

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : LA PERCEPTION SPATIALE.....	3
1.1. LA PERCEPTION DIRECTE	5
1.1.1. <i>L'environnement comme opportunité d'action</i>	5
1.1.2. <i>La notion d'invariants perceptifs</i>	6
1.1.3. <i>La taille de mon corps comme référence.....</i>	7
<i>Franchissement latéral.....</i>	7
<i>Franchissement vertical dynamique.....</i>	7
<i>Franchissement vertical statique.....</i>	8
1.1.4. <i>Des possibilités d'action référencées au niveau des yeux</i>	9
<i>Dans l'estimation des distances</i>	9
<i>Dans l'estimation de la hauteur et la taille relative des objets</i>	10
<i>Pour percevoir une affordance.....</i>	10
1.1.5. <i>L'affordance spécifiée par un invariant multimodal ?</i>	11
1.1.6. <i>Manipulation du contexte postural</i>	12
<i>Différentes configurations posturales pour différents points d'observation</i>	12
<i>Différentes configurations posturales pour un même point d'observation</i>	14
1.2. UNE REPRESENTATION CONSTRUISTE DE L'ESPACE.....	14
1.2.1. <i>Les référentiels spatiaux</i>	15
<i>Des espaces stables et définis.....</i>	15
<i>Des référentiels multiples.....</i>	16
1.2.2. <i>Plusieurs types de références spatiales</i>	17
<i>Des repères de l'environnement contextuel comme référence</i>	17
<i>Des invariants terrestres comme référence</i>	17
<i>Mon corps comme référence</i>	18
1.2.3. <i>Références physiques versus références perçues</i>	19
1.2.4. <i>Des références mixtes et ambiguës à l'origine d'erreurs perceptives.....</i>	20
<i>La verticale gravitaire potentiellement confondue avec l'axe Z</i>	20
<i>L'horizon visuel potentiellement confondu avec le plan transverse à la tête</i>	20
1.2.5. <i>La dissociation des référentiels spatiaux comme paradigme d'étude</i>	22
CHAPITRE 2 : INFLUENCES POSTURALES	23
2.1. CONSEQUENCES DES INCLINAISONS CORPORELLES	24
2.1.1. <i>Inclinaisons corporelles en roulis et estimation de la verticale visuelle</i>	24
<i>Mise en évidence des effets Aubert et Müller</i>	24
2.1.2. <i>Inclinaisons corporelles en tangage et estimation de l'horizon visuel.....</i>	26
<i>Équivalence de l'effet Aubert</i>	26
<i>Répercussions dans l'estimation du franchissement d'obstacles hauts.....</i>	28
2.1.3. <i>Influences segmentaires</i>	30
2.2. INFLUENCE DE LA CENTRIFUGATION	31
2.2.1. <i>Cabine non pendulaire</i>	31
2.2.2. <i>Cabine pendulaire</i>	33
2.3. ORIGINE DES EFFETS D'INCLINAISONS CORPORELLES	33
2.3.1. <i>Des erreurs de jugements géocentriques résultant d'une mauvaise estimation de l'orientation du corps ?</i>	33
<i>La perception effective de l'orientation du corps dans l'espace</i>	36
<i>Des processus sériels ? Une hypothèse remise en cause.....</i>	38

2.3.2. Une attraction égocentrale dans une direction définie par l'orientation longitudinale corporelle ?	38
Le vecteur idiotropique de Mittelstaedt.....	39
Une interaction entre référentiels spatiaux.....	40
CHAPITRE 3 : INFLUENCES VISUELLES	42
3.1. EFFET D'INCLINAISON DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL.....	43
3.1.1. Mise en évidence de perturbations visuelles	43
3.1.2. Paradigmes expérimentaux	44
Le « Rod and frame test » pour l'estimation de la verticale visuelle	44
La chambre inclinée pour l'estimation de l'horizon visuel	46
3.1.3. Effet d'un enrichissement structurel de l'espace allocentré	47
Nombre et orientation des lignes	47
Taille du cadre et champ visuel.....	48
Influence allocentrale en environnement naturel	49
3.2. EFFET DE LA POLARITE VISUELLE	50
3.2.1. Etude de la polarité visuelle sur la VVS.....	51
En chambre inclinée réelle.....	51
En environnement immersif.....	52
3.2.2. Etude de la polarité visuelle sur l' HVS	53
3.2.3. D'autres aspects cognitifs de la polarité visuelle	54
Les propriétés orientationnelles de l'objet polaire	54
La polarité lumineuse.....	55
L'orientation préférentielle des objets	57
3.3. EFFET DU MOUVEMENT VISUEL.....	57
3.3.1. Effet d'un mouvement visuel en rotation sur la VVS.....	58
3.3.2. Effet d'un mouvement visuel en translation sur l' HVS	60
CHAPITRE 4 : OBJECTIFS ET HYPOTHESES.....	63
CHAPITRE 5 : METHODOLOGIE GENERALE	67
5.1. LES OUTILS EXPERIMENTAUX	67
5.1.1. La chaise inclinable en tangage.....	67
Inclinaison du corps en tangage	67
Manipulation de la configuration posturale.....	68
Système de sécurité	68
5.1.2. La barre laser et le galvanomètre : pour projeter la barre horizontale	69
5.1.3. La rampe à diodes : pour offrir un point de fixation au sujet	70
5.1.4. Le contrôle EOG : pour s'assurer du respect des consignes	70
5.1.5. Le vidéo-projecteur : pour présenter des scènes visuelles dynamiques	71
5.1.6. Acquisition des données	72
5.2. PROCEDURE GENERALE.....	72
5.3. LES OUTILS D'ANALYSE	74
5.3.1. LE PROTOCOLE PSYCHOPHYSIQUE UTILISE	74
5.3.2. Les analyses de variance.....	76
5.3.3. Les analyses de régression linéaire	76

CHAPITRE 6 : ETUDES EXPERIMENTALES	77
6.1. ORIGINE DE LA COMPOSANTE EGOCENTREE.....	77
6.1.1. <i>Etude 1</i>	78
Abstract	79
Introduction	80
Methods	82
Results	86
Discussion	90
Conclusion.....	94
6.1.2. <i>Etude 2</i>	99
Abstract	100
Introduction	101
General methods.....	103
Experiment 1	106
Experiment 2	109
General discussion.....	112
Conclusion.....	115
6.2. INCIDENCES VISUELLES SUR LE PHENOMENE D'ATTRACTION EGOCENTREE	119
6.2.1. <i>Etude 3</i>	120
Abstract	121
Introduction	122
Methods.....	123
Results	126
Discussion	129
Conclusion.....	131
Supplementary materials	132
6.2.2. <i>Etude 4</i>	135
Abstract	136
Introduction	137
Methods.....	139
Results	143
Discussion	145
Conclusion.....	148
CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE	151
7.1. ELABORATION DU REFERENTIEL EGOCENTRE	154
7.2. INTERACTIONS VISUO-POSTURALES : L'INCIDENCE DU CONTEXTE VISUEL.....	159
7.3. VERS UNE INTERPENETRABILITE DES REFERENTIELS SPATIAUX ?	164
7.4. VERS UN COMPLEMENT DE DEFINITION DE L'AFFORDANCE?	169
CONCLUSION	174
BIBLIOGRAPHIE.....	177
ANNEXES	193

INTRODUCTION

Lorsque nous étions enfants avec mes frères et sœurs, tous les étés nous parcourions l'Europe avec mon père au volant de son monospace. A chaque étape, la hantise de mon père était de se retrouver coincé dans ce genre de parking à niveaux où le plafond semble parfois tellement bas, en particulier à l'approche des montées pour accéder aux étages, que nous nous posions souvent la fameuse question : « ça passe ou ça ne passe pas ?». Aussi, dans ce genre de situation, est-ce le plafond qui est trop bas ou la voiture trop haute ? Quoi qu'il en soit, cette petite illustration montre facilement que la perception que nous avons de l'espace dépend des relations que nous établissons avec celui-ci.

Depuis de nombreuses années, et peut-être bien même depuis les prémisses des questionnements sur l'orientation spatiale, une des problématiques majeures réside dans la dichotomie qui est souvent faite entre le rôle des informations posturales et des informations visuelles dans la définition de ces relations spatiales. Pour une même situation visuelle d'action suggérée, est-il possible que la configuration posturale modifie cette relation à l'environnement ? Quel poids relatif peut-on alors attribuer aux informations visuelles et aux informations posturales ?

Certaines situations sont particulièrement délicates, notamment lorsque le corps est incliné et les informations visuelles amoindries. Ces situations, sensoriellement ambiguës ou bien contradictoires, sont très souvent propices à des phénomènes de désorientation spatiale. Ces phénomènes, occasionnés par des illusions perceptives ou des distorsions de l'espace perçu, perturbent la relation du corps à l'environnement et influencent nécessairement l'estimation des hauteurs et des distances. Les répercussions de tels phénomènes sur l'orientation spatiale peuvent être dramatiques, comme l'attestent les nombreux accidents d'avions dans le secteur de l'aéronautique, régulièrement touché par ces illusions perceptives. Mieux comprendre les processus qui sous-tendent la perception de l'espace devient alors un enjeu déterminant pour la sécurité humaine, et cette thèse s'inscrit pleinement dans cette optique de recherche.

Le présent manuscrit se divise en trois grandes parties. La première présente les données de la littérature qui ont servi de cadre théorique à ce travail de thèse. Il s'agira tout d'abord de présenter les différents processus perceptifs qui sous-tendent la perception spatiale, c'est-à-dire les processus de perception directe d'une part, avec la notion d'affordances comme unité de cadre, puis de représentation construite de l'espace avec l'utilisation de référentiels spatiaux d'autre part. Ensuite, nous nous attacherons à définir les influences contextuelles, respectivement posturales et visuelles, dans l'élaboration de ces processus. À la fin de cette première partie, les objectifs et hypothèses de travail seront présentés.

La deuxième partie de ce travail concerne l'aspect expérimental et intègre les différentes études réalisées au cours de cette thèse. En premier lieu, nous présenterons les éléments de méthodologie générale utilisés pour les quatre études développées. La première concerne l'influence de l'orientation du corps et du regard sur la perception spatiale. Au regard des résultats obtenus, la deuxième étude questionne l'origine de l'influence corporelle observée. Elle s'intéresse à l'importance de la configuration posturale sur la perception spatiale en y présentant la contribution relative de l'axe des jambes, de la tête, et du tronc. La troisième et la quatrième étude mettent l'accent sur le rôle de l'information visuelle versus posturale dans la réalisation de cette tâche. Nous verrons notamment comment l'orientation posturale peut affecter la lecture d'une direction de déplacement induit dans un flux visuel (étude 3) et les répercussions qui s'en suivent sur la perception spatiale (étude 4). La question sera traitée au travers d'une tâche d'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts de manière à illustrer de manière concrète les processus perceptifs sous-jacents, inhérents à la manipulation du contexte postural et visuel.

Enfin, la troisième et dernière partie présente une discussion générale des résultats recueillis dans les différentes études. Ces résultats seront principalement discutés en termes d'interaction de référentiels spatiaux pour une représentation élaborée de l'espace géocentré subjectif. Nous insisterons sur le rôle de l'information sensorielle et du contexte dans les processus d'utilisation de ces référentiels spatiaux. *In fine* et pour clore ce manuscrit, nous proposerons une ouverture sur les perspectives de recherches envisageables à la suite des travaux réalisés.

CHAPITRE 1

LA PERCEPTION SPATIALE

« *La perception spatiale, qu'est-ce que c'est ?*

Quels sont les processus qui sous-tendent la perception ? »

Tout être vivant sur Terre est contraint par l'environnement dans lequel il évolue. Savoir s'orienter et se repérer correctement dans cet environnement constitue un acte primordial pour la survie de chaque espèce. Chez l'homme, et de manière plus générale dans l'ensemble du règne l'animal, déterminer la position d'un objet au même titre que la position de son propre corps dans l'espace constitue un acte tout aussi important pour interagir avec les éléments qui nous entourent. Aussi, la problématique que nous allons développer dans cette thèse s'ancre au cœur des questionnements abordés en orientation spatiale et cherche à comprendre comment l'individu appréhende l'espace environnant notamment au travers des relations qu'il tisse avec celui-ci.

Pour introduire très simplement le sujet on s'accordera à dire que ces relations peuvent être de plusieurs sortes, et qu'elles dépendent essentiellement du contexte dans lequel elles sont élaborées. En situation tout à fait naturelle,-comme par exemple dans un environnement structuré lumineux-, déterminer ces relations à l'objet peut s'envisager par l'évaluation des opportunités d'action suggérées par l'environnement. Cela signifie que, pour notre conducteur, qui jusqu'alors souhaite « passer » sous le plafond du parking sans butter contre les parpaings et les tuyaux qui courent au-dessus de son véhicule, déterminer la hauteur et la distance de ces obstacles selon une échelle absolue, de type métrique par exemple, n'est peut-être pas la stratégie à utiliser, sauf si lui-même connaît précisément et préalablement les caractéristiques de son véhicule. Evaluer son franchissement en termes de possibilités effectives d'action apparaît alors comme une solution simple et adaptée qui émerge naturellement des propriétés communes de l'individu dans son véhicule et de son environnement. Percevoir l'espace dans ces conditions caractérise un processus de « perception directe » car tous les éléments pour envisager l'action sont directement présents et accessibles dans l'environnement, l'espace ne nécessitant à aucun moment d'être mentalement représenté.

Dans d'autres situations, -comme par exemple dans un environnement visuel assombri, la nuit, ou dans un jour blanc comme on en rencontre dans les avions quand on traverse l'épaisseur d'un nuage- les propriétés de l'environnement peuvent être rendues inaccessibles par le manque de visibilité. Il est alors tout à fait concevable dans ce cas que les processus sous-tendant la perception spatiale puissent être radicalement différents de ceux impliqués en situation « naturelle ». La perception de l'espace nécessite alors la mise en œuvre de processus sous-jacents élaborés, aboutissant à une représentation construite et structurée de l'environnement sur la base de repères spatiaux, appelés « référentiels ». Notons que la perception de l'espace au moyen de ces référentiels spatiaux est tout à fait légitime dans des situations particulièrement ambiguës ou complexes, résultant d'un contexte appauvri visuellement, au même titre qu'un contexte postural particulier. Mais appréhender l'espace au moyen de référentiels spatiaux trouve également sa légitimité au regard de la nature même de la tâche, par exemple quand celle-ci requiert de localiser un objet par rapport à d'autres objets, par rapport à des directions intrinsèques corporelles ou même des directions invariantes de l'environnement comme l'horizon physique ou la verticale gravitaire.

Ainsi, nous faisons l'hypothèse qu'appréhender ces relations à l'objet peut être sous-tendu par divers processus perceptifs. Certains trouvent leur originalité dans la perception d'une relation univoque à l'environnement, d'autres, dans des processus construits, nécessitant d'évaluer des hauteurs et des distances, de manière absolue ou bien relative par rapport à des références spatiales. Ces processus conscients ou inconscients, peuvent s'appliquer aussi bien dans l'observation, l'anticipation d'une action, comme tout au long de son exécution.

Ce premier chapitre expose différents processus mis en jeu dans la perception spatiale. Ces processus seront exposés au travers de deux cadres explicatifs complémentaires, l'un questionnant la nature de l'information pertinente utilisée dans la définition des relations spatiales, et l'autre, les processus cognitifs sous-tendant leur perception. Pour ce faire, Nous développerons tout d'abord les mécanismes de perception directe impliqués dans la perception spatiale dans le cadre d'une approche écologique de la perception. Nous détaillerons pour cela l'environnement comme opportunité d'action à travers les concepts « d'affordances » et « d'invariants perceptifs ». Dans un deuxième

temps, nous nous intéresserons aux processus perceptifs à l'origine d'une représentation construite de l'espace. Pour cela nous définirons la notion de « référentiels spatiaux » et détaillerons différents types de « références spatiales ». La tâche de franchissement d'obstacles hauts sera bien sûr mise en avant pour illustrer nos propos.

1.1. LA PERCEPTION DIRECTE

Les processus de perception directe concernent une approche prospective de l'orientation spatiale où localiser un objet prend tout son sens dans le but de réaliser une action. L'acteur et l'environnement sont intimement liés, l'ensemble constituant un système dont émerge naturellement l'information pour l'action. L'information initialement présente dans l'environnement est directement perceptible par l'acteur sans pour autant nécessiter une représentation construite de l'espace. Elle se présente très naturellement à l'acteur comme une opportunité d'action (Gibson1950 ; 1952 ; Warren, 1984).

1.1.1. L'environnement comme opportunité d'action

Le terme « affordance » a été créé par le psychologue James Gibson dans les années 50 à partir du verbe « to afford » (se permettre), afin de caractériser une relation fonctionnelle existant entre un individu et son environnement. Selon Gibson, l'environnement, de par ses caractéristiques intrinsèques (définies par les hauteurs, largeurs, surfaces, ...) offre à l'individu une collection de possibilités d'actions qui nécessitent d'être détectées pour appréhender l'action. Par exemple, un escalier présent dans l'environnement offre à l'individu l'opportunité de le gravir, tout comme une porte pour pénétrer dans une pièce suggèrera d'être franchie. Une affordance correspond donc à une opportunité d'action. Elle spécifie des relations directes et univoques entre les objets, et nous invite à l'action. Une affordance s'exprime sur la base d'invariants perceptifs qui sont à l'origine des relations acteur / environnement.

1.1.2. La notion d'invariants perceptifs

Dans sa célèbre expérience sur la montée de marche, Warren (1984) s'intéresse à la notion d'invariants perceptifs. La tâche consiste à évaluer la possibilité de monter une marche d'escalier, ou à juger sans action si une marche peut- être gravie (ou « montable ») sans l'aide des mains (Figure 1.1.). Il eut l'idée d'exprimer les propriétés pertinentes à la fois de l'acteur et de l'environnement, sous la forme d'un ratio entre la valeur maximale d'une propriété environnementale E , et la valeur optimale A correspondant à une propriété intrinsèque à l'acteur. Le ratio $\pi = E/A$, permet de définir la hauteur perçue de la marche, non pas selon une échelle métrique, extrinsèque et tout à fait abstraite pour l'individu, mais suivant une proportion invariante référée à une caractéristique physique de l'individu, ici la longueur de jambe. Warren a montré que ce ratio, π , ou « point critique », exprimé sans dimension, est perçu de manière très précise sur la seule base de l'information visuelle. En outre, il semblerait que sa valeur (ici, $\pi \approx 0.88$) corresponde fidèlement au modèle biomécanique des possibilités réelles d'action construit par le sujet a priori. π représente ainsi un invariant perceptif, indépendant de la taille du sujet, et offrant dans la scène visuelle une information directement disponible à l'acteur sur ces possibilités d'action. Ce type de relation a par ailleurs été déterminé pour de nombreuses autres tâches comme la détermination de la hauteur maximale à laquelle des individus peuvent s'asseoir (Mark, 1987) ou encore l'estimation du franchissement d'obstacles hauts (Marcilly et Luyat, 2008 ; Steffanucci et Geuss, 2010 ; Van der Meer, 1997 ; Wagman et Malek, 2008 ; 2009).

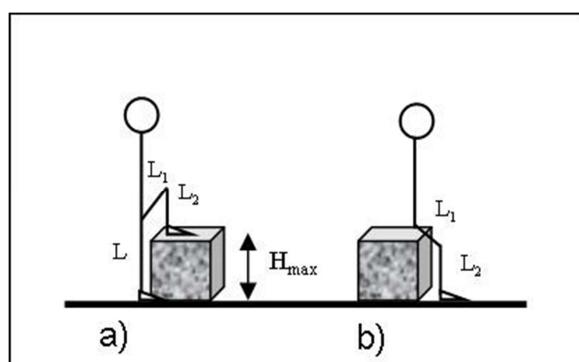


Figure 1.1. D'après Warren, 1984 et Mark, 1987. Estimer la hauteur maximale H_{\max} d'une marche à gravir ou d'un support pour s'asseoir, peut être exprimé en termes de proportion invariante de la longueur de jambes. a) $H_{\max} = 0.89 L$, et b) $H_{\max} = 0.88 L$, ce qui correspond de très près au H_{\max} prédit par le modèle biomécanique pour la montée de marche ($= 0.90 L$) et au H_{\max} réel pour la hauteur maximale d'assise ($= 0.89 L$). D'un point de vue biomécanique, pour gravir une marche $H_{\max} = L + L_1 - L_2$.

1.1.3. La taille de mon corps comme référence

Franchissement latéral

Un certain nombre d'études se sont intéressées au franchissement d'obstacles, comme tâche perceptive, toujours en relation avec une dimension intrinsèque corporelle. Par exemple, Warren et Wang, (1987) ont défini un ratio critique pour le franchissement latéral d'une porte, permettant d'évaluer une valeur minimale d'ouverture de porte égale à 1.30 fois la largeur des épaules, pour un passage sans rotation des sujets (e.g., Lepecq et al. 2009). D'autres études se sont intéressées à l'évolution de ce ratio, par exemple en manipulant la dimension corporelle des sujets via l'ajout d'un objet porté en latéral. Ces études ont montré que les sujets ajustent leur possibilité de franchissement par rapport à la largeur de l'objet rajouté. Ces études montrent également une prise en compte de ces nouvelles dimensions sans action réelle de l'observateur mais dans l'anticipation du franchissement (Wagman et Taylor, 2005). D'autre part, quand un but annexe est clairement spécifié dans la tâche, comme traverser une porte pour récupérer des bonbons, une attention particulière est portée à la taille des mains, comme l'atteste la sensibilité du ratio à l'ajout de prothèses de main (Ishak et al. 2008).

Franchissement vertical dynamique

Le franchissement d'obstacles présentés en hauteur est une tâche qui a été beaucoup moins étudiée. Néanmoins les quelques études que l'on trouve à ce sujet constituent des éléments clefs pour comprendre comment un individu estime ses possibilités de passage sous une porte en conditions naturelles (Marcilly et Luyat, 2008; Steffanucci et Guess, 2010 ; Van der Meer, 1997 ; Wagman et Malek, 2008 ; 2009). Par exemple, Van der Meer (1997) s'est intéressée au franchissement dynamique d'une barre située à différentes hauteurs du sujet (**Figure 1.2.a**). Son étude montre que les sujets commencent à baisser la tête et à plonger sous la barre quand le ratio π , définie par le rapport entre la hauteur de barre et la hauteur du sujet, équivaut à 1.04, pour un adulte marchant à vitesse normale. De façon intéressante, la valeur de ce ratio augmente pendant la course ($\pi = 1.06$), et augmente chez l'enfant ($\pi = 1.1$), surtout quand celui-ci est atteint de difficultés motrices (hémiparésie). Ceci suggère un comportement d'autant plus précautionneux que la vitesse est élevée et le niveau de développement et de contrôle moteur faibles, sans doute pour compenser la variabilité dans le contrôle des oscillations du corps verticales au cours du mouvement.

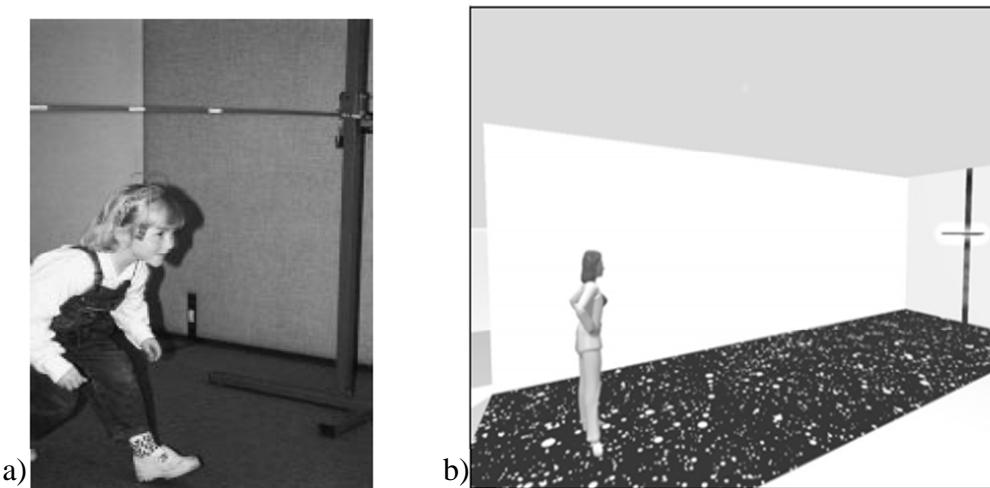


Figure 1.2. Illustrations tirées de a) Van der Meer (1997) et b) Marcilly et Luyat (2008). Paradigmes de franchissement dynamique a), et statique b) à partir d'un point d'observation fixe. En a), le paradigme s'intéresse au comportement moteur de sujets qui marchent à différentes vitesses sous la barre. Le ratio à partir duquel les sujets commencent à plonger sous la barre dépend essentiellement de la vitesse de déplacement, du niveau de développement et de contrôle moteur. La taille des sujets ne modifie pas ce ratio. En b), les sujets doivent estimer à partir d'un point d'observation fixe s'ils pensent passer sans se pencher sous une barre présentée à différentes hauteurs face à eux.

Franchissement vertical statique

Plus récemment, d'autres études se sont intéressées à l'estimation des possibilités de franchissement d'une barre horizontale à partir d'un point d'observation fixe (**Figure 1.2.b** ; Marcilly et Luyat, 2008 ; Stefanucci et Geuss, 2010 ; Wagman et Malek, 2008 ; 2009). Ces études montrent que les sujets utilisent également ce genre de ratio calibré sur leur propre taille lorsqu'ils imaginent sans déplacement réel la hauteur minimale d'une barre à franchir sans baisser la tête. Les résultats montrent que le jugement de l'affordance est affecté par la vitesse de déplacement imaginé (la marche ou la course) pour le franchissement de barre (Wagman et Malek, 2009). Comme pour des conditions de franchissement dynamique, les participants semblent plus aptes à juger correctement leur possibilité de franchissement pour une vitesse de déplacement imaginé plus adaptée à une tâche courante comme la marche. Parallèlement, la modification de certaines caractéristiques propres aux sujets, comme l'augmentation de leur taille par le port de chapeau ou de talons semble également affecter le jugement de l'affordance (Stefanucci et Geuss, 2010). Cette dernière observation suggère que le niveau des yeux joue également un rôle important dans la détermination des possibilités d'action.

1.1.4. Des possibilités d'action référencées au niveau des yeux

De nombreuses études ont montré que les individus peuvent également référer la taille, la hauteur et la distance des objets par rapport au niveau des yeux (Bertamini et al. 1998 ; Matin et Li, 1995 ; Ooi et al. 2001 ; Sedgwick, 1973). Le niveau des yeux constitue en effet un point de références privilégié pour de nombreuses tâches de perception spatiale de par les liens étroits qu'il entretient avec l'horizon visuel, défini par le plan passant par les yeux et perpendiculaire à la gravité.

Dans l'estimation des distances

Ainsi un grand nombre d'auteurs se sont intéressés au niveau des yeux comme référence dans l'estimation des distances sur la base d'une déclinaison angulaire par rapport à l'horizon (Gardner et Mon-Williams, 2001, Gibson, 1950 ; Ooi et al. 2001 ; Philbeck et Loomis, 1997 ; Wallach et O'Leary, 1982). La **Figure 1.3.** expose l'hypothèse proposée par Ooi et al. (2001) selon laquelle le traitement des distances prend en compte le niveau des yeux h et l'angle de déclinaison sous l'horizon α en utilisant la relation trigonométrique $d = h/\tan(\alpha)$.

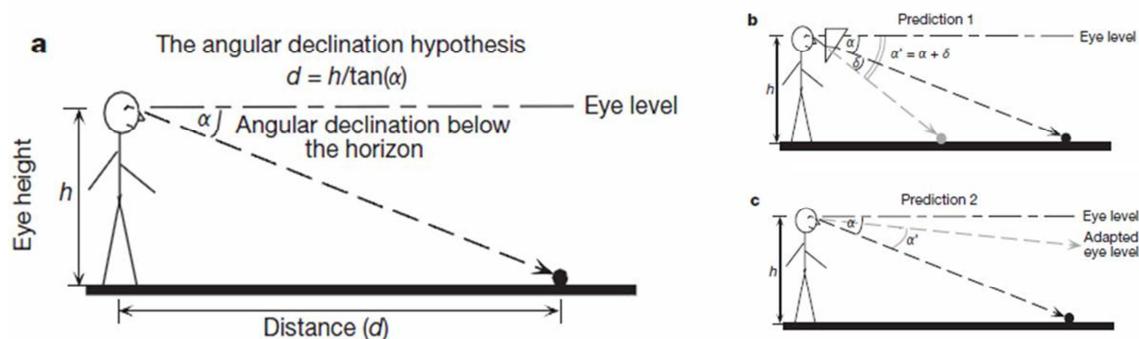


Figure 1.3. a) L'hypothèse de la déclinaison angulaire pour la perception des distances (extrait de Ooi et al. 2001). Cette hypothèse décrit comment le système visuel peut déterminer les distances d à partir du niveau des yeux h et de l'angle de déclinaison sous l'horizon α en utilisant la relation trigonométrique suivante : $d = h/\tan(\alpha)$. L'hypothèse est vérifiée par : b) le port de prismes vers le bas qui augmente la déclinaison angulaire de α à $\alpha+\delta$, réduisant la distance perçue ; c) l'effet résiduel de l'adaptation aux prismes qui dévie le niveau des yeux vers le bas, induisant une diminution de la déclinaison angulaire des objets α à α' , la distance devenant ainsi surestimée.

Dans l'estimation de la hauteur et la taille relative des objets

D'autres études ont souligné l'importance du niveau des yeux dans l'estimation de la taille relative des objets sur la base d'un ratio avec l'horizon (**Figure 1.4.** ; Bertamini et al. 1998 ; Sedgwick, 1973, 1983 ; Warren et Wang, 1987 ; Wraga, 1999). Ainsi, Bertamini et al. (1998) suggère que l'estimation de la taille relative des objets nécessite de prendre en compte l'angle visuel S_{EH} défini entre l'horizon et le point d'intersection de l'objet avec le sol et l'angle visuel S_{from} entre l'horizon et le haut de l'objet. Il semblerait que les individus jugent mieux de la hauteur des objets quand la taille des objets est située aux alentours de la hauteur des yeux, qu'ils soient assis ou debout (Bertamini et al. 1998).

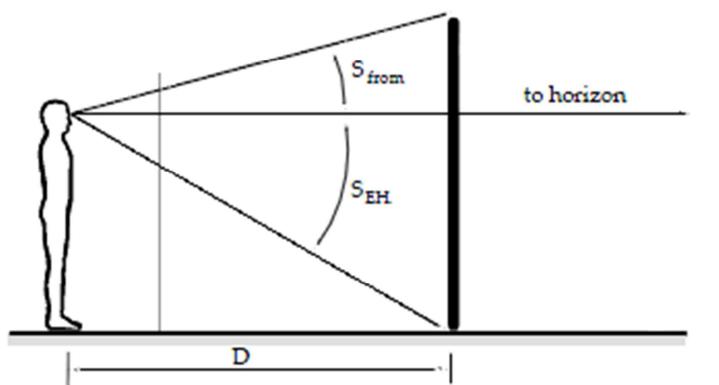


Figure 1.4. L'estimation de la taille relative des objets (extrait de Bertamini et al. 1998). Les règles de l'optique permettent l'expression de la dimension d'un objet à partir d'un ratio basé sur les yeux. Comme les relations anthropomorphiques entre le niveau des yeux et les autres dimensions corporelles sont d'ordinaire constantes, on peut prélever directement le ratio entre le niveau des yeux et les dimensions environnementales pour percevoir une affordance. Le ratio H se définit comme $H = (SEH+Sfrom)/SEH$; où SEH est l'angle visuel défini entre l'horizon et le point d'intersection de l'objet avec le sol. $Sfrom$ est l'angle visuel entre l'horizon et le haut de l'objet. $Sfrom=0$ quand l'objet est au niveau des yeux, $Sfrom>1$ si l'objet est plus grand que le niveau des yeux, et $Sfrom<1$ si l'objet est plus petit que le niveau des yeux. La valeur H est indépendante de la distance D .

Pour percevoir une affordance

Généralement la hauteur des yeux se présente comme une constante en rapport avec la taille réelle des individus. Ces observations suggèrent que la hauteur des yeux peut également être utilisée pour percevoir une affordance ($\pi' = \pi/constante$). Cette idée a par ailleurs été évoquée par Mark (1987) et Warren et Wang (1987) dans leurs études respectives sur les possibilités d'action que propose une surface (s'asseoir, grimper), ou le franchissement d'une porte (passer entre des ouvertures). Ces auteurs ont cherché à modifier le niveau des yeux, soit en manipulant réellement le niveau des yeux en surélevant les sujets via l'ajout de blocs sous les pieds (Mark, 1987), soit en diminuant artificiellement la hauteur des yeux suggérée par l'environnement via l'ajout d'un faux

sol (niveau de yeux effectif). Que les participants portent des blocs ou non sous leurs pieds, il semblerait qu'il n'y ait pas de différence significative dans le ratio calculé à partir des yeux quand il s'agit d'estimer la hauteur maximale d'une marche à gravir sans l'aide des mains ou encore la hauteur maximale d'un siège dans lequel on peut s'asseoir (Mark, 1987 ; **Figure 1.5.** : a) $H_{\max}=0.45$ fois la hauteur des yeux H_{yeux} ; b) $H_{\max}=0.44 H_{\text{yeux}}$). Les mêmes conclusions ont été rapportées concernant le franchissement d'obstacles, qu'ils soient latéraux ou verticaux. Le ratio référé au niveau des yeux pour le passage latéral d'une porte semble être le même, que le niveau des yeux effectif soit abaissé ou pas (Warren et Wang, 1987). Cela suggère toutefois une mauvaise estimation de la taille maximale de l'objet avec lequel on souhaite interagir. De même, la position effective des yeux dans l'estimation du passage sous une barre ne semble pas non plus affecter ce ratio (Marcilly et Luyat, 2008).

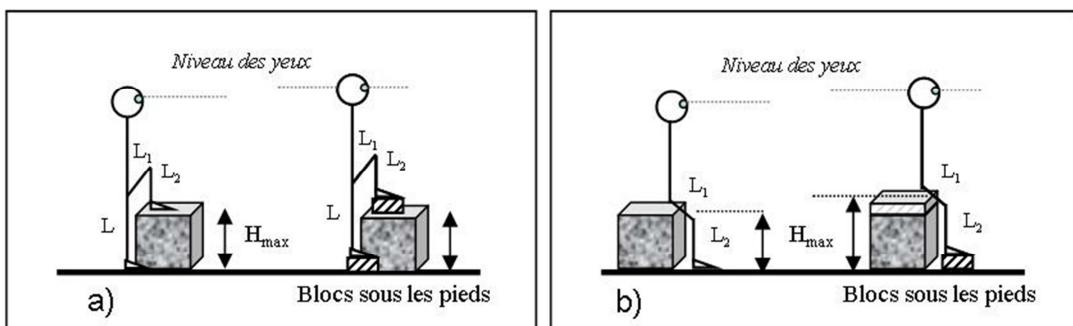


Figure 1.5. D'après Warren (1984) et Mark, (1987). Manipulation du niveau des yeux par ajout de blocs sous les pieds. Le ratio calculé à partir des yeux pour estimer les possibilités d'action est équivalent, quel que soit le niveau des yeux, que les sujets portent des blocs ou non. En a) H_{\max} n'est pas physiquement affectée par le port de blocs, car la possibilité de gravir la marche dépend seulement de L_1 . Pourtant le niveau des yeux est plus élevé. Un ratio identique pour les deux conditions signifie que ($H_{\max}/H_{\text{yeux}} = H_{\max}/H_{\text{yeux}+\text{blocs}}$) ce qui traduit une mauvaise perception de la hauteur maximale à gravir en condition port de blocs. H_{\max} est surestimé. En b) le port de bloc a des effets différents sur les limites d'action de la tâche. Le sujet peut physiquement s'asseoir sur des surfaces plus hautes : H_{\max} est donc physiquement différent, et l'individu n'est plus normalement proportionné. Un ratio perçu de manière identique pour les deux conditions traduit par conséquent une sous-estimation de la hauteur maximale d'assise.

1.1.5. L'affordance spécifiée par un invariant multimodal ?

D'autres études se sont intéressées à la nature de l'invariant perceptif permettant de spécifier une affordance de franchissement. S'agit-il d'un invariant optique (i.e., spécifié par la configuration optique de la scène visuelle), ou d'un invariant multimodal? En particulier, Marcilly et Luyat (2008) ont questionné l'effet de l'abaissement du niveau effectif des yeux (par l'ajout de prismes) sur l'affordance de franchissement de barre, sans

mouvement réel des sujets. La perception de cette affordance est étudiée avant, pendant et après adaptation prismatique. Leur étude montre qu'il n'y a pas de différence significative dans le ratio relatif au niveau des yeux, quelle que soit la condition (contrôle, avec port de prismes, après adaptation aux prismes) alors que les jugements verbaux de la hauteur minimale de franchissement et de la hauteur des yeux sont affectés par le port de prismes. Ces résultats supportent l'hypothèse que la hauteur des yeux effective est calibrée par rapport à la scène visuelle et qu'elle peut en retour servir à estimer des potentialités d'action. Les sujets auraient donc juste à détecter ce ratio π' pour juger s'ils passent ou non sous une barre. Néanmoins cette étude souligne que l'affordance ne dépend pas seulement d'un invariant optique (le ratio des yeux spécifié dans les rayons optiques) mais plutôt d'un invariant multimodal donné dans un flux global (le ratio des yeux étant spécifié par des éléments optiques, vestibulaires et oculomoteurs).

En ce sens, il peut être intéressant de questionner la validité de telles affordances dans des situations particulières où le contexte, notamment le contexte postural est modifié et entraîne des modifications relatives aux afférences vestibulaires et somesthésiques. Ainsi, pour une même situation visuelle et pour une même action suggérée, est-il possible que la configuration posturale modifie la relation qui lie l'acteur à son environnement?

1.1.6. Manipulation du contexte postural

Différentes configurations posturales pour différents points d'observation

Récemment, Wagman et Malek (2008) ont étudié l'affordance du passage sous une barre pour différentes situations posturales (**Figure 1.6.**). Les configurations « sujet debout, les pieds posés au sol », « assis par terre » ou « debout surélevé sur un petit support » induisait notamment une modification dans la position du point d'observation par rapport à la barre à franchir. Si globalement, l'affordance de franchissement est perçue de la même manière par rapport au corps, l'étude a pu mettre à jour de petites différences dans la manière de percevoir les limites d'action dans chaque cas. En condition assise, le ratio hauteur de barre sur hauteur du sujet ($\pi = 0.98$) est légèrement inférieur au ratio perçu en condition debout ($\pi = 1.02$), reflétant ainsi un comportement moins précautionneux.

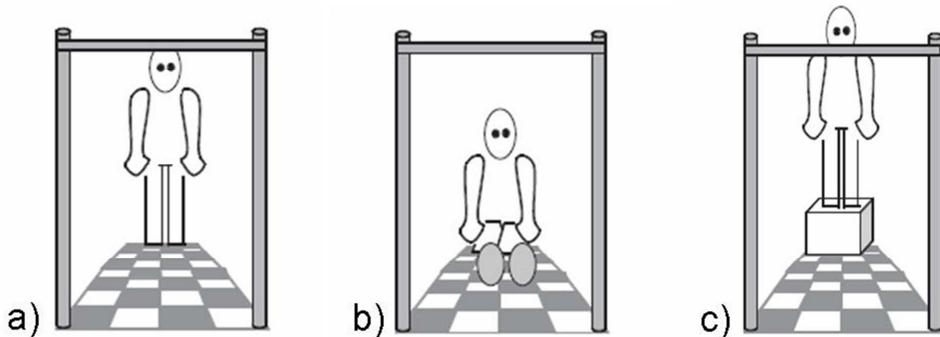


Figure 1.6. Extrait de Wagman et Malek (2008). Les sujets doivent estimer leur possibilité de passage sous une barre (comme s'ils marchaient vers cette barre) depuis un point d'observation fixe pour différentes configurations posturales : a) debout en position naturelle, b) assis par terre, c) debout surélevés sur un petit support. On note de légères différences dans les ratios perçus.

Deux explications peuvent alors être avancées pour expliquer cette différence. La première concerne le contexte postural dans lequel se trouve l'observateur et le nombre d'ajustements en ligne qu'il lui serait nécessaire de faire s'il devait réaliser la tâche de franchissement de manière dynamique. Ainsi, on peut s'attendre, en position debout, à une diminution du nombre d'ajustements en ligne à fournir pour réaliser la tâche comparée à la position assise par exemple. Aussi, on peut considérer que plus on est près de la barre dans une position classique de franchissement meilleure sera l'affordance.

La seconde explication fait référence au rôle de l'expérience dans la connaissance des relations acteur/environnement en fonction des différentes conditions expérimentales manipulées. Ainsi, en position naturelle (« debout, les pieds posés au sol ») ont peut s'attendre à une meilleure connaissance du système acteur/environnement que pour d'autres configurations posturales (assis ou surélevé) moins habituelles et moins appropriées dans l'estimation de ce genre de tâche. De nombreux auteurs ont relevé un effet avéré de l'expérience sur l'estimation des limites d'action (Mark, 1987 ; Stoffregen et al. 2009). Par exemple, s'approcher et tourner autour des objets avec lesquels on souhaite interagir permet de juger de manière plus efficace les possibilités d'action (Marcilly et Luyat, 2008 ; Mark, 1987). Pratiquer une nouvelle action, comme marcher avec des talons ou porter fréquemment des chapeaux hauts permet d'autre part d'estimer de manière plus juste les possibilités de franchissement d'une barre quand les proportions corporelles sont modifiées (Stefanucci et Geuss, 2010). Enfin, le niveau d'expertise rendu accru par l'apprentissage permet une amélioration très nette des performances en

éduquant l'attention des acteurs vers des informations pertinentes de l'environnement pour réaliser la tâche.

Différentes configurations posturales pour un même point d'observation

Une situation qui a très peu été étudiée en matière d'affordance concerne le cas où le contexte postural est manipulé alors que le point d'observation reste fixe. C'est le cas notamment quand on incline un sujet en tangage autour de l'axe transoculaire. Les travaux de Bringoux et al. (2008) suggèrent que pour une même configuration optique de la scène visuelle, l'affordance de franchissement d'obstacles est perçue différemment en fonction de l'orientation du corps dans l'espace. Notamment, une relation linéaire est mise en évidence entre l'orientation du corps et l'estimation des possibilités de franchissement pour des inclinaisons de corps comprises entre 20° vers l'avant et 30° vers l'arrière (Bringoux et al. 2008). Cette relation est telle que, plus le corps est incliné vers l'avant, plus le franchissement de la barre est perçu comme possible. Cette observation suggère que dans des situations où l'environnement visuel est appauvri, d'autres processus perceptifs, peut-être plus adaptés à la situation, sont à envisager pour expliquer l'apparition d'illusions perceptives concernant l'estimation de la hauteur des objets. Il reste en effet à expliquer l'origine de ces dérives perceptives systématiques, directionnellement signées, et proportionnelles à l'inclinaison du corps. Nous chercherons dans la partie suivante à étoffer notre approche théorique par la présentation d'un contexte expérimental adapté à des situations perceptivo-spatiales où l'information environnementale disponible est extrêmement réduite ou ambiguë.

