

**Efficiences et déficiences
du contrôle postural**

Dominic Pérennou et Michel Lacour eds.
Solal, éditeur, Marseille - 2006.

C. LOPEZ¹
M. LACOUR¹
A. EL
AHMADI²
J. MAGNAN³
L. BOREL¹

**PERCEPTION
DE LA VERTICALE EN PRESENCE
D'INFORMATIONS VISUELLES
DYNAMIQUES**
**Effets comparés d'une perte
vestibulaire unilatérale et bilatérale**

INTRODUCTION

La perception de la verticale requiert l'intégration d'informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques. Le rôle de ces différentes modalités sensorielles a été bien illustré dans des expériences portant sur les effets de stimulations sélectives de l'un de ces canaux sur la perception de la verticale. L'implication des informations vestibulaires dans la perception de la verticale a été montrée par l'utilisation de stimulations vestibulaires galvaniques et par des stimulations vestibulaires naturelles lors de rotations du sujet (Zink et al., 1998; Pavlou et al., 2003). L'implication des informations visuelles dans la perception de la verticale a été mise en évidence par des manipulations des informations visuelles statiques et dynamiques. Ainsi, l'inclinaison de références visuelles statiques relativement à la verticale gravitaire, comme cela est le cas dans le test du cadre et de la baguette (*rod and frame test*), modifie la verticale visuelle perçue et tend à la dévier dans le sens d'inclinaison des références visuelles (Witkin et Ash, 1948; Luyat et al., 1997, 1999; Guerraz et al., 1998, 2001; Ohlmann et Luyat, 2001). De même, le déplacement circulaire de l'environnement visuel dans le plan frontal, autour de l'axe du regard, se traduit par l'incli-

1. Laboratoire de Neurobiologie Intégrative et Adaptative. UMR 6149 Université de Provence - CNRS. Pôle 3C, Case B. 3, Place Victor Hugo. 13331 Marseille Cedex 3.

2. Service de Psychologie Mathématique, Université de Provence. Aix-en-Provence.

3. Service d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie Cervico-faciale, CHU Hôpital Nord. Marseille.

raison de la verticale visuelle perçue dans le sens de déplacement de l'environnement visuel. Cet effet a été observé par de nombreux auteurs à l'aide de stimulations optocinétiques à vitesse angulaire constante (Dichgans et al., 1972, 1974; Hughes et al., 1972; Held et al., 1975; Brandt et Dieterich, 1996; Guerraz et al., 1998; Isabelle et al., 1998; Kobayashi et al., 2002; Lopez et al., 2003) et lors d'oscillations sinusoïdales de la scène visuelle (Mauritz et al., 1977).

La perte des informations vestibulaires constitue un modèle d'étude permettant d'évaluer les interactions entre systèmes visuel et vestibulaire dans la perception de la verticale. Les conséquences d'une perte vestibulaire sur la perception de la verticale ont fait l'objet de nombreuses descriptions chez des patients vestibulo-déficients unilatéraux. Classiquement, en l'absence de références visuelles, la verticale visuelle perçue est déviée vers le côté de la perte vestibulaire (e.g. Friedmann, 1970; Vibert et al., 1999; Vibert et Häusler, 2000). Lorsque des références visuelles de verticalité et d'horizontalité sont présentes dans l'environnement, l'inclinaison de la verticale perçue est réduite, même si elle demeure en direction du côté désafférenté (Borel et al., 2001). En revanche, on sait peu de choses sur l'effet de stimulations visuelles dynamiques sur la perception de la verticale après une perte vestibulaire unilatérale. Une déviation asymétrique de la verticale visuelle dynamique a été rapportée chez des patients porteurs de lésions du tronc cérébral (Brandt et Dieterich, 1987) et chez des patients testés après résection d'un schwannome vestibulaire (Goto et al., 2003). Néanmoins, aucune étude n'a porté à ce jour sur le décours de la compensation des déficits perceptifs mis en évidence lors de stimulations visuelles dynamiques. En outre, les effets comparés d'une perte vestibulaire unilatérale et bilatérale sur la contribution des informations visuelles dynamiques à la perception de la verticale restent à préciser. A notre connaissance, seulement deux études ont étudié l'influence des informations visuelles dynamiques sur la perception de la verticale chez des patients vestibulo-déficients bilatéraux (Bronstein et al., 1996; Guerraz et al., 2001). Ces deux études ont mis en évidence une augmentation de la dépendance des sujets à l'égard des informations visuelles dynamiques, se traduisant par une augmentation de l'inclinaison de la verticale perçue.

Cette étude a pour objectif de déterminer comment la manipulation expérimentale des informations visuelles se combine avec les effets de la perte vestibulaire pour modifier la perception de la verticale. Afin de répondre à cette question, nous avons analysé l'effet d'une perte vestibulaire unilatérale totale sur la perception de la verticale. Pour cela, nous avons évalué la perception de la verticale visuelle chez des patients vestibulo-déficients atteints de la maladie de Ménière traités par une neurotomie vestibulaire à visée curative. L'appréciation de la verticale a été mesurée dans des conditions visuelles dynamiques, en présence d'une stimulation optocinétique circulaire dans le plan frontal. Les objectifs principaux étaient de comparer l'effet de stimulations optocinétiques dirigées vers le côté de la lésion (stimulations ipsilésionnelles) et vers le côté intact (stimulations contralésionnelles), ainsi que de déterminer le décours de la compensation des déficits perceptifs en réalisant un suivi longitudinal des patients. Finalement, nous avons comparé les effets d'une perte vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale à ceux d'une perte vestibulaire bilatérale.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sujets

Cette étude a été conduite chez des patients vestibulo-déficients unilatéraux et bilatéraux. Le groupe de patients vestibulo-déficients unilatéraux était constitué de 40 patients atteints de la maladie de Menière composé de 20 hommes et 20 femmes (âge moyen \pm écart type : 48 ± 13 ans). L'examen neuro-otologique a révélé chez tous les patients une atteinte vestibulaire purement unilatérale. Tous présentaient la triade symptomatique classique regroupant vertiges rotatoires invalidants, hypoacousie fluctuante et acouphènes. La perte vestibulaire unilatérale déterminée par le test d'irrigation calorique était en moyenne de 46 ± 16 %. La perte auditive moyenne était de 45 ± 19 dB du côté de l'oreille atteinte. L'ancienneté de la maladie s'étendait de 1 à 22 ans (moyenne : 6 ± 6 ans). Sur les 40 patients, 21 % souffraient de crises vertigineuses quotidiennes, 42 % de crises hebdomadaires, et 37 % de crises mensuelles. Chez ces patients devenus résistants aux traitements pharmacologiques, une neurectomie vestibulaire unilatérale (NVU) a été pratiquée par voie rétrosgmoïde afin de supprimer de façon définitive les crises vertigineuses (Magnan et al., 1991). La neurectomie a été pratiquée du côté droit chez 23 patients et du côté gauche chez les 17 autres. La réalisation du test calorique après la NVU a confirmé l'aréflexie vestibulaire unilatérale. Tous les patients étaient capables de se tenir debout, détendus et immobiles une semaine après la NVU.

