

Partie I

La perception de la verticalité

Chapitre 1. Le sens de verticalité : l'équilibre vu sous l'angle des neurosciences cognitives	11
Chapitre 2. Évaluation de la latéropulsion	23

Le sens de verticalité : l'équilibre vu sous l'angle des neurosciences cognitives

Céline Piscicelli, Shenhao Dai, Camille Lemaire
et Dominic Pérennou

Introduction

Le sens de verticalité peut être défini comme la capacité humaine à percevoir explicitement la direction de la verticale, à construire et à mettre à jour une représentation mentale de cette verticale, à l'utiliser implicitement ou explicitement pour s'orienter soi-même (posture érigée) ou orienter l'environnement spatial. Le sens de verticalité permet de mieux comprendre les troubles posturaux en pathologie du vieillissement et en pathologie neurologique, récemment revisités à travers le prisme des neurosciences cognitives. En effet, le lien entre la perception de la verticale et l'orientation active du corps par rapport à la gravité est maintenant clairement établi dans le plan frontal (latéropulsion) chez des individus victimes d'un accident vasculaire cérébral (AVC) ou qui ont une maladie de Parkinson [1–3] ainsi que dans le plan sagittal chez des chuteurs récurrents [4]. Dans ce chapitre, nous analysons la littérature en lien avec le sens de verticalité, prenant en compte l'AVC comme modèle humain dans ce domaine [2, 3, 5].

En clinique et en recherche, l'évaluation de la perception de la verticale consiste à ajuster l'orientation d'un stimulus, qui est soit un objet extérieur, comme une ligne lumineuse pour la modalité visuelle (verticale visuelle [VV]) ou une barre pour la modalité haptique, soit son propre corps (verticale posturale [VP]), sur la direction perçue comme verticale. Ces mesures nécessitent l'obscurité absolue, les résultats étant affectés par tout indice visuel d'orientation présent dans l'environnement durant les mesures. Nous recommandons de ne débiter les mesures qu'après deux à trois minutes dans l'obscurité, le temps que la représentation mentale

de la pièce soit évacuée de la mémoire de travail. La perception visuelle de la verticale (VV) repose sur les informations visuo-vestibulaires [6, 7]. La perception posturale de la verticale (VP) dérive de l'information graviceptive somesthésique [3, 4] fournie par la proprioception (Ia et Ib) et les informations cutanées de pression, ainsi que par les gravicepteurs viscéraux distribués autour des reins et des gros vaisseaux. La verticale tactile ou haptique (VH) n'est pas une tâche purement perceptive, car elle implique également le contrôle moteur, notamment du membre supérieur [3, 7, 8]. Ces modalités de la perception de la verticale, et en particulier les VV et VP, fournissent de façon appropriée et complémentaire des moyens d'inférer sur le sens de verticalité d'un individu donné.

Chaque test VV, VP ou VH nécessite un nombre suffisant d'essais pour donner des résultats robustes, exprimés par un critère principal qui est l'orientation de la verticale perçue par un individu, habituellement calculée comme la moyenne algébrique des essais réalisés, et un critère secondaire qui est l'incertitude sur cette perception, habituellement calculée comme l'écart type sur les essais réalisés par un individu. Le critère d'orientation indique si la perception de la verticale est normalement orientée (proche de la verticale physique) ou inclinée de façon pathologique (biaisée) dans le plan frontal ou dans le plan sagittal. Elle est exprimée soit en valeur signée, soit en valeur absolue. La polarité est obligatoire pour interpréter l'effet possible d'un biais de la perception de la verticale sur une inclinaison corporelle par rapport à la gravité, le corps étant implicitement orienté sur une référence de verticale erronée. Par convention, un signe négatif correspond à une inclinaison vers la gauche

chez les sujets sains ou, après transformation de signe en fonction du côté de la lésion, à une inclinaison contralésionnelle chez les patients qui ont une lésion cérébrale. L'incertitude donne une indication sur la robustesse du sens de verticalité, indépendamment de l'existence d'un biais. L'incertitude peut aussi indiquer la fiabilité d'un paradigme ou l'existence de problème technique durant un test. La plupart des articles reportent uniquement le critère d'orientation, l'incertitude étant malheureusement trop souvent négligée. Le plan suivi pour ce chapitre est tout d'abord d'analyser la littérature pour chaque modalité VV, VP, VH, puis d'analyser comment la perception de la verticale fournit une base théorique pour la rééducation.

