

# **Approches innovantes pour la prise en charge des patients atteints de troubles vestibulaires chroniques : indicateurs de suivi et marqueurs prédictifs pour l'étude du signal d'erreur vestibulaire**

Frédéric Xavier<sup>1,2\*</sup>, Emmanuelle Chouin <sup>2</sup>, Brahim Tighilet <sup>1,2</sup>, Christian Chabbert <sup>1,2</sup>, Stéphane Besnard <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Unité de Neurosciences Sensorielles et Cognitives LNC UMR 7231 CNRS, Aix-Marseille Université, Marseille, France

<sup>2</sup> Unité de Physiopathologie et Thérapie des Troubles Vestibulaires GDR 2074, Aix-Marseille Université, Marseille, France

<sup>3</sup> UNICAEN, INSERM U1075, COMETE, Normandie Université, Caen, France

## **Introduction :**

Malgré des avancées significatives dans la compréhension des impacts biochimiques, anatomiques et fonctionnels des lésions vestibulaires, le développement de stratégies de réadaptation standardisées et efficaces pour les patients ne répondant pas aux thérapies conventionnelles reste un défi. Les troubles vestibulaires chroniques, caractérisés par des déséquilibres permanents ou récurrents et une vision floue ou oscillopsie, présentent une complexité importante dans la prise en charge non pharmacologique. L'interaction complexe entre les lésions vestibulaires périphériques et leur impact sur le système nerveux central (SNC) soulève des questions sur la neuroplasticité et la capacité de compensation vestibulaire. Bien que la recherche fondamentale ait examiné les conséquences des lésions sur le système vestibulaire, l'effet d'un signal d'erreur vestibulaire périphérique chronique (VES) sur le SNC reste sous-exploré. Le VES fait référence à l'écart entre les attentes sensorielles et les perceptions du système vestibulaire et a été clarifié par des études d'ingénierie récentes. Cette compréhension plus approfondie du VES est cruciale non seulement pour la physiologie et la pathologie vestibulaires, mais aussi pour la conception de mesures et de méthodes efficaces de réadaptation vestibulaire, mettant en lumière l'importance des mécanismes de compensation et de l'intégration sensorielle.

## **Méthodes :**

Cette étude rétrospective, ciblant des patients atteints de vestibulopathie périphérique unilatérale chronique insensible aux traitements standards, visait à exclure toute interférence due à des conditions préexistantes. Les participants ont été évalués avant et après un programme intégratif d'exploration et de rééducation vestibulaires au moyen de questionnaires, de tests posturographiques et de vidéonystagmographie.

## **Résultats :**

Les résultats indiquent des améliorations significatives de la stabilité posturale et de la qualité de vie, démontrant une modulation positive du SNC et une amélioration de la compensation vestibulaire.

## **Discussion :**

Une rééducation vestibulaire réussie nécessite probablement une approche multidimensionnelle qui intègre les dernières connaissances en matière de neuroplasticité et d'intégration sensorielle, adaptée aux besoins spécifiques et à la progression clinique de chaque patient. En se concentrant sur

la compensation du VES et l'amélioration de l'intégration sensori-perceptivo-motrice, cette approche vise non seulement à adapter les interventions, mais également à renforcer la cohérence entre les systèmes vestibulaire, visuel et neurologique, améliorant ainsi la qualité de vie des personnes atteintes de troubles vestibulaires chroniques.

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte et justification de l'étude

Les troubles vestibulaires chroniques (TSC) se manifestent par des symptômes non spécifiques tels que des déséquilibres, des visions floues perçues lors de mouvements de soi ou de l'environnement, et des troubles de la perception ou même de la mémoire spatiale. Ils posent un défi clinique important touchant une large partie de la population ( 1 , 2 ). Si les causes périphériques de ces troubles sont souvent identifiées initialement, l'impact de ces déficiences périphériques sur le système nerveux central (SNC), en particulier sur les régions associées au système vestibulaire, principalement les fonctions multisensorielles du cortex temporo-pariétal, reste peu exploré en pratique clinique. Cette interaction complexe met en évidence des questions clés sur la neuroplasticité de l'intégration vestibulaire, visuelle et somesthésique, et sur les stratégies adaptatives du cerveau aux troubles sensoriels et aux techniques de rééducation vestibulaire.

Néanmoins, les interactions et les plaintes récurrentes des troubles visuels observés dans la VPC sont également remises en question dans la littérature. Roberts et al. ( 3 ) ont mis en évidence une modification significative du cortex visuel primaire V1 chez des patients souffrant de névrite vestibulaire chronique lors de stimulations visuo-vestibulaires congruentes. Cette découverte suggère que les mécanismes adaptatifs associés au cortex visuel primaire jouent un rôle crucial dans la compensation centrale et, par extension, dans les résultats cliniques chez ces patients. Cette observation est renforcée par Beh ( 4 – 7 ), qui souligne le rôle pivot des informations vestibulaires dans les processus cognitifs, en particulier les capacités visuo-spatiales, et comment les troubles vestibulaires peuvent conduire à des déficits visuo-spatiaux via des lésions des composantes corticales et sous-corticales du système vestibulaire. Enfin, Cousins et al. ( 8 ) rappellent que la dépendance visuelle fait partie des symptômes prédictifs de chronicité les plus importants.

Xavier ( 9 , 10 ) propose de considérer la perturbation de l'intégration du signal d'erreur vestibulaire périphérique (VES), notamment à un niveau seuil subliminal, qui pourrait influencer, d'une part, les adaptations visuo-oculomotrices à court et moyen terme, et d'autre part, la plasticité neuronale et la mise en place de processus de compensation optimaux suite à une VES subie par le SNC à long terme. À ce stade, il est important de comprendre que la fusion visuelle est un processus complexe qui permet au cerveau humain de combiner les images des deux yeux en une seule image tridimensionnelle cohérente. Ce phénomène, crucial pour la perception spatiale, repose sur le respect de deux concepts fondamentaux : l'horoptère et l'aire de Panum. Cependant, cette synergie visuelle peut être compromise dans des conditions pathologiques, notamment dans le cadre d'une asthénopie vestibulaire ( 11 ). L'horoptère est une construction géométrique qui définit la région de

l'espace où les images projetées sur les rétines des deux yeux se chevauchent exactement, assurant une correspondance rétinienne normale et une vision binoculaire optimale pour la fusion et la vision stéréoscopique. Tout écart par rapport à cet alignement entraîne un décalage de l'horoptère, entraînant une perception d'une image sans relief, floue ou, dans les cas extrêmes, double. L'aire de Panum, également appelée « zone de fusion », est la zone autour de l'horoptère où la fusion binoculaire est encore possible malgré de légers décalages entre les images rétinienne (12). Cette zone joue un rôle essentiel dans la perception tridimensionnelle, car elle permet une certaine tolérance aux variations de position de l'objet observé. Nous avons démontré qu'un signal d'erreur vestibulaire (VES) peut entraîner une adaptation subtile du comportement oculomoteur impliquant une anomalie de correspondance rétinienne. Cela se manifeste par des symptômes tels qu'une fatigue visuelle, une vision floue et, dans les cas extrêmes, une diplopie intermittente, notamment lorsque l'objet de fixation bouge ou lorsque l'individu est soumis à des mouvements corporels complexes. Cette condition est appelée asthénopie vestibulaire.

C'est dans ce contexte de recherche autour de la VPC que nous avons mené une étude rétrospective au sein d'un centre de kinésithérapie en partenariat avec le Centre Hospitalier de Caen.

## 1.2 Signal d'erreur vestibulaire et hypothèse de recherche

Le « signal d'erreur vestibulaire » (VES) désigne un écart entre les informations sensorielles attendues et celles perçues par le système vestibulaire, qui joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre et de la perception spatiale. Cet écart peut résulter de dommages ou de dysfonctionnements au niveau de composants périphériques ou centraux du système vestibulaire. Ce concept, déjà présent dans la littérature des années 1980 (13) a été enrichi par de nombreux travaux réalisés tant en ingénierie que dans le modèle humain. Les modèles mathématiques d'intégration du signal ont permis de mieux comprendre la notion d'erreur dans les systèmes de mesure due au bruit (signaux indésirables), conduisant à des différences et donc à des erreurs entre la grandeur de sortie et la grandeur d'entrée à mesurer, notamment dans les situations de mesure dynamique où les erreurs quadratiques moyennes prennent en compte à la fois les erreurs dynamiques et statiques (14).

### 1.2.1 Interaction multisensorielle et adaptation du système nerveux central

Ces nombreuses observations, tant en recherche fondamentale que clinique, indiquent que le système vestibulaire a tendance à interagir avec les événements visuels et somatosensoriels. Par exemple, Angelaki et Cullen (15) ont souligné comment les signaux vestibulaires contribuent à une étonnante gamme de fonctions cérébrales, de la perception spatiale à la coordination motrice. Chang et al. (16) ont examiné comment l'intégration des signaux auditifs et vestibulaires nécessite leur perception simultanée malgré leur arrivée asynchrone au système nerveux central, proposant un mécanisme pour expliquer les symptômes chez les patients présentant un déséquilibre. Ferré et al. (17) ont démontré comment la stimulation vestibulaire module différemment deux sous-modalités du système somatosensoriel, augmentant la sensibilité au toucher tout en réduisant la sensibilité aux entrées nociceptives. Les mêmes auteurs en 2015 (18) ont montré comment la stimulation

vestibulaire interagit avec les événements visuels et somatosensoriels dans une tâche de détection, soulignant le rôle vestibulaire dans la régulation du gain somatosensoriel.

### 1.2.2 Intégration visuo-vestibulaire et réponses motrices

Shayman et al. (19) ont exploré l'hypothèse selon laquelle les déficits vestibulaires pourraient perturber l'intégration temporelle visuo-vestibulaire, en déterminant les relations entre le seuil de perception vestibulaire et la fenêtre de liaison temporelle chez des participants ayant une fonction vestibulaire normale et hypo-fonctionnelle. Dans ce contexte, l'hypothèse selon laquelle le système nerveux central jouerait un rôle crucial dans le maintien de certains symptômes subtils semble pertinente. Nous savons que le système nerveux central traite les écarts entre les mouvements attendus et les sensations réelles. Par exemple, lorsqu'une personne bouge ou tourne la tête, le système vestibulaire anticipe les changements de perception sensorielle en fonction des mouvements planifiés (15). Si les signaux sensoriels réels diffèrent de ces attentes, un signal d'erreur est généré. Ce signal d'erreur est ensuite utilisé pour ajuster les réponses motrices et améliorer la précision des mouvements futurs, ainsi que pour mettre à jour la perception sensorielle et la représentation spatiale (20, 21). Mais face à un système nerveux périphérique chronique, notre hypothèse est que les mécanismes d'intégration sensorielle et de traitement des signaux d'erreur sont significativement altérés. Alberts et al. (22) offrent un aperçu de la façon dont le système nerveux périphérique influence les niveaux de bruit des signaux otolithiques et somatosensoriels en fonction de l'inclinaison du corps, ce qui entraîne des changements dynamiques dans les poids des entrées sensorielles avec l'angle d'inclinaison. Cela met en évidence un changement dans la dépendance sensorielle, où les organes otolithiques sont plus influents autour des positions verticales, et les entrées somatosensorielles deviennent plus critiques lors d'inclinaisons corporelles plus importantes. Forbes et al. (23) ont exploré plus en détail la façon dont le système nerveux périphérique affecte les réponses motrices, montrant qu'il modifie l'ampleur des réponses musculaires pour s'aligner sur l'erreur vestibulaire et la direction de l'équilibre. Cette flexibilité dans les ajustements des commandes motrices en réponse aux troubles vestibulaires indique l'adaptabilité du système. Rideaux et al. (24) se penchent sur l'impact du système nerveux périphérique sur l'intégration sensorielle, démontrant comment il conduit à une repondération sensorielle et influence l'équilibre de l'activité entre les neurones congruents et opposés.

### 1.2.3 Implications cliniques et protocole de rééducation

Cela affecte le processus de décision sur la combinaison ou la séparation des signaux multisensoriels, soulignant la capacité du cerveau à s'adapter aux erreurs vestibulaires pour une estimation précise du mouvement. Cela suggère que les VES périphériques chroniques perturbent non seulement l'intégration sensorielle et l'adaptation de la réponse motrice, mais ont également un impact sur la capacité à gérer les inadéquations visuo-vestibulaires, ce qui peut entraîner des maux de tête et des étourdissements. Ainsi, après une VES chronique, les adaptations nécessaires pour naviguer et interagir efficacement avec notre environnement seraient mal ajustées, et les prédictions et réponses basées sur des flux d'informations sensorielles complexes et souvent contradictoires seraient inadéquates. Cette inadéquation peut entraîner une variété de symptômes persistants dans le CVS, notamment des étourdissements, des instabilités, des désorientations spatiales et des difficultés à exécuter des mouvements précis et coordonnés. L'impact de ces altérations sur la vie

quotidienne des patients peut être considérable, affectant non seulement leur capacité à effectuer des tâches ordinaires, mais aussi leur bien-être psychologique. Pour répondre à ces observations, nous avons entrepris la création d'un programme de rééducation vestibulaire basé sur une approche intégrative impliquant l'identification clinique et instrumentale du type de SVE (irritatif ou déficient) et la recherche de marqueurs de suivi dédiés au type de SVE. L'iVRT aborde les troubles vestibulaires en considérant l'individu dans sa globalité, incluant des interventions sur les systèmes moteur, oculomoteur, cognitif et émotionnel. En plus des exercices vestibulaires, le traitement intègre l'évaluation et la rééducation de la colonne cervicale pour améliorer la coordination sensorimotrice, les approches maxillo-faciales pour réduire la tension musculaire et améliorer la proprioception, et l'apprentissage de stratégies pour améliorer les performances d'équilibre dynamique et la stabilité. La performance neurovisuelle, qui relie la vision et l'équilibre, est également un point focal, avec des séquences de rééducation spécifiques si des anomalies sont détectées. De plus, l'approche aborde les aspects psychiques et émotionnels, en reconnaissant l'impact de la cognition et de l'état émotionnel sur l'équilibre physique et en utilisant des techniques d'évaluation et de gestion psycho-comportementales (Tableau 1).

#### Tableau 1

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

#### Tableau 1. Séquence de rééducation.

La thérapie iVRT s'articule autour de quatre piliers principaux : l'évaluation globale des capacités et des dysfonctionnements du patient, le traitement personnalisé, le suivi régulier pour ajuster le traitement et enfin, la définition de critères d'arrêt en fonction d'indicateurs de succès ou d'échec. Les séquences de traitement détaillées dans le tableau 1 sont déterminées suite à l'évaluation initiale.

« Chaque séance de traitement est personnalisée selon deux principes directeurs : répondre aux plaintes spécifiques du patient et être guidé par des indicateurs instrumentaux spécifiques présents dans la littérature pour lesquels nous avons construit un arbre de décision Figure 1, (9, 10). "Cette stratégie adhère au modèle de traitement diagnostique, garantissant une approche ciblée et réactive des soins aux patients. Au cours de ces soins, nous avons recherché des indicateurs liés à des changements statistiquement significatifs (indicateurs de suivi). Enfin, nous avons évalué rétrospectivement s'il existe des marqueurs prédictifs d'instabilité posturale et des marqueurs prédictifs de la variation de l'exactitude et de la précision de la verticale visuelle subjective (25).

#### Figure 1

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 1. Arbre décisionnel (deux parties). Cette figure illustre les différents symptômes rapportés par les patients atteints de troubles vestibulaires chroniques. Une évaluation initiale complète est réalisée au début du traitement et les principaux domaines d'intérêt sont déterminés en fonction des

symptômes les plus invalidants pour le patient. Au début de chaque semaine, un dépistage des plaintes (symptômes) est effectué. Pour chaque plainte, une évaluation est effectuée et le traitement est ajusté en fonction des résultats. VNGk : vidéonystagmographie cinétique, DVA : acuité visuelle dynamique, VHIT : test d'impulsion vidéo de la tête, VOMS : dépistage oculomoteur vestibulaire.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Objectifs de la recherche et conception de l'étude

Cette étude rétrospective a pour objectif d'identifier des marqueurs de surveillance et prédictifs chez des patients souffrant de vestibulopathie périphérique unilatérale chronique réfractaire aux thérapies conventionnelles depuis plus d'un an. Réalisée de novembre 2021 à mars 2022, notre recherche s'est focalisée sur des indicateurs clés issus de questionnaires et d'évaluations instrumentales pour approfondir la compréhension de la pathologie vestibulaire chronique. Le protocole a été approuvé par le comité d'éthique du CHU de Caen, numéro d'accréditation 2 796, et a été réalisé dans le respect des normes de confidentialité et de consentement.

