

UNCLASSIFIED

Defense Technical Information Center  
Compilation Part Notice

ADP013871

TITLE: Perception de la verticale avec Un cadre visuel solidaire de la tete:  
implications pour la conception des afficheurs de casques en ae'ronaflque  
[Perception of the Vertical With a Head-Mounted Visual Frame:  
Implication for the Design of Helmet-Mounted Displays in Aeronautics]

DISTRIBUTION: Approved for public release, distribution unlimited  
Availability: Hard copy only.

This paper is part of the following report:

TITLE: Spatial Disorientation in Military Vehicles: Causes, Consequences  
and Cures [Desorientation spaiale dans les vehicules militaires: causes,  
consequences et remedes]

To order the complete compilation report, use: ADA413343

The component part is provided here to allow users access to individually authored sections  
of proceedings, annals, symposia, etc. However, the component should be considered within  
the context of the overall compilation report and not as a stand-alone technical report.

The following component part numbers comprise the compilation report:  
ADP013843 thru ADP013888

UNCLASSIFIED

**Perception de la verticale avec un cadre visuel solidaire de la tête :  
implications pour la conception des afficheurs de casques en aéronautique**  
**(Perception of the Vertical With a Head-Mounted Visual Frame:  
Implication for the Design of Helmet-Mounted Displays in Aeronautics)**

**Franck Mars (Ph.D.)**

Institut de Réadaptation de Montréal  
Université de Montréal & Centre de Recherche  
Interdisciplinaire en Réadaptation  
6300 Darlington  
Montréal, Québec, H3S 2J4  
Canada

[franckmars@netcourrier.com](mailto:franckmars@netcourrier.com)

**Jean-Louis Vercher (Ph.D.)**

Laboratoire "Mouvement & Perception"  
Faculté des Sciences du Sport  
CNRS & Université de la Méditerranée  
CP 910, 163 Avenue de Luminy  
F-13288 Marseille cedex 09  
France

[vercher@laps.univ-mrs.fr](mailto:vercher@laps.univ-mrs.fr)

Une partie des travaux rapportés dans ce manuscrit a été réalisée au Centre de Recherche du Service de Santé de Armées Emile Parde (La tronche, France) en collaboration avec le Médecin Chef Christian Raphel et son équipe.

## Résumé

Les travaux présentés visent à déterminer si inclure des références visuelles solidaires des mouvements de la tête, une possibilité offerte par les afficheurs de casque, peut influencer la perception de l'orientation d'un objet visuel. Une première expérience étudie l'influence d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale subjective, lors d'inclinaison de la tête dans le plan frontal. Elle montre qu'incliner la tête avec le cadre visuel provoque des modifications conséquentes de l'estimation de la verticale dans la direction de l'inclinaison. Ces erreurs ne peuvent pas être expliquées par une addition des erreurs imputables au cadre visuel et à l'inclinaison de la tête lorsque les effets des deux perturbations sont évalués indépendamment. De plus, la vision du cadre visuel céphalocentré pendant le mouvement ne réduit pas l'erreur, ce qui contraste avec la diminution des erreurs observée lorsque le cadre visuel est dissocié de la tête. Une seconde expérience compare la verticale subjective et la performance dans une tâche de réorientation de la tête lors d'inclinaisons du corps entier. Les estimations de la verticale se font en présence soit d'un cadre visuel céphalocentré, soit d'un cadre solidaire des mouvements du tronc mais dissocié de la tête. Les résultats montrent qu'un cadre visuel céphalocentré modifie les comportements d'orientation de la tête, ce qui contribue à augmenter significativement les erreurs d'estimation de la verticale générées par le cadre. Les deux études mettent l'accent sur le rôle fondamental du référentiel céphalocentré dans le traitement des informations visuelles pour la perception de l'orientation spatiale. Elles suggèrent qu'entourer des indicateurs d'attitude par des informations visuelles solidaires de la tête dans les afficheurs de casque pourrait contribuer à la désorientation spatiale, en particulier durant les vols de nuit.

Les afficheurs de casque suscitent beaucoup d'intérêt chez les chercheurs et les concepteurs dans le domaine de l'aviation de combat, car il s'agit là d'outils qui ouvrent de nouvelles perspectives dans la façon de présenter des informations au pilote. La technique consiste à superposer des informations visuelles au monde réel en les projetant sur la visière du casque. Elle a l'avantage de permettre la présentation d'informations visuelles solidaires des mouvements de la tête, de façon à ce que ces informations restent constamment disponibles dans le champ de vision du pilote quelle que soit l'orientation de sa tête. Le pilote n'a donc pas besoin de quitter des yeux l'environnement externe pour se référer aux instruments de bord. L'application principale à l'heure actuelle a été de transférer le système de visée dans les afficheurs de casque, ce qui leur donne le potentiel de transformer fondamentalement les paramètres du combat aérien. Au-delà du système de visée, les progrès technologiques font envisager aux concepteurs d'inclure d'autres indicateurs dans les afficheurs de casque, y compris des indicateurs de l'attitude de l'avion. Ces indicateurs sont susceptibles eux aussi d'être asservis à l'orientation de la tête (Cohen et al., 2001).

Considérons maintenant l'exemple d'un concepteur d'afficheurs de casque qui désirerait fournir au pilote, dans la visière du dispositif, une série d'indications qui peuvent être utiles lorsque le pilote quitte des yeux les instruments du cockpit pour explorer l'environnement extérieur. Une façon de présenter ces indications sans obstruer le champ de vision du pilote pourrait consister à les disposer parallèlement à l'axe vertical de la tête, de chaque côté de la visière. Cette solution reviendrait à inclure des informations visuelles orientées, attachées à la tête, qui s'inclineraient par rapport à la verticale dès lors que l'utilisateur de l'afficheur de casque inclinerait lui-même sa tête. Or, un cadre visuel incliné peut provoquer des erreurs considérables dans une tâche d'estimation de la verticale. L'erreur est commise dans la direction de l'inclinaison du cadre visuel, ce qu'on appelle classiquement l'effet cadre (Witkin et Asch, 1948). La désorientation induite par le cadre est susceptible d'être potentialisée par l'inclinaison de la tête (Di Lorenzo et Rock, 1982).

De plus, pour percevoir correctement l'orientation d'un objet visuel dans l'espace, le système nerveux central doit transposer l'information rétinienne dans un référentiel géocentré, défini par la direction de la gravité. De nombreux auteurs s'accordent à dire que s'orienter dans le référentiel gravitaire implique une chaîne de transformation de coordonnées impliquant des sources variées d'informations (Howard, 1986). La projection de l'image sur la rétine doit être encodée et mise en rapport avec l'orientation des yeux dans leur orbite, ce qui implique la prise en compte des signaux de position des yeux. Les informations vestibulaires doivent également être considérées, puisqu'elles renseignent sur l'orientation et les déplacements de la tête. Enfin, l'information propriosomesthésique utilisée pour réguler la posture fournit le lien entre la position de la tête dans l'espace et les forces de contact du corps au sol (Mergner & Rosemeier, 1998). En d'autres termes, l'orientation d'un objet visuel par rapport à la gravité est obtenue par la transposition des coordonnées rétinienne dans un référentiel géocentré en passant par des étapes intermédiaires définies dans des référentiels centrés sur la tête ou sur le tronc. Au regard de ces considérations sur la construction des référentiels spatiaux, la présentation d'informations visuelles solidaires des mouvements de la tête met l'utilisateur d'un afficheur de casque face à une situation inhabituelle. En effet, lorsque le pilote bouge la tête, les informations visuelles ajoutées bougent dans l'espace extra-personnel tout en restant fixes dans le référentiel de la tête. Cette configuration d'informations n'a pas d'équivalent dans des conditions naturelles. En effet, les coordonnées relatives d'un objet visuel par rapport à la tête varient habituellement dès lors que la tête (ou l'objet observé) bouge dans l'espace. Cela implique que le système nerveux central n'a probablement pas évolué pour traiter des références visuelles solidaires des mouvements de la tête et pourrait donc être amené à résoudre un conflit informationnel.

Le but du travail rapporté ici est d'évaluer les modifications éventuelles de la perception de l'orientation d'un indicateur visuel que pourrait provoquer l'inclusion dans les afficheurs de casque de références visuelles solidaires des mouvements de la tête. Les deux expériences présentées ici étudient l'influence sur la verticale subjective d'un cadre visuel céphalocentré, lorsque la tête ou le corps entier du sujet est incliné en roulis. L'obtention d'un cadre incliné d'une amplitude identique à celle de la tête a été rendue possible par l'utilisation d'un casque vidéo. Porter cet appareil donne la sensation de voir un écran céphalocentré rectangulaire dont les contours sont clairement visibles. Ainsi, quelle que soit l'orientation de la tête du sujet, l'axe vertical de symétrie du cadre reste constamment aligné avec l'axe vertical de la tête. La première expérience s'intéresse tout d'abord à l'influence du port d'un tel dispositif sur la verticale subjective lors d'inclinaisons de la tête, chez des sujets assis. La seconde expérience étudie quant à elle les effets du même type de cadre visuel sur le comportement de réorientation de la tête des sujets et sur leur perception de verticalité lorsque le corps entier est incliné.