Verticale visuelle

Méthodes d'évaluation

La VV est la modalité la plus fréquemment utilisée, initialement et largement, comme mesure de la fonction vestibulaire otolithique en oto-rhino-laryngologie (ORL), puis maintenant utilisée de façon croissante en pathologie neurologique. Dans le domaine de la neurologie, l'AVC est la pathologie qui perturbe le plus sévèrement la VV [9]. C'est un test simple qui consiste à ajuster, dans l'obscurité absolue, une baguette lumineuse sur la direction estimée de la verticale. Cette évaluation est normalement très précise avec des erreurs de l'ordre du degré. La VV a été évaluée depuis longtemps chez les patients qui ont fait un AVC [10], et est maintenant relativement bien intégrée en routine clinique [2, 3, 11–18]. Cependant, les approches méthodologiques varient largement avec une myriade de protocoles qui ont été proposés et revus dans une analyse systématique [16]. La VV est aussi la modalité de perception de la verticale qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études investiguant les propriétés clinimétriques de ce test [16]. Il est recommandé de mesurer la VV avec un nombre pair d'essais allant de 6 à 10 pour obtenir une fiabilité suffisante sur le critère d'orientation [19]. Il est recommandé, en particulier chez des patients victimes d'un AVC et qui présentent des troubles de l'équilibre, de maintenir la position du corps droite par différents dispositifs, au minimum un maintien droit par une mentonnière, au mieux par d'autres dispositifs

permettant de bien maintenir la tête ou le tronc et la tête [15] (figure 1.1A). Dans ces conditions d'évaluation (figures 1.1A et 1.1B), l'orientation de la VV peut être considérée normale entre $-2,5^\circ$ et $+2,5^\circ$, et constitue une mesure très fiable qui peut être utilisée à la fois en recherche et en routine clinique [14]. Un changement de plus de 2° entre deux sessions de mesure de VV a été identifié comme un réel changement avec un intervalle de confiance à 95 % [14]. Ce seuil est critique pour la rééducation, notamment pour le suivi des patients présentant un biais dans la perception de la verticale en post-AVC, mais aussi pour servir de critère de jugement pour des essais cliniques.

La direction des inclinaisons de VV dépend de la localisation de la lésion cérébrale. Un AVC hémisphérique cause habituellement une inclinaison contralésionnelle de la VV, soit du côté du déficit hémicorporel, avec une fréquence estimée à environ la moitié des patients qui sont dans un service de rééducation [2, 3]. Cependant des biais ipsilésionnels sont retrouvés chez 10 à 20 % des patients après lésion hémisphérique [3, 19–21], constituant un phénomène encore mal compris à ce jour. Les lésions ponto-mésencéphaliques causent plutôt des biais contralésionnels de la VV [22]. Les lésions du tronc cérébral ponto-médullaires causent des inclinaisons plutôt ipsilésionnelles de la VV [3, 6]. Ces directions suivent en fait les décussations des voies vestibulaires des noyaux vestibulaires jusqu'au cortex vestibulaire, en passant par le thalamus [5]. Les directions de ces biais de VV sont congruentes avec la direction des inclinaisons du corps (latéropulsion).