### 2.2 Matériels et méthodes

#### 2.2.1 Participants

L'étude a inclus des patients atteints de vestibulopathie périphérique unilatérale chronique depuis un an ou plus et n'ayant pas répondu au traitement de rééducation. Le suivi de rééducation de ces patients a été réalisé dans une clinique de physiothérapie spécialisée en rééducation vestibulaire située à Vitro Iles (13,127, France). Pour assurer la fiabilité et la précision des données recueillies, les critères d'inclusion ont été méticuleusement définis, en s'appuyant sur des évaluations cliniques et instrumentales complètes.

Les critères d'exclusion ont été soigneusement choisis pour éliminer toute variable susceptible de biaiser les résultats de l'étude. Ces critères comprenaient :

- Troubles de la vision binoculaire ou stéréoscopique : incluant la neutralisation, l'amblyopie (mauvaise vision dans un œil non corrigé dans l'enfance), l'anisométrie (différence de puissance réfractive entre les deux yeux) et tous les types de strabisme, incluant le microstrabisme, où le désalignement des axes visuels est minime mais peut affecter la perception de la profondeur.
- Troubles psychiatriques diagnostiqués avant l'apparition des problèmes vestibulaires pour éliminer les interférences potentielles des conditions psychiatriques préexistantes qui pourraient influencer les symptômes vestibulaires ou leur gestion.
- Affections neurologiques vasculaires, dégénératives et inflammatoires affectant les fonctions centrales diagnostiquées avant les soins de réadaptation.
- Les affections neurologiques susceptibles d'avoir un impact sur le système nerveux central et, par conséquent, de perturber l'évaluation de la vestibulopathie périphérique ont été exclues afin de purifier l'échantillon de recherche des influences externes qui pourraient altérer la précision de l'analyse des résultats.

### 2.2.2 Procédures expérimentales

Français Les participants ont été évalués avant et après le traitement à l'aide de questionnaires (tableaux supplémentaires S1–S5) créés à partir de la littérature des patients vestibulaires pour évaluer i/le handicap et la qualité de vie : l'inventaire du handicap dû aux vertiges [DHI (26)], le questionnaire abrégé (27) sur la santé [SF36 (28, 29)];, ii/les traits de personnalité avec le Big Five Inventory [BFI (30)];. Notre batterie de questionnaires comprenait également le test d'émotivité positive et négative en 31 points [EPN31 (31) ;] et le questionnaire sur la santé vestibulaire que nous avons développé (VestiQ-VS ; Xavier et al. 2023 en cours de soumission). Français De plus, une série d'exams instrumentaux comprenait : i/ un test d'organisation sensorielle issu de la posturographie, développé par Synapsys, comprenant une analyse spécifique appelée évaluation de l'organisation sensorielle ( tableau supplémentaire S6 ), ii/ la vidéonystagmographie (VNG thermique et cinétique) développée par Synapsys, et l'étude de la verticale visuelle subjective (VVS) iii/ les tests d'optométrie suivants : pour l'évaluation de l'acuité visuelle de près et de loin, l'utilisation des échelles de Monoyer et de Parinaud ; pour l'évaluation de la capacité de convergence et de divergence, la barre prismatique (PB) ; pour l'évaluation de la fusion, la planche de Mawas ; pour l'évaluation des capacités d'accommodation [ou point d'accommodation de près (NPA)] et de convergence [ou point de convergence de près (NPC)], l'utilisation de la barre d'accommodation ; pour l'évaluation de la vision stéréoscopique de loin, le test de vision stéréoscopique de Thomas (TVST) ; et pour évaluer le degré de vision binoculaire et de vision binoculaire simple d'un patient, le test à quatre lumières de Worth ; toutes ces évaluations permettant une approche englobant les aspects somato-perceptivo-visuo-oculomoteurs et somato-perceptivo-moteurs sous la régulation du contrôle vestibulaire ( 32 – 36 ).

### 2.2.3 Indicateurs étudiés

Une analyse détaillée des indicateurs suivants a été réalisée :

#### 2.2.3.1 Analyse posturographique Synapsys

Le test d'organisation sensorielle (SOT) dispose d'un standard instrumental développé au laboratoire de neurosciences cognitives du campus St Charles, Aix Marseille Université. Il est établi à partir des limites de stabilité et des conditions du SOT [Tableaux supplémentaires S6 et S7 (27)].

Le calcul de l'énergie totale, évaluant la stabilité posturale, est basé sur l'enregistrement de la trajectoire du centre de pression (CoP), représentant le mouvement du centre de gravité du corps sur la surface d'appui (37). La vitesse du CoP est calculée dans deux directions (antéro-postérieure et latérale), ce qui donne deux ensembles de données. La variance de ces vitesses est ensuite calculée pour chaque direction, et l'énergie totale est obtenue en combinant ces variances. Une valeur d'énergie totale élevée indique une moindre stabilité posturale, tandis qu'une valeur faible suggère une meilleure stabilité.

Var(APd) représente la variance de la vitesse du CoP dans la direction antéro-postérieure (APd),

Var(MLd) représente la variance de la vitesse CoP dans la direction latérale (MLd).

### 2.2.3.2 Indicateurs de vidéonystagmographie cinétique (VNG)

Français Le modèle utilisé comprend un système de vidéonystagmographie et un fauteuil rotatif électronique (type Met4). Nous avons exploité les indicateurs obtenus lors du test cinétique Met4 en rafale (test sinusoïdal à 0,25 Hz) en étudiant le réflexe visuo-vestibulo-oculaire (test yeux ouverts sans fixation ; VVOR), le réflexe vestibulo-oculaire (test yeux fermés ; VOR), le réflexe vestibulo-oculaire en double tâche [test yeux fermés combiné à une tâche de calcul mental (addition et soustraction aléatoires incluant des nombres entre 1 et 100) ; VOR2], l'indice de fixation oculaire (test avec fixation visuelle ; OFI) et le réflexe cervico-oculaire [test avec stabilisation de la tête (seul le torse effectue le mouvement sinusoïdal ; COR)]. Les normes sont présentées dans le Matériel supplémentaire, Tableau S8 . Les standards VNG Synapsys sont des normes développées par le fabricant et sont documentées dans la documentation technique interne non indexée (38).

### 2.2.3.3 Indicateurs de vidéonystagmographie bithermique (VNGt)

Les indicateurs enregistrés lors du test bithermique étaient la prépondérance nystagmique absolue, la réflectivité du côté opposé à la lésion et le déficit ipsilatéral à la lésion. Les normes sont disponibles dans le tableau supplémentaire S8 (38).

### 2.2.3.4 Indicateur composite « état de la rémunération » (SoC)

Français Nous avons développé un indicateur pour cette étude afin de classer les profils vestibulaires par vidéonystagmographie bithermique (VNGt), comprenant : i/ Profil Non Inhibé (N) avec une réflectivité controlatérale  $\geq 15^\circ/s$  et un déficit vestibulaire ipsilatéral  $\leq 30\%$ , indiquant une réactivité controlatérale préservée malgré un déficit mineur, donc sans modulation de l'arc sous-cortical ; ii/ Profil d'Inhibition Controlatérale Partielle (P) lorsque la réflectivité controlatérale est de l'ordre de  $[2^\circ/s ; 15^\circ/s]$  avec un déficit ipsilatéral de l'ordre de  $[30\% ; 70\%]$ , montrant une compensation partielle ; iii/ Profil d'Inhibition Controlatérale Totale (T) défini par une réflectivité  $\leq 2^\circ/s$  et un déficit ipsilatéral  $\geq 70\%$ , reflétant une inhibition quasi totale de l'entrée périphérique controlatérale associée à une compensation sous-corticale maximale ; iv/ Profil d'inhibition sans déficit (I) avec réflectivité  $\leq 15^\circ/s$  et un déficit ipsilatéral  $\leq 30\%$ , indiquant une réduction de la réactivité controlatérale malgré un déficit mineur. N indique l'absence de modulation de compensation en présence d'une VES de type déficitaire subliminale, P indique une compensation modérée répondant à une VES déficitaire, T indique une compensation forte répondant à une VES déficitaire. I indique une modulation de la réflectivité en présence d'une VES déficitaire maintenue à un niveau subliminal. La réflectivité en vestibulométrie fait référence à la réponse réflexe générée par le système vestibulaire lors d'une stimulation calorique bithermique. La réactivité fait référence à la capacité du système vestibulaire à répondre à la stimulation et à moduler les signaux envoyés au cerveau. Dans le contexte de la vestibulométrie, la réactivité est souvent évaluée en termes de compensation vestibulaire suite à une perte ou un déficit.

### 2.2.3.5 Indicateur composite pour l'étude du signal hyperactif (Hs)

Cliniquement, le SVE irritatif est identifié à partir de trois paramètres : le test de secouage de la tête (HST) qui déclenche un nystagmus battant vers le côté pathologique ; un test cinétique montrant une prépondérance vers le côté pathologique ; et un test calorique montrant un déficit non compensé



(Figure 2A). Le SVE déficient est identifié par un HST déclenchant un nystagmus battant vers le côté sain, un test cinétique montrant une prépondérance vers le côté sain et un test calorique non compensé (Figure 2B).

Figure 2

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 2. (A) En présence d'une VES non compensée résultant d'un défaut de compensation sous-corticale : Le phénomène observé va provoquer un décalage de l'intersection des lignes de réflectivité le long de la ligne de base 1 vers le côté pathologique et un décalage de l'intersection le long de la ligne de base 2 vers le haut, ce qui peut indiquer soit un état incomplet de compensation des noyaux vestibulaires lors d'une stimulation chaude du côté sain, soit un défaut de réflectivité lors d'une stimulation froide du côté pathologique. Un nystagmus révélé battant vers le côté pathologique sera présent (décalage vers le quadrant supérieur gauche du point d'intersection des lignes de réflectivité). (B) En présence d'une VES déficiente compensée : Le phénomène observé va provoquer un décalage de l'intersection des lignes de réflectivité vers le côté pathologique le long de la ligne de base 1 sans décalage parallèle le long de la ligne de base 2. L'intersection des lignes de réflectivité reste sur l'axe horizontal. Un nystagmus révélé battant vers le côté sain sera présent. VES, signal d'erreur vestibulaire ; ligne de base 1, axe de prépondérance directionnelle ; ligne de base 2, axe des réflectivités ; ligne de réflectivité rouge, résultats des stimulations chaudes des oreilles droite et gauche ; ligne de réflectivité bleue, résultats des stimulations froides des oreilles droite et gauche ; RE, oreille droite ; LE, oreille gauche ; RN, nystagmus droit ; LN, nystagmus gauche.

#### 2.2.3.6 Etude de la verticale visuelle subjective et des variables explicatives de son évolution

Nous proposons un nouveau modèle d'analyse pour ce travail. L'objectif est d'offrir à la communauté une nouvelle perspective sur l'examen et l'interprétation de la Verticale Visuelle Subjective (VVS ; Figure 3). Nous avons choisi de réaliser quatre mesures de chaque côté pour le test statique et six pour le test dynamique car lors de nos essais préliminaires, nous avons constaté que les variations de mesures pour certains profils VPC, encore mal identifiés, s'aggravaient ou s'amélioraient. Cela indiquait la mise en œuvre de stratégies sensori-perceptives gravitationnelles, que nous soupçonnons d'être liées à la somesthésie et à la graviception.

Figure 3

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 3. Description de l'angle géométrique et de la bissectrice de l'angle modélisés sur les mesures de VVS. Nous procédons à une sélection aléatoire de l'inclinaison initiale. Par exemple, pour une sélection côté droit : nous effectuons une série de 4 mesures avec le patient assis dans l'obscurité, en commençant par le côté droit [figure ligne rouge (A)], suivie de 4 mesures côté gauche [figure ligne bleue (A)]. Chaque point de départ est positionné aléatoirement dans un intervalle de  $[18^\circ ; 22^\circ]$  côté droit et  $[-18^\circ ; -22^\circ]$  côté gauche par rapport à l'axe vertical. En conditions dynamiques, la stimulation optocinétique est initiée à  $20^\circ/s$  dans le sens horaire (flèche verte) pour les mesures commençant par la droite [figure ligne rouge (B)], et dans le sens antihoraire (flèche orange) pour les mesures commençant par la gauche [figure ligne bleue (B)]. Les mêmes principes sont appliqués sauf que nous effectuons 6 mesures de chaque côté. En faisant la moyenne de chaque série, on obtient 2

angles : un en condition statique [figure (A)] et un en condition dynamique [figure (B)]. On trace ensuite la bissectrice de chaque angle (ligne jaune). On évalue le suivi de l'angle géométrique (fermeture = précision accrue ; ouverture = imprécision accrue) et la variation de l'angle de la bissectrice par rapport à la verticale (angle augmenté = précision diminuée ; angle diminué = précision accrue).

Après avoir moyenné les valeurs mesurées, nous avons calculé pour chaque condition statique et dynamique un angle géométrique (SGA et DGA, respectivement) et une bissectrice pour chaque angle obtenu dans les conditions statiques et dynamiques (SBA et DBA, respectivement).

Où:

- $\theta\Delta$  = variation de l'angle  $\theta$ ,
- $\mu$  = moyenne des angles en degrés ( $^{\circ}$ ) des variables SVVI et SVVr,
- SVVI et SVVr = l'ensemble des mesures | pour déterminer l'angle SGA | prises sur le côté droit (SVVstatr) et sur le côté gauche (SVVstatl) ; | pour déterminer l'angle DGA | pris sur le côté droit (SVVdynr) et sur le côté gauche (SVVdynl), valeurs exprimées en degrés ( $^{\circ}$ ),

Où:

- $\theta\Delta$  = variation de l'angle  $\theta$ ,
- $\mu$  = moyenne des angles pris par la bissectrice du degré d'inclinaison ( $^{\circ}$ ) pour les valeurs prises en SVVI et SVVr,
- SVVI et SVVr = l'ensemble des mesures | pour déterminer l'angle SBA | prises sur le côté droit (SVVstatr) et sur le côté gauche (SVVstatl)/2 et | pour déterminer l'angle DBA | prises sur le côté droit (SVVdynr) et sur le côté gauche (SVVdynl)/2, valeurs exprimées en degrés ( $^{\circ}$ ).

Nous avons modélisé l'angle géométrique (Figure 3) obtenu à partir des amplitudes moyennes des scores des tests droit et gauche comme représentant la précision (25). La bissectrice de l'angle modélise la précision. Nous émettons l'hypothèse que la précision n'est pas uniquement liée au modèle interne mais également à l'intégration de l'erreur de mesure. En d'autres termes, deux patients peuvent avoir la même précision (représentée par l'inclinaison de la bissectrice par rapport à la verticale) mais des angles d'ouverture différents (conduisant à des niveaux de précision différents : plus l'angle est obtus, plus la précision est faible).

#### 2.2.3.7 Indicateurs de test d'optométrie à partir des mesures d'acuité visuelle

Nous avons utilisé deux échelles de mesure de l'acuité visuelle : l'échelle de Monoyer (39) pour l'évaluation de l'acuité visuelle de loin (AVD) à 3 mètres et l'échelle de Parinaud pour l'évaluation de l'acuité visuelle de près (AVP) à 40 cm (40).

#### 2.2.3.8 Indicateurs d'étude prismatique (convergence et divergence)

Pour une mesure précise des capacités de convergence et de divergence proches, nous avons adopté l'utilisation d'un prisme barreau (PB), associé à un appareil de mesure spécifique (41). Ce dispositif, constitué d'un casque équipé d'un axe frontal sur lequel est fixée une cible à une distance de 30 cm

du point nasion, assure des mesures uniformes et reproductibles. Le PB, dont les graduations s'étendent de 1 à 40 dioptries, est positionné stratégiquement soit en base nasale pour évaluer les capacités de divergence (PBd) soit en base temporale pour examiner les capacités de convergence (PBc). Les résultats sont enregistrés en dioptries.

#### 2.2.3.9 Indicateurs de test d'optométrie issus des examens du conseil Mawas

Le Mawas Board, connu sous le nom de plaque de Mawas-Weiss, est constitué d'une plaque en carton dont une face est imprimée d'un trait blanc sur fond noir et l'autre face d'un trait noir sur fond blanc (42). Nous avons utilisé ce dispositif pour détecter des troubles de fusion lors des mouvements de vergence. Les mesures ont été prises tous les 5 centimètres de 5 à 40 cm. Une pause de 10 s, les yeux fermés, a été observée entre chaque mesure pour solliciter un mouvement de vergence à partir de la position de repos. Chaque mesure a été prise de manière aléatoire par tirage au sort parmi 4 séquences pour l'évaluation initiale et 3 séquences pour l'évaluation finale (en excluant celle obtenue par tirage au sort lors de la première évaluation). L'objectif était de mimer au plus près la fonction écologique des vergences. La fusion est considérée comme normale lorsque le sujet visualise une croix. Tout autre motif est jugé anormal.

#### 2.2.3.10 Indicateurs de test d'optométrie à partir des mesures des points d'accommodation de près (NPA) et de convergence (NPC)

Nous avons utilisé une barre d'accommodation pour mesurer les NPA positifs (la distance à laquelle l'accommodation focale maximale est atteinte) et les NPC. La distance à laquelle la vision devient floue indique le NPA positif en utilisation monoculaire et le NPC en utilisation binoculaire ( 43 ).