Le groupe de patients vestibulo-déficients bilatéraux était constitué de quatre patients (1 homme et 3 femmes ; âge moyen : 58 ± 22 ans). L'aréflexie vestibulaire bilatérale a été établie sur la base d'une absence de réponse au test calorique et au test cinétique sur fauteuil rotatoire. Chez un patient, la perte vestibulaire bilatérale était due à la prise d'un traitement antibiotique ototoxique contre une tuberculose. Pour les trois autres patients, la perte vestibulaire était idiopathique. L'examen neurologique était normal chez tous les patients. La perte auditive était inférieure à 20 dB chez trois patients ; un patient présentait une surdité totale sur une oreille. Tous les patients ont été testés au stade compensé, entre 3 et 10 ans après la perte vestibulaire.

Les données recueillies chez les patients vestibulo-déficients unilatéraux et bilatéraux ont été comparées à celles recueillies chez 24 sujets volontaires sains (12 hommes et 12 femmes ; âge moyen : 40 ± 12 ans) exempts de troubles moteurs, oculomoteurs et visuels.

Sessions

Les patients vestibulo-déficients unilatéraux atteints de la maladie de Menière ont été testés 1 jour avant la NVU (J-1) en l'absence de crise vertigineuse, ainsi qu'au cours de la période de compensation (1 semaine : J+7, 2 semaines : J+15, 1 mois : J+30, 2-3 mois : J+75, 4-5 mois : J+135, 1-2 ans : J>365 après la chirurgie). La répétition des tests étant susceptible de modifier les performances, nous avons vérifié chez 10 sujets témoins testés de façon répétée que les réponses perceptives étaient stables au cours du temps.

Dispositif expérimental

Les tests ont été réalisés chez des sujets se tenant debout face à un disque optocinétique. Le disque était recouvert d'un patron visuel pseudo-aléatoire composé de points noirs sur un fond blanc. Le disque était motorisé et pouvait être mis en rotation dans le sens horaire et dans le sens antihoraire à des vitesses angulaires constantes (5, 10, 20, 40, 80 et 120 °/s). Une cible circulaire noire était positionnée au centre du disque optocinétique. Le centre du disque était positionné au niveau de l'axe du regard des sujets. L'appréciation de la verticale visuelle a été évaluée en projetant un faisceau lumineux rouge (Framiral, Cannes, France) au centre du disque optocinétique. Le faisceau pouvait être incliné dans le sens horaire ou antihoraire par l'intermédiaire de deux manettes placées dans chacune des mains du sujet. L'orientation de la verticale visuelle a été enregistrée de façon continue sur ordinateur.

Protocole expérimental

Chaque session expérimentale était composée de tests réalisés en présence d'un environnement visuel stationnaire et en présence d'une stimulation optocinétique circulaire, ce qui nous a permis d'évaluer respectivement la verticale visuelle statique (VS) et la verticale visuelle dynamique (VD). Les sujets avaient pour consigne de fixer la cible centrale du disque. Ils portaient un masque destiné à restreindre leur champ visuel (40° dans les plans horizontal et vertical) et à supprimer toute référence de verticale et d'horizontale. Les mesures ont été réalisées en vision binoculaire.

S'agissant de l'évaluation de la VS, 4 mesures consécutives ont été réalisées face au disque immobile. Les sujets avaient pour consigne d'aligner le faisceau lumineux avec leur propre perception de la verticalité. La position de départ du faisceau était déterminée par l'expérimentateur soit dans le sens horaire (2 essais) soit dans le sens antihoraire (2 essais) relativement à la verticale gravitaire.

S'agissant de l'évaluation de la VD, elle a été réalisée lors des stimulations optocinétiques pour chacune des vitesses de stimulation et pour chaque direction de stimulation. Les stimulations optocinétiques duraient 40 s. L'enregistrement de la position du faisceau lumineux démarrait 10 s après le début de la stimulation et durait 30 s. Ce protocole a été utilisé afin d'exclure des données la période de latence correspondant à la mise en place des effets perceptifs. Au cours des stimulations optocinétiques, les sujets avaient pour consigne d'aligner la position du faisceau lumineux afin qu'il leur paraisse en permanence vertical, compensant ainsi l'illusion perceptive d'inclinaison de la verticale.

Acquisition et traitement des données

Nous avons évalué la VS en calculant la moyenne sur les 4 essais consécutifs réalisés devant le disque immobile. Lors des stimulations optocinétiques, la position du faisceau lumineux a été enregistrée avec une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz. La perception de la VD a été définie comme l'inclinaison moyenne du faisceau lumineux pendant les 30 dernières secondes de la stimulation optocinétique. Selon nos conventions, un angle de 0° indique que la

verticale perçue est alignée avec la verticale gravitaire. Des valeurs angulaires positives et négatives représentent une déviation de la verticale perçue respectivement du côté intact et du côté lésé, chez les patients, et dans le sens horaire et antihoraire chez les témoins.

Par ailleurs, nous avons calculé pour chaque sujet l'amplitude de l'effet perceptif induit par la stimulation optocinétique relativement à la VS et non plus par rapport à la verticale gravitaire. Ce calcul a été réalisé dans le but de dissocier les effets perceptifs liés au déplacement de l'environnement visuel (VD) des effets perceptifs statiques (VS). Nous avons appelé ce nouveau paramètre « verticale visuelle dynamique relative » ou VDR. Il a été calculé en soustrayant la valeur de la VS de la valeur de la VD.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SAS/STAT (version 9). Les performances préopératoires des patients de Menière ont été comparées aux performances des sujets témoins par le biais d'analyses de la variance (ANOVAs) à mesures répétées avec comme facteur inter-groupes les sujets (patients, témoins) et comme facteurs intra-groupes la direction de stimulation (horaire, antihoraire) et la vitesse de stimulation (5, 10, 20, 40, 80 et 120 °/s). Le même type d'analyse a été réalisé afin de comparer les performances des patients vestibulo-déficients bilatéraux à celles des sujets témoins. Finalement, afin d'évaluer l'évolution des performances postopératoires des patients de Menière, des ANOVAs supplémentaires ont été réalisées avec comme facteurs intra-groupes le délai postopératoire (J-1, J+7, J+15, J+30, J+75, J+135, J>365), la direction de stimulation (ipsilésionnelle, contralésionnelle) et la vitesse de stimulation (5, 10, 20, 40, 80 et 120 °/s). Les différences ont été considérées comme étant significativement différentes pour $p < 0,05$.