1.2. UNE REPRESENTATION CONSTRUISTE DE L'ESPACE

Dans certaines situations environnementales, les processus de perception directe ne permettent pas d'expliquer l'apparition d'illusions perceptives occasionnées par un contexte postural et visuel inhabituels. Ces phénomènes suggèrent que d'autres processus perceptifs sont à envisager pour étudier de manière plus complète les mécanismes qui régissent la perception spatiale. Tout porte à croire que les processus alors mis en jeu ne concernent plus une perception directe de l'information caractérisant les relations acteur/environnement -celles-ci étant rendues inopérantes par le caractère particulier de la

situation- mais suggèrent que localiser un objet nécessite une représentation construite de l'espace qui nous entoure.

1.2.1. Les référentiels spatiaux

Des espaces stables et définis

Tout individu évoluant dans un environnement, qu'il soit terrestre ou non, dispose de repères lui permettant de structurer son espace. Sur la Terre, dans l'Espace ou sur Mars, ces repères, organisés sur la base d'éléments physiquement présents, de directions intrinsèques ou extrinsèques à l'individu appelées références, permettent théoriquement à tout un chacun de percevoir la position d'un objet de manière cohérente dans un espace stable et bien défini. La représentation spatiale d'un objet est alors, sans pour autant s'en tenir à un formalisme mathématique du terme, conceptuellement envisageable, au travers de systèmes de coordonnées spatiales appelés « cadres de références » ou encore « référentiels spatiaux ».

Par définition, dans un espace euclidien, un référentiel est un repère avec une origine et trois axes, ou vecteurs, qui spécifient trois dimensions de l'espace (Batista, 2002 ; Howard, 1982; 1986). L'origine de ce référentiel peut être différente suivant la tâche à effectuer, de même que les références (axes ou plans) impliquées. Très souvent, on s'intéresse aux yeux comme origine de ces référentiels. C'est notamment le cas lorsqu'on étudie l'estimation du franchissement d'obstacles hauts (Bringoux et al. 2008). Mais d'autres origines, comme par exemple la main ou l'épaule pour des tâches de pointage peuvent être envisagées (Soechting et al. 1990), le but étant en fin de compte de proposer un espace d'étude stable pour la description et l'analyse de la position ou du mouvement d'un solide par rapport à un autre solide.

Les référentiels spatiaux offrent notamment la possibilité d'exprimer la position d'un objet en termes de métrique, c'est-à-dire d'amplitude le long de chaque vecteur de base qui constitue les coordonnées de cet espace (Soechting et Flanders, 1992 ; 1995) mais également d'analyser la perception effective de la position de cet objet à travers l'orientation de ces différents espaces d'études. C'est précisément ce que nous nous attachons de faire dans cette thèse. Ceci nous amène notamment à questionner l'influence relative des indices gravitaires, posturaux et visuels dans l'élaboration et l'orientation des différents référentiels spatiaux impliqués dans la perception de l'espace.

Des référentiels multiples

De manière générale, plusieurs référentiels peuvent être utilisés pour coder la position d'un objet dans l'espace (Figure 1.7. ; Berthoz, 1997 ; Howard, 1982 ; 1986 ; Wade, 1992). L'utilisation d'un référentiel plutôt qu'un autre est classiquement suggérée par les caractéristiques de l'environnement ou clairement spécifiée par la nature de la tâche. Ainsi, lorsqu'un objet nécessite d'être localisé par rapport à des références du corps, le référentiel est dit **égocentré** (*centré sur soi*). Lorsque cet objet nécessite d'être situé par rapport à une référence externe spécifique de l'environnement proche, le référentiel est dit **allocentré** (*centré sur autre chose*). Enfin, lorsque cet objet nécessite d'être localisé par rapport à des invariants terrestres comme la verticale gravitaire ou l'horizon, le référentiel est dit **géocentré** (*centré sur la terre*)¹.



Ces référentiels spatiaux sont construits sur la base d'éléments spécifiques de l'espace qui constituent des références égo-, allo- ou géocentriques. Ces références peuvent être multiples comme le décrit le paragraphe suivant.

¹ Notons toutefois que dans la littérature, la distinction entre les référentiels allocentrés et géocentrés n'est pas toujours faite. Les deux types de référentiels peuvent alors être regroupés sous le terme général *d'exocentré*, par opposition au référentiel égocentré. Pourtant ces deux types de référentiels possèdent chacun leur particularité, chacun impliquant des références distinctes dans leur constitution.

1.2.2. Plusieurs types de références spatiales

Des repères de l'environnement contextuel comme référence

Dans des conditions visuelles optimales, l'environnement constitue une source importante de références pour le sujet. Dans un paysage, les arbres, les routes, les maisons sont autant de point de repère permettant au sujet de localiser d'autres éléments. Ainsi, on pourra déterminer si un objet se trouve à droite ou à gauche d'un arbre, devant, derrière, dessus, dessous, ou même dedans. Par ailleurs, l'environnement peut également servir de référence pour décrire un mouvement, comme par exemple l'avancée d'un joueur sur un terrain de foot et la trajectoire de sa frappe de balle par rapport à la lucarne. De manière générale, on retiendra de la littérature classique que l'environnement offre une multitude de références pour la perception spatiale, qualifiées d'*allocentraées*.

Des invariants terrestres comme référence

Parmi ces références de l'environnement, les références gravitaires possèdent un statut très particulier. Il s'agit notamment de l'horizon physique (défini par la ligne d'horizon) et la verticale gravitaire (donnée par le fil à plomb)². Ces références constituent des directions terrestres invariantes, qui même quand elles sont visuellement masquées -imaginez un environnement clos comme une pièce sans fenêtre ou un paysage qui ne permet pas une vue dégagé sur l'horizon - peuvent être partiellement reconstruites sur la base d'éléments préexistants, notamment par l'extrapolation des lignes de fuites. Si ces éléments environnementaux ne sont pas présents –il peut s'agir d'une pièce sombre ou d'un paysage baigné dans l'obscurité-, ces références terrestres, qualifiées de *géocentraées*, nécessitent (lorsque les informations sensorielles sont ambiguës)³ d'être représentées (Gibson, 1979 ; Sedgwick, 1986). Nous reviendrons plus en détail sur ce point au paragraphe 1.2.3.

² Les directions géographiques données par le pôle magnétique constituent également des références géocentraées permettant aux oiseaux migrateurs de s'orienter (notamment en azimut).

³ Le corps est pourvu de différents capteurs spécifiques permettant un accès univoque à la gravité. Néanmoins, dans des situations contextuelles particulières où l'information sensorielle est ambiguës, le traitement de ces informations nécessite une représentation.

Mon corps comme référence

Plusieurs parties du corps, axes, plans et segments, peuvent également être utilisées comme références dans des tâches de perception spatiale (**Figure 1.8.**). Ainsi, les axes corporels X, Y, Z peuvent être utilisés pour déterminer des mouvements de translation égocentrale, respectivement horizontal (une avancée ou un recul sur l'axe X), latéral (un déplacement à droite ou à gauche sur l'axe Y), ou vertical (une montée ou une descente sur l'axe Z). Des mouvements de rotation peuvent également être déterminés à partir de ces axes (respectivement une rotation en roulis autour de l'axe X, tangage autour de l'axe Y, et lacet autour de l'axe Z). La représentation spatiale des objets peut être décrite par rapport à des plans⁴, comme le plan horizontal qui permet de déterminer de manière relative les directions égocentrales du haut et du bas, le plan transversal qui permet de distinguer les directions devant de derrière, ou encore le plan médian (ou sagittal) qui permet la perception d'objets en en azimut, i.e. à droite ou à gauche).

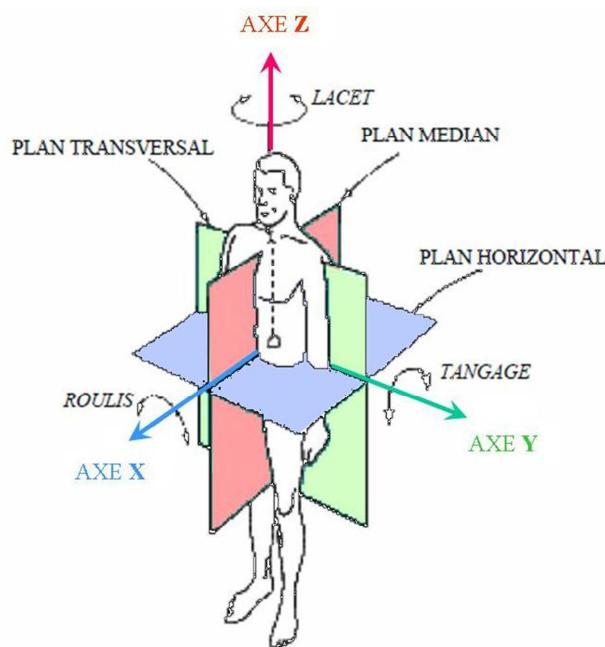


Figure 1.8. Principaux plan et axes utilisés pour spécifier les directions de déplacement et les rotations du corps humain. D'après Howard (1982).

⁴ Il est important de noter dans la description qui est faite de ces plans, que si tous ici coupent le centre de gravité du sujet, la représentation spatiale des objets par rapport à tout autre plan qui leur sont parallèles est bien entendu envisageable. D'autres part, les références égocentrales, axes et plans présentés peuvent avoir pour origine divers segments corporels comme la tête, le tronc ou tout autre élément corporel impliqué ou non dans la tâche. C'est le choix des références en question, qualifiées d'*égocentrales*, et de leur origine qui permet de déterminer le type de référentiel égocentré choisi pour l'étude (Cf. paragraphe 1.2.1).

1.2.3. Références physiques versus références perçues

Parce que la perception que nous avons des choses et de notre propre espace passe forcément par un ressenti subjectif de l'environnement et des éléments qui nous entourent, il convient de préciser que l'élaboration des relations qui lient un acteur à son environnement s'effectue ici sur la base d'un « état perçu », qui peut être différent pour diverses raisons de l'état objectif physique. Ainsi, la référence « perçue » que l'on appelle communément référence subjective exprime le résultat d'une représentation interne à l'individu sur laquelle s'effectue le jugement (**Figure 1.9.**).

Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement à la manière dont les individus perçoivent leur espace géocentré. L'horizon visuel, défini comme le plan perpendiculaire à la gravité passant par l'axe des yeux (Stopper et Cohen, 1989), et la verticale visuelle, plan parallèle à la gravité, sont des références constitutives de cet espace⁵. Précisément, on appellera respectivement verticale visuelle subjective (VVS) et horizon visuel subjectif (HVS), l'état perçu de ces références.

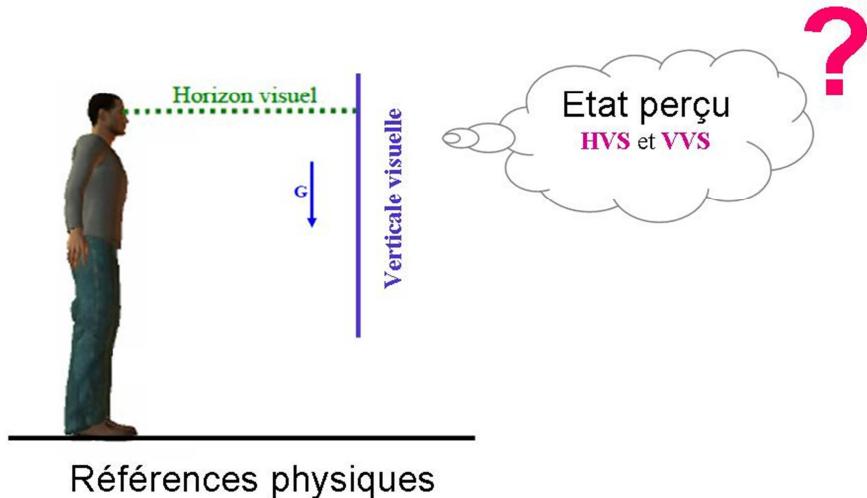


Figure 1.9. L'horizon visuel et la verticale visuelle constituent des références gravitaires physiques. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la perception de ces plans, appelés respectivement l'HVS et la VVS. (Figure adaptée de Paillard, 2010).

⁵ Le terme visuel est essentiellement employé en relation avec le type de tâche utilisée pour déterminer la référence. En fonction de la tâche utilisée, on parlera de référence visuelle, posturale ou même haptique. Le qualificatif utilisé ne signifie pas qu'une seule modalité sensorielle est impliquée dans les processus sous-jacents à la perception de cette référence.

De nombreuses études ont fréquemment montré que pour un grand nombre de situations expérimentales la référence subjective ne correspond pas forcément à la référence physique. Cette dissociation entre l'état physique et l'état perçu semble, avant tout questionnement sur les processus perceptifs sous-tendant l'appréhension de l'espace, souligner une certaine confusion dans l'utilisation des références spatiales pour le type de jugement normalement requis par la tâche. Cette confusion peut trouver son origine dans l'ambiguïté que revêtent par nature certaines références spatiales lors d'un contexte postural ou visuel particulier. C'est précisément le point que nous développons dans le paragraphe suivant.

1.2.4. Des références mixtes et ambiguës à l'origine d'erreurs perceptives

La verticale gravitaire potentiellement confondue avec l'axe Z

Nul n'étant insensible aux lois de la pesanteur, les individus se sont adaptés au cours de l'Evolution aux contraintes d'une vie gravitaire, la bipédie pouvant être présentée comme une forme évoluée à cette adaptation. Notamment, le fait qu'en station debout, l'axe longitudinal corporel (axe Z) se trouve classiquement aligné avec la verticale gravitaire, semble générer chez l'individu une tendance qui constitue à prendre en compte l'axe Z, *axe d'équilibration posturale*, comme source d'indication de la direction verticale quelle que soit son orientation dans l'environnement (Clément et al. 2001). Cette tendance s'observe d'autant plus que l'accès aux références visuelles et posturales est amoindri. L'hypothèse que l'individu puisse partiellement confondre la direction de la verticale gravitaire avec l'orientation de son axe Z a fréquemment été supportée. Il s'agit notamment de la position soutenue par Mittelstaedt (1983 ; 1986) au travers de la notion de *vecteur idiotropique* que nous détaillerons plus amplement au chapitre 2.3.2.

L'horizon visuel potentiellement confondu avec le plan transverse à la tête

Alors que la verticale visuelle, qui est orientée parallèlement à la direction de la pesanteur, possède une réalité physique indéfectible, indépendante des caractéristiques intrinsèques à l'individu, l'horizon visuel nécessite un point d'origine défini par les yeux de son observateur (Matin et Li, 1992 ; 1995 ; Stopper et Cohen, 1989). En effet, si on gravit une tour qui donne vue sur la mer et qu'à chaque étage on marque sur la vitre la ligne d'horizon, on s'apercevra que cette ligne correspond toujours au niveau des yeux. Ainsi, en référence à la projection infinie de l'horizon, à deux sujets debout de taille

différente correspondra deux horizons visuels différents. Par contre à niveau des yeux égal, l'horizon visuel sera le même quel que soit l'individu, indépendamment de la configuration posturale ou de l'orientation du corps dans l'espace (**Figure 1.10.**).

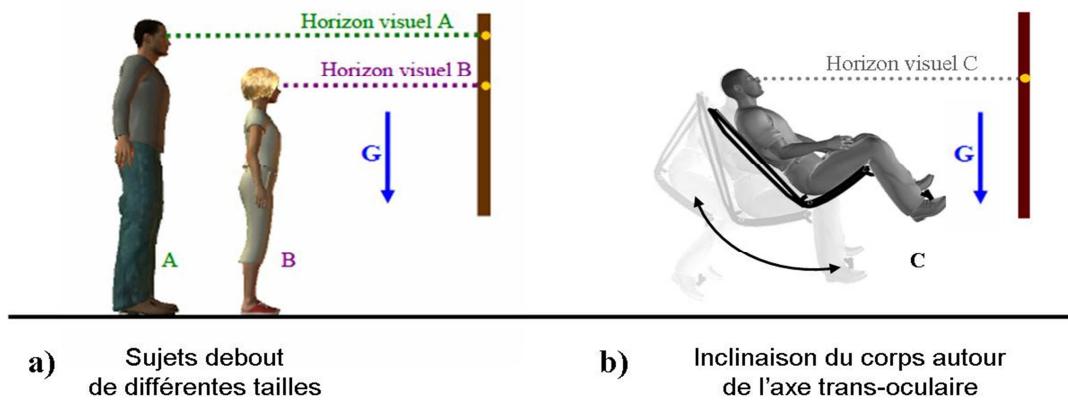


Figure 1.10. Illustration de l'horizon visuel, en **a)** pour des sujets debout de différentes tailles (extrait de Paillard, 2010) ; et en **b)** pour une inclinaison corporelle en tangage autour de l'axe transoculaire. Quelle que soit la taille ou la configuration posturale des sujets, l'horizon visuel, correspond toujours au plan passant par les yeux perpendiculairement à la gravité.

Cependant, dès lors que l'orientation du sujet quitte l'axe de la verticale gravitaire, la caractéristique structurelle de l'horizon visuel lui vaut la particularité d'être potentiellement confondu avec le plan transverse de la tête, référence égocentrique définie comme le plan perpendiculaire à l'axe Z de la tête passant par le centre des cristallins oculaires (Howard et Templeton, 1966), et qui varie avec l'orientation de la tête (**Figure 1.11.**).

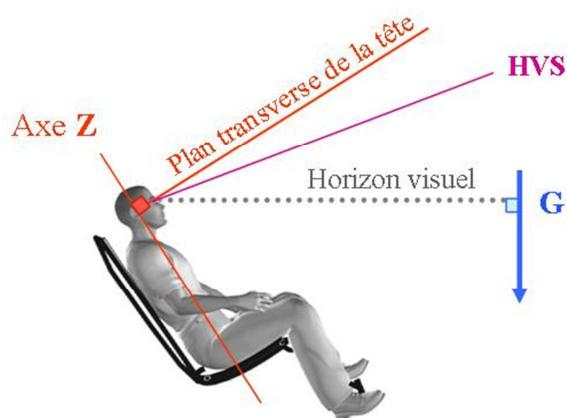


Figure 1.11. Illustration de l'horizon visuel et du plan transverse de la tête. Les deux références peuvent être partiellement confondues quand il s'agit d'estimer l'horizon visuel.

La confusion partielle entre les deux références physiques aurait notamment pour conséquence un HVS dévié de la référence géocentrale physique, à l'origine d'une mauvaise évaluation des hauteurs et des distances (Bertamini et al. 1998; Li et al. 2001 ; Matin et Li, 1995 ; Ooi et al. 2001 ; Sedgwick, 1973). Les travaux de Bringoux et al. (2008) soulignent également l'influence d'une telle mésestimation dans l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts. Nous reviendrons plus amplement sur ce point dans le développement du chapitre 2.2.

1.2.5. La dissociation des référentiels spatiaux comme paradigme d'étude

La perception des références terrestres constitue un élément clef dans la manière dont les individus se représentent l'espace géocentré. Une manière de mieux comprendre comment les individus appréhendent l'espace est d'effectuer une dissociation physique entre les différents systèmes de références spatiaux, allocentré, géocentré et égocentré. Ce type d'expérimentation est notamment rendu possible par la manipulation du contexte postural et visuel présenté aux sujets. C'est précisément la question traitée dans les deux chapitres suivants intitulés « Influence posturale » et « Influences visuelles », sous-entendu, dans la perception de l'espace géocentré.

CHAPITRE 2

INFLUENCES POSTURALES

« *Quelle est l'influence du contexte postural sur la perception spatiale ?*

Pour une même action suggérée, le contexte postural peut-il modifier la relation qui lie un acteur à son environnement ? »

Nous avons vu précédemment, dans la partie dédiée à la perception des affordances, que la configuration posturale d'un individu (assise, vs debout, vs debout surélevé sur un petit support) pouvait affecter, en environnement naturel, la manière de percevoir les limites d'action dans l'estimation du franchissement d'obstacles hauts (Wagman et Malek, 2008). Par ailleurs, les travaux de Bringoux et al. (2008) suggèrent qu'en environnement visuellement appauvri, l'orientation du corps dans l'espace joue un rôle prépondérant dans l'apparition d'erreurs perceptives systématiques qui perturbent l'appréciation des références terrestres sur lesquelles s'articule la perception de l'espace géocentré.

Ce second chapitre questionne l'importance du contexte postural sur la perception spatiale géocentrale. Nous détaillerons différentes situations expérimentales pour lesquelles une modification de l'axe corporel ou d'autres segments du corps par rapport à la gravité génère l'apparition d'illusions perceptives à l'origine d'une mauvaise appréciation de l'espace géocentré. Nous présenterons pour cela différents paradigmes expérimentaux pour lesquels la manipulation du contexte postural entraîne des erreurs de perception spatiale. Dans un deuxième temps, nous chercherons à expliquer l'origine de ces phénomènes au travers des différentes hypothèses perceptives fournies jusqu'à ce jour dans la littérature. Nous questionnerons dans un troisième temps la contribution relative des différents segments corporels dans l'élaboration d'un phénomène d'attraction égocentré émergeant dans la perception spatiale géocentrale.

2.1. CONSEQUENCES DES INCLINAISONS CORPORELLES

Si l'on demande à des individus en position érigée, d'orienter une baguette selon la direction de la verticale gravitaire ou de l'horizon visuel, on s'apercevra que la perception de ces références est assez proche de la réalité physique, sans différence réelle que l'on soit dans le noir ou en pleine lumière. Pour un sujet sain, debout et immobile dans l'obscurité, la VVS dévie seulement de 1° maximum par rapport à la verticale gravitaire (Asch et Witkin, 1948a ; 1948b). L'HVS, quant à lui, même s'il est légèrement moins précis, est tout de même estimé en moyenne à -2° en dessous du véritable horizon physique (MacDougall, 1903 ; Howard, 1986). Par contre, dans le noir complet, la perception de ces mêmes références spatiales devient beaucoup moins précise dès lors que l'axe du corps se retrouve décorrélé de celui de la gravité.

La perception de ces références gravitaires a été étudiée de manière extensive suite à la manipulation du contexte postural de l'individu. Ces manipulations concernent principalement l'orientation du corps en roulis, et à moindre échelle en tangage. Des paradigmes de centrifugation ont également été mis en place dans le but d'étudier l'influence de la direction de la force gravito-inertielle sur la perception des références géocentriques. Nous nous attacherons dans les paragraphes suivants à décrire les effets de ces manipulations posturales sur la perception de la verticale visuelle et de l'horizon visuel, et des répercussions qu'elles engendrent sur l'estimation du franchissement d'obstacles hauts.

2.1.1. Inclinaisons corporelles en roulis et estimation de la verticale visuelle

Mise en évidence des effets Aubert et Müller

Les effets d'une orientation posturale sur la perception de l'espace géocentré ont été décrits pour la première fois en 1861 par un chercheur Allemand du nom de Hermann Aubert. L'histoire veut que ce chercheur s'aperçut qu'un rayon de lumière traversant l'obscurité de son laboratoire se déplaçait subjectivement en sens inverse de ses mouvements de tête. Cette observation constitue un premier rapport de l'influence d'une inclinaison céphalique sur la perception spatiale géocentrique. Par la suite, en 1888, Mulder décrivit un effet inverse de celui évoqué précédemment dans le cadre d'inclinaisons de tête plus faibles que celles décrites par Aubert. Ces travaux, repris en 1916 par Müller,

permettent aujourd’hui de distinguer deux phénomènes perceptifs rendus célèbres au fil des décennies. Il s’agit des effets « Aubert » et « Müller ».

Les effets Aubert et Müller ont été principalement mis en évidence dans l’estimation de la verticale visuelle pour les inclinaisons corporelles ou céphaliques en roulis. Les sujets sont installés dans l’obscurité avec pour seul élément visuel une baguette lumineuse pour effectuer leurs ajustements. Afin de limiter les artefacts expérimentaux, la baguette se trouve généralement en face du point de fixation oculaire. Dans la littérature, ces effets sont principalement observés pour des inclinaisons passives d’orientation corporelle sans maintien actif de la position posturale manipulée.

Initialement mis en évidence dans l’estimation de la verticale visuelle pour les inclinaisons corporelles ou céphaliques en roulis, la dénomination « d’effet Aubert » a par la suite perdurée pour désigner une tendance à déplacer la verticale gravitaire dans la direction de l’axe du corps ou de tout autre segment corporel incliné. La baguette verticale, qui est pourtant strictement immobile, est perçue en sens inverse de l’inclinaison du sujet (**Figure 2.1.a**). L’ajustement qui s’en suit s’effectue alors dans la direction de l’orientation du corps (Aubert, 1861 ; Bauermeister, 1964, Bischof et Scheerer, 1970 ; Ebenholtz, 1970 ; Howard et Templeton, 1966 ; Mittelstaedt, 1983 ; Müller, 1916 ; Witkin et Asch, 1948). De manière générale, l’effet Aubert est observé pour des angles d’inclinaison importants (souvent supérieurs à 60°).

La dénomination « d’effet Müller » ou « effet E » est utilisée quant à elle pour désigner un comportement inverse, c'est-à-dire un phénomène de répulsion de la verticale gravitaire par rapport au segment corporel incliné. La baguette, toujours immobile, est perçue comme se rapprochant du sujet. L’ajustement qui s’en suit engendre alors un positionnement de la verticale subjective dans la direction opposée au segment incliné. L’effet Müller apparaît pour des angles d’inclinaison faibles (généralement inférieurs à 60° ; Bauermeister, 1964, 1978 ; Müller, 1916; Templeton, 1973 ; Howard, 1982 ; Ohlmann, 1988 ; Witkin et Asch, 1948).

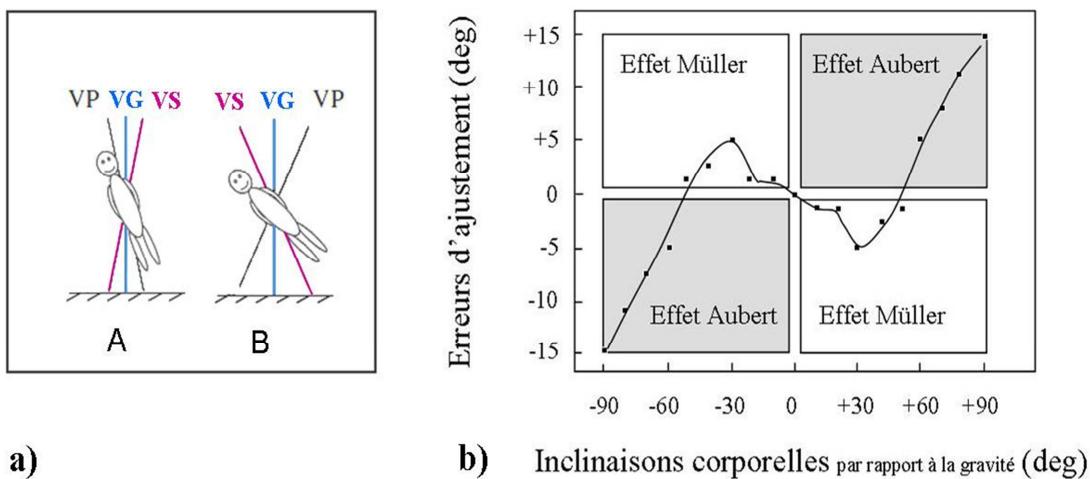


Figure 2.1. a) Effets résultants de l'inclinaison de l'axe corporel : en A, Effet Müller ; en B, Effet Aubert. VG : Verticale gravitaire ; VP : Orientation perçue d'une baguette placée à la verticale gravitaire et VS : Verticale subjective ; (Figure tirée de Ceyte 2006). b) Erreur d'estimation de la verticale visuelle en fonction de l'orientation du corps. Courbe théorique des erreurs d'ajustement d'une baguette, (d'après Bauermeister, 1964).

Si la majorité des études s'accorde pour définir la zone de transition pour le passage d'un effet à l'autre autour de 60° d'inclinaison (Figure 2.1.b ; Lackner, 1978 ; Bauermeister, 1964), il convient toutefois de noter que cette zone n'est pas rigide. Certaines études décrivent la transition autour de 30° d'inclinaison (Udo de Haes, 1970 ; Young, 1984). D'autres la situent autour de 80° d'inclinaison (Miller et al. 1968). Parfois même, certaines études ne montrent pas d'effets Müller, mais uniquement un effet Aubert qui apparaît précocement pour des angles d'inclinaisons de faible amplitude (Schöne, 1964 ; Wade 1972). Il semblerait d'autre part que cette zone de transition soit équivalente pour perception de la verticale visuelle en roulis et en tangage (Ebenholtz, 1970 ; Mittelstaedt, 1983 ; Ohlmann, 1988). Voyons maintenant si de pareils effets se produisent sur la perception de l'horizon visuel pour des inclinaisons corporelles en tangage.

2.1.2. Inclinaisons corporelles en tangage et estimation de l'horizon visuel

Equivalence de l'effet Aubert

Comparé au grand nombre d'études effectuées sur la VVS lors d'inclinaison posturale en roulis, l'inclinaison en tangage est une modalité d'orientation posturale qui a été beaucoup moins étudiée dans la littérature. Ebenholtz (1970) est le premier à s'être intéressé à la perception de la VVS lors d'inclinaisons corporelles en roulis et en tangage (Figure 2.2.a). Les résultats montrent que les effets Aubert et Müller apparaissent tout aussi bien pour les deux types d'inclinaison. Par la suite, Ito et Gresty (1997) se sont intéressés à l'orientation des objets perçus lors d'inclinaisons du corps en tangage. Plus

précisément une relation de proportionnalité est mise en évidence entre l'angle d'inclinaison du corps et l'ajustement d'un cube à la verticale (**Figure 2.2.b**).

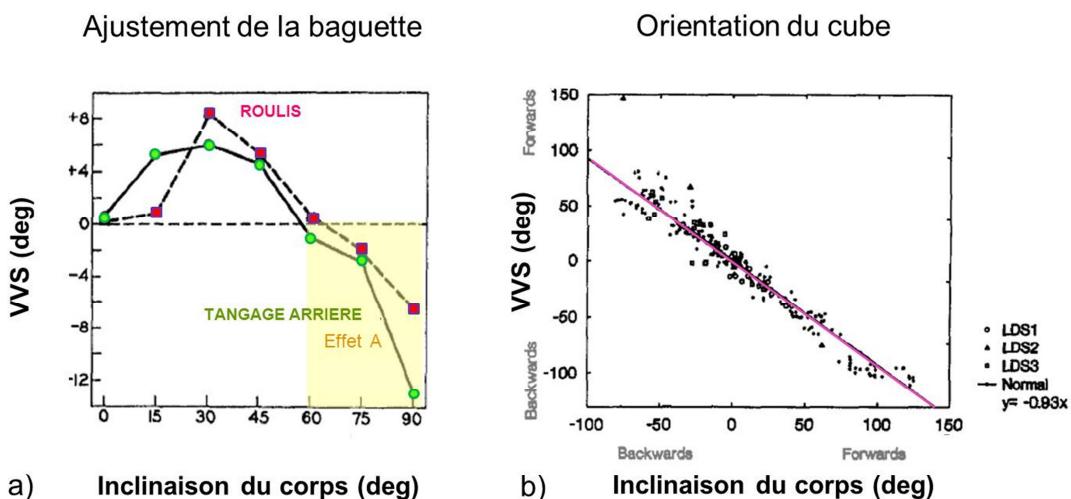


Figure 2.2. VVS en fonction de l'inclinaison du corps, a) pour des inclinaisons en roulis sur la droite ou en tangage arrière (d'après Ebenholtz, 1970). Les erreurs positives obtenues lors d'une inclinaison arrière pour des angles compris entre 0° et 45° indiquent que la barre est perçue verticale à la suite d'un ajustement dépassant la verticale physique (effet Müller). Les erreurs négatives représentent la tendance opposée, à savoir une rotation de la barre dans la direction de l'inclinaison du sujet (effet Aubert). La distribution des effets Aubert et Müller semble assez analogues pour les deux modalités d'inclinaison. b) Ajustement de l'orientation d'un cube à la verticale en fonction de l'inclinaison du corps en tangage (pour 12 sujets normaux et 3 patients LDS ; d'après Ito et Gresty, 1996).

Enfin, les études de Bringoux et al. (2004 ; 2007 ; 2008) ont permis de mettre en évidence des effets d'orientation du corps sur la perception de l'HVS lors d'inclinaisons en tangage. Les sujets assis dans le noir sur une chaise inclinable en tangage avaient pour consigne d'estimer le HVS pour différentes orientations de corps. L'estimation pouvait s'effectuer de manière directe par l'ajustement d'un faisceau laser sur la référence subjective ou bien de manière indirecte au moyen d'un protocole de psychophysique visant à déterminer la référence subjective par un enchaînement de présentations-réponses à choix forcé.

Indépendamment de l'orientation du corps, les travaux de Bringoux et al. (2004 ; 2008) montrent un abaissement général de l'HVS par rapport à l'horizon physique, reflétant ainsi une sous-estimation de la référence géocentrale. Précédemment, MacDougall (1903) avait déjà noté un abaissement de l'HVS pour des sujets debout dans le noir et non inclinés. Une relation linéaire est d'autre part mise en évidence par les auteurs entre l'HVS et l'angle d'orientation du corps. Précisément, plus le corps est

incliné en avant, plus l'HVS est abaissé par rapport à l'horizon physique (i.e., sous-estimation de l'horizon physique). A l'inverse, cette sous-estimation diminue lorsque le corps est incliné en arrière. En d'autres termes, l'orientation du corps exerce un effet « d'attraction » de la référence géocentrale subjective en direction de l'axe corporel incliné. Cet effet s'apparente de très près à l'effet Aubert décrit plus haut dans l'estimation de la verticale visuelle. Il apparaît néanmoins pour des angles d'inclinaisons plutôt faibles compris entre -20° vers l'avant et +30° vers l'arrière (**Figure 2.3.**)

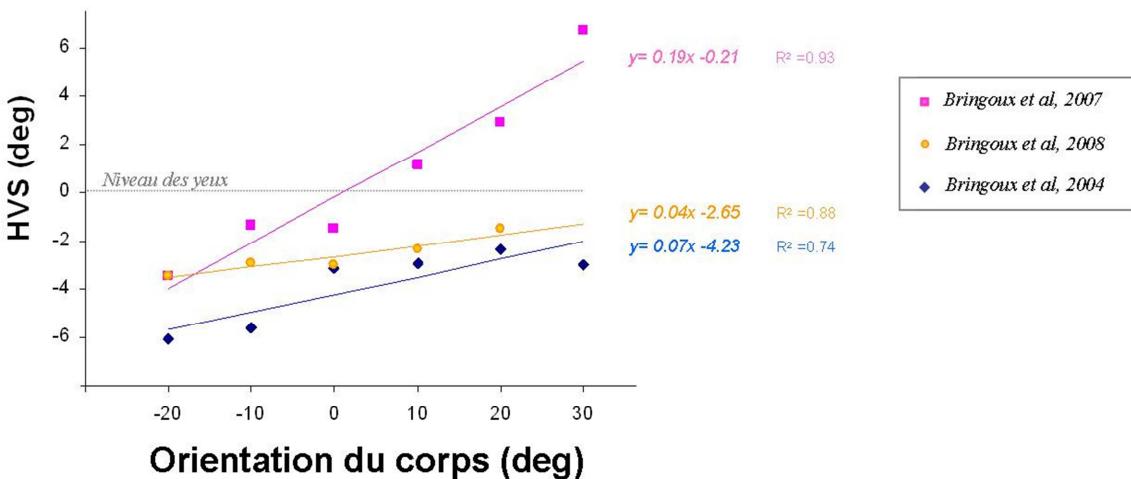


Figure 2.3. L'HVS en fonction de l'orientation du corps. D'après Bringoux et al. (2004 ; 2007 ; 2008). Les résultats montrent une relation de proportionnalité entre l'angle d'orientation du corps et l'estimation de la référence géocentrale dans le panel d'angles testés. Les études de 2004 et 2008 montrent un effet de l'orientation du corps comparable sur l'HVS, avec un abaissement général de la référence subjective par rapport à l'horizon visuel physique. L'étude de 2007, réalisée sur une population vieillissante (de 60 ans et plus), souligne une influence égocentrique plus importante chez les sujets âgés.

Répercussions dans l'estimation du franchissement d'obstacles hauts

Dans leur étude de 2008, Bringoux et al. ont confirmé l'existence d'une influence linéaire similaire, directionnellement signée, de l'inclinaison du corps sur la perception des hauteurs et des possibilités de franchissement d'obstacles hauts en environnement visuel appauvri. Un effet Aubert similaire s'observe dans la détermination de l'HVS et dans l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts. Précisément, lorsque les individus sont penchés en avant, ils surestiment la hauteur des obstacles et lorsqu'ils sont inclinés en arrière, cette surestimation est diminuée (**Figure 2.4.**).

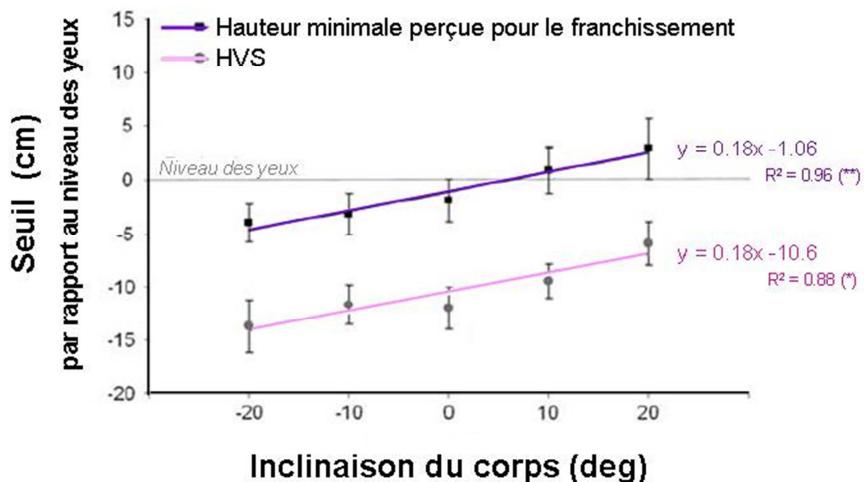


Figure 2.4. Estimation de l'horizon visuel et de la hauteur minimale de franchissement en fonction de l'orientation du corps. Les droites de régression parallèles suggèrent que l'HVS constitue une référence dans l'estimation du franchissement d'obstacles. L'écart constant entre les deux droites montre que les sujets ne prennent pas en compte les changements de l'écart qui sépare le niveau des yeux du sommet de leur crâne pour les différentes inclinaisons ; (d'après Bringoux et al. 2008).

Ces résultats traduisent l'existence de processus perceptifs identiques pour l'estimation des hauteurs d'obstacles et le jugement des capacités de franchissement. Ils montrent également que l'HVS constitue certainement une référence commune aux estimations de la hauteur et du franchissement d'obstacles. Ainsi, pour juger du franchissement d'un obstacle, l'individu estimerait la hauteur de l'obstacle par rapport à l'HVS (**Figure 2.5.**). Il tiendrait ensuite compte de la distance entre ses yeux et le haut de son crâne pour estimer la faisabilité du franchissement. La perception de cette dimension égocentrique est maintenue constante pendant l'inclinaison du corps ; en témoignent les travaux de Bringoux et al. (2008) qui montrent un écart constant entre les estimations de l'HVS et des capacités de franchissement en fonction de l'orientation du corps.

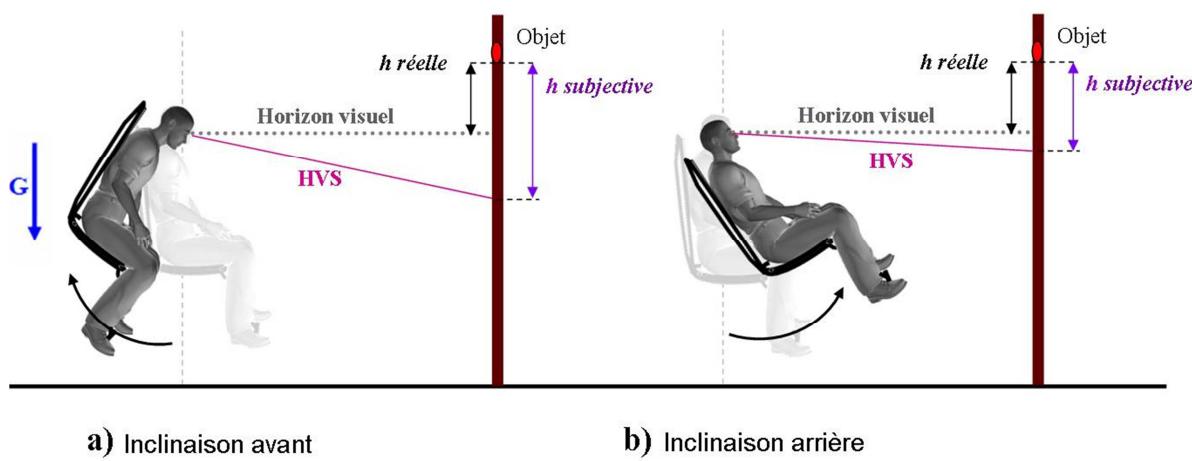


Figure 2.5. Estimation de l'horizon visuel et de la hauteur minimale de franchissement en fonction de l'orientation du corps. L'HVS constitue une référence commune aux estimations de la hauteur et du franchissement d'obstacles. Pour juger du franchissement d'un obstacle, l'individu estime la hauteur de l'obstacle par rapport à l'HVS. Une sous-estimation de l'HVS induit une surestimation de la hauteur de l'objet (h subjective $>$ h réelle). Cette surestimation diminue pour des inclinaisons de corps vers l'arrière.

2.1.3. Influences segmentaires

Un grand nombre d'études souligne une influence systématique de l'orientation du corps entier sur la perception de l'espace géocentré. Néanmoins, le corps entier étant constitué d'un agencement de nombreux segments, d'autres études ont cherché à démontrer l'influence d'effets segmentaires spécifiques sur la perception de l'espace géocentrée (Aubert, 1861; Guerraz et al. 1998 ; Mittelstaedt 1983 ; Templeton, 1973 ; Wade, 1968 ; 1969, 1970, 1972 ; Witkin et Asch, 1948). Ceci a notamment été rendu possible par la manipulation de différents types de configurations posturales, allant de l'orientation de la tête seule et du tronc seul par rapport à la gravité, à la manipulation conjointe de l'orientation de la tête et du tronc en sens inverse ou dans des plans différents.

De manière unanime, toutes ces études ont révélé l'existence d'influences égocentriques spécifiques issues de différentes parties du corps sur la perception de l'espace géocentré. L'axe Z de la tête et l'axe Z du tronc semblent constituer des références égocentriques déterminantes dans la perception de l'espace géocentré (Aubert, 1861; Guerraz et al. 1998 ; Templeton, 1973 ; Wade, 1968 ; 1969, 1970, 1972 ; Witkin et Asch, 1948). Aussi, il est communément admis que les effets égocentriques issus principalement de l'orientation de la tête et du tronc, puissent, en association avec d'autres facteurs,

contribuer à l'élaboration d'une référence égocentrale résultante s'exerçant sur la perception géocentrale. Pour de nombreux auteurs, cette référence résultante peut être assimilée à l'axe Z corporel lorsque le corps est orienté en position érigée. En position assise, Ito et Gresty (1997) suggèrent que cette dernière puisse s'établir sur la base d'une ligne reliant les jambes à la tête des sujets. Quoi qu'il en soit, ces études soulignent la nécessité de considérer la configuration posturale comme un facteur tout aussi important que le facteur orientation dans la perception de l'espace géocentré.