#### 2.2.3.11 Indicateurs de test d'optométrie du test de vision stéréoscopique de Thomas Far (TVST)

Nous avons évalué les capacités de vision stéréoscopique des patients à des distances de cinq et un mètre, à l'aide de quatre stéréogrammes, basés sur le principe des stéréogrammes à points aléatoires de Julesz (44). Les deux premiers, avec une disparité de 250 arcs, présentaient des images d'un cercle et d'une étoile, tandis que les deux derniers, avec une disparité de 300 arcs, représentaient un chat et une voiture. Ces tests ont permis de mesurer la perception de la profondeur et la capacité à distinguer les détails spatiaux à différentes distances.

#### 2.2.3.12 Indicateurs de test d'optométrie du test à quatre points de Worth

Dans notre étude, la lampe de Worth a été utilisée comme outil de diagnostic pour évaluer la perception binoculaire des patients. Cet instrument, constitué d'un système d'éclairage spécifique projetant quatre points colorés (un rouge, deux verts et un blanc) à différentes distances, permet de détecter des anomalies de la vision binoculaire telles que la diplopie ou la suppression d'un œil. L'examen est considéré comme normal lorsque les couleurs générées par les 4 lampes sont perçues de la manière suivante : i/rouge, ii/vert, iii/vert, iv/blanc ou couleur mixte ( 42 ).

#### 2.2.4 Prétraitement des données et analyse statistique univariée

L'analyse statistique a été réalisée selon une stratégie d'intention de traiter, où tous les participants ont été inclus dans l'analyse en fonction de leur affectation initiale au groupe de réadaptation. Pour gérer les valeurs manquantes, nous avons utilisé la méthode d'imputation modale, en remplaçant les

valeurs manquantes par la catégorie la plus fréquente dans notre ensemble de données, garantissant ainsi une intégrité maximale des données. Le traitement des données a été effectué pour déterminer l'évolution avant (A1) et après (A2) la réadaptation avec une valeur p seuil de 0,05. Les indicateurs de succès de la réadaptation sont représentés par l'étude de questionnaires. La recherche d'indicateurs de suivi est représentée par l'étude des données de posturographie, de VSV et de tests d'optométrie.

#### 2.2.4.1 Évaluation des réponses aux questionnaires cliniques

Le test de Shapiro-Wilk a évalué la normalité des scores du questionnaire avant et après l'intervention, permettant l'utilisation du test t de Student ou du test du rang signé de Wilcoxon pour comparer les moyennes, en fonction de la distribution des données.

#### 2.2.4.2 Analyse des indicateurs posturographiques

Nous avons converti les scores posturographiques quantitatifs continus en variables catégorielles, en utilisant des seuils de normalité définis par Synapsys. Les valeurs dépassant ces seuils ont été codées « N » pour normal et « AN » pour anormal. Pour examiner l'évolution de la normalité entre A1 et A2, nous avons créé quatre catégories : « A » pour les variables anormales à la fois en A1 et A2, « B » pour les variables passant d'anormales à normales, « C » pour celles passant de normales à anormales et « D » pour les variables restant normales. Les fréquences de chaque catégorie ont été calculées à l'aide d'un tableau de contingence. Le test de McNemar a été utilisé pour évaluer la significativité statistique des variations.

#### 2.2.4.3 Analyse des indicateurs cinétiques VNG

Une méthodologie statistique a été utilisée pour analyser l'évolution de plusieurs indicateurs, notamment les gains et les prépondérances au VVOR, VOR, OFI, VOR2, COR avant (A1) et après (A2) rééducation. Les données ont été classées en « N » pour normal et « AN » pour anormal selon des seuils spécifiques. Une analyse de fréquence a documenté l'évolution des indicateurs avant et après rééducation. Le test de McNemar a examiné la significativité des changements observés.

#### 2.2.4.4 Analyse du gain VOR2 et COR

Une méthodologie structurée a été appliquée pour analyser l'évolution du gain de VOR2 et COR, avec des classifications basées sur l'amélioration ou la détérioration des mesures. Les tests de Shapiro-Wilk et, selon leurs résultats, le test t de Student ou les tests de Wilcoxon signés ont évalué les différences significatives.

#### 2.2.4.5 Analyse comparative des tendances de gain VOR et VOR2

Une analyse statistique comparative des tendances de gain VOR et de gain VOR2 a été utilisée pour déterminer leur comportement entre A1 et A2. Pour cela, nous avons créé deux variables quantitatives continues nommées :

- varVORg en utilisant les variables VORgA1 et VORgA2 selon l'équation suivante :

varVOR2g en utilisant les variables VOR2gA1 et VOR2gA2 selon l'équation suivante :

Français Les sous-groupes A et D de l'étude d'évolution du gain VOR2 ont été utilisés pour créer deux nouvelles variables catégorielles (varVORgImprovement vs. varVOR2gImprovement et varVORgDeterioration vs. varVOR2gDeterioration) codant l'évolution des gains VOR et VOR2 entre A1 et A2 en 3 catégories : catégorie 1 où  $VORg < VOR2g$ , catégorie 2 où  $VORg$  et  $VOR2g$  observent une légère différence IC  $[-5,0 ; 5,0]$ , et catégorie 3 où  $VORg > VOR2g$ .

#### 2.2.4.6 Analyse de la réflectivité VNG bithermique

Pour étudier l'évolution des indicateurs de vidéonystagmographie bithermique (VNGt) entre les mesures initiales (A1) et finales (A2), une approche statistique en deux phases a été adoptée. Tout d'abord, les variations de ces indicateurs ont été analysées à l'aide de tests statistiques, en classant les données par normalité et en utilisant le test de McNemar pour évaluer les changements de normalité avant et après la rééducation. Ensuite, des sous-groupes d'évolution (« A » pour amélioration, « D » pour détérioration et « I » pour inversion de latéralité) ont été constitués. Le test de Shapiro-Wilk a vérifié la normalité des données et les différences ont été évaluées à l'aide du test du rang signé de Wilcoxon. Des comparaisons entre les mesures A1 et A2 ont été effectuées pour identifier les différences significatives.

#### 2.2.4.7 Analyse des indicateurs composites : état de compensation (SoC) et signal hyperactif (Hs)

Nous avons identifié de manière descriptive différents groupes à partir de ces deux classifications.

#### 2.2.4.8 Analyse de la verticale visuelle subjective (VVS)

Français Les sujets ont été classés selon l'évolution des angles géométriques statiques (SGA) ou dynamiques (DGA) entre A1 et A2 en trois catégories : « D » pour détérioration, « A » pour amélioration et « S » pour stagnation. Cette classification a également été appliquée aux valeurs absolues des angles bissecteurs. Si la valeur absolue de |l'angle bissecteur statique (SBA) ou dynamique (DBA) à A1| était strictement inférieure à |SBA ou DBA à A2|, les sujets étaient classés dans la catégorie « D », si la valeur absolue de |SBA ou DBA à A1| était strictement supérieure à |SBA ou DBA à A2|, les sujets étaient classés dans la catégorie « A ». Le test de Shapiro-Wilk a vérifié la normalité des distributions, avec un seuil de p-value de 0,05 pour distinguer les distributions normales et anormales. Les comparaisons des moyennes entre A1 et A2 pour les variables normalement distribuées ont été réalisées avec le test t de Student en séries appariées, tandis que le test du rang signé de Wilcoxon a été utilisé pour les distributions non normalement distribuées.

#### 2.2.4.9 Analyse des variables explicatives de l'évolution de la VS

Dans cette étude, les groupes ont été définis en fonction de l'évolution de plusieurs indicateurs clés : le gain du réflexe cervico-oculaire (COR), l'état de compensation évalué par vidéonystagmographie thermique (SoC) et la présence d'un signal hyperactif (Hs). Pour analyser la variation et la concentration des données, deux outils statistiques ont été utilisés : le coefficient de variation (CV) et le coefficient de Gini (Cg). Le CV évalue la dispersion des données autour de la moyenne, rendant la comparaison entre les distributions avec des moyennes différentes plus équitable. Un CV plus élevé indique une plus grande dispersion relative. Le Cg mesure la concentration des données, avec des valeurs proches de 0 indiquant une égalité parfaite et des valeurs proches de 1, une concentration élevée. L'utilisation combinée du CV et du Cg permet d'évaluer la variabilité et la concentration au sein des groupes, facilitant ainsi la comparaison de l'homogénéité entre eux.

- $\sigma$  = écart type
- $m$  = moyenne
- $G$  est un nombre compris entre 0 et 1
- $A$  représente l'aire entre la ligne de Lorenz et la ligne d'égalité parfaite
- $B$  représente l'aire totale sous la ligne d'égalité parfaite.

#### 2.2.4.10 Analyse des indicateurs d'optométrie

Pour l'évolution des résultats obtenus dans l'étude de l'acuité visuelle de près (AVP), de l'acuité visuelle de loin (AVD), des tests de convergence/divergence du prisme (PBC/PBD), des points d'accommodation de près (AVP) et du point de convergence de près (NPC) entre A1 et A2, des moyennes ont été calculées. La distribution des données pour la normalité a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. L'analyse statistique des changements observés a été réalisée à l'aide du test de Wilcoxon pour échantillons appariés, adapté aux données non paramétriques.

L'évolution de l'état de normalité des mesures de l'examen du conseil de Mawas, du test de vision stéréoscopique de Thomas (TVST) et du test de Worth a été étudiée, en utilisant le test du Chi carré de McNemar pour évaluer les changements entre A1 et A2.

#### 2.2.5 Prétraitement des données et analyse statistique multivariée

Nous avons utilisé le modèle de régression des moindres carrés ordinaires (OLS) pour analyser l'impact de variables sélectionnées sur les mesures posturographiques et la VSV. Le modèle OLS, avec son équation vise à estimer les coefficients  $b$ , quantifiant l'influence de chaque variable indépendante  $X$  sur la variable dépendante  $Y$ . Cette méthode permet d'identifier des relations causales, contrairement à l'analyse de corrélation qui ne détecte que les co-variations. L'objectif statistique est d'évaluer l'impact d'un ensemble de facteurs explicatifs sur la variation des données posturographiques et de l'angle VVS entre A1 et A2. La variation des mesures posturographiques a été réalisée selon le modèle suivant :

- $\Delta m$  = variation de la mesure
- $ma_1$  = mesure avant iTRV
- $ma_2$  = mesure après iTRV

Pour chaque calcul d'évolution, une variable quantitative a été dérivée, sur laquelle une régression linéaire a été réalisée pour mesurer la causalité des facteurs explicatifs potentiels. Les facteurs prédictifs retenus ont tous été mesurés dans la première période. Douze variations de mesures posturographiques et quatre variations de mesures angulaires ont ainsi été calculées avant qu'un modèle de régression ne soit appliqué à chacune d'elles. En plus des indicateurs à expliquer, l'étude incluait un large ensemble de variables explicatives potentielles. Un processus de sélection de ces facteurs prédictifs a été réalisé en trois étapes.

Premièrement, pour chaque variable à expliquer, une régression linéaire univariée a été réalisée pour chaque variable explicative potentielle. Les variables issues des régressions avec une valeur de  $p$

inférieure à 25 % ont été retenues. Ensuite, la multicollinéarité a été examinée pour éviter de sélectionner des facteurs explicatifs ayant une relation linéaire qui pourraient expliquer la même variation. Pour cela, les facteurs d'inflation de la variance (VIF) ont été calculés pour chaque variable. Toute variable ayant un VIF (ajusté pour les variables qualitatives ayant plus de deux modalités de réponse) supérieur à 5 a été retirée de l'analyse. Enfin, si nécessaire, une procédure d'élimination par étapes a été réalisée pour ne conserver que cinq variables exogènes. Le modèle final retenu était celui composé de cinq variables exogènes et présentant le critère d'information d'Akaike (AIC) le plus faible.

La qualité de tous les modèles a été évaluée par le coefficient de détermination R<sup>2</sup>, qui indique la proportion de variance de la variable expliquée par les variables explicatives du modèle. La signification globale des modèles a été estimée par le test de Fisher, où l'hypothèse nulle suppose qu'aucune des variables n'a d'effet significatif. L'adéquation entre la variable dépendante et chaque variable indépendante a été évaluée par un test t de Student, qui teste l'hypothèse nulle d'absence de relation linéaire entre la variable dépendante et la variable explicative.

### 3 résultats

#### 3.1 Présentation de la cohorte

Au total, 62 patients ont été inclus ( Figure 4 ). Notre échantillon était composé de 45 femmes (72,6%) et 17 hommes (27,4%), avec un âge moyen de 59,4 ans et un écart type de 18,1 ans. La description de l'échantillon est fournie dans le Tableau 2 .

Figure 4

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 4. Organigramme.

Tableau 2

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 2. Caractéristiques de la population étudiée (taille de l'échantillon 62).

Les patients perdus de vue représentaient 6,5 % de la cohorte. Parmi ces patients, le diagnostic a évolué après le début de l'intervention rééducative : deux pour un syndrome de Canvas, cinq et neuf mois plus tard, un pour une ataxie de Friedrich six mois plus tard, et un pour suicide 10 mois après le début du suivi rééducatif. Deux diagnostics de migraine vestibulaire ont été réévalués sept mois et un an plus tard. Le diagnostic initial de vertige paroxystique positionnel bénin (VPPB) récidivant représentait 33,9 % mais était réduit à 1,6 % à la fin de la rééducation. 24,2 % des vertiges vestibulaires indéfinis étaient définis à la fin des soins.

Français Lors de la première crise, 51,6 % de la cohorte ont rapporté avoir ressenti un vertige visuel de type rotationnel, déclenché par le mouvement dans 77,4 % des cas et transitoire dans 54,8 % des cas ; déclenché par la vision dans 38,7 % des cas, par la manœuvre de Valsalva dans 9,7 % des cas et par l'orthostatisme dans 9,7 % des cas. La vision floue induite par le mouvement lors de la première crise était présente chez 11,3 % de la cohorte et est passée à 59,7 % de la cohorte lors de la première

consultation de physiothérapie. Les autres symptômes visuels identifiés lors de l'entretien sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 3. Symptômes visuels rapportés lors de la première consultation de physiothérapie (échantillon de 62).

Français Concernant l'état de santé général, 40,3 % de la cohorte ont connu des troubles du sommeil et 91,9 % ont rapporté une fatigue anormale qui s'est installée progressivement après la première crise. Notamment, avant la première crise (un an après) : 72,6 % de la cohorte avaient des troubles anxieux, parmi eux : 27,4 % ont eu au moins un épisode dépressif et 30,5 % étaient suivis pour un trouble de stress post-traumatique. 1,61 % de la cohorte souffrait de troubles de l'articulation temporo-mandibulaire (ATM) avant la première crise contre 14,5 % à la première consultation ; 1,61 % avaient des lésions du nerf facial contre 9,68 % et 3,13 % souffraient de cervicalgie chronique contre 25,8 %, soit un quart de la cohorte.

### 3.2 Évaluation de l'iTRV : analyse du questionnaire

Tous les résultats sont présentés dans les figures 5 à 9 et tous les résultats statistiques dans le tableau supplémentaire S9 en raison de la densité des données. De manière non conventionnelle pour faciliter l'approche des données, nous présentons une liste issue de l'analyse de la variation des scores qui n'est pas significative ( $p > 0,05$ ) pour les dimensions suivantes : douleur SF36, colère EPN, surprise EPN, extraversion BFI, énergie, enthousiasme, agréabilité BFI, altruisme, affection, conscience BFI, contrôle, contrainte, ouverture BFI, originalité, ouverture d'esprit, mémoire VestiQ-VS et orientation spatiale VestiQ-VS.

Figure 5

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 5. Distribution des scores entre les trois composantes de l'inventaire des handicaps dus aux vertiges (DHI). Rouge : scores à A1 ; Bleu : scores à A2. Les scores les plus élevés indiquent un état plus mauvais de la composante évaluée.

Figure 6

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 6. Distribution des scores sur les huit dimensions du questionnaire SF36. Rouge : scores à A1 ; Bleu : scores à A2. Les scores les plus élevés indiquent un meilleur état de la composante évaluée.

Figure 7

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)



Figure 7. Distribution des scores sur les cinq dimensions du questionnaire EPN-31. Rouge : scores à A1 ; Bleu : scores à A2. Des scores plus élevés indiquent que la composante émotionnelle évaluée est vécue plus fréquemment, et vice versa.

Figure 8

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 8. Distribution des scores sur les cinq dimensions du questionnaire BFI. Rouge : scores à A1 ; Bleu : scores à A2. Plus le score est élevé, plus le trait de personnalité correspondant (extraversion, agréabilité, conscience professionnelle, névrosisme, ouverture à l'expérience) est prononcé, et vice versa.

Figure 9

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 9. Distribution des scores sur les dix dimensions du questionnaire vestiQ-VS. Rouge : scores à A1 ; Bleu : scores à A2. Plus le score est élevé, plus l'état de la composante évaluée est dégradé.