## **Expérience 1 : Effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale subjective lors d'inclinaisons de la tête**

Le premier objectif de l'expérience 1 vise à décrire les effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale visuelle, et ceci pour l'ensemble des inclinaisons possibles de la tête. L'influence de l'inclinaison de la tête en l'absence de référence visuelle, ainsi que l'influence d'un cadre visuel incliné, fixe dans l'espace et sans inclinaison de tête, sont également évaluées dans des conditions très similaires. La méthode utilisée se distingue de celles employées dans les études antérieures en ce qu'elle permet un positionnement libre de la tête à des inclinaisons variées en amplitudes. L'orientation de la tête et son maintien ne dépendent donc pas des dispositifs assez contraignants habituellement utilisés. De plus, la verticale visuelle est estimée pour un grand nombre d'amplitudes d'inclinaisons du cadre et/ou de la tête. Les analyses de régression effectuées sur ces valeurs permettent d'obtenir des fonctions psychométriques précises. Dans ces conditions, il est possible de déterminer si les effets d'un cadre fixe par rapport à la tête lors d'inclinaisons de la tête peuvent s'expliquer par l'addition d'un effet cadre et d'un effet postural ou, dans le cas contraire, de préciser quelle est la nature des pondérations sensorielles mises en jeu dans ces conditions. Afin d'évaluer l'influence potentielle de la commande motrice associée à la production volontaire d'inclinaisons de la tête, l'expérience compare également les estimations obtenues de la verticale à la suite de mouvements actifs et passifs de la tête.

Le second objectif de l'expérience consiste à évaluer l'influence de la vision continue ou discontinue des cadres visuels lors de leurs changements d'orientation. L'orientation du cadre solidaire de la tête ne peut être évaluée que sur la base des signaux de position de la tête, puisque son orientation ne change jamais par rapport au segment céphalique. En d'autres termes, les transformations de coordonnées visuelles dans le référentiel céphalocentré sont inexistantes. Au contraire, lorsque l'orientation du cadre est dissociée de celle de la tête, toute rotation peut être référée à la tête. Ainsi, quand le sujet a la possibilité de garder les yeux ouverts pendant la rotation, les variations d'orientation du cadre par rapport à la tête peuvent être prises en compte en conjonction avec les signaux vestibulaires et proprioceptifs qui renseignent sur l'orientation de la tête dans l'espace. Nous faisons donc l'hypothèse que la vision du cadre lors de ses rotations dans l'espace ne diminue les effets observés sur la verticale visuelle que lorsque l'orientation du cadre est dissociée de celle de la tête.

### **Méthodes**

Douze sujets, 9 hommes et 3 femmes, âgés de 23 à 41 ans, se sont portés volontaires pour cette expérience. Aucun sujet n'a déclaré souffrir ou avoir souffert de troubles vestibulaires. Leur vision était normale ou normalement corrigée.

L'expérience a été réalisée dans l'obscurité. Tous les sujets ont participé à 8 conditions expérimentales. Dans chacune d'elles, la tâche était de placer une baguette lumineuse à la verticale. La baguette visuelle, de couleur blanche, était de forme oblongue, d'une longueur de  $10^\circ$  d'angle et d'une largeur de  $2^\circ$  en son milieu. La baguette pouvait tourner autour de son axe central en agissant sur une manette de jeux placée sur l'accoudoir droit du siège. Aucune limite temporelle n'était fixée pour estimer la verticale. Cependant, les consignes insistent sur la nécessité d'effectuer la tâche en première impression, rares ont été les ajustements excédant 5 secondes. A chaque nouvel essai, l'orientation initiale de la baguette était déterminée de façon aléatoire. Chaque condition expérimentale comportait 40 essais.

La baguette lumineuse utilisée pour les estimations de la verticale était générée soit sur un moniteur informatique de 17", soit sur un casque vidéo (Glasstron PLM-S700 commercialisé par Sony) selon les conditions expérimentales (Fig. 1).

### Conditions «tête et cadre inclinés» (TCI)

Dans les conditions TCI, les sujets portaient un casque vidéo qui donne la sensation de voir un écran informatique, centré sur l'axe interoculaire, d'une taille angulaire de  $30^\circ \times 22,5^\circ$ . L'écran virtuel apparaît comme un rectangle gris foncé sur un arrière plan totalement noir. Ce contraste de luminosité forme donc un contour perçu par les sujets comme un cadre visuel. Un récepteur magnétique (Polhemus Fastrak) était fixé sur le haut du crâne, pour mesurer l'orientation de la tête et du casque. Les sujets, équipés du casque vidéo, plaçaient leur tête à diverses orientations dans le plan frontal (Fig. 1A). Le cadre virtuel et la tête étaient donc inclinés de façon identique par rapport à la gravité. Le premier essai était toujours réalisé avec la tête droite. Ensuite, une nouvelle orientation de la tête était choisie et maintenue le temps d'estimer la verticale. Immédiatement après la validation de la mesure, une nouvelle posture de la tête était adoptée.

Quatre conditions TCI ont été réalisées. Dans deux d'entre elles, les sujets bougeaient la tête volontairement et choisissaient eux-mêmes l'amplitude de l'inclinaison. Les sujets avaient pour instruction d'explorer l'ensemble des inclinaisons possibles de la tête, dans un ordre pseudo-aléatoire au cours des 40 essais. Dans les deux conditions TCI restantes, la tête était inclinée d'une orientation à une autre par l'expérimentateur. Les sujets avaient pour consigne de ne pas résister au mouvement imposé par l'expérimentateur et, à l'opposé, de ne pas accompagner le mouvement. Pour chaque type de mouvement (actif et passif), deux conditions ont été réalisées. Dans l'une d'elle, les sujets fermaient les yeux pendant le mouvement alors que dans l'autre, ils voyaient le cadre tout en bougeant.

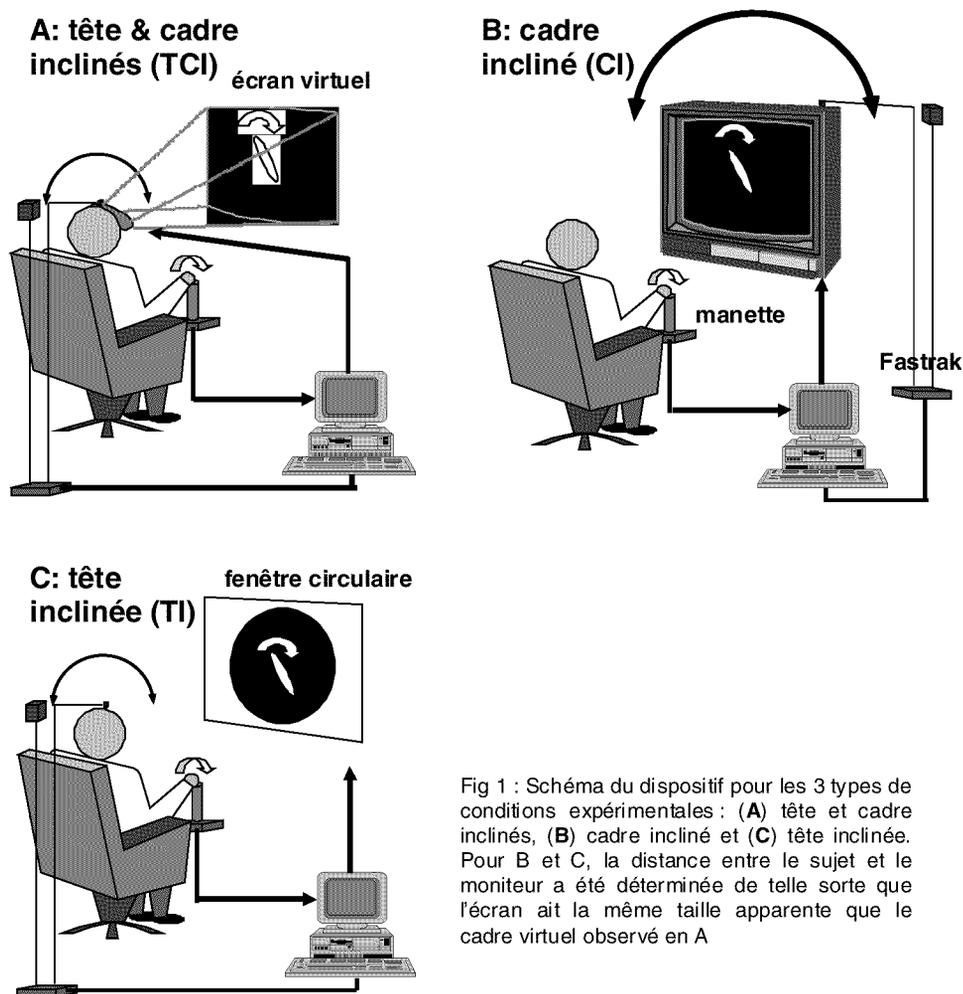


Fig 1 : Schéma du dispositif pour les 3 types de conditions expérimentales : (A) tête et cadre inclinés, (B) cadre incliné et (C) tête inclinée. Pour B et C, la distance entre le sujet et le moniteur a été déterminée de telle sorte que l'écran ait la même taille apparente que le cadre virtuel observé en A

### Conditions «cadre incliné» (CI)

La baguette était cette fois présentée sur un moniteur 17", fixé sur une plate-forme qui pouvait être inclinée manuellement dans le plan frontal. Un récepteur magnétique était monté sur le moniteur afin d'enregistrer son orientation. Les contours de l'écran formé par l'ensemble des pixels formaient un cadre rectangulaire lumineux. Afin d'ajuster au mieux la distance entre le sujet et l'écran, le casque vidéo décrit précédemment était superposé à l'écran du moniteur (le casque était utilisé dans ce cas en mode «see through», qui permet de superposer l'écran virtuel au monde extérieur visible). Seuls les contours du cadre et la barre lumineuse étaient visibles dans un environnement totalement noir par ailleurs.