La question relative à la nature de ces références segmentaires et leur mode de combinaison reste toutefois posée. Aussi, de nouvelles études semblent nécessaires pour répondre de manière plus complète à ces questions. Se pourrait-il par exemple que le plan du regard, référence déterminante dans la perception égocentrale (Poljac et van den Berg, 2005) puisse également contribuer à la perception de l'espace géocentré ? Il pourrait être en outre particulièrement intéressant de questionner le mode de combinaison des effets tête, tronc et plan du regard dans la perception de l'espace géocentré. C'est précisément dans ce but que les études 1 et 2 de ce présent manuscrit ont été réalisées.

2.2. INFLUENCE DE LA CENTRIFUGATION

Un autre paradigme fréquemment utilisé pour questionner les incidences posturales sur la perception spatiale implique la centrifugation de l'observateur (Carriot et al. 2006 ; Cohen, 1973 ; DiZio et al. 1997 ; Lackner et Graybiel, 1980 ; Paillard, 2010; Schöne, 1964 ; Tribukait et Eiken, 2005 ; Welch et al. 1996). Ce paradigme permet en effet de décorrélérer l'axe corporel de la direction gravito-inertielle résultante, afin de mettre à jour les effets de cette décorrélation sur des jugements de directions géocentriées.

2.2.1. Cabine non pendulaire

Dans l'obscurité, l'accélération résultante est confondue par le sujet avec l'accélération gravitationnelle. Si le sujet est face ou dos au centre de rotation dans une cabine non-pendulaire, il a l'impression d'être penché dans le plan sagittal (respectivement en arrière ou en avant ; **Figure 2.6.**). Il s'agit de l'illusion dite somatogravique (Clément, 2001). La VVS est alors décalée dans le sens du vecteur

gravito-inertiel (Clark et Graybiel, 1963). Si le sujet est assis face à l'axe de rotation, cela entraîne un abaissement de l'HVS de -8° à -12° par rapport à la référence physique pour une force gravito-inertiale dont la magnitude atteint $9,95\text{m.s}^{-2}$ (Raphel et Barraud, 1994; Raphel et al. 1996). Cet abaissement de l'HVS peut alors être mis en relation avec le mouvement illusoire d'élévation d'une cible visuelle, phénomène mieux connu sous le terme d'illusion oculogravique (Graybiel, 1952 ; Clément, 2001). Ce phénomène s'explique au niveau physiologique par les actions mécaniques des stimulations otolithiques (Miller et Graybiel, 1966 ; Wade et Schöne, 1971). D'un point de vue phénoménologique, l'illusion oculogravique est communément annoncée comme un corrélat de l'illusion somatogravique. Le terme d'illusion reste toutefois à nuancer, l'appareil vestibulaire ne pouvant pas distinguer les effets inertIELS d'une accélération linéaire de ceux de la gravitation, la résultante gravito inertIELLE en l'absence d'information visuelle est alors considérée comme une verticale de substitution, et l'HVS, la perpendiculaire à cette nouvelle verticale.

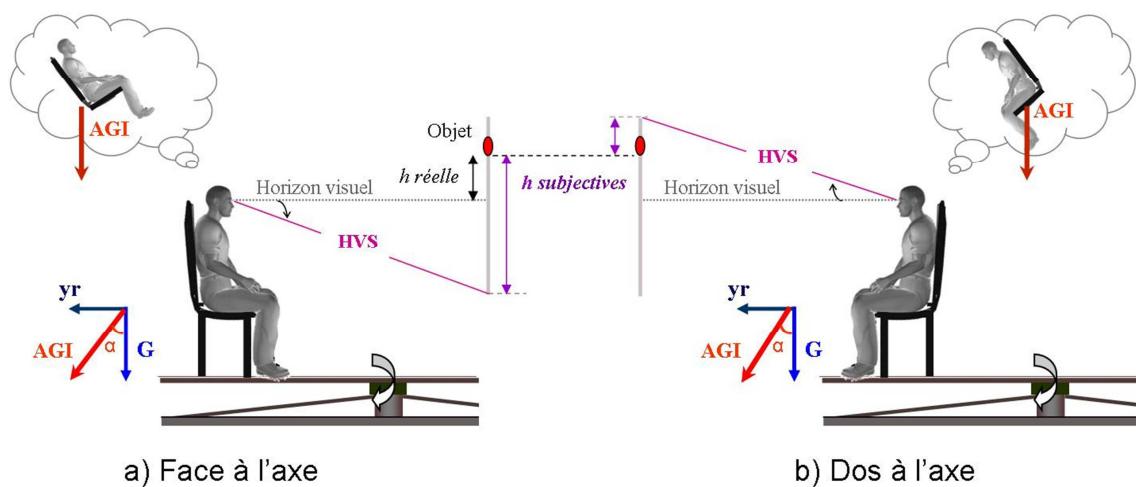


Figure 2.6. Lorsque l'environnement inertiel est supérieur à 1G, les limitations des systèmes sensoriels peuvent causer une perception erronée de l'orientation du corps dans l'espace. Il s'agit de l'illusion somatogravique (Clément, 2001). Les sujets intégrant AGI comme la nouvelle verticale se sentent inclinés dans la direction de la force centrifuge de la valeur de l'angle de la résultante AGI. Le corrélat visuel de l'illusion somatogravique est le changement de la position apparente des objets visuellement perçus. Il s'agit de l'illusion oculogravique (Graybiel, 1952).

2.2.2. Cabine pendulaire

Lors d'une centrifugation en cabine pendulaire, l'orientation du corps est toujours alignée sur la résultante gravito-inertielle. La VVS n'est pas affectée par les conditions d'hypergravité lorsque la cabine et l'observateur sont inclinés en roulis. Les jugements traduisent en effet une estimation précise de la direction prise par la résultante gravito-inertielle (Clark et Graybiel, 1968), ce qui est une conséquence physique du milieu plutôt qu'une erreur perceptive (Bischof, 1974 ; Howard et Templeton, 1966). Par contre, l'augmentation de l'intensité du champ gravitaire entraîne une augmentation de l'effet de charge du corps. Cet effet de charge influence l'HVS. Ainsi, des travaux ont montré que l'HVS est déviée de -17° à -24° lorsque l'intensité du champ gravitaire est de 2G (Tribukait et Eiken, 2005; Schöne, 1964).

La première partie de ce chapitre s'est attachée à décrire deux types d'illusions perceptives affectant principalement la perception de références géocentriées dans des paradigmes permettant de décorrérer l'axe du corps avec la verticale gravitaire (ou gravito-inertielle). Nous nous attacherons dans la partie suivante à déterminer l'origine de ces phénomènes aux travers des principales hypothèses explicatives avancées jusqu'à présent dans la littérature.

2.3. ORIGINE DES EFFETS D'INCLINAISONS CORPORELLES

Au regard des effets précédemment mis en évidence dans le cadre d'une manipulation de la position du corps dans l'espace, plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer l'influence du contexte postural sur la perception spatiale géocentriée.

2.3.1. Des erreurs de jugements géocentriés résultant d'une mauvaise estimation de l'orientation du corps ?

La première hypothèse avancée dans la littérature soutient l'existence de processus sériels entre l'estimation de l'orientation du corps dans l'espace et la perception des références égocentriées (**Figure 2.7.**). La perception erronée des références géocentriées est alors présentée comme la conséquence directe d'une mauvaise estimation de l'orientation

du corps dans l'espace (Day et Wade, 1969 ; Howard et Templeton, 1966 ; Parker et al. 1983 ; van Beuzekom et van Gisbergen, 2000).

Ainsi, selon cette hypothèse, pour de faibles inclinaisons, l'effet Müller peut s'expliquer par la sensation qu'a le sujet d'être plus incliné qu'il ne l'est réellement par rapport à la gravité. En d'autres termes, l'angle α séparant l'axe du corps de la verticale gravitaire apparaît surestimé (l'angle perçu $\alpha' > \alpha$). Reporté à la position d'inclinaison réelle du sujet, cette surestimation α' induit une déviation de la VVS au-delà de la verticale gravitaire. Cette explication semble tout à fait cohérente avec le fait que le sujet « repousse » la baguette à l'opposé de son inclinaison corporelle.

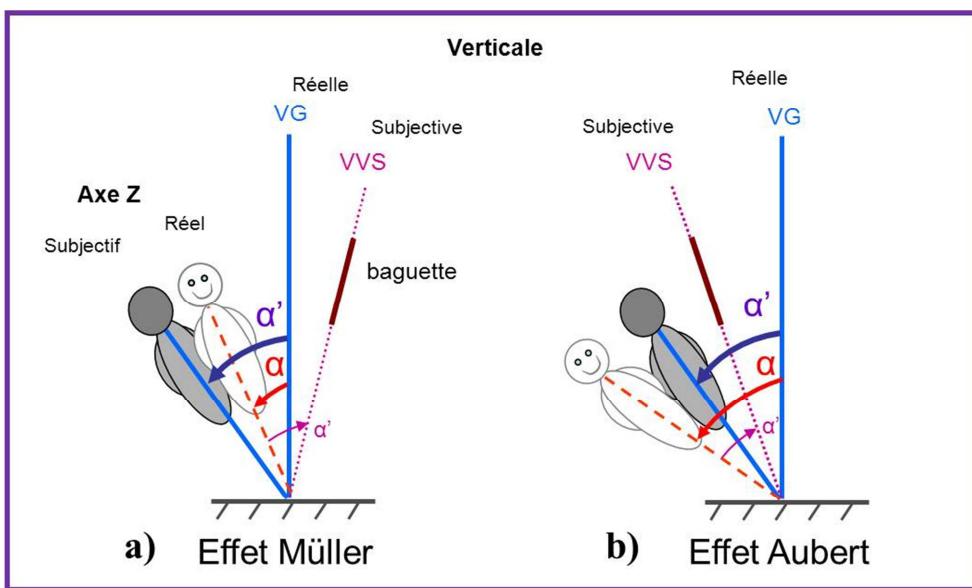


Figure 2.7. Les effets Aubert et Müller peuvent s'expliquer par une différence dans l'inclinaison corporelle ressentie (silhouette grise) a) Effet Müller : Pour des faibles inclinaisons, l'angle d'inclinaison de corps est surestimé ($\alpha > \alpha'$). Reporté à l'axe réel du corps, α' entraîne une déviation de la VVS en direction opposée à l'inclinaison du corps. La baguette est « repoussée » au-delà de la verticale gravitaire. b) Effet Aubert Pour des inclinaisons plus prononcées, l'angle d'inclinaison de corps est sous-estimé ($\alpha < \alpha'$). Reporté à l'axe réel du corps, α' entraîne une déviation de la VVS dans la direction de l'inclinaison du corps. La baguette est « attirée » vers l'axe du corps.

A l'inverse, pour des inclinaisons plus importantes, l'effet Aubert peut s'expliquer par la sensation qu'a le sujet d'être moins incliné qu'il ne l'est réellement par rapport à la gravité. L'angle α séparant l'axe du corps de la verticale gravitaire apparaît alors sous-estimé (l'angle perçu $\alpha' < \alpha$). Reporté à la position d'inclinaison réelle du sujet, cette sous-estimation α' induit une déviation de la VVS dans le sens de l'inclinaison du corps. Cette explication semble également cohérente avec le fait que la baguette soit « attirée » dans la direction de l'axe du corps.

En accord avec cette première interprétation, les erreurs perceptives associées à l'estimation de la verticale visuelle ou de l'horizon visuel pour une orientation de corps spécifique ont tout d'abord été imputées aux propriétés physiologiques des différents systèmes sensoriels dès lors que l'axe Z du corps quitte l'axe la gravité. Cette première explication semble assez cohérente avec l'apparition de l'effet Müller, qui, instable et très labile, tend à se transformer en effet Aubert au cours d'une inclinaison corporelle prolongée. Cette explication semble également cohérente avec l'apparition de l'effet Aubert, qui, plus stable et plus prononcé, peut être expliqué par une diminution de la sensibilité des systèmes sensoriels (principalement otolithique et somesthésique) au cours de l'inclinaison, aboutissant à une diminution de la sensation d'inclinaison par rapport à la gravité (Lechner-Steinleitner, 1978; Schöne, 1964; Young, 1984).

L'hypothèse d'une origine otolithique a été pleinement supportée par Schöne (1964) pour expliquer l'émergence des deux effets. Les forces de cisaillement agissant à angle droit sur les cellules ciliées otolithiques agiraient comme le stimulus effectif contribuant directement au sens de l'orientation du corps dans l'espace (Trincker, 1962). La non proportionnalité de ces forces par rapport à l'inclinaison suppose notamment que la courbe des effets suive une fonction sinusoïdale. Les erreurs d'ajustements géocentrés ont en outre été imputées en partie au réflexe de contre-cyclotorsion oculaire, également déclenché par le vestibule, dès lors que la tête quitte l'axe de la gravité. Ce mouvement reflexe des yeux, réalisé dans la direction opposée à l'inclinaison de la tête, est destiné préserver l'orientation du méridien rétinien la plus verticale possible malgré l'inclinaison de la tête (Day et Wade, 1969 ; Udo de Haes, 1970 ; Howard, 1982, 1986). Ce phénomène, qui tend à préserver l'orientation d'un environnement incliné aussi bien qu'un environnement normal, est également connu sous l'appellation de constance visuelle. Pour compenser ce phénomène (dont ils n'ont d'ailleurs probablement pas conscience), les sujets seraient alors amenés à décaler la baguette à ajuster sur la VVS d'un angle β entre l'axe longitudinal corporel et la verticale visuelle physique, de manière proportionnelle au degré de stimulation des organes otolithiques (voir Ebenholtz, 1970).

Enfin, d'autres auteurs supportent également l'hypothèse d'une origine proprioceptive de ces deux effets (Higashiyama et Koga, 1998; Wade, 1970). Plus particulièrement, Higashiyama et Koga (1998) soutiennent que les erreurs d'estimation de la VVS observées lorsque le corps est incliné pourraient être imputées à un phénomène

d'adaptation somatosensorielle des mécanorécepteurs cutanés et des propriocepteurs musculaires observé après un délai d'exposition posturale prolongé (entre 3 et 10 minutes). Ce phénomène aurait pour conséquence d'induire une diminution croissante de la sensibilité dans la perception de la position apparente du corps par rapport à la gravité, (i.e. l'orientation du corps est d'autant plus sous-estimée avec l'adaptation), ce qui est compatible avec la systématisation de l'effet Aubert fréquemment rapporté après un délai d'inclinaison prolongé. Cependant de nombreuses études remettent en compte cette hypothèse générale liée au fonctionnement même des capteurs sensoriels, en démontrant une inversion, une absence de symétrie ou même une absence totale des effets Aubert et Müller incompatibles avec une explication purement physiologique (Bauermeister, 1964 ; 1978 ; Poquin et al. 1995 ; Sandström, 1954 ; Wade, 1972).

Cette recherche sur l'origine des effets ne nous dit pas pour autant si une relation existe réellement entre une mauvaise estimation de l'orientation du corps et l'estimation des références géocentriques. Pour être validée, cette première hypothèse nécessite d'explorer de plus près la perception qu'ont réellement les individus de leur orientation de corps dans l'espace. L'angle d'inclinaison du corps relatif à la gravité est-il effectivement surestimé pour de faibles inclinaisons et surestimé pour des inclinaisons plus importantes ? Comment s'effectue l'ajustement effectif de la baguette au regard des positions de corps ressenties ?

La perception effective de l'orientation du corps dans l'espace

De nombreuses études ont cherché à comprendre comment les individus perçoivent, en l'absence de référence visuelle extérieure, leur orientation de corps par rapport à la gravité. Aussi, cette question a été principalement étudiée à travers deux types de paradigmes expérimentaux qui consistent d'une part à demander aux sujets d'ajuster de manière dynamique leur orientation de corps sur des références gravitaires (horizon physique ou verticale gravitaire) à partir d'une certaine inclinaison de départ (Mann et Passey, 1951 ; Mast et Jarchow, 1996 ; Mittelstaedt, 1983 ; Young, 1984); ou bien d'ajuster une baguette parallèlement à l'axe de leur propre corps (Guedry, 1992 ; Mast et Jarchow, 1996, Ceyte, 2006). Les différentes études montrent des résultats controversés selon le type de paradigme expérimental utilisé. En effet, si l'ajustement du corps sur des orientations préférentielles de l'espace (verticales et horizontale) ne semble pas poser de problème particulier aux sujets (Young, 1984), les recherches manipulant l'ajustement

d'une baguette parallèlement à l'axe du corps montrent des erreurs d'estimations beaucoup plus importantes (Bauermeister, 1964 ; Catz, 1992 ; Chassouant et al. 1994 ; Ebenholtz, 1970 ; Guedry, 1992 ; McFarland et Clarkson, 1966).

Néanmoins, Ebenholtz (1970) obtient des résultats tout à fait intéressants en proposant à ces sujets de reproduire, avec des baguettes lumineuses, l'angle perçu entre leur orientation de corps et la verticale (ce qui constitue une tâche géocentrale, et non pas égocentrale comme pour un ajustement de la baguette avec l'axe Z corporel expérimenté par Mc Farland et al. 1966 ; Bauermeister, 1964). Conjointement, une évaluation verbale, en degrés, de l'angle d'orientation estimé est demandée aux sujets. Les résultats montrent une surestimation systématique de l'orientation du corps pour des inclinaisons corporelles vers l'arrière comprises entre 0° et 90° (**Figure 2.8.**). Ces résultats, confrontés à l'apparition d'un effet Aubert entre 60° et 90° dans une tâche complémentaire d'ajustement de la VVS, ne permettent pas de valider l'hypothèse d'une relation serielle entre l'estimation de la référence gravitaire et l'orientation du corps perçue.

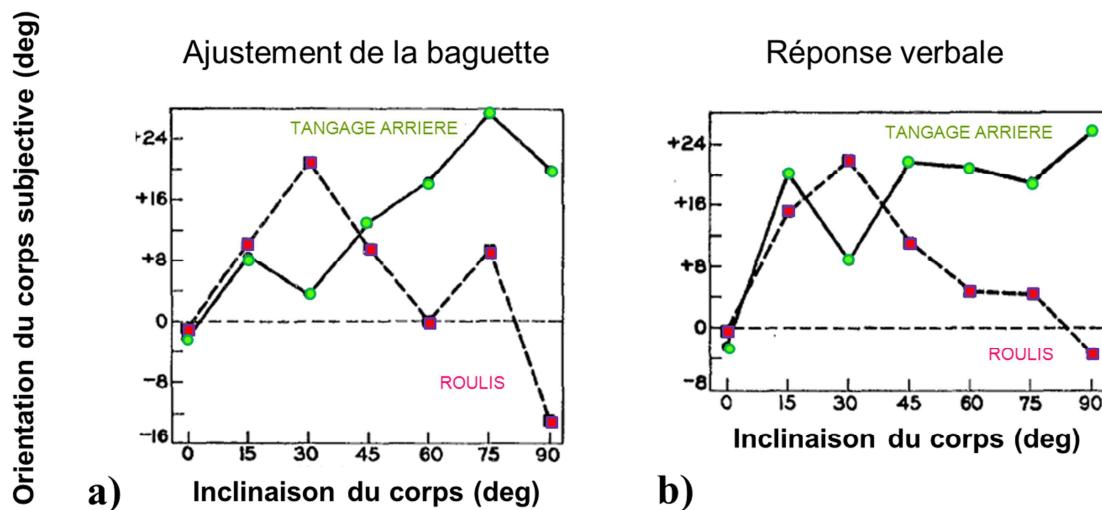


Figure 2.8. Erreur d'estimation de l'orientation du corps par rapport à l'angle correct du corps dans l'espace en fonction de l'inclinaison du corps pour des inclinaisons en roulis à droite ou en tangage arrière, (d'après Ebenholtz, 1970). a) Reproduction de l'angle d'inclinaison de corps perçu par rapport à la verticale via une tâche d'ajustement entre deux baguettes. b) Report verbal. A 0° , les valeurs positives signifient une erreur d'estimation vers l'arrière (ou cw) et négatives et vers l'avant (ou ccw). Les résultats montrent des tendances différentes entre les deux modalités d'inclinaison. Les inclinaisons arrière s'accompagnent d'une augmentation de la surestimation de l'orientation du corps. Les inclinaisons en latéral montrent une diminution de la tendance de surestimation au cours de l'inclinaison, (entre 30° et 60°) avec une sous-estimation pour des grandes inclinaisons. Les mêmes observations peuvent être appliquées pour les réponses verbales.

Des processus sériels ? Une hypothèse remise en cause

De nombreuses études impliquant l'évaluation conjointe de l'inclinaison du corps ressentie et de la référence gravitaire remettent actuellement en cause l'hypothèse selon laquelle ces deux processus seraient fortement liés (Bauermeister, 1964 ; Ceyte et al. 2009 ; Mast et Jarchow, 1996 ; Mittelstaedt, 1996; Tribukait et Eiken 2005 ; Trousselard et al. 2004). Ainsi, Bauermeister (1964) a pu montrer une inversion des effets Aubert et Müller dans l'ajustement de la VVS en roulis. Il observe un effet Aubert pour des inclinaisons d'angles inférieurs à 60°, et un effet Müller pour des angles plus grands jusqu'à 90° alors que l'ajustement d'une baguette parallèlement à l'axe du corps entraîne une surestimation systématique de l'orientation du corps par rapport à la gravité quel que soit l'angle d'inclinaison. Plus récemment, Mast et Jarchow (1996) ont montré que des sujets inclinés en roulis jusqu'à atteindre une orientation de corps perçue comme étant horizontale, ne perçoivent pas comme étant horizontale une ligne lumineuse pourtant strictement alignée avec leur axe longitudinal corporel. Ainsi, alors que l'ajustement de leur corps avec la direction horizontale gravitaire semble correct, les sujets réalisent toutefois des erreurs importantes et systématiques dans l'estimation visuelle des références horizontales et verticales terrestres. De plus, d'autres études manipulant parallèlement un ajustement de la verticale posturale subjective (VPS) et de la VVS montrent des dissociations claires entre les deux références (Bronstein, 1999).

Compte tenu de ces résultats, il semblerait qu'il n'y ait pas de relation sérielle entre l'orientation du corps perçu et l'estimation des références géocentriques. Une autre explication, peut-être plus cognitive, peut alors être avancée pour expliquer les déviations des références géocentriques observées durant une inclinaison du corps.

2.3.2. Une attraction égocentrale dans une direction définie par l'orientation longitudinale corporelle ?

Une deuxième hypothèse supportée par la littérature soutient que les déviations perceptives observées pourraient être liées à un effet d'attraction égocentrale induit par l'orientation du corps sur l'estimation des références géocentriques (Bringoux, 2004 ; 2008 ; 2009 ; Luyat et al. 2005 ; Mitelstaedt, 1983 ; 1986). L'estimation de l'orientation du corps dans l'espace et la perception des références égocentriques sont ici présentées comme deux processus parallèles, indépendants l'un de l'autre.

Le vecteur idiotropique de Mittelstaedt

Ainsi, selon Mittelstaedt (1983 ; 1986 ; 1988) les erreurs perceptives observées dans l'estimation des références géocentriques seraient le fruit de l'interaction entre deux tendances, l'une liée au fonctionnement vestibulaire (otolithique) et qui incite le sujet à localiser la verticale subjective dans la direction, voire au-delà de la verticale gravitaire (que l'on appelle tendance gravitaire), et l'autre, qui incite le sujet à positionner la verticale subjective en direction de son axe longitudinal corporel. Cette seconde tendance, caractérisant un effet Aubert a été exprimée par Mittelstaedt en termes de tendance idiotropique.

Précisément, Mittelstaedt formalise cette hypothèse au moyen d'un modèle mathématique vectoriel, dans lequel chaque tendance (gravitaire et idiotropique) est représentée sous la forme d'un vecteur. Les erreurs commises par les personnes inclinées sont le résultat de la combinaison de ces deux vecteurs (**Figure 2.9.**).

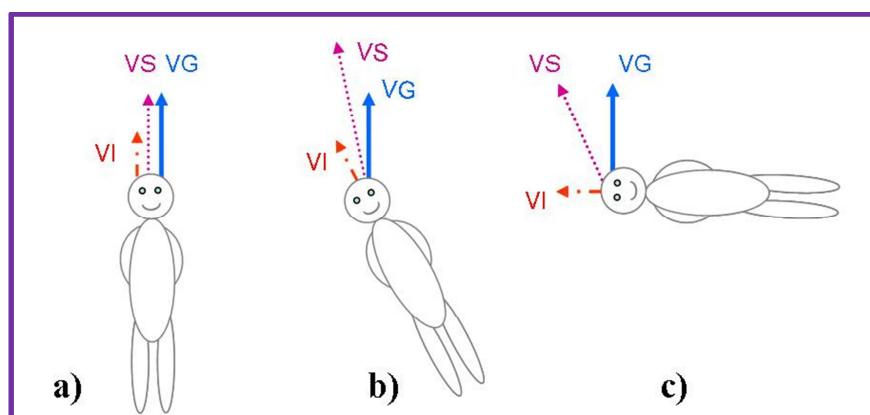


Figure 2.9. La verticale subjective **VS** est le résultat d'une combinaison vectorielle entre le vecteur gravitaire **VG** et le vecteur idiotropique **VI**. Le vecteur gravitaire est un vecteur unitaire pointant dans la direction du zénith physique. Le vecteur idiotropique pointe dans la direction de l'axe longitudinal corporel (axe Z). Ainsi, en position érigée, la verticale subjective est correctement perçue, les vecteurs **VG** et **VI** se superposant (**a**). Ce n'est pas le cas lorsque le corps est incliné (**b** et **c**).

Mittelstaedt (1983 ; 1986) propose en outre un système de pondération relatif aux différents vecteurs impliqués. Précisément, il attribue un poids constant de 1 au vecteur gravitaire, et un poids variable compris entre 0 et 1 au vecteur idiotropique. Selon lui, le poids attribué au vecteur idiotropique pourrait-être défini par le calcul de la cotangente de l'angle existant entre la verticale subjective et l'axe Z du sujet (**Figure 2.10.**). Il s'agiterait d'une constante personnelle (pondération constante), quelle que soit la modalité de perception de la verticale impliquée (haptique ou bien visuelle) et de la direction d'inclinaison du corps.

Sujets	VS	β	VI = cotangente (β)
A	15	$90-15 = 75$	0.27
B	35	$90-35 = 55$	0.7

Figure 2.10. Calcul du poids du vecteur idiotropique pour deux sujets imaginaires inclinés à 90 degrés en roulis. Avec VS, l'erreur (deg) réalisée lors de l'ajustement d'une baguette sur la direction gravitaire, β , l'angle (deg) existant entre la verticale subjective et l'axe corporel et VI, la valeur du vecteur idiotropique (Tiré de Ceyte, 2006 ; D'après Mittelstaedt, 1986).

Compte tenu de cette modélisation, l'intensité de l'effet Aubert peut être définie par une relation liant l'amplitude de l'erreur réalisée et le poids du vecteur idiotropique. En ce sens, l'effet Aubert observé sera d'autant plus fort que le poids du vecteur idiotropique sera proche de 1. Une erreur perceptive élevée sera alors observée dans la direction de l'orientation du corps. D'autre part, pour de fortes amplitudes d'orientation de corps (à partir de 130°), les vecteurs idiotropique et gravitaire tendent vers la même direction. Le modèle prévoit alors une diminution de l'effet Aubert que l'on retrouve effectivement dans les faits. Cette modélisation vectorielle conçoit la verticale subjective comme issue d'un phénomène cognitif complexe mais inconscient donnant à la référence égocentrale une importance majeure.

Une interaction entre référentiels spatiaux

Dans la continuité des travaux de Mittelstaedt, l'hypothèse selon laquelle le phénomène d'attraction égocentrale pourrait résulter d'un processus d'interaction de référentiels spatiaux est de plus en plus supportée. En effet, comme défini au chapitre 1.2, l'individu pourrait baser sa perception de l'espace sur certaines régularités attendues du monde physique impliquant notamment l'utilisation conjointe et pondérée des référentiels spatiaux égocentrés, géocentrés et allocentrés. C'est précisément la thèse soutenue par Bringoux et al. (2004 ; 2008 ; 2009) et Luyat et al. (2005) pour expliquer le phénomène d'attraction égocentrale sur l'HVS, l'effet cadre (défini au chapitre 3) ou encore l'effet de l'oblique observé dans la détermination visuelle et haptique de l'orientation des objets.

A titre d'exemple, Bringoux et al. (2004) ont expliqué la relation linéaire observée entre l'orientation du corps des observateurs et l'HVS comme l'expression d'un phénomène d'interaction entre un référentiel égocentré, défini par l'orientation du plan transverse à la tête passant par les yeux (HREL ; Stoper et Cohen, 1989 ; voir chapitre

2.1.2.), et un référentiel géocentré intégrant l'horizon gravitaire, normalement requis pour réaliser la tâche. La pente de la droite de régression linéaire renseigne alors sur la contribution pondérée du référentiel égocentré en addition avec d'autres informations dans la réalisation effective de la tâche géocentrale. Dans cette approche, une pente de 1 signifie une attraction totale de l'HVS en direction du plan de référence égocentré (le HREL). Le poids alors attribué au cadre de référence égocentré est de 100% sur les estimations visuelles. A l'inverse, une pente de 0 signifie qu'il n'y a pas d'influence de l'orientation du corps sur les jugements et donc que le poids attribué à la référence géocentrale est de 100% (**Figure 2.11.**). Ainsi, Bringoux et al. (2008) rapportent un poids constant de 20% du référentiel égocentré par rapport à l'influence du référentiel géocentré pour des inclinaisons allant de -20° vers l'avant à $+20^\circ$ vers l'arrière.

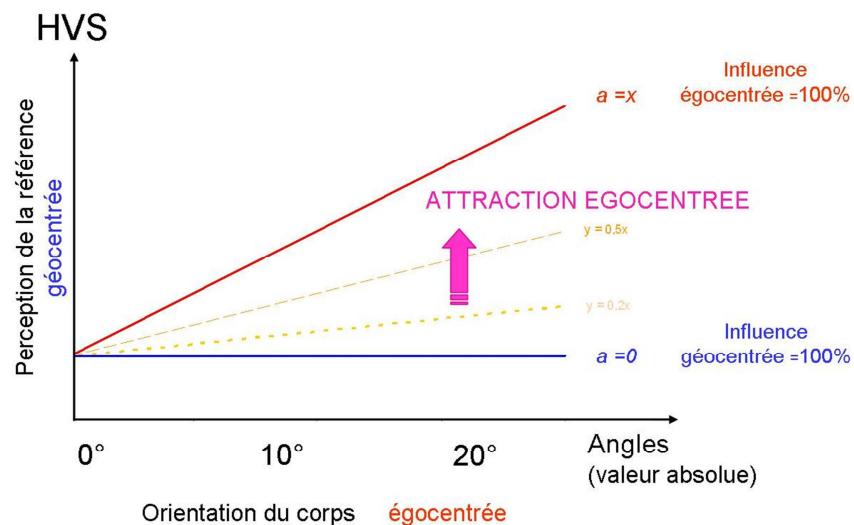


Figure 2.11. Représentation de l'HVS en fonction de l'orientation du corps. La relation linéaire observée entre l'HVS et l'orientation du corps traduit l'existence d'un phénomène d'attraction égocentrale de la référence corporelle sur la référence gravitaire subjective qui peut être interprété en termes d'interaction entre référentiels spatiaux.

Pour des valeurs de pente comprises entre 0 et 1, il semblerait que l'estimation de la référence géocentrale soit réalisée dans un référentiel composite, ou hybride constituant un état intermédiaire entre le référentiel géocentré normalement requis pour réaliser la tâche et un référentiel égocentré « perturbateur ». Cette hypothèse sera confrontée à nos résultats expérimentaux et largement débattue dans la partie discussion du présent manuscrit.

CHAPITRE 3

INFLUENCES VISUELLES

« *Quelle est l'influence du contexte visuel dans les aptitudes d'orientation spatiale ? Quel rôle joue la richesse de l'information visuelle dans la définition des relations acteur/ environnement ?* »

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le contexte postural, en environnement visuellement appauvri, pouvait modifier de manière importante la perception de l'espace géocentré. A l'image du travail précédemment présenté, ce troisième chapitre questionne l'influence du contexte visuel dans les aptitudes d'orientation spatiale géocentrale.

Selon Howard et Childerson (1994), trois types d'informations visuelles contribuent au sens de l'orientation par rapport à la gravité. Il s'agit notamment des principales lignes horizontales et verticales de l'environnement qui définissent un cadre visuel, de la polarité visuelle des objets et du mouvement visuel. Nous développerons ce troisième chapitre autour de ces trois points, en détaillant pour chacun les différents paradigmes et résultats expérimentaux qui ont pu mettre en évidence un effet du contexte visuel sur la perception de l'espace géocentré. Nous questionnerons notamment au travers de ce plan l'influence d'un enrichissement sélectif de la scène visuelle, depuis le noir complet, en passant par un l'ajout d'une structure géométrique tendant progressivement à se complexifier, jusqu'à l'insertion d'un flux optique définissant une direction de déplacement induit dans l'espace géocentré. En accord avec notre thématique de thèse, nous illustrerons nos propos au travers des répercussions engendrées par une modification du contexte visuel sur l'évaluation des hauteurs et l'estimation du franchissement d'obstacles hauts.

3.1. EFFET D'INCLINAISON DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL

3.1.1. Mise en évidence de perturbations visuelles

Comme nous l'avons évoqué au chapitre précédent, c'est dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle que les premières recherches sur l'orientation spatiale ont été initiées. Très tôt en effet dans l'histoire de la psychologie, les hommes se sont penchés, tantôt par hasard, tantôt par réelle conviction scientifique sur l'exploration de situations illusogènes ouvrant le champ des investigations concernant les effets de perturbations visuelles sur la perception de l'espace environnant.

Dans ce contexte, le célèbre paradigme de la balançoire hantée de Wood (1895), fait souvent office de travail précurseur aux recherches formelles scientifiques menées par la suite dans ce domaine. Ce paradigme, mettant en scène une nacelle statique ancrée au cœur d'une chambre mobile, offrait à ses occupants la sensation d'un déplacement propre, la nacelle restant pourtant strictement immobile lors de la mise en mouvement de la chambre (voir **Figure 3.1.**). Cette petite anecdote souligne l'importance du contexte visuel dans l'élaboration des processus qui sous-tendent la perception de l'espace et de l'orientation spatiale.

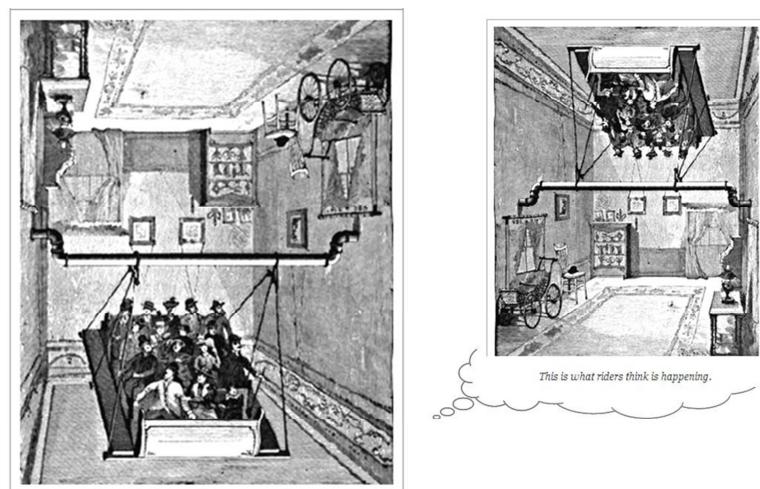


Figure 3.1. La balançoire hantée de Wood, 1895. Attraction présenté à San Francisco à l'occasion de la Midwinter International Exposition. Les visiteurs, assis dans une balançoire immobile située au cœur d'une chambre mobile (contenant un piano, des chaises, un sofa, le tout fixé aux murs et au parquet) ont l'illusion, après la mise en mouvement de la chambre entière, que la balançoire se meut. Cette illusion perceptive est accompagnée pour certains occupants des mêmes sensations de vertige que lors d'un mouvement réel de la balançoire.

Les premières études scientifiques sur le sujet se formalisent avec les travaux de Wertheimer (1912) qui a mis en évidence qu'une pièce observée à travers un miroir incliné en tangage induisait tout d'abord de fortes déviations de la VVS, (jusqu'à 20° d'angle) puis réapparaissait progressivement droite, après un cours délai d'observation. Ce type de capture visuelle conduira les auteurs de l'époque comme Koffka (1935) à souligner l'importance des éléments visuels dans des tâches d'orientation spatiale. Le champ visuel, qui crée son propre cadre de référence, exprime des directions verticales et horizontales dès lors que la scène visuelle est inclinée. Ainsi, une inclinaison de la scène visuelle serait à l'origine d'une déviation de l'HVS et VVS vers les principales directions allocentraées de l'espace incliné.

Depuis les observations de Wertheimer (1912), de nombreuses études se sont intéressées à l'effet exercé par l'orientation d'une scène visuelle sur la perception de références géocentraées et de la position relative des objets qui en découle (Asch et Witkin, 1948a ; 1948b ; Witkin et Asch, 1948; Dyde et al. 2006 ; Guerraz et al. 1998; Howard et Childerson, 1994; Mittelstaedt, 1988 ; Zoccolotti et al. 1992). Ces investigations passent notamment par l'utilisation de paradigmes expérimentaux spécifiques que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

3.1.2. Paradigmes expérimentaux

Le « Rod and frame test » pour l'estimation de la verticale visuelle

Le paradigme du « Rod and frame test » a été développé par Asch et Witkin (1948) dans le but d'étudier la VVS (voir Howard 1982 pour une revue de question). Ce paradigme demande aux sujets d'ajuster dans le noir complet une baguette lumineuse, placée au centre d'un cadre visuel incliné en roulis, dans la direction de la verticale gravitaire (**Figure 3.2.a**). Les résultats montrent une déviation systématique de la VVS dans la direction de l'inclinaison de la scène alors que dans le noir complet l'erreur d'ajustement de la VVS est de moins de 1°. Cet effet, qui s'observe aussi bien, mais sur une moindre amplitude, pour une scène visuelle richement structurée que pour un cadre visuel simple, porte le nom « d'effet cadre ».

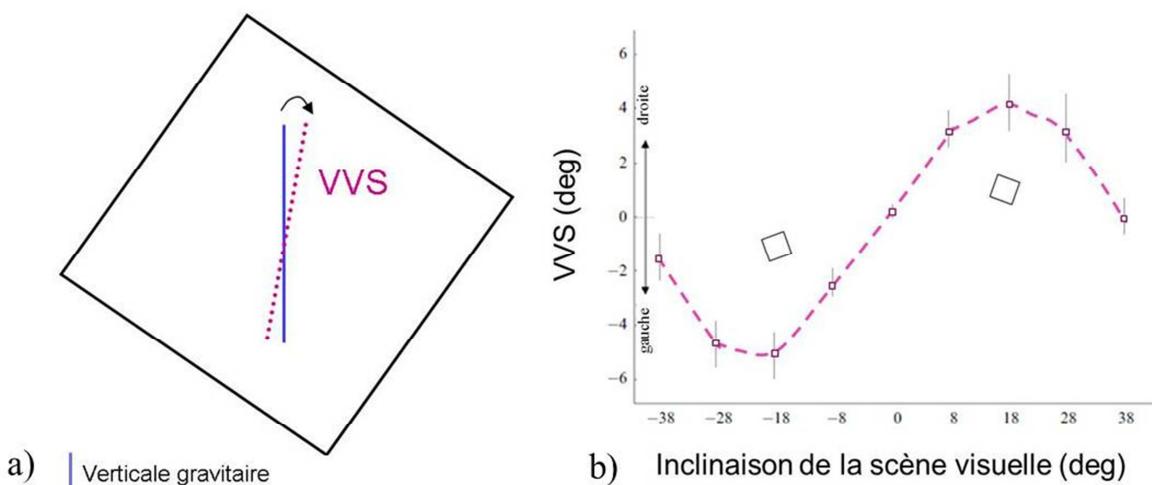


Figure 3.2. a) Illustration du « Rod and Frame test ». La tâche demandée au sujet est d'ajuster la barre dans la direction de la verticale gravitaire indépendamment de l'environnement qui l'entoure (présence ou pas du cadre et orientation du cadre). La déviation angulaire de la VVS enregistrée par rapport à la verticale gravitaire renseigne sur la dépendance du sujet à l'égard du champ visuel. **b)** Profil d'ajustement de la VVS via le « rod and frame test » en fonction de l'angle d'inclinaison d'un cadre visuel. Les données de la littérature montrent qu'une courbe sinusoïdale est classiquement obtenue (modélisation réalisée sur des données moyennes, IC= 95% ; d'après Bringoux et al. 2009).

Les déviations de la VVS permettent de quantifier l'amplitude de l'effet cadre obtenu pour chaque sujet en fonction de l'inclinaison visuelle et du type de scène présentée. Aussi, compte tenu de la grande variabilité interindividuelle observée au cours des d'ajustements, Witkin et Asch (1948) se sont principalement intéressés à l'aspect différentiel des jugements de verticalité plus qu'à l'effet cadre en lui-même. Cette démarche vise à catégoriser des populations de sujets en fonction de leur dépendance à l'égard du champ visuel de manière à identifier les stratégies cognitives utilisées (e.g., Oltman, 1968 ; voir également Ohlmann, 1988).

C'est seulement par la suite que les études se sont intéressées à la nature de l'effet cadre en lui-même. Ainsi, en multipliant les angles d'inclinaison de scène de nombreux travaux ont montré que cet effet présente généralement un aspect sinusoïdal en fonction de l'angle d'inclinaison du cadre. Dans son ensemble, cet effet montre une déviation maximale de la VVS vers l'inclinaison de la scène entre 18° et 28° d'angle visuel (**Figure 3.2.b**).

La chambre inclinée pour l'estimation de l'horizon visuel

D'autres études ont principalement questionné l'existence d'un effet cadre similaire sur l'HVS (Li et Matin, 1995 ; 1996 ; 1998 ; Matin et Fox, 1989 ; Matin et Li, 1992 ; 1994 ; 1995 ; Post et Welch, 1996 ; Post et al. 2000 ; Stoper et Cohen, 1989 ; Welch et Post, 1996). Très souvent, cette question a été étudiée via le paradigme de chambre inclinée où les murs (latéraux et frontal) et le plafond sont inclinés en tangage (Matin et Fox, 1989 ; Stoper et Cohen, 1986 ; 1989). Dans une version simplifiée, seul le mur frontal peut-être présenté (Post et al, 2000) et le sol n'est pas forcément visible (Matin et Fox, 1989). Le dispositif peut également se résumer à une boîte inclinée dans laquelle regardent les sujets (Stoper et Cohen, 1989). Il est demandé aux sujets assis face au dispositif d'effectuer une tâche d'ajustement de l'horizon visuel (**Figure 3.3.a**).