A l'issue de la rééducation vestibulaire intégrative (iVRT) : 79% des patients présentant une fatigue anormale ont amélioré leur score dans la dimension fatigue du questionnaire VestiQ-VS, 78,72% des patients présentant des troubles anxieux ont amélioré leur score de gestion des émotions (questionnaire EPN 31) et ont déclaré avoir amélioré leur état anxieux soit en diminuant la médication soit en reprenant des activités devenues anxiogènes avant la rééducation. Enfin, 75% des patients souffrant de cervicalgies ont amélioré leur score dans la dimension douleur du SF36.

### 3.3 Analyse des indicateurs de suivi instrumental

#### 3.3.1 Analyse des indicateurs posturographiques

L'étude statistique de la variation des scores BOS nous donne des résultats significatifs pour l'évolution de i/ Score vestibulaire en condition de déséquilibre médiolatéral : Chi-carré de McNemar = 4,00, dF = 1, p -value = 0,046 ; ii/ Score composite en condition de déséquilibre médiolatéral : Chi-carré de McNemar = 6,13, dF = 1, p -value = 0,01.

#### 3.3.2 Analyse des indicateurs issus des essais cinétiques VNG

Pour évaluer si la réadaptation avait un impact sur les indicateurs VVOR, VOR, VOR2, COR et OFI, nous avons examiné l'évolution de la normalité (transition vers les normes ou non) de ces indicateurs entre deux points dans le temps : avant (A1) et après (A2) pour la prépondérance et le gain. Aucun résultat n'était statistiquement significatif.

#### 3.3.3 Analyse du gain VOR2 (VOR2g) et du gain COR (CORg)

Trois sous-groupes ont été créés pour l'analyse du gain VOR2 en tant que variable quantitative continue afin d'évaluer la variation du gain VOR2 entre A1 et A2. Groupe A : augmentation n = 22, D : diminution n = 36, S : stabilité n = 0.

- Pour le sous-groupe A :  $V = 0$ ,  $p$ -value =  $1,93e-05$  montre une différence significative entre les moyennes VOR2g à A1 et A2 dans ce sous-groupe. Les différences moyennes (test de Wilcoxon signé) suggèrent une amélioration significative de la moyenne VOR2g après rééducation pour les sujets du sous-groupe A.

- Pour le sous-groupe D :  $t = 8,46$ ,  $df = 37$ ,  $p$ -valeur =  $3,59e-10$  montre également une différence significative entre les moyennes VOR2g à A1 et A2 dans ce sous-groupe. Les différences moyennes suggèrent une détérioration significative de la moyenne VOR2g après rééducation.

Trois sous-groupes ont été créés pour l'analyse du gain numérique de COR en tant que variable quantitative continue afin d'évaluer la variation du gain de COR entre A1 et A2. Groupe A : augmentation  $n = 25$ , D : diminution  $n = 31$ , S : stabilité  $n = 5$ .

- Pour le sous-groupe A (amélioration) :  $V = 496$ ,  $p$ -valeur =  $1,22e-06$ . Une différence significative entre les moyennes de CORg à A1 et A2 pour les sujets classés A est démontrée (test de Wilcoxon signé). Cela suggère une amélioration significative du CORg après rééducation.

- Pour le sous-groupe D (détérioration) :  $V = 0$ ,  $p$ -value =  $8,752e-06$  montre également une différence significative entre les moyennes CORg à A1 et A2 pour les sujets classés D (test de Wilcoxon signé). Cela suggère une détérioration significative du CORg après rééducation.

#### 3.3.4 Analyse comparative des tendances de gain VOR (VORg) et VOR2 (VOR2g)

Parmi les patients présentant une variation statistiquement significative du gain VOR2 ( $n = 43$ ), deux groupes d'évolution ont été observés : groupe A : groupe observant une augmentation du gain VOR2, et groupe D : groupe observant une diminution du gain VOR2.

Dans chaque groupe, 3 comportements ont été identifiés :

- Groupe A  $n = 24$  : condition 1 ( $VORg < VOR2g$ )  $n = 14$ , condition 2  $n = 2$  : VORg et VOR2g observent une légère différence IC  $[-5, 5]$ , condition 3  $n = 8$  :  $VORg > VOR2g$

- Groupe D  $n = 19$  : condition 1 ( $VORg < VOR2g$ )  $n = 12$ , condition 2  $n = 5$  : VORg et VOR2g observent une légère différence IC  $[-5, 5]$ , condition 3  $n = 2$  :  $VORg > VOR2g$

#### 3.3.5 Analyse de la réflectivité à partir du test VNG bithermique

Pour étudier la signification de l'évolution de cet indicateur en fonction de son interprétation clinique, trois sous-groupes ont été créés : sous-groupe A où la réflectivité s'est améliorée après rééducation, sous-groupe D pour lequel la réflectivité s'est détériorée après rééducation, sous-groupe I où la réflectivité a inversé sa latéralité après rééducation.

Pour les sous-groupes A et D, nous avons comparé des couples de valeurs mesurées en A1 et A2 pour voir si la position des médianes est différente de 0. Ce test, étant réalisé par couples de valeurs sur la même variable mesurées à deux moments, il est impossible de comparer l'évolution du groupe I, car le changement de la latéralité de la réflectivité ne permet pas d'appliquer le test statistique.

- Pour le sous-groupe A : l'évaluation de la réflectivité du côté droit donne un  $V = 0$ ,  $p$ -valeur =  $0,016$ , l'évaluation de la réflectivité du côté gauche donne un  $V = 0$ ,  $p$ -valeur  $< 0,001$ .

- Pour le sous-groupe D : l'évaluation de la réfectivité du côté droit donne un  $V = 36$ ,  $p$ -valeur = 0,008, l'évaluation de la réfectivité du côté gauche donne un  $V = 36$ ,  $p$ -valeur = 0,008.

Ces résultats suggèrent que, pour chaque paire de variables et pour chaque sous-groupe, il existe une différence significative entre les deux variables. Les hypothèses alternatives indiquent que la véritable différence de position n'est pas égale à zéro, ce qui signifie que les médianes des deux groupes sont différentes.

### 3.3.6 Analyse des indicateurs composites

11,29% présentent un signal hyperactif (Hs) en début de rééducation (A1), soit 7 patients, 0% en fin de soins (A2).

Français L'état de compensation (SoC) dans notre cohorte se répartit comme suit : à A1, 46,6 % ont une réfectivité normale avec un déficit  $\leq 30$  %, 36,6 % ont une réfectivité  $\leq 15^{\circ}/s$  avec un déficit  $\geq 30$  %, 1,7 % présentent une aréflexie bilatérale (réfectivité  $\leq 2^{\circ}/s$  avec un déficit  $\geq 70$  %), et 15 % une hypovalence unilatérale sans déficit (réfectivité  $\leq 15^{\circ}/s$  avec un déficit  $\leq 30$  %). À A2, les proportions sont de 46,6 % avec une réfectivité normale, 18,3 % avec une réfectivité  $\leq 15^{\circ}/s$  et un déficit  $\geq 30$  %, 6,7 % avec une aréflexie bilatérale et 6,7 % avec une hypovalence unilatérale sans déficit. Entre A1 et A2, 18 patients ont changé de SoC au cours de la rééducation, contre 42 qui n'ont pas changé.

### 3.3.7 Évolution des angles et des bissectrices géométriques

Trois sous-groupes ont été créés selon les conditions d'amélioration (A) ou de détérioration (D) de la VSV entre A1 et A2. L'étude de la normalité des variables issues de l'analyse de la VSV avec le test de Shapiro-Wilk est disponible dans le tableau supplémentaire S10 . Pour chaque groupe, on observe la distribution suivante :

- Groupe A : SGA n = 36, SBA n = 42, DGA n = 32, DBA n = 41
- Groupe D : SGA n = 26, SBA n = 20, DGA n = 30, DBA n = 31

L'étude statistique des variations pour chaque groupe donne les résultats décrits dans le tableau 4 .

#### Tableau 4

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 4. Résultats statistiques des variations de mesure de la VSV par groupe.

Français Une analyse statistique descriptive de la variation des indicateurs de VVS (SGA, DGA, SBA, DBA) par le coefficient de variation (CV) et le coefficient de Gini (Cg) a été réalisée en fonction des facteurs de regroupement identifiés a posteriori (présence ou absence d'un signal hyperactif (Hs), profils de compensation stables ou évolués au cours de la iVRT (SoC) et amélioration/diminution du gain obtenu au niveau du réflexe cervico-oculaire (CORg). Les résultats sont présentés dans les Tableaux 5, 6. L'évolution des mesures de VVS entre A1 et A2 est disponible dans le Tableau supplémentaire S11.

#### Tableau 5

www.frontiersin.org

Tableau 5. Homogénéité de la variation de la VSV par formation de groupe post-Hoc à A1.

Tableau 6

www.frontiersin.org

Tableau 6. Homogénéité des variations de SVV par formation de groupe post-Hoc à A2.

### 3.3.8 Analyse des résultats obtenus par les indicateurs d'optométrie

#### 3.3.8.1 Résultats de l'analyse de l'acuité visuelle

L'évolution de l'acuité visuelle de près (AVP ; Tableau 7 ) montre une amélioration statistiquement significative (  $p < 0,001$ ).

Tableau 7

www.frontiersin.org

Tableau 7. Étude de variation de l'acuité visuelle de l'inclusion (A1) au suivi (A2).

#### 3.3.8.2 Résultats de l'analyse prismatique (PBc/PBd)

L'évolution des capacités de convergence et de divergence au niveau de la barre prismatique (PBc/PBd ; Tableau 8) n'est pas statistiquement significative.

Tableau 8

www.frontiersin.org

Tableau 8. Étude des variations de convergence et de divergence (PBc/PBd) de la ligne de base (A1) au suivi (A2).

#### 3.3.8.3 Résultats de l'analyse obtenus au tableau Mawas (PmW)

L'analyse de la variation des mesures obtenues lors de l'examen PmW est présentée dans la Figure 7. Un test du Chi carré de McNemar a été appliqué pour déterminer si les paires discordantes ont évolué grâce à une intervention de réadaptation :

- PmW20 A1A2 Chi-carré de McNemar = 6,86, dF = 1, valeur  $p = 0,01^{***}$

Tous les résultats sont disponibles dans la section Matériel supplémentaire, tableau S12 .

#### 3.3.8.4 Résultats de l'analyse des mesures des points proches d'accommodation (NPA) et des points proches de convergence (NPC)

Pour analyser l'évolution des valeurs NPA droite, NPA gauche et NPC entre A1 et A2, la variation des moyennes entre ces deux périodes a été examinée.

- Pour le sous-groupe d'amélioration (A) des valeurs NPA droite, NPA gauche et NPC entre A1 et A2, le test de Wilcoxon signé montre que les différences sont significatives avec des valeurs de p très faibles, indiquant des améliorations significatives.
- Pour le sous-groupe de détérioration (D), le test de Wilcoxon signé montre également des différences significatives avec des valeurs de p très faibles, indiquant des détériorations significatives.

### 3.3.8.5 Résultats de l'analyse du test de vision stéréoscopique de Thomas Far (TVST)

L'analyse de la variation des mesures obtenues lors de l'examen de stéréoscopie lointaine (TVST) évaluée par quatre figures (cercle, étoile, chat, voiture) est présentée dans la Figure 9. Un test du Chi carré de McNemar a été appliqué pour déterminer si les paires discordantes ont évolué grâce à une intervention de rééducation :

- Étoile 1 m A1A2 : chi-carré de McNemar = 5,26, dF = 1, valeur p = 0,02\*\*
- Voiture 1 m A1A2 : chi carré de McNemar = 5,33, dF = 1, valeur p = 0,02\*\*
- Cercle de 5 m A1A2 : chi-carré de McNemar = 5,06, dF = 1, valeur p = 0,02\*\*
- Étoile 5 m A1A2 : chi-carré de McNemar = 4,08, dF = 1, valeur p = 0,04\*\*

Tous les résultats sont disponibles dans la section Matériel supplémentaire, tableau S13.

### 3.3.8.6 Résultats de l'analyse du test de Worth

L'analyse de la variation des mesures obtenues lors du test de Worth à quatre points (tableau 9) montre un changement statistiquement significatif entre A1 et A2 ( $p < 0,01$ ), indiquant comment la perception des couleurs et la vision binoculaire ont pu changer suite à la rééducation. Pour 26,7 % des patients, on observe une restauration de la correspondance rétinienne, et pour 8,3 %, une altération de la correspondance rétinienne ( $p = 0,029$ ).

Tableau 9

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 9. Étude des variations des mesures de convergence et de divergence (PBc/PBd) de la ligne de base (A1) au suivi (A2).

## 3.4 Recherche de marqueurs prédictifs

### 3.4.1 Présentation des résultats

Cette section présente les résultats significatifs. Douze conditions ont été traitées représentant les six épreuves du Sensory Organization Test (SOT) avec pour chaque épreuve, les conditions de déséquilibre antéropostérieur (AP) et médiolatéral (ML). Quatre modèles explicatifs de la posturographie ont été retenus ; nous n'avons pas utilisé de méthode d'ajustement du seuil de significativité puisque nos modèles ne comportaient pas les mêmes régresseurs. Outre la significativité de l'effet d'un facteur sur la variable endogène, les modèles nous ont permis de déterminer le pouvoir explicatif de chaque variable explicative grâce aux coefficients de régression ( $\beta$ ). Enfin, un dernier modèle a été retenu concernant l'évolution de l'angle bissecteur de la VVS, mais

sous une forme catégorielle. La variable expliquée prenait la modalité « amélioration » si l'angle à la deuxième mesure s'approchait de 0 degré, la modalité « détérioration » dans le cas contraire. L'objectif était d'évaluer l'impact sur la direction de la variation de l'angle bissecteur de la VSV des cinq variables explicatives : la posturostatique assistée par ML, la posturodynamique assistée par ML, le gain COR, la prépondérance VOR et si le quotient de Romberg (QR) était dans les normes ou non.

Pour mesurer ces relations potentielles de cause à effet, une régression logistique multivariée et multinomiale a été réalisée. L'ajustement du modèle a été déterminé en calculant le pseudo-R2 de McFadden, la significativité de l'impact des cofacteurs par ANOVA et les résultats exprimés sous forme de rapports de cotes.

#### 3.4.2 Évolution de l'équilibre médio-latéral

La régression de la variation de la mesure d'énergie totale (E) en condition statique (St) yeux ouverts (EO) pour l'équilibre ML est significative ( $P < 0,01$ ) et représente 31% de la variance. Le modèle montre une causalité de la dimension dBIG5A et de la composante SoC T au seuil de 5%. Tous les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 10. Analyse de régression MCO  $\Delta$ EstEOML.

La régression de la variation de la mesure d'énergie totale (E) en condition statique (St) avec condition visuellement contrôlée (VC) pour l'équilibre ML est significative ( $P < 0,01$ ) et représente 43% de la variance. Le modèle montre une causalité de dEPN31TS et de la composante I du SoC au seuil de 5%. Tous les résultats sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 11. MCO  $\Delta$  EstVCML.

La régression de la variation de la mesure d'énergie totale (E) en condition dynamique (D) yeux fermés (EC) pour l'équilibre ML est significative ( $P < 0,01$ ) et explique 32 % de la variance. Le modèle montre une causalité des dimensions dSM, dEPN31J et dBIG5E au seuil de 5 %. Tous les résultats sont présentés dans le Tableau 12 .

Tableau 12

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 12. MCO  $\Delta$  EDECML.

La régression de la variation de la mesure d'énergie totale (E) en condition dynamique (D) avec condition visuellement contrôlée (VC) pour l'équilibre ML est significative ( $P < 0,01$ ) et représente 27 % de la variance. Le modèle montre une causalité des dimensions dSC, dSE et dBIG5A au seuil de 5 %. Tous les résultats sont présentés dans le Tableau 13.

## Tableau 13

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

### Tableau 13. MCO $\Delta$ EDVCML.

#### 3.4.3 Evolution de l'annulation de la bissectrice par rapport à la verticalité dans l'examen SVV

La régression de l'angle bissecteur (Ab) de la verticale visuelle subjective dynamique (SVVd) est significative ( $p < 0,01$ ) et représente 38 % de la variance. Le modèle montre une causalité des indicateurs instrumentaux VORprep et CORg au seuil de 5 %. Tous les résultats sont présentés dans le tableau 14.

## Tableau 14

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

### Tableau 14. Analyse de régression MCO pour le changement dynamique de l'angle bissecteur SVV ( $\Delta$ AbSVVd).

## 4 Discussion

### 4.1 Présentation de la cohorte

Les résultats de cette étude mettent en évidence plusieurs points importants concernant la population recrutée, le suivi clinique et leur signification clinique. Les patients ont été inclus sur deux années consécutives, avec une légère prédominance en 2021 (59,7%) par rapport à 2022 (40,3%). La durée moyenne de suivi était de 13 mois, avec une moyenne de 87 séances de rééducation. La répartition professionnelle des patients a montré une diversité, avec une majorité de retraités (46,8% ; Tableau 3).

