un des cônes ou les deux ou encore nécessite une assistance physique.

#### **\_\_\_\_ 8. Escalier**

Consignes : *Montez ces marches comme vous le feriez à la maison (c.-à-d. en utilisant la rampe si vous en avez besoin). En haut de l'escalier, tournez et descendez.*

Cotation : Notez la catégorie la plus basse qui s'applique.

(3) Normal – Alterne les pieds, n'utilise pas la rampe.

(2) Incapacité légère – Alterne les pieds, doit utiliser la main courante.

(1) Incapacité modérée – Dépose les deux pieds sur chaque marche, doit utiliser la main courante.

(0) Incapacité sévère – Ne peut accomplir cette tâche de façon sécuritaire.

**RÉSULTAT TOTAL : \_\_\_\_\_ RÉSULTAT MAXIMAL 24**

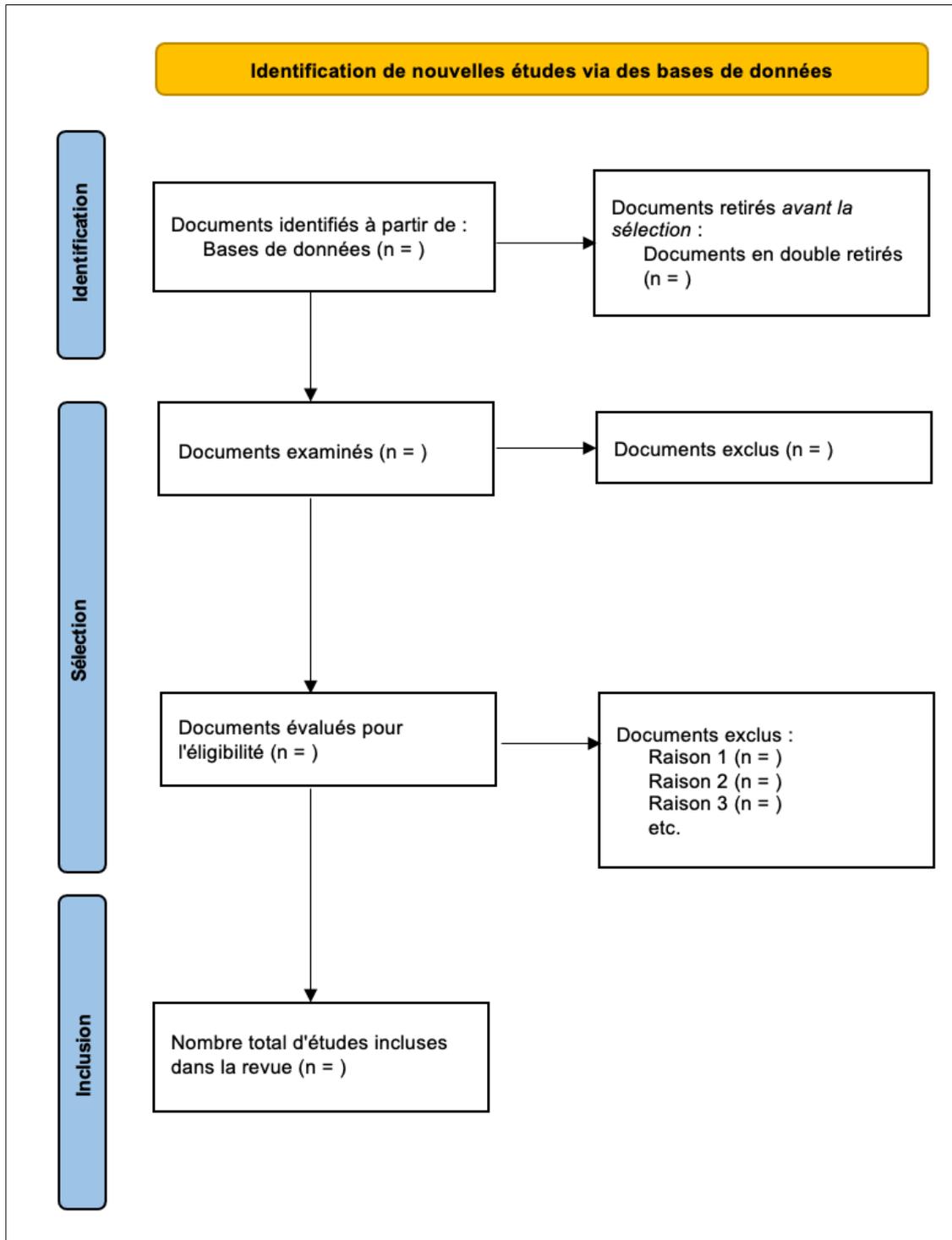
Renseignements sur la cotation :