Deux conditions CI ont été réalisées. Cette fois, la tête était maintenue droite par une sorte de minerve. L'expérimentateur changeait l'orientation du cadre en agissant sur la plate-forme inclinable (Fig. 1B). Chaque nouvelle orientation était choisie au hasard entre  $40^\circ$  dans le sens anti-horaire et  $40^\circ$  dans le sens horaire. Dans l'une des conditions, les sujets avaient pour consigne de fermer les yeux entre les essais afin de ne pas disposer de la vision du cadre lorsque celui-ci était en rotation. Dans l'autre condition, la vision continue du cadre était permise.

### Conditions «tête inclinée» (TI)

De la même manière que durant les conditions TCI, les sujets avaient pour instruction de positionner leur tête dans 40 orientations différentes et d'estimer la verticale pour chacune des positions (Fig. 1C). La baguette était affichée sur l'écran utilisé dans les conditions CI, placé à la même distance, mais cette fois les références visuelles orientées fournies par le contour de l'écran étaient supprimées. A cette fin, un panneau noir, percé en son centre d'un orifice circulaire de  $15^\circ$  d'angle, était disposé devant le moniteur. La baguette apparaissait au centre de la fenêtre circulaire.

## Résultats

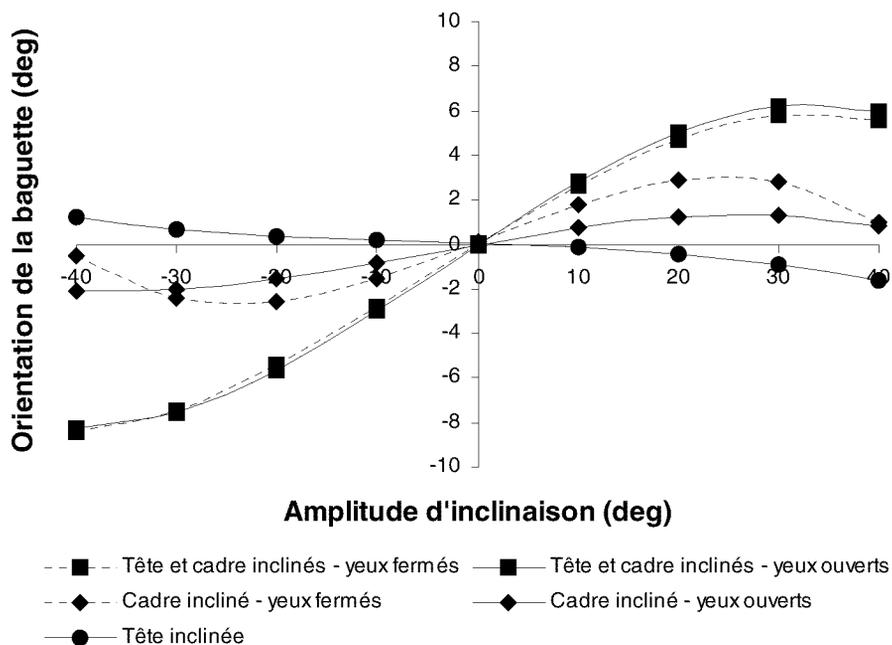


Fig. 2 : Estimation moyenne de la verticale (en degrés,  $0^\circ$  correspondant à la verticale gravitaire) en fonction de l'angle d'inclinaison de la tête et/ou du cadre dans toutes les conditions.

Toutes les conditions expérimentales ont généré une variabilité interindividuelle importante, une caractéristique très souvent retrouvée dans les études portant sur la verticale subjective. Cette variabilité s'observe sur l'amplitude des erreurs d'estimation de la verticale, mais aussi sur la forme des fonctions psychométriques obtenues. En effet, les erreurs commises en estimant la verticale étaient, pour la plus grande partie des sujets, une fonction linéaire de l'inclinaison de la tête et/ou du cadre pour atteindre un maximum vers 25° d'inclinaison ou plus. Pour des inclinaisons supérieures, l'erreur cessait d'augmenter, voire diminuait. D'autres sujets, au contraire, présentaient des réponses purement linéaires. C'est pourquoi les données ont été analysées à l'aide de régressions polynomiales de 3<sup>ème</sup> ordre. Puisque toutes les courbes de réponses pouvaient être résumées en grande partie par leur composante linéaire, la pente des courbes à l'origine est la valeur pertinente pour estimer la force de l'effet (erreur constante). De plus, l'erreur variable a été évaluée en calculant la moyenne des résidus absolus (les valeurs absolues des différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites pour un même angle d'inclinaison).

Les jugements de la verticale ont des profils superposables, que les mouvements de tête aient été réalisés activement ou passivement. Cette observation est valable dans les conditions TCI ( $t_{11} = 0,90$  avec les yeux ouverts et  $t_{11} = 0,64$  avec les yeux fermés) et dans les conditions TI ( $t_{11} = 0,10$ ). Par conséquent, les données ont été moyennées et les analyses ultérieures ont été réalisées sur ces moyennes. La figure 2 présente les courbes de réponses moyennes obtenues dans l'ensemble des conditions. On observe que, dans les conditions TCI, l'erreur d'estimation de la verticale correspond à 29% et 28% de l'inclinaison de la tête et du cadre, respectivement lorsque les yeux sont ouverts et fermés. Dans les conditions CI, l'erreur de 17% commise avec les yeux fermés chute à 8% lorsque les sujets ont la possibilité d'observer les rotations du cadre visuel. Enfin, incliner la tête en l'absence de référence visuelle ne produit qu'un très léger effet Müller (inclinaison de la verticale visuelle dans le sens opposé à l'inclinaison de la tête), non significatif.

Une analyse de variance à mesures répétées 2 (cadre fixe par rapport à la tête vs. cadre dissocié de la tête) x 2 (yeux fermés vs. yeux ouverts) réalisée sur les pentes des courbes met en évidence un effet principal du type de cadre [ $F(1,11) = 5,96$  ;  $p < .05$ ], une absence d'effet principal de la vision du cadre pendant la rotation [ $F(1,11) = 4,15$ ] et une interaction significative entre les deux variables [ $F(1,11) = 12,76$  ;  $p < .005$ ]. Les analyses post-hoc (tests de Newman-Keuls) révèlent que l'interaction est la conséquence d'un effet significatif de la vision continue du cadre dans les conditions CI (la pente est plus forte avec les yeux fermés,  $p < .001$ ), mais pas dans les conditions TCI [ $p > .50$ ].

Les erreurs commises dans les conditions TCI sont plus grandes que la somme des erreurs obtenues dans les conditions CI et dans les conditions TI. Cet effet est significatif avec les yeux fermés pendant le mouvement ( $t_{11} = 2,96$  ;  $p < .05$ ) et encore plus avec les yeux ouverts ( $t_{11} = 6,65$  ;  $p < .001$ ).

Les résidus absolus moyens diffèrent selon les conditions expérimentales [ $F(2,22) = 9,99$  ;  $p < .001$ ]. Les analyses post-hoc révèlent que la variabilité intraindividuelle est plus faible dans les conditions CI que dans les conditions TCI ( $p < .001$ ) et que dans les conditions TI ( $p < .01$ ). La différence entre les deux dernières conditions n'atteint pas le niveau de significativité ( $p < .15$ ). Aucune autre manipulation expérimentale (yeux fermés/yeux ouverts, mouvements actifs/mouvements passifs) n'a d'effet significatif sur la variabilité de la réponse. La figure 3 décrit les résidus absolus moyens en fonction de l'inclinaison. Lorsque la tête est droite (conditions CI), les résidus restent presque constants, quelle que soit l'orientation du cadre. Au contraire, la variabilité augmente avec le degré d'inclinaison de la tête. Ce profil est frappant, particulièrement lorsque l'inclinaison de la tête est combinée avec un cadre visuel incliné (conditions TCI).