L'analyse des diagnostics initiaux et finaux des patients a révélé des changements significatifs au cours des soins de réadaptation. Par exemple, 8,1 % de la cohorte ont été diagnostiqués avec des troubles centraux après le début de la réadaptation, tandis que le diagnostic initial de VPPB récurrents a diminué de 33,9 % à 9,7 % à la fin de la réadaptation. De plus, 24,2 % des vertiges vestibulaires non spécifiques ont été diagnostiqués à la fin des soins. Ces résultats soulignent l'importance d'une réévaluation clinique pour améliorer le diagnostic en fonction des changements cliniques au cours du programme de réadaptation.

Concernant les symptômes visuels, l'étude a constaté des changements significatifs entre la première crise de vertige et la première consultation de thérapie de réadaptation vestibulaire intégrative (iVRT). Par exemple, la fatigue visuelle est passée de 4,8 % à 38,7 % de la cohorte et la vision floue induite par le mouvement est passée de 11,3 % à 59,7 % de la cohorte lors de la première consultation de iVRT (Tableau 4). Ces résultats suggèrent une évolution des symptômes visuels chez les patients atteints de vertige chronique (CVP), sous-jacents à des mécanismes de compensation, ce qui pourrait avoir des implications importantes pour la gestion de l'iVRT en termes d'intervention.

Enfin, concernant les syndromes associés tels que les cervicalgies chroniques (CCC) et les troubles temporo-mandibulaires (TTM), 8% de la cohorte souffraient de CC avant la première crise contre 13% à l'inclusion, et 6,5% de TTM contre 14,5% à l'inclusion.

#### 4.2 L'action de l'iTRV : analyse du questionnaire

Français Dans notre étude, des améliorations significatives ont été observées après iVRT dans divers questionnaires évaluant l'impact du vertige sur la qualité de vie. Le DHI (tableau supplémentaire S9) a révélé une diminution significative des scores émotionnels de 45,31 à 28,57 et des scores fonctionnels de 50,00 à 29,17 ( $p < 0,05$ ), indiquant une amélioration de la perception du handicap lié au vertige. Le SF36 (tableau supplémentaire S9) a montré des améliorations du niveau physique (de 62,41 à 76,34) et des limitations de santé physique (de 68,10 à 52,68), suggérant une amélioration de la qualité de vie physique ( $p < 0,05$ ). L'amélioration de la santé mentale a été particulièrement notable, avec une augmentation de 50,55 à 58,07 de la dimension bien-être émotionnel après iVRT ( $p < 0,05$ ). Français Les résultats de l'EPN-31 (Tableau supplémentaire S9) indiquent une amélioration de la joie (de 19,69 à 23,80) et une réduction de la honte (de 39,87 à 18,88), démontrant un impact positif sur les émotions ( $p < 0,05$ ). De même, le Big Five Inventory (BFI ; Tableau supplémentaire S9) a révélé une augmentation de l'extraversion après iVRT (de 3,16 à 2,76,  $p < 0,05$ ). Le VestiQ-VS (Tableau supplémentaire S9) a montré une amélioration significative de l'état psychologique (de 47,31 à 27,64) et de l'état émotionnel (de 39,87 à 24,55), confirmant l'efficacité de l'iVRT sur l'état psychologique et émotionnel ( $p < 0,05$ ).

Cependant, certaines dimensions comme la douleur dans le SF36 et la mémoire dans le VestiQ-VS n'ont pas montré de changement significatif, ce qui suggère que l'iVRT n'affecte pas directement ces aspects (tableau supplémentaire S9). Malgré des améliorations globales, des limitations émotionnelles et physiques spécifiques persistent (montrées par les dimensions du SF36), peut-être influencées par des facteurs externes non évalués dans cette étude.

#### 4.3 Etude des indicateurs de suivi instrumental

Cette section discute de la pertinence du suivi des indicateurs chez les patients vestibulaires chroniques (PVC) au-delà des notions de normalité souvent attribuées aux examens instrumentaux, nécessaires dans les conditions cliniques face aux cas aigus ainsi qu'au suivi pré- et post-chirurgical. Cependant, il semble, sur la base de nos résultats, que le PVC impacte différemment la fonction vestibulaire en présence d'un signal d'erreur permanent et/ou récurrent. L'accent de notre approche est mis sur la notion de signal d'erreur vestibulaire (SVE), qui est d'une importance primordiale dans la prise en charge du patient en rééducation. Nous savons qu'un SVE supraliminal induit non seulement des conséquences sur les performances comportementales du RVO mais également des conséquences adaptatives via les capacités de compensation centrales aux niveaux sous-corticaux et corticaux (3, 45 – 47) et la stratégie du système sensori-perceptivo-moteur (SPM) (23, 48). Ce que nous commençons à comprendre, c'est qu'un VES faible ou subliminal induit également des réponses comportementales (9) et provoque des erreurs d'orientation spatiale lors de tâches d'imagerie mentale (46). L'intégration du VES et son étude semblent définir des sous-catégories d'adaptation et de réponse SPM, dont certaines ont été enregistrées au cours de nos travaux. Celles-ci sont développées dans les sous-sections suivantes.

##### 4.3.1 Analyse des indicateurs posturographiques



Notre étude démontre des améliorations significatives ( $p < 0,05$ ) de la fonction vestibulaire et des scores composites médiolatéral (ML) après iVRT, soulignant l'efficacité de l'iVRT sur ces aspects, même chez les sujets plus âgés. Ces résultats soutiennent les liens établis entre la fonction vestibulaire et l'équilibre ML retrouvés dans la littérature (49, 50). Bien que des variations dans d'autres scores posturographiques aient été notées, elles n'étaient pas statistiquement significatives, soulignant la sensibilité et le potentiel de faux positifs dans les méthodes algorithmiques utilisées pour l'analyse. Cela soulève des questions sur la spécificité et l'interprétation des mesures posturographiques dans la CVP et suggère d'intégrer des tests fonctionnels du réflexe vestibulo-oculaire pour une analyse plus sensible, comme le recommande Di Fabio (27). C'est ce que nous avons proposé au lecteur dans les sections suivantes.

#### 4.3.2 Analyse des indicateurs issus des essais cinétiques VNG

##### 4.3.2.1 Analyse du gain VOR2 (VOR2g) et du gain COR (CORg)

Concernant les indicateurs issus de la VNG cinétique, l'analyse a montré des résultats mitigés. Toutes les variables étudiées n'ont pas montré de différences significatives entre A1 et A2 en termes de changements de normalisation, indiquant que la rééducation ne semble pas avoir d'impact direct sur la réflectivité (prépondérance). Cependant, l'analyse des variations de valeurs en fonction de l'amélioration ou de la détérioration vers la normalisation était significative comme le montrent l'évaluation cinétique du gain du réflexe vestibulo-oculaire sensibilisé dans une tâche mentale duale (VOR2g) et l'évaluation cinétique du gain du réflexe cervico-oculaire (CORg). Cela pourrait soutenir l'évolution de la compensation chez ces patients, non liée à une restauration de la fonction périphérique du système vestibulaire mais bien liée à une modulation plus complexe du système sensori-perceptivo-moteur (SPM).

##### 4.3.2.2 Analyse comparative des tendances de gain VOR (VORg) et VOR2 (VOR2g)

L'interprétation du gain VOR2 dépend de la valeur du gain VOR. Généralement, une amélioration du gain VOR2 pourrait exprimer une désinhibition centrale dans les PVC, mais lorsqu'il se détériore, l'interprétation devient dépendante du contexte clinique. Un gain VOR2 approchant le gain VOR semble exprimer l'absence d'inhibition (condition 2 ; Tableau 15).

Tableau 15

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Tableau 15. Interprétation des gains lors du test de rafale de vidéonystagmographie cinétique (VNGc).

Parmi les 26 patients identifiés dans la condition 1 (Tableau 15), 14 se sont améliorés. Concernant la condition 3, elle est révélatrice pour nous, chez les patients chroniques, d'un effet plateau déjà remis en cause dans la littérature (51 – 54). La diminution d'un gain dans une double tâche pourrait indiquer la présence d'un seuil de difficulté de la tâche cognitive au-delà duquel le patient devient moins efficace au niveau vestibulaire. Cette observation rejoint celles présentées par Xavier et al. (10) chez des patients atteints de schwannome vestibulaire. L'évolution de la composante fatigue du VestiV-QS est très explicite : parmi les 14 patients qui présentent une augmentation du gain VOR2, la fatigue s'améliore significativement par rapport aux 12 patients qui ont vu leur gain VOR2 diminuer.

Les recherches futures devraient approfondir ces observations et explorer davantage les mécanismes sous-jacents de ces évolutions. Néanmoins, nous suggérons de surveiller l'indicateur de fatigue avant, pendant et 48 h après la iVRT. Cependant, contrairement aux commotions cérébrales où des échelles spécifiques comme la Post-Concussion Symptom Scale (PCSS) sont couramment utilisées pour évaluer les symptômes et la fatigue, il n'existe pas d'outils équivalents standardisés pour les troubles vestibulaires (55). La mesure de la fatigue neurologique peut être complexe, car elle dépend de nombreux facteurs propres à chaque patient et à son état neurologique. Les professionnels de la santé peuvent utiliser une combinaison d'outils et de méthodes pour évaluer la fatigue neurologique, notamment : (i) interroger les symptômes : les médecins et les thérapeutes peuvent effectuer des évaluations cliniques subjectives pour évaluer la fatigue neurologique du patient en fonction de leurs observations et des rapports du patient ; (ii) utiliser des échelles de mesure : certaines échelles générales de mesure de la fatigue telles que la Chalder Fatigue Scale ( 56 ) peuvent être adaptées aux patients atteints de troubles vestibulaires chroniques pour évaluer leur fatigue ; (iii) suivre les symptômes et les performances : une surveillance régulière des symptômes du patient et de ses performances sur des tâches spécifiques en iVRT peut également aider à évaluer la fatigue neurologique.

#### 4.3.2.3 Analyse de la réflectivité à partir du test VNG thermique

Des variations notables de la réflectivité ont été observées dans certains sous-groupes, avec des améliorations et des détériorations significatives, indiquant des changements individuels de la réflectivité indépendamment de l'association globale avec la rééducation. Des cas d'inversion de la latéralisation de la réflectivité après rééducation ont été notés, nécessitant une analyse spécifique pour leurs implications cliniques. Ces résultats révèlent la complexité de l'impact de la rééducation sur la réflectivité et soulignent l'importance des études futures pour explorer ces variations en détail et identifier d'éventuelles interventions bénéfiques pour les patients vestibulaires.

#### 4.3.2.4 Analyse des indicateurs composites

L'analyse du signal d'erreur vestibulaire hyperactif (SH) a montré une résolution de ce signal au sein de la cohorte étudiée en A2. En raison de la nature rétrospective de notre étude, nous n'avons pas pu identifier l'origine de ce signal. Cependant, étant donné que la population étudiée est constituée de patients chroniques (c'est-à-dire présentant des symptômes persistants un an après la crise, au minimum pour être inclus dans l'étude), nous pouvons suggérer une origine multifactorielle résolue grâce à notre programme intégratif.

L'analyse de l'évolution de la compensation vestibulaire (SoC) à travers l'état de réflectivité de l'oreille saine lorsqu'il est disponible est un indicateur de suivi pertinent déjà prouvé dans la littérature ( 57 , 58 ). Ces articles montrent que la VRT a un impact significatif sur les patients vestibulaires aigus et même sur certains profils d'aréflexie instrumentale qui peuvent s'améliorer après traitement. Cependant, dans le contexte de la CPV, la SoC semble évoluer différemment. En effet, la SoC a montré des changements discrets entre le début (A1) et la fin de la iVRT (A2). Français Les résultats ont révélé que 46,6 % de la cohorte présentait une absence de compensation dans le test calorique (N) entre A1 et A2, mais, en examinant les détails des fluctuations, 3 des 28 patients de ce groupe ont migré vers une catégorie SoC qui peut indiquer la présence d'un signal d'erreur subliminal (I) et 1 vers une compensation modérée en raison d'une VES déficiente (P), tandis que 2 sont passés de la catégorie P à N et 2 de la catégorie I à N. De plus, 6,7 % de la cohorte a montré une

forte compensation qui peut résulter d'une VES fortement déficiente (profil T) en A2, contre 1,7 % en A1. Au total, 18 patients (30 %) ont observé une fluctuation dans le test bithermique, dont 3 avec une détérioration progressive du signal vestibulaire instrumental. 24 patients n'ont pas fluctué, restant dans une catégorie SoC N et formant un groupe homogène jusqu'à A2. Cette dernière observation pourrait indiquer que sur une période de prise en charge par iVRT, l'état de compensation vestibulaire des patients n'est pas acquis pour 70% de la cohorte. De plus, hormis les 3 diagnostics centraux correspondant aux 3 patients passés d'un état I à un état T, d'autres fluctuations semblent impactées par iVRT. Compte tenu des effectifs restreints des sous-groupes, des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer si la rééducation n'a pas eu d'effet délétère, notamment pour les 4 patients sortis d'une catégorie N du SoC : une seule étude de cas sera proposée ultérieurement.

#### 4.3.2.5 Analyse de la verticale visuelle subjective (VVS )

La notion de précision et d'exactitude est un prérequis essentiel dans l'étude des signaux somatosensoriels. Le concept de précision dans le cadre de la VSV est largement abordé dans la littérature (25, 59). Notre innovation a été d'introduire la notion de précision et d'exactitude dans la modélisation spatiale de nos mesures. Dans notre étude, l'analyse des sous-groupes (amélioration, détérioration) révèle des tendances distinctes. Il est important de noter que ces résultats montrent une variation significative de la valeur de l'angle géométrique (obtenue en faisant la moyenne des mesures prises à partir des points de départ d'inclinaison droit et gauche) et non de la valeur de l'angle bissecteur par rapport à l'axe vertical. Cela pourrait correspondre à une modulation de la précision (observée à travers la variation de l'angle géométrique) plutôt qu'à une variation de l'exactitude entre A1 et A2 (Tableau 4). Ceci renforce l'idée que la rééducation impacte le référentiel sensorimoteur-perceptif (SPM), permettant au système nerveux central d'intégrer d'autres informations (comme des informations somesthésiques) en modulant le poids des différents signaux sensoriels et en optimisant ainsi la précision, modélisée par la réduction de l'angle géométrique en A2. Cette nouvelle analyse SVV ouvre des perspectives pour observer la mise en place d'une compensation intégrative multisensorielle obtenue après iVRT.

Français Notre étude a examiné l'impact de plusieurs facteurs sur la VVS chez les sujets subissant une iVRT, en analysant l'influence du CORg, des profils SoC et de la présence d'un SH ( Tableau 5 ). Pour la variable composite SH, les coefficients de variation (CV) et les valeurs de Gini (Cg) sont plus faibles dans le groupe sans SH pour la mesure des angles géométriques statiques et dynamiques de la VVS. Cela suggère une certaine homogénéité dans les variations de ces angles dans ce groupe. Les améliorations de l'angle géométrique observées dans le groupe sans SH entre A1 et A2 semblent atteindre une proportion plus élevée de patients par rapport au groupe de détérioration, tandis que le groupe avec SH, montrant une proportion plus élevée de détérioration, est principalement affecté dans la mesure de l'angle géométrique dynamique. En conclusion, l'augmentation des disparités dans les mesures d'angle géométrique et la dégradation observée pour 73 % du groupe SH dans des conditions dynamiques suggèrent une difficulté accrue dans la performance SPM pour ces patients, en particulier lorsqu'ils sont soumis à un conflit induit lors d'une stimulation optocinétique à 20°/s. Nous observons que la stratégie utilisée pour résoudre l'imprécision est de passer à une performance d'exactitude optimale, identifiée dans notre étude par une homogénéité accrue de la mesure de l'angle bissecteur de la VVS en conditions dynamiques dans le groupe où le SH est présent. Notre hypothèse est que le système nerveux central, dans le contexte d'un ajustement du SPM en réponse

à un signal d'erreur vestibulaire hyperactif chronique (VES), serait plus « rigide » et moins enclin à moduler l'intervalle de confiance des mesures extrêmes de la VVS. En d'autres termes, la stratégie d'optimisation de la précision est moins efficace dans ce contexte. L'optimisation des stratégies de recrutement de précision semble plus complexe à moduler. Notre hypothèse est qu'il existe un lien fort entre précision et modèle interne. La stratégie de modulation de précision semble utile en présence d'imprécision. Cependant, cette stratégie a des limites car lorsque le modèle interne est biaisé, la stratégie d'amélioration de la précision est inefficace, comme démontré dans le cas des « pushers » ( 60 ). Nous émettons l'hypothèse que la précision est modérément biaisée par le modèle interne chez les patients CPV soumis à un VES hyperactif chronique. C'est pourquoi dans la CPV, l'uTRV propose des scénarios avec la notion d'erreur utile : le patient est soumis à une progression d'exercices dans lesquels il expérimente l'erreur progressivement jusqu'à atteindre un seuil maximal au-delà duquel le patient connaîtra un retour des symptômes. Il s'agit d'un profil rééducatif bien connu dans la prise en charge des commotions cérébrales (61 , 62).