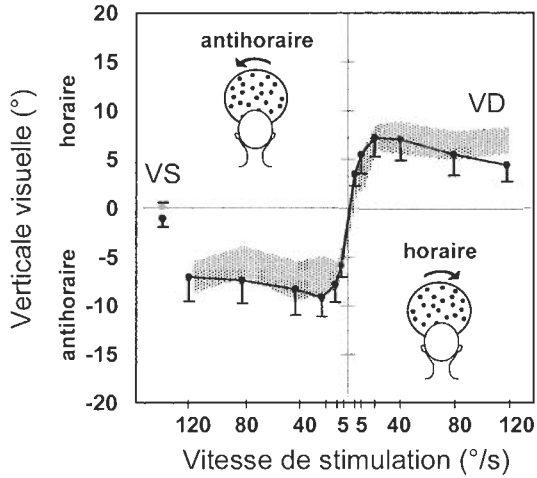
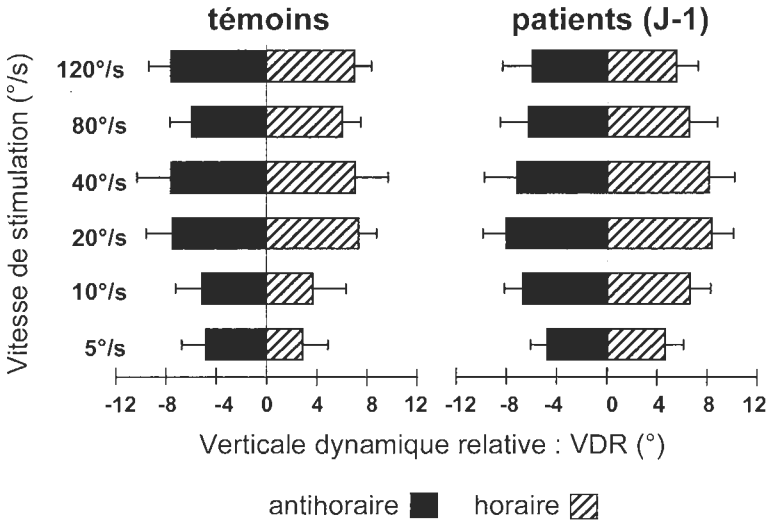
RÉSULTATS

Comparaison de la perception de la verticale visuelle chez des sujets témoins et des patients de Menière testés avant neurotomie vestibulaire unilatérale

La comparaison des performances préopératoires des patients de Menière avec celles des sujets témoins indique qu'il n'y a pas de différence entre ces deux groupes, quel que soit le paramètre perceptif considéré.

S'agissant de la perception de la VD, il n'y a pas de différence significative entre les patients de Menière et les sujets témoins [$F_{(1,49)} = 0,48$; $p = 0,49$]. L'ANOVA indique toutefois des variations en fonction de la direction de stimulation [$F_{(1,49)} = 1044$; $p < 0,0001$] et de la vitesse de stimulation [$F_{(10,490)} = 3,75$; $p < 0,0001$]. Les effets de la direction de stimulation et de la vitesse de stimulation sur la perception de la VD sont illustrés sur la figure 1A. Il est notable que chez les sujets témoins comme chez les patients de Menière, l'inclinaison de la VD augmente lorsque croît la vitesse de la stimulation, jusqu'à la vitesse de 20 °/s.

L'analyse de la perception de la VS indique à nouveau que les performances ne diffèrent pas chez les patients de Menière et chez les sujets témoins [$F_{(1,49)} = 0,00$; $p = 0,99$]. La VS ne diffère pas de la véritable verticale gravitaire chez

A**B****Figure 1 : Perception de la verticale visuelle**

Résultats chez des sujets témoins et des patients de Ménière testés avant neurotomie vestibulaire unilatérale.

(A) Verticale visuelle dynamique (VD) mesurée dans la population de patients de Ménière lors de stimulations optocinétiques antihoraires et horaires en fonction de la vitesse de stimulation. La zone hachurée représente les données recueillies dans la population témoin (moyenne \pm limites de confiance). La verticale visuelle statique (VS) est représentée à gauche des courbes pour les patients (*symboles noirs*) et les sujets témoins (*symboles gris*). Des signes positifs et négatifs représentent une déviation de la verticale perçue respectivement dans le sens horaire et antihoraire. Les barres verticales représentent les limites de confiance. (B) Verticale visuelle dynamique relative (VDR) mesurée pour des stimulations optocinétiques antihoraires (*histogrammes pleins*) et horaires (*histogrammes hachurés*) chez les sujets témoins (partie gauche) et les patients de Ménière (partie droite). Les barres horizontales représentent les limites de confiance. On notera la symétrie de la VDR pour des stimulations antihoraires et horaires chez les sujets témoins comme chez les patients de Ménière.

les sujets témoins (moyenne : $0,1^\circ \pm 0,4^\circ$; $p = 0,90$) comme chez les patients de Menière (moyenne : $-1,1^\circ \pm 0,9^\circ$; $p = 0,08$) (Fig. 1A).

Enfin, étant donné que la VD et la VS ne diffèrent pas entre les sujets témoins et les patients de Menière, la VDR ne diffère pas non plus entre ces deux groupes (Fig. 1B). En d'autres termes, les données recueillies chez les patients de Menière testés avant la neurotomie indiquent des réponses perceptives symétriques par rapport à une VS centrée sur la verticale gravitaire.

Effets de la neurotomie vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale visuelle

Verticale visuelle dynamique. Les ANOVAs conduites chez les patients de Menière testés avant et après NVU indiquent que la perception de la VD varie en fonction du délai [$F_{(6,78)} = 90,29$; $p < 0,0001$], de la direction de stimulation [$F_{(1,39)} = 910$; $p < 0,0001$] et de la vitesse de stimulation [$F_{(10,390)} = 2,26$; $p < 0,05$]. En outre, il existe une interaction significative entre le délai et la direction de stimulation [$F_{(6,78)} = 9,42$; $p < 0,0001$]. Cet interaction indique qu'au cours du temps, la perception de la VD est affectée de façon différente lors de stimulations optocinétiques ipsilésionnelles et contralésionnelles. Aussi, les analyses statistiques sont-elles rapportées par la suite séparément pour chaque direction de stimulation (Tableau I). La figure 2 illustre les modifications postopératoires de la perception de la VD pour des stimulations optocinétiques dans chaque direction.

Pour des stimulations optocinétiques contralésionnelles, l'ANOVA indique que la VD varie en fonction du délai postopératoire [$F_{(6,78)} = 89,22$; $p < 0,0001$] et de la vitesse de stimulation [$F_{(5,195)} = 2,63$; $p < 0,05$]. La neurotomie vestibulaire est capable de modifier la perception de la VD au point de changer le sens d'inclinaison de la verticale perçue. En effet, lors de stimulations optocinétiques contralésionnelles, la VD est inclinée vers le côté de la lésion. Les déficits sont maximaux 7 jours après NVU. Il est intéressant de noter qu'une réduction significative des déficits est déjà observée 15 jours après NVU [$F_{(1,78)} = 5,33$; $p < 0,05$]. Néanmoins, la perception de la VD demeure significativement altérée au-delà de la première année postopératoire (Tableau I).