Verticale visuelle et compréhension des troubles posturaux

À partir des années 1990, la congruence entre l'inclinaison de la VV (direction et amplitude) et celle de l'inclinaison latérale du corps en position debout (latéropulsion) a conduit à l'idée que les biais de VV refléteraient un biais dans la représentation de la verticale, expliquant ainsi le comportement postural de latéropulsion. Nous savons aujourd'hui que c'est vrai pour les AVC hémisphériques qui induisent une latéropulsion contralésionnelle [2, 3] associée à un biais contralésionnel de la VV. Ce n'est pas vrai pour les lésions basses du tronc cérébral qui causent une latéropulsion

ipsilésionnelle due à un tonus asymétrique, en relation avec un fonctionnement altéré des voies vestibulo-spinales [3]. L'association avec un biais ipsilésionnel de VV refléterait alors des signes vestibulo-oculaires, tels qu'une *skew déviation* ou une torsion oculaire [7, 10], signes qui n'ont rien à voir avec une altération de la représentation de la verticale.

Les résultats d'une étude récente [2], couplés avec une étude précédente, utilisant les mêmes procédures [3], donnent une vue d'ensemble de l'association proche entre la VV et la latéropulsion, les deux études constituant une série de 300 patients évalués à la période subaiguë après l'AVC. Les biais contralésionnels de VV sont d'autant plus fréquents et de grande amplitude que les patients ont une latéropulsion sévère. Cette association ne peut pas être simplement expliquée par une question de cooccurrence. La procédure pour tester la VV exclut que les biais de VV résultent de l'inclinaison corporelle par rapport à la gravité. La seule possibilité est que la latéropulsion soit secondaire à une altération de la graviception, quantifiée par les biais contralésionnels de VV. Ainsi la latéropulsion répond à une tentative d'aligner le corps sur la référence interne de verticale qui est erronée et perçue inclinée par rapport à la verticale gravitaire. En d'autres mots, les patients qui ont une latéropulsion ont une réponse posturale qui a pour but de contrôler leur équilibre en alignant implicitement leur posture érigée avec leur référence interne de la verticale qui est erronée et inclinée du côté opposé à l'AVC [3, 23]. Chez ces 300 individus, l'amplitude des biais contralésionnels de VV était deux fois plus importante que celle décrite dans deux séries de patients *pushers* [24, 25]. Inversement, les patients avec une latéropulsion n'avaient qu'occasionnellement une perception normale de VV (10/87, 10 %) ou des biais ipsilésionnels de la VV (9/97, 9 %). Ces résultats clairs, obtenus chez presque 100 patients présentant une latéropulsion, contredisent plusieurs études ayant rapporté qu'une perception normale de la VV était la règle chez les patients *pushers* [26–28]. De tels désaccords pourraient avoir été induits par des différences techniques dans les protocoles utilisés pour tester la VV [16]. Ces différences pourraient concerner l'installation des patients, la procédure, le nombre d'essais, les critères mesurés ainsi que la façon de les calculer, et éventuellement le niveau de pratique des examinateurs à faire ces tests. En

effet, comme il a été expliqué plus haut, la fiabilité des tests de VV dépend étroitement de la qualité des procédures [14–16, 19]. Dans une étude très récente [2], une analyse factorielle a même montré que les biais contralésionnels de VV et la latéropulsion contralésionnelle après AVC hémisphérique étaient deux critères inséparables d'une même dimension, l'orientation verticale [2, 3].

De façon intéressante, le lien étroit qui existe entre la perception et l'action référencée à la verticale, jusqu'à maintenant essentiellement documenté pour le contrôle postural, a été récemment étendu à d'autres tâches motrices telles que l'écriture manuelle. Une étude de cas a montré qu'un biais dans la représentation de la verticale pouvait être la cause du phénomène d'écriture inclinée observé après AVC [29]. L'écriture inclinée, partie intégrante du spectre des signes reliés au codage spatial du langage écrit constituant la dysgraphie spatiale après lésion hémisphérique droite, pourrait être due à un biais antihoraire dans la représentation de la verticale, transposé sur la feuille de papier référencée avec un haut et un bas [29].