Français Les patients dont le SoC a évolué au cours de l'iVRT montrent des mesures d'angle géométrique plus homogènes en conditions dynamiques de VSV, suggérant l'utilisation de cette stratégie lors des variations de réflectivité et de déficit, liant ainsi la qualité de l'intégration du signal périphérique à celle de l'intégration du SPM. Pour le CORg, il existe un lien clair entre la variation du gain du COR et l'homogénéité des résultats obtenus pour la VSV ( Tableau 5 ). Les valeurs des angles géométriques en conditions statiques et dynamiques sont plus homogènes chez les patients n'ayant pas connu de variation du gain du COR au cours de l'iVRT, suggérant fortement l'implication des voies vestibulo-colliques parmi les stratégies possibles de compensation du SPM ( 60 – 62 ). Il semble que le recrutement d'entrées proprioceptives cervicales impacte la précision des mesures de VSV chez les patients CPV.

#### 4.3.2.6 Analyse des résultats des indicateurs optométriques

L'analyse des indicateurs optométriques a donné des résultats très intéressants. L'amélioration significative de l'acuité visuelle de près (AVP) post-iVRT était inattendue car non présentée dans la littérature et, compte tenu de l'âge de notre cohorte, on s'attendait à ce qu'elle montre une tendance à la détérioration. Cela met en évidence, pour nous, l'effet potentiel de notre intervention non seulement sur l'équilibre et la fonction vestibulaire mais aussi sur des aspects plus globaux tels que les aspects psychiques, neurovisuels et locomoteurs. En effet, notre prise en charge a évolué avec des séquences (Tableau 1) axées sur une approche intégrative incluant les aspects ostéo-articulaires pour l'approche des dysfonctions temporo-mandibulaires et cranio-cervicales, neurovisuels pour les troubles de fusion et psycho-comportementaux pour les troubles de l'humeur. Cette amélioration significative d'un point de vue statistique (  $P < 0,01$  ) pourrait refléter l'interdépendance complexe entre l'intégration du SPM et la notion de chronicité.

Les résultats des analyses prismatiques, bien que non significatifs, suggèrent que l'iVRT n'interfère pas négativement avec la vision binoculaire, un aspect fondamental pour l'acuité visuelle de près.

Les résultats obtenus à l'examen de la planche de Mawas (PmW) montrent que des variations significatives de la fusion ont été mesurées entre 15 et 20 cm du nasion. La variation à 25 cm pourrait également être prise en compte (  $p = 0,10$  ) et réévaluée dans une autre étude. Là encore, la iVRT semble influencer significativement l'aspect neurosensoriel de la vision de près.

L'étude du point proche d'accommodation (NPA) montre une évolution significative entre A1 et A2 ( $p < 0,05$ ) avec deux groupes améliorant ou diminuant leurs performances.

L'étude des stéréogrammes de distance montre un changement significatif dans la présentation de l'étoile, du chat et de la voiture à un mètre, ainsi que dans la présentation du cercle et de l'étoile à cinq mètres. Ces résultats suggèrent que la iVRT peut impacter la perception spatiale des patients lorsqu'elle intègre l'utilisation de stéréogrammes spécifiques à notre travail de recherche.

Enfin, l'examen à la lampe de Worth confirme ces résultats, pour lesquels une amélioration de la vision stéréoscopique est observée pour 60% de la cohorte ( $p = 0,029$ ).

La fusion visuelle, dépendante de l'horoptère et de l'aire de Panum, est un mécanisme essentiel à la perception tridimensionnelle. Dans le cadre d'une asthénopie vestibulaire, la désorientation spatiale associée peut entraîner des troubles de la fusion visuelle, aggravant les symptômes visuels. L'intégration de la sphère neurovisuelle dans les concepts de rééquilibrage, de facilitation et de reprogrammation sensori-perceptivo-motrice dans nos séquences de traitement est l'un des points forts de notre approche. Ces observations corroborent les résultats obtenus par Xavier et al. (9) dans une étude précédente montrant que la VES subliminale impacte la composante visuo-oculomotrice. Il est fort probable que la prise en charge de la VES chronique bénéficie de mécanismes de résolution similaires, impactant des aspects subtils de la vision comme la fusion et la stéréoscopie.

#### 4.4 Etude des marqueurs prédictifs

Dans cette section, nous discutons des marqueurs prédictifs que nous avons identifiés dans notre étude. Il semble utile de rechercher ces marqueurs pour mieux influencer les effets de la physiothérapie.

##### 4.4.1 Etude des marqueurs prédictifs de la stabilité médio-latérale

Français Les signaux vestibulaires jouent un rôle crucial dans le maintien d'une posture droite, en particulier dans des conditions posturales instables où les autres sources d'informations sensorielles sont diminuées ou absentes. Ils sont particulièrement impliqués dans la détection et la correction de mouvements posturaux rapides et significatifs (63). Les réflexes vestibulo-spinaux sont modulés en fonction des conditions posturales et jouent un rôle dans l'ajustement de la posture pour maintenir la stabilité, en particulier dans le plan ML (63). L'étude des mécanismes sous-jacents de l'équilibre ML est très importante pour notre compréhension du contrôle postural et de la mobilité humaine, en particulier dans les populations vulnérables telles que les patients souffrant d'instabilité vestibulaire chronique et de symptômes (64). Des processus complexes sont impliqués dans le maintien de l'équilibre ML pendant des tâches essentielles telles que la transition de la position assise à la position debout ou dans des situations d'instabilité avec des fluctuations rapides dans le plan ML (65). Des études antérieures ont suggéré que l'équilibre ML pourrait être plus sensible aux troubles sensoriels et aux altérations liées à l'âge que l'équilibre antéropostérieur (AP). On sait que les états d'anxiété affectent les performances posturales (66). A l'instar des études sur le terrain, notre étude a permis de déterminer un lien prédictif entre la santé cognitive-émotionnelle et psycho-comportementale et la performance d'équilibre dans le plan médiolatéral. Nous avons pu préciser l'impact des différents facteurs étudiés à travers les dimensions des questionnaires utilisés dans

notre étude. L'analyse de la variation énergétique totale dans 4 conditions ML a révélé plusieurs résultats clés sous :

- Statique, yeux ouverts (tableau 10 , figure 10) : une relation significative (  $p < 0,01$ ) a été trouvée, avec 31 % de la variance expliquée. La dimension émotionnelle indique une corrélation négative, suggérant que la détérioration émotionnelle est liée à un déséquilibre postural accru. Inversement, un meilleur état de santé général est associé à une meilleure stabilité. Les dimensions de la peur et du plaisir n'ont pas montré de corrélation significative avec le déséquilibre postural.
- Condition statique contrôlée visuellement (VC ; Tableau 11 , Figure 11 ) : Une corrélation significative (  $P < 0,01$ ) a été observée, avec 43 % de la variance expliquée. Les dysfonctionnements émotionnels et le déséquilibre dans l'expérience de surprise sont associés à une instabilité accrue, tandis qu'un meilleur bien-être émotionnel favorise la stabilité. Les niveaux de compensation centrale influencent également l'équilibre, mais les troubles de la mémoire n'ont pas d'impact significatif.
- Dynamique, yeux fermés (EC ; Tableau 12 ; Figure 12 ) : une relation significative (  $P < 0,01$ ) avec 32 % de la variance expliquée a été démontrée. Un fonctionnement de la mémoire intact et des niveaux élevés d'extraversion sont liés à une meilleure stabilité. Cependant, un déséquilibre dans l'expérience de la joie est associé à un déséquilibre accru, et la fonction physique n'a pas montré de corrélation significative.
- Condition dynamique contrôlée visuellement (VC ; Tableau 13 ; Figure 13 ) : une relation significative (  $P < 0,01$ ) avec 27 % de la variance expliquée. De meilleures capacités cognitives et des niveaux élevés de plaisir sont associés à une meilleure stabilité. Le dysfonctionnement émotionnel global est lié à un déséquilibre accru, tandis que les fluctuations de la joie et de la fonction physique n'ont pas montré de corrélation significative dans cette condition.

Figure 10

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 10. Analyse de régression par les moindres carrés ordinaires (MCO) ESTEOML. Ce graphique montre les coefficients bêta des variables utilisées dans l'analyse de régression par les MCO pour la variation dynamique de l'ESTEOML. Les coefficients bêta indiquent la force et la direction de l'association entre chaque variable et l'ESTEOML dynamique. Composantes de la figure : • Points noirs : Chaque point noir représente un coefficient bêta pour une variable donnée. • Barres d'erreur : Les barres horizontales autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % pour chaque coefficient bêta. Elles montrent la plage dans laquelle le véritable coefficient bêta est susceptible de se situer avec une probabilité de 95 %. • Points rouges : Les points rouges indiquent les variables dont les coefficients bêta sont statistiquement significatifs (  $p < 0,05$ ). Les variables significatives sont annotées avec le texte « Significatif ». • Ligne pointillée horizontale à zéro : La ligne pointillée indique la valeur zéro du coefficient bêta. Français Un coefficient bêta de zéro signifie qu'il n'y a aucune association entre la variable et la variable ESTEOML dynamique Comment lire la figure : • Identifier les variables : Les variables sont répertoriées sur l'axe des x. Elles comprennent « Constante », « dSE », « dSF36SG », « dEPN31P », « dBIG5A », « I », « P » et « T ». • Comprendre les coefficients : La position des points noirs sur l'axe des y représente les coefficients bêta de chaque variable. Un

coefficient positif indique une association positive avec EStEOML, tandis qu'un coefficient négatif indique une association négative. Évaluer la signification : • Regardez les points rouges pour identifier les variables significatives. Ces variables ont une association statistiquement significative avec EStEOML. • Les barres d'erreur qui ne croisent pas la ligne pointillée horizontale à zéro indiquent également la signification. Définitions des variables : dSE : dimension émotionnelle du questionnaire VestiQ-VS, dSF36SG : dimension santé générale du questionnaire SF36, dEPN31P : dimension peur du questionnaire EPN31, dBIG5A : dimension agréabilité, altruisme, affection. I : profil d'inhibition sans déficit, P : profil d'inhibition controlatérale partielle, T : profil d'inhibition controlatérale totale.

Figure 11

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 11. Analyse de régression par les moindres carrés ordinaires (MCO) EStVCML. Ce graphique montre les coefficients bêta des variables utilisées dans l'analyse de régression par les MCO pour le changement dynamique de EStVCML. Les coefficients bêta indiquent la force et la direction de l'association entre chaque variable et la dynamique EStVCML. Composantes de la figure : • Points noirs : Chaque point noir représente un coefficient bêta pour une variable donnée. • Barres d'erreur : Les barres horizontales autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % pour chaque coefficient bêta, montrant la plage dans laquelle le véritable coefficient bêta est susceptible de se situer avec une probabilité de 95 %. • Points rouges : Les points rouges indiquent les variables dont les coefficients bêta sont statistiquement significatifs ( $p < 0,05$ ). Les variables significatives sont annotées avec le texte « Significatif ». • Ligne pointillée horizontale à zéro : La ligne pointillée indique la valeur zéro du coefficient bêta. Un coefficient bêta de zéro signifie qu'il n'y a aucune association entre la variable et EStEOML. Comment lire la figure : • Identifier les variables : Les variables sont répertoriées sur l'axe des x. Celles-ci incluent « Constante », « dSM », « dSE », « dEPN31TS », « dSF36BE », « I », « P » et « T ». • Comprendre les coefficients : La position des points noirs sur l'axe des y représente les coefficients bêta de chaque variable. Un coefficient positif indique une association positive avec l'EStVCML dynamique, tandis qu'un coefficient négatif indique une association négative. Évaluer la signification : • Observez les points rouges pour identifier les variables significatives. Ces variables ont une association statistiquement significative avec l'EStVCML dynamique. • Les barres d'erreur qui ne croisent pas la ligne pointillée horizontale à zéro indiquent également la signification. Définitions des variables : dSM : Dimension mémoire du questionnaire VestiQ-VS, dSE : Dimension émotionnelle du questionnaire VestiQ-VS, dEPN31TS : Dimension surprise du questionnaire EPN31, dSF36BE : Dimension bien-être émotionnel du questionnaire SF36.

Figure 12

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 12. Analyse de régression par les moindres carrés ordinaires (MCO) EDECML. Ce graphique montre les coefficients bêta des variables utilisées dans l'analyse de régression par les MCO pour EDECML. Les coefficients bêta indiquent la force et la direction de l'association entre chaque variable et EDECML. Composantes de la figure : • Points noirs : Chaque point noir représente un coefficient bêta pour une variable donnée. • Barres d'erreur : Les barres horizontales autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % pour chaque coefficient bêta. Elles indiquent la plage

dans laquelle le véritable coefficient bêta est susceptible de se situer avec une probabilité de 95 %.

- Points rouges : Les points rouges indiquent les variables dont les coefficients bêta sont statistiquement significatifs ( $p < 0,05$ ). Les variables significatives sont annotées avec le texte « Significatif ».
- Ligne pointillée horizontale à zéro : La ligne pointillée indique la valeur zéro du coefficient bêta. Un coefficient bêta de zéro signifie qu'il n'y a aucune association entre la variable et EDECML.

Comment lire la figure :

- Identifier les variables : Les variables sont répertoriées sur l'axe des x. Elles comprennent « Constante », « dSM », « dEPN31J », « dSF36FP » et « dBIG5E ».
- Comprendre les coefficients : La position des points noirs sur l'axe des y représente les coefficients bêta de chaque variable. Un coefficient positif indique une association positive avec EDECML, tandis qu'un coefficient négatif indique une association négative.
- Évaluer la signification :
  - Observez les points rouges pour identifier les variables significatives. Ces variables ont une association statistiquement significative avec EDECML.
  - Les barres d'erreur qui ne croisent pas la ligne pointillée horizontale à zéro indiquent également la signification.

Définitions des variables : dSM : Dimension Mémoire du questionnaire VestiQ-VS, dBIG5E : Dimension Extraversion, Énergie, Enthousiasme du questionnaire BFI, dEPN31J : Dimension Joie du questionnaire EPN31, dSF36FP : Dimension Fonctionnement physique du questionnaire SF36.

Figure 13

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 13. Analyse de régression par les moindres carrés ordinaires (MCO) EDVCML. Ce graphique montre les coefficients bêta des variables utilisées dans l'analyse de régression par les MCO pour EDVCML. Les coefficients bêta indiquent la force et la direction de l'association entre chaque variable et la mesure de résultat (EDVCML).

Composantes de la figure :

- Points noirs : Chaque point noir représente un coefficient bêta pour une variable donnée.
- Barres d'erreur : Les barres horizontales autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % pour chaque coefficient bêta. Elles indiquent la plage dans laquelle le véritable coefficient bêta est susceptible de se situer avec une probabilité de 95 %.
- Points rouges : Les points rouges indiquent les variables dont les coefficients bêta sont statistiquement significatifs ( $p < 0,05$ ). Les variables significatives sont annotées avec le texte « Significatif ».
- Ligne pointillée horizontale à zéro : La ligne pointillée indique la valeur zéro du coefficient bêta. Un coefficient bêta de zéro signifie qu'il n'y a aucune association entre la variable et la mesure de résultat (EDVCML).

Comment lire la figure :

- Identifier les variables : Les variables sont répertoriées sur l'axe des x. Elles comprennent « Constant », « dSF36FP », « dEPN31 », « dSC », « dBIG5A » et « dSE ».
- Comprendre les coefficients : La position des points noirs sur l'axe des y représente les coefficients bêta de chaque variable. Un coefficient positif indique une association positive avec EDVCML, tandis qu'un coefficient négatif indique une association négative.
- Évaluer la signification :
  - Observez les points rouges pour identifier les variables significatives. Ces variables ont une association statistiquement significative avec EDVCML.
  - Les barres d'erreur qui ne croisent pas la ligne pointillée horizontale à zéro indiquent également la signification.

Définitions des variables : dSC : Dimension cognitive du questionnaire VestiQ-VS, dSE : Dimension émotionnelle du questionnaire VestiQ-VS, dEPN31J : Dimension joie du questionnaire EPN31, dBIG5A : Dimension agréabilité, altruisme, affection du questionnaire BFI, dSF36FP : Dimension fonctionnement physique du questionnaire SF36.