21 /24 ou plus : indique un risque de chute minimal ou absent

Moins de 21 : indique un risque de chute; plus le score est faible, plus le risque est élevé

9 à 11/24 : indique le score couramment lié au stade modéré de la maladie de Parkinson

Annexe V : Diagramme de flux vierge



## Annexe VI : Échelle PEDro

### Échelle PEDro – Français

- 
- |   |                              |                              |     |
|---|------------------------------|------------------------------|-----|
| 1. les critères d'éligibilité ont été précisés  | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 2. les sujets ont été répartis aléatoirement dans les groupes (pour un essai croisé, l'ordre des traitements reçus par les sujets a été attribué aléatoirement)   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 3. la répartition a respecté une assignation secrète  | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 4. les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants  | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 5. tous les sujets étaient "en aveugle"   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 6. tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle"   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 7. tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels  | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 8. les mesures, pour au moins un des critères de jugement essentiels, ont été obtenues pour plus de 85% des sujets initialement répartis dans les groupes   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 9. tous les sujets pour lesquels les résultats étaient disponibles ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle conformément à leur répartition ou, quand cela n'a pas été le cas, les données d'au moins un des critères de jugement essentiels ont été analysées "en intention de traiter" | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 10. les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
| 11. pour au moins un des critères de jugement essentiels, l'étude indique à la fois l'estimation des effets et l'estimation de leur variabilité   | non <input type="checkbox"/> | oui <input type="checkbox"/> | où: |
-

*Selection of patients—exclusion criteria*

All study participants who met the following criteria were excluded from the study: subjects with diabetes; a history of cancer; HIV; neurological, psychiatric or mood disorders; surgery; radiation; or brain trauma. None of the subjects showed liver or renal abnormalities, or were pregnant or breastfeeding. Moreover, patients with neuro-psychiatric disorders (Parkinson's disease, Alzheimer's disease, schizophrenia, multiple sclerosis, and depression), lower respiratory tract and/or lung diseases, active hepatitis, cirrhosis, chronic renal failure, Vitamin B12 deficiency, alcohol or drug abuse, cerebral vascular accidents, insulin-dependent diabetes mellitus, hypothyroidism, or Cushing syndrome were not included in the study. We also excluded all subjects taking drugs that could affect auditory and visuo-vestibular functions.

None of the patients enrolled in the study underwent previous vestibular rehabilitation treatment, and they were all naïve to virtual reality-based procedures.

## Annexe VIII : Précisions sur les exercices de rééducation vestibulaire classique (Giray et al., 2009)

### **Adaptation Exercises**

To improve gaze stability, subjects were initially asked to move their heads in yaw rotation while focusing on a stationary hand-held target, X1 viewing. They then progressed to X2 viewing, in which the target and the head rotated in equal and opposite yaw directions. Exercises were performed in horizontal and vertical planes 3 times a day for 1 minute each.

### **Substitution Exercises**

Patients with little or no vestibular function were taught to substitute vision and somatosensation for their loss of vestibular function. For example, a patient might be instructed to fixate gaze during ambulation to stabilize walking and to decrease veering to the side, or to stand on the foam with EC to keep balance. Substitution exercises could be modified to become increasingly more difficult as the patient improved.

### **Visual Desensitization**

Disturbances that the patients experienced during performance of their daily activities were determined. In patients reporting enhanced sensitivity or poor tolerance to self or visual motion, additional desensitization exercises were added.