Les résultats montrent une déviation importante de l'HVS dans la direction de l'inclinaison de la scène (**Figure 3.3.b**). Rappelons que dans le noir complet et en position érigée, l'erreur d'ajustement de l'HVS est comprise entre -2° et -6° du véritable horizon physique (McDougall, 1903 ; Howard, 1986 ; Sharp, 1934 ; Stoper et Cohen, 1986). De plus la déviation observée évolue linéairement avec l'inclinaison visuelle pour une orientation de scène visuelle comprise entre -40° et $+25^\circ$ (Matin et Fox, 1989). D'autres études vérifient cette relation avec un effet cadre de l'ordre 50% de l'amplitude de l'inclinaison visuelle sur l'ajustement de l'HVS (Matin et Fox, 1989 ; Matin et Li, 1992 ; Welch et Post, 1996)

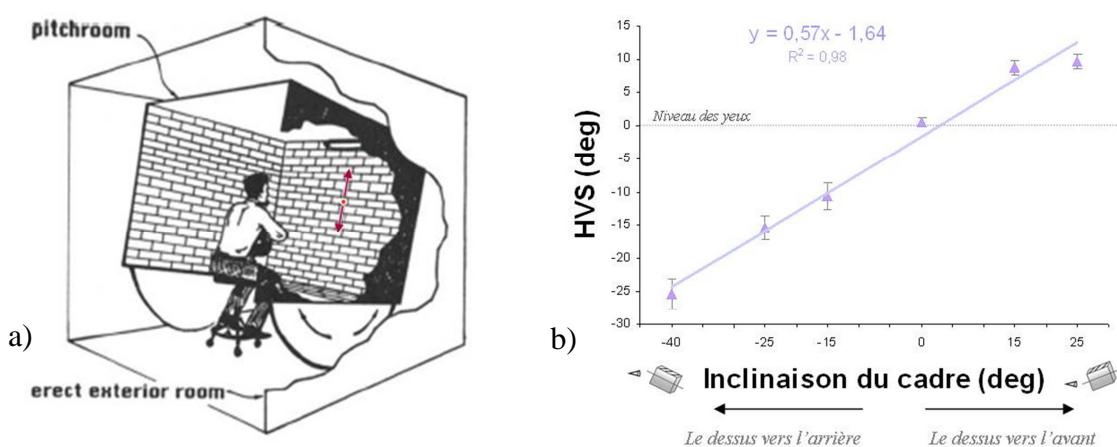


Figure 3.3. a) Illustration d'un paradigme de pièce inclinée (tiré de Matin et Fox, 1989). Les sujets sont assis dans une pièce rectangulaire inclinée en tangage dont l'intérieur est tapissé de briques. Les flèches sur le mur frontal représentent la direction d'ajustement de la cible laser pour mesurer l'HVS. Les sujets ne voient ni leur corps, ni le sol qui est caché par un rideau. **b)** HVS en fonction de l'inclinaison du cadre visuel. Droite de régression linéaire appliquée sur les moyennes ($\pm SD$; d'après Matin et Fox, 1989).

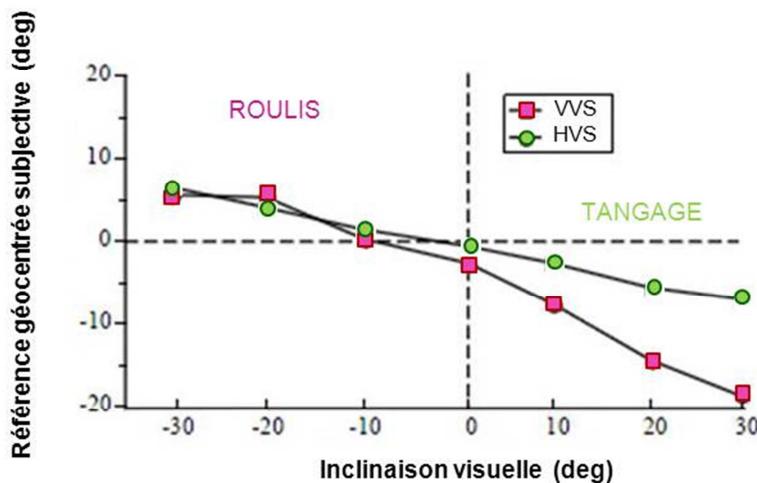


Figure 3.4. Ajustement de la référence géocentrale subjective en fonction de l'inclinaison de la scène visuelle (en roulis sur la VVS, en tangage pour l'HVS ; D'après Matin et Li, (1992, p263, figure 19).

Toutes ces études montrent un effet unanime de l'inclinaison d'une scène visuelle sur la perception de références géocentriques. Bien qu'elles manipulent des modalités d'orientations différentes (roulis ou tangage), la similarité des profils d'ajustement de la VVS et l'HVS suggère des processus perceptifs très proches pour l'estimation de ces deux références (**Figure 3.4.**). Le paragraphe suivant questionne l'influence d'un enrichissement de la structure géométrique de la scène visuelle sur la perception de ces références.

3.1.3. Effet d'un enrichissement structurel de l'espace allocentré

Nombre et orientation des lignes

Dans la continuité de ces travaux, de nombreuses études se sont intéressées à l'influence du degré de richesse de la scène visuelle sur l'amplitude de l'effet cadre dans la détermination de l'HVS. Ces études concernent dans un premier temps le nombre de lignes, leur orientation et leur luminosité (**Figure 3.5**).

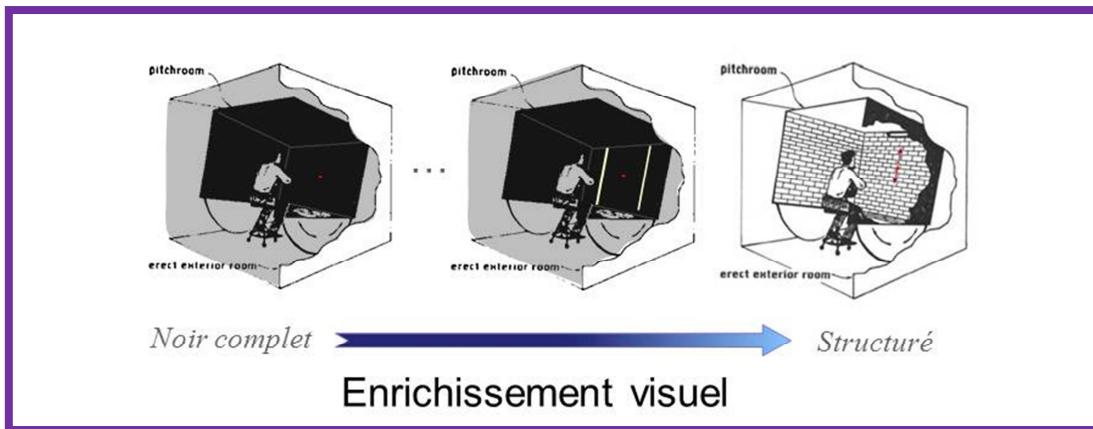


Figure 3.5. Enrichissement structurel de la scène visuelle depuis le noir complet jusqu'à l'ajout d'une surface texturée. D'après Matin et Li, (1992).

Ainsi, Matin et Li, (1992 ; 1994 ; 1995) ont montré que l'amplitude de l'effet cadre n'est pas fondamentalement affectée par le passage dans le noir de une à deux lignes verticales faiblement éclairées puis à une structure géométrique plus complexe et bien illuminée (un cadre, un pattern grillagé ou un mur de briques). On note seulement une légère augmentation de l'effet cadre qui passe respectivement de 52% à 56% et 63%. Cet effet est néanmoins plus marqué lorsqu'on passe d'une ligne horizontale à deux dans le plan fronto-parallèle aux sujets (respectivement l'effet passe de 8% pour une ligne à 18% pour deux ; Matin et Li, 1994). Ainsi, si l'orientation des lignes verticales et horizontales semble jouer un rôle sur l'amplitude de l'effet cadre, des lignes obliques quant à elles génèrent le même effet que celui délivré par des lignes verticales inclinées pour des angles d'orientation visuelle identiques (Matin et Li, 1999). Néanmoins, il convient de noter dans ces nombreuses études la relative ambiguïté des mesures perceptives effectuées. En effet, les sujets étant assis à la verticale, l'horizon visuel, référence géocentrale physique, et le plan transverse à la tête, référence égocentrale (plan perpendiculaire à l'axe de la tête passant par les yeux) sont indissociables et confondues. On peut donc s'interroger sur la nature de la variable subjective mesurée. Quel serait l'effet de l'inclinaison d'une scène visuelle (effet allocentré) sur l'HVS si on décorrélait l'axe du corps de celui de la gravité?

Taille du cadre et champ visuel

D'autres études se sont penchées sur l'influence de la taille du cadre visuel sur l'amplitude de l'effet (Ebenholtz, 1977). Ces études ont montré que l'inclinaison de cadres visuels plus grands induit des effets cadre plus importants (Brooks et Sherrick, 1994 ; Spinelli et al. 1991). Ceci est à mettre en relation avec la taille de l'image sur la

rétine (taille apparente), la projection de cadres visuels sur la rétine périphérique étant à l'origine d'un effet cadre plus important que ceux projetés à proximité de la fovea. Par conséquent si le champ visuel des sujets englobe, au-delà du cadre visuel présenté, une partie de la salle d'expérimentation éclairée dans sa périphérie, on notera une très nette diminution de l'effet cadre (presque de moitié ; Witkin et Asch, 1948), les éléments verticaux et horizontaux de la pièce dictant alors un autre cadre de référence, du plus grande taille donc plus proches de situations réelles ce qui le rend possiblement plus pertinent pour le sujet (Loomis et al. 1999).

Influence allocentré en environnement naturel

En environnement naturel, autres les directions horizontales et verticales données par les éléments qui nous entourent, d'autres directions de l'espace sont susceptibles d'exercer un pareil effet cadre. Gibson et Mowrer (1938, p 306) rapportent un effet tout à fait intéressant de l'orientation des strates géographiques bordant les flans d'un canyon sur la perception de l'angle d'inclinaison d'une rivière courant en son centre. Précisément, alors que le bateau navigue à contre-courant, ses occupants ressentent la remarquable impression de descendre un rapide. Cette sensation peut se rapporter au fait que l'orientation des strates qui déterminent les principales directions de l'espace visuel pointe elle-même à contre-courant.

Récemment, lors d'une étude de terrain et en pleine lumière, O'Shea et Ross (2007) ont questionné l'influence des pentes géographiques environnantes sur l'existence d'un effet cadre similairement observé en laboratoire sur l'HVS. En haute montagne, les randonneurs avertis connaissent l'effet de l'orientation des pentes environnantes sur l'estimation des hauteurs et des distances. L'effet cadre exercé par les pentes environnantes est à l'origine d'une surestimation ou d'une sous-estimation des hauteurs et des distances répercute sur le temps de marche estimé. O'Shea et Ross (2007) s'intéressent à ces illusions et montrent que la sous-estimation générale des hauteurs obtenue lorsque l'observateur se trouve à proximité d'une pente montante, et la surestimation des hauteurs observée lorsque l'observateur se trouve à proximité d'une pente descendante est à mettre en relation avec une surestimation ou une sous-estimation de l'HVS associé par rapport à la référence physique (**Figure 3.6.**). La pente exerce alors le rôle d'attracteur allocentré.

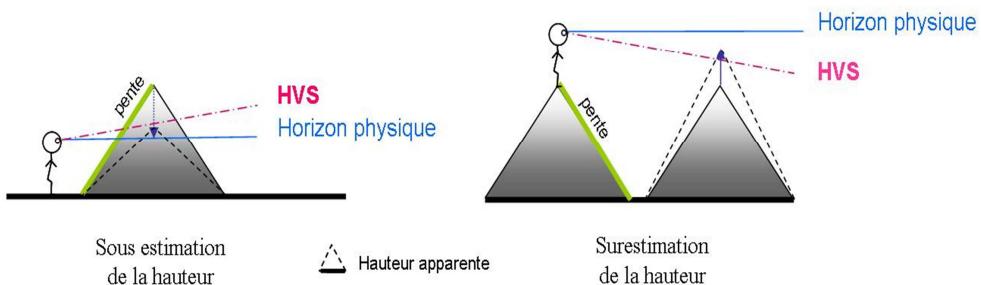


Figure 3.6. Illustration des **illusions de hauteur**, (d'après O'Shea et Ross, 2007). Le sommet d'une montagne apparaît plus bas lorsque la pente géographique environnante est montante, et plus haut lorsque la pente environnante est descendante. L'estimation de la hauteur du sommet est intimement liée à l'**HVS**. L'assimilation de ce dernier à l'inclinaison de la pente géographique environnante a des répercussions sur l'estimation des hauteurs, et par conséquent, sur l'estimation du temps de marche d'un randonneur novice pour l'atteindre!

De plus, O'Shea et Ross (2007) notent une influence linéaire de l'orientation des pentes environnantes sur l'**HVS**. Cette influence, observée pour des orientations de pentes comprises entre $\pm 7^\circ$, s'élève à 40% de la magnitude de l'inclinaison de pente, ce qui est inférieur à l'effet cadre observé dans des conditions de laboratoire (qui est, rappelons-le de 50% ; Matin et Li, 1992). Cette diminution de l'effet cadre pourrait être liée à la présence de nombreux éléments de la scène visuelle (arbres, maisons, sentiers) qui peuvent exercer un effet attracteur sur l'**HVS**. De plus, certains de ces éléments, en plus d'apporter une structure géométrique à la scène visuelle, contiennent des indices importants de polarité visuelle. Cette deuxième caractéristique concernant les informations visuelles semble également jouer un rôle important dans la perception spatiale géocentrale. C'est précisément le point abordé dans la partie suivante.

3.2. EFFET DE LA POLARITE VISUELLE

Tout élément de l'espace possédant un axe (de symétrie ou pas) permettant de faire une distinction claire entre les directions du haut et du bas égocentré est dit polaire. Dans notre environnement quotidien, les sources de polarité visuelle sont omniprésentes. Ainsi, qu'il s'agisse d'une boîte (avec un socle et un couvercle), d'une pièce (pourvue d'un sol et d'un plafond), ou d'une plante verte (avec des feuilles et des racines), de nombreux éléments usuellement droits dans notre environnement nous renseignent de manière fiable sur des directions gravitaires. Ces directions concernent la verticale gravitaire et l'horizon physique mais également le haut et le bas gravitaire. Aussi, de

nombreuses études ont cherché à définir l'influence de la polarité visuelle sur la perception des directions gravitaire. Ces études manipulent dans un premier temps l'effet de l'enrichissement matériel d'une scène visuelle au travers d'un paradigme de chambre inclinée.

3.2.1. Etude de la polarité visuelle sur la VVS

En chambre inclinée réelle

Wood (1895), comme nous l'avons vu plus haut au début de ce chapitre, a initialement souligné une forte influence de la polarité visuelle délivrée par les objets du quotidien sur la perception de l'orientation du corps dans l'espace. Rappelons-le, une pièce richement meublée placée en position inversée induit, en bouleversant les lois de la gravité, des déséquilibres vertigineux et une sensation intrigante de mouvements propres chez des observateurs passifs (voir aussi, Kleint, 1936 ; Witkin et Asch, 1948). Près d'un siècle plus tard, Howard et Childerson (1994) s'intéressent de manière expérimentale à la question en étudiant, en condition de laboratoire, l'influence de l'inclinaison d'une chambre texturée, constituée d'une part d'un intérieur faiblement polarisé tacheté de poids, et d'autre part d'un intérieur richement meublé sur la perception de l'orientation du corps dans l'espace. Les résultats montrent une sensation d'inversion de la part des sujets (sensation de rotation à 360° de l'orientation du corps) plus fréquente pendant l'inclinaison dynamique de la chambre meublée que de la « chambre à poids » (60% de sujets expérimentent cette sensation en chambre meublée contre 30% en chambre à poids). Parallèlement, l'ajustement de la VVS lors de la présentation statique d'une pièce inclinée en roulis montre un effet cadre également plus important pour la chambre richement meublée que pour la chambre à poids (**Figure 3.7.**).

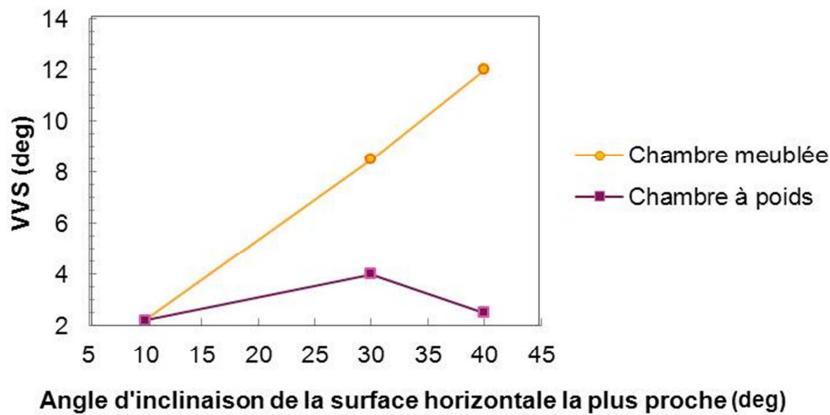


Figure 3.7. VVS en fonction de l'angle d'inclinaison de la surface la plus proche, pour une chambre richement meublée, et pour une chambre tachetée de poids (moyenne des ajustements visuels et haptiques ;d'après Howard et Childerson, 1994)

Précisément, les résultats montrent, pour les deux types de chambres, que les sujets utilisent la surface horizontale la plus proche pour déterminer ce qu'ils considèrent comme étant le « bas », et cela dans la majorité des inclinaisons visuelles. Néanmoins, et seulement dans le cas de la chambre à poids inclinée à presque 45° , les sujets semblent utiliser la diagonale du cadre comme référence pour leur ajustement. Ces résultats soulignent un effet inducteur important d'une pièce richement polarisée sur la VVS, même si la polarité apportée par les éléments de la pièce est loin d'être suffisante pour supplanter de manière consistante les informations gravitaires posturales pour des inclinaisons visuelles élevées ($> 40^\circ$).

En environnement immersif

Récemment, Bringoux et al. (2009) ont questionné l'effet de l'inclinaison d'une scène visuelle en roulis et l'influence de la polarité visuelle sur l'ajustement de la VVS en environnement immersif (**Figure 3.8.**). Les sujets ont pour consigne d'ajuster une baguette sur la verticale visuelle au moyen d'un joystick pour des scènes visuelles d'inclinaison différente et de structuration variée. Trois types de scènes sont présentés, allant du cadre simple à la pièce richement meublée. Tout comme pour des inclinaisons de chambres réelles, les résultats montrent une induction visuelle sur la VVS d'autant plus importante que la chambre est richement polarisée (**Figure 3.9.**).

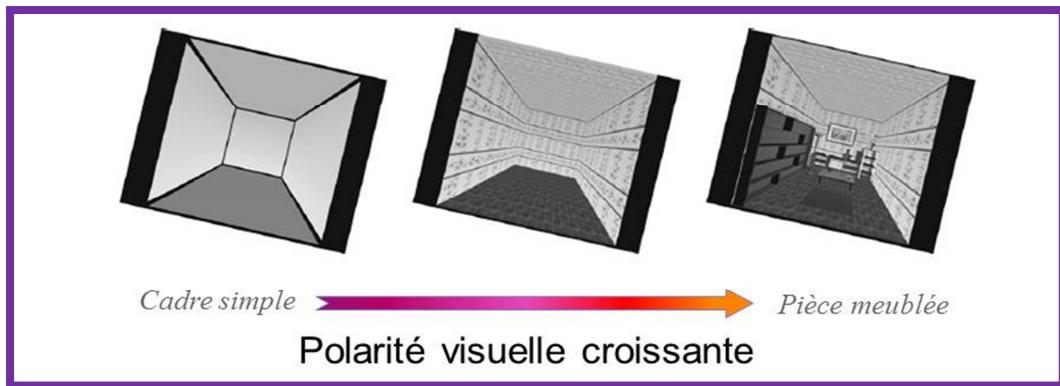


Figure 3.8. Effet cadre et effet de la polarité visuelle en environnement immersif, (d'après Bringoux et al. 2009). Les sources de polarité visuelles pour les directions du haut et du bas sont progressivement augmentées, depuis une chambre simple jusqu'à une pièce richement texturée.

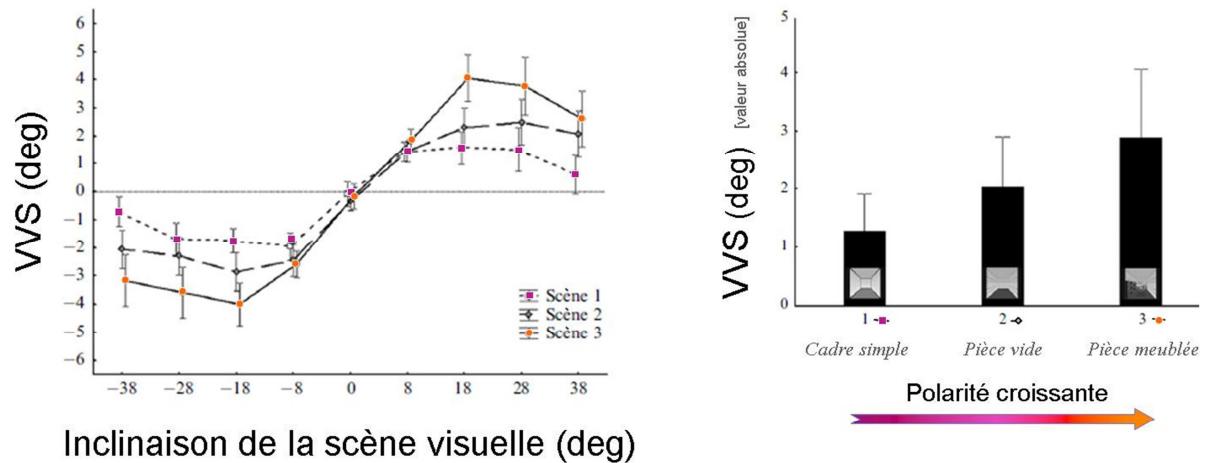


Figure 3.9. VVS en fonction de l'inclinaison du cadre pour les trois types de scènes visuelles. Les résultats montrent que les erreurs d'ajustement de la VVS par rapport à la verticale gravitaire augmentent avec le degré de polarité de la scène visuelle (d'après Bringoux et al. 2009).

3.2.2. Etude de la polarité visuelle sur l' HVS

Très peu d'études se sont intéressées à notre connaissance à l'influence de la polarité visuelle sur l'HVS. Howard (1982) rapporte tout de même une étude où des sujets, placés en face d'une scène visuelle inclinée ont pour consigne de dessiner la ligne de démarcation de la surface de l'eau dans un récipient en verre pour différentes orientations de scène visuelle polarisée. La scène est constituée d'une étagère avec des boîtes de conserves et un broc à eau. L'étude a montré que l'orientation de la scène visuelle affecte la représentation de l'HVS dans le sens de l'inclinaison du broc (voir Howard, 1978 ; Piaget et Inhelder, 1956 ; et Smedslund, 1963). Néanmoins pris isolément, ce type d'objet possède une connotation cognitive tellement forte qu'on se laisserait presque prendre à

dessiner la surface de l'eau non à l'horizontale physique comme elle est sensée l'être mais dans le plan transverse au broc lors qu'il est penché (Rebelsky, 1964 ; Thomas et al. 1973).

3.2.3. D'autres aspects cognitifs de la polarité visuelle

Nous avons vu que l'aspect cognitif amené suite à l'aménagement d'une pièce avec sol et plafond par l'augmentation de l'indice de polarité visuelle influence énormément la perception de la verticalité. En effet la connotation visuelle des directions du haut et du bas semble apporter un support important dans la structuration d'un cadre allocentré perturbateur sur l'évaluation des directions gravitaires. Nous allons voir dans les paragraphes suivants d'autres facteurs de polarité visuelle contribuant à exercer un effet sur la perception des références géocentriques, ce qui implique également la perception des directions du haut et du bas gravitaire. On ne traitera pas ici directement de l'incidence de l'environnement visuel sur la perception de l'espace géocentré, mais plutôt d'une façon différente d'objectiver la direction perçue de la verticale au travers de la manipulation de certaines caractéristiques cognitives du support de jugement.

Les propriétés orientationnelles de l'objet polaire

En manipulant l'orientation de certains objets courants utilisés comme cadre environnant, Cian et al. (2001) ont questionné l'influence de la signification de l'objet polaire en lui-même. Pour ce faire, il a été demandé à des sujets d'ajuster une baguette sur la VVS suite à la présentation de différents objets (une carte de France, une souris, un éléphant, et un cadre) projetés face à eux avec plusieurs inclinaisons. Les résultats montrent que la VVS est bien sûr affectée par l'inclinaison d'un cadre, mais est également modulée par l'inclinaison d'objets visuels qui ne contiennent ni formes géométriques, ni segments linéaires (Figure 3.10.). Parallèlement, la présentation d'une horloge avec les chiffres inversés mais non orientée affecte également la VVS.

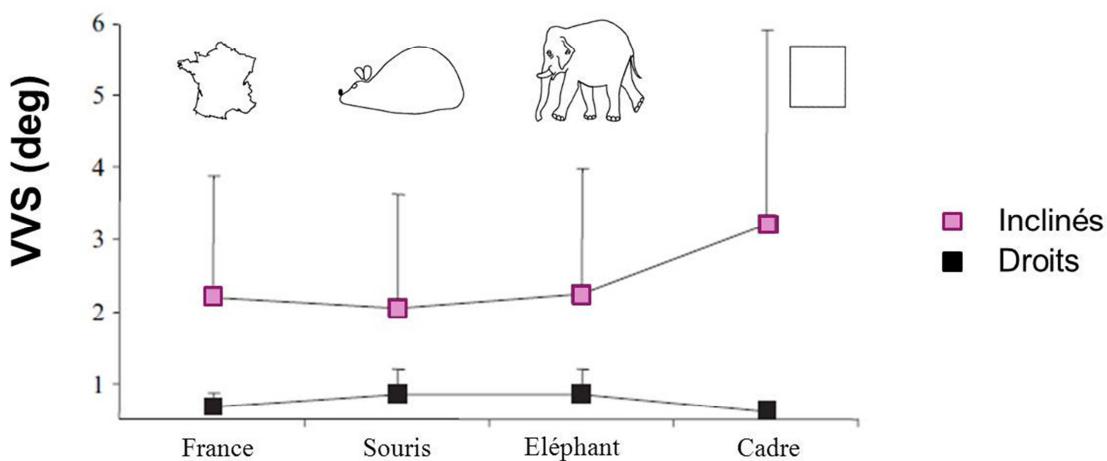


Figure 3.10. VVS en condition droite et inclinée (à 20° à droite et à gauche, valeurs moyennes non signées \pm SD ; d'après Cian et al. 2001). Les objets présentés n'entraînent pas nécessairement d'effet illusoire sur la VVS en position droite, mais possèdent un effet inducteur très prononcé (bien que de moindre mesure que pour un cadre incliné) dès lors qu'ils sont inclinés.

Cette étude montre que la VVS est affectée par les propriétés orientationnelles de l'objet, suggérant l'implication probable de mécanismes sous-jacents capables d'identifier les formes et de distinguer le dessus du dessous et des côtés de l'objet. Plus précisément il semblerait que l'effet cadre soit d'autant plus important que l'objet comporte un axe d'orientation visuellement présent (par exemple, les lignes principales d'un cadre) comparé à la plupart des objets polaires inducteurs où cet axe est seulement virtuel (Wenderoth, 1977 ; Wenderoth et Beth, 1977). De plus la définition de cet axe virtuel peut être très fortement influencée par la saillance de l'objet et la valeur cognitive qui lui est attribuée. Par exemple les chiffres d'une horloge légèrement décalés dans le sens horaire suggèrent un axe de polarité entre le 6 et le 12 légèrement dévié par rapport à la verticale physique.

La polarité lumineuse

Jenkin et al. (2003) de leur côté, ont questionné l'influence de la source de lumière reflétée sur les objets dans la détermination de la direction du haut et du bas. Dans leur étude, les sujets doivent juger de la forme plus ou moins concave ou convexe de différents cercles présentés sous des angles d'éclairage différents. Les ombres obtenus sur les cercles en fonction de l'orientation de l'éclairage donnent des impressions de convexité (ou de concavité) différentes. Par exemple, un éclairage pris de dessus caractérise le cercle d'un bombement convexe. Si on part du principe qu'en absence d'information relative à l'origine de l'illumination, les individus interprètent

naturellement la source de lumière comme provenant du haut, il suffit de rechercher quel cercle apparaît comme étant le plus convexe pour en déduire la direction perçue comme étant le haut. Les auteurs ont montrés que cette perception dépend à la fois de l'orientation du corps dans l'espace et de l'angle d'inclinaison de la chambre meublée environnante (**Figure 3.11.**).

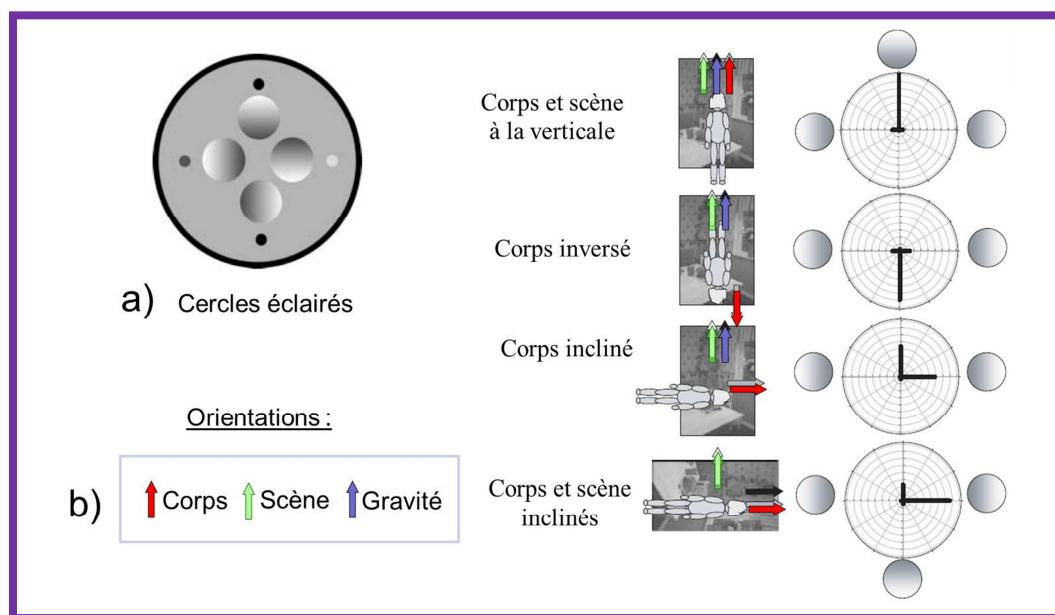


Figure 3.11. Illustration des différents cercles présentés. Les cercles apparaissent plus ou moins concaves ou convexe en fonction de la source d'éclairage. b) Réponses perceptives des sujets sur le type de cercle perçu en fonction de l'inclinaison du corps et de la scène visuelle par rapport à la gravité. (D'après Jenkin et al. 2003).

Par exemple, pour une orientation conjointe du sujet et de la pièce à la verticale, le cercle éclairé par le dessus est reporté le plus souvent comme étant le plus convexe. Ceci suggère que la direction du haut est correctement perçue. Cependant, pour une orientation du sujet inversée par rapport à la pièce restée verticale, c'est le cercle éclairé par le dessous qui est perçu le plus souvent comme étant le plus convexe. Cela suggère que la direction du haut est ici perçue à l'opposé du haut gravitaire. Dans la même logique, une inclinaison du corps à droite par rapport à une scène visuelle restée à la verticale entraîne une perception de la direction du haut partagée entre le haut gravitaire et le haut égocentrique du sujet (qui se situe dans le prolongement de l'axe Z de la tête). Enfin, une orientation du sujet et de la scène visuelle sur la droite entraîne une perception de la direction du haut presque essentiellement orientée sur la droite, c'est-à-dire en continuité avec le prolongement de l'axe Z corporel plutôt qu'aligné sur la gravité. Cette étude rappelle l'analyse du jugement de l'orientation préférentielle des objets (i.e. le

« *perceptual upright* ») qui constitue, parallèlement aux ajustements de la VVS dans l'évaluation de la direction gravitaire, une indication de l'orientation dans laquelle les objets sont le plus facilement reconnus.

L'orientation préférentielle des objets

Dyde et al. (2006) ont notamment travaillé sur ce sujet. Précisément, ces auteurs ont montré que la perception que nous avons de certains symboles (qui nécessitent d'être reliés à leur orientation pour être reconnus) est modifiée en fonction de l'orientation de la scène visuelle environnante et de l'orientation de notre corps dans l'espace. Ainsi, le symbole «  », selon le contexte visuel et postural, pourra être interprété comme le caractère « P » ou « d » de notre alphabet latin. La moyenne correspondant à la transition observée dans l'interprétation des deux lettres représente l'orientation préférentielle de l'objet. Les auteurs ont notamment montré que l'orientation préférentielle des objets peut être perçue comme une direction séparée de la VVS, alors que la VVS reflète la direction de la verticalité perçue par le sujet. Cette étude souligne que l'interprétation que nous pouvons faire de la polarité visuelle de certains objets ne rend pas forcément compte des directions du haut et du bas gravitaire, mais plutôt de directions égocentriques ou allocentriques définies par l'orientation du corps et de la scène visuelle environnante. Cette étude souligne l'influence conjointe de plusieurs référentiels spatiaux dans la perception de l'espace et de l'orientation des objets, ce qui constituera un point central de développement dans la partie discussion de ce présent manuscrit.

3.3. EFFET DU MOUVEMENT VISUEL

Les travaux présentés ci-dessus soulignent l'influence de l'inclinaison d'une scène visuelle statique et de la polarité visuelle sur la perception spatiale géocentrale. Le troisième type d'information visuelle susceptible d'influencer la perception spatiale géocentrale concerne le mouvement visuel.

Les études réalisées sur le sujet ont initialement questionné l'influence de la **rotation** d'une scène visuelle sur des aspects posturaux par rapport à la verticalité. La célèbre expérience de la chambre hantée de Wood, (1895), et plus tard de la chambre mobile Lishman et Lee (1973) souligne à ce propos l'importance des indices visuels

dynamiques dans le maintien de la posture, la mise en mouvement de celle-ci induisant des oscillations posturales et des réactions compensatoires puissantes allant parfois jusqu'à la chute de son observateur (Lee et Aronson, 1974 ; Butterworth et Hicks, 1977). Néanmoins, l'analyse d'un mouvement visuel exercé sur la perception des références gravitaires, comme la VVS et l'HVS reste paradoxalement moins exploré (Lishman et Lee, 1973; Lestienne et al. 1977; Dichgans et Brandt, 1978). Les études qui vont suivre soulignent l'importance de mieux comprendre comment les références gravitaires sont perçues en présence d'une scène visuelle dynamique.

3.3.1. Effet d'un mouvement visuel en rotation sur la VVS

Les effets d'une scène visuelle en mouvement sur la perception des références gravitaires concernent, dans leur grande majorité, l'étude de la VVS (voir Howard et Templeton, 1966). Ils ont été observés au travers d'études assez variées manipulant des dispositifs visuels de plus ou moins grandes taille, allant du disque simple texturé, au cône et au tambour tournant entourant le sujet, et dans des tâches qui traitent également du maintien postural et de l'ajustement égocentré (Dichgans et al. 1972 ; 1974 ; Huang et Young, 1988 ; Parker et al. 1983 ; Young et al. 1992 ; Young et Shelhamer, 1990). Dans la plupart de ces études, la vitesse de la rotation visuelle constitue également un paramètre manipulé.

Ces études ont révélées qu'un dispositif visuel en rotation autour du plan frontal induit une sensation d'inclinaison et de rotation du corps propre dans le sens opposé à la rotation appelé «vection» (Howard, 1982 ; Warren, 1995 pour une revue de questions). Cette sensation devection est attribuée au fait que les récepteurs gravitaires ne confirment pas l'information captée par les récepteurs visuels concernant le mouvement (Young et al. 1984). Il est également mentionné que ce genre dispositif provoque un déplacement de l'angle apparent d'une ligne verticale stationnaire également dans la direction opposée à la rotation. Par conséquent, lorsqu'il est demandé à des sujets d'ajuster la barre physiquement présente avec la verticale perçue, une déviation de la VVS par rapport à la verticale physique est enregistrée.

Précisément, Hughes (1972) montrent que, pour un dispositif tournant de petite taille (sous-tendant angle visuel de 19°), l'erreur augmente dans la direction de la rotation

jusqu'à une valeur maximale de 3° pour une vitesse angulaire jusqu'à $36^\circ.s^{-1}$. De leur côté, Dichgans et al. (1972), qui utilisent un dispositif tournant de plus grande taille (130° d'angle visuel) trouvent un effet plus prononcé du mouvement visuel sur la VVS, et montrent que la position apparente de la verticale d'une baguette est déplacée d'une valeur maximale moyenne de 15° alors que la vitesse angulaire de rotation de la scène visuelle s'élève à $30^\circ.s^{-1}$. Pour des valeurs angulaires plus élevées, l'effet observé est plus ou moins constant (voir **Figure 3.12.**).

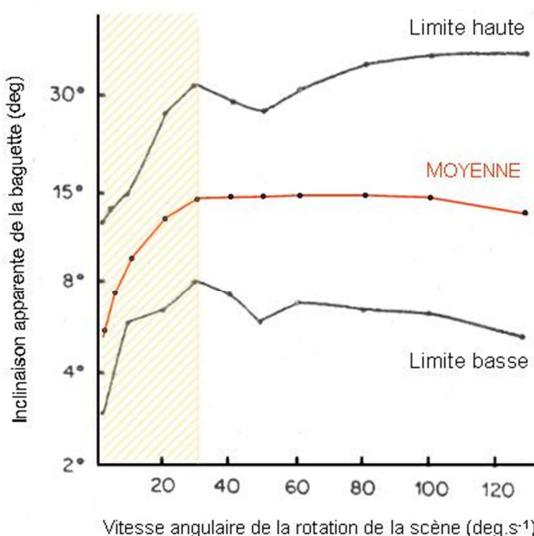


Figure 3.12. Inclinaison apparente d'une barre verticale en fonction de la vitesse angulaire d'une scène visuelle en rotation. La scène visuelle est constituée d'un disque texturé (matérialisé par des points randomisés) en rotation dans le plan frontal des sujets. La courbe représente les résultats moyens pour 7 sujets (d'après Dichgans et al. 1972 ; Extrait de Howard, 1982, pp 426).

En outre, comme la scène visuelle ne comporte pas d'indices d'orientations qui pourraient être en conflit avec ceux médiés par la gravité, les résultats suggèrent que le mouvement visuel seul peut altérer la VVS (Thilo et Gresty, 2002). Aussi, les déviations observées peuvent être interprétées comme le résultat d'un conflit entre les coordonnées spatiales déterminées par les contours visibles de la scène visuelle en mouvement d'une part, et la direction immuable de la gravité d'autre part. Ceci suggère que les informations relatives au mouvement visuel pourraient moduler le traitement des signaux en provenance des gravicepteurs au niveau du SNC, cette hypothèse étant récemment supportée d'un point de vue neurophysiologique (Green et Angelaki, 2007, Gu et al. 2006).

3.3.2. Effet d'un mouvement visuel en translation sur l' HVS

Parallèlement, très peu d'études questionnent à notre connaissance l'effet d'un mouvement visuel sur l'HVS. Les travaux de Gibson, (1950) suggèrent pourtant très tôt l'importance de cette référence spatiale dans la perception de la direction de déplacement géocentré. En effet, lorsque nous bougeons dans notre environnement, le défilement optique des lignes de flux sur notre rétine apporte des renseignements précieux concernant nos caractéristiques de déplacement. Ces caractéristiques spécifient à chaque instant l'évolution des relations spatiales définies entre un observateur et son environnement. Lors d'un déplacement translationnel vers l'avant, un flux radial (i.e., constitué de vitesses faibles au centre et élevées en périphérie) peut être observé à partir d'un invariant optique, appelé « focus d'expansion optique » (FOE ; Gibson et Gibson, 1955).

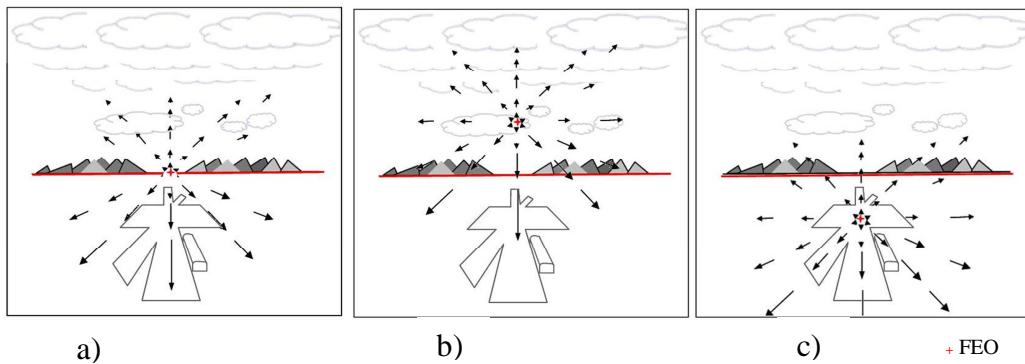


Figure 3.13. Illustration du champ de flux optique d'un observateur survolant une piste d'atterrissement. Le FEO donne une indication précise de la direction de déplacement réelle ou simulée d'un observateur par rapport à la surface horizontale de la terre. **a)** Si le FEO se situe au niveau de la ligne d'horizon, le déplacement réel ou simulé correspond à une translation horizontale par rapport à la surface terrestre. **b)** Si le FEO est au-dessus de la ligne d'horizon, le déplacement de l'observateur est montant, dirigé vers le haut par rapport à la terre **c)** Si le FEO est situé au-dessous de la ligne d'horizon, le déplacement de l'observateur est descendant, dirigé vers le bas, déterminant une phase d'approche avec la terre. D'après Gibson (1950).

La position du FEO dans le champ global de flux renseigne un observateur avec précision sur sa direction de déplacement dans la scène visuelle (Cutting, 1986). Aussi, cette évaluation peut s'effectuer de manière absolue dans la scène visuelle (heading), mais également relative, par rapport à des références de l'espace. Il peut s'agir de références égocentriques dans le cas où la référence choisie concerne un élément du corps (van den Berg, 1996 ; Wexler, 2003), allocentriques lorsque la référence sélectionnée appartient à l'espace extérieur (Crowell et al, 1998 ; Warren et al, 1988; Wexler, 2003),

ou géocentriques lorsque la référence utilisée est une direction terrestre invariante comme par exemple l'horizon physique (voir également la partie 1.1 de ce présent manuscrit). Aussi, lorsque l'horizon physique est visuellement présent, la détermination de la direction de déplacement gravitaire est assez simple et est facilement identifiable par la position du FEO relativement à la ligne d'horizon (**Figure 3.13.**). Notamment, le champ de flux décrit par un FEO situé au niveau de la ligne d'horizon caractérise un déplacement horizontal (i.e. perpendiculaire à la surface de la terre). Parallèlement, le champ de flux décrit par un FEO situé au-dessus de la ligne d'horizon spécifie un déplacement montant (i.e., dirigé vers le haut gravitaire). Enfin, le champ de flux décrit par un FEO situé au-dessous de la ligne d'horizon est représentatif d'un déplacement descendant (i.e., dirigé vers le bas gravitaire).

Cependant, dans un contexte environnemental ambigu, où l'accès à la référence horizontale physique et aux indices de polarité de la scène est altérée (il peut s'agir par exemple d'un vol à travers les nuages où la piste d'atterrissement, le hangar, les montagnes ne sont plus visibles), on peut légitimement se demander si le mouvement visuel (réduit au champ de flux sur la rétine) peut significativement influencer l'HVS. Dans cette éventualité, on peut alors questionner les répercussions engendrées par cette mauvaise estimation dans d'autres tâches de représentation spatiale sous-tendues par l'HVS, comme par exemple l'estimation de la direction de déplacement par rapport à une référence géocentrique ou encore l'estimation du franchissement d'obstacles haut en environnement visuellement appauvri. C'est précisément ce à quoi nous avons tâché de répondre dans les études 3 et 4 de ce présent manuscrit.

