

RECHERCHES EMPIRIQUES
EMPIRICAL STUDIES

PERCEPTION DE LA VERTICALE AVEC UN CADRE VISUEL SOLIDAIRE DE
LA TÊTE : IMPLICATIONS POUR L'UTILISATION DES VISIOCASQUES

par F. MARS^{*}, L. BRINGOUX^{**}, C. CIAN^{***}, P.A. BARRAUD^{***},
C. RAPHEL^{***} ET J.L. VERCHER^{****}

SUMMARY

PERCEPTION OF THE VERTICAL WITH A HEAD-FIXED VISUAL FRAME: IMPLICATIONS FOR USING HEAD-MOUNTED DISPLAYS

Head-mounted displays are now extensively developed and tested to be used in enhanced reality environments. The technique consists in transmitting synthetic visual information to the user's eyes in such a way that virtual objects are superimposed on the real world. Some displays give the feeling of viewing a rectangular head-fixed virtual screen with clearly visible contours. In addition, head-mounted displays allow for the presentation of head-fixed visual information to the user and this may be an advantage in some applications, military aeronautics for instance. Presenting head-fixed visual information may not be trivial with regard to actual models of spatial orientation. This study addressed the question of potential disorienting effects associated with head-mounted displays by investigating the influence of a head-fixed visual frame on the perception of the vertical when the head or the whole body was tilted in the frontal plane. In a first experiment, subjects were instructed to indicate the vertical by rotating a visual rod that appeared at the centre of the frame whilst tilting the head in various positions. This performance was compared with the effect on the subjective vertical of a tilted earth-based visual frame without head tilts as well as with the effect of tilting the head without a frame. With the tilted frames, subjects set the rod in an intermediate direction between the gravitational vertical and the orientation of the frame. Errors were substantially larger with a head-fixed visual frame during head tilt than with a tilted earth-based frame. This difference cannot be attributed to the addition of a postural effect caused by the head being tilted. Moreover, continuous vision of the frame when its orientation changed improved performance only when the head and the frame were dissociated, i.e. with an earth-based frame. A second experiment investigated the effects of a head-fixed frame on the subjective vertical and on the voluntary control of head orientation when the whole body was tilted. The effect of a head-fixed frame was contrasted with the effect of a trunk-fixed frame. Results show that the head-fixed frame modified the head behaviour when subjects were instructed to align the head with the trunk. These errors contributed to an increase in the visual frame influence on the subjective vertical. Results of both experiments suggest that integrating visual information in the head-centric reference frame is crucial for spatial orientation. This property of the perceptual system may be relevant for the design and use of head-mounted displays.

Key words: Reference Frames, Spatial Orientation, Subjective Vertical, Head-Mounted Displays, Sensory Integration, Vision, Enhanced Reality

^{*} Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN) - Equipe PsyCoTec - Campus de l'École Centrale de Nantes 1, rue de la Noë - B.P. 92101 F-44321 NANTES CEDEX . E-mail :franckmars@net courrier.com

^{**} Université Joseph-Fourier - UPRES 597 – Sport et Performance Motrice – UFRAPS - BP 53 F-38041 Grenoble Cedex 9

^{***} Centre de Recherche du Service de Santé des Armées – Unité de Psychologie F-38702 LA TRONCHE

^{****} CNRS-Université de la Méditerranée - UMR 6152 - Mouvement et Perception – Faculté des Sciences du Sport CP 910 – 163, avenue de Luminy F-13288 Marseille Cedex 09

I. INTRODUCTION

Depuis l'avènement des ordinateurs à haute vitesse de calcul, la réalité augmentée (RA) s'est développée à une vitesse considérable et son utilisation dans le monde du travail donne lieu à de nombreuses recherches. Contrairement à la réalité virtuelle qui vise à immerger un individu dans un environnement artificiel en le coupant du monde extérieur, la RA permet à l'utilisateur de voir le monde réel, dont on modifie certaines caractéristiques en y surimposant des objets virtuels (Azuma, 1997). Autrement dit, la RA vise à enrichir le monde réel d'objets synthétiques qui coexistent avec le monde réel. Cette technique offre de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines d'application : entraînement et aide à la visualisation en chirurgie (Fuchs *et al.*, 1998), conception et entretien de machines complexes (Curtis, Mizell, Gruenbaum, & Janin, 1998), architecture (Webster, Feiner, MacIntyre, Massie, & Krueger, 1996), téléopération (Tharp, Hayati, & Phan, 1995), divertissement (Maes, 1995) et aviation (Cohen, Otakeno, Previc, & Ercoline, 2001).

Au cœur de nombreux systèmes de RA, on trouve des dispositifs appelés visiocasques (head-mounted display, selon la terminologie anglophone) dont le principe général est de présenter une image à chaque œil par l'intermédiaire de deux écrans miniatures (cathodiques ou à cristaux liquides). Pour obtenir une RA, deux solutions existent. La scène visuelle peut être filmée et présentée à l'utilisateur sous forme de vidéo que l'on enrichit d'images synthétiques. L'utilisateur est dans ce cas coupé du monde extérieur, même si l'image qui lui est présentée est en grande partie une copie du monde réel. Une autre solution consiste à utiliser des casques semi-transparents (see-through) qui permettent de projeter des objets virtuels en surimposition au monde réel. Si l'on souhaite présenter les objets virtuels de façon à ce qu'ils soient stables dans l'environnement, il est nécessaire de prendre en compte la position et l'orientation de tête dans l'espace. Les visiocasques sont par conséquent couplés à des systèmes de mesure qui permettent de compenser les mouvements de tête afin de stabiliser l'image dans le référentiel terrestre. Cependant, il est possible que l'utilisation de visiocasques mette l'utilisateur face à des informations visuelles qui restent fixes dans le référentiel de la tête.

Des informations visuelles solidaires de la tête peuvent être induites par les limites intrinsèques du visiocasque. En effet, ces dispositifs disposent d'un champ visuel limité qui varie selon les modèles (entre 25° et 100° d'angle). Certains systèmes offrent une fenêtre de visualisation en dehors de laquelle il n'est pas possible de voir. D'autres donnent la sensation de voir un moniteur informatique semi-transparent qui reste fixe par rapport à la tête. Or, les contours qui délimitent le champ de vision ou le moniteur virtuel sont souvent visibles et forment un cadre visuel fixe dans le référentiel tête. Un tel cas de figure est observé, par exemple, dans le prototype MARS (Mobile Augmented Reality System : Feiner, MacIntyre, Höllerer, & Webster, 1997 ; Höllerer, Feiner, Terauchi, Rashid, & Hallaway, 1999). Ce système permet de surimposer à un environnement connu, en l'occurrence le campus de l'Université de Columbia, des éléments hypermédias (noms des bâtiments, icônes qui peuvent être sélectionnées pour faire apparaître un historique du bâtiment sur une tablette graphique portée à la main, représentations virtuelles de bâtiments disparus...). Ces éléments sont stabilisés dans le référentiel terrestre. Dans le visiocasque apparaissent également des éléments fixes dans le référentiel tête : une barre de menu horizontale, un pointeur de direction, mais aussi les contours de l'écran virtuel.