### **Balance Exercises**

Patients attempted to restore balance while switching between static (eg, standing) and dynamic movements (eg, walking) by altering visual, somatosensory, and vestibular impulses.

The exercise program consisted of 2 sessions a week for a period of 4 weeks, and each session lasted for approximately 30 to 45 minutes in the rehabilitation unit. All patients in group 1 were followed up once a week by the rehabilitation physician, who reviewed the exercises and made changes together with the physiotherapist.

In addition to the exercise they performed at the hospital, all patients in group 1 were given instructions with diagrams of exercises to be performed twice a day as a home exercise program. Each home program was designed to take approximately 30 to 40 minutes. Home programs consisted of 4 to 5 substitution, habituation, and balance exercises that the patients performed with difficulty at the rehabilitation unit.

During the training period in the hospital, compliance was monitored by a physician and a physical therapist. Home exercises were monitored with a chart that was filled in every day by the patients. Patients in group 2 were not trained or shown any exercises. All patients in group 2 were included in

a personalized vestibular rehabilitation program at the end of the study.

This study was approved by the local ethics committee of our institution, and informed consent forms were obtained from all participants.

## Annexe IX : Score DGI de l'étude de (Viziano et al., 2019)

**Table 1.** Significant follow-up between-group effects of otoneurological variables and self-report and performance measures in head-mounted device and vestibular rehabilitation.

	HMD pre	HMD post	HMD 12months	VRT pre	VRT post	VRT 12 months	Between-group effect at 12 months
	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)	Significance
Ipsilesional VOR gain	0.38 (0.04)	0.51 (0.05)	0.71 (0.04)	0.37 (0.04)	0.43 (0.04)	0.64 (0.03)	$F(2, 90) = 21,531; P < 0.001$
Low-frequency interval PS							
CE X	8.53 (1.9)	6.5 (1.44)	6.61 (1.45)	8.41 (1.43)	7.6 (1.58)	8.3 (1.42)	$F(2, 90) = 47,457; P < 0.001$
CE Y	8.36 (1.75)	6.05 (1.51)	6.21 (1.54)	8.19 (1.82)	7.29 (1.86)	8 (1.75)	$F(2, 90) = 97,318; P < 0.001$
OE X	5.55 (0.49)	4.73 (0.55)	4.82 (0.54)	5.66 (0.46)	5.38 (0.46)	5.45 (0.46)	$F(2, 90) = 34,710; P < 0.001$
OE Y	4.79 (0.36)	3.97 (0.41)	4.07 (0.39)	4.66 (0.39)	4.44 (0.34)	4.5 (0.35)	$F(2, 90) = 55,893; P < 0.001$
Surface							
CE	1696.07 (446.38)	1077.59 (341.48)	1108.42 (345.23)	1701.3 (505.33)	1364.96 (452.45)	1436.61 (449.46)	$F(2, 90) = 64,053; P < 0.001$
Length							
OE	644.65 (112.48)	395.63 (98.28)	431.49 (99.21)	639.77 (119.88)	568.52 (112.98)	604.14 (112.75)	$F(2, 90) = 226,66; P < 0.001$
Self-report and performance measures							
DHI—							
physical	16.26 (4.48)	7.13 (2.54)	6.52 (2.01)	15.73 (4.83)	9.73 (3.87)	9.73 (3.87)	$F(2, 90) = 15,335; P < 0.001$
emotional	20.69 (3.49)	10.08 (2.13)	9.47 (2.1)	20.26 (3.48)	13.56 (3.07)	13.56 (3.07)	$F(2, 90) = 41,738; P < 0.001$
functional	18.66 (5.41)	8.86 (2.61)	8.34 (2.14)	19.91 (4.61)	12.43 (3.9)	12.43 (3.9)	$F(2, 90) = 15,013; P < 0.001$
DHI—total	56.6 (5.13)	26.08 (2.92)	24.34 (2.8)	55.91 (5.3)	35.73 (5.88)	35.73 (5.88)	$F(2, 90) = 58,566; P < 0.001$
DGI	14.39 (2.03)	24.69 (1.76)	24.69 (1.76)	13.91 (1.8)	20.65 (1.64)	19.87 (1.8)	$F(2, 90) = 11,510; P < 0.001$
ABC	64.78 (5.44)	78.56 (4.61)	80.04 (4.65)	65.08 (5.75)	73.21 (6.01)	74.33 (5.86)	$F(2, 90) = 31,049; P < 0.001$

CE: closed eyes; OE: open eyes; PS: power spectra; VOR: vestibulo-ocular reflex; DHI: Dizziness Handicap Inventory; DGI: Dynamic Gait Index; ABC: Activities-specific Balance Confidence scale; VRT: vestibular rehabilitation; HMD: head-mounted device.