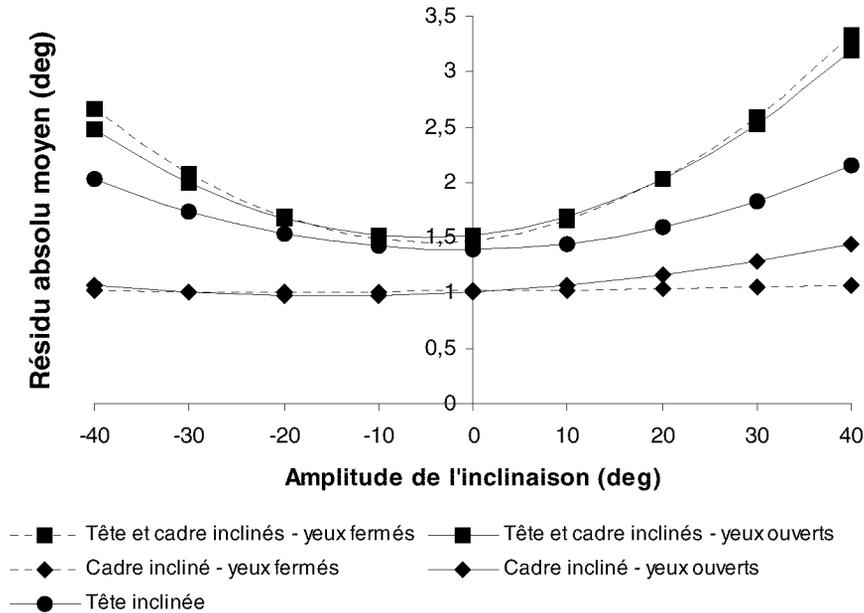


Fig. 3 : Distribution des résidus absolus moyens (variabilité de la réponse) en fonction de l'inclinaison dans toutes les conditions.

## Discussion

L'expérience 1 s'intéresse aux effets d'un cadre visuel solidaire de la tête sur la verticale visuelle lorsque la tête est inclinée. Les effets d'une telle combinaison d'informations ont été comparés aux effets simples de l'inclinaison d'un cadre fixe dans l'espace et à ceux de l'inclinaison de la tête en l'absence de références visuelles orientées. Les inclinaisons du cadre et/ou de la tête ont été variées de façon systématique afin de pouvoir décrire précisément la forme des fonctions psychométriques résultantes. Deux résultats principaux peuvent être mis en avant. Premièrement, les erreurs dans l'estimation de la verticale sont nettement plus grandes lorsqu'un cadre visuel s'incline avec la tête que lors d'inclinaisons similaires d'un cadre fixe dans l'espace sans inclinaison de tête. L'augmentation de l'effet du cadre visuel ne peut pas être expliquée par l'addition d'un effet postural, puisque incliner la tête en l'absence de références visuelles n'influence pas, en moyenne, l'estimation de la verticale faite par les sujets. Deuxièmement, la vision continue du cadre lors de ses changements d'orientation n'améliore la performance des sujets que lorsque la tête et le cadre sont dissociés, c'est-à-dire avec un cadre fixe dans l'espace.

### *Réfutation de l'hypothèse d'additivité des effets visuels et posturaux*

Dans la grande majorité des expériences, les effets induits par les stimulations visuelles sont nettement plus importants lorsque la tête est inclinée par rapport à la gravité que lorsqu'elle est maintenue droite (Dichgans et al., 1974 ; Witkin et Asch, 1948). Le débat est encore ouvert pour savoir si l'augmentation de la désorientation relève d'une addition des effets posturaux et des effets visuels ou si les deux effets sont interdépendants. Selon le modèle additif, l'erreur due à l'inclinaison de la tête ou du corps entier s'ajouterait intégralement aux erreurs provoquées par la perturbation visuelle. Autrement dit, la réponse fournie par le sujet lorsque les deux perturbations sont combinées serait le résultat de l'addition vectorielle des deux verticales perçues dans les situations où une seule manipulation expérimentale est réalisée. Pour le modèle interdépendant, l'influence de la vision sur la perception de l'orientation spatiale est limitée par le rôle inhibiteur des utricules et des informations somatosensorielles lorsque ceux-ci ne détectent

aucun changement dans l'information gravitaire. Lorsque la tête est inclinée, la fiabilité des afférences otolithiques diminuerait et, par conséquent, la pondération des différentes sources d'informations serait modifiée en faveur des afférences visuelles. Récemment, Guerraz et al. (1998b) ont examiné la combinaison d'inclinaisons de la tête et de perturbations visuelles statiques (cadre incliné). Ils concluent que l'augmentation de l'effet cadre observée dans ces conditions ne serait que la conséquence d'un effet postural de type Aubert (erreur d'estimation dans la direction de l'inclinaison corporelle), ce qui contredit les conclusions de DiLorenzo et Rock (1982).

Les résultats de l'expérience 1 ne soutiennent pas l'hypothèse d'additivité, puisque nos sujets ont montré une influence du cadre visuel nettement accrue, sans effet Aubert. D'un point de vue plus général, il est difficile d'envisager la fusion des informations sensorielles provenant de différentes sources comme relevant d'une simple sommation. En effet, il existe la plupart du temps de grandes différences dans les caractéristiques spatiales et temporelles des systèmes sensoriels (Howard, 1997). Les modèles actuels essaient d'ailleurs d'expliquer l'intégration d'afférences sensorielles multiples en terme de combinaisons non-linéaires (Mergner et al., 1997, 1998). En fonction des conditions, une modalité sensorielle peut prévaloir sur une autre ou, au contraire, voir son influence diminuer. Plus spécifiquement, les signaux de position de la tête semblent n'être fiables que lorsqu'ils sont intégrés au travers de processus dynamiques (Teasdale et al., 1999). Par conséquent, lorsque la tête est inclinée et maintenue dans une orientation donnée, l'augmentation des erreurs dans la direction du cadre incliné reflète probablement un poids plus important affecté aux références visuelles.

### *La désorientation spatiale : un phénomène à deux visages*

L'étude de la variabilité de la réponse des sujets suggère également une fiabilité moindre des signaux de position de la tête lorsque celle-ci est inclinée. La variabilité intraindividuelle est faible lorsque la tête est droite, quelle que soit l'orientation du cadre visuel. En revanche, la variabilité est plus grande dès lors que la tête est inclinée et elle s'accroît avec l'amplitude d'inclinaison, que les références visuelles soient absentes ou fixes par rapport à la tête. Il est intéressant de remarquer que cette observation quantitative correspond aux commentaires des sujets, qui ont exprimé une plus grande difficulté à réaliser la tâche lorsque la tête était inclinée, en particulier en combinaison avec le cadre visuel. Dans ces dernières conditions, les sujets ont d'ailleurs souvent rapporté un fort sentiment d'incertitude quant à la précision de leurs ajustements. Ces résultats mettent l'accent sur le fait que la désorientation spatiale peut être définie de deux façons différentes. D'une part, l'erreur constante par rapport à la verticale gravitaire témoigne du résultat perceptif élaboré par le système nerveux central, en fonction des informations dont il dispose. En l'occurrence, lorsque le cerveau doit s'accommoder d'informations appauvries ou conflictuelles, la perception peut être biaisée en faveur d'une modalité sensorielle ou d'une autre. D'autre part, on peut considérer l'erreur variable qui atteste du niveau de reproductibilité de la réponse du sujet. En ce qui concerne les estimations subjectives, cette reproductibilité reflète souvent le niveau de confiance du sujet dans sa réponse. Dans ce cas, désorientation spatiale n'est pas nécessairement synonyme d'altération de performance moyenne. Nos résultats illustrent cette distinction. En effet, le biais perceptif atteint un plateau et décroît parfois (Fig. 2), alors que la variabilité (et sa contrepartie subjective) continue à augmenter avec l'amplitude de l'inclinaison de la tête (Fig. 3).

### *Traitement de l'information visuelle en mouvement dans le référentiel céphalocentré*

Lorsqu'un cadre visuel solidaire des mouvements de la tête est porté par le sujet, la vision continue du cadre durant les inclinaisons n'améliore pas la performance finale. Dans ce cas, le système nerveux central doit composer avec des informations visuelles orientées, à la fois stables dans le référentiel céphalocentré et mobiles dans le référentiel gravitaire. En fait, l'orientation du cadre ne peut alors être appréciée que par le biais des signaux de position de la tête, c'est-à-dire grâce à l'information vestibulaire et à la proprioception du cou. La commande motrice ne semble avoir aucune influence puisque les résultats sont identiques, que les mouvements de tête soient effectués activement ou passivement. Les résultats obtenus avec le cadre solidaire de la tête contrastent nettement avec l'amélioration des jugements de verticalité apportée par la vision continue d'un cadre ancré dans l'espace extracorporel. Cette condition expérimentale se rapproche des conditions naturelles où la scène visuelle bouge dans le référentiel céphalocentré dès lors que la tête bouge ou que les éléments de l'environnement changent de position ou

d'orientation. Le fait que le traitement continu de l'information visuelle ne réduise les erreurs que lorsque la tête et le cadre sont dissociés suggère que les indices visuels de mouvement doivent être intégrés dans le référentiel céphalocentré pour qu'ils puissent participer à la constance de l'orientation spatiale.

## **Expérience 2 : Effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la réorientation de la tête et la verticale subjective lors d'inclinaisons corporelles**

L'expérience 2 s'intéresse cette fois à l'estimation de la verticale lorsque le corps entier du sujet est incliné dans le plan frontal, en présence soit d'un cadre solidaire de l'inclinaison du tronc, soit d'un cadre solidaire des mouvements de la tête. Dans les deux cas, le sujet est assis dans un siège monté sur une plate-forme inclinable en roulis. Le cadre solidaire du corps est fourni par les contours d'un écran, fixé sur la plate-forme à hauteur des yeux du sujet. Le cadre solidaire de la tête est fourni par le casque vidéo utilisé dans l'expérience 1. Lorsque l'orientation de la tête est maintenue dans l'alignement du tronc, les deux conditions sont strictement identiques, quelle que soit l'orientation du corps par rapport à la gravité. En revanche, lorsque la tête est mobile, les deux conditions diffèrent. En effet, si le cadre visuel est solidaire de la plate-forme, c'est-à-dire lorsqu'il s'incline avec le corps du sujet tout en restant dissocié de la tête, les mouvements de la tête produisent un déplacement du cadre relativement au référentiel céphalocentré. L'information visuelle dynamique qui est générée devrait contribuer à diminuer l'influence du cadre sur la verticale subjective. En revanche, lorsque le cadre visuel est solidaire des mouvements de la tête, bouger la tête provoque un mouvement du cadre dans le référentiel gravitaire, mais aucune variation de l'orientation du cadre dans le référentiel céphalocentré. Dans cette condition, loin d'améliorer la performance des sujets, les mouvements de la tête et du cadre visuel dans l'espace risquent de désorienter d'avantage le sujet.