Inclure des informations visuelles céphalocentrées peut également avoir des avantages dans certaines applications. C'est le cas dans le domaine de l'aéronautique militaire où les concepteurs ont intégré, dans les visiocasques des pilotes, des éléments de symbologie qui sont solidaires des mouvements de la tête. De cette façon, le pilote n'a plus besoin de quitter des yeux l'environnement externe pour se référer aux instruments de bord. L'apport principal

des visiocasques concerne à l'heure actuelle le système de visée et la perception de la situation tactique, mais les progrès technologiques font envisager aux concepteurs d'inclure d'autres indicateurs, y compris des indicateurs de l'attitude de l'avion (Cohen *et al.*, 2001 ; Ercoline, Self, & Matthews, 2002 ; Liggett & Gallimore, 2002). Ces indicateurs, puisque leur orientation est stable dans le référentiel géocentré, donneraient aux visiocasques le potentiel d'améliorer les capacités du pilote à s'orienter dans l'espace. Considérons maintenant l'exemple d'un concepteur de visiocasque 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 fixer dans le référentiel céphalocentré et à les disposer parallèlement à l'axe vertical de la tête, de chaque côté de la visière. Les éléments visuels pourraient alors former un cadre visuel subjectif, présenté en vision périphérique et solidaire des mouvements de la tête.

Quelle que soit l'application envisagée, inclure un cadre visuel attaché à la tête n'est pas neutre au regard des modèles théoriques de l'orientation spatiale. En effet, il est connu qu'un cadre visuel incliné peut influencer les comportements d'orientation, qu'il s'agisse du maintien de l'équilibre (Isableu, Ohlmann, Cremieux, & Amblard, 1997) ou d'une tâche d'estimation de la verticalité (Witkin & Asch, 1948), ce qu'on appelle classiquement des effets cadre. La déviation posturale ou l'effet sur l'estimation de la verticale est commise dans la direction de l'inclinaison du cadre visuel. Il a également été démontré que la désorientation induite par le cadre est susceptible d'être potentialisée par l'inclinaison de la tête (DiLorenzo & Rock, 1982). De plus, 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 proprioceptive 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 rétinocentrées 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 visiocasque face à une situation inhabituelle. En effet, lorsqu'il 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, puisque 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 de déterminer si des références visuelles fixes dans le référentiel tête peuvent influencer la perception de l'orientation spatiale et, le cas échéant, d'éclaircir les mécanismes sous-jacents. Pour cela, deux expériences ont étudié l'influence sur la verticale subjective d'un cadre visuel solidaire des mouvements de la tête. Indiquer la verticale subjective consiste à aligner un objet, en général une barre lumineuse, sur la direction perçue de la gravité. L'étude de la verticale subjective a été privilégiée dans la mesure où il s'agit d'un indicateur des processus d'intégration multisensorielle pour la perception dans l'espace. En effet, la verticale subjective est influencée par l'ensemble des

informations impliquées dans l'orientation spatiale (pour une revue, voir Howard, 1986). Cette tâche peut être considérée comme une lecture cognitive d'un modèle interne de la gravité, élaboré par le système nerveux pour l'orientation dans l'espace.

L'obtention d'un cadre incliné d'une amplitude identique à celle de la tête a été rendue possible par l'utilisation d'un visiocasque qui 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.

II. EXPERIENCE 1 : EFFETS D'UN CADRE VISUEL CEPHALOCENTRE SUR LA VERTICALE SUBJECTIVE LORS D'INCLINAISONS DE LA TETE

II.1. OBJECTIFS

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 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 évaluée dans le référentiel de 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.

II.2. METHODES

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° d'angle et d'une largeur de 2° 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 insistant 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).

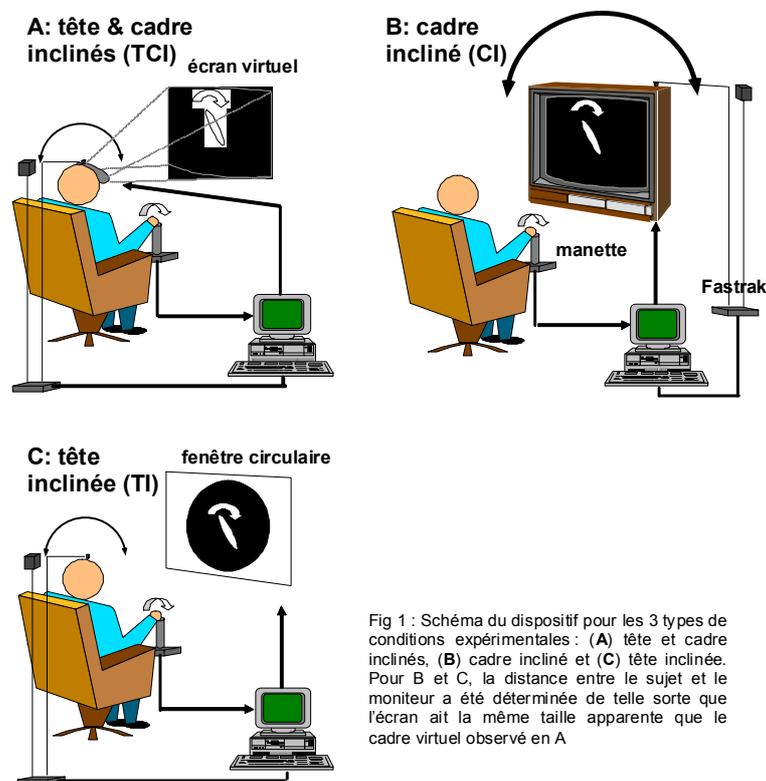


Fig 1 : Schéma du dispositif pour les 3 types de conditions expérimentales : (A) tête et cadre inclinés, (B) cadre incliné et (C) tête inclinée. Pour B et C, la distance entre le sujet et le moniteur a été déterminée de telle sorte que l'écran ait la même taille apparente que le cadre virtuel observé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

Fig.1 : Schéma du dispositif pour les trois 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 réglée de telle sorte que l'écran ait la même taille angulaire que l'écran virtuel présenté en (A). L'ensemble de l'expérience a été réalisé dans l'obscurité. Les seuls objets visibles étaient le contour de l'écran et la baguette.