Pour des stimulations optocinétiques ipsilésionnelles, l'ANOVA indique également que la VD varie en fonction du délai postopératoire [$F_{(6,78)} = 27,23$; $p < 0,0001$]. Néanmoins, le décours de la restauration de la perception de la VD diffère drastiquement de celui mis en évidence pour des stimulations optocinétiques contralésionnelles. Lors de stimulations ipsilésionnelles, l'inclinaison de la VD en direction du côté lésé est significativement augmentée 7 jours après la NVU. Un retour à des valeurs préopératoires est déjà amorcé 15 jours après la NVU. Enfin, une compensation totale des déficits perceptifs est observée dès le premier mois postopératoire.

Verticale visuelle statique. Les modifications de la VS au cours des sessions postopératoires sont illustrées sur la figure 2. L'ANOVA indique que la perception de la VS varie en fonction du délai postopératoire [$F_{(6,78)} = 14,84$; $p < 0,0001$]. Une semaine après la NVU, la VS est systématiquement déviée vers le côté lésé d'une amplitude moyenne de $-7,6^\circ \pm 1,6^\circ$. Nos résultats indiquent que le restauration complète de la perception de la VS est longue, puisque la

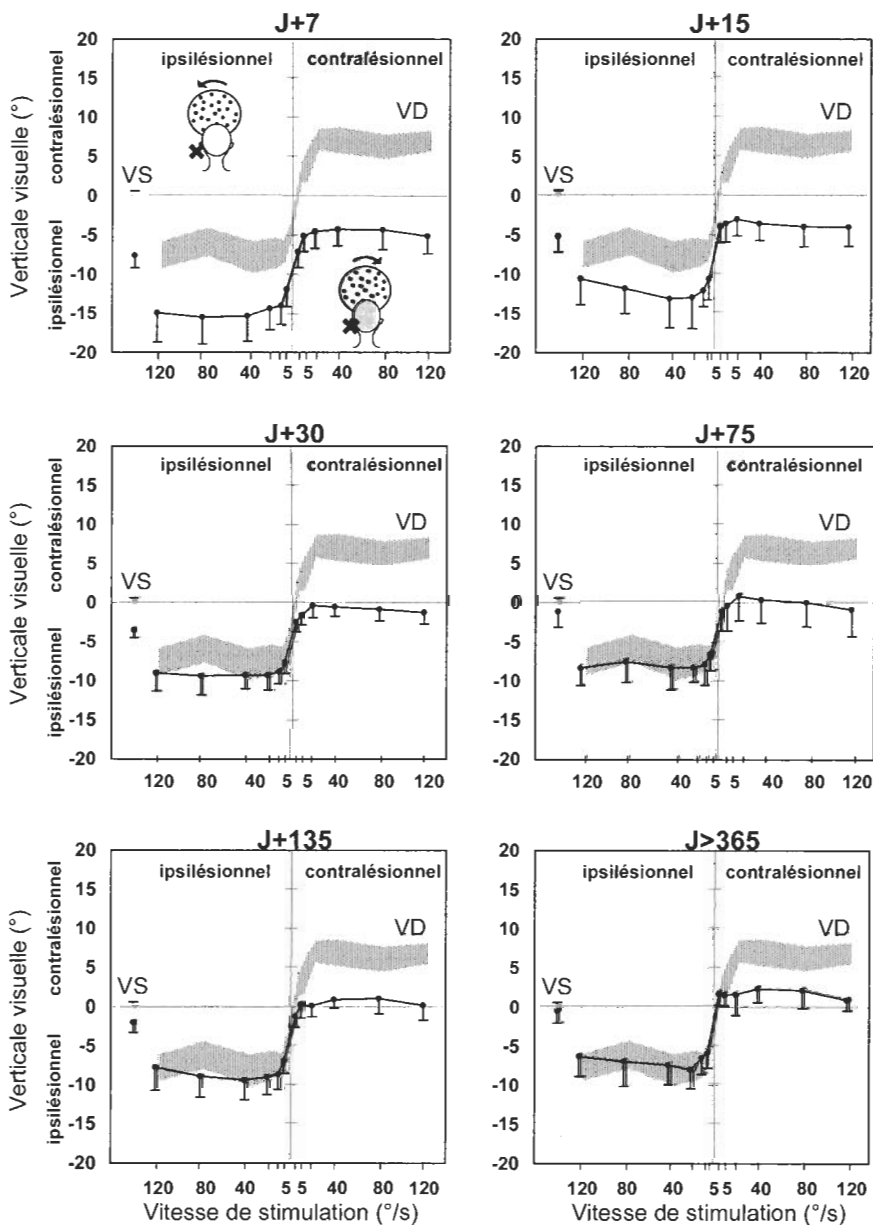


Figure 2 : Effets de la perte vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale visuelle

Verticale visuelle dynamique (VD : courbes) mesurée lors de stimulations optocinétiques ipsilésionnelles et contralésionnelles et verticale visuelle statique (VS : symboles sur la gauche) chez des patients de Ménière testés de façon longitudinale après une neurectomie vestibulaire unilatérale (1 semaine : J+7, 2 semaines : J+15, 1 mois : J+30, 2-3 mois : J+75, 4-5 mois : J+135 et 1-2 ans : J>365 après la neurectomie). Des signes positifs et négatifs représentent une déviation de la verticale perçue respectivement du côté intact et du côté lésé, chez les patients de Ménière, et dans le sens horaire et antihoraire chez les sujets témoins. Les barres verticales représentent les limites de confiance.

VS ne retrouve des valeurs comparables à la verticale gravitaire qu'un an après la neurotomie (moyenne : $-0,4^\circ \pm 1,6^\circ$; $p = 0,90$).

Verticale visuelle dynamique relative. L'ANOVA conduite chez les patients de Menière testés avant et après NVU indique que la VDR varie en fonction du délai [$F_{(6,78)} = 9,38$; $p < 0,0001$], de la direction de stimulation [$F_{(1,39)} = 1102$; $p < 0,0001$] et de la vitesse de stimulation [$F_{(10,390)} = 2,74$; $p < 0,005$]. L'existence d'une interaction significative entre le délai et la direction de stimulation [$F_{(6,78)} = 11,40$; $p < 0,0001$] indique que la VDR est affectée de façon différente au cours du temps pour des stimulations optocinétiques ipsilésionnelles et contralésionnelles. La figure 3 illustre l'évolution de la perception de la VDR pour chaque session postopératoire.

S'agissant des stimulations optocinétiques contralésionnelles, l'ANOVA indique que la VDR varie en fonction du délai [$F_{(6,78)} = 23,20$; $p < 0,0001$] et de la vitesse de stimulation [$F_{(5,195)} = 2,77$; $p < 0,05$]. La VDR est largement réduite au stade aigu de la neurotomie. Il est surprenant d'observer que la VDR recueillie une semaine après la NVU n'est jamais améliorée au cours du temps postopératoire (Fig. 3). En effet, la VDR recueillie un an après la neurotomie ne diffère pas de celle recueillie une semaine après la neurotomie, témoignant d'une absence totale d'amélioration des déficits perceptifs [$F_{(1,78)} = 0,32$; $p = 0,57$].