L'expérience 2 étudie également l'influence des deux types de cadres visuels sur le positionnement de la tête et ses conséquences sur la perception de la verticale. A cette fin, il est demandé au sujet de repositionner sa tête dans l'alignement du tronc après avoir effectué une série de mouvements céphaliques, puis, une fois la posture adoptée, d'estimer la verticale. Là encore, on peut supposer un effet différencié des deux types de cadres visuels. En effet, certains travaux montrent que des références visuelles orientées peuvent influencer sur la posture céphalique. Un cadre visuel incliné, par exemple, induit une réorientation de la tête dans la direction de l'inclinaison du cadre (Guerraz et al., 2001 ; Isableu et al., 1997 ; Sares et al., résultats non publiés). Le système nerveux central utiliserait donc l'information visuelle statique disponible dans l'environnement pour réorienter la partie supérieure du corps, avec très certainement pour finalité de faire de la tête un référentiel spatial stable et orienté adéquatement pour la perception du monde visuel (Amblard et al., 1985 ; Gresty et Bronstein, 1992).

Dans l'expérience décrite ici, le sujet a pour tâche de réorienter sa tête dans l'alignement du tronc. Or, le cadre visuel solidaire de la plate-forme et l'axe céphalocaudal du sujet (axe Z) sont colinéaires. Par conséquent, il est fort probable que, dans cette condition, les sujets tirent avantage de la présence du cadre pour mener à bien la tâche de réorientation de la tête. En revanche, le cadre visuel solidaire de la tête n'a pas d'ancrage dans l'espace extra-corporel. Son orientation ne peut être évaluée qu'à partir des signaux de position de la tête. L'information visuelle est donc présente, mais non-utilisable pour réorienter la tête. On peut donc faire l'hypothèse que le repositionnement de la tête donnera lieu à des erreurs plus importantes dans cette condition. Toute erreur de repositionnement risque d'avoir des conséquences sur l'estimation de la verticale. En effet, le cadre étant solidaire de la tête, son inclinaison dans l'espace sera modifiée de la même amplitude que l'erreur de repositionnement de la tête. L'expérience 2 vise donc à (1) quantifier les éventuelles erreurs de repositionnement de la tête en présence ou en l'absence de références visuelles ancrées dans l'espace extra-personnel, et (2) déterminer dans quelle mesure ces erreurs interagissent avec les références visuelles pour influencer la perception de la verticale.

### **Méthodes**

Les résultats de 6 hommes et 3 femmes ont été retenus pour cette expérience. Aucun sujet n'a déclaré souffrir ou avoir souffert de troubles vestibulaires. Leur vision était normale ou normalement corrigée.

Les sujets étaient assis dans un siège baquet fixé sur une plate-forme verticale (Fig. 4). La plate-forme pouvait être inclinée dans le plan frontal autour d'un axe de rotation situé approximativement au niveau du centre de masse du sujet. Les sujets étaient fermement maintenus immobiles dans le siège par un ensemble de sangles au niveau des pieds, des jambes, du bassin, de la poitrine et des épaules. La tête pouvait également être maintenue dans l'alignement du tronc, lorsque les conditions expérimentales l'exigeaient, grâce à deux presses appuyant sur les tempes.

La baguette visuelle utilisée pour indiquer la verticale était la même que celle de l'expérience 1. La baguette était présentée soit dans le casque vidéo utilisé dans l'expérience précédente, lequel présentait un écran virtuel dont les contours fournissaient un cadre solide des mouvements de la tête, soit sur un écran placé fixe face au sujet sur la plate-forme (Fig. 4). Les cadres visuels formés par les bords de chaque écran avaient une taille angulaire de  $30^\circ \times 22,5^\circ$ . Seuls les contours de l'écran et la barre lumineuse étaient visibles dans un environnement totalement noir par ailleurs.

Un dispositif magnétique Fastrak mesurait l'orientation de la tête par rapport au tronc. L'émetteur était fixé sur la plate-forme à la droite du sujet et un récepteur était attaché à un casque ajustable, porté par le sujet.

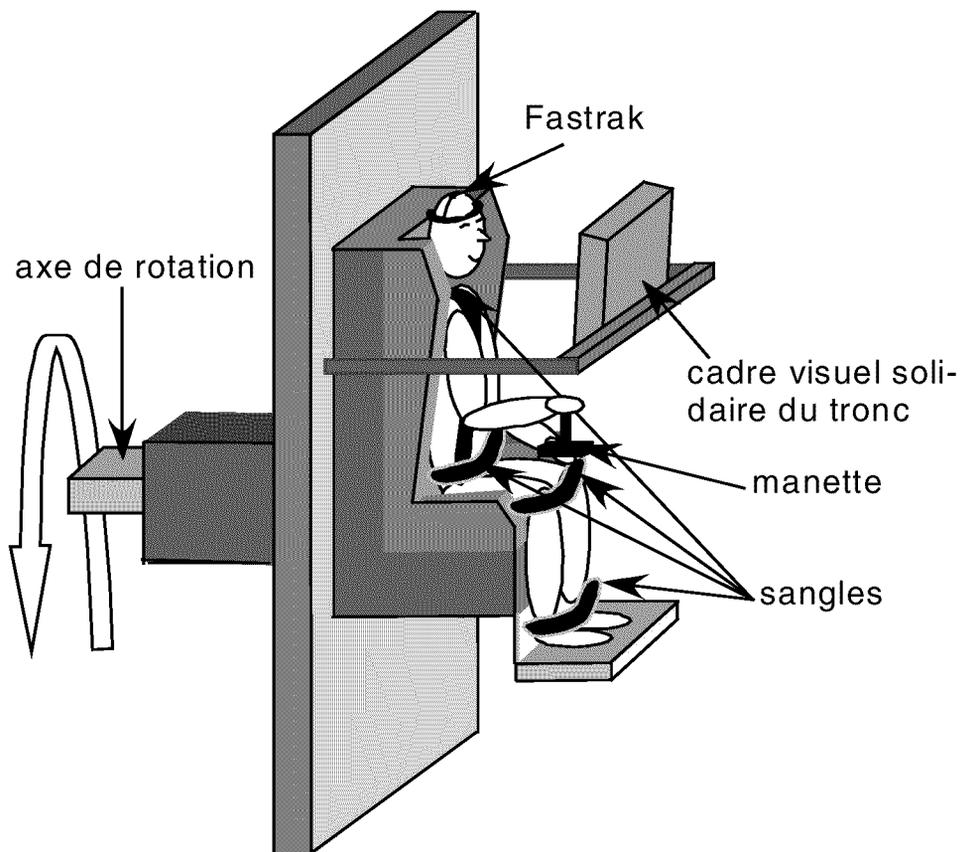


Fig. 4 : Schéma du dispositif expérimental dans la condition où le cadre visuel est solidaire du tronc (tête mobile). Dans les conditions «tête fixe», la tête est maintenue immobile dans l'axe du corps par deux presses latérales.

### *Inclinaisons du corps*

Le corps des sujets a été incliné avec la plate-forme à  $15^\circ$  et  $30^\circ$  dans le plan frontal, dans le sens horaire et dans le sens anti-horaire. Les inclinaisons s'effectuaient avec une accélération initiale de  $3^\circ \cdot s^{-2}$ , jusqu'à une vitesse de  $3^\circ \cdot s^{-1}$ . Cette vitesse était maintenue constante jusqu'à la phase de décélération, elle aussi effectuée à  $3^\circ \cdot s^{-2}$ . Durant la rotation, les sujets avaient pour consigne de garder les yeux ouverts et de

regarder le cadre visuel. Des valeurs de références ont été enregistrées avant chaque séquence d'inclinaisons, lorsque la plate-forme était verticale.

### *Type de cadre visuel*

La baguette visuelle apparaissait au centre de trois types de cadre visuel, dont l'ordre de présentation a été contrebalancé. Le casque vidéo fournissait un cadre solidaire de la tête (conditions CST). L'axe vertical du cadre visuel restait donc constamment aligné sur l'axe vertical de la tête, quelle que soit l'orientation de celle-ci. Les contours de l'écran fixé à la plate-forme fournissaient un cadre visuel solidaire de la plate-forme (conditions CSP). L'axe vertical du cadre restait cette fois constamment aligné avec l'axe vertical du corps du sujet (axe Z). Une fenêtre circulaire entourant la baguette formait un cadre visuel non-orienté (conditions CNO).