Après AVC hémisphérique, il existe aussi des biais ipsilésionnels dont l'origine est encore mal comprise. Ils ne sont pas rares, retrouvés chez 10 à 20 % des patients [3, 10, 14, 21, 30] et en particulier après lésion thalamique inférieure et médiane. Leur physiopathologie semble différente de celle des biais contralésionnels de VV et il semble qu'ils ne soient pas liés à la perception de la verticale. Ils ne sont pas associés à des signes vestibulo-oculaires [30] qui, de plus, ne sont pas fréquents après AVC hémisphérique [31], ce qui argumente contre la possibilité d'une cyclotorsion oculaire ipsiversive. Les études en imagerie fonctionnelle du réseau vestibulaire chez des individus sains et chez des patients ont révélé des voies vestibulaires ipsilatérales et contralatérales complexes allant des noyaux vestibulaires aux deux jonctions pariéto-insulaires, l'une court-circuitant le thalamus [30, 32]. En fait, selon la localisation précise de la lésion sur les voies vestibulaires, les inclinaisons de la VV pourraient être contralésionnelles ou ipsilésionnelles [30, 32]. Ceci expliquerait la fréquence des deux orientations, contralésionnelle et ipsilésionnelle. Cependant, cette interprétation ne prend pas en compte l'absence de biais ipsilésionnel lorsque la lésion endommage la graviception somesthésique [3], pas plus que les différents impacts fonctionnels des biais de VV ipsilésionnels

et contralésionnels. En effet, les individus avec des biais ipsilésionnels de VV se tiennent généralement en position verticale sans latéropulsion. L'amplitude des biais ipsilésionnels de VV est plus petite que celle des biais contralésionnels, et n'est pas liée à la prédominance de l'hémisphère droit [21]. Quels que soient les mécanismes sous-tendant les biais ipsilésionnels de VV après AVC hémisphérique, leur existence atténuée la valeur prédictive des biais de VV (indépendamment de leur polarité) sur les troubles posturaux et les capacités de mobilité [13, 28]. Si les biais ipsilésionnels sont écartés des analyses, alors la VV devient un test pertinent et très intéressant pour guider la rééducation du sens de verticalité en détectant et quantifiant les biais contralésionnels du modèle interne de verticalité, et suivant leur évolution.

Pour résumer, la grande fréquence des biais contralésionnels de perception de la VV après AVC hémisphérique est maintenant bien établie. La mesure de la VV permet de mieux comprendre le mécanisme de la latéropulsion. Schématiquement, les patients avec une lésion hémisphérique alignent leur posture érigée sur une référence de verticalité erronée, inclinée du côté opposé à l'AVC, ce qui induit la latéropulsion. Les biais ipsilésionnels de la VV après AVC hémisphérique semblent ne pas correspondre à un problème de verticalité; leur mécanisme reste à élucider. Chez les patients avec AVC du tronc cérébral, la latéropulsion est généralement ipsilésionnelle et résulte plutôt d'une asymétrie de tonus liée à des mécanismes vestibulo-spinaux.

Verticale visuelle et quantification des progrès durant la rééducation

La VV contribuant à expliquer les troubles posturaux, son évaluation pourrait fournir des mesures objectives avec une variable continue pour un suivi durant la rééducation, en supplément des échelles cliniques ordinales qui évaluent la latéropulsion (voir chapitre 2). Cependant, la récupération de la VV après AVC a été peu analysée. Le peu de données disponibles sur l'évolution dans le temps de la perception de la VV [33] apporte un éclairage intéressant sur la dominance hémisphérique du sens de verticalité. Bonan *et al.* ont analysé l'évolution de la VV chez 30 patients après AVC, 17 ayant une lésion hémisphérique gauche et 13 une lésion