Mixed-model ANOVA highlighting significant outcomes in otoneurological variables and self-report and performance measures, recorded before (pre) and after (post) treatment and during the follow-up meeting (12 months) in patients undergoing only vestibular rehabilitation (VRT) or the mixed protocol including head-mounted device (HMD). Exact *P* values in the text.

## Annexe X : Demande d'informations par mail

### Request for information on DGI for dissertation physiotherapy



VILET LEA p1911602

ven. 15/03, 18:35

andrea.viziano@gmail.com ✉

↳ Répondre à tous | ▼

Dear Sir,

I am Léa VILET, currently in my final year of physiotherapy studies. For my dissertation, I am conducting a literature review focusing on the application of virtual reality in vestibular rehabilitation. I have chosen to analyze your article titled "Long-term effects of vestibular rehabilitation and head-mounted gaming task procedure in unilateral vestibular hypofunction: a 12-month follow-up of a randomized controlled trial." (2019).

As part of my review, I am delving into the results of your study. Specifically, I am interested in discussing the Dynamic Gait Index (DGI). In your methodology, you define the DGI as a measure assessing functional balance during walking, with scores ranging from 0 to 24. However, upon examining Table 1 of your article titled "Significant follow-up between-group effects of otoneurological variables and self-report and performance measures in head-mounted device and vestibular rehabilitation," I noticed that the mean DGI score for the Head-Mounted Device (HMD) group at both post-treatment and follow-up is reported as 24.69.

Given that the maximum attainable DGI score is 24, I am perplexed by how the mean DGI score could exceed this threshold. I would greatly appreciate it if you could provide clarification on this matter.

Thank you for your attention to this inquiry. I eagerly await your response.

Best regards,

Léa VILET

## Annexe XI : Données de posturographie de la surface et la longueur en condition les yeux fermés de l'étude de (Micarelli et al., 2019)

**Table 2**

Pre- post-treatment within-subjects effect of main otoneurological measures in UVH Older Adults and patients with Mild Cognitive Impairment undergoing vestibular rehabilitation or HMD + vestibular rehabilitation protocol.