### *Mobilité de la tête*

Dans la moitié des conditions expérimentales, la tête du sujet était maintenue dans l'alignement du tronc par les presses latérales. Pendant la rotation et les estimations de la verticale, le sujet avait pour instruction de regarder le cadre visuel. Dans l'autre moitié des conditions expérimentales, la tête du sujet était libre. Pendant les rotations, le sujet avait pour instruction de maintenir la tête dans l'alignement du tronc. En revanche, avant d'estimer la verticale, il devait réaliser des mouvements libres de la tête pendant quelques secondes. Les mouvements devaient être effectués dans toutes les directions de l'espace, tout en gardant le regard dirigé vers le cadre visuel. Finalement, le sujet devait réorienter la tête de façon à la remettre dans l'alignement du buste et estimer la verticale.

## **Résultats**

La figure 5 montre les estimations de la verticale dans toutes les conditions expérimentales. Pour la clarté de l'illustration et pour mieux mettre en évidence la linéarité des effets en fonction de l'inclinaison du sujet, une erreur dans l'estimation de la verticale se voit assigner une valeur positive, si elle est dans le sens horaire, et négative, si elle est dans le sens anti-horaire. Pour les analyses statistiques, en revanche, les erreurs d'appréciation de la verticale sont positives si elles sont commises dans le sens de l'inclinaison du corps (et du cadre). Les valeurs de références obtenues dans chaque condition sans inclinaison corporelle ont été retranchées à ces données.

En ce qui concerne les effets principaux, l'analyse révèle un effet significatif du type de cadre visuel [ $F(2,16) = 15,96$  ;  $p < .001$ ], pas d'effet de la mobilité de la tête [ $F(1,8) = 0,43$ ], pas d'effet du côté d'inclinaison du corps [ $F(1,8) = 5,15$ ] et un effet significatif de l'amplitude d'inclinaison [ $F(1,8) = 37,73$  ;  $p < .001$ ]. Parmi toutes les interactions possibles, une seule est significative. Il s'agit de l'interaction de premier ordre entre le type de cadre visuel et la mobilité de la tête [ $F(2,16) = 4,72$  ;  $p < .05$ ]. Les tests post-hoc effectués sur cette interaction montrent que, dans la condition CST, les erreurs augmentent de façon significative lorsque la tête est en mouvement avant l'estimation de la verticale ( $p < .05$ ). En revanche, la réduction des erreurs observées lorsque la tête est libre n'est significative ni dans la condition CSP, ni dans la condition CNO. Si l'on considère maintenant les erreurs d'estimation de la verticale en proportion de l'amplitude d'inclinaison de la plate-forme, on observe que les erreurs commises dans les conditions CSP «tête fixe» et «tête libre» correspondent respectivement à 26% et 20% de l'inclinaison de la plate-forme. L'erreur commise en CST «tête fixe» est équivalente, puisqu'elle atteint 22%. Cette proportion augmente à 34% en CST «tête libre».

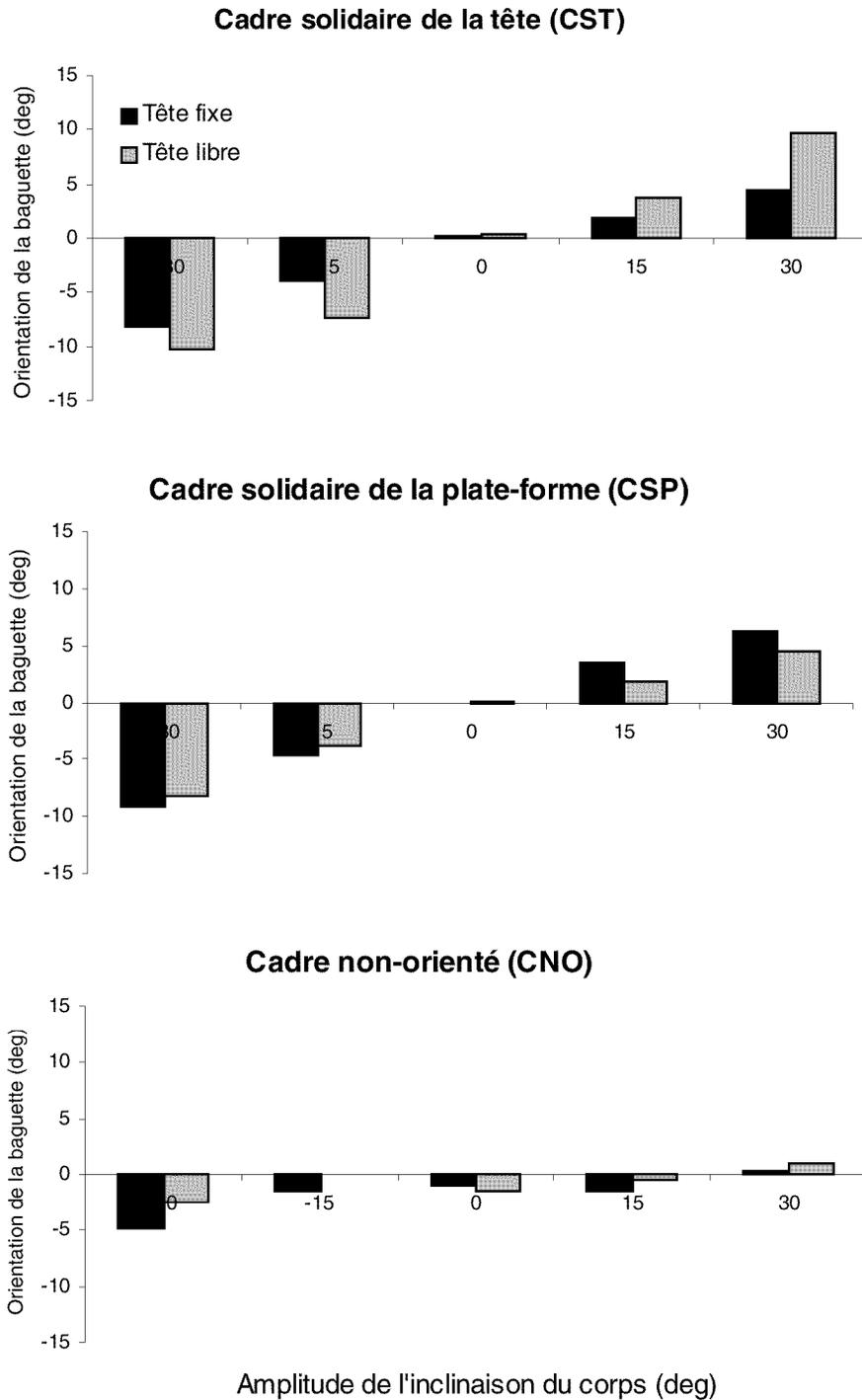


Fig. 5 : Estimation de la verticale en fonction de l'inclinaison du corps, du type de cadre visuel et de la mobilité de la tête. Dans la condition CST, bouger la tête avant l'estimation augmente l'erreur, commise en direction de l'inclinaison du corps et du cadre. Dans la condition CSP, la mobilité de la tête n'a pas d'effet significatif d'un point de vue statistique sur la verticale subjective. On peut cependant observer une légère amélioration de la performance pour toutes les inclinaisons lorsque le mouvement de la tête est permis.

En ce qui concerne la tâche de réorientation de la tête, les erreurs de repositionnement de la tête commises dans le sens de l'inclinaison de la plate-forme se voient attribuer une valeur positive, alors que les erreurs commises dans la direction opposée sont négatives. Les valeurs de référence obtenues sans inclinaison corporelle ont là aussi été retranchées aux données obtenues pendant les inclinaisons. Les erreurs de repositionnement sont à la fois très faibles en moyenne et très variables selon les sujets. Un effet du type de cadre visuel sur les erreurs de repositionnement de la tête peut cependant être mis en évidence en calculant l'erreur moyenne indépendamment de la direction et de l'amplitude de l'inclinaison du corps (Fig. 6) et en comparant ces moyennes à zéro. Dans ce cas, seule l'erreur de repositionnement commise en condition CST est significativement déviée, en l'occurrence dans le sens de l'inclinaison de la plate-forme ( $p < .05$ ).