hémisphérique droite. La VV était testée d'abord dans les quarante-cinq jours après AVC puis à trois et six mois. Soixante pour cent des patients avaient une perception altérée de la verticale en phase initiale et 39 % récupéraient durant les trois premiers mois [33]. L'amplitude des inclinaisons de la VV était en valeur absolue de $5,3^\circ$ à la première évaluation, de $2,5^\circ$ à trois mois et de $1,7^\circ$ à six mois. En phase initiale, la fréquence et la sévérité des biais de VV ne différaient pas entre lésions droites et lésions gauches. Cependant, les biais de VV étaient plus sévères et plus persistants après AVC hémisphérique droit. Cette meilleure récupération des biais de perception de la VV après lésion hémisphérique gauche pourrait expliquer la différence de prévalence retrouvée dans la littérature entre lésions droites et lésions gauches avec une prédominance hémisphérique droite inconstamment retrouvée [3, 11, 12, 20, 34] et qui pourrait être liée au délai entre le moment de l'évaluation et l'AVC. La moins bonne récupération des biais de VV après lésion droite est cohérente avec la prédominance de l'hémisphère droit pour la cognition spatiale, ce patron de récupération n'étant pas sans rappeler celui du syndrome de négligence spatiale ainsi que celui de la latéropulsion [2]. Cette moins bonne récupération des biais de perception de la verticale après lésion droite pourrait être impliquée dans la moins bonne récupération de l'équilibre après lésion droite [13].

Verticale visuelle et recherche fondamentale : les bases neurales du sens de verticalité

Les bases neurales du sens de verticalité ont été assez largement étudiées pour la modalité visuelle [3, 11, 12, 20, 22, 30, 34–37] et essentiellement par une approche d'inférence par analyse lésionnelle. En partant du postulat que la lésion est la cause du déficit comportemental, les régions lésées sont considérées comme essentielles pour la fonction. L'AVC, en étant caractérisé par la survenue brutale d'une lésion cérébrale focale, responsable d'altérations sévères de la perception de la verticale [9], apparaît être un modèle privilégié pour évaluer le sens de verticalité chez l'homme. Une récente revue synthétise les données de la littérature [38] dont les résultats convergent autour de la jonction temporo-pariétale [11, 12, 20, 34, 35] avec l'implication de l'insula postérieure [11,

12, 20, 34, 35] et des régions adjacentes pariéto-operculaires [11, 12, 36, 37], à travers le thalamus postéro-latéral [12, 30], de manière prédominante à droite [3] (figure 1.1C). Quelques études ont aussi été réalisées chez des sujets sains, en utilisant la stimulation magnétique transcrânienne [39, 40], l'électrophysiologie [41] ou l'imagerie fonctionnelle [42]. En complément des résultats des analyses lésionnelles, ces études ont pointé l'im-

plication de régions moins attendues, telles que le cortex occipital [41, 42], dont le rôle devra être clarifié. L'étape suivante sera de voir comment toutes ces structures sont fonctionnellement connectées et comment elles participent au probable réseau sous-tendant le sens de verticalité. Une récente étude de connectivité a pointé le rôle majeur des projections thalamo-insulaires, en particulier de la partie postérieure de celles-ci dans ce réseau [43].