Fig.1: Schema of the set-up for the three kinds of conditions: (A) the visual frame was integral to the head and subjects tilted their head at 40 different orientations, (B) an earth-based visual frame was tilted at various orientations while the head remained upright, (C) the head was tilted at various orientations with a circular (non-oriented) visual frame. In (B) and (C), the distance between the subject and the screen was adjusted so that the size of the screen was identical to the size of the virtual screen in (A). The experiment was carried out in darkness. The subject could only see the contour of the screen and the rod.

II.2.A. Conditions «tête et cadre inclinés» (TCI)

Dans les conditions TCI (Fig. 1A), le sujet portait 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.

Le sujet, équipé du casque vidéo, plaçait sa tête à diverses orientations dans le plan frontal. 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. De cette façon, les essais s'enchaînaient sans que les phases de maintien statique de la tête ne durent plus de temps que celui nécessaire à l'ajustement de la baguette lumineuse.

Quatre conditions TCI ont été réalisées. Dans deux d'entre elles, le sujet bougeait la tête volontairement et choisissait lui-même l'amplitude de l'inclinaison. Auparavant, il avait été entraîné à exécuter des mouvements d'inclinaison de la tête, en étant attentif à n'y associer ni rotation de la tête vers la droite ou vers la gauche, ni mouvement des épaules ou du tronc. Par conséquent, les inclinaisons de plus de 40° n'étaient pas demandées. Le sujet avait 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. Le sujet avait pour consigne de ne pas résister au mouvement imposé par l'expérimentateur et, à l'opposé, de ne pas accompagner le mouvement. L'expérimentateur a pris soin de reproduire aussi adéquatement que possible les caractéristiques (vitesse, accélération) d'un mouvement naturel. Ainsi, que les mouvements de la tête aient été effectués activement ou passivement, l'estimation de la verticale était obtenue pour 40 orientations différentes, entre 40° d'inclinaison entre 40° dans le sens anti-horaire et 40° d'inclinaison dans le sens horaire.

Pour chaque type de mouvement (actif et passif), deux conditions ont été réalisées. Dans l'une d'elle, le sujet fermait les yeux pendant le mouvement. Il n'avait donc la vision du cadre visuel que lorsque l'orientation de la tête était stabilisée, c'est-à-dire pendant le temps nécessaire à estimer la direction de la verticale. Dans l'autre condition, le sujet gardait les yeux ouverts tout au long de la passation. Il voyait donc le cadre bouger avec sa tête.

II.2.B. 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 (Fig. 1B). 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 obscur 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. Pour chaque essai, une orientation était choisie au hasard, de telle sorte à ce que les 40 essais se répartissent entre 40° dans le sens anti-horaire et 40° dans le sens horaire. Dans l'une des conditions, le sujet avait pour consigne de fermer les yeux entre les essais et

ne voyait le cadre visuel que lors des estimations de la verticale. Dans l'autre condition, il gardait les yeux ouverts et observait le cadre pendant ses rotations.

II.2.C. Conditions «tête inclinée» (TI)

Dans les conditions TI (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° d'angle, était disposé devant le moniteur. La baguette apparaissait au centre de la fenêtre circulaire.

Deux conditions TI ont été réalisées. Suivant la même procédure que pour les conditions TCI, la tête du sujet était positionnée dans 40 orientations différentes, soit par un mouvement volontaire du sujet (mouvements actifs), soit par un mouvement imposé par l'expérimentateur (mouvements passifs). L'objectif de ces conditions étant d'évaluer l'influence de l'inclinaison de la tête *per se*, le sujet fermait les yeux pendant les mouvements de tête.

A la fin de l'expérience, les sujets étaient invités au cours d'un entretien libre à commenter les tâches effectuées. En particulier, il était demandé au sujet de s'exprimer au sujet de la difficulté à réaliser la tâche dans les différentes conditions expérimentales. L'expérimentateur a également cherché à s'assurer que les sujets avaient bien réalisé la tâche en première intention, sans mettre en jeu de stratégie particulière.

II.3. ANALYSE DES DONNEES

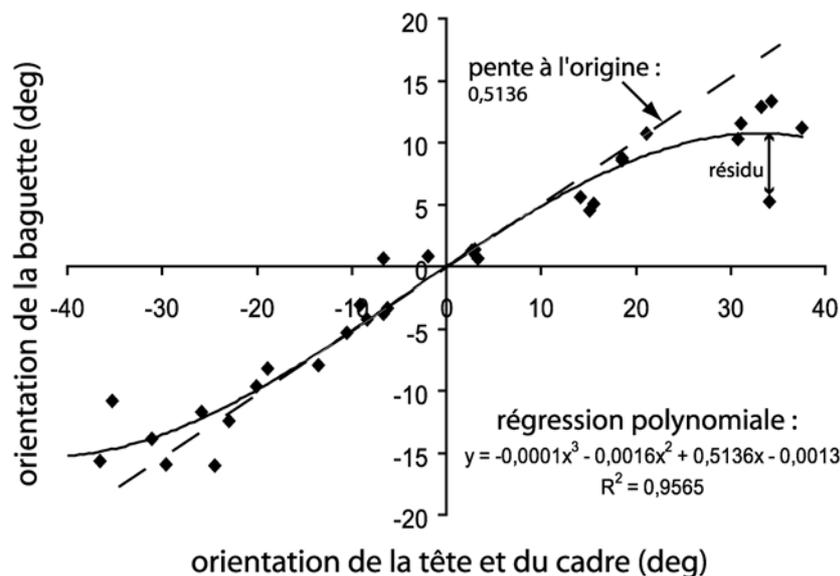


Fig. 2 : Courbe de réponse typique d'un sujet dans une des conditions TCI. Les réponses obtenues à chaque essai sont représentées, ainsi que la courbe de régression (polynôme de 3ème ordre). L'équation correspondant à la courbe de régression et le coefficient de détermination R^2 sont indiqués.

Fig. 2. Typical performance of one selected subject with the head-fixed visual frame (TCI condition). All trials are displayed together with the regression function. The equation of the regression curve (third order polynomial) and the corresponding R^2 coefficient are indicated.