Des résultats très différents sont observés pour des stimulations optocinétiques ipsilésionnelles. On peut en effet observer sur la figure 3 que la VDR n'est nullement affectée par la neurotomie [$F_{(6,78)} = 1,17$; $p = 0,33$], même au stade aigu de la désafférentation vestibulaire. Aussi, pour des stimulations optocinétiques ipsilésionnelles, la VDR ne varie qu'en fonction de la vitesse de stimulation [$F_{(5,195)} = 2,71$; $p < 0,05$].

Effets de la perte vestibulaire bilatérale sur la perception de la verticale visuelle

Nos résultats indiquent que la perte vestibulaire bilatérale modifie fortement la perception de la verticale en présence d'une stimulation optocinétique. Il est notable que la modification mise en évidence chez ces patients diffère de celle décrite précédemment après une perte vestibulaire unilatérale. On trouvera sur la figure 4 une illustration de la perception de la VD, de la VS et de la VDR après perte vestibulaire bilatérale.

Verticale visuelle dynamique. L'ANOVA montre que la perception de la VD est significativement différente chez des patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale et chez des sujets témoins [$F_{(1,307)} = 5,68$; $p < 0,05$]. La perte vestibulaire bilatérale se traduit par une augmentation de l'inclinaison de la VD dans la direction de la stimulation optocinétique. Contrairement à ce qui a été décrit chez des patients porteurs d'une perte vestibulaire unilatérale, l'augmentation de l'inclinaison de la VD est observée quel que soit le sens de la stimulation chez des patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale.

Verticale visuelle statique. La perception de la VS ne diffère pas chez les patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale et chez les sujets témoins [$F_{(1,26)} = 1,11$; $p = 0,30$]. Chez les patients, la VS moyenne est de $-0,5^\circ \pm 0,8^\circ$ et ne diffère pas de la véritable verticale gravitaire ($p = 0,54$) (Fig. 4A).

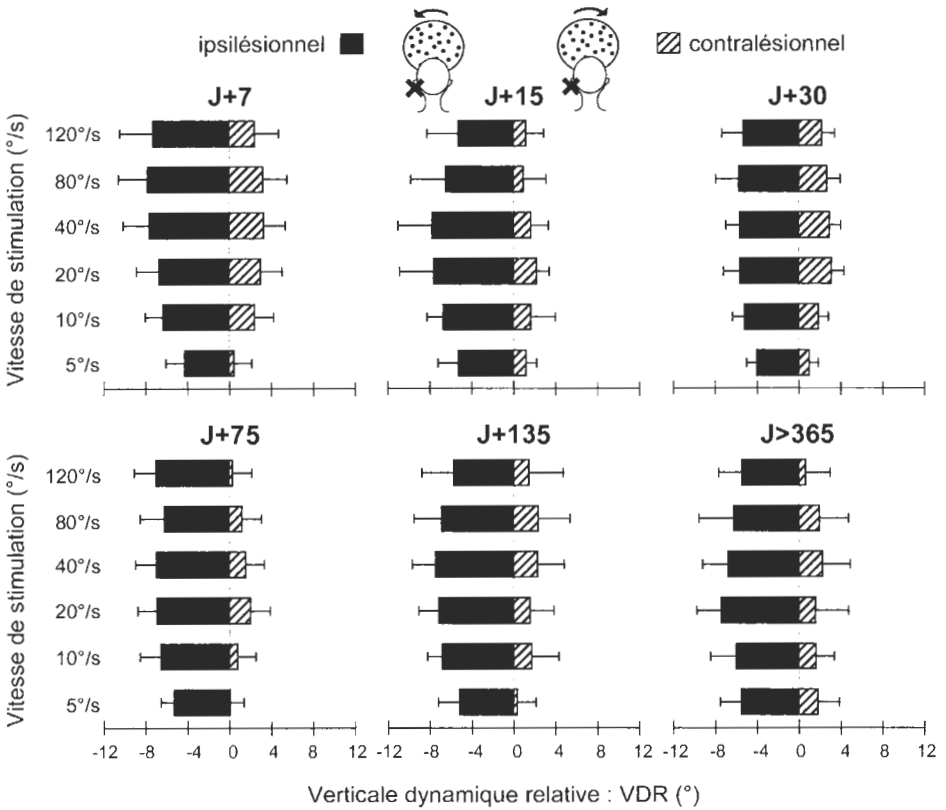


Figure 3 : Effets de la perte vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale visuelle dynamique relative

Verticale visuelle dynamique relative (VDR) mesurée lors de stimulations optocinétiques ipsilésionnelles (*histogrammes pleins*) et contralésionnelles (*histogrammes hachurés*) chez des patients de Ménière testés de façon longitudinale après une neurectomie vestibulaire unilatérale (1 semaine : J+7, 2 semaines : J+15, 1 mois : J+30, 2–3 mois : J+75, 4–5 mois : J+135 et 1–2 ans : J>365 après la neurectomie). Les barres horizontales représentent les limites de confiance. On notera que la VDR demeure asymétrique quel que soit le délai postopératoire.

Verticale visuelle dynamique relative. L'ANOVA indique que la VDR diffère significativement chez les patients vestibulo-déficients bilatéraux et chez les sujets témoins [$F_{(1,307)} = 97,49$; $p < 0,0001$] et qu'elle est modulée par la vitesse de stimulation [$F_{(5,307)} = 6,25$; $p < 0,0001$]. L'examen de la figure 4B montre que la VDR est largement augmentée chez les patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale. Cette augmentation est significative pour des stimulations horaires et antihoraires, et quelle que soit la vitesse de stimulation.

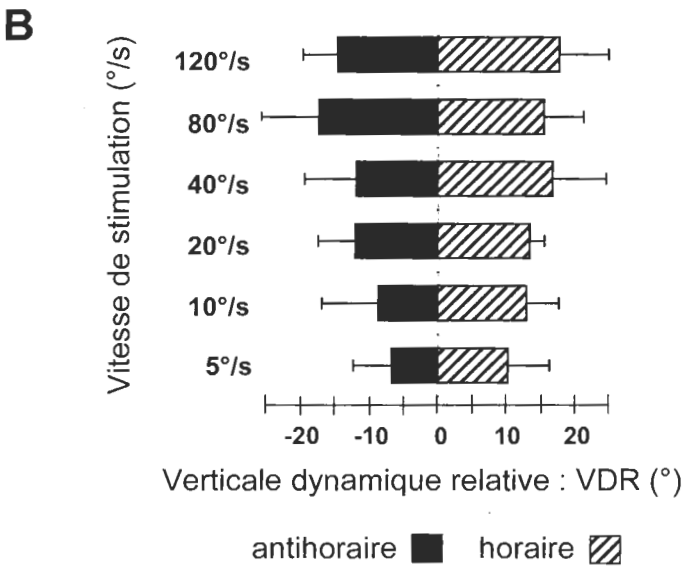
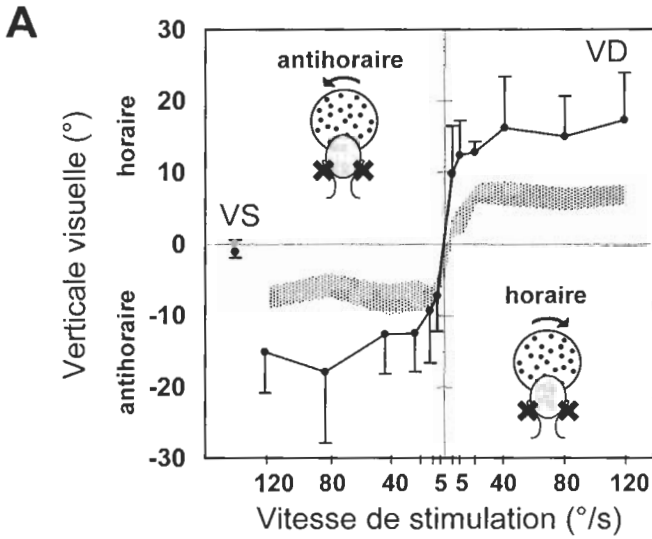