Les travaux de Wu et al. (2005) apportent notamment quelques pistes de réponse à cette question suite à la manipulation d'un mouvement visuel en translation dont on modifie la direction. Les sujets, placés en face d'une scène visuelle dynamique simulant un déplacement translationnel vers l'avant, ont pour consigne d'indiquer à l'expérimentateur (dans une tâche d'ajustement de cible), la position de l'HVS pour différentes orientations de flux. La scène visuelle dynamique, constituée d'un nuage de points en mouvement, présente alors toutes les caractéristiques d'un flux radial, avec en son centre le FEO qui spécifie la direction de déplacement simulée de l'observateur (**Figure 3.14.**). Les résultats montrent, après une observation prolongée de la stimulation visuelle, qu'une relation linéaire peut être établie entre la position verticale du FEO (qui

caractérise l'orientation du déplacement dans la scène visuelle) et l'HVS pour des angles compris entre ± 10 deg d'orientation visuelle. Plus précisément, l'HVS est abaissé par rapport à la référence physique lorsque le FEO est décalé vers le bas, et élevé par rapport à la référence physique lorsque le FEO est décalé vers le haut. De plus la relation observée est telle que l'effet du mouvement visuel s'élève ici à 45% de l'inclinaison de scène, ce qui s'apparente de très près à la valeur de l'effet cadre obtenue lors de la présentation d'une scène visuelle inclinée en statique (Matin et Fox, 1989, Matin et Li, 1994, Post et al. 2000).

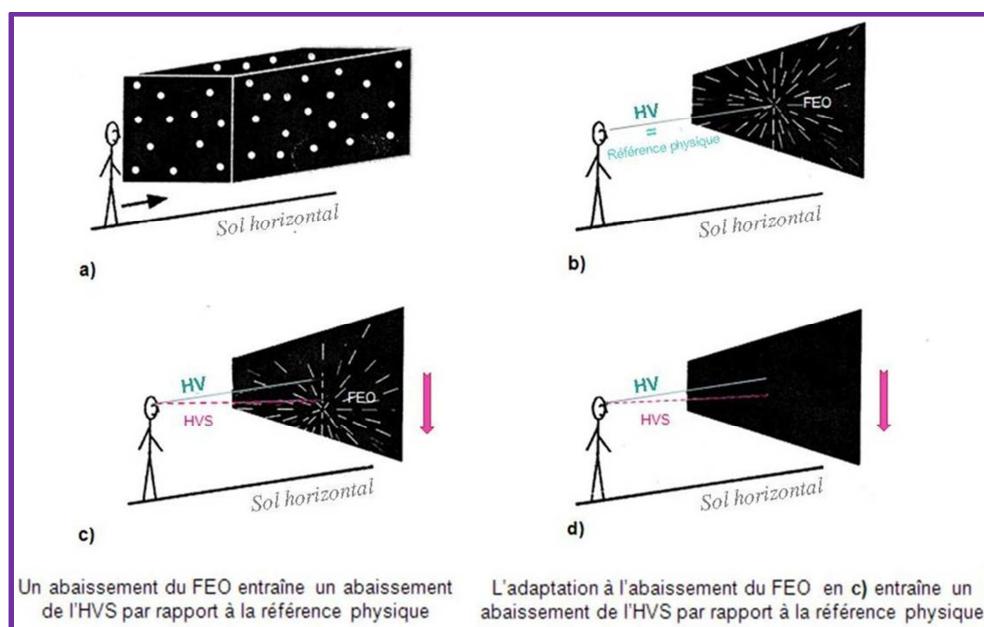


Figure 3.14. a) Illustration du dispositif de flux optique présenté dans un environnement virtuel 3D. L'observateur se tient debout sur un sol horizontal. b) Lorsque le FEO coïncide avec l'horizon visuel physique (HV), le champ de flux simule un déplacement horizontal de l'observateur vers l'avant avec une vitesse de marche constante. Le regard est fixe dans la direction de déplacement. c) Les sujets doivent estimer leur horizon visuel pour différentes élévations du FEO dans le plan médian des sujets. L'HVS est abaissé par rapport à la référence physique lorsque le FEO est dirigé vers le bas. d) A l'issue de la stimulation visuelle, les sujets estiment leur horizon visuel dans le noir. L'adaptation à la présentation visuelle antérieure entraîne une déviation de l'HVS par rapport à la référence horizontale physique dans la direction du mouvement visuel précédemment présenté (d'après Wu et al. 2005).

Ces résultats démontrent que le mouvement visuel en translation peut, après un délai d'observation prolongé, influencer la perception de références géocentriques au même titre qu'une inclinaison de scène visuelle statique. De plus, l'effet cadre mis en évidence est durable dans le temps, puisque l'erreur enregistrée dans la direction du déplacement est encore observée plusieurs minutes après extinction du flux (Figure 3.14.d). Ces observations suggèrent que le mouvement visuel peut également jouer un rôle adaptatif dans la mise à jour des références spatiales à partir desquelles pourra être évalué l'espace géocentré.

CHAPITRE 4

OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Nous avons vu dans la partie théorique de ce manuscrit qu'un certain nombre d'influences, respectivement posturales (égozentrées) et visuelles (allocentrales), peuvent s'exercer sur la perception de l'espace géocentré. Ces influences se traduisent d'une part par l'émergence d'un phénomène d'attraction égozentré issu de l'orientation du corps dans l'espace, et d'autre part par l'existence d'un effet cadre généré par les principales directions de l'espace visuel incliné. Ces différentes influences ont pour conséquence une altération de la perception spatiale géocentrale, qui peut, dans certaines situations, constituer une menace pour la sécurité humaine. Aussi, dans le but de pallier à l'apparition de ces biais perceptifs, il convient de mieux comprendre comment l'individu perçoit l'espace géocentré dans des conditions particulièrement propices à leur apparition. C'est précisément le but de ce travail doctoral. A travers la manipulation du contexte postural et visuel de l'individu, nous avons cherché à décorrélérer l'orientation des différents référentiels spatiaux afin de mieux comprendre comment ils sont utilisés dans les processus de construction perceptivo-spatiale de l'espace géocentré.

Les différentes études présentées dans la partie théorique ont précédemment apporté certains éléments de réponse à cette question. Néanmoins de nombreuses interrogations restent encore ouvertes. Notamment, les indices impliqués dans l'élaboration de la composante égozentrale affectant la perception géocentrale sont relativement mal identifiés dans la littérature. D'autre part la manière dont cette influence égozentrale s'exprime et interagit avec des environnements visuels structurés reste encore aujourd'hui mal connue. Aussi, le présent travail de thèse s'articule autour deux axes d'études, l'un concernant l'origine idiotropique du phénomène et l'autre concernant les influences du contexte visuel sur son apparition (**Figure 4.1.**). Chacun d'eux vise, de façon plus générale, à mieux appréhender la manière dont les référentiels spatiaux sont utilisés et combinés dans la représentation de l'espace géocentré.

QUESTIONS :

(1) La première question à laquelle nous avons tenté de répondre concerne l'origine de l'attraction égocentrale précédemment observée dans la littérature. En effet, si une influence de l'orientation du corps a systématiquement été observée, très peu d'études mettent l'accent sur l'origine de ce phénomène et les substrats idiotropiques qui le composent. Notamment, quelles sont les références égocentrales impliquées (segments, plans?). D'autre part, comment ces influences se combinent-elle et en quelles proportions ?

Nous faisons tout d'abord l'hypothèse que le phénomène d'attraction égocentré résulte de la contribution pondérée de plusieurs influences égocentrales spécifiques issues de différentes parties du corps. Pour cela et dans un premier temps, nous avons questionné la contribution relative de différentes références égocentrales (plan et axes corporels) dans l'élaboration du phénomène d'attraction égocentré observé dans littérature. Cela a été rendu possible par la manipulation du contexte postural en manipulant par ailleurs l'orientation du corps en tangage des individus. Aussi, comme un grand nombre de nos actions et de nos intentions d'actions sont portées par la direction de notre regard, l'étude 1 avait pour but de déterminer si au même titre que l'orientation du corps, l'orientation du plan du regard peut exercer une influence égocentrale sur la perception des directions géocentrales. Dans la continuité de cette étude, l'étude 2 s'intéresse de plus près à l'attraction corporelle observée. Précisément, elle cherche à définir la contribution relative de l'axe de la tête, du tronc et des jambes dans l'émergence de ce phénomène. La tête constituant une plateforme sensorielle stabilisatrice pour les aptitudes d'orientation spatiale (Pozzo et al, 1998) nous nous attendons à ce que la manipulation de celle-ci soit en grande partie responsable des erreurs observées dans la condition où le corps entier (tête et tronc alignés) est incliné.

(2) La deuxième concerne le maintien de ce phénomène d'attraction égocentré à la suite d'un enrichissement de la scène visuelle par une information allocentrale directionnelle. On sait que dans le noir, le contexte postural affecte significativement la perception des directions spatiales géocentriques. Aussi, le contexte postural peut-il également modifier la lecture de cette information en présence d'une information visuelle allocentrale? Une influence du contexte postural est-elle toujours observée notamment si l'information visuelle contribue à renforcer le poids du référentiel gravitaire?

Nous faisons alors la deuxième hypothèse que la composante égocentrale résultante constitue un phénomène particulièrement puissant, résistant à l'épreuve d'un enrichissement visuel spécifiant les principales directions de l'espace géocentré. Pour cela, nous avons d'abord questionné dans l'étude 3 l'influence de l'orientation du corps sur la lecture des directions géocentriques en présence d'un flux optique spécifiant différentes directions de l'espace allocentré dans la scène visuelle. Ce prérequis ainsi mené, il nous restait à éprouver dans l'étude 4 le bien-fondé de ce phénomène d'attraction égocentré sur la perception spatiale géocentrale lorsque l'ajout d'un flux visuel spécifiant une direction de déplacement horizontal vient renforcer le poids du référentiel géocentré versus égocentré.

Pour ce faire, nous avons testé nos hypothèses au moyen de deux types de tâches géocentriques : l'estimation du franchissement d'obstacles hauts (études 1, 2 et 4) et l'estimation de la direction de déplacement géocentré visuellement induit (étude 3), soutenue par l'HVS. Ce type de paradigme offre l'avantage de présenter un cadre d'étude original pour la perception spatiale, tout en proposant une tâche simple, attractive et facilement réalisable pour les sujets.

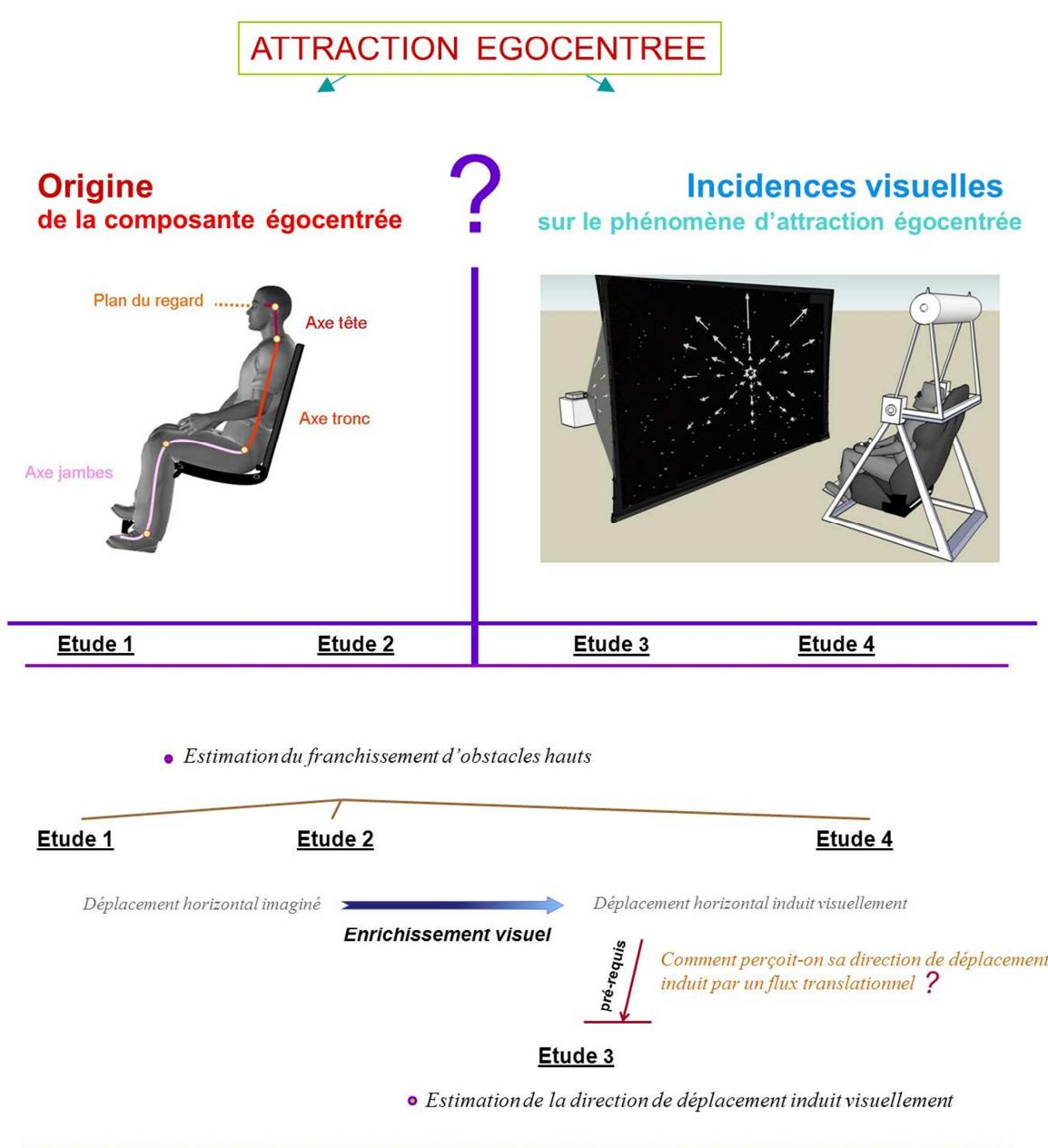


Figure 4.1. Deux axes d'études structurent ce travail doctoral. Le premier s'intéresse à l'origine de la composante égocentrale qui semble jouer un rôle dans la perception des directions de l'espace géocentré en l'absence de scène visuelle. Le deuxième vise à mieux comprendre l'influence de cette composante égocentrale dans un contexte visuel où des directions de l'espace sont physiquement spécifiées par l'ajout d'un flux optique. Ces questions ont été abordées au travers de 4 études expérimentales, (2 réparties dans chaque axe), manipulant une tâche d'estimation de franchissement d'obstacles hauts (études 1, 2, 4) ou une tâche d'estimation de la direction de déplacement induit par un flux optique (étude 3). L'objectif général est de mieux comprendre comment les référentiels spatiaux sont utilisés dans la représentation de l'espace géocentré.

CHAPITRE 5

METHODOLOGIE GENERALE

Ce chapitre a pour but de développer les différents outils utilisés dans les quatre contributions expérimentales que comporte cette thèse. Bien que chacune d'entre elles contiennent déjà une description assez claire de la méthodologie utilisée, il nous a semblé intéressant de détailler plus précisément les outils expérimentaux, procédure générale et outils d'analyse que nous avons utilisés. Un grand nombre de ces outils ont été conçus au laboratoire et ont nécessité un travail important de développement et de perfectionnement. L'optimisation du dispositif et de la méthodologie utilisée a été cautionnée par de nombreux pré-tests.

5.1. LES OUTILS EXPERIMENTAUX

5.1.1. La chaise inclinable en tangage

Inclinaison du corps en tangage

La chaise inclinable a été développée au laboratoire dans le but de dissocier l'axe du corps du sujet avec la gravité. Elle constitue la pièce maîtresse du dispositif expérimental pour l'ensemble des quatre études que comprend cette thèse. En partie déjà existante lors de mon arrivée au laboratoire, cette chaise, constituée d'un siège baquet de rallye, avec sangles, disposé en balancier au centre d'un socle en métal fixe, autorise la rotation du corps en tangage autour de l'axe transoculaire (**Figure 5.1.**). Pour se faire, un système de réglage en hauteur et en profondeur du siège permet l'ajustement de la position des yeux du sujet au niveau de l'axe de rotation de la chaise. Les principales modifications apportées à la structure pour les études de cette thèse ont concerné sa motorisation, c'est-à-dire la pose d'un ensemble motoréducteur et variateur (moteur BALDOR référence BSM80C-375AX avec un couple nominal de 3.6 Nm ; réducteur DYNABOX; et variateur BALDOR), la réalisation des circuits électroniques, et le développement de la commande informatique du système. La chaise motorisée était pilotée informatiquement et servo-contrôlée en vitesse, le variateur, constituant la partie électronique de régulation permettant une boucle d'asservissement via un logiciel

d'interface développé au laboratoire (Docomètre©). Un inclinomètre de type AccuStar (résolution $0,001^\circ \pm 60^\circ$) placé sur l'axe de rotation de la chaise permettait via un retour d'information un contrôle de l'angle.

Manipulation de la configuration posturale

Des améliorations ont également été apportées à la structure de la chaise dans le but de manipuler la configuration posturale des sujets (**Etude 2**). Ainsi, différents types de supports de pieds, interchangeables, ont été réalisés de manière à modifier la position des jambes du sujet (tendues ou pliées). Plusieurs supports de tête ont également été réalisés pour maintenir la tête du sujet dans l'axe du tronc au cours de l'inclinaison (support de tête solidaire à la chaise), maintenir la tête du sujet alignée avec la gravité quelle que soit l'inclinaison du corps (support de tête solidaire à la structure fixe de la chaise), ou incliner la tête en avant ou en arrière avec un retour en position d'un inclinomètre et en réajustant ensuite la hauteur des yeux du sujet. Ces supports de tête se présentaient sous forme de casque avec possibilité de mentonnière qui permettait de restreindre les mouvements du sujet. Tout au long des études, les sujets étaient solidement attachés par un harnais qui les plaquait dos à la chaise de manière à ne pas tomber.

Système de sécurité

Enfin, ces améliorations sur la structure ont nécessité la mise en place de systèmes de sécurité pour le sujet. Tout d'abord, un contrepoids a été ajouté à la structure dans le but de diminuer la charge exercée par le couple de force sur le moteur et d'assurer un maintien à l'équilibre en situation d'extrême urgence, au cas où la chaise viendrait à se désolidariser son axe de rotation. Ensuite des boutons d'arrêt d'urgence (coupe-circuits) destinés au sujet sur sa chaise ainsi qu'à l'expérimentateur ont été intégrés au circuit. La chaise pouvait alors être instantanément immobilisée à leur enclenchement.

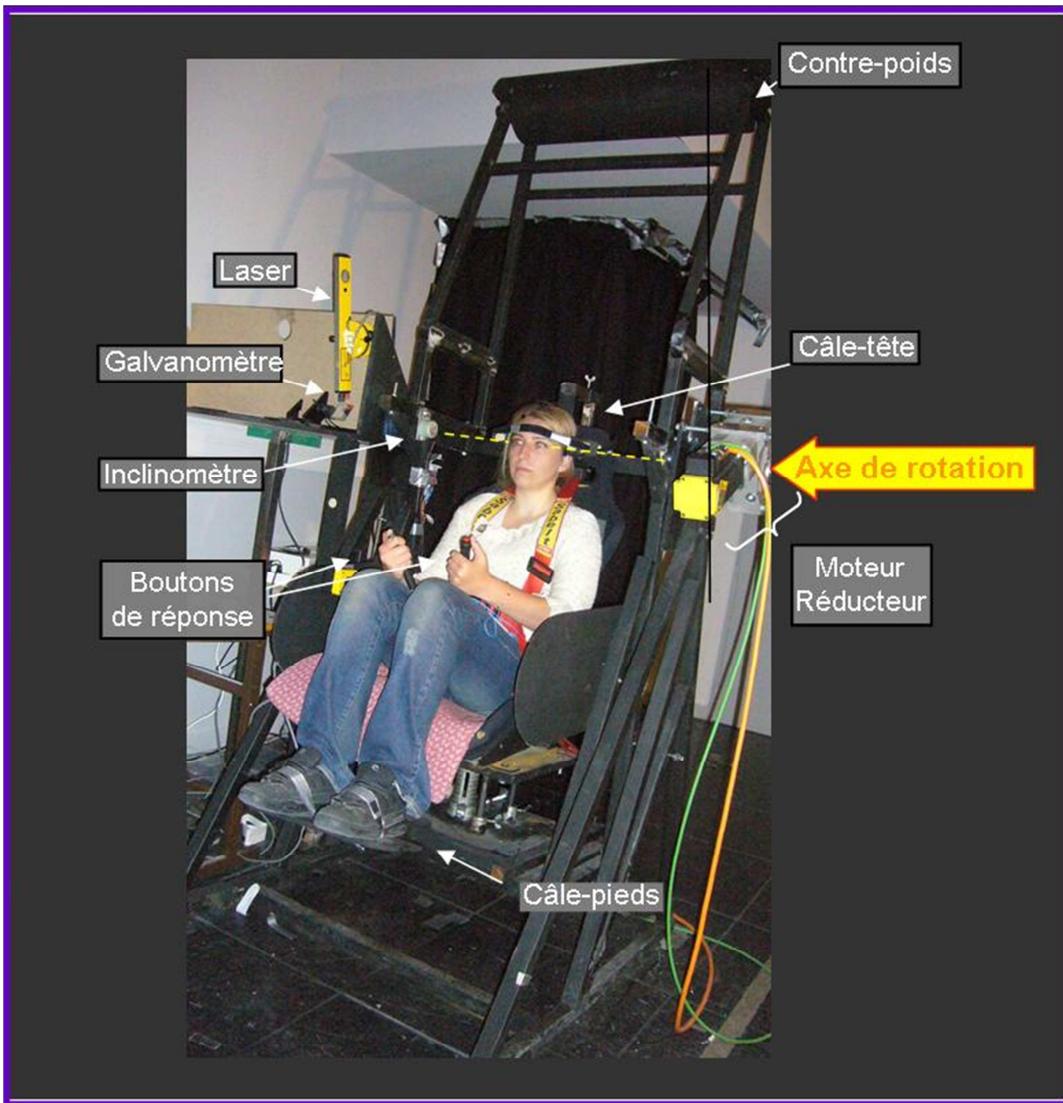


Figure 5.1. Photographie du dispositif expérimental. Dans cette configuration posturale la tête du sujet est sécurisée dans un cale-tête solidaire du siège, ce qui lui permet d'être inclinée avec l'ensemble du corps. Les jambes sont positionnées dans la configuration « jambes pliées » de l'étude 3. Différentes configurations posturales sont rendues possibles par la substitution du présent cale-tête par un autre associé à la structure fixe de la chaise. L'utilisation de ce dernier permet de décorreler l'axe de la tête et du tronc durant l'inclinaison. De la même manière, différents cale-pieds peuvent être utilisés afin d'ajuster la position des jambes dans une configuration « jambes allongées ».

5.1.2. La barre laser et le galvanomètre : pour projeter la barre horizontale

La tâche utilisée dans la plupart de nos études est une tâche de franchissement d'obstacles hauts (études 1, 2, 4). Les sujets doivent répondre s'ils estiment pouvoir passer ou pas sous une barre placée à différentes hauteurs face à eux. Dans les études 1 et 2, cette barre est matérialisée sous la forme d'une barre laser horizontale (1mm d'épaisseur sur 2 m de large) projetée sur un écran depuis une source fixe (située derrière le sujet pour l'étude 1, où derrière l'écran pour l'étude 2). Le faisceau laser était dirigé sur

un petit miroir inclinable, et réfléchi en direction de l'écran. L'orientation du miroir était contrôlée par un galvanomètre piloté depuis un poste informatique par l'expérimentateur. Après un étalonnage minutieux, elle permettait la présentation de la barre lumineuse aux différentes hauteurs souhaitées.

5.1.3. La rampe à diodes : pour offrir un point de fixation au sujet

L'étude 1 vise à déterminer l'effet de l'orientation du regard sur l'estimation du franchissement d'obstacles. Pour ce faire, une rampe à diodes a été développée et placée verticalement à l'arrière de l'écran dans l'axe médian du sujet. Cette rampe était constituée de 5 diodes vertes, montées en dérivation et alignées sur la rampe afin de constituer des angles de -10° , -5° , 0° , $+5^\circ$, $+10^\circ$ d'élévation par rapport aux yeux des sujets quand la rampe était placée derrière l'écran, à 2.28 m du sujet. L'éclairage de chacune de ces diodes était piloté depuis le poste informatique. Lorsqu'une diode s'éclairait le sujet avait pour consigne de la fixer et d'effectuer sa tâche d'estimation de franchissement de barre sans la quitter des yeux.

5.1.4. Le contrôle EOG : pour s'assurer du respect des consignes

L'électro-oculographie (EOG) est une technique d'analyse permettant de mesurer les variations de potentiels de la membrane basale de l'œil au cours du temps. Ces variations de potentiels peuvent être assimilées aux variations d'amplitude d'un dipôle, orienté pôle positif vers la cornée et pôle négatif perpendiculaire au plan du pôle postérieur de l'œil. Lors d'un changement de direction de regard, la rotation de l'œil dans son orbite induit une variation d'amplitude du dipôle qui peut être enregistrée au moyen d'électrodes de surface.

Dans notre étude (étude 1), des électrodes EOG (gain : 10K, filtre : 10kHz) sont disposées au-dessus et au-dessous de l'œil directeur des sujets et alignées par rapport à la pupille, avec l'électrode de masse positionnée derrière l'oreille, dans le but d'enregistrer les mouvements verticaux de l'œil. Le signal enregistré est amplifié mais présente généralement une dérive des potentiels d'électrodes au cours du temps (lié à

l'hétérogénéité du champ électrique possiblement lié à une adaptation à l'obscurité⁶. Cette dérive rend difficile la réalisation de mesures absolues de l'amplitude de la direction du regard mais permet largement un contrôle de l'orientation relative du regard (i.e., stabilité) dans l'axe vertical. De façon générale, une variation franche du signal en amplitude indique un mouvement de l'œil vers le haut ou vers le bas par rapport à une position de base (la direction d'une éventuelle saccade était précédemment définie lors d'une phase de calibrage du système d'appareillage après adaptation dans une pièce assombrie). Cette procédure de contrôle permet à l'expérimentateur de suivre, d'une part l'orientation du regard en direction de la cible (suivant la consigne), et d'autre part des éventuels mouvements parasites pendant la phase de fixation de la cible. Une modification de l'orientation du regard pendant la phase de fixation de la cible donnait lieu à l'annulation de l'essai qui était alors présenté plus tard dans la session. Aussi, les sujets avaient pour consigne d'éviter les clignements d'yeux durant la phase de fixation afin de limiter l'apparition d'artéfacts sur l'électro-oculogramme.

5.1.5. Le vidéo-projecteur : pour présenter des scènes visuelles dynamiques

Les études 3 et 4 visent à reproduire un déplacement virtuel des sujets dans un flux optique à une vitesse de 66 m.s^{-1} (vitesse d'un avion qui atterrit). Pour cela, il s'agissait de recréer un champ de flux visuel correspondant au déplacement d'un individu évoluant dans un nuage de points, avec une certaine vitesse, et suivant une certaine direction. Par rapport à un observateur immobile, cela consistait à projeter face à lui un nuage de points en mouvement (400 points de 5mm chacun, sans expansion locale). La direction de déplacement induit était obtenue en modifiant la position verticale du focus d'expansion optique (FEO ; le point à partir duquel les lignes de flux rayonnent, cf. chapitre 3) dans le plan médian du sujet. La direction de déplacement souhaitée pouvait être simulée vers le haut ou vers le bas par rapport à un déplacement horizontal du sujet (étude 3), ou horizontalement (étude 4). Ainsi, les individus avaient le sentiment de se déplacer dans la scène visuelle suivant un mouvement de translation linéaire. En plus du flux optique, l'étude 4 nécessitait la présentation d'une barre horizontale (de type barre de parking de 2 m de long et de 5 cm d'épaisseur) dans le cadre du développement d'une tâche de franchissement.

⁶ Observation relativisée sur l'échelle d'un essai.

Les scènes visuelles ont été générées par un ordinateur PC Dell Précision 380 à partir du programme ICE développé par les ingénieurs au laboratoire, et projeté sur l'écran via un vidéo projecteur (taux de rafraîchissement à 85 images/s).

5.1.6. Acquisition des données

Le pilotage de l'ensemble du matériel et l'acquisition en temps réel des données étaient assurés par le système Adwin (Keithley®) et le logiciel Docomètre® associé développé par les ingénieurs du laboratoire. Les réponses perceptives des sujets étaient enregistrées par l'intermédiaire de boutons de réponses placés dans chacune de leurs mains. Pour chaque essai, les signaux analogiques (inclinomètre, galvanomètre, EOG) et numériques (les réponses binaires des sujets) apparaissaient sur l'écran d'ordinateur de l'expérimentateur et étaient vérifiées et annotées en complément dans les fichiers associés au numéro de l'essai.

5.2. PROCEDURE GENERALE

Les protocoles utilisés pour les 4 études de cette thèse observent quelques points de similitude. Ces similitudes ont été souhaitées dans le but de permettre des comparaisons entre les résultats des différentes études. Dans leur globalité, le déroulement des passations expérimentales comprenait les 6 phases suivantes :

L'installation des sujets : Les sujets étaient tout d'abord assis et sécurisés sur la chaise, dans la configuration posturale souhaitée. Le siège était ajusté en hauteur et en profondeur de manière à ce que le niveau des yeux corresponde à l'axe de rotation de la chaise. La salle était ensuite plongée dans le noir.

L'inclinaison de la chaise : Les sujets avaient pour consigne de fermer les yeux pendant la manipulation de la chaise. Dans toutes nos études, la chaise était programmée pour atteindre un angle d'inclinaison compris entre ± 20 deg en 15 s. Pour ce faire, la commande d'exécution, programmée en paliers, comprenait une phase d'accélération de 2 s suivie d'un plateau à vitesse constante de 11 s et d'une phase de décélération de 2 s. Les

vitesses et les accélérations utilisées pour chaque inclinaison sont résumées dans le tableau ci-dessous (**Figure 5.2.**).

Angle d'inclinaison	Vitesse angulaire	Accélération initiale et décélération finale
± 5	± 0.4	± 0.2
± 10 deg	± 0.8 deg.s ⁻¹	± 0.4 deg.s ⁻²
± 15	± 1.2	± 0.6
± 20	± 1.6	± 0.8

Figure 5.2. Tableau résumé des vitesses, des accélérations initiales et des décélérations finales utilisées pour amener la chaise à l'angle d'inclinaison souhaité.

La phase de stabilisation : La phase d'inclinaison de la chaise était suivie de 15 s de stabilisation. Ce délai a été évalué de manière théorique sur la base de certaines propriétés sensorielles inhérentes au système vestibulaire et somesthésique (**Figure 5.3.**). Nous avons en effet souhaité établir le meilleur compromis entre le temps nécessaire à la disparition quasi-totale de la décharge vestibulaire résiduelle, permettant de considérer les effets post-rotatoires comme négligeables (Benson, 1990 ; Goldgberg et Fernandez, 1977), et d'autre part limiter l'adaptation somesthésique liée à la période d'immobilisation de la chaise dans l'inclinaison souhaitée (Higashiyama et Koga, 1998).

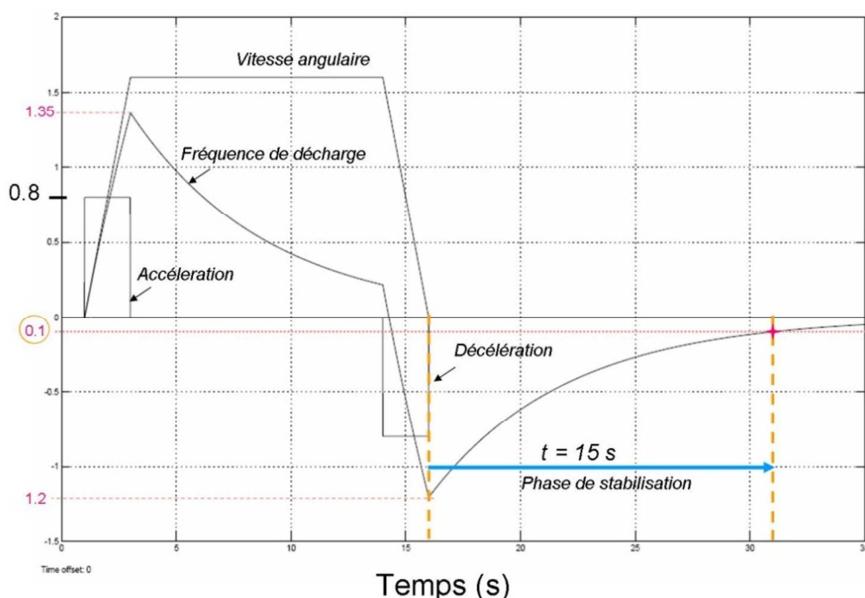


Figure 5.3. Simulation du profil de décharge vestibulaire au cours du temps pour une orientation de chaise à 20° . La stimulation consiste en 2 s d'accélération et de décélération angulaire constante à $0.8^\circ \cdot s^{-2}$, séparées par un plateau de 11 s à vitesse constante. La figure montre que le pic de fréquence de décharge est atteint après 2 s d'accélération angulaire, avant une diminution exponentielle du signal. La décélération angulaire induit un second pic de fréquence de décharge dans la direction opposée. La simulation permet d'évaluer le niveau de décharge post-rotatoire des neurones issus des canaux semi-circulaires pendant la phase de stabilisation. Précisément, il semblerait qu'après 15 s de stabilisation, la décharge résiduelle corresponde seulement à $0.1^\circ \cdot s^{-1}$, une valeur qui n'est pas fondamentalement différente de la décharge observée après 30 s (Goldberg et Fernandez, 1977) ou même 1 min (Shebilske et Fogelgren, 1977).

La présentation visuelle et le jugement : Après la phase de stabilisation les sujets avaient pour consigne d'ouvrir les yeux et d'observer la scène visuelle. Celle-ci durait entre 2.5 s et 12 s en fonction des améliorations apportées au protocole au fur et à mesure des expérimentations. Ensuite, il leur fallait donner leur réponse à la fin de la stimulation visuelle par l'intermédiaire des boutons poussoir.

Le retour de la chaise à la verticale : Une fois l'ensemble des essais effectués pour une même orientation de corps, les sujets avaient pour consigne de fermer les yeux et la chaise était ramenée à la verticale.

Eclairage de la pièce : Les lumières de la pièce étaient ensuite rallumées permettant ainsi aux sujets de retrouver leurs repères spatiaux avant de lancer une nouvelle séquence de jugement. Au total, pour limiter les phénomènes d'adaptation somesthésique, chaque séquence de jugement présentée au sein d'une même inclinaison était calculée pour ne pas dépasser les 2 min.

5.3. LES OUTILS D'ANALYSE

5.3.1. Le Protocole psychophysique utilisé

La psychophysique est une approche qui vise à déterminer les relations quantitatives qui existent entre un stimulus physique et la perception qu'on en a. En d'autres termes, il s'agit de l'étude des relations entre des stimuli et les ressentis associés, comme la perception du mouvement ou de l'espace. Le protocole psychophysique utilisé dans nos études est un protocole de choix forcé. A la fin de la stimulation visuelle, les sujets doivent répondre à propos de l'estimation du franchissement de la barre présentée (soit « je passe » soit « je ne passe pas » pour les Etudes 1, 2, 4), ou de leur direction de déplacement perçue dans le flux (soit « je monte » ou « je descends » pour l'Etude 3). Tout d'abord, les réponses des sujets sont converties sous forme binaire. Un score de 1 est attribué aux réponses dites « positives » (« je passe » ou « je monte ») et un score de zéro aux réponses « négatives » (« je ne passe pas » ou « je descends »). Les réponses des sujets obtenues pour chaque inclinaison de corps sont alors soumises à une analyse psychométrique de type Probit (**Figure 5.4.**).

La fonction de l'équation Probit est la suivante :

$$P_i = 1 / (1 + C_{(i,j)} / C_0)^n$$

Légende de la fonction :

P_i = probabilité d'estimer positivement le franchissement de la barre.

C_0 = numéro de la barre pour $P=0.5$

i = numéro de la barre

j = numéro de l'essai

n = puissance de l'effet (indicateur de la sensibilité de la fonction dans la détermination du seuil de franchissement)

La représentation graphique de la fonction Probit est la suivante :

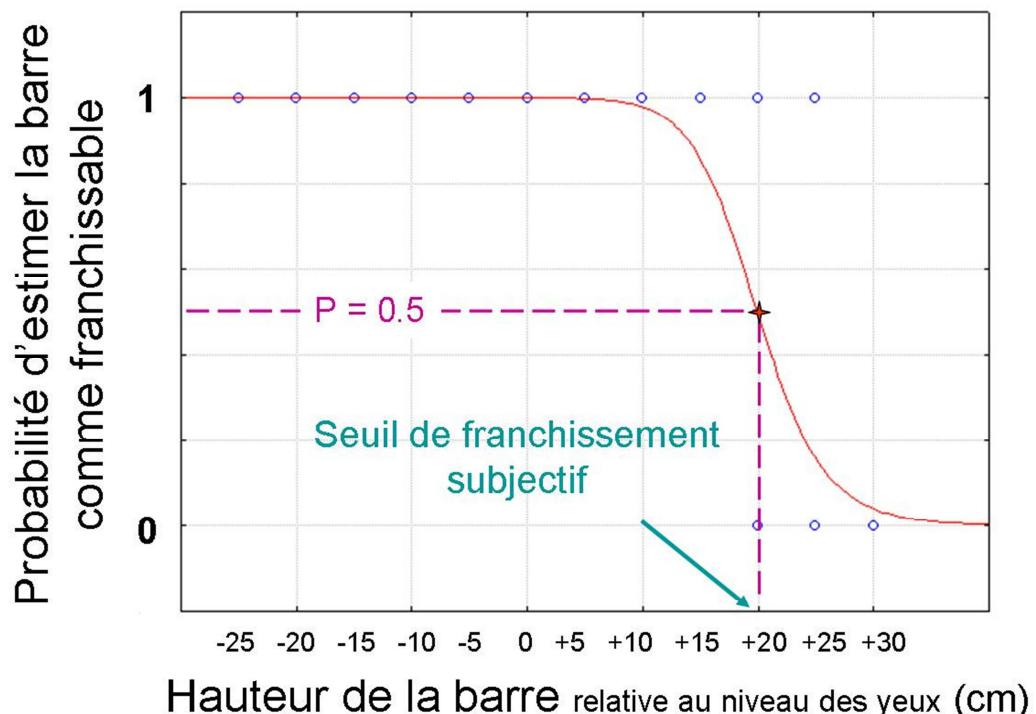


Figure 5.4. Illustration d'une fonction psychométrique (Probit) obtenue pour un sujet dans une condition d'orientation de corps donnée (tirée de l'étude 3). La valeur à $P=0.5$ correspond au seuil de franchissement subjectif (cm) relative au niveau des yeux. Dans cet exemple, pour une hauteur de barre présentée à 20 cm au-dessus du niveau des yeux, le sujet a autant de chance de dire qu'il passe qu'il ne passe pas.

Pour les études 1, 2 et 4, la fonction nous permet de déterminer mathématiquement la valeur (en cm) pour laquelle les sujets estiment aussi bien qu'ils passent ou pas sous la barre. La valeur obtenue correspond au seuil de franchissement subjectif, (i.e., la hauteur minimale à partir de laquelle les sujets estiment pouvoir passer). Cette hauteur, dans un premier temps référée au niveau des yeux, est redéfinie par la suite par rapport au haut de la tête. La valeur ainsi obtenue nous permet de mieux nous rendre compte de l'erreur d'estimation obtenue par rapport à la hauteur physique minimale requise pour exprimer le franchissement d'une barre. Pour l'étude 3, la fonction Probit nous permet de déterminer mathématiquement la valeur pour laquelle les sujets estiment aussi bien qu'ils montent ou qu'ils descendent dans la scène visuelle. Cette valeur correspond alors à la direction de déplacement horizontal subjectif exprimée en degrés par rapport à la direction horizontale physique, et qui sert de référence pour l'estimation du haut et du bas.

5.3.2. Les analyses de variance

Une première analyse de variance est effectuée sur l'indice « n » (voir l'équation de la fonction Probit ci-dessus) extrait de chaque fonction Probit dans le but de s'assurer que la sensibilité de détermination des seuils n'est pas significativement différente pour l'ensemble des conditions testées. Ceci étant vérifié, les valeurs obtenues à $P=0.5$ et référées au niveau de la tête selon l'étude sont ensuite soumises à une analyse de variance à mesures répétées de manière à tester l'existence de différences significatives entre les conditions expérimentales manipulées.

5.3.3. Les analyses de régression linéaire

La dernière étape du traitement consiste à appliquer une analyse de régression linéaire sur les valeurs obtenues à $P = 0.5$ afin de caractériser la nature de l'effet. Si les résultats sont significatifs, une relation linéaire peut être établie entre les jugements perceptifs des sujets et la variable d'inclinaison utilisée (orientation du corps, du regard, de la tête selon les études) et dans les angles d'inclinaison testés. L'équation de la droite, du type $y = ax + b$, nous renseigne d'une part sur le pourcentage d'influence de l'orientation du corps sur le jugement géocentré (coefficients a) et d'autre part sur la déviation de l'erreur moyenne par rapport à la référence physique (i.e., le haut de la tête pour les études 1, 2 et 4, ou le niveau des yeux géocentré pour l'étude 3 ; coefficient b).

CHAPITRE 6

ETUDES EXPERIMENTALES

Ce sixième chapitre regroupe les quatre études expérimentales que nous avons réalisées au cours de cette thèse. Comme nous l'avons précédemment annoncé (chapitre 4), les études 1 et 2 questionnent l'origine de la composante égocentrale préalablement observée dans le noir sur la perception de l'espace géocentrale. Les études 3 et 4 interrogent quant à elles l'incidence du contexte visuel sur l'apparition du phénomène d'attraction égocentrale. Pris dans leur ensemble, ces quatre études visent à mieux comprendre comment les référentiels spatiaux sont utilisés dans la perception effective de l'espace.

6.1. ORIGINE DE LA COMPOSANTE EGOCENTREE

De nombreuses études ont récemment montré un effet de l'orientation du corps entier et de la tête, dans le noir complet, sur la perception de l'espace égocentré. Néanmoins la question relative à l'origine du phénomène égocentré observé reste encore à ce jour assez mal comprise. Quels sont les indices impliqués dans l'élaboration de la composante égocentrale et comment se combinent-ils ? Les études 1 et 2 qui suivent questionnent la contribution relative de différentes influences segmentaire dans l'élaboration de la composante égocentrale résultante.

L'étude 1 de ce présent manuscrit questionne l'influence du plan du regard (i.e. le plan passant par l'axe des yeux et porté par la direction du regard lorsqu'on fixe un objet) sur la perception de l'espace géocentré. Tout porte à croire que cette référence particulière, centrée sur les yeux, et déjà présentée comme déterminante dans la perception de l'espace égocentrale, puisse également jouer un rôle prépondérant dans la perception de l'espace géocentré. **L'étude 2** quant à elle s'intéresse de plus près à l'origine de la composante corporelle observée en questionnant l'implication relative de l'axe de la tête, du tronc et des jambes dans l'élaboration du phénomène égocentré résultant. L'apport combiné de ces deux études présentées dans leur globalité dans les pages qui vont suivre sera discuté plus en détail dans la partie 7.1 de ce présent manuscrit.