Par convention, une inclinaison de la tête ou une erreur dans l'estimation de la verticale se voient assigner une valeur positive si elles sont dans le sens horaire et, négative, si elles sont dans le sens anti-horaire. La figure 2 montre les réponses données par un sujet dans l'une des conditions TCI. Cet exemple est représentatif du caractère non-linéaire des comportements observés dans cette expérience, quelle que soit la condition expérimentale. 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. Cette variabilité interindividuelle est présente dans toutes les conditions expérimentales. Par conséquent, afin de résumer au mieux toutes les données individuelles avec la même méthode, nous avons réalisé des régressions polynomiales de 3ème ordre. De cette façon, chaque courbe de réponse peut être modélisée par l'équation suivante :

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

où y est l'estimation prédite de la verticale et x l'orientation de la tête et/ou du cadre. La composante de 3ème ordre de l'équation (a) reflète la tendance du sujet à commettre une erreur maximale avant d'atteindre l'inclinaison maximale de la tête et/ou du cadre. Le second paramètre (b) teste l'asymétrie de la courbe. Le troisième (c) est la pente de la courbe à l'origine. Enfin, la constante (d) représente l'erreur commise par le sujet lorsque sa tête était droite.

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. De plus, la variabilité intra-individuelle a été évaluée en calculant la moyenne des résidus absolus (les valeurs absolues des différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par la courbe de régression pour le même angle d'inclinaison). Dans la section suivante, les moyennes de groupes des pentes et des résidus absolus moyens sont présentées avec les erreurs-types de la moyenne.

II.4. RESULTATS

La moyenne des pentes à l'origine obtenues lorsque les mouvements de tête étaient réalisés activement ne diffère pas de celle obtenue avec des mouvements passifs. Cette observation est valable dans les conditions TCI avec les yeux ouverts (actif : pente=0,31±0,07 ; passif : pente=0,28±0,08 ; $t(11)=0,64$; $p=.53$), dans les conditions TCI avec les yeux fermés (actif : pente=0,26±0,09 ; passif : pente=0,30±0,10 ; $t(11)=-0,90$; $p=.39$) et dans les conditions TI (actif : pente=-0,01±0,04 ; passif : pente=-0,02±0,08 ; $t(11)=0,10$; $p=.92$). Par conséquent, les données obtenues avec mouvements actifs et mouvements passifs ont été moyennées et les analyses ultérieures ont été réalisées sur ces moyennes.

La figure 3 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 (pente=0,29±0,08) et fermés (pente=0,28±0,09). Dans les conditions CI, l'erreur de 17% commise avec les yeux fermés (pente=0,17±0,04) chute à 8% lorsque les sujets ont la possibilité d'observer les rotations du cadre visuel (pente=0,08±0,03). Enfin,

incliner la tête en l'absence de référence visuelle ne produit pas d'effet significatif sur l'estimation de la verticale (pente= $-0,01\pm 0,06$).

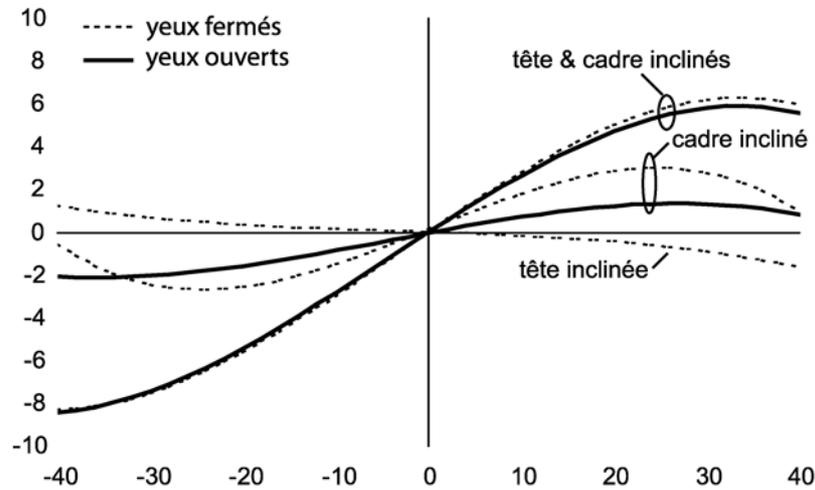


Fig. 3 : Estimation moyenne de la verticale (en degrés, 0° correspondant à la verticale gravitaire) en fonction de l'angle d'inclinaison de la tête et/ou du cadre dans toutes les conditions. Les courbes ont été obtenues en moyennant pour chaque angulation (pas de 2°), les réponses prédites par les régressions polynomiales (voir Fig.2).

Fig. 3: Average estimation of the vertical (in degrees, 0° corresponding to the gravitational vertical) as a function of the angle of tilt of the head and/or the frame in all conditions. The larger effects were observed with the head-fixed visual frame and were similar with or without vision of the frame during head rotations. The earth-based visual frame yielded a significant error in the same direction, but of a smaller magnitude. In contrast to the head-fixed visual frame, vision of the frame improved the performance. Tilting the head without a visual frame did not significantly affect vertical settings. The curves correspond to the predicted responses, based on polynomial regression analyses (see Fig. 2), averaged across subjects.

Une analyse de variance à mesures répétées 2 (cadre fixe par rapport à la tête / cadre dissocié de la tête) x 2 (yeux fermés / yeux ouverts) réalisée sur les pentes des courbes met en évidence un effet principal du type de cadre [$F(1;11)=5,96$; $p=.03$], une absence d'effet principal de la vision du cadre pendant la rotation [$F(1;11)=4,15$; $p=.07$] et une interaction significative entre les deux variables [$F(1;11)=12,76$; $p=.002$]. 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 [$p=.50$].

Afin de tester l'hypothèse d'additivité des effets visuels et posturaux, nous avons ajouté les valeurs observées en TI aux valeurs observées en CI-yeux ouverts d'une part, et aux valeurs observées en CI-yeux fermés d'autre part, pour comparer chacun de ces calculs aux conditions TCI correspondantes. Dans les deux cas, la moyenne des pentes observées dans les conditions TCI est plus grande que l'addition des valeurs obtenues en CI et en TI. Cet effet est significatif avec les yeux fermés ($t(11)=2,96$; $p=.01$) et encore plus avec les yeux ouverts ($t(11)=6,65$; $p<.0001$).

Les résidus absolus moyens diffèrent selon les conditions expérimentales [$F(2 ;22)=9,99$; $p<.0001$]. Les analyses post-hoc révèlent que la variabilité intraindividuelle est plus faible dans les conditions CI que dans les conditions TCI ($p=.0008$) et que dans les conditions TI ($p=.009$). La différence entre les deux dernières conditions n'est pas significative ($p=.15$). 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 4 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 dans les conditions TCI.