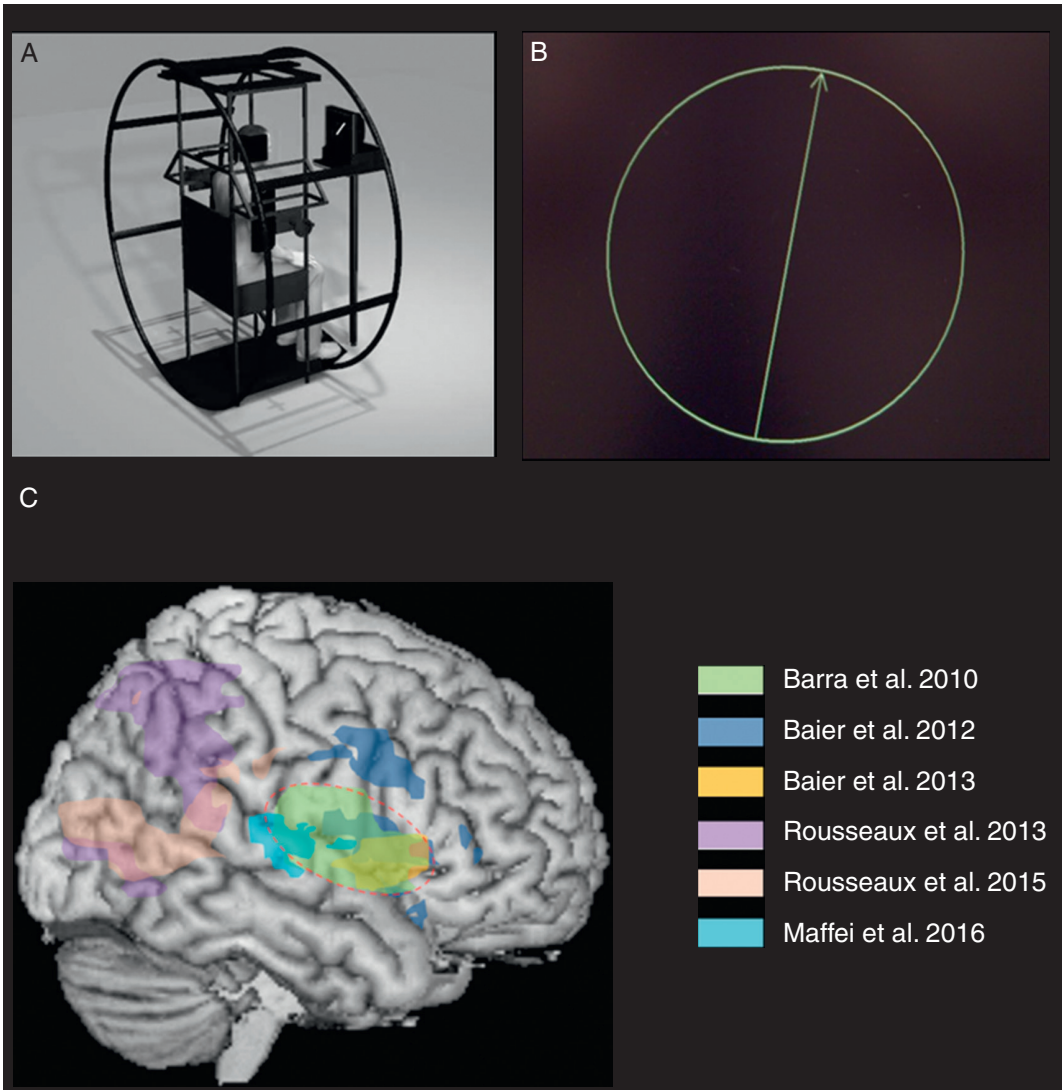


Figure 1.1. Verticale visuelle.

A. Dispositif d'évaluation informatisée de la verticale visuelle (VV) [3] B. Illustration de l'affichage de la VV sur l'écran d'ordinateur [3]. C. Illustration des aires corticales associées à une altération de la VV, basée sur une reproduction approximative des localisations lésionnelles identifiées par méthode d'inférence lésionnelle dans six études [11, 12, 34–37]. La zone en pointillé rouge indique les principales aires de convergence entre les études. *Copyright Céline Piscicelli.*

Verticale posturale (VP)

La perception posturale de la verticale est évaluée en demandant au sujet, dans l'obscurité, d'orienter verticalement son corps selon la direction qu'il perçoit verticale. L'inclinaison corporelle est réalisée au moyen de différents dispositifs qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories.