Figure 4 : Effets de la perte vestibulaire bilatérale sur la perception de la verticale visuelle

(A) Verticale visuelle dynamique (VD) mesurée chez des patients vestibulo-déficents bilatéraux lors de stimulations optocinétiques antihoraires et horaires en fonction de la vitesse de stimulation. La zone hachurée représente les données recueillies dans la population témoin (moyenne \pm limites de confiance). La verticale visuelle statique (VS) est représentée à gauche des courbes pour les patients (*symboles noirs*) et les sujets témoins (*symboles gris*). Mêmes conventions que pour la figure 1A. (B) Verticale visuelle dynamique relative (VDR) mesurée pour des stimulations optocinétiques antihoraires (*histogrammes pleins*) et horaires (*histogrammes hachurés*). Mêmes conventions que pour la figure 1B.

DISCUSSION

Effets de la neurotomie vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale visuelle statique et dynamique

Les patients de Ménière testés avant NVU présentent des réponses perceptives qui ne diffèrent pas de celles enregistrées dans la population témoin. Chez les patients de Ménière comme chez les sujets témoins, la verticale visuelle dynamique (VD) est symétrique pour des rotations horaires et antihoraires. Par ailleurs, les propriétés des réponses perceptives rapportées dans notre étude chez les sujets témoins sont en accord avec celles d'études précédentes (Hughes et al., 1972 ; Dichgans et al., 1972, 1974 ; Held et al., 1975 ; Lopez et al., 2003). Nous montrons que les effets perceptifs augmentent jusqu'à une vitesse de stimulation de 20 °/s, ce qui est en accord avec les observations de Dichgans et al. (1972) montrant une saturation de l'effet perceptif à la vitesse de 30 °/s et un maintien de cet effet jusqu'à la vitesse de 130 °/s.

Après NVU, nos résultats indiquent une altération importante de la perception de la VD. La verticale perçue est en effet inclinée vers le côté lésé, non seulement lors de stimulations optocinétiques ipsilésionnelles, mais également lors de stimulations contralésionnelles. Il en résulte une asymétrie marquée de la VD relativement à la verticale gravitaire.

Lors de stimulations optocinétiques dirigées vers le côté lésé, nous notons une augmentation de l'amplitude de la VD. Cette observation est en accord avec celle décrite après résection de schwannome (Goto et al., 2003) et chez des patients porteurs de lésions du tronc cérébral (Brandt et Dieterich, 1987). S'agissant de stimulations optocinétiques dirigées vers le côté intact, l'inversion de la direction de la VD n'a été rapportée que chez quelques patients porteurs de lésions du tronc cérébral (Brandt et Dieterich, 1987). Nos observations nous incitent à établir un lien entre l'asymétrie de la VD et l'intensité de la vection circulaire, telle qu'elle est subjectivement rapportée par les patients. En effet, les patients de Ménière rapportent que les stimulations optocinétiques dirigées vers le côté lésé donnent naissance à des effets perceptifs très prégnants et sont à l'origine de manifestations neurovégétatives (nausées) plus importantes que les stimulations dirigées vers le côté intact.

Notre étude montre que le décours de la compensation des déficits diffère en fonction de la direction de la stimulation optocinétique. Nous mettons en évidence une compensation totale des déficits un mois après NVU pour des stimulations optocinétiques ipsilésionnelles. En revanche, il n'y a pas de compensation totale des déficits un an après la neurotomie pour des stimulations optocinétiques contralésionnelles. Ces données suggèrent qu'une normalisation de la perception de la VD nécessite une période supérieure à un an, ou que l'altération de la perception de la VD fait partie des déficits dynamiques présents de façon permanente après une perte vestibulaire unilatérale (voir Curthoys et Halmagyi, 1995 pour revue). En utilisant des stimulations optocinétiques de même nature chez des patients de Ménière, nous avons également mis en évidence que le réflexe optocinétique torsionnel demeurait asymétrique 3 mois après neurotomie (Lopez et al., 2005). Le maintien à long terme d'une asymétrie des fonctions vestibulaires a en outre été rapporté après perte vestibulaire

unilatérale s'agissant de la stabilisation des images sur la rétine par le réflexe vestibulo-oculaire horizontal (Halmagyi et al., 1990) et la contre-rotation oculaire dynamique (Diamond et Markham, 1983).

La neurotomie se traduit également par une altération drastique de la perception de la verticale visuelle statique (VS), systématiquement déviée vers le côté de l'opération. Le décours de la restauration de la VS est très différent de celui de la VD : la VS est à nouveau alignée avec la verticale gravitaire un an après la neurotomie. Ces résultats confirment qu'une perception correcte de la verticalité dépend de la symétrie des afférences vestibulaires parvenant aux structures nerveuses centrales. Il est classiquement admis que ces déficits sont essentiellement dus à une asymétrie des entrées otolithiques (voir Gresty, 1996 pour revue).

Effets de la neurotomie vestibulaire unilatérale sur la perception de la verticale visuelle dynamique relative

L'analyse de la verticale visuelle dynamique relative (VDR) nous a permis de conclure que les déficits perceptifs dynamiques n'étaient pas dus à un simple décalage de la VD autour d'une nouvelle VS, mais révélaient des déficits plus complexes. En effet, la neurotomie se traduit par une asymétrie très marquée de la VDR. Cette asymétrie se caractérise par une diminution drastique de l'amplitude de la VDR lors de stimulations optocinétiques dirigées vers le côté intact. Plus surprenant, les réponses demeurent inchangées lors de stimulations dirigées vers le côté lésé. A notre connaissance, cette étude constitue la première mise en évidence d'une telle asymétrie perceptive après perte vestibulaire unilatérale. Goto et al. (2003) ont en revanche décrit une déviation symétrique de la VD autour de la nouvelle position de la VS. Ils ont proposé que les patients utiliseraient cette VS en tant que nouvelle référence. Les divergences notables entre nos observations et celles de ces auteurs pourraient tenir à la différence de pathologie préopératoire et à la nature de son évolution (maladie de Menière dans notre étude vs schwannome dans celle de Goto et collaborateurs).