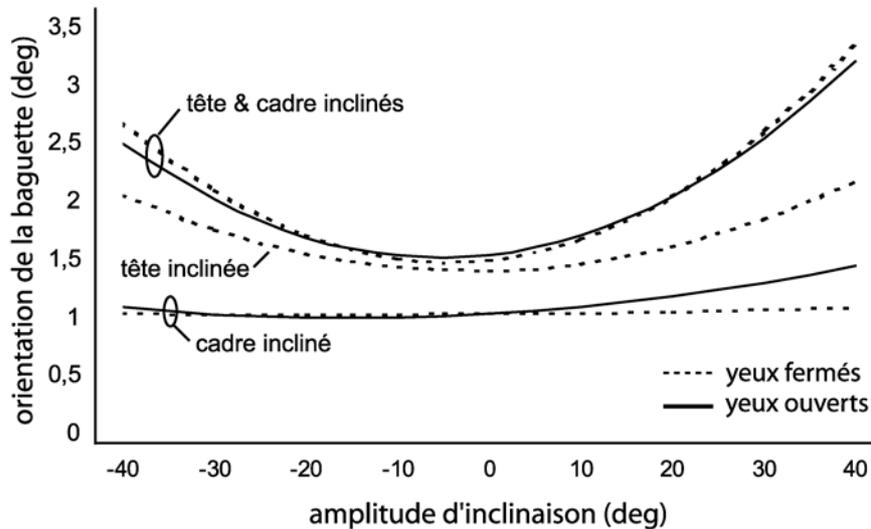


Fig. 4 : Distribution des résidus absolus moyens (variabilité de la réponse) en fonction de l'inclinaison dans toutes les conditions.

Fig. 4: Distribution of absolute residuals (response variability) as a function of the degree of tilt in all conditions. Variability increased with the degree of head tilt, especially with the head-fixed visual frame. In contrast, the degree of tilt of the earth-based visual frame did not significantly affect response variability.

II.5. 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 lorsqu'il change 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.

II.5.A. *Réfutation de l'hypothèse d'additivité des effets visuels et posturaux*

Dans la grande majorité des expériences portant sur l'orientation spatiale, 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, Diener, & Brandt, 1974 ; Witkin & 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, Poquin et Ohlmann (1998) 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 termes de combinaisons non-linéaires (Mergner, Huber, & Becker, 1997 ; Mergner, Nasios, & Anastasopoulos, 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, Nougier, Barraud, Bourdin, Debu, Poquin, & Raphel, 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.

II.5.B. *La désorientation spatiale : un phénomène à deux visages*

La variabilité de la réponse des sujets (quantifiée par la méthode des résidus) 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. En effet, ils 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. 3), alors que la variabilité (et sa contrepartie subjective) continue à augmenter avec l'amplitude de l'inclinaison de la tête (Fig. 4).

II.5.C. *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.

III. EXPERIENCE 2 : EFFETS D'UN CADRE VISUEL CEPHALOCENTRE SUR LA REORIENTATION DE LA TETE ET LA VERTICALE SUBJECTIVE LORS D'INCLINAISONS DU CORPS ENTIER

III.1. OBJECTIFS

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 sur 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 référentiel céphalocentré relativement au cadre. 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 davantage 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, Yardley, Bertholon, Pollak, Rudge, Gresty, & Bronstein, 2001 ; Isableu *et al.*, 1997 ; Sarès, Prieur, Bourdin, Gauthier, Blouin., & Vercher, 2002). 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, Cremieux Marchand, & Carblanc, 1985 ; Gresty & Bronstein, 1992).

Dans l'expérience décrite ici, 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 sera moins précis dans cette condition. En outre, 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.

III.2. METHODES

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 sur un siège baquet fixé sur une plate-forme verticale (Fig. 5). 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.

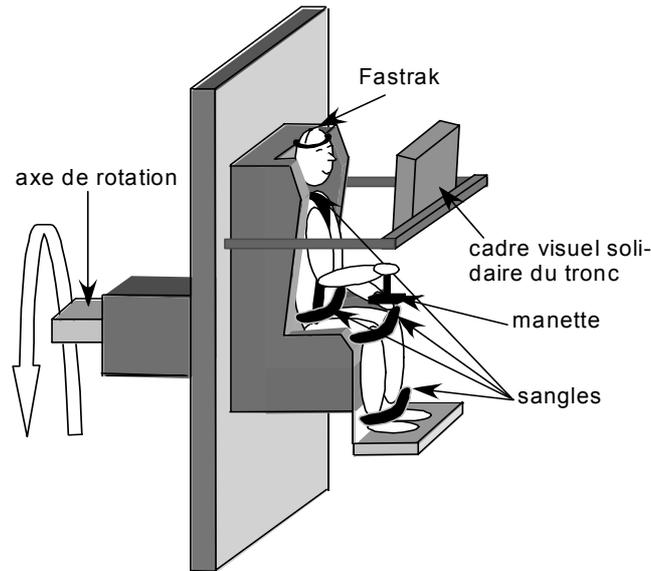


Fig. 5 : Schéma du dispositif expérimental dans la condition où le cadre visuel est solidaire du tronc (tête mobile). Dans les conditions «tête fixe», la tête est maintenue immobile dans l'axe du corps par deux presses latérales.

Fig. 5: Schema of the set-up where the visual frame was integral to the trunk and the head was not restrained. The platform was tilted in the frontal plane and subjects were instructed to keep the head in alignment with the trunk during the rotation and while estimating the vertical. In another condition, the head was kept in alignment with the trunk by means of two lateral pressing devices.

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 solidaire des mouvements de la tête, soit sur un écran placé fixe face au sujet sur la plateforme (Fig. 5). 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 obscur 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.

Les sujets ont passé 30 conditions expérimentales correspondant au plan d'expérience suivant : $I_5 * C_3 * M_2$, où I est le degré d'inclinaison de la plate-forme, C le type de cadre visuel présenté et M la condition de mobilité de la tête. Pour chacune des 30 conditions, 5 essais étaient réalisés. Les conditions étaient présentées dans un ordre pseudo-aléatoire.

III.2.A. Inclinaisons du corps

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

III.2.B. *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).

III.2.C. *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 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 tronc et estimer la verticale. Avant le début de l'expérience, l'expérimentateur entraînait le sujet à effectuer ces tâches et s'assurait en particulier que les mouvements de tête soient globalement similaires pour tous les sujets (quantité de mouvements, distribution homogène dans toutes les directions de l'espace).

III.3. RESULTATS

La figure 6 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 valeurs de références obtenues sans inclinaison corporelle ont été retranchées aux données obtenues lorsque le corps était incliné. Les erreurs d'appréciation de la verticale étaient alors positives si elles étaient commises dans le sens de l'inclinaison du corps (et du cadre) et négatives dans le sens opposé. Par conséquent, le plan d'analyse est le suivant : $A_3 * D_2 * C_3 * M_2$, où A est l'amplitude de l'inclinaison, D la direction de l'inclinaison, C le type de cadre visuel présenté et M la condition de mobilité de la tête.