6.1.1. Etude 1

INFLUENCE DE L'ORIENTATION DU REGARD DANS L'ESTIMATION DES POSSIBILITES DE FRANCHISSEMENT D'OBSTACLES HAUTS

Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL

Experimental Brain Research 2009 – 193(1):19-28

Ce travail de recherche questionne l'influence de l'orientation du regard dans l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts lors d'inclinaisons corporelles en tangage. La tâche est réalisée à partir d'un point d'observation fixe (i.e. sans déplacement propre des sujets) et en l'absence d'indices visuels environnementaux. Précédemment, Bringoux et al. (2008) ont montré que cette estimation nécessite de prendre en compte l'horizon visuel comme référence pour le jugement, et que la perception de cette référence est modifiée par l'inclinaison du corps en tangage. Nos résultats montrent une surestimation générale des possibilités de franchissement et confirment l'effet de l'orientation corporelle sur les jugements. Cette surestimation est de plus proportionnelle à l'inclinaison du corps, ainsi qu'à l'orientation du regard. Les effets respectifs des deux inclinaisons (corps vs regard) sont indépendants mais se combinent de façon additive. Ceci suggère que plusieurs références égocentrees peuvent conjointement influencer l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts. Les poids des effets d'orientation du corps et du regard sont respectivement de 45% et 54%, dans un panel angulaire de ± 10 deg. Ces résultats sont discutés en termes d'interaction entre référentiels égo et géocentres et montrent qu'au même titre que l'orientation du corps, l'orientation du regard joue un rôle déterminant dans la perception de l'espace géocentré.

INFLUENCE OF GAZE ELEVATION
ON ESTIMATING THE POSSIBILITY OF PASSING UNDER HIGH OBSTACLES
DURING BODY TILT

Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL

✉ *aurore.bourrelly@hotmail.fr ; Lionel.bringoux@univmed.fr*

UMR CNRS 6233 'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey',
CNRS & Aix-Marseille Université, France.

Abstract

We investigated the influence of gaze elevation on judging the possibility of passing under high obstacles during pitch body tilts, while stationary, in absence of allocentric cues. Specifically, we aimed at studying the influence of egocentric references upon geocentric judgements. Seated subjects, orientated at various body orientations, were asked to perceptually estimate the possibility of passing under a projected horizontal line while keeping their gaze on a fixation target and imagining a horizontal body displacement. The results showed a global overestimation of the possibility of passing under the line, and confirmed the influence of body orientation reported by Bringoux et al. (2008). More strikingly, a linear influence of gaze elevation was found on perceptual estimates. Precisely, downward eye elevation yielded increased overestimations, and conversely upward gaze elevation yielded decreased overestimations. Furthermore, body and gaze orientation effects were independent and combined additively to yield a global egocentric influence with a weight of 45% and 54%, respectively. Overall, our data suggest that multiple egocentric references can jointly affect the estimated possibility of passing under high obstacles. These results are discussed in terms of "interpenetrability" between geocentric and egocentric reference frames and clearly demonstrate that gaze elevation is involved, as body orientation, in geocentric spatial localization.

Key words: Spatial localization – Reference frames – Gaze elevation – Body orientation – Egocentric – Geocentric.

Introduction

Imagine you are visiting an old castle, walking towards an open door which seems rather low. You will doubtlessly ask yourself whether you are able to pass under or not without bending. Now, imagine that before you cross the door, you pay attention to an object located on the ground, or conversely above the top of the door; will your estimation of the possibility of passing under be the same for these different gaze elevations? This study deals with the influence of gaze elevation on the estimated possibility of passing under high obstacles with different body tilts.

Motor behaviour when crossing high obstacles has already been investigated, through a task in which observers walked and passed under a horizontal barrier (Van der Meer, 1997). According to Gibson's theory of affordances (1979) which claims that the environment offers a collection of possibilities for action that organisms need to detect, Van der Meer (1997) found a body-scaled critical point at which subjects began to duck under a barrier. Specifically, their results showed that subjects used a non-negligible safety margin in presence of full visual reference (for instance, a 5.25 cm safe margin was observed for a subject whose height is 1,75 m). This cautious behaviour was also observed in full light when erect subjects had to estimate while stationary the possibility of walking under a barrier, but was not present when subjects sat on the floor (Wagman and Malek, 2008). It was therefore suggested that intrinsic individual characteristics (body size, speed of locomotion and level of motor control) and the position of the point of observation may constitute important properties of the actor-environment fit. Other studies have demonstrated that judgements of "passability" through apertures (Mark, 1987; Warren and Whang, 1987) and "climbability" of objects (Warren, 1984) were based on affordances for which body-scaled information were also important. As a main reference for this body-scaled information, the observers' eye level appeared determinant in estimating these possibilities of action (Marcilly and Luyat, 2008; Mark, 1987; Wagman and Malek, 2008).

Nevertheless, although processes ruling the possibility of passing under obstacles in full vision may radically differ from those involved in complete darkness, Bringoux et al. (2008) showed that estimating the possibility of passing under a horizontal line in

absence of motion at various body tilts was also referred to **the estimated eye level**. Interestingly, in their study, direct eye level estimates (i.e., judgements of the subjective visual horizon, that is the plane normal to gravity crossing eye level), clearly distinguished from estimates of subjective “passability”. Both judgements were indeed separated by the distance between the top of the head and the physical eye level, although the slight modifications of this distance at different body orientations have not been shown to be integrated in the subjective estimates. Moreover, Bringoux et al. (2008) found a similar effect of body orientation on the subjective estimation of the height of an obstacle with respect to eye level and the possibility of passing under. Specifically, the more the subjects were tilted forward, the more they overestimated the possibility of passing under the projected line. These findings questioned the role of the vestibular system regarding the accuracy of perception of gravity-specified axes. Bringoux et al. (2007) found a similar performance in both labyrinthine-defective subjects and control subjects when judging the visual horizon in static conditions. They concluded that somatosensory inputs can convey as much graviceptive information as the vestibular system for visual horizon estimates. The observed linear relation between body orientation and the estimated possibility of passing under high obstacles was explained in terms of egocentric attraction induced by body tilt. Mittelstaedt (1983; 1986) has already explained similar phenomena by the existence of an idiotropic vector which "attracts" judgements of verticality along the longitudinal body axis. It has since been suggested that different body parts might be involved in the elaboration of the idiotropic vector (Ito and Gresty, 1997). For instance, the head axis (Guerraz et al. 1998) as well as other body segments (Ito and Gresty, 1997) could be involved in the egocentric influences reported in verticality judgements.

Another possible source of egocentric "attraction" may be the **plane of regard**. The plane of regard, containing the interocular axis and the line of sight, has been considered an important reference in egocentric spatial localization (Poljac et al. 2005; Poljac and van den Berg, 2005). Specifically, the elevation of objects relative to this plane is perceived accurately, irrespective of eye or head orientation. However, the question remains whether the orientation of the plane of regard, that is, gaze elevation, is also crucial in judging the location of objects relative to some geocentric (i.e. earth-based) systems of coordinates, including the direction of gravity and the physical horizon (Howard, 1982). Gaze elevation may have an influence on geocentric estimates because

information about the position of the target on the retina and information about the position of the eye in the head are required for such perceptual tasks (Matin and Li, 1992; Stoper and Cohen, 1989). By successive transformations of coordinates, a stable map can be maintained between spatial localization, spatial orientation, and physical space (Matin and Li, 1995).

The following experiment aimed first at investigating the influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during whole-body tilt, with subjects motionless, and in the absence of visual allocentric cues. The second purpose of this work was to question the relation between the influence of gaze elevation and body orientation on these judgments. A linear effect of gaze orientation was expected on the estimates since a linear body orientation influence has been previously observed by Bringoux et al. (2008).

Methods

Subjects

Twelve subjects (6 male and 6 female; mean age 27.5 ± 9.8 year) with normal or corrected to normal vision (by lens correction), participated in the experiment. They had no previous history of vestibular and neurological symptoms. All gave informed consent, in compliance with the ethical committee which regulates human experimentation in France.

Apparatus

The subjects were seated in complete darkness on a padded tilting chair, and restrained by means of a shoulder harness (Fig. 1). The head was strapped to a headrest which was adjusted so that the naso-occipital axis was orthogonal to the direction of the gravity when the chair was vertically oriented. The axis of rotation of the chair coincided with the trans-ocular axis. Thus, eye level remained at the same height (1.34 m) from the floor reference, regardless of the tilt magnitude. The motorized tilting chair, servo-controlled in speed, enabled backward and forward rotations ranging from +10 deg backward to -10 deg forward. The chair was first tilted during a 2 s period of initial acceleration ($a=0.5 \text{ deg.s}^{-2}$) before reaching a constant velocity (1 deg.s^{-1} for -10 deg and +10 deg of tilt; $v=0.375 \text{ deg.s}^{-1}$ for -5 deg and +5 deg of tilt) during 8 s, followed by a 2 s

period of final deceleration (0.5 deg.s^{-2}). Finally, irrespective of the angle of tilt the total duration of tilting was 12 s.

Compliance with gaze elevation instructions was controlled online by recording subjects' eye movements (vertical DC electro-oculography, EOG). A flat vertical semi-opaque screen 2 m high x 2.5 m wide was placed in front of the subjects, at a distance of 2.28 m from eyes. Behind the screen, 5 luminous targets were vertically aligned in order to define 5 gaze elevations (+10 deg, +5 deg, 0 deg, -5 deg, -10 deg elevations from eye level). A laser pointer mounted on a fixed structure positioned beside the tilting chair projected a thin horizontal beam on a tilting mirror. The pitch orientation of the mirror was adjustable by means of a galvanometer (Scanner Control CCX 100), so that the reflected beam was projected on the screen at the desired elevation. The resulting luminous horizontal line was 2 m long and 0.01 m thick and adjustable in height with a precision of 0.01 m. Subjects held in both hands the digital response push buttons for judgement settings. Galvanometer control and response recordings were performed by the ADwin-Gold system (Keithley_®) piloted via our in-house Docometer software. Throughout the experiment, subjects were placed in darkness without any allocentric cue to influence their judgement.

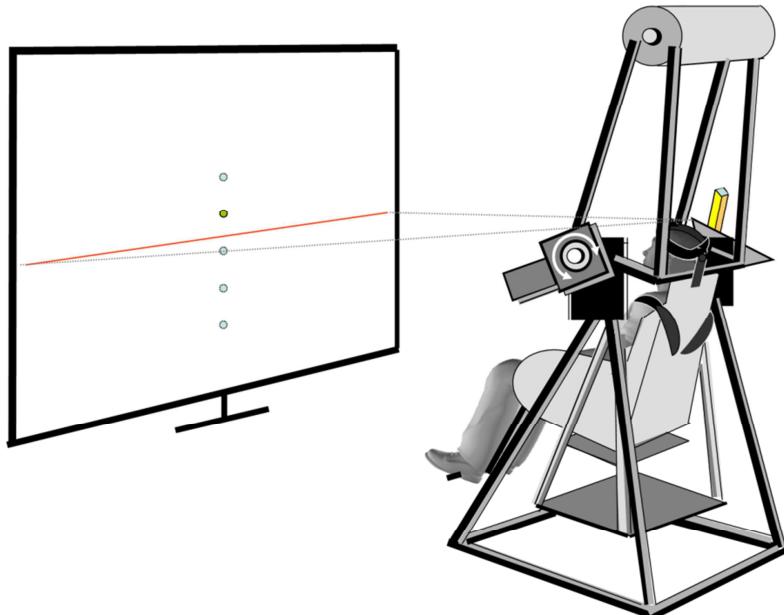


Figure 1: Illustration of the experimental set-up. The motorized chair rotating around the subjects' trans-ocular axis could be rotated from +10 deg backward to -10 deg forward. The screen, 2.28 m away from the observers' eye supported 5 luminous targets (LEDs). The luminous horizontal line was projected from a laser beam at different elevations on the screen. Subjects had to rigorously fix the lighted target on the screen and to estimate whether they would be able to pass under the luminous horizontal line, imagining a horizontal displacement.

Procedure

Five body orientations (+10 deg, +5 deg, 0 deg, -5 deg, -10 deg, respectively backward and forward), 5 gaze elevations (+10 deg, +5 deg, 0 deg, -5 deg, -10 deg elevations from eye level) and 10 line elevations (+25 cm, +20 cm, +15 cm, +10 cm, +5 cm, -5 cm, -10 cm, -15 cm, -20 cm, -25 cm from eye level; i.e. respectively +1.3 deg, +2.5 deg, +3.8 deg, +5. deg, +6.3 deg -6.3 deg, -5. deg, -3.8 deg, -2.5 deg, -1.3 deg, elevations from eye level) were manipulated in a counterbalanced pseudo-random order to prevent the possibility of any order effect. Subjects were neither informed about the number and angular values of body and gaze orientations nor about the number and height of line elevations. They were asked to answer the following question: “Do you think that you would pass under the line, in the present body orientation, imagining a virtual horizontal displacement of your body ?”

A typical sequence of judgements happened as follows: The subjects were first tilted at the desired angle of orientation. This was followed by a 15 s period of rest, allowing the post-rotational effects issued from semi-circular canals stimulation to disappear (Benson, 1990; Goldberg and Fernandez, 1977). A loudspeaker, positioned in the subjects' median plane, 1 m behind the chair and elevated at eye level, emitted a first auditory signal indicating the trial onset, at which a luminous target appeared ($t = 0$ s). Subjects had to keep their gaze on the target during all the visual presentation. At $t = 2$ s, a luminous line appeared. Subjects were then required to orient their attention towards the luminous line projected in the peripheral field of vision and to estimate the possibility of passing under the line. At $t = 6$ s, the luminous target and the line disappeared and a second auditory signal indicated it was time to respond via the push buttons (“able to pass” with the right hand-held button and “not able to pass” with the left hand-held button). The instructions were frequently repeated to keep subjects alert and concentrated on the task throughout the experiment. We assume that auditory signals did not affect visual localization, as no attentional focus on the spatial location of the sound was required (Bertelson and Radeau, 1971; Pick et al. 1969; Warren, 1979).

Eye movements were controlled online by means of a vertical EOG recording of the subjects' dominant eye. A consistent shift of the EOG signal indicated a change in gaze elevation whereas a sustained signal indicated a stabilisation of gaze elevation. The signal polarity indicated the direction of vertical gaze displacement. Overall, subjects

adequately performed the task. Nevertheless, if the DC signal indicated a change during the fixation task (e.g., a blink or an eye movement), the trial was immediately cancelled by the experimenter and presented again later in the session.

Finally, ten judgements (corresponding to 10 line elevations randomly presented for different gaze elevations) were obtained within a sequence executed at the same body orientation. Each sequence ended by a rotation of the tilting chair back to the vertical and the room was lit for 15 s before a new sequence was launched. To limit the time spent on the experiment, a specific trial was presented only once for a total of 250 judgments. This design was chosen in accordance to the previous observations of Bringoux et al. (2008) who found high intrasubject judgment reliability after several trial repetitions in a similar perceptual task.

Data processing

Judgements were converted into binary values. A score of 1 was attributed when the subjects estimated they could pass under the line (in other words, when the line elevation was perceived higher than the minimal height for passing under). Conversely, a score of 0 was attributed when the subjects estimated they could not pass under the line. A Probit model, using a non-linear regression analysis for dichotomic variables, enabled us to determine the probability p that subjects estimated at 50% that they could pass under the line. The Probit function was defined by the following relation:

$$p_i = 1 / (1 + (C_{i,j} / C_0)^n) \quad (1)$$

Where " p_i " is the probability that subjects estimated they can pass under the line. " i " corresponds to the line number in the sequence, " j " to the trial number, " C_0 " the line number for $p=0.5$ and " n " the slope of the tangent at the inflection point of the curve. The latter coefficient constitutes an estimation of the discrimination sensibility relative to the chosen increments. An Analysis of Variance (ANOVA) with repeated measures was performed on " n " values, to test any differences between the discrimination sensibility calculated for each experimental condition. Line elevations obtained at $p=0.5$ via the psychometric function defined judgements of subjective "passability", that is, estimates of the minimal height relative to eye level required for passing under obstacles. The estimates of subjective "passability", initially referred to eye-level for convenience, were

subsequently reported to the top of the head, defined as the highest physical point of the head from the horizontal floor of the room measured for each subject in each body orientation. Hence, the data were expressed as a vertical elevation (in cm) relative to the top of the head in order to define a true level of "passability". A repeated measures ANOVA was applied to the estimates of subjective "passability" relative to the top of the head in order to test any differences between body and gaze orientation angles and to investigate a possible interaction between the two factors. The influence of the egocentric position of the eyes was also investigated by a one way ANOVA applied to the estimates of subjective "passability" relative to eye-in-head orientation. Finally, a multiple linear regression analysis was conducted on the mean estimates of subjective "passability" for each condition (i.e., for a specific body orientation associated to a particular gaze elevation) in order to investigate the presence of linear and independent effects of body and gaze orientation upon estimates and to characterize the magnitude of these effects.

Results

All the subjects stated that the required task was easy to perform and overall exhibited no hesitation when giving their response. Figure 2 illustrates the mean raw responses obtained for the different line elevations, relative to a) body orientation and b) gaze elevation. Overall, observation of the data showed that the higher the line relative to eye level, the more the subjects tended to answer that they could pass under, independently of their body orientation or their gaze elevation. Furthermore, these raw data also suggested specific effects of body and gaze orientation upon estimates.

Probit analysis

A non-linear regression analysis (Probit function) was performed to determine the subjective "passability" for each subject in each experimental condition (see Methods). To assess the discrimination sensibility of the Probit processing, a 5 body orientations (-10 deg; -5 deg; 0 deg; +5 deg; +10 deg) x 5 gaze elevations (-10 deg; -5 deg; 0 deg; +5 deg; +10 deg) repeated measures ANOVA was performed on the "n" values (i.e. the slopes calculated at the inflection point of each function). Results showed there was no significant difference between body orientation angles ($F_{(4,44)} = 1.75$; $p = .16$) or gaze elevation angles ($F_{(4,44)} = 0.91$; $p = .47$). The interaction between both factors was also non-significant ($F_{(16,176)} = 1.31$; $p = .2$). These results showed that the sensibility to

discriminate the subjective "passability" for subjects did not differ between the experimental conditions.

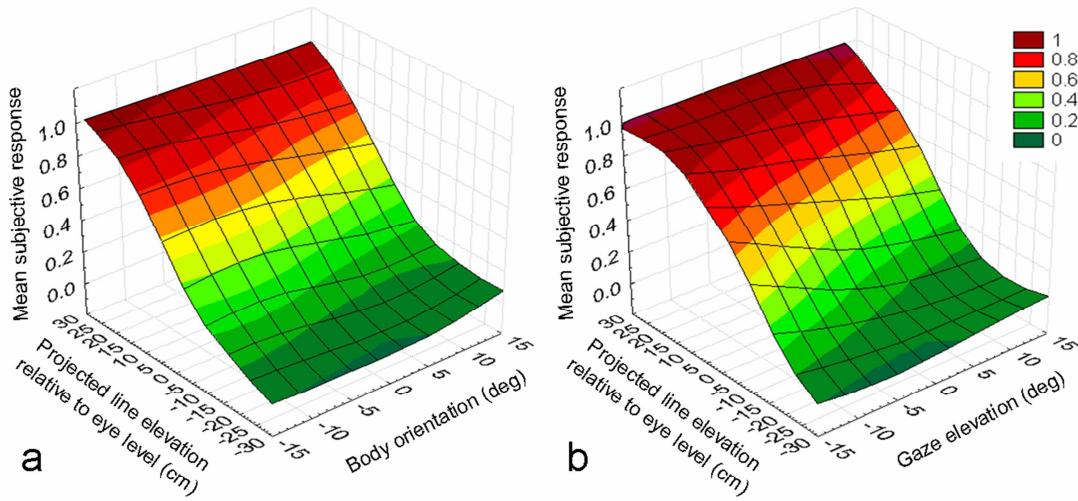


Figure 2: Typical psychometric functions from all the subjects obtained via Probit non-linear regression analysis for (a) the different body orientations or (b) different gaze elevations. The mean subjective responses corresponded to the mean perceptual scores obtained when subjects had to estimate the minimal height for passing under. The value extracted at $p=0.5$ from each Probit function corresponds to the subjective "passability", that is, the perceived minimal height for passing under the line.

Mean comparisons of subjective "passability"

The subjective "passability" relative to eye level obtained via the Probit analysis was reported to the true level of "passability", that is, relative to the top of the head for each subject at each body orientation angle. Overall, the subjective "passability" reported to the top of the head was found notably lower (8.24 cm) than the minimal physical height required for passing under the line. This denotes a significant over-estimation of the "passability" under obstacles.

A 5 body orientations (-10 deg; -5 deg; 0 deg; +5 deg; +10 deg) \times 5 gaze elevations (-10 deg; -5 deg; 0 deg; +5 deg; +10 deg) ANOVA conducted on the mean estimates of subjective "passability" revealed a significant effect of body orientation ($F_{(4,44)} = 7.5636$; $p < .001$) and gaze elevation ($F_{(4,44)} = 9.5481$; $p < .001$) on the estimated possibility of passing under the line. The interaction between both factors was not significant ($F_{(16,176)} = 0.74$; $p = .75$). This means that the main effect of body orientation was not affected by gaze elevation and vice versa. Post-hoc analyses (Newman-Keuls test) showed significant differences between body orientation angles (Figure 3).

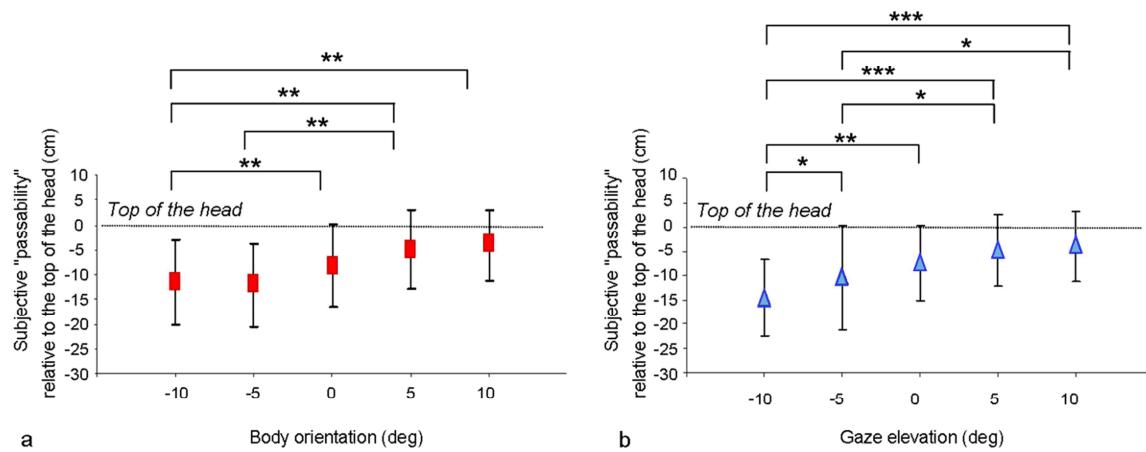


Figure 3: Mean subjective "passability" relative to the top of the head (plotted with \pm confidence intervals) obtained for (a) the different body orientations or (b) for the different gaze elevations. The zero corresponds to the top of the head reference (i.e. the highest point of the head irrespective of head orientation). Significant differences between body and gaze orientation angles (Newman-Keuls test) are also shown ($***=p<.001$; $**=p<.01$; $*=p<.05$).

A 9 eye-in-head orientations (-20 deg; -15 deg; -10 deg; -5 deg; 0 deg; +5 deg; +10 deg; +15 deg; +20 deg) ANOVA conducted on the mean estimates of subjective "passability" showed non significant differences between eye-in-head orientation conditions ($F_{(8,88)} = 1.21$; $p = .30$). Then, the judgement of subjective "possibility" was not affected by the egocentric position of the eyes relative to the head.

Multiple linear regression analysis

A multiple regression analysis, applied to the mean estimates of subjective "passability" obtained for all the subjects in all experimental conditions, showed a linear effect of body orientation and an independent linear effect of gaze elevation on the estimated possibility of passing under high obstacles ($F_{(2,22)} = 81.84$; $p<.001$). Figure 4 shows that most of the data fit on a simple plane when plotted as a function of body and gaze orientation.

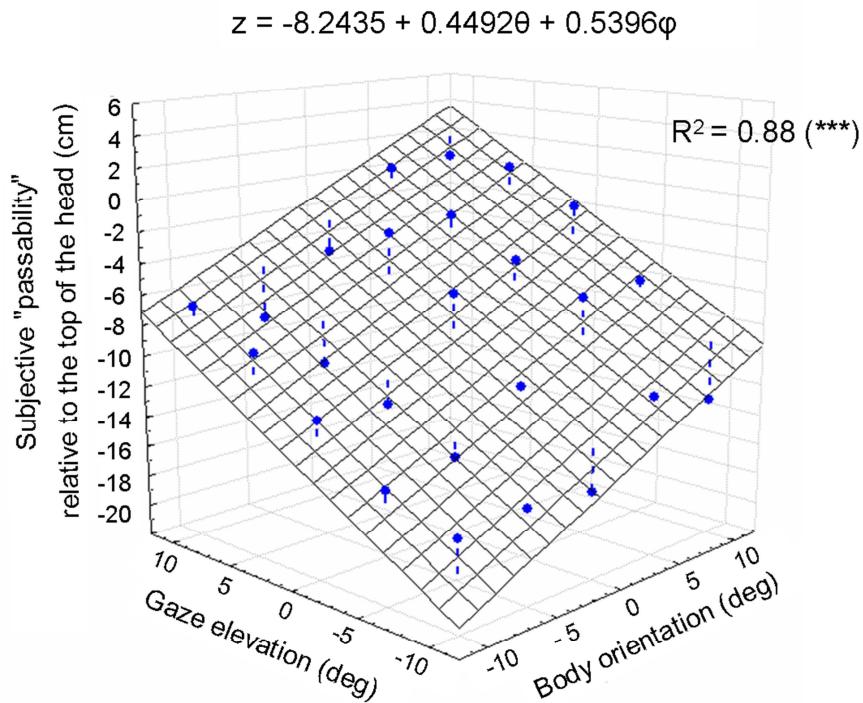


Figure 4. Multiple regression function fitted to the mean estimates of subjective "passability". Mean estimates of subjective "passability" relative to the top of the head (black circles) are plotted against body orientation and gaze elevation. The hatched area represents the multiple regression plane, whose regression equation is given above the graph: "z" corresponds to the subjective "passability" relative to the top of the head, "θ" to the body orientation angle, and "φ" to the gaze elevation angle. The length of the segments joining the black circles to the plane represents the deviation of the subjective "passability" from the plane. The R^2 indicates the significance level of the fit.

These results showed that the error on estimating the possibility of passing under high obstacles is both proportional to the body orientation angle and to the gaze elevation angle. They also showed that the independent effects of body and gaze orientation combined additively. The multiple linear regression analysis is characterised by the following function:

$$z = 0.45\theta + 0.54\varphi - 8.24 \quad (2)$$

where "z" corresponds to the subjective "passability" relative to the top of the head, "θ" to the body orientation angle, "φ" to the gaze elevation angle. 0.45 is the coefficient associated to the weight of the body orientation influence; 0.54 is the coefficient associated to the weight of the gaze orientation influence and -8.24 corresponds to the mean calculated subjective "passability" relative to the top of the head.

Discussion

The main purpose of this study was to investigate the influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during whole-body tilt, while stationary, and in absence of visual allocentric cues. Specifically, the question was to determine whether gaze elevation could constitute an egocentric influence which may in turn affect geocentric estimates. The second objective of this work was to question the relation between body orientation and gaze elevation on these perceptual judgements.

Overall, our results showed that the mean subjective "passability" is -8.24 cm (i.e., -2,07 deg) lower than the physical minimal height required to adequately perform the task. In other words, subjects estimated they were able to pass under obstacles which were actually located below the top of their head. These results highlighted a global overestimation of the possibility of passing under obstacles. Recently, Bringoux et al. (2008), using the same experimental setup as the one designed in the present study, found a similar overestimation of the subjective "passability" during body tilt. This result has been related to the perceived visual horizon, which was found globally lower than the physical reference in darkness (Bringoux et al. 2008). For instance, the measured offset was -3 deg in the same experimental setup. Although the subjective visual horizon was not recorded in the present experiment, the occurrence of such a phenomenon is clearly assumed in this study. Other previous works also reported that the subjective visual horizon is lower in darkness (Bringoux et al. 2004; 2008; MacDougall, 1903; Raphel and Barraud, 1994; Sharp, 1934; Stopper and Cohen, 1986). This phenomenon may be related to the 30 degrees backward orientation of the saccular and utricular maculae relative to the head (Rosenhal, 1972; Bortolami et al. 2006). As a consequence, obstacles, whose elevation is referred to the subjective visual horizon, will be considered higher than they actually are, since the visual horizon is perceived lower than its true location in darkness.

Gaze elevation effect on geocentric judgments

Our results showed a significant effect of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles. Specifically, the more the gaze was orientated downward, the more the possibility of passing under high obstacles was overestimated. Conversely, this overestimation was reduced when the gaze was orientated upward.

According to many studies, gaze constitutes an egocentric reference that may be advanced as a potential source of egocentric attraction reported on geocentric judgments.

Numerous authors have stressed the importance of eye level in height and distance judgments (Li et al. 2001; Matin and Li, 1995; Ooi et al. 2001). Specifically, eye level is commonly considered as a central reference in egocentric (Matin and Li, 1995) and geocentric spatial localization in darkness (Bringoux et al. 2004; 2008; Stoper and Cohen, 1989). In parallel, Poljac and van den Berg (2005) and Poljac et al. (2005) have investigated the importance of the plane of regard in egocentric spatial localization. In a first study, subjects were asked to point with their supported arm to their plane of regard (Poljac and van den Berg, 2005). The results showed a correct localization of this plane in space. In a second study, subjects were asked to perceptually estimate the elevation of flashed probe points relative to their plane of regard during eccentric viewing (Poljac et al. 2005). These results showed that the elevation of objects relative to this plane was perceived accurately, irrespective of eye or head orientation. These findings suggest that passive object localization relative to an egocentric reference is correctly achieved along the vertical dimension, contrary to what has been reported for judgements of object lateral eccentricity in the peripheral field assessed via pointing movements (Bock, 1993). In the latter case, the necessary transformation of sensory coordinates into an appropriate motor output could explain the errors reported in pointing judgments (McIntyre et al. 1997).

In line with the conclusion of Poljac et al. (2005), stating that "*the plane of regard is a good starting point for representing objects in head-centric coordinates*", our results demonstrated that the plane of regard is also involved in judging the location of objects with respect to a geocentric reference frame (i.e., including the horizontal plane passing through the eyes). The linear effect of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles observed in our study implies that gaze elevation influence is not magnified for the maximal gaze elevation angles tested in this experiment. In other words, gaze elevation exerted a linear egocentric attraction upon geocentric judgments in a range from -10 degrees to +10 degrees (a range limited by some morphological constraints at extreme body tilts such as the curvature of the brow).

Additive independent effects of body and gaze orientation

The results did not reveal any interaction between body and gaze orientation. Specifically, in the range of the tested orientations, body orientation effect is not influenced by gaze elevation angle, and conversely, gaze elevation effect is not affected by body orientation angle. Additive effects of body and gaze orientation were also shown. Moreover, our results showed that several egocentric references may have additive effects and participate, each independently, in the construction of a resultant egocentric influence upon geocentric judgments.

Some previous studies suggested that multiple body parts could constitute egocentric references which additively combine to yield main effects on geocentric judgments. For instance, Guerraz et al. (1998) showed that lateral head tilt alone and lateral trunk tilt alone generated single effects on subjective visual vertical estimates, which could merge into a cumulative main egocentric effect when head and trunk are tilted together. Moreover, some authors (Becker et al. 2000; Ito and Gresty, 1997) suggested that multiple body parts could be involved in the elaboration of the idiotropic vector influencing verticality perception. Consequently, one might expect that the whole-body configuration in space (sitting or upright posture) could modify the perception of some geocentric directions of space involved in the judgement of "passability" under obstacles.

Interpenetrability between reference frames

The extent to which reference frames are implicated in spatial cognition tasks is still widely discussed. Several hypotheses have been proposed in the literature.

The first hypothesis suggests that subjects can rapidly adapt their behaviour by switching from a specific reference frame to another while performing their task. For instance, Ghafouri et al. (2002) identified a radical switch between allocentric and egocentric references frames during fast arm pointing movements. In this task, subjects had to point either to a motionless target or to a target moving synchronously with the trunk. In this context, reference frames could be considered as pre-existing neurophysiological structures, some exclusive from others (Galati et al. 2000).

The second hypothesis supports the existence of intermediate states, in which egocentric, allocentric and geocentric cues would merge into a hybrid reference frame (Flanders and Soechting, 1995; Kappers, 2003; 2004; Paillard, 1991; Soechting and Flanders, 1992). For instance, Kappers (2004) found a combined contribution of allocentric and egocentric cues in the haptic judgment of parallelism. Blindfolded subjects exhibited systematic deviations when manually rotating a test bar in such a way that they felt it as parallel relative to a reference bar in the midsagittal plane. In the same vein, Coello and Iwanow (2006) found an influence of allocentric cues (given by a structured background) on an egocentric pointing task (i.e., pointing movements toward a visual target located at various distances along the sagittal axis). Finally, according to Bringoux et al. (2004; 2007; 2008), the present findings illustrate the “interpenetrability” between reference frames.

Two cases of “interpenetrability” have been described in the literature. The first relates to the existence of a dynamic intermediate state, where the weight attributed to each reference frame evolved during the task. Specifically, this phenomenon has been observed on the rod-and-frame effect during head tilt (DiLorenzo and Rock, 1982) or whole-body tilt (Bischof, 1974; Goodenough et al. 1985; Zoccolotti et al. 1992). For instance, it was shown that a 45 deg head tilt increased the influence of a 20 deg tilted frame upon visual vertical estimates, compared to a head upright condition (DiLorenzo and Rock, 1982). The greater rod-and-frame effect was explained by the decreased efficiency of available gravity cues during head tilt, but might also be understood as an increased weight of the allocentric (visual) frame of reference when the head is no longer aligned with gravity.

The second case refers to the existence of an intermediate reference frame in which the contribution of each egocentric, allocentric or geocentric cues is kept constant and stable throughout the task (Bringoux et al. 2004; 2007; 2008; Kappers, 2003; 2004; Neggers et al. 2005). For instance, Bringoux et al. (2008), showed that egocentric references could influence the perceived location of objects relative to some geocentric references, each with a constant weight, whatever the tilt magnitude. In the same perspective, Neggers et al. (2005) showed that allocentric cues, given by a structured visual background placed behind a target, biased judgements of the target’s location relative to the body with a constant weight.

According to the latter hypothesis, our study strongly suggests that perceptual shifts in judging the "passability" under obstacles may result from the "interpenetrability" between egocentric and geocentric reference frames. This finding might lead to a new and hybrid reference frame, corresponding to a sustained intermediate state between a geocentric reference frame normally required to adequately perform the task, and a disturbing egocentric reference frame. Successive transformations of coordinates required to perform the task (Matin and Li, 1992; Stoper and Cohen, 1989) may account for the influence of one reference frame to another.

Conclusion

To our knowledge, the present study is the first to show an independent, linear influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles, while stationary and in the absence of allocentric cues. Furthermore, our results suggest that gaze elevation is additively combined to body orientation to yield a resultant egocentric effect that modifies geocentric estimates. The present work also supports the hypothesis of "interpenetrability" between egocentric and geocentric reference frames to explain how judgements of "passability" under obstacles are attracted towards body orientation and gaze elevation. Further experiments investigating the orientation of different body segments in space should be particularly interesting to better understand the egocentric influences upon judgements of subjective "passability" under obstacles.

Finally, our study may have important repercussions in aeronautics where pilots are usually seated 30 degrees backward (Roumes and Grau, 2003). Comparable egocentric attraction upon spatial estimates may arise when pilots have to elevate their gaze towards a vertical visual display, while controlling the pitch of their aircraft. Mars et al. (2004; 2005) showed that head and body orientation are of importance in judging the pitch of aircrafts. Our study suggests that gaze elevation should also be taken into account in the conception of visual displays to prevent pilots from risks of spatial disorientation, specifically under visually poor flight conditions (Braithwaite et al. 1998; Kirkham et al. 1978).

In addition, because gaze orientation and attentional focus are often congruent in everyday life, further experiments dissociating gaze orientation and attentional location might also be investigated to reduce the risks of accidents in aeronautics. Specifically, in accordance with the paradigm of Posner et al. (1980), it could be valuable to determine whether priming cues orienting attention would affect geocentric estimates in the same way as gaze elevation.

Acknowledgements

The authors are grateful to Gabriel Gauthier, Franck Buloup, and Alain Donneaud for their technical expertise and Cecile Scotto for her help during data acquisition and processing. They also thank Thelma Coyle, Julie Martin-Malivel and George Mitchell for English corrections, and the anonymous reviewers for their helpful comments in revising the current ms.

References

- Becker W, Jürgens R, Boß T (2000) Vestibular perception of self-rotation in different postures: a comparison between sitting and standing subjects. *Exp Brain Res* 131(4):468–476
- Benson AJ (1990) Sensory functions and limitations of the vestibular system. In: Warren R, Wertheim AH (eds) *Perception and Control of Self-Motion*. Erlbaum, Hillsdale New-Jersey, pp 145-170
- Bertelson P, Radeau M (1981) Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual discordance. *Percept Psychophys* 29(6):578-584
- Bishof N (1974) Optic-vestibular orientation to the vertical. In: HH Kornhuber (ed) *Handbook of sensory physiology, Vestibular System Part 2: Psychophysics, applied aspects and general interpretations*, vol 6. Springer, New-York, pp 155-190
- Bock O (1993) Localization of objects in the peripheral visual field. *Behav Brain Res* 56:77-84
- Bortolami SB, Pierobon A, DiZio P, Lackner JR (2006) Localization of the subjective vertical during roll, pitch, and recumbent yaw body tilt. *Exp Brain Res* 173(3):364-373
- Braithwaite MG, Douglass PK, Durnford SJ, Lucas G (1998) The hazard of spatial disorientation during helicopter flight using night vision devices. *Aviat Space Environ Med* 69(11):1038-44
- Bringoux L, Tamura K, Faldon M, Gresty MA, Bronstein AM (2004) Influence of whole-body pitch tilt and kinesthetic cues on the perceived gravity-referenced eye level. *Exp Brain Res* 155(3):385-392
- Bringoux L, Mezey LE, Faldon M, Gresty MA, Bronstein AM (2007) Influence of pitch tilts on the perception of gravity-referenced eye level in labyrinthine defective subjects. *Neuropsychologia* 45(2):350-356
- Bringoux L, Robic G, Gauthier GM, Vercher JL (2008) Judging beforehand the possibility of passing under obstacles without motion: the influence of egocentric and geocentric frames of reference. *Exp Brain Res* 185(4):673-80
- Coello Y, Iwanow O (2006) Effect of structuring the workspace on cognitive and sensorimotor distance estimation: no dissociation between perception and action. *Percept Psychophys* 68(2):278-289
- 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(4):536-46
- Flanders M, Soechting JF (1995) Frames of reference for hand orientation. *J Cogn Neurosci* 7(2):182-195
- Ghafouri M, Archambault PS, Adamovich SV, Feldman AG (2002) Pointing movements may be produced in different frames of reference depending on the task demand. *Brain Res* 929(1):117-128
- Gibson JJ (1979) *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston
- Goldberg JM, Fernandez C (1977) Conduction times and background discharge of vestibular afferents. *Brain Res* 122(3):545-550
- Goodenough DR, Cox PW, Sigman E, Strawderman WE (1985) A cognitive-style conception of the field-dependence dimension. *Cah Psychol Cogn* 5:687-706
- Guerraz M, Poquin D, Luyat M, Ohlmann T (1998) Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. *Percept Mot Skills* 87(2):643-648
- Howard IP (1982) *Human visual orientation*. Wiley, New-York
- Ito Y, Gresty MA (1997) Subjective postural orientation and visual vertical during slow pitch tilt for the seated human subject. *Aviat Space Environ Med*. 68(1):3-12

- Kappers AML (2003) Large systematic deviations in a bimanual parallelity task: further analysis of contributing factors. *Acta Psychol* 114(2):131-145
- Kappers AML (2004) The contributions of egocentric and allocentric reference frames in haptic spatial tasks. *Acta Psychol* 117(3):333-340
- Kirkham WR, Collins WE, Grape PM, Simpson JM, Wallace TF (1978) Spatial disorientation in general aviation accidents. *Aviat Space Environ Med* 49(9):1080-6
- Li W, Dallal N, Matin L (2001) Influences of visual pitch and visual yaw on visually perceived eye level (VPEL) and straight ahead (VPSA) for erect and rolled-to-horizontal observers. *Vision Res* 41(22):2873-2894
- MacDougall R (1903) The subjective horizon. *Psychol Rev* 4:145-166
- Marcilly R, Luyat M (2008) The role of eye height in judgment of an affordance of passage under a barrier. *Curr Psychol Lett* 24(1):12-24
- Mark LS (1987) Eyeheight-scaled information about affordances: A study of sitting and stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13(3):361-370
- Mars F, Vercher JL, Blouin J (2004) Perception of the vertical with a head-mounted visual frame during head tilt. *Ergonomics* 47:1116-1130
- Mars F, Bringoux L, Cian C, Barraud PA, Raphel C, Vercher JL (2005) Perception de la verticale avec un cadre visuel solidaire de la tête : implications pour l'utilisation des visiocasques. *Le Travail Humain* 68:125-152
- Matin L, Li W (1992) Visually perceived eye level: changes induced by a pitched from -vertical 2-line visual field. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 18(1):257-289
- Matin L, Li W (1995) Multimodal basis for egocentric spatial localization and orientation. *J Vestib Res* 5(6):499-518
- McIntyre J, Stratta F, Lacquaniti F (1997) Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol* 78(3):1601-1618
- Mittelstaedt H (1983) A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften* 70(6):272-281
- Mittelstaedt H (1986). The subjective vertical as a function of visual and extraretinal cues. *Acta Psychol* 63:63-85
- Neggers SFW, Schölvinck ML, van der Lubbe RHJ, Postma A (2005) Quantifying the interactions between allo- and egocentric representations of space. *Acta Psychol (Amst)* 118(1-2):25-45
- Ooi TL, Wu B, He ZJ (2001) Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature* 414:197-200
- Paillard J (1991) Motor and representational framing of space. In: Paillard J (Ed) *Brain and Space*, Oxford university press Oxford, pp 163-182
- Pick HL, Warren DH, Hay JC (1969) Sensory conflict in judgment of spatial direction. *Percept Psychophys* 6:203-205
- Poljac E, Lankheet MJM, van den Berg AV (2005) Perceptual compensation for eye torsion. *Vision Res* 45(4):485-496

- Poljac E, van den Berg AV (2005) Localization of the plane of regard in space. *Exp Brain Res* 163(4):457-467
- Posner MI, Snyder CRR, Davidson BJ (1980) Attention and detection of signals. *J Exp Psychol Gen* 102(2):160-174
- Raphel C, Barraud PA (1994) Perceptual thresholds of radial accelerations as indicated by visually perceived eye level. *Aviat Space* 65:204-208
- Roumes C, Grau JY (2003) Rafale: a human factors view of the man machine interface. *Médecine aéronautique et spatiale* 45:23-26
- Rosenhal U (1972) Vestibular macular mapping in man. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 81:339-351
- Sharp WL (1934) An experimental study concerning visual localisation in the horizontal plane. *J Exp Psychol [Hum Percept]* 17:787-797
- Soechting JF, Flanders M (1992) Moving in three-dimensional space: frames of reference, vectors, and coordinate systems. *Annul Rev Neurosci* 15:167-191
- Stoper AE, Cohen MM (1986) Judgements of eye level in light and in darkness. *Percept Psychophys* 40:311-306
- Stoper AE, Cohen MM (1989) Effect of structured visual environments on apparent eye level. *Percept Psychophys* 46(5):469-475
- Van der Meer ALH (1997) Visual guidance of passing under a barrier. *Early Dev Parent* 6:149-157
- Wagman JB, Malek EA (2008) Perception of whether an object affords walking under from different points of observation. *Ecol Psychol* 20:65-83
- Warren DH (1979) Spatial localization under conflict conditions: Is there a single explanation? *Perception* 8:323-337
- Warren WH Jr (1984) Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 10(5):683-703
- Warren WH Jr, Whang S (1987) Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13(3):671-383
- Zoccolotti P, Antonucci G, Goodenough DR, Pizzamiglio L, Spinelli D. (1992) The role of frame size on vertical and horizontal observers in the rod-and-frame illusion. *Acta Psychol* 9(2):171-87

6.1.2. Etude 2

INFLUENCE DE LA CONFIGURATION POSTURALE DANS L'ESTIMATION DES POSSIBILITES DE FRANCHISSEMENT D'OBSTACLES HAUTS

Bourrelly A, Vercher JL, Bringoux L

Acta Psychologica (en révision)

Nous venons de mettre en évidence une influence de l'orientation du regard et du corps entier dans la perception de l'espace géocentré. Cependant, le corps étant composé de plusieurs segments, quel est l'origine de l'influence corporelle observée ? Ce travail de recherche questionne la contribution relative de l'axe de la tête, du tronc et des jambes dans l'apparition du phénomène d'attraction égocentrale précédemment observé lors de l'orientation du corps entier sur la perception de l'espace géocentré. Pour ce faire, différentes configurations posturales ont été manipulées. Un effet de l'orientation du corps entier, du tronc seul et de la tête seule, ainsi que deux positions de jambes (fléchies vs tendues par rapport au tronc) ont été testées. Les résultats montrent des déviations systématiques de la hauteur minimale de franchissement subjectif dans la direction de l'angle manipulé. De plus, une relation proportionnelle entre la hauteur minimale de franchissement subjectif et l'angle d'orientation est également observée. Dans chacune des configurations posturales, la position de la tête et du tronc semble majoritairement impliquée dans l'émergence du phénomène d'attraction égocentrale précédemment observé lors de l'orientation du corps entier. La position des jambes quant à elle ne semble pas déterminante dans l'émergence du phénomène. Par rapport à la condition d'inclinaison du corps entier, une inclinaison du tronc seul diminue sensiblement l'erreur d'estimation enregistrée, alors qu'une inclinaison de la tête seule l'augmente considérablement. Nos résultats suggèrent que l'influence égocentrale observée lors de l'orientation du corps entier pourrait résulter d'un processus de repondération d'effets égocentrés spécifiques issus de différentes parties du corps. Ce processus pourrait notamment s'établir sur la base de la fiabilité accordée aux différentes informations sensorielles disponibles dans un type de configuration posturale donnée.