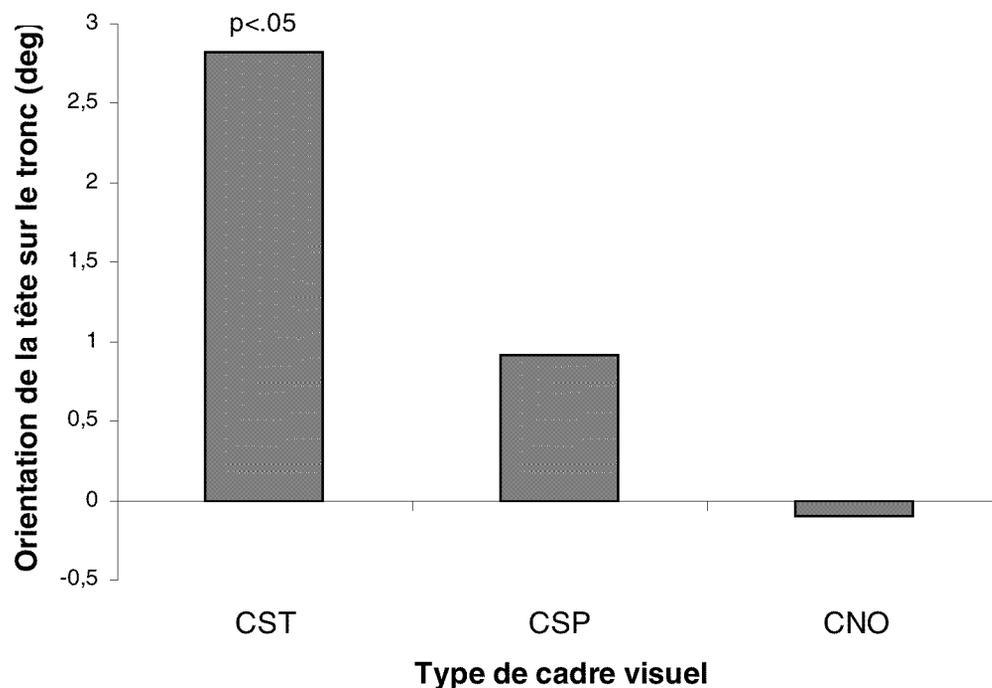


Fig. 6 : Erreur moyenne de repositionnement de la tête en fonction des trois types de cadres visuels étudiés. Une valeur positive représente une erreur dans le sens de l'inclinaison du corps. Seule l'erreur commise avec le cadre solidaire de la tête est significativement différente de zéro.

Les liens entre les erreurs de repositionnement de la tête et les erreurs d'estimation de la verticale peuvent être mis à jour en effectuant une série de corrélations linéaires. Ces corrélations ont consisté à mettre en rapport, d'une part, l'erreur de repositionnement de la tête dans les conditions «tête libre» et d'autre part, la différence entre les erreurs d'estimation de la verticale dans les conditions «tête libre» et celles observées dans les conditions «tête fixe» (Fig. 7). Elles montrent que les deux variables ne sont significativement corrélées que dans les conditions CST ( $r = 0,64$ ,  $p < .001$ ). La régression appliquée sur ces données révèle que l'erreur supplémentaire observée en CST-«tête libre» correspond à 70% de l'inclinaison de la tête.

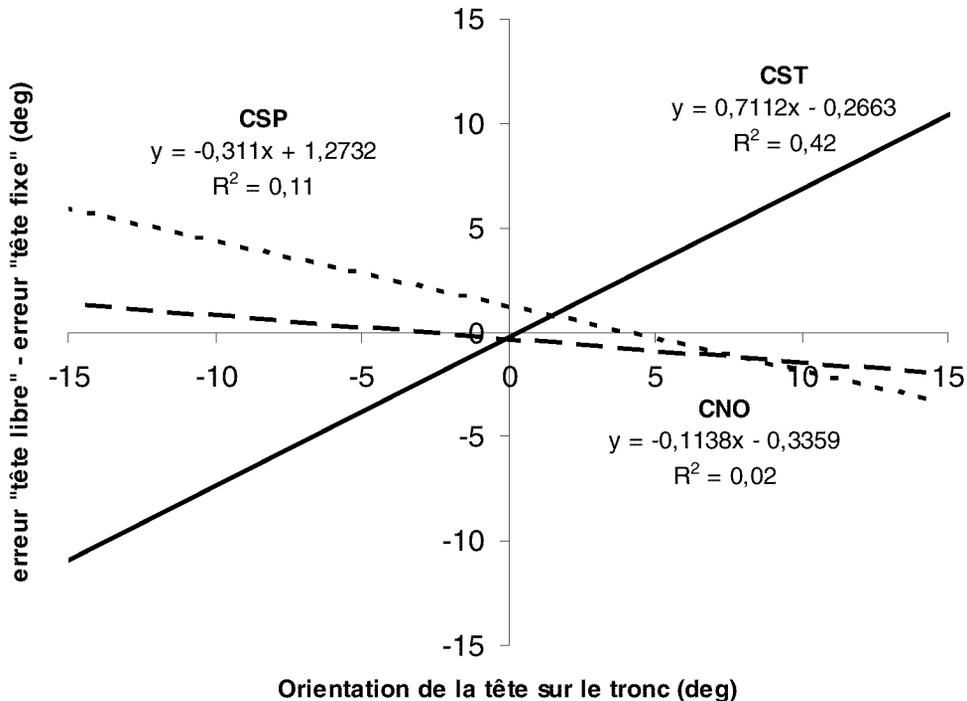


Fig. 7 : Différences d'estimation de la verticale entre les conditions «tête libre» et «tête fixe» en fonction des erreurs de repositionnement de la tête. La corrélation n'est significative que lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête.

## Discussion

L'expérience 2 visait principalement à comparer les effets de deux types de cadres visuels lors d'inclinaison du corps dans le plan frontal, à la fois sur la perception de la verticale et sur le maintien de la tête dans l'alignement du tronc. L'un des cadres était solidaire de l'orientation de la tête, l'autre s'inclinait avec le corps du sujet, sans toutefois être asservi à la tête. Lorsque la tête est mobile, un cadre visuel céphalocentré génère des erreurs supérieures dans l'estimation de la verticale. Le comportement des sujets dans la tâche de réorientation de la tête diffère également. Les sujets tendent en moyenne à repositionner leur tête dans l'alignement du tronc en présence de références visuelles ancrées dans l'environnement extérieur. Par contraste, la tête est inclinée dans la direction de l'orientation du corps, lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête.

### *Ancrage des références visuelles et réorientation de la tête*

La stabilisation de la tête dans l'espace aurait deux fonctions primordiales (Massion, 1994). D'une part, elle intervient comme un élément déterminant dans le contrôle postural et le maintien de l'équilibre et d'autre part, elle permet de fournir aux systèmes perceptifs un référentiel stable. Pour maintenir la tête droite, plusieurs sources d'informations sont utilisées. Premièrement, les indices vestibulaires commandent le réflexe vestibulo-collique, dont l'effet est de redresser la tête dès lors qu'elle n'est plus alignée avec la direction de la gravité. Deuxièmement, les informations proprioceptives issues des muscles du cou participent aux réflexes cervico-colliques qui tend à maintenir la tête dans l'alignement du tronc. On accorde habituellement une importance moindre à la vision sur le maintien de l'orientation de la tête en condition normale, même s'il est reconnu qu'elle peut avoir une influence significative (Guitton et al., 1986).

Lorsque les références visuelles d'orientation ne sont pas alignées sur la verticale, l'influence de la vision peut être clairement mise en évidence par une réorientation de la tête dans la même direction (Guerraz et al., 2001 ; Isableu et al., 1997; Sares et al., résultats non publiés). Sares et al. (résultats non publiés) montrent en particulier que, dans un champ gravito-inertiel modifié, un cadre visuel incliné modifie considérablement le résultat de la compétition entre les réflexes vestibulo-colliques et cervico-colliques. Sur la base de l'ensemble de ces travaux, nous avons fait l'hypothèse qu'un cadre visuel incliné de la même amplitude que le corps améliorerait la performance des sujets dans une tâche consistant à réorienter la tête dans l'alignement du tronc, par rapport à une situation où les informations visuelles étaient solidaires de la tête. Les résultats confirment en partie seulement cette hypothèse. En effet, si la performance moyenne des sujets est meilleure en présence d'informations visuelles ancrées dans l'espace externe, la dispersion des données témoigne d'une assez grande variabilité interindividuelle dans toutes les conditions. Les idiosyncrasies habituellement observées dans les situations expérimentales telles que la nôtre semblent donc se manifester dans la contribution des informations visuelles au choix des «stratégies» de stabilisation de la tête, un phénomène cohérent avec les travaux d'Amblard et al. (2001). En l'absence d'ancrage des informations visuelles dans l'environnement externe au sujet, le comportement de la tête est nettement plus consistant. En effet, les sujets, dans leur majorité, ont tendance à laisser la tête inclinée dans la direction de l'inclinaison du corps. Dans cette condition, les informations visuelles solidaires de la tête sont sans aucune pertinence pour la réalisation de la tâche. En fait, la performance des sujets peut être considérée comme le strict résultat de la modulation volontaire de la compétition entre les réflexes cervico-colliques et vestibulo-colliques. Les premiers vont dans le sens d'une performance adéquate dans la tâche demandée. Les seconds doivent être inhibés pour éviter un redressement de la tête. Visiblement, dans les conditions expérimentales décrites ici, le réflexe vestibulo-collique est sur-compensé.

### *Ancrage des références visuelles et verticale subjective*

Avec un cadre solidaire de la tête, l'estimation de la verticale faite par les sujets après la tâche de réorientation de la tête est significativement plus déviée dans le sens de l'inclinaison du cadre qu'avec un cadre dissocié de la tête. La question se pose alors de savoir quels facteurs peuvent expliquer cette augmentation des erreurs, puisque deux phénomènes coexistent dans cette condition. En effet, le cadre visuel étant solidaire de l'orientation de la tête, les mouvements précédant l'estimation de la verticale ne génèrent aucune variation de l'orientation du cadre dans le référentiel céphalocentré, contrairement à l'autre condition. De plus, si on considère les observations précédentes, il apparaît que les sujets tendent en moyenne à incliner la tête dans la même direction que le corps. Le cadre est donc lui-même incliné par rapport à la gravité d'une amplitude supplémentaire équivalente à celle de la tête.