En ce qui concerne les effets principaux, l'analyse révèle un effet significatif du type de cadre visuel [$F(2 ; 16) = 15,96 ; p = .0002$], pas d'effet de la mobilité de la tête [$F(1 ; 8) = 0,43 ; p = .53$], une tendance non-significative à commettre des erreurs plus importantes lorsque le corps était incliné à droite plutôt qu'à gauche [$F(1 ; 8) = 5,15 ; p = .06$] et un effet significatif de l'amplitude d'inclinaison [$F(1 ; 8) = 37,73 ; p = .0003$]. 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 [$F(2 ; 16) = 4,72 ; p = .02$]. 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 ($p = .04$). En revanche, la réduction des erreurs observées lorsque la tête est libre n'est significative ni dans la condition CSP ($p = .81$), ni dans la condition CNO ($p = .79$). Si l'on considère 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».

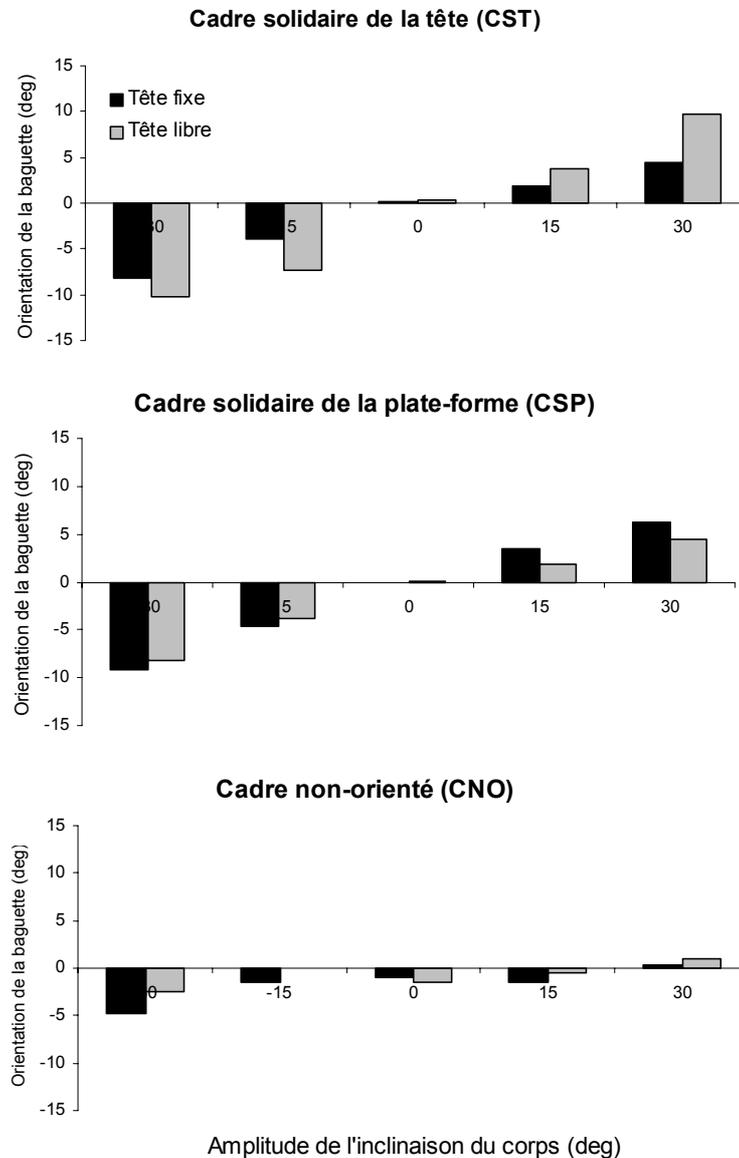


Fig. 6 : Estimation de la verticale en fonction de l'inclinaison du corps, du type de cadre visuel et de la mobilité de la tête. Dans la condition CST, bouger la tête avant l'estimation augmente l'erreur, commise en direction de l'inclinaison du corps et du cadre. Dans la condition CSP, on observe une légère amélioration, non significative, de la performance, lorsque le mouvement de la tête est permis. Les valeurs positives et négatives représentent des inclinaisons respectivement dans le sens horaire et dans le sens anti-horaire.

Fig. 6: Vertical settings as a function of the degree of body tilt (15° or 30°), of the kind of visual frame (from top to bottom: head-fixed rectangle frame, trunk-fixed rectangle frame, circular frame) and of head mobility (head restrained in black, head free in grey). With the head-fixed visual frame, moving the head before the vertical settings increased the error. With the trunk-fixed frame, moving the head slightly reduced the error, but the effect was not significant. Positive and negative values represent clockwise and counterclockwise tilts, respectively.

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. 7) et en comparant ces moyennes à zéro. On observe alors que la tête est significativement déviée dans le sens de l'inclinaison de la plate-forme dans la condition CST ($t(1,8)=2,73$; $p=.03$), mais pas dans la condition CSP ($t(1,8)=0,72$; $p=.49$), ni dans la condition CNO ($t(1,8)=-0,06$; $p=.96$).

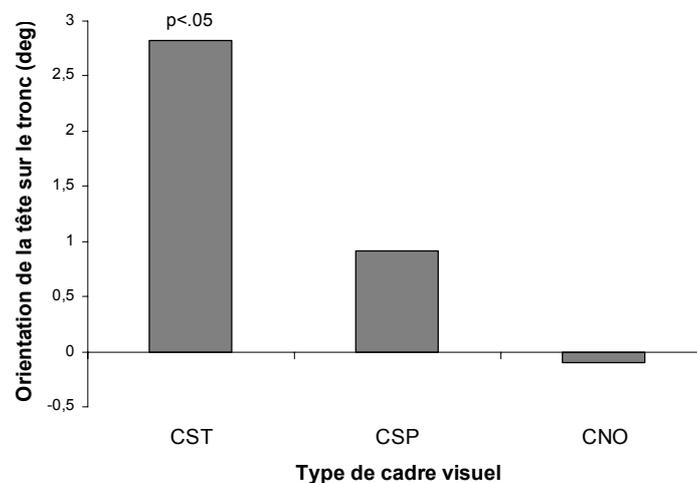


Fig. 7 : Erreur moyenne de repositionnement de la tête en fonction des trois types de cadres visuels étudiés. Une valeur positive représente une erreur dans le sens de l'inclinaison du corps. Seule l'erreur commise avec le cadre solidaire de la tête est significativement différente de zéro.

Fig. 7: Average error of head reorientation as a function of the kind of visual frame (from left to right: head-fixed, trunk-fixed, circular). Positive values represent an error in the direction of body tilt. With the head-fixed frame only, the error significantly differed from zero.