La première s'inspire des toutes premières expérimentations sur la VP telles que proposées par Brant Clark et Ashton Graybiel [44] et des expérimentations sur les effets de la gravité avec les simulateurs de vol, où le sujet est complètement maintenu, capitoné dans le plan latéral. Ce maintien complet du sujet concerne l'ensemble des segments corporels (membres inférieurs, tronc et tête). Ainsi, le sujet devient solidaire du dispositif, ce qui confère à la tâche d'orientation une dimension purement perceptive. Parmi les dispositifs utilisés jusqu'ici en clinique, seul le *Wheel Paradigm* [3] répond à cette propriété (figure 1.2). Il s'agit d'un dispositif mécanique constitué d'un siège fixé dans une roue de 2 m de diamètre au sein duquel le sujet est complètement maintenu en position assise, avec la tête, le tronc et les membres inférieurs alignés et maintenus en position droite au moyen de sangles et de cales latérales revêtues de mousses. Afin de déterminer la VP, le sujet est incliné jusqu'à un angle défini dont il n'a pas connaissance. La roue est ensuite tournée vers le côté opposé jusqu'à ce que le sujet indique avoir atteint une position verticale. La roue est mobilisée manuellement, aussi doucement et régulièrement que possible, à une vitesse relativement faible (1,5°/s) pour minimiser la stimulation des canaux semi-circulaires, sur un support de type moquette pour éviter tout indigage en cas d'aspérité du sol. Plusieurs caractéristiques mécaniques ont de l'importance, dont une masse importante (128 kg), un grand rayon servant de main courante pour les opérateurs, un barycentre conçu pour être approximativement positionné, proche du centre de masse des personnes testées, et un déplacement sur un support sans aspérité. Ces caractéristiques garantissent une rotation silencieuse et régulière, sans à-coup, excluant tout indigage lié au retour acoustique ou vibratoire. Elles assurent aussi une mobilisation combinant rotation et translation du sujet, ce qui confère un caractère écologique à ces déplacements qui sont perçus par les personnes testées comme étant très confortables, y compris par les personnes les plus fragiles. Une

excellente distribution des masses autour d'un barycentre unique (personne et dispositif), une personne parfaitement solidaire du dispositif grâce à un capitonage et sanglage optimal ainsi qu'un rayon de grande dimension permettent à l'opérateur de mobiliser l'ensemble sans effort et de façon continue quelle que soit l'inclinaison du dispositif. Une personne peut même être laissée inclinée dans la roue quasiment sans nécessité de maintenir le dispositif. Au niveau de la tête, l'inclinaison comporte à la fois une composante de rotation et de translation. Cette dernière composante est faible (approximativement 0,3 cm/s pour un sujet de 1,8 m) et en dessous du seuil de stimulation des otolithes. Par conséquent, les stimulations otolithiques sont quasiment toutes dues à l'inclinaison gravitationnelle ($4,9 \text{ m/s}^2$ à 30° d'inclinaison de la verticale). Les pieds reposent sur un support solidaire du dispositif pour éviter de laisser pendre librement les membres inférieurs, ce qui pourrait induire un biais de perception d'orientation lors des inclinaisons du tronc et de la tête. Ce dispositif offre l'avantage d'évaluer la VP soit dans le plan frontal, soit dans le plan sagittal, en inclinant les personnes sans difficulté jusqu'à 50 à 60° , voire plus, puisqu'elles sont solidaires du dispositif et qu'avec le principe de la roue, il n'y a rien qui, mécaniquement, limite l'inclinaison maximale. Des amplitudes supérieures à 30° d'inclinaison peuvent être nécessaires pour tester des patients qui ont des biais importants de VP.

La seconde catégorie de dispositifs d'évaluation de la VP comprend des tâches mixtes, combinant action et perception. Au sein de ces dispositifs, le maintien du sujet n'est que partiel, avec, dans la majorité des cas, une absence de maintien de la tête [27, 28, 45–51], voire, pour certains, du tronc ou des membres inférieurs [27, 47–49, 52], avec des différences concernant la présence [45, 46, 49] ou non d'un support plantaire [27, 47, 48, 51]. Les conditions de maintien confèrent à la tâche une dimension dynamique, le sujet devant à la fois se maintenir activement vertical (action) et tenter de percevoir explicitement l'orientation de son corps perçue comme verticale (perception). Ainsi, la perception de la verticale évaluée, appelée « VP », correspondrait plus à une verticale « comportementale » [23, 53]. Lorsque la tête et les membres inférieurs sont libres, il n'est pas certain que leur orientation soit confondue avec celle du tronc. Dans ce cas, la VP mesurée reflète-t-elle l'orientation du tronc, celle de la tête, celle des membres