	VR Older Adults				VR MCI				HMD + VR Older Adults				HMD + VR MCI			
	Pre-treatment		Post-treatment		Pre-treatment		Post-treatment		Pre-treatment		Post-treatment		Pre-treatment		Post-treatment	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
PS LF EC X	<b>8.75</b>	1.9	<b>6.38</b>	1.51	<b>10.19</b>	0.83	<b>8.98</b>	0.7	<b>8.32</b>	1.94	5.12	1.29	<b>10.83</b>	1.06	<b>8.65</b>	1.2
PS LF EC Y	<b>8.15</b>	2	<b>5.62</b>	1.69	<b>10.21</b>	0.89	<b>8.86</b>	1.02	<b>8.63</b>	1.51	5.03	0.71	<b>10.75</b>	1.33	<b>8.52</b>	1.47
PS LF EO X	<b>5.94</b>	0.61	<b>4.41</b>	0.58	<b>6.87</b>	0.86	<b>5.73</b>	0.81	<b>6</b>	0.57	3.1	0.5	<b>6.91</b>	0.86	<b>4.88</b>	0.68
PS LF EO Y	<b>5.13</b>	0.53	<b>3.79</b>	0.54	<b>5.7</b>	0.55	<b>4.62</b>	0.5	<b>5.03</b>	0.47	2.82	0.32	<b>5.77</b>	0.57	<b>4.17</b>	0.43
PS MF EC X	0.57	0.03	0.64	0.05	0.62	0.02	0.64	0.02	0.57	0.04	0.64	0.02	0.61	0.01	0.64	0.01
PS MF EC Y	0.5	0.02	0.55	0.02	0.54	0.01	0.56	0.01	0.51	0.02	0.55	0.01	0.55	0.01	0.57	0
PS MF EO X	0.31	0.02	0.38	0.02	0.33	0.01	0.37	0.01	0.31	0.02	0.39	0.02	0.33	0.02	0.36	0.01
PS MF EO Y	0.22	0.01	0.28	0.02	0.23	0.01	0.27	0.01	0.22	0.01	0.29	0.01	0.24	0.01	0.26	0.01
PS HF EC X	1.18	0.12	1.13	0.13	1.14	0.09	1.09	0.08	1.07	0.1	1.14	0.11	1.22	0.04	1.1	0.06
PS HF EC Y	1.07	0.12	1	0.08	1.14	0.08	1.08	0.08	1.06	0.12	0.99	0.1	1.1	0.06	1.06	0.06
PS HF EO X	1.07	0.12	0.98	0.11	1.08	0.06	1.03	0.06	1.02	0.21	0.97	0.19	1.12	0.03	1.05	0.04
PS HF EO Y	0.91	0.14	0.84	0.13	0.99	0.06	0.95	0.06	0.92	0.16	0.83	0.15	0.95	0.02	0.91	0.03
Surface EO	<b>721.36</b>	<b>188.75</b>	<b>499.72</b>	<b>210.67</b>	<b>918.81</b>	<b>2062.83</b>	<b>703.12</b>	<b>1855.42</b>	<b>773.4</b>	<b>272.5</b>	<b>481.86</b>	<b>236.61</b>	<b>865.59</b>	<b>165.8</b>	<b>591.06</b>	<b>173.26</b>
Surface EC	<b>1742.83</b>	<b>323.98</b>	<b>1154.44</b>	<b>214.79</b>	<b>183.81</b>	<b>287.87</b>	<b>133.83</b>	<b>280.88</b>	<b>1645.06</b>	<b>563.39</b>	<b>831.94</b>	<b>357.51</b>	<b>2121.06</b>	<b>346.42</b>	<b>1537.84</b>	<b>327.36</b>
Length EO	<b>654.89</b>	<b>109.42</b>	<b>407.92</b>	<b>99.55</b>	<b>768.47</b>	<b>1100.35</b>	<b>633.98</b>	<b>968.85</b>	<b>633.49</b>	<b>120.01</b>	<b>338.51</b>	<b>93.19</b>	<b>743.58</b>	<b>125.18</b>	<b>550.21</b>	<b>101.68</b>
Length EO	<b>942.01</b>	<b>190.5</b>	<b>642.31</b>	<b>180.9</b>	<b>105</b>	<b>126.58</b>	<b>110.16</b>	<b>108.4</b>	<b>996.85</b>	<b>173.22</b>	<b>471.91</b>	<b>113.8</b>	<b>1165.9</b>	<b>125.65</b>	<b>807.33</b>	<b>192.89</b>
VOR gain of the affected side	0.63	0.03	0.71	0.03	0.62	0.03	0.67	0.02	0.63	0.05	0.74	0.05	0.65	0.03	0.72	0.03

Significant changes in main otoneurological measures before and after vestibular rehabilitation (VR) or head-mounted displays (HMD) + VR protocol in unilateral vestibular hypofunction (UVH) Older Adults and patients with Mild Cognitive Impairment (MCI). PS, power spectra; LF, low frequency interval; MF, middle frequency interval; HF, high frequency interval; EO, eyes open; EC, eyes closed; X, X plane; Y, Y plane; VOR, vestibulo-ocular reflex; DHI, Dizziness Handicap Inventory; P, Physical; E, Emotional; F, Functional; DGI, Dynamic Gait Index; ABC, Activities-specific Balance Confidence scale; SSQ, Simulator Sickness Questionnaire; N, Nausea; O, Oculomotor Stress; D, Disorientation; SD, standard deviation. In bold significant within-subjects changes.