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. 8). Elles montrent que les deux variables ne sont significativement corrélées que dans la condition CST ($r=0,64$; $p<.001$). La régression appliquée sur ces données révèle que l'erreur supplémentaire observée en CST-«tête libre» correspond à 71% de l'inclinaison de la tête.

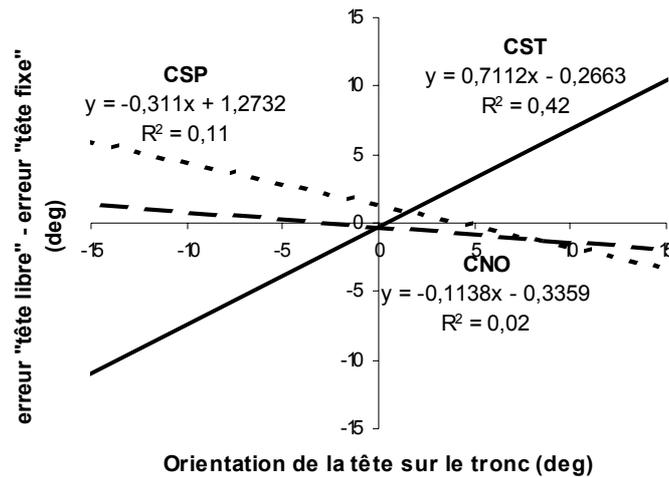


Fig. 8 : Différences d'estimation de la verticale entre les conditions «tête libre» et «tête fixe» en fonction des erreurs de repositionnement de la tête. La corrélation n'est significative que lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête.

Fig. 8: Difference between vertical settings made in the "head free" conditions and the "head fixed" conditions as a function of errors in head reorientation. The correlation is significant only when using the head-fixed visual frame.

III.4. 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.

III.4.A. Ancrage des références visuelles et réorientation de la tête

La stabilisation de la tête dans l'espace aurait deux fonctions primordiales (Massion, 1994 ; Pozzo, Berthoz, & Lefort, 1989). 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 au réflexe cervico-collique 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, Kearney, Wereley, & Peterson, 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; Sarès *et al.*, 2002). Sarès *et al.* (2002) 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, Assaiante, Vaugoyeau, Baroni, Ferrigno et Pedotti (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.

III.4. *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. 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 n'a été observée que chez trois sujets.

IV. CONCLUSION

Il a déjà été proposé que la tête serve d'origine à un référentiel important pour les jugements d'orientation (Friedman & Hall, 1996 ; Guerraz *et al.*, 1998 ; Spidalieri & 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 que le traitement de l'information visuelle dans le référentiel de la tête est crucial pour le maintien d'une perception constante et adéquate de l'orientation spatiale. Par conséquent, inclure des références visuelles solidaires des mouvements de la tête dans les visiocasques n'est pas une démarche anodine au regard des mécanismes fondamentaux du traitement de l'information sensorielle. Bien entendu, la prudence s'impose en ce qui concerne l'extrapolation de nos résultats à une utilisation particulière des visiocasques. Nous nous sommes volontairement placés dans des conditions de laboratoire qui induisent de forts épisodes de désorientation spatiale, afin de pouvoir mettre en évidence les effets spécifiques de références visuelles céphalocentrées. De plus, une modification de la perception de la verticale, tout en étant un effet représentatif des processus d'intégration multisensorielle, ne peut pas être extrapolée sans une certaine prudence à d'autres tâches d'orientation dans l'espace. Cependant, les dispositifs de RA mobiles sont susceptibles de présenter un cadre visuel céphalocentré plus prégnant encore que celui utilisé dans notre expérience. C'est le cas du prototype MARS développé par Höllerer *et al.* qui inclut les contours d'un écran virtuel et une barre de menu horizontale (cf. introduction). On peut s'interroger sur le potentiel qu'auraient ces références visuelles de perturber l'orientation spatiale de l'utilisateur, avec pour conséquences des troubles ponctuels du maintien de l'équilibre.

En ce qui concerne les visiocasques utilisés en aéronautique, nos résultats laissent penser qu'il n'est peut-être pas judicieux d'aligner en périphérie du champ de vision des

éléments de symbologie dont l'orientation est solidaire de celle de la tête. Ces éléments de symbologie formeraient alors un cadre visuel subjectif qui, même partiel, pourrait influencer sur l'orientation spatiale du pilote. Ceci n'est valable que lors de vols sans visibilité, durant lesquels des épisodes de désorientation spatiale sont fréquemment rapportés, en raison de l'absence de repères visuels externes. Les informations visuelles céphalocentrées ne doivent pas nécessairement former un cadre complet pour être source de désorientation, puisqu'il a été montré qu'un cadre incomplet ou même des contours subjectifs peuvent induire des effets similaires, quoique moins importants (Antonucci, Fanzon, Spinelli, & Zoccolotti, 1995 ; Spinelli, Antonucci, Daini, Martelli, & Zoccolotti, 1999 ; Streibel, Barnes, Julness, & Ebenholtz, 1980). Là encore, il convient d'être prudent sur la généralisation de nos résultats à une application particulière comme la conception des visiocasques en aéronautique. Nos travaux expérimentaux ne permettent en aucun cas d'évaluer l'intensité ou les risques d'occurrence des épisodes de désorientation spatiale que des références visuelles céphalocentrées contribueraient à induire. Ils ne portent que sur la mise en évidence des mécanismes selon lesquels les visiocasques pourraient contribuer au phénomène de désorientation spatiale, si la symbologie choisie ne respecte pas les caractéristiques fondamentales du traitement de l'information sensorielle. Selon Previc (2000), cette démarche est essentielle dans le processus de conception des visiocasques, afin de lutter contre la désorientation spatiale, source importante d'accidents dans l'aviation de combat.

Enfin, les visiocasques sont de plus en plus utilisés comme des outils pour la recherche fondamentale en psychologie. Les environnements immersifs ou semi-immersifs permettent de manipuler à volonté les propriétés de l'environnement, ce qui offre de nombreuses perspectives de recherche, en particulier dans le domaine de la perception et de l'intégration sensori-motrices. Ce type de méthode a cependant un certain nombre d'inconvénients (Loomis, Blascovich, & Beall, 1999). La limitation du champ visuel induit par les visiocasques en est un, dans la mesure où elle restreint l'immersion du sujet. Nos travaux suggèrent que le cadre visuel formé par les contours de la fenêtre ouverte sur le monde virtuel peut également influencer les tâches nécessitant le maintien d'une perception correcte de l'orientation dans l'espace.