Comment expliquer que la VDR ne soit altérée que pour des stimulations optocinétiques dirigées vers le côté intact ? Dans les conditions naturelles, une rotation de l'environnement visuel vers le côté intact survient lors d'une rotation de la tête vers le côté lésé. Aussi, nous proposons que la réduction drastique de la VDR lors de stimulations optocinétiques vers le côté intact pourrait être le pendant de la réduction de la sensibilité aux accélérations dirigées vers le côté lésé (Dai et al., 1989). Le substrat neurophysiologique pourrait en être la réduction de la sensibilité dynamique aux accélérations dirigées vers le côté lésé dans les neurones des noyaux vestibulaires (Precht et al., 1966 ; Xerri et al., 1983 ; Smith et Curthoys, 1988).

Il est notable que la forte diminution de l'amplitude de la VDR observée une semaine après neurotomie est encore présente un an après la lésion. Les données électrophysiologiques recueillies chez des modèle animaux de perte vestibulaire ont cependant largement montré qu'il y avait une restauration partielle de l'activité nerveuse dans les noyaux vestibulaires (Lacour et al., 1989 ; Smith et Curthoys, 1989 ; Curthoys et Halmagyi, 1995). Toutefois, le nombre de neurones spontanément actifs et la sensibilité des neurones aux déplacements de l'animal demeurent réduits un an après la perte vestibulaire (Smith et Curthoys, 1989).

Effets de la perte vestibulaire bilatérale sur la perception de la verticale visuelle

Nos résultats indiquent que le poids des informations visuelles dynamiques est accru chez des patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale. En effet, l'amplitude de l'inclinaison de la VD et de la VDR est largement augmentée chez ces patients relativement aux sujets témoins. Cette augmentation de l'inclinaison de la VD est en accord avec les observations précédentes réalisées chez ce même type de patients par Bronstein et al. (1996) et Guerraz et al. (2001). Ces auteurs ont montré une contribution accrue des informations visuelles dynamiques à la perception de la verticale pour des stimulations optocinétiques avec des vitesses atteignant 60 °/s. Nos propres résultats montrent une augmentation de l'inclinaison de la VD et de la VDR pour des vitesses s'étendant jusqu'à 120 °/s, témoignant donc d'une augmentation du poids des informations visuelles dynamiques dans une large gamme de vitesses. L'ensemble de ces données est en accord avec le rôle supplétif de la modalité visuelle après perte vestibulaire bilatérale, illustré dans le domaine du contrôle postural chez des patients immergés dans une pièce oscillante (Bles et al., 1983) ou dans le domaine de la stabilisation des images sur la rétine par le réflexe optocinétique (Huygen *et al.*, 1989).

Conclusions : effets comparés d'une perte vestibulaire unilatérale et bilatérale sur la perception de la verticale visuelle

Cette étude montre un impact très différent d'une perte vestibulaire unilatérale et bilatérale sur la contribution des informations visuelles dynamiques à la perception de la verticale :

Après perte vestibulaire unilatérale, l'asymétrie de perception de la VD est due d'une part à une inclinaison de la VS vers le côté lésé, et d'autre part à une asymétrie de la VDR. Après neurotomie, les mécanismes adaptatifs mis en place se traduisent par une disparition des déficits perceptifs statiques, si bien que la perception de la VS est à nouveau alignée avec la verticale gravitaire. Au contraire, il y a une absence de compensation des déficits perceptifs dynamiques, puisque les déficits de perception de la VDR observés une semaine après la neurotomie sont encore présents un an plus tard. Finalement, nos données indiquent qu'après une perte vestibulaire unilatérale, il n'y a pas d'augmentation de la contribution des informations visuelles dynamiques à la perception de la verticale. Il existe en revanche un traitement asymétrique des informations visuelles dynamiques chez les patients vestibulo-déficients unilatéraux.

Après perte vestibulaire bilatérale, il n'y a pas de déficit perceptif statique. Les mécanismes adaptatifs se manifestent dans ce cas par une augmentation du poids fonctionnel des informations visuelles, visant à suppléer les entrées vestibulaires. Nos données suggèrent enfin que le rôle supplétif des informations visuelles n'est pas transitoire, mais constitue un caractère permanent de la restauration fonctionnelle chez des patients vestibulo-déficients bilatéraux.

RÉSUMÉ

Nous avons étudié comment la perte unilatérale et bilatérale des informations vestibulaires se combine avec les informations visuelles pour modifier la perception de la verticale visuelle. Cette étude a été conduite chez 40 patients de Ménière testés avant et après (1 semaine – 1 an) une neurotomie vestibulaire unilatérale, ainsi que chez 4 patients porteurs d'une perte vestibulaire bilatérale. La perception de la verticale visuelle dynamique (VD) a été étudiée au cours de stimulations optocinétiques circulaires. La perception de la verticale visuelle statique (VS) a été recueillie devant un environnement visuel immobile.

Après perte vestibulaire unilatérale, la VD est inclinée vers le côté lésé, quelle que soit la direction de stimulation, et la VS est également inclinée vers le côté lésé. L'amplitude de l'inclinaison de la VD induite par la stimulation optocinétique relativement à la nouvelle position de la VS est fortement asymétrique. Elle est fortement diminuée pour des stimulations contralésionnelles, et n'est jamais restaurée. Pour des stimulations ipsilésionnelles, elle n'est pas affectée. Après perte vestibulaire bilatérale, l'inclinaison de la VD est largement augmentée.

Nos résultats mettent en évidence une altération à très long terme de la perception de la VD, suggérant un traitement asymétrique des informations visuelles dynamiques après une perte vestibulaire unilatérale, et une augmentation de leur poids fonctionnel après une perte vestibulaire bilatérale.

BIBLIOGRAPHIE

- Bles, W., Vianney de Jong, J.M., de Wit, G. (1983). Compensation for labyrinthine defects examined by use of a tilting room. *Acta Otolaryngol*, 95: 576-579.
- Borel, L., Harlay, F., Magnan, J., Lacour, M. (2001). How changes in vestibular and visual reference frames combine to modify body orientation in space. *Neuroreport*, 12: 3137-3141.
- Brandt, T., Dieterich, M. (1987). Pathological eye-head coordination in roll: tonic ocular tilt reaction in mesencephalic and medullary lesions. *Brain*, 110: 649-666.
- Brandt, T., Dieterich, M. (1996). How do vestibular disorders affect spatial orientation and motion perception? In: Baloh, R.W., Halmagyi, G.M. (Eds). *Disorders of the vestibular system*. Oxford University Press, New York, pp. 126-139.
- Bronstein, A.M., Yardley, L., Moore, A.P., Cleaves, L. (1996). Visually and posturally mediated tilt illusion in Parkinson's disease and in labyrinthine defective subjects. *Neurology*, 47: 651-656.
- Curthoys, I.S., Halmagyi, G.M. (1995). Vestibular compensation: a review of the oculomotor, neural, and clinical consequences of unilateral vestibular loss. *J Vestib Res*, 5: 67-107.
- Dai, M.J., Curthoys, I.S., Halmagyi, G.M. (1989). Linear acceleration perception in the roll plane before and after unilateral vestibular neurectomy. *Exp Brain Res*, 77: 315-328.
- Diamond, S.G., Markham, C.H. (1983). Ocular counterrolling as an indicator of vestibular otolith function. *Neurology*, 33: 1460-1469.