***POSTURAL CONFIGURATION
AFFECTS THE PERCEPTION OF EARTH-BASED SPACE
DURING PITCH TILT***

Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL

✉ *aurore.bourrelly@hotmail.fr ; Lionel.bringoux@univmed.fr*

UMR CNRS 6233 ‘Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey’,
CNRS & Aix-Marseille Université, France.

Abstract

This study investigates the relative contribution of body parts in the elaboration of a whole-body egocentric attraction phenomenon previously observed during earth-based judgments. This was addressed through a particular earth-based task requiring estimating the possibility of passing under a projected line, imagining a forward horizontal displacement. Different postural configurations were tested, involving whole-body tilt, trunk tilt alone or head tilt alone. Two legs positions relative to the trunk were manipulated. Results showed systematic deviations of the subjective “passability” toward the tilt, linearly related to the tilt magnitude. For each postural configuration, the egocentric influence appeared to be highly dependent on the position of trunk and head axes, whereas the legs position appeared not relevant. When compared to the whole-body tilt condition, tilting the trunk alone consistently reduced the amount of the deviation toward the tilt, whereas tilting the head alone consistently increased it. Our results suggest that several specific effects from multiple body parts can account for the global deviation of the estimates observed during whole-body tilt. Most importantly, we support that the relative contribution of the body segments could mainly depend on a reweighting process, probably based on the reliability of sensory information available for a particular postural set.

Key words: Spatial perception – Postural orientation – Reference frame – Geocentric – Egocentric.

Introduction

The visual horizon, defined as the plane normal to gravity crossing eye level (Stopper and Cohen, 1989) has been found critically involved in the perception of earth-based space. Several studies have shown that estimating distance (Ooi et al. 2001), elevation (Matin and Li, 1995), and the possibility of passing under high obstacles (Bringoux et al. 2008) relies on this reference. Most of the time, the visual horizon is fully accessible, or can be derived from the contextual lines of a structured visual environment if not directly available (Wu et al. 2005). However, in absence of vision (during night or foggy day), the spatial judgments mentioned above must rely on an implicit horizontal reference named the subjective visual horizon (SVH).

Numerous studies indicated that the visual horizon was generally perceived -2° below the physical reference, when measured in darkness for erect subjects (e.g., McDougall, 1903; Howard, 1986). They also showed that the SVH could be influenced by numerous environmental factors such as the orientation of the visual scene (Matin and Li, 1995), and the gravitational flow field (Tribukait and Eiken, 2005). Interestingly, body orientation was also found to significantly influence the SVH (about 20% of body tilt magnitude in the direction of pitch body tilt, and in a range from $\pm 20^\circ$), stressing the importance of taking into account the whole-body position in space when making earth-based spatial judgements (Bringoux et al. 2004; 2008; Bourrelly et al. 2009; 2010). Nevertheless, the origin of this whole-body tilt influence remains unclear.

The main effect of body tilt upon SVH was initially interpreted as a decreased sensitivity of the vestibular system during tilt, leading to a diminished sensation of tilt (Lechner-Steinleitner, 1978; Shöne, 1964; Young, 1984). Similar interpretation could be given considering the phenomenon of somatosensory adaptation observed after prolonged tilt (Higashiyama and Koga, 1998; Wade, 1970). However, this hypothesis was inconsistent with other studies which found no relationship between the estimated body orientation and the perception of earth-based references (Mast and Jarchow, 1996, Mittelstaedt, 1996; Trousselard et al. 2003). Another interpretation of the relationship observed between body orientation and SVH has been recently suggested in terms of egocentric attraction induced by body tilt (Bringoux et al. 2004; 2008).

Here, we addressed the issue of the possible link between this latter interpretation and the idiotropic vector hypothesis previously formulated by Mittelstaedt (1983). This hypothesis considers that the longitudinal Z-body axis could serve as a strong reference in estimating some relevant earth-based directions such as the subjective visual vertical and the SVH. According to the previous explanation, geocentric judgements would be attracted towards the whole Z-body axis, regardless of the perception of tilt (Carriot et al. 2008). This whole-body attraction has been reported more or less important, however, depending on the dimension of body tilt (roll vs pitch; Ebenholtz, 1970) or the direction to be estimated (vertical vs horizontal; Betts and Curthoys, 1998; Carriot et al. 2008; Lejeune et al. 2009). Alternatively, the Z-trunk axis and the Z-head axis were also shown to constitute relevant egocentric references influencing the perception of earth-based directions (Guerraz et al. 1998; Wade, 1969; 1970; Wetzig and Baumgarten, 1990). For instance, Wetzig and Baumgarten (1990) and Guerraz et al. (1998) showed a specific effect of roll head tilt on judgments of verticality which was smaller than during whole-body tilt, supporting the assumption that multiple body parts could be taken into account in the elaboration of a whole-body egocentric attraction. Moreover, Guerraz et al. (1998) suggested that the single effects relative to the tilt of the Z-trunk axis and the Z-head axis could be additively combined into a main egocentric effect when the head and trunk were tilted together. However, this hypothesis of additivity between independent body parts has not been systematically accepted. Ito and Gresty (1996) supported the theory of a dynamic combination of multiple body parts such as legs, trunk and head position in the elaboration of a main egocentric effect. Specifically, they suggested that the weight attributed to each single body part could evolve during the task such as the more the subjects are tilted backward, the more the weight attributed to the trunk-leg axis is important. In addition, the egocentric attraction during tilt was found greater for erect subjects (with the head to trunk-leg axis in alignment) than for seated subjects. These results strongly suggested that the postural configuration in space could affect a large number of spatial tasks relied on earth-based directions.

The aim of the present study was to determine the origin of the egocentric attraction previously observed on earth-based judgments during whole-body tilt. The question was addressed by testing the influence of postural configuration on a particular earth-based task which requires to estimate the possibility of passing under high obstacles (Bringoux et al. 2008; Bourrelly et al. 2009). Indeed, it has been previously demonstrated

that the perceived ability of passing under obstacles in otherwise darkness is related to the perceived earth-based horizon at eye level, acting as a reference for height judgements (Bringoux et al. 2008; Marcilly et Luyat, 2008). In Experiment 1, we examined the contribution of head, trunk and leg positions in the elaboration of the whole-body egocentric attraction previously observed in the judgements of “passability” under a projected horizontal line. In Experiment 2, we focused on the influence of active head orientation in the same task to further investigate the contribution of somatosensory and vestibular inputs in the elaboration of the main egocentric attraction effect.

General methods

Apparatus

In the subsequent experiments reported here, subjects were seated on a padded tilting chair allowing body rotations in pitch within a range from +20° backward to -20° forward with accelerations above the vestibular threshold for rotation perception. Prior to any condition, subjects were restrained by means of a shoulder harness with their head strapped on a head-and-chinrest so that the naso-occipital axis was orthogonal to the direction of gravity when the chair was vertically oriented. Eye level was positioned so that the trans-ocular axis coincided to the axis of rotation of the chair. Consequently, eye level was kept at the same height relative to the floor reference (1.34 m) whatever the body tilt magnitude. Depending on the experimental condition, the head could be kept either vertical while the trunk was tilted, aligned with the trunk during whole-body tilts, or tilted alone while the trunk was kept vertical. The feet were strapped onto an adjustable foot-rest which permitted to reach specific legs positions (flexed vs extended) relative to the body.

Subjects were placed in front of a flat vertical screen 2 m height x 2.5 wide at a distance of 2.28 m from the eyes. A laser pointer located behind the screen projected a thin horizontal beam on a tilting mirror. The luminous line was reflected on the screen. The elevation of the projected line was adjustable in height by means of a galvanometer (Scanner Control CCX 100) which allowed the rotation of the mirror in pitch. The resulting luminous horizontal line was 2 m long and 0.01 m thick and adjustable in height with a precision of 0.01 m. Subjects held in both hands the digital response push buttons for judgment settings. Galvanometer control and response recordings were performed by

the ADwin-Pro system (Keithley[©]) piloted via our in-house software (Docometre). All the judgments were performed in a dark room to avoid external visual cues.

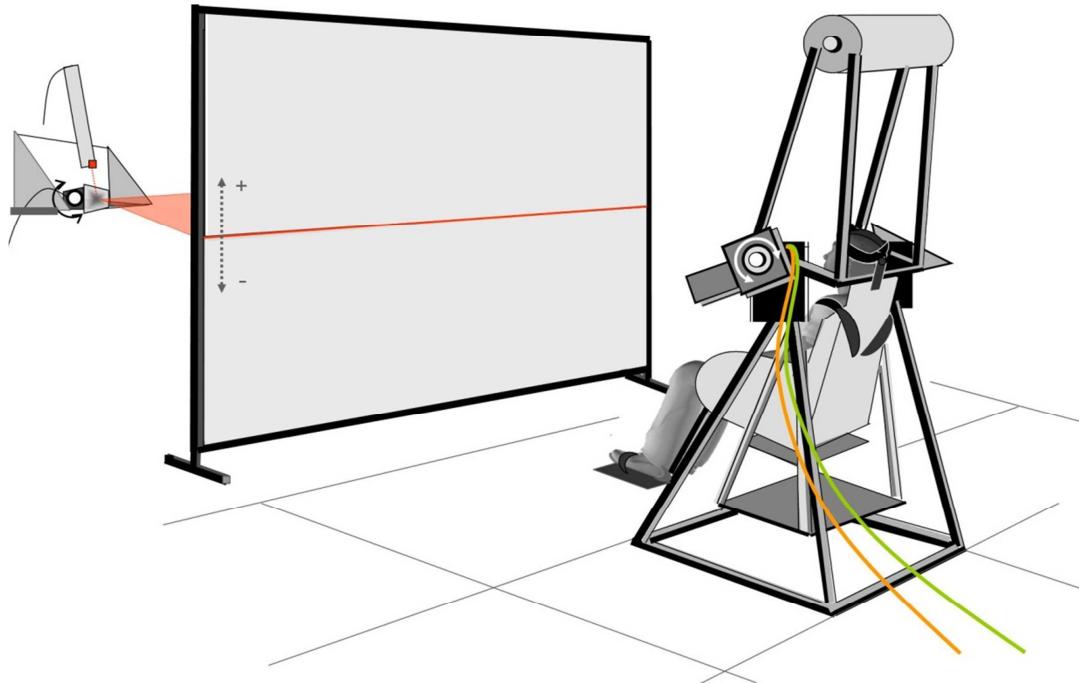


Figure.1: Illustration of the experimental set-up. The motorized chair rotating around the subjects' trans-ocular axis could be rotated from +20° backward to -20° forward. Depending on the experimental condition, subjects head could be either kept vertical while the trunk was tilted, aligned with the trunk during whole-body tilts, or tilted alone while the trunk was kept vertical. The feet were strapped onto an adjustable foot-rest which permitted to reach flexed or extended legs positions relative to the body. The luminous horizontal line was projected from a laser beam at different elevations on the screen. Subjects had to fix the line on the screen and estimate whether they could pass under, imagining a forward horizontal displacement.

General procedure

Nine angles of tilt were manipulated in the present study. For each body orientation, 10 line elevations were randomly presented. Subjects were asked to answer the following question: “Do you think you could pass under the line in the present body orientation, imagining a forward horizontal displacement of your body?”. To make sure that the subjects clearly understood the task, sketches were presented, illustrating a forward horizontal displacement (always normal to gravity) and passable or impassable obstacles for different postural configurations. Subjects were first positioned at the desired body angle relative to gravity in complete darkness. The chair was rotated at a constant velocity during 11 s, with a period of initial acceleration and final deceleration of 2 s (0.4°.s⁻¹ and 0.2°.s⁻² for ±5° tilt, 0.8°.s⁻¹ and 0.4°.s⁻² for ±10° tilt, 1.2°.s⁻¹ and 0.6°.s⁻²

for $\pm 15^\circ$ tilt, $1.6^\circ \cdot s^{-1}$ and $0.8^\circ \cdot s^{-2}$ for $\pm 20^\circ$ tilt). This was followed by 15 s of rest. This specific duration was chosen as a compromise between the weakest vestibular resting discharge allowing to consider post-rotational effects as negligible and limited somatosensory adaptation due to the subsequent period of static tilt (Benson, 1990; Goldberg and Fernandez, 1977). Stationary subjects were then asked to open their eyes and to gaze at the horizontal line which appeared on the screen during 4 s. At the end of the visual presentation, the line was switch off and subjects were asked to respond about the possibility of passing under the line, via a forced-choice judgement by means of two hand-held buttons. Judgment settings were recorded via the ADwin-Pro system (Keithley©) piloted via our in-house software (Docometre). At the end of the sequence (i.e., a successive presentation of 10 line elevations in a same body orientation), the chair was brought back to the vertical and the room lights were turned on for 10 s before a new sequence was launched. The instructions were frequently repeated to keep subjects alert and concentrated on the task throughout the experiment. Subjects were neither informed about the number and height of line elevations.

Data processing

Judgment settings were first converted into binary values. A score of 1 was attributed when the subjects estimated they could pass under the line, that is, when the line elevation was perceived higher than the minimal height for passing under. Conversely, a score of 0 was attributed when the subjects estimated they could not pass under the line. A subsequent "Probit" model, using a non-linear regression analysis for dichotomic variables, was used to determine the probability p that subjects estimated at 50% that they could pass under the line. Line elevations obtained at $p=0.5$ via the psychometric function defined judgements of subjective "passability", that is, estimates of the minimal height relative to eye level required for passing under obstacles (see Bourrelly et al. 2009). The slope of the tangent at the inflection point of the Probit curve gave an indication about the discrimination sensitivity of the so-called subjective "passability" relative to the chosen increments. The sharper the slope, the higher the discrimination sensitivity. Analyses of variance (ANOVA) with repeated measures were performed on the slopes of the Probit function to ensure there was no difference in the discrimination sensitivity whatever the experimental condition. The estimates of subjective "passability", initially referred to eye-level for convenience, were subsequently referred to the top of the head (the highest physical point of the head from the horizontal

floor reference) measured for each subject in each body orientation. Hence, the data were expressed as a vertical elevation (in cm) relative to the top of the head in order to define a true level of “passability”. Repeated measures ANOVAs were performed on the data to test the presence of a specific egocentric influence in each postural configuration at the different angles of tilt. Linear regression lines were then applied to the estimates of subjective “passability” for each subject in each postural configuration to characterize the nature of the egocentric influence. Differences between postural configurations were tested by comparing the slopes of the regression lines obtained for each subject. Newman-Keuls *post-hoc* tests were used to characterize the effects.

Experiment 1

The purpose of the experiment 1 was to investigate the contribution of head, trunk and legs position in the elaboration of the whole-body egocentric attraction previously reported in the judgments of “passability” under high obstacles.

Methods

Eight subjects (4 males and 4 females; mean age 23.4 ± 4.2 year) with normal or corrected to normal vision (by lens correction) gave informed consent to participate in the study, in compliance with the ethical committee which regulates human experimentation in France. They had no previous history of vestibular and neurological symptoms. All were naive as to the hypothesis under study.

Four postural configurations were tested in the present experiment (Fig. 2). The effects of the whole-body orientation, trunk orientation, and legs position were investigated. The experimental conditions were named as following: **B** (whole-body tilt with extended legs); **B-Lflex** (whole-body tilt with flexed legs), **T** (trunk tilt alone with the extended legs), and **T-Lflex** (trunk tilt alone with flexed legs). For each condition, the head was secured by means of a head-and-chinrest, either mounted on the tilting display (so that head-and-trunk were tilted as a whole during whole-body rotation) or fixed in space (so that the trunk was tilted alone with the head remaining fixed). The feet were secured to an adjustable footrest. The position of the legs, flexed or extended, was determined so that the axis from the malleolus to the eye axis respectively reaches an angle of 35° or 45° relative to gravity. The order of the tested different body positions

was initially randomized and then counterbalanced for half of the subjects (i.e., strict inverse order in the presentation of the postural configurations for two sub-groups).

Five angles of tilt relative to gravity (i.e. whole-body tilt or trunk tilt alone; 0°; -10°, -20° forward; and +10°, +20° backward) were manipulated in the present experiment. For each body orientation, 10 line elevations (+5, +10, +15, +20, +25 cm upward elevations; and -5, -10, -15, -20, -25 cm downward elevations cm from eye level; i.e., respectively, $\pm 1.3^\circ$, $\pm 2.5^\circ$, $\pm 3.8^\circ$, $\pm 5.0^\circ$, $\pm 6.3^\circ$ elevations from eye level) were pseudo-randomly presented. To avoid any order effects, the order of presentation was strictly counterbalanced for half of the subjects. The total number of judgments was 400 (4 x 5 x 10) for a total session duration of 90 min.

Results and discussion

A non-linear regression analysis (Probit function) was performed to determine the subjective "passability" for each subject in each experimental condition (see "General methods"). A one-way ANOVA with repeated measures on the slopes of the Probit function curve was performed for each body orientation. The analysis showed no significant difference in the discrimination sensitivity of the subjective "passability" whatever the body orientation ($F(3,12) = 0.79$, $p = 0.52$). A 4 postural configurations \times 5 angles of tilt ANOVA with repeated measures on each factor was then conducted on the estimates of subjective "passability". Results showed a significant difference between the manipulated angles of tilt on the subjective "passability" ($F(4,28) = 30$, $p < 0.001$) but no significant main difference between the postural configurations ($F(3,21) = 0.65$, $p = 0.59$). Nevertheless, the interaction between the angle of tilt and the postural configuration was highly significant ($F(12,84) = 3.59$; $p < 0.001$). This suggested that the tilt effect was clearly dependant on the postural configuration.

In order to further characterize the influence of body orientation upon the judgements, linear regression analyses were applied to the estimates of subjective "passability" obtained for each subject in each experimental condition (Fig. 2-a). Results, summarized in Table 1, showed a significant linear influence of body orientation on the estimated possibility of passing under high obstacles in the four postural configurations. Specifically, the level of subjective "passability" was systematically deviated in the direction of tilt, that is, the more the subjects were tilted backward, the more they felt

possible to pass under a given obstacle. Equations of the regression lines performed on the mean subjective estimates for the four experimental conditions are expressed in the following terms $Y=a\theta-b$, where the slope coefficient “ a ” corresponds to the weight of the orientation influence, “ θ ” to angle of tilt, “ Y ”, to the subjective “passability”, and “ b ” to a negative offset characterizing the general lowering of the subjective estimates relative to the true level of “passability”.

Table 1 Results of the linear regression analysis between the mean subjective “passability” and the angle of tilt (Experiment 1)

Experimental conditions	Equation of the regression lines	R2	p
B (Whole-body)	$Y = 0.53 \theta - 1.90$	$R^2 = 0.99$	$p < .001$
B-Lflex (Whole-body - Legs flexed)	$Y = 0.46 \theta - 4.18$	$R^2 = 0.94$	$p < .05$
T (Trunk alone)	$Y = 0.24 \theta - 3.55$	$R^2 = 0.97$	$p < .01$
T-Lflex (Trunk alone- Legs flexed)	$Y = 0.22 \theta - 2.59$	$R^2 = 0.92$	$p < .01$

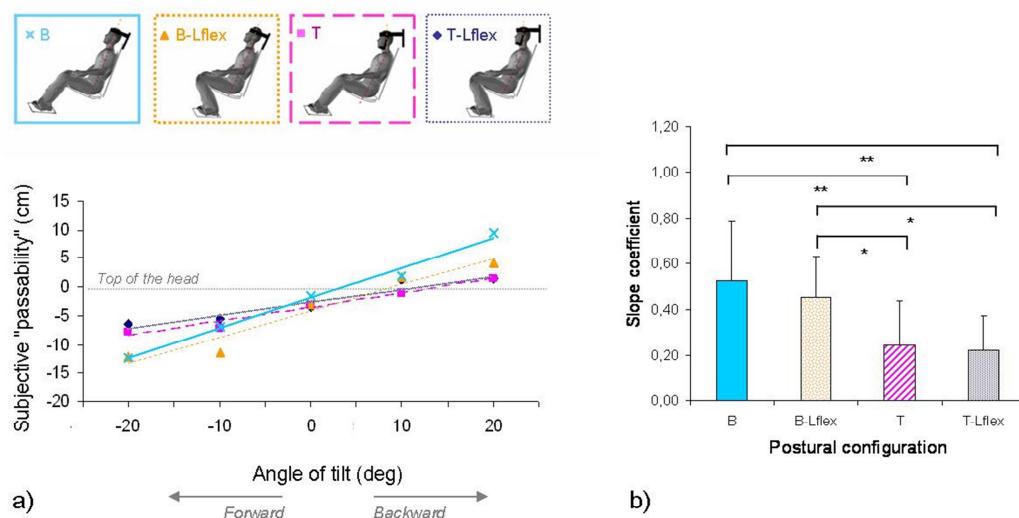


Figure 2: (a) Linear regression analysis applied to the mean estimates of the subjective “passability” under obstacles relative to the angle of tilt obtained for the four postural configurations (Experiment 1). (b) Mean slope coefficient of the linear regression lines between the mean subjective “passability” and the angle of tilt, and the inter-subjects standard deviation for the four postural configurations (Experiment 1; *** = $p < 0.001$; ** = $p < 0.01$; * = $p < 0.05$). The slope coefficient corresponds to the weight of the orientation influence.

In order to compare the magnitude of the “tilt influence” (i.e., the deviation of the subjective “passability” in the direction of tilt) between the different postural configurations, a one-way ANOVA with repeated measures was conducted on the slope coefficients derived from the individual regression lines for each postural configuration (Fig. 2-b). Results showed significant differences between postural configurations ($F(3,21) = 7.99, p < 0.001$). Specifically, post-hoc analyses (Newman-Keuls test) showed

a significant influence of the head position in space (i.e., significant differences between **B** and **T** condition; $p < 0.01$) but no significant differences in the legs position relative to the trunk (i.e., no differences between the **B** and **B-Lflex** condition; and between the **T** and **T-Lflex** condition).

The egocentric effect for the **B** and **B-Lflex** condition was about 46 and 53% of the tilt magnitude, respectively. Noteworthingly, the weight obtained for the whole-body orientation influence is fully comparable with the one previously described in the literature for similar judgments of “passability” under obstacles (45%; Bourrelly et al. 2009). Interestingly, fixing the head in space appears to notably reduce the weight of the egocentric attraction observed on perceptual judgments of “passability” under obstacles. This can be explained by the fact that the head-Z axis, which is kept aligned with gravity, constitutes a stabilizing reference for earth-based judgments (Pozzo et al; 1998). Nevertheless, regarding the weight of the egocentric attraction obtained for each experimental condition, the results showed that the trunk orientation influence (between 22 and 24% of the tilt magnitude) can account for almost half of the whole-body egocentric attraction in both legs positions. However, no direct conclusion can be done about the relative contribution of head orientation in the elaboration of the whole-body egocentric attraction. This is precisely the aim of Experiment 2 to question this point.

Experiment 2

The purpose of the Experiment 2 was to further investigate the influence of head orientation in the egocentric attraction effect previously reported in literature. Active head orientation, rather than passive head orientation, was manipulated with the assumption that active head movements could improve the subjective “passability” under obstacles (Viviani, 1990; Fouque et al. 1999). Particularly, active head orientation could contribute to diminish the effect of egocentric attraction from the head tilt by providing additional information of the head position relative to gravity (Gooey at al, 2000; Luyat et al. 2001). Specific effects of head and trunk orientation were evaluated separately and compared to the whole-body egocentric effect obtained in a range of $\pm 20^\circ$ pitch tilts.

Methods

Eight new subjects (3 males and 5 females; mean age 25.25 ± 2.9 year) with normal or corrected to normal vision (by lens correction) took part in this second experiment. They had no previous history of vestibular and neurological symptoms and were naive as to the hypothesis under study.

Three postural configurations were tested to address the influence of the whole-body tilt (**B**), the trunk tilt alone (**T**), and the head tilt alone (**H**) on the subjective “passability” under obstacles (Fig. 3). To allow comparisons with the Experiment 1, the **B** and **T** conditions were the same as previously described. In the **H** condition, the head was tilted alone relative to gravity while the chair was kept vertically oriented.

Subjects’ head was first positioned at the desired angle. The orientation was controlled on line by the experimenter by means of an inclinometer (Accustar®). Eye level was positioned at a constant height (1.34 m relative to the floor reference, and 2.28 relative to the screen) by adjusting the chair in height and depth. Subjects were asked to keep the head orientation still until the end of the trial. If the signal of head position changed during the judgments by more than 1 degree, the trial was cancelled and presented again later in the session.

Nine angles of tilt relative to gravity (0° ; -5° , -10° , -15° , -20° forward; and $+5^\circ$, $+10^\circ$, $+15^\circ$, $+20^\circ$ backward) were manipulated in the present experiment. For each body or head orientation, twelve visual stimuli (0 ; $+5$, $+10$, $+15$, $+20$, $+25$, $+35$ cm upward elevations; and -5 , -10 , -15 , -20 , -25 cm downward elevations cm from eye level; i.e., respectively, 0 , $\pm 1.3^\circ$, $\pm 2.5^\circ$, $\pm 3.8^\circ$, $\pm 5.0^\circ$, $\pm 6.3^\circ$ and $+7.5^\circ$ elevations from eye level) were presented to the subjects in a pseudo-randomised order. For a given body or head orientation, each visual stimulus was repeated 3 times in a pseudo-randomised order. This order was strictly counterbalanced for half of the subjects. Finally, the total number of judgments was 324 ($3 \times 9 \times 12$) for a total session duration of 60 min. Except for the previous points, the experimental set-up and procedure was the same as in the experiment 1.

Results and discussion

As for experiment 1, no significant difference was found in the discrimination sensitivity of the Probit function whatever the body orientation magnitude ($F(2,16) = 0.15, p = 0.86$). A 3 postural configurations \times 9 angles of tilt ANOVA with repeated measures on each factor was then conducted on the mean estimates of subjective “passability”. Results showed a significant difference between the manipulated angles of tilt ($F(8,56) = 31.65, p < 0.0001$) but no significant main difference between the postural configurations ($F(2,14) = 0.23, p = 0.8$). Nevertheless, the interaction between the angle of tilt and the postural configuration was highly significant ($F(16,112) = 4.94; p < 0.0001$). Here again, this clearly suggested that the tilt effect appeared dependant on the postural configuration.

Linear regression analyses were performed on the subjective “passability” obtained for each subject in each experimental condition (Fig. 3-a). Results confirmed a linear effect of the whole-body tilt (**B**) and the trunk tilt alone (**T**) on estimating the possibility of passing under high obstacles, as observed in Experiment 1. In addition, results showed a linear effect of head tilt alone (**H**) on the perceptual estimates. The equations of the regression lines calculated on the mean subjective estimates were summarized in Table 2.

Table 2 Results of the linear regression analysis between the mean subjective “passability” and the angle of tilt (Experiment 2)

<i>Experimental conditions</i>	<i>Equation of the regression lines</i>	<i>R2</i>	<i>p</i>
B (Whole-body)	$Y = 0.52 \theta - 3.10$	$R2 = 0.98$	$p < .001$
T (Trunk alone)	$Y = 0.27 \theta - 4.60$	$R2 = 0.90$	$p < .001$
H (Head alone)	$Y = 0.77 \theta - 5.34$	$R2 = 0.97$	$p < .001$

In order to compare the linear influences between the different postural configurations, a one-way ANOVA with repeated measures was conducted on the slope coefficients derived from the regression lines for each postural configuration. Results, summarized in Fig. 3-b showed significant differences between the three postural configurations ($F(2,14) = 12.77, p < 0.001$). Post-hoc analyses (Newman-Keuls test) are reported in Fig. 3-b.

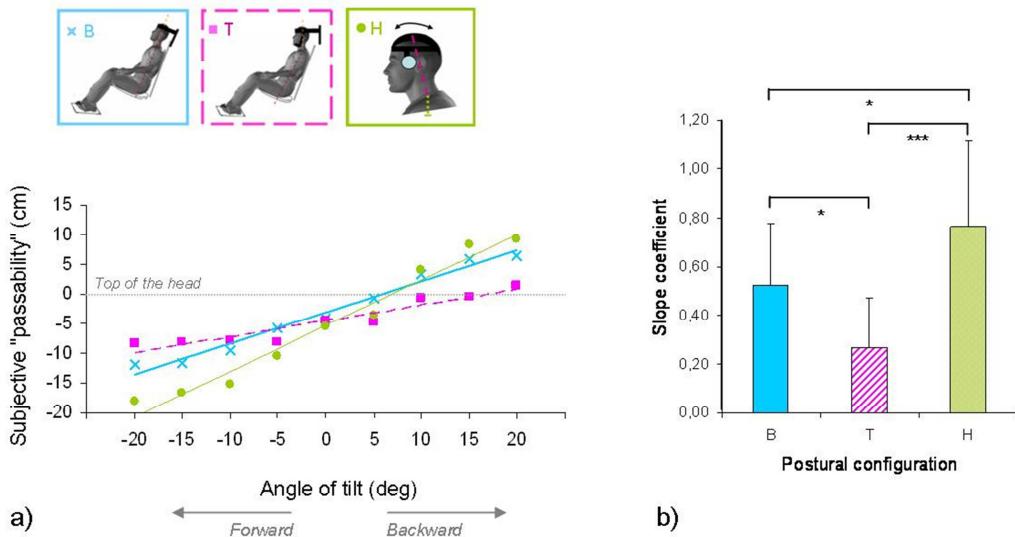


Figure 3. (a) Linear regression analysis applied to the mean estimates of the subjective “passability” under obstacles relative to the angle of tilt obtained for the three postural configurations (Experiment 2). (b) Mean slope coefficient of the linear regression lines between the mean subjective “passability” and the angle of tilt, and the inter-subjects standard deviation for the three postural configurations (Experiment 2; *** $= p < 0.001$; ** $= p < 0.01$; * $= p < 0.05$). The slope coefficient corresponds to the weight of the orientation influence.

Regarding the slope coefficients of the regression lines obtained for each postural configuration, the “whole-body tilt” (**B**) condition and the “trunk tilt alone” (**T**) condition show comparable weights in both Experiments 1 and 2. As for Experiment 1, the weight of the egocentric attraction seems to be half of the whole-body egocentric attraction when the head is fixed in space. Strikingly, moving the head alone induced a greater egocentric attraction than when the whole-body is tilted. This suggests a relevant implication of the combined vestibular and neck proprioceptive information in the elaboration of the present egocentric attraction.

General discussion

The aim of the present study was to determine the origin of the egocentric attraction previously observed on earth-based judgments. To address this question, we investigated the contribution of head, trunk and legs position, in the elaboration of the whole-body egocentric attraction previously reported on estimating the possibility of passing under high obstacles during pitch body tilt. The main finding of this study was that the estimated possibility of passing under high obstacles depends on both the magnitude of tilt and the postural configuration in space. Whole-body, trunk and head orientation were found to exert a significant linear effect on perceptual judgments in a

range of $\pm 20^\circ$ of tilt. In other words, systematic deviations of the subjective “passability” were observed toward the tilt, and were proportional to the tilt magnitude. For each postural configuration, the egocentric influence appeared also to be highly dependent on the position of trunk and head axis in space. For instance, when compared to the whole-body tilt condition, tilting the trunk alone was found to consistently reduce the amount of the deviation toward the tilt, whereas tilting the head alone was found to consistently increase the deviation toward the tilt.

Previous studies suggested that specific egocentric effects from several body parts could merge together to influence earth-based judgments (Bourrelly et al. 2009; Guerraz et al. 1998; Ito and Gresty, 1996; Mittelstaedt, 1983). However, the way this combination would be achieved remains unclear. Two main interpretations can be advanced from the literature. A first hypothesis suggested that trunk and head specific effects may originate from independent egocentric influences, which could additively combine to yield a main egocentric attraction on earth-based judgments. In line with this hypothesis, Bourrelly et al. (2009) showed that, in a range of $\pm 10^\circ$ of tilt, gaze and body orientation participated each with a constant weight in the elaboration of the main egocentric attraction by a simple summation process. This hypothesis of additivity was also supported by the work of Guerraz et al. (1998) and Wetzig and Baumgarten (1990). Both studies suggested that specific head roll influence could account for the whole-body egocentric attraction in a main part, the remaining part being due to the trunk influence. Our data showed that the weight corresponding to the effect of the trunk orientation alone is half of that obtained for the whole-body orientation. If such an additive process is at work in the elaboration of the main egocentric attraction, the effect of head orientation should account for the other half in the elaboration of the main whole-body egocentric effect. However, the sum of the single effects observed in our study when the head and the trunk are tilted independently gives rise to a larger egocentric influence than when the whole-body is tilted. This suggests that the egocentric attraction may stem from a more complicated process than a simple summation of single and independent effects related to the orientation of different body parts. In other words, our results did not support the idea of an “absolute” and invariant weight attributed to each body segment, irrespective of the postural configuration.

Hence, a second hypothesis may be advanced to explain how the body segments may combine to yield a main egocentric influence on earth-based judgments. The main assumption is that a reweighting process may occur between the different body parts and their respective egocentric influence, depending on the reliability of sensory cues available for a given postural configuration. By reweighting process, we name the interaction between several agents (e.g., sensory inputs, body parts, reference frames) whose influence (i.e., weight) may combine and evolve over time. By allocating a higher weight to reliable cues and a lower weight to unreliable ones, the central nervous system may optimize sensory integration and resolve sensory ambiguities about space representation for a given task (Ernst and Banks, 2002; Ernst and Bülthoff, 2004; Mars et al. 2005). For instance, Mars et al. (2005) demonstrated that the respective weight attributed to vestibular and somatosensory cues were inverted, depending on whether the observers had to judge their self-orientation in space or objects orientation relative to gravity. In our study, the difference in sensory reliability may be related for a part to the nature of somatosensory and motor information involved in both tasks, that is information from trunk graviceptors, pressure cues from the skin, neck proprioceptive information or even efference copy during active tilt. For instance, trunk tilt alone induces neck proprioceptive changes, but no vestibular changes, which tends to confirm that vestibular cues are more reliable than somatosensory cues for the assessment of earth-based judgments when the head is vertically oriented (Wade, 1970). Conversely, a decreased vestibular reliability may occur during whole-body tilt (Schöne, 1964, Bringoux et al. 2004), hence explaining the increasing influence of tilt upon earth-based judgements. Furthermore, tilting the head alone induces neck proprioceptive and vestibular changes. Additional information from neck proprioception during head tilt alone may then provide ambiguous signals about whether the head is moving relative to the trunk or the trunk is moving relative to the head. In this condition, when available sensory cues are modified during tilt and may express different postural configurations, we hypothesized that the central nervous system may cautiously select the head orientation as a main reference for verticality during earth-based judgments. This point is supported by previous works indicating that the head constitutes a stabilized platform for numerous spatial tasks (Pozzo et al, 1998; Berthoz, 1997). Finally, one may summarize the latter interpretation by considering that the egocentric weight attributed to the Z-head axis is increased in case of head-and-trunk orientation dissociation.

This strongly challenges the assumption that active head movement could reduce the amount of errors in subjective “passability” by providing additional information about head position relative to gravity (Luyat et al. 2001). Previously, Bringoux et al. (2004) made a similar observation regarding the effect of active arm lifting on SVH judgements. Although arm lifting was supposed to provide additional information about gravity, the authors found that the SVH became more dependent on the whole-body tilt when judgements were performed through active arm movements. These observations stressed once again that estimating limb or body orientation in space and judging the location of earth-based references are likely based on different perceptual processes (Bronstein, 1999).

Conclusion

The present study demonstrates that estimating the subjective “passability” under high obstacles depends not only on the whole-body tilt magnitude, but also on the postural configuration in space. Head and trunk tilt were found to mainly attract the subjective “passability” toward their direction. Our results suggest that head and trunk influence could be reweighted to yield a main egocentric attraction, depending on the postural configuration. Special care should be addressed to the orientation of the head, as its egocentric weight may drastically increase when the head axis is not aligned with the trunk axis. The origin of such a reweighting process may probably stem from the reliability of the sensory information available for a particular postural set. Further investigations about the effect of passive vs active head orientation alone may help to better understand the influence of motor involvement upon the whole-body egocentric attraction during static pitch tilt. In parallel, regarding the findings of Bringoux et al. (2009) who showed a dynamic evolution of the subjective vertical settings toward a tilted visual background, further experiments should be done to investigate how specific egocentric effects could evolve and merge over time. Finally, these findings could be of value in aeronautics where pilots, seated under different postural configurations depending on the type of aircraft, must achieve earth-based judgments in absence of a structured visual background, such as during night or foggy day.

Acknowledgements

Aurore Bourrelly was supported by a grant from DGA-CNRS (No.2007-746). The authors are grateful to F. Buloup, A. Donneaud and C. Goulon for technical expertise.

References

- Benson, A.J., 1990. Sensory functions and limitations of the vestibular system, in: Warren, R., Wertheim, A.H. (Eds.), *Perception and control of self-motion*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, pp. 145-170.
- Berthoz, A., 1997. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- Betts, G.A., Curthoys, I.S., 1998. Visually perceived vertical and visually perceived horizontal are not orthogonal. *Vision Res.* 38, 1989-1999.
- Bourrelly, A., Bringoux, L., Vercher, J.L., 2009. Influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during body tilt. *Exp. Brain Res.* 193, 19-28.
- Bourrelly, A., Vercher, J.L., Bringoux, L., 2010. Pitch body orientation influences the perception of self-motion direction induced by optic flow. *Neurosci. Lett.* 482, 193-197.
- Bringoux, L., Tamura, K., Faldon, M., Gresty, M.A., Bronstein, A.M., 2004. Influence of whole-body pitch tilt and kinesthetic cues on the perceived gravity-referenced eye level. *Exp. Brain Res.* 155, 385-392.
- Bringoux, L., Robic, G., Gauthier, G.M., Vercher, J.L., 2008. Judging beforehand the possibility of passing under obstacles without motion: the influence of egocentric and geocentric frames of reference. *Exp. Brain Res.* 185, 673-680.
- Bringoux, L., Bourdin, C., Lepecq, J.C., Sandor, P., Pergandi, J.M., Mestre, D., 2009. Interaction between reference frames during subjective vertical estimates in a tilted immersive virtual environment. *Perception* 38, 1053-1071.
- Bronstein, A.M., 1999. The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality. The effects of labyrinthine and CNS disease. *Ann. N.Y Acad. Sci.* 871, 324-33.
- Carriat, J., DiZio, P., Nougier, V., 2008. Vertical frames of reference and control of body orientation. *Neurophysiol. Clin.* 38, 423-437.
- Ebenholtz, S.M., 1970. Perception of the vertical with body tilt in the median plane. *J. Exp. Psychol.* 83, 1-6.
- Ernst, M.O., Banks, M.S., 2002. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*. 415, 429-433.
- Ernst, M.O., Bülthoff, H., 2004. Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cogn. Sci.* 8, 162-169.
- Fouque, F., Bardy, B.G., Stoffregen, T.A., Bootsma, R.J., 1999. Action and intermodal information influence the perception of orientation. *Ecol. Psychol.* 11, 1-43.
- Goldberg, J.M., Fernandez, C., 1977. Conduction times and background discharge of vestibular afferents. *Brain Res.* 122, 545-550.