À ce stade, il semble pertinent de considérer que les niveaux de difficulté dans les conditions de déséquilibre évaluées impliquent des connexions différentes avec le recrutement cognitivo-émotionnel (CE) pour chacune d'entre elles. Ainsi, le classement des tâches du Sensory Organization Test par niveau de difficulté devrait également être discuté en évaluant conjointement les capacités de recrutement CE propres à chaque patient. Avec l'introduction d'un système cognitivo-vestibulaire (Lacroix 2021), il est suggéré que chaque patient possède un seuil spécifique au-delà duquel le système sensori-perceptivo-moteur, et donc la capacité d'équilibre dans des contextes de privation visuelle, de performance d'équilibre, de conflit sensoriel ou de situations de double tâche, échoue. Ce seuil représente la limite au-delà de laquelle la gestion des conditions d'équilibre devient trop exigeante énergétiquement pour les fonctions cognitives supérieures. Ce phénomène indique non seulement que certains patients atteints de troubles vestibulaires chroniques nécessitent un recrutement énergivore des fonctions cognitives supérieures pour maintenir l'équilibre mais aussi que le CE joue un rôle significatif dans la gestion de l'allocation des ressources cognitives pour les capacités d'équilibre dans des situations complexes. Par conséquent, il existe un seuil au-delà duquel la gestion des conditions d'équilibre n'est plus écologique, soulignant la nécessité d'une approche thérapeutique personnalisée pour optimiser la compensation vestibulaire et l'intégration sensorielle, soulignant l'importance cruciale de l'interaction entre la CE, l'allocation des ressources cognitives à la compensation d'une ESV chronique et les capacités d'équilibre.

#### 4.4.2 Etude des marqueurs prédictifs de la variation de l'inclinaison de la bissectrice par rapport à la verticalité ; de l'angle formé par la moyenne des mesures SVV en condition dynamique (optocinétique à 20°/s)

Les déséquilibres tonaux du système vestibulaire, traditionnellement associés à des lésions vestibulaires périphériques unilatérales, ont été réévalués. Ces études suggèrent qu'au-delà des lésions otolithiques, des dysfonctionnements à différents niveaux du système vestibulaire, notamment les lésions spinales, du noyau vestibulaire, du tronc cérébral, du noyau interstitiel de Cajal, ainsi que les lésions situées au-dessus du tronc cérébral, thalamiques et corticales dans les régions insulaires et temporo-pariétales, peuvent affecter l'équilibre VVS et ML. Ces altérations peuvent conduire à des dysfonctionnements complexes tels que l'héminégligence visuospatiale et le syndrome du pusher, influençant à la fois la cognition et diverses modalités sensorielles (60). De plus, la modélisation des réseaux neuronaux révèle que les inclinaisons de la VVS résultent non seulement de déséquilibres otolithiques mais également d'anomalies du tonus des canaux semi-circulaires verticaux, affectant l'estimation centrale de la gravité. Français Ce modèle met en évidence l'importance du canal semi-circulaire vertical dans les inclinaisons de la VVS, proposant une réévaluation des causes des lésions vestibulaires, qui résulteraient d'un dysfonctionnement combiné des otolithes et de l'entrée du canal semi-circulaire (60). Dans notre modèle (Tableau 14 ; Figure 14), nous avons également montré une relation significative ( $P < 0,01$ ) entre la variation de l'angle bissecteur de la VVS en conditions dynamiques et les variables explicatives, contribuant à 38 % à la variance. Les résultats indiquent que la prépondérance du VOR et le gain du COR sont positivement et significativement associés à la variation de l'inclinaison de la VVS. Cela suggère une forte relation chez les patients vestibulaires chroniques entre la variation de la prépondérance du VOR et du gain du COR et celle de l'angle de la VVS en conditions de troubles visuels alors qu'aucune corrélation significative n'est observée avec le VVOR, l'IFO et la prépondérance absolue à l'examen bithermique. Ainsi, le recrutement du SPM chez certains de nos patients chroniques présentant des plaintes

d'instabilité serait proprioceptif multimodal impliquant la proprioception cervicale et oculomotrice selon notre théorie des réseaux neuronaux « courts » ou à courte latence.

Figure 14

[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

Figure 14. Analyse de régression par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) pour la variation dynamique de l'angle bissecteur de la VVS (AbSVVd). Ce graphique montre les coefficients bêta des variables utilisées dans l'analyse de régression par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) pour la variation dynamique de l'angle bissecteur de la VVS (AbSVVd). Les coefficients bêta indiquent la force et la direction de l'association entre chaque variable et la variation dynamique de l'angle bissecteur de la VVS. Composantes de la figure : • Points noirs : Chaque point noir représente un coefficient bêta pour une variable donnée. • Barres d'erreur : Les barres horizontales autour des points indiquent les intervalles de confiance à 95 % pour chaque coefficient bêta. Elles indiquent la plage dans laquelle le véritable coefficient bêta est susceptible de se situer avec une probabilité de 95 %. • Points rouges : Les points rouges indiquent les variables dont les coefficients bêta sont statistiquement significatifs ( $p < 0,05$ ). Les variables significatives sont annotées avec le texte « Significatif ». • Ligne pointillée horizontale à zéro : La ligne pointillée indique la valeur zéro du coefficient bêta. Français Un coefficient bêta de zéro signifie qu'il n'y a aucune association entre la variable et le changement dynamique de l'angle bissecteur de la VVS. Comment lire la figure : • Identifier les variables : Les variables sont répertoriées sur l'axe des x. Elles comprennent des mesures telles que « Constante », « VVORprep », « VORprep », « IFog », « CORg » et les catégories de « Présence d'une prépondérance absolue anormale (PA) ». • Comprendre les coefficients : La position des points noirs sur l'axe des y représente les coefficients bêta de chaque variable. Un coefficient positif indique une association positive avec le changement dynamique de l'angle bissecteur de la VVS, tandis qu'un coefficient négatif indique une association négative. • Évaluer la signification : Regardez les points rouges pour identifier les variables significatives. Ces variables ont une association statistiquement significative avec le changement dynamique de l'angle bissecteur de la VVS. Les barres d'erreur qui ne croisent pas la ligne pointillée horizontale à zéro indiquent également la signification. Définitions des variables : • VVORprep : Prépondérance observée lors du test de salve sensibilisée pour l'étude du réflexe visuo-vestibulo-oculaire, • VORprep : Prépondérance observée lors du test de salve sensibilisée pour l'étude du réflexe vestibulo-oculaire, • IFog : Gain obtenu lors du test de salve sensibilisée pour l'étude de l'index de fixation oculaire, • CORg : Gain obtenu lors du test de salve sensibilisée pour l'étude de l'index de réflexe cervico-oculaire, • PA (Oui) : Prépondérance absolue anormale ( $\geq 2^\circ/s$ ) au test bithermique, • PA (Non) : Prépondérance absolue normale ( $\leq 2^\circ/s$ ) au test bithermique.

#### 4.5 Modalités multisensorielles

Ces résultats incitent à réévaluer les mécanismes sous-jacents qui gouvernent l'interaction entre les systèmes vestibulaire et visuel, notamment en ce qui concerne le traitement et l'intégration des informations sensorielles. La compensation vestibulaire semble être influencée par deux systèmes : le premier implique une stratégie non cognitive ou de bas niveau. Cette stratégie, impliquant principalement les réseaux sous-corticaux, semble affecter l'activité visuo-oculomotrice sous l'influence du signal d'erreur vestibulaire et du lien fort avec la proprio-oculomotricité (67), et d'autre part, les noyaux vestibulaires et la précision de la VVS via le recrutement des voies

proprioceptives cervicales, notamment par le recrutement du gain COR, défini comme la précision du traitement vestibulaire (25, 68). Le deuxième système, impliquant une stratégie cognitive ou de haut niveau, implique plusieurs mécanismes de compensation « possibles » pour influencer le contrôle du gain sensoriel proprioceptif, le contrôle des processus sensorimoteurs, cognitivo-perceptifs et affectifs (6).

## 5 Conclusion

Notre étude a mis en évidence deux points d'intérêt principaux, le premier étant celui d'une thérapie intégrative, non segmentée, par un panel de praticiens paramédicaux. La thérapie non pharmacologique ne doit pas seulement répondre aux dysfonctionnements des fonctions vestibulaires primaires mais doit également se concentrer sur divers aspects de la fonction visuelle et de la qualité de vie des patients vestibulaires chroniques. Les améliorations significatives de l'acuité visuelle de près, de la fusion visuelle et de la perception spatiale soulignent l'importance d'une stratégie en temps réel dans la prise en charge des troubles vestibulaires. Il s'agit d'une véritable thérapie somato-perceptivo-motrice et cognitivo-comportementale, ces deux aspects devant être fusionnés dans la prise en charge. Un deuxième point soulevé par notre étude est la notion de nouveaux marqueurs qui doivent être systématiquement questionnés avant, pendant et après la thérapie, tels que les aspects neuro-visuels et psycho-émotionnels.

Cette étude contribue également à la discussion dans la littérature existante ( 52 ) qui postule l'impact du recrutement cognitivo-vestibulaire lors des tâches de compensation sur les ressources disponibles en démontrant que la rééducation vestibulaire intégrative peut avoir des effets bénéfiques importants, impactant positivement la santé mentale et la qualité de vie des patients. Elle souligne l'importance de poursuivre la recherche dans ce domaine, notamment pour développer des stratégies de rééducation plus ciblées et efficaces, et pour mieux comprendre les mécanismes centraux de compensation. Ces efforts amélioreront considérablement le bien-être et l'indépendance des personnes souffrant de troubles vestibulaires chroniques.

## Déclaration de disponibilité des données

Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article/ matériel supplémentaire, toute demande de renseignements complémentaires peut être adressée à l'auteur correspondant.

## Déclaration d'éthique

Les études impliquant des êtres humains ont été approuvées par le comité d'éthique de l'hôpital universitaire de CAEN numéro 2 796. Les études ont été menées conformément à la législation locale et aux exigences institutionnelles. Le consentement éclairé écrit des participants ou de leurs tuteurs légaux/parents les plus proches n'a pas été requis pour la participation, conformément à la législation nationale et aux exigences institutionnelles.

## Contributions des auteurs

FX : Conceptualisation, Analyse formelle, Méthodologie, Logiciel, Supervision, Rédaction – ébauche originale, Rédaction – révision et édition. EC : Conservation des données, Analyse formelle, Méthodologie, Logiciel, Supervision, Rédaction – ébauche originale, Rédaction – révision et édition.

BT : Validation, Visualisation, Rédaction – révision et édition. CC : Validation, Visualisation, Rédaction – révision et édition. SB : Validation, Visualisation, Rédaction – révision et édition.

#### Financement

L'auteur(e) déclare n'avoir reçu aucun soutien financier pour la recherche, la rédaction et/ou la publication de cet article.

#### Remerciements

Nous remercions Tristan Rosière [contact@statetudes.fr](mailto:contact@statetudes.fr) pour son aide précieuse dans l'élaboration de la méthodologie et la conduite des analyses statistiques.

#### Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière qui pourrait être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

#### Note de l'éditeur

Toutes les déclarations exprimées dans cet article sont uniquement celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de leurs organisations affiliées, ni celles de l'éditeur, des rédacteurs et des réviseurs. Tout produit qui pourrait être évalué dans cet article, ou toute déclaration qui pourrait être faite par son fabricant, n'est ni garantie ni approuvée par l'éditeur.

#### Matériel supplémentaire

Le matériel supplémentaire de cet article est disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fresc.2024.1414198/full#supplementary-material>

#### Abréviations

AP, antéro-postérieur ; PB, barre prismatique ; PBc, convergence de la barre prismatique ; PBd, divergence de la barre prismatique ; BFI, inventaire des cinq grands ; CHU, Centre Hospitalier Universitaire ; SNC, système nerveux central ; VPC, vestibulopathie périphérique chronique ; CSD, étourdissements subjectifs chroniques ; DHI, inventaire du handicap des étourdissements ; DVA, acuité visuelle de loin ; EC, yeux fermés ; EO, yeux ouverts ; EPN31, test d'émotivité positive et négative en 31 items ; Hs, signal hyperactif ; iVRT, thérapie de réadaptation vestibulaire intégrative ; I, inhibition sans déficit ; ML, médio-latéral ; N, profil non inhibé ; NPA, points d'accommodation proches ; NPC, point de convergence proche ; NVA, acuité visuelle de près ; OFI, indice de fixation oculaire ; P, inhibition controlatérale partielle ; PmW, planche de Mawas ; SOT, test d'organisation sensorielle ; SoC, état de compensation ; SF36, questionnaire de santé abrégé ( 27 ) ; SVV, verticale visuelle subjective ; SVVdyn, verticale visuelle subjective dynamique ; SVVstat, verticale visuelle subjective statique ; T, inhibition controlatérale totale ; ATM, troubles de l'articulation temporo-mandibulaire ; TVST, test de vision stéréoscopique de Thomas ; VC, état de contrôle visuel ; VES, signal d'erreur vestibulaire ; VNG, vidéonystagmographie ; VNGt, vidéonystagmographie bithermique ; VOR, réflexe vestibulo-oculaire ; VOR2, réflexe vestibulo-oculaire à double tâche ; VOR2g, gain VOR2 ; VORg, gain VOR ; VVOR, réflexe visuo-vestibulo-oculaire ; VestiQ-VS, questionnaire de santé vestibulaire.

## Références

1. Grill E, Heuberger M, Strobl R, Saglam M, Holle R, Linkohr B, et al. Prévalence, déterminants et conséquences de l'hypofonction vestibulaire. Résultats de l'enquête KORA-FF4. *Front Neurol* . (2018) 9:1076. doi: 10.3389/fneur.2018.01076

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

2. Hülse R, Biesdorf A, Hörmann K, Stuck B, Erhart M, Hülse M, et al. Troubles vestibulaires périphériques : une enquête épidémiologique auprès de 70 millions de personnes. *Otol Neurotol Off Publ Am Otol Soc Am Neurotol Soc Eur Acad Otol Neurotol* . (2019) 40(1):88–95. doi: 10.1097/MAO.0000000000002013

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

3. Roberts RE, Ahmad H, Patel M, Dima D, Ibitoye R, Sharif M, et al. Une étude IRMf des interactions visuo-vestibulaires après une névrite vestibulaire. *NeuroImage Clin* . (2018) 20:1010–7. doi: 10.1016/j.nicl.2018.10.007

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

4. Beh SC. La neuropsychologie des étourdissements et des troubles apparentés. *Otolaryngol Clin North Am* . (2021) 54(5):989–97. doi: 10.1016/j.otc.2021.05.016

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

5. Chari DA, Madhani A, Sharon JD, Lewis RF. Preuves de déficience cognitive chez les patients atteints de troubles vestibulaires. *J Neurol* . (2022) 269(11):5831–42. doi: 10.1007/s00415-022-11289-3

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

6. Guo J, Wang J, Liang P, Tian E, Liu D, Guo Z, et al. Le dysfonctionnement vestibulaire entraîne des troubles cognitifs : état des connaissances dans le domaine et perspectives cliniques (revue). *Int J Mol Med* . (2024) 53(4):36. doi: 10.3892/ijmm.2024.5360

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

7. Dobbels B, Mertens G, Gilles A, Claes A, Moyaert J, van de Berg R, et al. Fonction cognitive dans la vestibulopathie bilatérale acquise : une étude transversale sur la cognition, l'audition et la perte vestibulaire. *Front Neurosci* . (2019) 13:340. doi: 10.3389/fnins.2019.00340

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

8. Cousins S, Cutfield NJ, Kaski D, Palla A, Seemungal BM, Golding JF, et al. Dépendance visuelle et étourdissements après névrite vestibulaire. *PLoS One* . (2014) 9(9):e105426. doi: 10.1371/journal.pone.0105426

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

9. Xavier F, Chouin E, Serin-Brackman V, Séverac Cauquil A. Comment un signal vestibulaire unilatéral subclinique améliore la vision binoculaire. *J Clin Med* . (2023) 12(18):5847. doi: 10.3390/jcm12185847

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

10. Xavier F, Chouin E, Tighilet B, Lavieille JP, Chabbert C. Identification de marqueurs de suivi pour la prise en charge en réadaptation des patients atteints de schwannome vestibulaire. *J Clin Med* . (2023) 12(18):5947. doi: 10.3390/jcm12185947

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

11. Bauwens A, Kapoula Z, Aakash G, Guérin R. L'asthénopie vestibulaire de mieux en mieux cernée. *Rév. Francoph Orthopte* . (2021) 14(2):74-80. doi: 10.1016/j.rfo.2021.04.001

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

12. Orssaud C. Vision binoculaire. *CEM—Ophtalmol* . (2006) 3 :1-10. est ce que je: 10.1016/S0246-0343(06)45657-4

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

13. Lund S, Broberg C. Effets de différentes positions de la tête sur le balancement postural chez l'homme induit par un signal d'erreur vestibulaire reproductible. *Acta Physiol Scand* . (1983) 117(2):307–9. doi: 10.1111/j.1748-1716.1983.tb07212.x

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

14. Woschni EG. Erreurs dans les systèmes de signalisation. Dans : Sydenham PH, Thorn R, éditeurs. *Manuel de conception de systèmes de mesure*. Chichester, Angleterre : John Wiley & Sons, Ltd (2005) p. 304–16. Disponible en ligne sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471497398.mm158> (cité le 7 avril 2024).