BIBLIOGRAPHIE

- 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. *Experimental Brain Research*, *137*, 170-179.
- Amblard, B., Cremieux, J., Marchand, A.R., & Carblanc, A. (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. *Experimental Brain Research*, *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.
- Azuma, R.T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *6*, 355-386.
- Cohen, D., Otakeno, S., Previc, F.H., & Ercoline, W.R. (2001). Effect of "inside-out" and "outside-in" attitude displays on off-axis tracking in pilots and nonpilots. *Aviation Space & Environmental Medicine*, *72*, 170-176.
- Curtis, D., Mizell, D., Gruenbaum, P., & Janin, A. (1998). Several Devils in the Details: Making an AR App Work in the Airplane Factory. In R. Behringer, G. Klinker, & D. Mizell (Eds.), *Augmented Reality: Placing Artificial Objects in Real Scenes* (pp. 47-60). Natick, MA: A K Peters, Ltd.
- Dichgans, J., Diener, H.C., & Brandt, T. (1974). Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta Otolaryngologica*, *78*, 391-398.
- DiLorenzo, J.R., & Rock, I. (1982). The rod-and-frame effect as a function of the righting of the frame. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, *8*, 536-546.

- Ercoline, W.R., Self, B.P., & Matthews, R.S. (2002). Effects of three helmet-mounted display symbologies on unusual attitude recognition and recovery. *Aviation Space & Environmental Medicine*, *73*, 1053-1058.
- Feiner, S., MacIntyre, B., Höllerer, T., & Webster, A. (1997) A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. *Personal Technologies*, *1*, 208-217.
- Friedman, A., & Hall, L.D. (1996). The importance of being upright: use of environmental and viewer-centered reference frames in shape discriminations of novel three-dimensional objects. *Memory and Cognition*, *24*, 285-295.
- Fuchs, H., Livingston, M.A., Raskar, R., Colucci, D., Keller, K., State, A., Crawford, J.R., Rademacher, P., Drake, S.H., & Meyer, A.A. (1998). Augmented Reality Visualization for Laparoscopic Surgery. Paper presented at the *First International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Cambridge, MA, Oct.
- Gresty, M.A., & Bronstein, A.M. (1992). Visually controlled spatial stabilisation of the human head: compensation for the eye's limited ability to roll. *Neuroscience Letters*, *140*, 63-66.
- Guerraz, M., Poquin, D., & Ohlmann, T. (1998). The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Perception & Psychophysics*, *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.
- Guitton, D., Kearney, R.E., Wereley, N., & Peterson, B.W. (1986). Visual, vestibular and voluntary contributions to human head stabilization. *Experimental Brain Research*, *64*, 59-69.
- Höllerer, T., Feiner, S., Terauchi, T., Rashid, G., & Hallaway, D. (1999). Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System. *Computers and Graphics*, *23*, 779-785.
- Howard, I.P. (1986). The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In K.R. Boff, L.K. Kaufman, & J.P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance Vol I* (pp. 18.1-18.62). New York, NY: Wiley and Sons.
- Howard, I.P. (1997). Interactions within and between the spatial senses. *Journal of Vestibular Research*, *7*, 311-345.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Experimental Brain Research*, *114*, 584-589.
- Liggett, K.K., & Gallimore, J.J. (2002). An analysis of control reversal errors during unusual attitude recoveries using helmet-mounted display symbology. *Aviation Space and Environmental Medicine*, *73*, 102-111.
- Loomis, J.M., Blascovich, J.J., & Beall, A.C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavioral Research, Methods, Instruments and Computers*, *31*, 557-564.
- Maes, P. (1995) Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents. *Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents. Communications of the ACM*, *38*, 108-114.
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, *4*, 877-887.
- Mergner, T., Huber, W., Becker, W. (1997). Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. *Journal of Vestibular Research*, *7*, 347-367.
- Mergner, T., Nasios, G., & Anastopoulos, 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 Research Reviews*, *28*, 118-135.
- Pozzo, T., Berthoz, A., & Lefort, L. (1989). Head kinematic during various motor tasks in humans. *Progress in Brain Research*, *80*, 377-383.
- Previc, F.H. (2000). Neuropsychological guidelines for aircraft control stations. *IEEE Engineering Medicine and Biology Magazine* *19*, 81-88.
- Sarès, F., Prieur, J.M., Bourdin, C., Gauthier, G.M., Blouin, J., & Vercher, J.L. (2002). Peripheral visual information influence head posture during gravitoinertial changes. *Current Psychology of Cognition*, *21*, 455-477.
- 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, M.L., & Zoccolotti, P. (1999). Hierarchical organisation in perception of orientation. *Perception*, *28*, 965-979.
- Streibel, M.J., Barnes, R.D., Julness, G.D., & Ebenholtz, S.M. (1980). Determinants of the rod-and-frame effect: Role of organization and subjective contour. *Perception & Psychophysics*, *27*, 136-140.
- Teasdale, N., Nougier, V., Barraud, P.A., Bourdin, C., Debu, B., Poquin, D., & Raphel, C. (1999). Contribution of ankle, knee, and hip joints to the perception threshold for support surface rotation. *Perception & Psychophysics*, *61*, 615-624.

- Tharp, G.K., Hayati, S., & Phan, L. (1995) Virtual window telepresence system for telerobotic inspection. In G.K. Tharp, S. Hayati, & L. Phan (Eds.) *Proceedings of SPIE, Volume 2351* (pp. 366-373). Bellingham, WA: SPIE Press.
- Webster, A., Feiner, S., MacIntyre, B., Massie, W., & Krueger, T. (1996). Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. Paper presented at the *ASCE Third Congress on Computing in Civil Engineering*. Anaheim, CA: Juin.
- Witkin, H.A. & Asch, S.E. (1948). Studies in space orientation IV Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 762-782.

RÉSUMÉ :

Les travaux présentés visent à déterminer comment la présence de références visuelles fixes dans le référentiel de la tête peut influencer la perception de l'orientation spatiale. Une première expérience étudie l'influence d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale subjective, lors d'inclinaison de la tête. Une seconde expérience s'intéresse aux effets d'un tel cadre visuel sur la verticale subjective et sur la performance dans une tâche de réorientation de la tête lors d'inclinaisons du corps entier. 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'un cadre visuel céphalocentré tel qu'on peut le trouver dans un visiocasque, peut contribuer à désorienter l'utilisateur, en particulier dans les environnements de réalité augmentée.

Mots-clés : Référentiels spatiaux, Orientation spatiale, Verticale subjective, Visiocasque, Intégration sensorielle, Vision, Réalité augmentée

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du financement du CNRS et de Dassault Aviation. Ils ont été présentés préalablement au symposium organisé par la section Facteurs Humain et Médecine de l'Organisation pour la Recherche et la Technologie (RTO) de l'OTAN, du 15 au 17 Avril 2002.