-
- Dichgans, J., Held, R., Young, L.R., Brandt, T. (1972). Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science*, 178: 1217-1219.
- Dichgans, J., Diener, H.C., Brandt, T. (1974); Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta Otolaryngol*, 78: 391-398.
- Friedmann, G. (1970). The judgement of the visual vertical and horizontal with peripheral and central vestibular lesions. *Brain*, 93: 313-328.
- Goto, F., Kobayashi, H., Saito, A., Hayashi, Y., Higashino, K., Kunihiro, T., Kanzaki, J. (2003). Compensatory changes in static and dynamic subjective visual vertical in patients following vestibular schwannoma surgery. *Auris Nasus Larynx*, 30: 29-33.
- Gresty, M.A. (1996). Vestibular tests in evolution. I. Otolith testing. In: Baloh, R.W., Halmagyi, G.M. (Eds). *Disorders of the vestibular system*. Oxford University Press, New York, pp 243-255.
- Guerraz, M., Poquin, D., Ohlmann, T. (1998). The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Percept Psychophys*, 60: 287-295.
- Guerraz, M., Yardley, L., Bertholon, P., Pollak, L., Rudge, P., Gresty, M.A., Bronstein, A.M. (2001). Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain*, 124: 1646-1656.
- Halmagyi, G.M., Curthoys, I.S., Cremer, P.D., Henderson, C.J., Todd, M.J., Staples, M.J., D'Cruz, D.M. (1990). The human horizontal vestibulo-ocular reflex in response to high-acceleration stimulation before and after unilateral vestibular neurectomy. *Exp Brain Res*, 81: 479-490.
- Held, R., Dichgans, J., Bauer, J. (1975). Characteristics of moving visual scenes influencing spatial orientation. *Vision Res*, 15: 357-365.
- Hughes, P.C., Brecher, G.A., Fishkin, S.M. (1972). Effects of rotating backgrounds upon the perception of verticality. *Percept Psychophys*, 11: 135-138.
- Huygen, P.L., Verhagen, W.I., Theunissen, E.J., Nicolaisen, M.G. (1989). Compensation of total loss of vestibulo-ocular reflex by enhanced optokinetic response. *Acta Otolaryngol, Suppl* 468: 359-364.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J., Amblard, B. (1998). How dynamic visual field dependence-independence interacts with the visual contribution to postural control. *Hum Mov Sci*, 17: 367-391.
- Kobayashi, H., Hayashi, Y., Higashino, K., Saito, A., Kunihiro, T., Kanzaki, J., Goto, F. (2002). Dynamic and static subjective visual vertical with aging. *Auris Nasus Larynx*, 29: 325-328.
- Lacour, M., Toupet, M., Denise, P., Christen, Y. (1989); *Vestibular compensation: facts, theories and clinical perspectives*. Elsevier (Ed), Amsterdam, Oxford, New York, Paris, 308 pp.
- Lopez, C., Borel, L., Magnan, J., Lacour, M. (2003). Relation entre posture, oculomotricité et perception de la verticalité au cours de la compensation vestibulaire: stratégies individuelles et processus communs. In: Dupui, P., Montoya, R., Lacour, M. (Eds). *Posture et équilibre. Physiologie, techniques, pathologies*. Solal, Marseille, pp. 103-116.
-

-
- Lopez, C., Borel, L., Magnan, J., Lacour, M. (2005). Torsional optokinetic nystagmus after unilateral vestibular loss: asymmetry and compensation. *Brain*, 128: 1511-1524.
- Luyat, M., Ohlmann, T., Barraud, P.A. (1997). Subjective vertical and postural activity. *Acta Psychol (Amst)*, 95: 181-193.
- Luyat, M., Poquin, D., Isabelleu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J. (1999). Existe-t-il des processus communs impliqués dans l'estimation de la verticalité et le contrôle de la posture? In: Lacour, M. (Ed). *Posture et équilibre*. Sauramps Médical, Montpellier, pp 55-72.
- Magnan, J., Bremond, G., Chays, A., Gignac, D., Florence, A. (1991). Vestibular neurotomy by retrosigmoid approach: technique, indications, and results. *Am J Otol*, 12: 101-104.
- Mauritz, K.H., Dichgans, J., Hufschmidt, A. (1977). The angle of visual roll motion determines displacement of subjective visual vertical. *Percept Psychophys* 22: 557-562.
- Ohlmann, T., Luyat, M. (2001). La posture référencée et la posture source de références. In: Lacour, M. (Ed). *Nouveautés 2001, conceptuelles, instrumentales et cliniques*. Solal, Marseille, pp. 15-37.
- Pavlou, M., Wijnberg, N., Faldon, M.E., Bronstein, A.M. (2003). Effect of semi-circular canal stimulation on the perception of the visual vertical. *J Neurophysiol*, 90: 622-630.
- Precht, W., Shimazu, H., Markham, C.H. (1966). A mechanism of central compensation of vestibular function following hemilabyrinthectomy. *J Neurophysiol*, 29: 996-1010.
- Smith, P.F., Curthoys, I.S. (1988). Neuronal activity in the ipsilateral medial vestibular nucleus of the guinea pig following unilateral labyrinthectomy. *Brain Res*, 444: 308-319.
- Smith, P.F., Curthoys, I.S. (1989). Mechanisms of recovery following unilateral labyrinthectomy: a review. *Brain Res Brain Res Rev*, 14: 155-180.
- Vibert, D., Häusler, R., Safran, A.B. (1999). Subjective visual vertical in peripheral unilateral vestibular diseases. *J Vestib Res*, 9: 145-152.
- Vibert, D., Häusler, R. (2000). Long-term evolution of subjective visual vertical after vestibular neurectomy and labyrinthectomy. *Acta Otolaryngol*, 120: 620-622.
- Witkin, H.A., Asch, S.E. (1948). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *J Exp Psychol*, 38: 762-782.
- Xerri, C., Gianni, S., Manzoni, D., Pompeiano, O. (1983). Central compensation of vestibular deficits. I. Response characteristics of lateral vestibular neurons to roll tilt after ipsilateral labyrinth deafferentation. *J Neurophysiol*, 50: 428-448.
- Zink, R., Bucher, S.F., Weiss, A., Brandt, T., Dieterich, M. (1998). Effects of galvanic vestibular stimulation on otolithic and semicircular canal eye movements and perceived vertical. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 107: 200-205.
-