Google Scholar

15. Angelaki DE, Cullen KE. Système vestibulaire : les multiples facettes d'un sens multimodal. *Annu Rev Neurosci* . (2008) 31 : 125–50. doi : 10.1146/annurev.neuro.31.060407.125555

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

16. Chang NYN, Uchanski RM, Hullar TE. Intégration temporelle des stimuli auditifs et vestibulaires. *Laryngoscope* . (2012) 122(6):1379–84. doi: 10.1002/lary.23329

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

17. Ferrè ER, Bottini G, Iannetti GD, Haggard P. L'équilibre des sentiments : modulation vestibulaire des sensations corporelles. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav* . (2013) 49(3) : 748–58. doi : 10.1016/j.cortex.2012.01.012

[Texte intégral de Crossref](#) | [Google Scholar](#)

18. Ferrè ER, Walther LE, Haggard P. Interactions multisensorielles entre signaux vestibulaires, visuels et somatosensoriels. *PLoS One* . (2015) 10(4):e0124573. doi: 10.1371/journal.pone.0124573

[Texte intégral de Crossref](#) | [Google Scholar](#)

19. Shayman CS, Seo JH, Oh Y, Lewis RF, Peterka RJ, Hullar TE. Relation entre la sensibilité vestibulaire et l'intégration temporelle multisensorielle. *J Neurophysiol* . (2018) 120(4):1572–7. doi: 10.1152/jn.00379.2018

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

20. Cullen KE. Le système vestibulaire : intégration multimodale et codage de l'auto-mouvement pour le contrôle moteur. *Trends Neurosci* . (2012) 35(3):185–96. doi: 10.1016/j.tins.2011.12.001

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

21. Cullen K. Traitement vestibulaire pendant le mouvement naturel de soi : implications pour la perception et l'action. *Nat Rev Neurosci* . (2019) 20(6):346–63. doi: 10.1038/s41583-019-0153-1

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

22. Alberts BBGT, Selen LPJ, Bertolini G, Straumann D, Medendorp WP, Tarnutzer AA. Dissociation des contributions vestibulaires et somatosensorielles à l'orientation spatiale. *J Neurophysiol* . (2016) 116(1):30–40. doi: 10.1152/jn.00056.2016

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

23. Forbes PA, Luu BL, Van der Loos HFM, Croft EA, Inglis JT, Blouin JS. Transformation des signaux vestibulaires pour le contrôle de la station debout chez l'homme. *J Neurosci* . (2016) 36(45):11510–20. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1902-16.2016

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

24. Rideaux R, Storrs KR, Maiello G, Welchman AE. Comment les neurones multisensoriels résolvent l'inférence causale. *Proc Natl Acad Sci USA* . (2021) 118(32):e2106235118. doi: 10.1073/pnas.2106235118

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

25. Diaz-Artiles A, Karmali F. Précision vestibulaire au niveau de la perception, des mouvements oculaires, de la posture et des neurones. *Neurosci* . (2021) 468 : 282–320. doi : 10.1016/j.neuroscience.2021.05.028

[Texte intégral de Crossref](#) | [Google Scholar](#)

26. Jacobson GP, Newman CW. Le développement de l'inventaire des handicaps dus aux vertiges. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* . (1990) 116(4):424–7. doi: 10.1001/archotol.1990.01870040046011

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

27. Di Fabio RP. Sensibilité et spécificité de la posturographie de la plateforme pour identifier les patients présentant un dysfonctionnement vestibulaire. *Phys Ther* . (1995) 75(4):290–305. doi: 10.1093/ptj/75.4.290

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

28. Lindell E, Kollén L, Johansson M, Karlsson T, Rydén L, Fässberg MM, et al. Étourdissements et qualité de vie liée à la santé chez les personnes âgées dans une population urbaine : une étude transversale. *Health Qual Life Outcomes* . (2021) 19(1):231. doi: 10.1186/s12955-021-01864-z

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

29. Machetanz K, Wang SS, Oberle L, Tatagiba M, Naros G. Différences entre les sexes dans le schwannome vestibulaire. *Cancers (Bâle)* . (2023) 15(17):4365. doi: 10.3390/cancers15174365

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

30. Ak AK, Çelebisoy N, Özdemir HN, Gökçay F. Migraine vestibulaire et vertiges perceptifs posturaux persistants : handicap, comorbidités émotionnelles, qualité de vie et traits de personnalité. *Clin Neurol Neurosurg* . (2022) 221:107409. doi: 10.1016/j.clineuro.2022.107409

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)

31. Pélioso A, Rolland JP, Perez-Diaz F, Jouvent R, Allilaire JF. Évaluation dimensionnelle des émotions en psychiatrie : validation du questionnaire Émotionnalité positive et négative à 31 items (EPN-31). *L'Encéphale* . (2007) 33(3):256-63. doi: 10.1016/S0013-7006(07)92037-0

[Texte intégral de Crossref](#) | [Google Scholar](#)

32. Anastasio T, Robinson D. Traitement parallèle distribué dans le système vestibulo-oculomoteur. *Neural Comput—NECO* . (1er juin 1989) 1 : 230–41. doi : 10.1162/neco.1989.1.2.230

[Texte intégral de Crossref](#) | [Google Scholar](#)

33. Jones SM, Jones TA, Mills KN, Gaines GC. Considérations anatomiques et physiologiques sur le dysfonctionnement et la compensation vestibulaires. *Semin Hear* . (2009) 30(4):231–41. doi: 10.1055/s-0029-1241124

[Résumé PubMed](#) | [Texte intégral Crossref](#) | [Google Scholar](#)



34. Ferrè ER, Haggard P. Interactions vestibulaires-somatosensorielles : un mécanisme à la recherche d'une fonction ? *Multisensory Res* . (2015) 28(5–6):559–79. doi: 10.1163/22134808-00002487

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

35. Balaban C. Régulation autonome vestibulaire (y compris le mal des transports et le mécanisme des vomissements). *Curr Opin Neurol* . (1999) 12(1):29–33. doi: 10.1097/00019052-199902000-00005

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

36. Kaliuzhna M, Ferrè ER, Herbelin B, Blanke O, Haggard P. Effets multisensoriels sur la somatosensation : une interaction visuo-vestibulaire-tactile trimodale. *Sci Rep* . (2016) 6:26301. doi: 10.1038/srep26301

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

37. Montesinos L, Castaldo R, Pecchia L. Sur l'utilisation de l'entropie approximative et de l'entropie d'échantillon avec des séries chronologiques du centre de pression. *J NeuroEngineering Rehabil* . (2018) 15:116. doi: 10.1186/s12984-018-0465-9

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

38. Chays A, Florant A, Ulmer E. *Les Vertiges* . 2e éd. Issy-les-Moulineaux, France : MASSON (2009). p. 95-6. Disponible en ligne sur : <https://www.elsevier-masson.fr/les-vertiges-9782294702143.html> (cité le 14 octobre 2023).

Google Scholar

39. Dufier JL. Échelle décimale Monoyer. *J Fr Ophtalmol* . (1988) 11(11):793. ISSN : 0181-5512.3250970

Résumé de PubMed | Google Scholar

40. Parinaud H. *Échelle Optométrique : Acuité Visuelle, Perception De La Lumière Et Des Couleurs* Paris : Roulot Editeur (1888). P. 9-11.

Google Scholar

41. Winn B, Gilmartin B, Sculfor DL, Bamford JC. Adaptation de la vergence et sénescence. *Optom Vis Sci Off Publ Am Acad Optom* . (1994) 71(12):797–800. doi: 10.1097/00006324-199412000-00011

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

42. Vedel V. Prix en soins orthoptiques dans un contexte de vertiges et céphalées chez l'enfant. *Rév. Francoph Orthopte* . (2017) 10(3-4):156-8. doi: 10.1016/j.rfo.2017.09.005

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

43. Scheiman M, Gallaway M, Frantz KA, Peters RJ, Hatch S, Cuff M, et al. Point de convergence proche : procédure de test, sélection de la cible et données normatives. *Optom Vis Sci* . (2003) 80(3) : 214–25. doi : 10.1097/00006324-200303000-00011

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

44. Julesz B. Fondements de la perception cyclopéenne. Oxford, Angleterre : U. Chicago Press (1971). p. xiv, 406. (Fondements de la perception cyclopéenne).

Google Scholar

45. Grosch M, Lindner M, Bartenstein P, Brandt T, Dieterich M, Ziegler S et al. Connectivité métabolique dynamique du cerveau entier lors de la compensation vestibulaire chez le rat. *NeuroImage* . (2021) 226 : 117588. est ce que je: 10.1016/j.neuroimage.2020.117588

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

46. Zwergal A, Lindner M, Grosch M, Dieterich M. Neuroplasticité in vivo dans des modèles animaux vestibulaires. *Neurosciences de cellules Mol* . (2022) 120:103721. est ce que je: 10.1016/j.mcn.2022.103721

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

47. Ibitoye RT, Mallas EJ, Bourke NJ, Kaski D, Bronstein AM, Sharp DJ. Le cortex vestibulaire humain : anatomie fonctionnelle de l'OP2, sa connectivité et l'effet de la maladie vestibulaire. *Cereb Cortex NYN* 1991. (2023) 33(3) : 567–82. doi : 10.1093/cercor/bhac085

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

48. Borel L, Honoré J, Bachelard-Serra M, Lavieille JP, Saj A. Représentation de l'orientation corporelle chez les patients présentant une déficience vestibulaire avant et après une perte vestibulaire unilatérale. *Front Syst Neurosci* . (2021) 15:733684. doi: 10.3389/fnsys.2021.733684

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

49. Appiah-Kubi KO, Wright WG. L'entraînement vestibulaire favorise l'adaptation de l'intégration multisensorielle dans le contrôle postural. *Gait Posture*. (2019) 73 : 215–20. doi : 10.1016/j.gaitpost.2019.07.197

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

50. Toth AJ, Harris LR, Bent LR. Le retour visuel n'est pas nécessaire pour recalibrer la contribution vestibulaire à la phase dynamique d'une réponse de récupération de perturbation. *Exp Brain Res* . (2019) 237(9) : 2185–96. doi : 10.1007/s00221-019-05571-6

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

51. Kobel MJ, Wagner AR, Merfeld DM, Mattingly JK. Seuils vestibulaires : revue des avancées et des défis des applications cliniques. *Front Neurol* . (2021) 12:643634. doi: 10.3389/fneur.2021.643634

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

52. Lacroix E, Deggouj N, Edwards MG, Van Cutsem J, Van Puyvelde M, Pattyn N. L'hypothèse de la compensation cognitivo-vestibulaire : comment les troubles cognitifs pourraient être le prix à payer pour faire face à la compensation. *Front Hum Neurosci* . (2021) 15:732974. doi: 10.3389/fnhum.2021.732974

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

53. Houben MMJ, Meskers AJH, Bos JE, Groen EL. Le seuil de perception de l'illusion vestibulaire de Coriolis. *J Vestib Res Equilib Orientat* . (2022) 32(4):317–24. doi: 10.3233/VES-210073

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

54. Lacquaniti F, La Scaleia B, Zago M. Bruit et perception vestibulaire du mouvement passif. *Front Neurol* . (2023) 14:1159242. doi: 10.3389/fneur.2023.1159242

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

55. Langevin P, Frémont P, Fait P, Roy JS. Réactivité de l'échelle de symptômes post-commotionnels pour surveiller le rétablissement clinique après une commotion cérébrale ou un traumatisme crânien léger. *Orthop J Sports Med* . (2022) 10(10):23259671221127049. doi: 10.1177/23259671221127049

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

56. Jackson C. L'échelle de fatigue de Chalder (CFQ 11). *Occup Med Oxf Engl* . (2015) 65(1):86. doi: 10.1093/occmed/kqu168

Texte intégral de Crossref | Google Scholar

57. Bittar RS, Pedalini MEB, Ramalho JRO, Carneiro CG. Perte vestibulaire bilatérale après irrigation calorifique : application clinique de la rééducation vestibulaire. *Rev Laryngol—Otol—Rhinol* . (2005) 126(1):3–6. PMID: 16080640.

Google Scholar

58. Sestak A, Maslovara S, Zubcic Z, Vceva A. Influence de la rééducation vestibulaire sur la récupération de tous les organes récepteurs vestibulaires chez les patients présentant une hypofonction vestibulaire unilatérale. *NeuroRehabilitation* . (2020) 47(2):227–35. doi: 10.3233/NRE-203113

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

59. Bjasch D, Bockisch CJ, Straumann D, Tarnutzer AA. Effets différentiels du retour visuel sur la précision et l'exactitude visuelles subjectives. *PloS One* . (2012) 7(11):e49311. doi: 10.1371/journal.pone.0049311

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

60. Dieterich M, Brandt T. Perception de la verticalité et troubles vestibulaires de l'équilibre et des chutes. *Front Neurol* . (2019) 10:172. doi: 10.3389/fneur.2019.00172

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

61. Kontos AP, Deitrick JM, Collins MW, Mucha A. Revue du dépistage vestibulaire et oculomoteur et de la réadaptation des commotions cérébrales. *J Athl Train* . (2017) 52(3):256–61. doi: 10.4085/1062-6050-51.11.05

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

62. Brown L, Camarinos J. Le rôle de la physiothérapie dans la réadaptation des commotions cérébrales. *Semin Pediatr Neurol* . (2019) 30:68–78. doi: 10.1016/j.spen.2019.03.011

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

63. Bacsí AM, Colebatch JG. Preuves de la contribution des réflexes et des perceptions vestibulaires au contrôle postural. *Exp Brain Res* . (2005) 160(1):22–8. doi: 10.1007/s00221-004-1982-2

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

64. Dakin CJ, Inglis JT, Chua R, Blouin JS. Modulation musculaire spécifique des réflexes vestibulaires avec augmentation de la vitesse et de la cadence locomotrices. *J Neurophysiol* . (2013) 110(1):86–94. doi: 10.1152/jn.00843.2012

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

65. Lui KY, Hewston P, Deshpande N. Interaction visuo-vestibulaire pour le contrôle postural lors de la transition assis-debout : effets du vieillissement. *Contrôle moteur* . (2019) 23(1):115–26. doi: 10.1123/mc.2017-0045

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

66. Goto F, Kabeya M, Kushiro K, Ttsutsumi T, Hayashi K. Effet de l'anxiété sur la stabilité posturale antéro-postérieure chez les patients souffrant de vertiges. *Neurosci Lett* . (2011) 487(2):204–6. doi: 10.1016/j.neulet.2010.10.023

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

67. Blazquez PM, Highstein SM. Interaction visuo-vestibulaire dans les neurones vestibulaires verticaux uniquement. *Neuroreport* . (2007) 18(13):1403–6. doi: 10.1097/WNR.0b013e3282cdeedd

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

68. King S, Dahlem K, Karmali F, Stankovic KM, Welling DB, Lewis RF. Le déséquilibre et les étourdissements causés par les schwannomes vestibulaires unilatéraux sont corrélés à la précision et au biais du réflexe vestibulo-oculaire. *J Neurophysiol* . (2022) 127(2):596–606. doi: 10.1152/jn.00725.2020

Résumé PubMed | Texte intégral Crossref | Google Scholar

Mots clés : rééducation vestibulaire intégrative, fusion visuelle, signal d'erreur vestibulaire, système sensori-perceptivo-moteur, indicateurs de surveillance, marqueurs prédictifs

Citation : Xavier F, Chouin E, Tighilet B, Chabbert C et Besnard S (2024) Approches innovantes pour la prise en charge des patients atteints de troubles vestibulaires chroniques : indicateurs de suivi et marqueurs prédictifs pour l'étude du signal d'erreur vestibulaire. *Front. Rehabil. Sci.* 5 :1414198. doi: 10.3389/fresc.2024.1414198

Reçu : 8 avril 2024 ; Accepté : 8 juillet 2024 ;

Publié : 16 août 2024.

Édité par :

Michael C. Schubert , Université Johns Hopkins, États-Unis

Révisé par :

Megan Kobel , Université de l'Arizona, États-Unis

Graham Dean Cochrane , Université de Caroline du Nord à Chapel Hill, États-Unis

Droits d'auteur : © 2024 Xavier, Chouin, Tighilet, Chabbert et Besnard. Il s'agit d'un article en libre accès distribué selon les termes de la licence Creative Commons Attribution (CC BY) . L'utilisation, la distribution ou la reproduction sur d'autres forums est autorisée, à condition que le ou les auteurs originaux et le ou les titulaires des droits d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée, conformément à la pratique universitaire acceptée. Aucune utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces termes n'est autorisée.

\*Correspondance : Frédéric Xavier, frederic.xavier@etu.univ-amu.fr

Avertissement : Toutes les déclarations exprimées dans cet article sont uniquement celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de leurs organisations affiliées, ni celles de l'éditeur, des rédacteurs et des réviseurs. Tout produit qui pourrait être évalué dans cet article ou toute déclaration qui pourrait être faite par son fabricant n'est ni garantie ni approuvée par l'éditeur.