Les corrélations représentées par la figure 7 ont été réalisées dans le but de déterminer dans quelle proportion cette inclinaison supplémentaire du cadre et de la tête peut expliquer l'augmentation de l'erreur dans l'estimation de la verticale. Alors que les erreurs de repositionnement de la tête ne présentent aucun lien avec les erreurs sur la verticale subjective lorsque le cadre est dissocié de la tête, la corrélation est clairement positive lorsque le cadre est solidaire de la tête. Elle montre que l'augmentation des erreurs observée entre les conditions «tête fixe» et «tête libre» correspond à 70% de l'inclinaison de la tête. Cette proportion est particulièrement élevée au regard des résultats obtenus dans l'expérience 1 où les effets de l'inclinaison de la tête par rapport au corps ont été étudiés. Rappelons que les erreurs observées sur la verticale subjective correspondaient alors à moins de 30% de l'inclinaison de la tête. L'inclinaison supplémentaire du cadre et de la tête dans l'espace peut donc expliquer, au mieux, la moitié de l'erreur supplémentaire observée dans l'expérience 2.

Une autre explication pourrait être avancée. Elle consisterait à dire que l'erreur de réorientation de la tête ne serait pas accessible au système perceptif et viendrait s'ajouter à l'erreur provoquée par l'inclinaison du cadre. En effet, le sujet ayant explicitement pour tâche de réorienter sa tête dans l'alignement du tronc, on peut faire l'hypothèse que l'erreur de repositionnement est la conséquence d'une perception erronée de la tête. L'orientation du cadre céphalocentré étant, par définition, dépendante de la position perçue de la tête, les erreurs perceptives s'ajouteraient. Cependant, la logique de cette éventualité voudrait que l'erreur de repositionnement s'ajoute intégralement à l'erreur observée lorsque la tête est maintenue dans l'alignement du tronc par le dispositif de contention. Ce n'est pas le cas, ce qui nous amène à rejeter cette hypothèse.

Les résultats plaident donc en faveur de l'hypothèse, posée *a priori*, selon laquelle les mouvements de la tête provoquent un conflit informationnel, puisque le cadre visuel change d'orientation dans le référentiel gravitaire tout en restant fixe dans le référentiel céphalocentré. L'augmentation de l'erreur observée ici serait donc une autre démonstration de l'importance cruciale du traitement des informations spatiales relativement à la tête. Cette hypothèse prédisait également une diminution de l'effet cadre lorsque la tête était mobile en face d'un cadre indépendant de la tête. Cette diminution, quoique présente d'un point de vue descriptif pour toutes les orientations du corps, n'est pas significative.

## Conclusions

Il a déjà été proposé que la tête sert d'origine à un référentiel important pour les jugements d'orientation (Friedman et Hall, 1996 ; Guerraz et al., 1998b ; Spidalieri et Sgolastra, 1999). Les deux études que nous rapportons ici renforcent cette idée en démontrant les effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la perception de la verticalité. Premièrement, lorsqu'un cadre visuel s'incline avec la tête, il donne lieu à des erreurs importantes qui ne peuvent être expliquées par l'addition d'effets visuels et posturaux. Deuxièmement, la vision du cadre lors de ses changements d'orientation dans l'espace ne diminue l'erreur perceptive que lorsque la tête et le cadre sont dissociés. De plus, lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête, des erreurs de repositionnement de la tête peuvent survenir et entraîner indirectement des erreurs supplémentaires dans l'estimation de la verticale. Ces résultats suggèrent par conséquent que le traitement de l'information visuelle dans le référentiel céphalocentré est crucial pour le maintien d'une perception constante et adéquate de la direction de la gravité.

Rappelons que les afficheurs de casque sont actuellement développés pour être intégrés dans les appareils militaires car ils présentent l'avantage remarquable de fournir des informations dans le champ visuel du pilote quelle que soit l'orientation de sa tête. A ce titre, des essais sont conduits pour inclure des indicateurs d'attitude dans les afficheurs de casque (Cohen et al., 2001). De plus, Taylor et Kuchar (2000) montrent que ce type d'appareillage peut influencer de façon significative le comportement de la tête du pilote lorsqu'il effectue une manœuvre de rétablissement. Considérés ensemble, ces résultats s'accordent avec les nôtres pour suggérer que si des indicateurs d'attitude, comme une ligne d'horizon, sont entourés d'informations visuelles orientées fixes par rapport à la tête, la perception qu'a le pilote de son orientation peut être significativement altérée. Ceci serait d'autant plus probable lors de vols de nuit durant lesquels des épisodes de désorientation spatiale sont fréquemment rapportés, en raison de l'absence de repères visuels externes. Les informations visuelles orientées n'ont pas forcément besoin d'avoir la forme d'un cadre complet tel que celui utilisé dans les expériences rapportées ici, puisqu'il a été montré qu'un cadre incomplet ou même des contours subjectifs peuvent induire un effet cadre (Antonucci et al., 1995 ; Spinelli et al., 1999; Streibel et al., 1980). Ceci devrait inciter les concepteurs en aéronautique à porter attention aux risques potentiels liés à l'inclusion dans les afficheurs de casque d'informations visuelles dont l'orientation resterait constante par rapport à la tête. Previc (2000) défendait déjà l'idée que l'inclusion d'indicateurs d'attitude asservis à la tête risquait de violer les caractéristiques fondamentales des systèmes nerveux responsables de l'orientation spatiale. Les arguments expérimentaux présentés ici confortent cette idée.

## Références

- Amblard B, Assaiante C, Vaugoyeau M, Baroni G, Ferrigno G, Pedotti A (2001). Voluntary head stabilisation in space during oscillatory trunk movements in the frontal plane performed before, during and after a prolonged period of weightlessness. *Exp Brain Res* 137: 170-179
- Amblard B, Cremieux J, Marchand AR, Carblanc A (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. *Exp Brain Res* 61: 21-37
- Antonucci G, Fanzon D, Spinelli D, Zoccolotti P (1995) Visual factors affecting the rod-and-frame illusion: role of gap size and frame components. *Perception* 24 : 1119-1130
- Cohen D, Otakeno S, Previc FH, Ercoline WR (2001) Effect of "inside-out" and "outside-in" attitude displays on off-axis tracking in pilots and nonpilots. *Aviat Space Environ Med* 72: 170-176
- Dichgans J, Diener HC, Brandt T (1974) Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta Otolaryngol* 78: 391-398
- DiLorenzo JR, Rock I (1982) The rod-and-frame effect as a function of the righting of the frame. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 8: 536-546

- Friedman A, Hall LD (1996) The importance of being upright: use of environmental and viewer-centered reference frames in shape discriminations of novel three-dimensional objects. *Mem Cognit* 24: 285-295
- Gresty MA & Bronstein AM (1992). Visually controlled spatial stabilisation of the human head: compensation for the eye's limited ability to roll. *Neurosci Lett*: 140: 63-66
- 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 MA, Bronstein AM (2001). Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain* 124: 1646-1656
- Guitton D, Kearney RE, Wereley N, Peterson BW (1986). Visual, vestibular and voluntary contributions to human head stabilization. *Exp Brain Res* 64: 59-69
- Howard IP (1997) Interactions within and between the spatial senses. *J Vestib Res* 7: 311-345
- Howard IP (1986) The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In: Boff KR, Kaufman LK, Thomas JP (eds) *Handbook of perception and human performance*, Vol I. Wiley and Sons, New York, pp 18.1-18.62
- Isableu B, Ohlmann T, Cremieux J, Amblard B (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Exp Brain Res*, 114: 584-589
- Massion J (1994). Postural control system. *Curr Opin Neurobiol* 4: 877-887
- Mergner T, Huber W, Becker W (1997) Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. *J Vestib Res* 7: 347-367
- Mergner T, Nasios G, Anastasopoulos D (1998) Vestibular memory-contingent saccades involve somatosensory input from the body support. *Neuroreport* 9: 1469-1473
- Mergner T, Rosemeier T (1998) Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions - a conceptual model. *Brain Res Rev* 28: 118-135
- Previc FH (2000). Neuropsychological guidelines for aircraft control stations. *IEEE Eng Med Biol Mag* 19: 81-88
- Sares F, Bourdin C, Gauthier GM (en préparation) Influence of peripheral visual information on head sensory-motor responses during gravito-inertial changes.
- Spidalieri G, Sgolastra R (1999) The head midline as a reliable reference frame for encoding head-on-body orientation. *Neuroreport* 10: 2473-2476
- Spinelli D, Antonucci G, Daini R, Martelli ML, Zoccolotti P (1999) Hierarchical organisation in perception of orientation. *Perception* 28: 965-979
- Streibel MJ, Barnes RD, Julness GD, Ebenholtz SM (1980) Determinants of the rod-and-frame effect: Role of organization and subjective contour. *Percept Psychophys* 27: 136-140
- Taylor JB, Kuchar JK (2000) Helmet-mounted display symbology for terrain avoidance during low-level maneuvers. *Intern J Aviat Psychol* 10: 155-168
- Teasdale N, Nougier V, Barraud PA, Bourdin C, Debu B, Poquin D, Raphel C (1999) Contribution of ankle, knee, and hip joints to the perception threshold for support surface rotation. *Percept Psychophys* 61: 615-624
- Witkin HA, Asch SE (1948) Studies in space orientation IV Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *J Exp Psychol* 38: 762-782