- Gooey, K., Bradfield, O., Talbot, J., Morgan, D.L., Proske, U., 2000. Effects of body orientation, load vibration on sensing position and movement at the human elbow joint. *Exp. Brain Res.* 133, 340-348.
- Guerraz, M., Poquin, D., Luyat, M., Ohlmann, T., 1998. Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. *Percept. Mot. Skills* 87, 643-648.
- Higashiyama, A., Koga, K., 1998. Apparent body tilt and postural aftereffect. *Percept. Psychophys.* 60, 331-347.
- Howard, I.P., 1986. The perception of posture, self-motion, and the visual vertical, in: Boff, K., Kaufman, L., & Thomas J. (Eds.), *Handbook of perception and human performance*. Wiley, New York, pp. 1-62
- Ito, Y., Gresty, M.A., 1996. Subjective postural orientation and visual vertical during slow pitch tilt for the seated human subject. *Aviat Space Environ Med.* 68, 3-12.
- Lechner-Steinleitner, S., 1978. Interaction of labyrinthine and somatoreceptor inputs as determinants of the subjective vertical. *Psychol. Res.* 40, 65-76.
- Luyat, M., Gentaz, E., Regia Corte, T., Guerraz, M., 2001. Reference frames and haptic perception of orientation: body and head tilt effects on the oblique effect. *Percept. Psychophys.* 63, 540-554.
- Lejeune, L., Thouvarecq, R., Anderson, D.J., Caston, J., Jouen, F., 2009. Kinaesthetic and visual perceptions of orientations. *Perception* 38, 988-1001.
- Mars, F., Vercher, J.L., Popov, K., 2005. Dissociation between subjective vertical and subjective body orientation elicited by galvanic vestibular stimulation. *Brain Res. Bull.* 65, 77-86.
- MacDougall, R., 1903. The subjective horizon. *Psychol. Rev.* 4, 145-166.
- Marcilly, R., Luyat, M., 2008. The role of eye height in judgment of an affordance of passage under a barrier. *Curr. Psychol. Lett.* 24, 12-24.
- Mast, F., Jarchow, T., 1996. Perceived body position and the visual horizontal. *Brain Res. Bull.* 40, 393-398.
- Mittelstaedt, H., 1983. A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften* 70, 272-281.
- Mittelstaedt, H., 1996. Somatic graviception. *Biol. Psychol.* 42, 53-74.
- Ooi, T.L., Wu, B., He, Z.J., 2001. Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature* 414, 197-200.
- Pozzo, T., Papaxanthis, C., Stapley, P., Berthoz, A., 1998. The sensorimotor and cognitive integration of gravity. *Brain Res. Rev.* 28, 92-101
- Shöne, H., 1964. On the role of gravity in human spatial orientation. *Aerosp. Med.* 35, 764-772.
- Stopper, A.E., Cohen, M.M., 1989. Effect of structured visual environments on apparent eye level. *Percept. Psychophys.* 46, 469-475.
- Tribukait, A., Einken, O., Perception of the head transversal plane and subjective horizontal during gondola centrifugation. *Percept. Psychophys.* 67, 369-382.
- Trousselard, M., Barraud, P.A., Nougier, V., Raphel, C., Cian, C., 2004. Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Cogn. Brain Res.* 20, 355-362.

- Viviani, P., 1990. Motor-perceptual interactions: the evolution of an idea, in: Piattelli Palmarini M. (Ed.), *Cognitive science in Europe: issues and trends*. Golem, pp 11-39.
- Wade, N.J., 1969. Visual orientation as a function of head tilt. *Percept. Motor. Skills.* 29, 573-574.
- Wade, N.J., 1970. Effect of prolonged tilt on visual orientation. *Q. J. Exp. Psychol.* 22, 423-439.
- Wetzig, J., Baumgarten, R.J., 1990. Influence of neck receptor stimulation on eye rotation and on the subjective vertical: experiment on the tilt table, under water, and weightlessness, in: Berthoz W.G., Vidal P.P., (Eds.), *The head-neck sensorimotor system*. Wiley, Chichester, pp. 198-200.
- Wu, J., He, Z.J., Ooi, T.L., 2005. Visually perceived eye level and horizontal midline of the body trunk influenced by optic flow. *Perception* 34, 1045-1060.
- Young, L.R., 1984. Perception of the body in space: mechanisms, in : Smith. I (Ed.), *The nervous system. Handbook of Physiology*. Academic Press, New York, pp 1023-1066.

6.2. INCIDENCES VISUELLES SUR LE PHENOMENE D'ATTRACTION EGOCENTREE

Nous venons de montrer, dans le noir, que l'orientation de plusieurs références corporelles génère une influence égocentrale importante (i.e. entre 40 et 55% de l'inclinaison manipulée) sur la perception de l'espace géocentrale. Nous questionnons dans cette deuxième partie l'existence de ce phénomène égocentré lorsque l'environnement visuel est structuré par un flux optique. Ceci nous permet notamment d'interroger le poids de l'information allocentrale visuelle sur la perception de l'espace géocentré lorsque le corps est incliné en tangage. Ces deux études conduisent naturellement à comparer l'effet d'un enrichissement visuel sur le phénomène d'attraction égocentrale précédemment observé dans des conditions de noir complet.

L'étude 3 de ce présent manuscrit, questionne l'influence de l'orientation du corps dans la perception de la direction de déplacement induit par un flux optique lorsqu'elle doit être référée à l'horizon. **L'étude 4** s'intéresse ensuite à l'estimation du franchissement d'obstacles hauts lorsqu'une direction de déplacement horizontal pour franchir la barre est directement spécifiée dans le flux visuel. Cette dernière étude vise notamment à éprouver le phénomène d'attraction égocentré précédemment observé lorsque l'ajout d'un flux visuel vient renforcer la prégnance des indices géocentres par la spécification d'une direction de déplacement horizontal. L'apport combiné de ces deux études sera abordé plus en détail dans la partie de discussion générale 7.2 de ce présent manuscrit.

6.2.1. Etude 3

INFLUENCE DE L'ORIENTATION DU CORPS SUR LA PERCEPTION DE LA DIRECTION DE DEPLACEMENT INDUIT PAR UN FLUX OPTIQUE

Bourrelly A, Vercher JL, Bringoux L

Neuroscience Letters 2010 482(3):193-197

Ce travail de recherche questionne l'influence de l'orientation du corps en tangage sur la perception de la direction de déplacement induit par une scène visuelle dynamique. Cette scène consiste en un nuage de points en mouvement simulant la translation d'un observateur vers l'avant avec différents angles d'approche (déplacements angulaires montants, à l'image d'un avion qui décolle ; ou descendants, à l'image d'un avion qui atterrit). Les sujets ont pour consigne d'estimer leur direction de déplacement induit dans la scène visuelle, vers le haut ou vers le bas, en référence à une direction de déplacement horizontal. Différentes orientations de corps sont manipulées. Les résultats montrent des déviations systématiques de la direction de déplacement subjectif dans le sens de l'orientation du corps. Une relation proportionnelle (de l'ordre de 40% de l'angle du corps dans un panel angulaire $\pm 20^\circ$) entre la direction de déplacement subjectif rapportée et l'angle d'orientation de corps manipulé est de plus observée. En conséquence, une même stimulation visuelle est interprétée différemment en fonction de l'angle d'orientation du corps. Alors que la tâche nécessite d'être réalisée dans un cadre de référence géocentré (i.e., en référence à l'horizon), les sujets semblent être influencés par des références égocentriques. Ceci suggère que la perception de la direction de déplacement n'est pas élaborée dans un cadre de référence exclusif (égocentré ou géocentré) mais résulte plutôt de l'influence combinée des deux.

PITCH BODY ORIENTATION
INFLUENCES THE PERCEPTION OF SELF-MOTION DIRECTION
INDUCED BY OPTIC FLOW

Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL

 aurore.bourrelly@hotmail.fr ; Lionel.bringoux@univmed.fr

UMR CNRS 6233 ‘Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey’,
CNRS & Aix-Marseille Université, France.

Abstract

We studied the effect of static pitch body tilts on the perception of self-motion direction induced by a visual stimulus. Subjects were seated in front of a screen on which was projected a 3D cluster of moving dots visually simulating a forward motion of the observer with upward or downward directional biases (relative to a true earth horizontal direction). The subjects were tilted at various angles relative to gravity and were asked to estimate the direction of the perceived motion (nose-up, as during take-off or nose-down, as during landing). The data showed that body orientation proportionally affected the amount of error in the reported perceived direction (by 40% of body tilt magnitude in a range of $\pm 20^\circ$) and these errors were systematically recorded in the direction of body tilt. As a consequence, a same visual stimulus was differently interpreted depending on body orientation. While the subjects were required to perform the task in a geocentric reference frame (i.e, relative to a gravity-related direction), they were obviously influenced by egocentric references. These results suggest that the perception of self-motion is not elaborated within an exclusive reference frame (either egocentric or geocentric) but rather results from the combined influence of both.

Key words: Spatial perception – Body orientation – Heading – Self-motion – Reference frame – Geocentric – Egocentric.

Introduction

When one moves in a visual environment, the pattern of optic-flow projected on the retina gives information about the direction of our self-motion. By recreating this visual pattern, a feeling of self-motion can be fully experienced by static observers on the sole basis of the visual context [8, 10, 26]. Hence, investigating self-motion induced by an optic flow field is of interest for questioning the perceived displacement of operators embarked in a vehicle [8, 10]. Specifically, in the context of aeronautics, the way pilots perceive the up and down direction of self-motion from optic-flow is critical for flight safety [9, 10]. For instance, visual angle accuracy on the order of $\pm 1^\circ$ was shown to be required for the control of visual self-motion and obstacle avoidance [9, 27].

For more than 50 years, behavioural neuroscientists have mainly raised the question of self-motion perception involving egocentric or allocentric tasks which respectively required to be assessed relative to body-fixed elements or other features of the visual environment. For instance, subjects were usually asked to point a cursor toward the perceived direction of self-motion on the visual scene relative to their straight ahead [26, 28], or conversely had to discriminate the direction of self-motion as oriented leftward or rightward relative to a stationary post in the environment [8, 27, 28]. Overall, these judgments were shown to be accurately performed, mainly on the basis of the optic flow pattern. However, only a few studies investigated the perception of self-motion direction through a task, which must be referred to some earth-invariant directions, such as the direction of the gravity or the horizon. This may be of particular importance in a context of poor visibility (during night or foggy days) when relevant visual-polarity cues for up and down directions are no more available. Within this context, judging upward and downward direction of self-motion represents a geocentric task which is required to be achieved relative to an earth-based reference. In this particular case, body orientation can be dissociated from the direction of self-motion relative to gravity. Specifically, we hypothesize that the relative reference for upward and downward judgments may be the subjective horizon, that is the perceived plane passing through the eye and normal to gravity.

Several studies previously focused on the perception of the subjective horizon at different body orientations [4, 5]. It was shown that static pitch body tilts influenced the

perceptual estimates of the horizon. In line with these previous findings, the present experiment was designed to investigate whether pitch body orientation can modify the perceived direction of a forward self-motion induced by optic flow, with upward and downward directional biases relative to a true earth horizontal direction. Specifically, since body orientation was previously found to exert an influence on earth-based judgments, it was hypothesized that the perception of self-motion direction induced by optic flow can be also affected by static body tilt when the judgment must be referred to external space.

Methods

Twelve subjects (5 males and 7 females; mean age 26.5 ± 6.67) with normal or corrected-to-normal vision (by lens correction), gave their informed consent to participate in the study, in compliance with the ethical committee regulating human experimentation in France. They had no previous history of vestibular and neurological symptoms. All were naive as to the hypothesis under study.

Subjects were seated on a padded tilting chair allowing body rotations in pitch with acceleration above the vestibular threshold for rotation perception [1, 11]. The chair was rotated at constant velocity during 11 s, with a period of initial acceleration and final deceleration of 2 s; ($0.4^\circ \cdot s^{-1}$ and $0.2^\circ \cdot s^{-2}$ for $\pm 5^\circ$ tilt, $0.8^\circ \cdot s^{-1}$ and $0.4^\circ \cdot s^{-2}$ for $\pm 10^\circ$ tilt, $1.2^\circ \cdot s^{-1}$ and $0.6^\circ \cdot s^{-2}$ for $\pm 15^\circ$ tilt, $1.6^\circ \cdot s^{-1}$ and $0.8^\circ \cdot s^{-2}$ for $\pm 20^\circ$ tilt). They were restrained by means of a shoulder harness with their head strapped and secured on a headrest so that the naso-occipital axis was orthogonal to the direction of the gravity when the chair was vertically oriented. The axis of rotation of the chair coincided with the trans-ocular axis. In this way, the subjects' eye level was kept at the same height with respect to the floor reference (1.34 m) regardless of the tilt magnitude. Subjects were placed in front of a screen which subtended an elliptic visual angle of 81° horizontal x 42° vertical when viewed binocularly by observers wearing customised goggle at a distance of 1.22 m. This ensured that the squared edges of the screen were masked. The visual stimulus was generated by a PC Dell Precision 380 computer via our in-house ICE software and projected onto the screen by a video-projector (refresh rate set to 85 frames/s). The visual stimulus was set to simulate an optic flow field viewed by an observer translating forward into a 3D cloud of stationary dots (figure.1-a). Relative to the stationary observer, the

projected stimulus consisted in a cluster of 400 circular dots (diameter = 5 mm without local expansion) which radially expanded toward him (figure.1-b). Upward or downward directional biases relative to a true earth horizontal direction were inserted in the simulated forward motion by shifting on the screen the elevation of the central focus of expansion of the moving cloud of dots along the subjects' median plane (figure.1-c,d). In this way, the observer experienced a feeling of self-motion in a direction that was tilted either upward or downward relative to the earth horizontal direction (as during an aircraft take-off or landing, respectively). The velocity flow field was designed to simulate a constant speed of 66 m.s^{-1} in order to be close to the actual condition of flight during aircraft landing. The total number of dots was always kept constant on the screen so that new dots appeared at randomly determined positions in the screen when others went out.

Figure 1

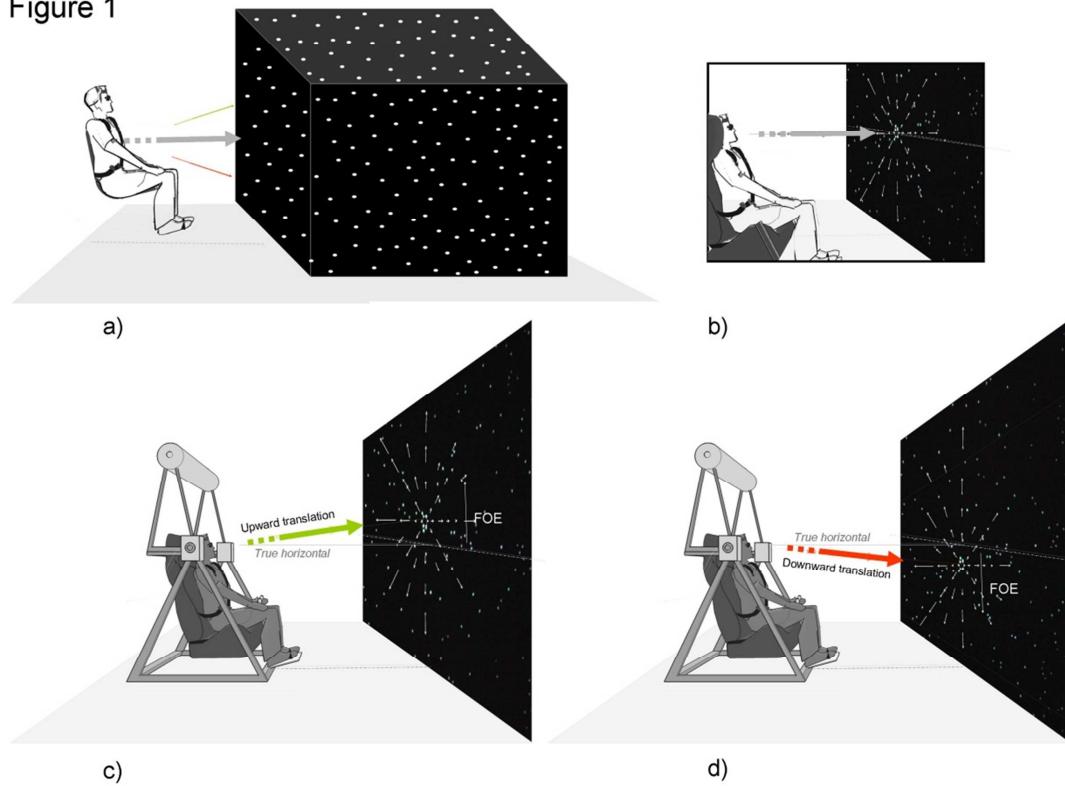


Figure 1: (a) Illustration of the optic flow display presented in a 3D virtual environment. The visual stimulus simulated an optic flow field viewed by an observer translating forward into a 3D cloud of stationary dots. (b) Relative to the stationary observer, the projected stimulus consisted in a cluster of 400 circular dots which radially expanded toward him. Upward (c) or downward (d) directional biases relative to a true earth horizontal direction were inserted in the simulated forward motion by shifting on the screen the elevation of the central focus of expansion of the moving cloud of dots along the subjects' median plane. The observer experienced a feeling of self-motion in a direction that was tilted either upward (c) or downward (d) relative to the earth horizontal direction.

Subjects were first positioned at the desired body angle relative to gravity after 15 s of rotation in complete darkness, followed by 15 s of rest. This specific duration was chosen as a compromise between the weakest vestibular resting discharge allowing to consider post-rotational effects as negligible and limited somatosensory adaptation due to the subsequent period of static tilt [1, 11]. Stationary subjects were then asked to open their eyes and to observe the visual stimulus. The visual stimulus was presented motionless for 0.5 s before simulating self-motion for 2 s. During this phase, subjects were clearly required to keep the eye still in the direction in which they felt translating. Next, subjects were asked to respond to the following question: “Do I feel translating upward relative to the earth horizontal direction?” or “Do I feel translating downward relative to the earth horizontal direction?”. They were asked to give their response at the end of the visual presentation after the scene disappeared, respectively with a right or a left hand-held button. Judgment settings were recorded via the ADwin-Pro system (Keithley[©]) piloted via our in-house Docometer software. At the end of the sequence, the chair was brought back to the vertical and the room lights were turned on for 5 s before a new sequence was launched.

Nine body orientations (0°; -5°, -10°, -15°, -20° forward; and +5°, +10°, +15°, +20° backward relative to the gravity) were manipulated in the present experiment. For each body orientation, eighteen visual stimuli were presented to the subjects in a pseudo-randomised order for less than 2 min of body orientation exposure. The visual stimuli simulated a forward self-motion with upward or downward directional biases relative to the true earth horizontal direction (+27°, +20°, +16°, +12.5°, +10°, +7.5°, +5°, +2.5°, +1° upward biases; and -27°, -20°, -16°, -12.5°, -10°, -7.5°, -5°, -2.5°, -1° downward biases). For a given body orientation, each visual stimulus was repeated 3 times in a pseudo-randomised order. This order was strictly counterbalanced for half of the subjects. Finally, the total number of judgments was 486 (3 x 18 x 9) for a total session duration of 60 min. During the experiment, subjects were neither informed about the number and angular values of body orientation nor about the true direction of the presented visual stimuli. The instructions were frequently repeated to keep subjects alert and concentrated on the task throughout the experiment.

Data processing was first carried out on the judgment settings converted into binary values. For each simulated direction of self-motion, a score of 1 was attributed

when subjects responded they felt translating upward relative to the earth horizontal direction. Conversely, a score of 0 was attributed when subjects responded they felt translating downward relative to the earth horizontal direction. Then, a subsequent “Probit” model, using a non-linear regression analysis for dichotomic variables, was achieved on the binary responses obtained for each body orientation in order to determine the probability p that subjects estimated at 50% they felt translating upward relative to the true earth horizontal direction (supplementary materials). This permitted to determine mathematically an indirect variable corresponding to the angular value of a simulated direction of self-motion at which subjects would indistinguishably feel translating forward or upward relative to the true earth horizontal direction. This specific angular value obtained for each body orientation corresponded to the subjective earth horizontal direction of self-motion and was expressed in terms of angular deviation (or error) relative to the true earth horizontal direction of self-motion. Positive angular values meant that the subjective earth horizontal direction of self-motion was estimated above the true earth horizontal direction; whereas negative angular values meant that the subjective earth horizontal direction of self-motion was estimated below the true earth horizontal direction.

Results

In order to test the discrimination sensitivity of the so-called subjective earth horizontal direction of self-motion relative to the chosen increments, a preliminary data analysis was conducted on the slopes of the tangent at the inflection point of the Probit function curve for each body orientation. The slopes of the tangent at the inflection point provided an indication about the sharpness relative to the transition of the response probability. A nine body orientations (0° , $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$) analysis of variance (ANOVA) with repeated measures showed no significant difference in the discrimination sensitivity whatever the body orientation [$F_{(3,5,38)} = 0.99$; Epsilon = 0.43; $p = .42$; when corrected for sphericity with Greenhouse-Geisser epsilon adjustments; $\eta^2_p = 0.08$; $(1-\beta) = 0.26$].

In order to test any differences between body orientations on the subjective earth horizontal direction of self-motion, a nine body orientations (0° , $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$) ANOVA with repeated measures was then performed on the angular values of the

subjective earth horizontal direction of self-motion obtained for the different body orientations. The analysis showed a significant effect of body orientation on the subjective estimates [$F_{(2.8,30.8)} = 58.05$; Epsilon = 0.35, $p < .001$; when corrected for sphericity with Greenhouse-Geisser epsilon adjustments; $\eta^2_p = 0.84$; $(1-\beta) = 1$]. Specifically, the subjective estimates ranged from -11.67° downward at -20° of body tilt to 4.25° upward at $+20^\circ$ of body tilt relative to a true horizontal direction of self-motion. Post-hoc analyses (Newman-Keuls test) confirmed the presence of significant differences between body orientations (Table.1).

Table 1: Summary table of the Newman-Keuls pairwise comparisons for the mean estimates of the perceived horizontal direction of self-motion. The results showed significant differences between the different body orientations (** = $p < .001$; ** = $p < .01$; * = $p < .05$; ns = no significant difference).

	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
20	—	*	***	***	***	***	***	***	***
15		—	ns	**	***	***	***	***	***
10			—	ns	**	***	***	***	***
5				—	ns	***	***	***	***
0					—	**	***	***	***
-5						—	ns	**	***
-10							—	ns	***
-15								—	*
-20									—

A linear regression analysis applied to the mean estimates of the subjective earth horizontal direction of self-motion obtained for all the subjects at each body orientation yielded a significant effect of body orientation on the perceptual estimates ($F_{(1,7)} = 3119.93$; $p < .001$; $R^2 = 1$). The data showed that body orientation proportionally affected the error magnitude in the reported perceived direction of self motion. Furthermore, the mean estimates of the subjective earth horizontal direction of self-motion were systematically deviated in the direction of body tilt. Specifically, when referred to no-tilt condition (which presented an offset about -3.57° below the true earth horizontal direction of self-motion), the subjective earth horizontal direction of self-motion was found lowered with forward body tilts and elevated with backward body tilts (figure.2).

The equation of the regression function was

$$(\zeta = 0.40 \theta - 3.57)$$

where 0.40 corresponds to the gain of body orientation influence “ θ ” on the perceptual estimates “ ζ ”, with an offset of -3.57° characterizing the general lowering of the subjective estimates relative to the true earth horizontal direction of self-motion. Interestingly, numerous studies previously reported a lowering of the subjective horizontal reference for earth-based judgments given by erect observers [4, 7, 14, 22]. For instance, Bringoux et al. [5] measured an offset on the subjective horizon in darkness which is 3° lower than the true earth horizontal reference. This phenomenon may be related to the 30° backward orientation of the saccular and utricular maculae relative to the naso-occipital axis of the head [19].

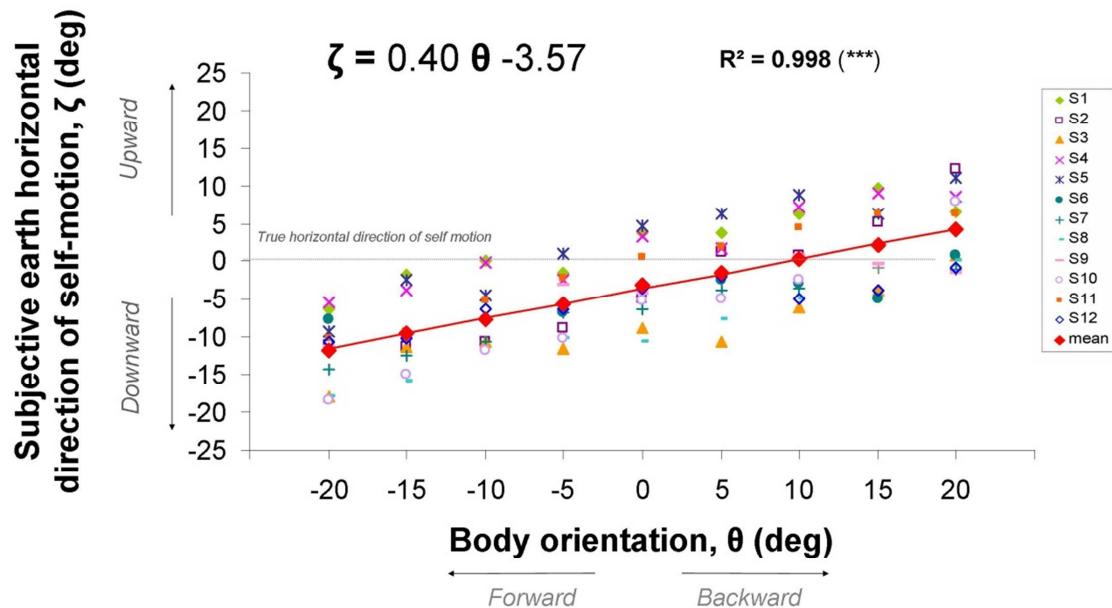


Figure 2: Linear regression analysis applied to the mean estimates of the subjective earth horizontal direction of self-motion. Regarding estimates obtained for each of the 12 subjects in each body orientation, this figure suggests that comparable regression lines could be applied for individual profiles. The equation of the regression line shows an influence of body orientation about 40% on the subjective estimates. The coefficient -3.57 shows a general lowering of the subjective horizontal direction of self-motion relative to the true horizontal direction of self-motion at 0° of pitch body orientation. The R^2 provides a measure of how well the recorded data are likely to be predicted by the linear statistical model, (***) = $p < .001$.

Discussion

To our knowledge, this study represents the first attempt to evaluate the influence of body orientation on the perception of self-motion direction in vertical median plane, induced by optic flow. Overall, these findings clearly showed that body orientation in the sagittal plane proportionally influenced the subjective orientation of self-motion from optic-flow, when judgments must be achieved relative to an earth-based reference. Specifically, systematic perceptual deviations were observed in the direction of body tilt. A first explanation may be based on the underestimation of the body tilt magnitude in space [25]. According to this interpretation, the perceptual errors may be related to a decreased sensibility of the graviceptive sensory system (mainly conveyed by otolith organs and somatosensory inputs) when the body is no more aligned with gravity, leading to a lesser sensation of tilt [12, 21]. However, this hypothesis was inconsistent with other studies showing no relationship between the estimated body orientation and the perception of earth-based references [7, 15, 16, 24]. Indeed, erect subjects who were tilted in roll until they reached their perceived horizontal body orientation, did no more perceive as earth horizontal a luminous line aligned along their longitudinal body axis [15]. Thus, even if subjects were quite good at estimating their horizontal body orientation in space, they made large systematic errors in visually judging earth horizontal and vertical orientations.

A second explanation can be found in the nature of the task required. In the present experiment, estimating the perceived upward and downward direction of a forward self-motion from optic flow must be judged relative to an earth-based reference. While the visual system can determine the horizon information in presence of a structured visual environment by extrapolating from converging lines in the projection plane [10, 20, 29], the subjective horizon (i.e., the perceived plane passing through the eye normal to the gravity) requires to be internalized under poor reliable visual condition. In this context, body orientation was shown to linearly influence the subjective horizon in a range of $\pm 20^\circ$ body tilt [4, 5]. Specifically, estimates were lowered by forward tilts and elevated with backward tilts. This phenomenon was found to have important repercussions on numbers of spatial tasks relying on the subjective horizon such as perceiving the elevation of objects and estimating the possibility of passing under obstacles [3, 5]. The estimation of the relative size of objects (referred on the horizon [2, 20]), and the judgment of distances

(based on the angular declination below the horizon [17], that is, the visual angle between eye level and object location) were also shown to be affected. Because the visual horizon constitutes the underlying reference for estimating the visually-induced upward and downward direction of self-motion, we assume that a similar phenomenon would occur in the present task.

Specifically, our study clearly shows a substantial influence of a body-related reference frame on the earth-based reference frame normally required to perform the task. This phenomenon, in line with the “idiotropic vector” hypothesis given by Mittelstaedt [16] to explain the deviation of the subjective vertical toward the longitudinal body axis, was also defined in term of “egocentric attraction” induced by body tilt [3, 4, 5]. This strongly supports the existence of an interaction process between reference frames [3, 5, 6]. Specifically, regarding the slope of the regression line, directional estimates of self-motion may be performed into a composite reference frame [13], that is an intermediate state between a pure egocentric and a pure geocentric reference frame. Luyat et al. [13] evoked a similar interpretation for the mapping of the oblique effect during haptic and visual tasks of reproduction of orientation. With a slope about 1, the subjective earth horizontal direction of self-motion would be fully oriented towards a body-related direction (e.g., the transverse plane of the head passing through the eyes [22]). In that case, the weight attributed to the egocentric reference frame would be about 100% on the visual estimates. Conversely, a slope of 0 would indicate no influence of body orientation, whereas the weight attributed to the geocentric reference frame would be consequently of 100%. In the present study, we found an interaction between the egocentric and geocentric reference frames with a constant weight of about 40% for the egocentric reference frame. Interestingly, according to a previous study of Bringoux et al. [5] who observed a constant weight of about 20% relative to the influence of the egocentric reference frame on the same range of pitch body tilt, our results suggest that the “egocentric attraction” towards body orientation is enhanced in presence of an optic flow. Specifically, this finding could be due to the fact that a dynamic visual environment primarily specifies an egocentric direction of self-motion [26], and may consequently increase the weight associated to the egocentric reference frame, as compared to the geocentric one.

Finally, it should be interesting to further question the influence of the required task on the present findings. Specifically, the influence of action as compared to perception only has been previously highlighted in self-motion perception [23]. Therefore, investigating the influence of body orientation in controlling the direction of self-motion may be of particular relevance in usual situations of flight including motor actions.

Conclusion

In conclusion, the present study provides new insights into the way how spatial reference frames could interact for the perception of space during visually-induced self-motion. Particularly, this may be highly significant within the context of aeronautics, where fighter pilots, usually seated 30° backward [18], achieve up and down earth-based judgments in poor visual conditions. Furthermore, this can also have important repercussions in helicopter or vectored thrust vehicles' navigation, when the vehicles' longitudinal axis is not always aligned with the direction of displacement.

Supplementary materials

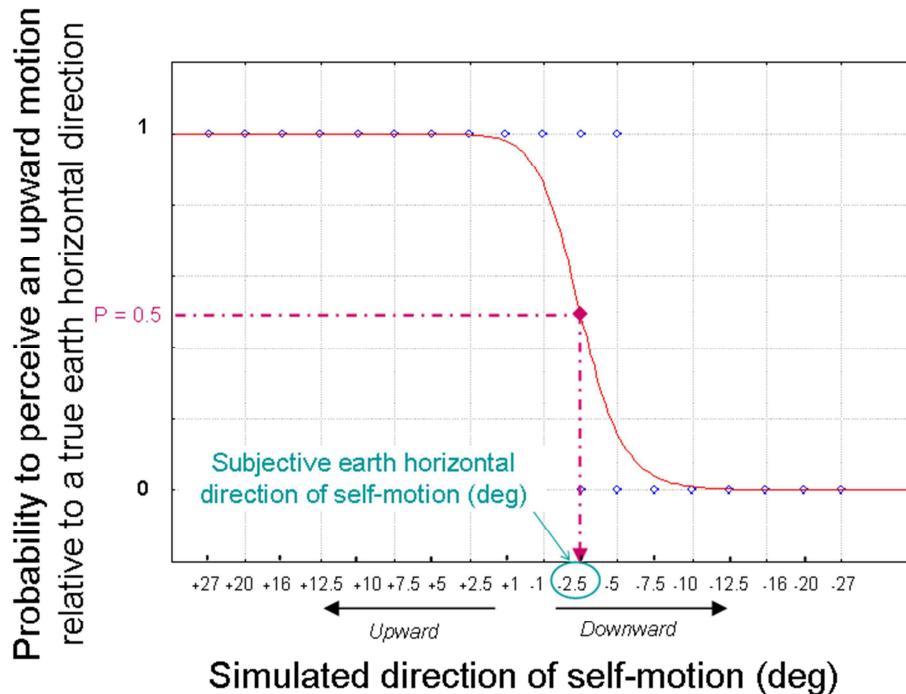


Figure: Illustration of a typical “Probit” non-linear regression function achieved on the binary responses given by a typical subject in a particular body orientation for the 18 simulated directions of self-motion. The probability $p = 0.5$ enabled to mathematically determine the subjective earth horizontal direction of self-motion, that is the angular value of a simulated direction at which subjects would indistinguishably feel translating forward or upward relative to the true earth horizontal direction. The slopes of the tangent at the inflection point provided an indication about the sharpness relative to the transition of the response probability.

The Probit function was defined by the following relation:

$$pi = 1 / (1 + (C(i,j) / C0)^n) \quad (1)$$

Where “pi” is the probability that subjects estimated they can pass under the line. “i” corresponds to the line number in the sequence, “j” to the trial number, “C0” the line number for $p=0.5$ and “n” the slope of the tangent at the inflection point of the curve. The latter coefficient constitutes an estimation of the discrimination sensibility relative to the chosen increments.

Acknowledgements

Aurore Bourrelly was supported by a grant from DGA-CNRS (No.2007-746). The authors are grateful to F. Buloup, A. Donneaud and C. Goulon for technical expertise, and to J. Martin-Malivel, G. Mitchell for English assistance. We also greatly thank reviewers for several helpful comments in revising the current manuscript.

References

- [1] A.J. Benson, Sensory functions and limitations of the vestibular system. In: R. Warren, A.H. Wertheim (Eds.), *Perception and control of self-motion*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1990, pp. 145-170.
- [2] M. Bertamini, T.L. Yang, D.R. Proffit, Relative size perception at a distance is best at eye level, *Percept. Psychophys.* 60 (1998) 673-682.
- [3] A. Bourrelly, L. Bringoux, J.L. Vercher, Influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during body tilt, *Exp. Brain Res.* 193 (2009) 19-28.
- [4] L. Bringoux, K. Tamura, M. Faldon, M.A. Gresty, A.M. Bronstein, Influence of whole-body pitch tilt and kinesthetic cues on the perceived gravity-referenced eye level, *Exp. Brain Res.* 155 (2004) 385-392.
- [5] L. Bringoux, G. Robic, G.M. Gauthier, J.L. Vercher, Judging beforehand the possibility of passing under obstacles without motion: the influence of egocentric and geocentric frames of reference, *Exp. Brain Res.* 185 (2008) 673-680.
- [6] L. Bringoux, C. Bourdin, J.C. Lepecq, P. Sandor, J.M. Pergandi, D. Mestre, Interaction between reference frames during subjective vertical estimates in a tilted immersive virtual environment, *Perception* 38 (2009) 1053-1071.
- [7] H. Ceyte, C. Cian, M. Trousselard, P.A. Barraud, Influence of perceived egocentric coordinates on the subjective visual vertical, *Neurosci. Lett.* 462 (2009) 85-88.
- [8] J.A. Crowell, M.S. Bancks, V. Shenoy, R.A. Andersen, Visual self-motion perception during head turns, *Nature Neurosci.* 1 (1998) 732-737.
- [9] J.E. Cutting, *Perception with an eye for motion*, MIT Press, 1986.
- [10] J.J. Gibson, *The perception of the visual world*, Houghton Mifflin, Boston, 1950.
- [11] J.M. Goldberg, C. Fernandez, Conduction times and background discharge of vestibular afferents, *Brain Res.* 122 (1977) 545-550.
- [12] S. Lechner-Steinleitner, Interaction of labyrinthine and somatoreceptor inputs as determinants of the subjective vertical, *Psychol. Res.* 40 (1978) 65-76.
- [13] M. Luyat, S. Mobarek, C. Leconte, E. Gentaz, The plasticity of gravitational reference frame and the subjective vertical: Peripheral visual information affects the oblique effect, *Neurosci. Lett.* 385 (2005) 215-219.
- [14] R. MacDougall, The subjective horizon. *Psychol Rev* 4 (1903) 145-166
- [15] F. Mast, T. Jarchow, Perceived body position and the visual horizontal, *Brain Res. Bull.* 40 (1996) 393-398.
- [16] H. Mittelstaedt, Somatic graviception, *Biol. Psychol.* 42 (1996) 53-74.
- [17] T.L. Ooi, B. Wu, Z.J. He, Distance determined by the angular declination below the horizon, *Nature* 414 (2001) 197-200.
- [18] C. Roumes, J.Y. Grau, Rafale: a human factors view of the man machine interface, *Med Aeronaut. Spat.* 45 (2003).23-26.
- [19] U. Rosenhal, Vestibular macular mapping in man, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 81 (1972) 339-351.

- [20] H.A. Sedgwick. Space perception. In: K. R. Boff, L. Kaufman, J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*, vol. 21, Willey, New York, 1986, pp. 1-21 (chapter 57).
- [21] H. Schöne, On the role of gravity in human spatial orientation, *Aerosp. Med.* 35 (1964) 764-772.
- [22] A.E. Stopper, M.M. Cohen, Effect of structured visual environments on apparent eye level, *Percept. Psychophys.* 46 (1989) 469-475.
- [23] L. Tremblay, D. Elliott, Contribution of action to perception of self-orientation in humans, *Neurosci. Lett.* 349 (2003) 99-102.
- [24] M. Trousselard, P.A. Barraud, V. Nougier, C. Raphel, C. Cian, Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity, *Cogn. Brain Res.* 20 (2004) 355-362.
- [25] A.D. van Beuzekom, J.A.M. van Gisbergen, Properties of the internal representation of gravity inferred from spatial-direction and body-tilt estimates, *J. Neurophysiol.* 84 (2000) 11-27.
- [26] A.V. van den Berg, Judgements of heading, *Vision Res.* 36 (1996) 2337-2350.
- [27] W.H., Jr. Warren, M.W. Morris, M. Kalish, Perception of translational heading from optical flow, *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 14 (1988) 646-660.
- [28] M. Wexler, Voluntary head movement and allocentric perception of space, *Psychol. Sci.* 14 (2003) 340-346.
- [29] J. Wu, Z.J. He, T.L. Ooi, Visually perceived eye level and horizontal midline of the body trunk influenced by optic flow, *Perception* 34 (2005) 1045-1060.

6.2.2. Etude 4**INFLUENCE DE L'ORIENTATION DU CORPS DANS L'ESTIMATION DES POSSIBILITES DE FRANCHISSEMENT D'OBSTACLES HAUTS LORS D'UN DEPLACEMENT HORIZONTAL INDUIT PAR UN FLUX OPTIQUE**

Bourrelly A, Vercher JL, Bringoux L

(en préparation)

Nous avons montré dans l'étude 3 que l'orientation du corps en tangage modifie la perception de la direction de déplacement induit par un flux optique. L'objectif de cette dernière étude est de déterminer l'influence de l'orientation du corps sur l'estimation du franchissement d'obstacles hauts lorsque la direction de déplacement horizontal pour franchir la barre est spécifiée visuellement dans le flux optique. Les résultats montrent, comme dans le noir complet (études 1 et 2), des déviations systématiques de la hauteur de franchissement minimal subjectif dans le sens de l'orientation du corps. Une relation proportionnelle (de l'ordre de 46% de l'angle du corps dans un panel angulaire $\pm 20^\circ$) entre l'estimation de la hauteur de franchissement minimal et l'angle d'orientation de corps manipulé est également observée. Ces résultats suggèrent que la présentation d'une direction de déplacement horizontal (i.e., de la référence de jugement) dans la scène visuelle ne contribue pas à limiter l'attraction égocentrale précédemment observée dans le noir complet (étude 1 et 2). En d'autres termes, nos résultats suggèrent que le renforcement d'une information spatiale géocentrale par la concordance d'une information allocentrale ne permet pas de réduire le poids du référentiel égocentré dans l'estimation des possibilités de franchissement. Ces résultats sont discutés en termes de fiabilité de l'information sensorielle (concernant notamment la richesse de l'information visuelle) dans la définition des poids alloués aux différents référentiels spatiaux.

TO PASS OR NOT TO PASS:***MORE A QUESTION OF BODY ORIENTATION THAN VISUAL CUES...***

Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL

✉ aurore.bourrelly@hotmail.fr ; Lionel.bringoux@univmed.fr

UMR CNRS 6233 ‘Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey’,
CNRS & Aix-Marseille Université, France.

Abstract

This study investigated the influence of static pitch body tilt on judging the possibility of passing under high obstacles when horizontal self-motion direction is induced by optic flow. Seated subjects, orientated at various body orientations, were asked to estimate the possibility of passing under a projected horizontal bar (i.e., a parking barrier), imagining a horizontal forward body displacement. This specific horizontal direction was visually specified by optic flow just before the barrier appeared, giving a feeling of forward linear self-motion in the visual scene. The results showed a global overestimation of the possibility of passing under the bar, and confirmed the influence of body orientation previously reported in darkness by Bourrelly et al. (2009; 2010) and Bringoux et al. (2008). Specifically, the data showed that body orientation proportionally affected the amount of error in the reported estimates (by 46% of body tilt magnitude in a range of $\pm 20^\circ$), and that the errors were systematically recorded in the direction of body tilt. This suggests that specifying a horizontal (Earth-based) direction of self-motion in the optic flow field do not diminish the egocentric attraction previously observed on the judgements in complete darkness. In other words, the increase of geocentric information by congruent allocentric cues (i.e., optic flow field) do not reduce the weight attributed to the egocentric reference frame when estimating the possibility of passing under obstacles. These findings are discussed in terms of interaction between egocentric, allocentric and geocentric reference frames, where the reliability of multiple sensory inputs is closely related to the weight attributed to each reference frame.

Key words: Spatial perception – Body orientation – Visual cues – Self-motion – Optic Flow - Reference frame – Geocentric – Egocentric – Allocentric

Introduction

Passing under high obstacles, like the upper part of a door or a parking barrier, is a very common task, experienced by everyone in daily situations. It has been demonstrated that, under most natural situations, judging the possibility of passing under high obstacles could rely on the perceptual information provided by the environment itself (i.e., an affordance, based on the ratio issued from common properties of the subject and the environment, Warren 1984; Warren and Wang 1987). However, during particular conditions, such as in impoverished visual environment and/or unusual postural configuration, estimating the possibility of passing under high obstacles may rely on internalized spatial representations, that could be crucial for avoiding collision. In this context, several coordinate systems, named reference frames (Howard 1982) have been hypothesized to organize these spatial representations. For instance, the position and orientation of an object can be estimated with respect to body-related references (i.e., egocentric) such as the body-midline or the Z-longitudinal axis, with respect to contextual references (i.e., allocentric) such as the orthogonal of a room, or even earth-based references (geocentric), such as the direction of gravity, or the physical horizon. Overall, without any particular task specification, perceptual judgments can be done through these different references frames, whose main orientation depends on the direction of the chosen references.

In absence of true motion, estimating the possibility of passing under a bar from a stationary point of view requires to figure out a self-motion displacement. When the imagined displacement has to be horizontal, the task is required to be performed in a geocentric reference frame, since the horizontal direction constitutes the reference for the judgment. Previous works have demonstrated that the horizontal direction, when referred to the eyes, is generally judged -2° lower than the physical reference (MacDougall, 1903; Howard, 1986). Other studies have shown that several environmental factors, such as postural and visual context could significantly influence the subjective horizontal reference.

The effect of postural context on the perception of earth-based space has been previously investigated by Bringoux et al. (2004; 2008) and Bourrelly et al. (2010; 2011). The authors showed that, in darkness, body orientation linearly influenced the perception

of earth-based space, in a range from 20° forward to 20° backward body tilts. Specifically, judgments were shown to be attracted toward the body orientation (in a range of 20% to 50% of the angle of pitch body tilt, depending of the study). The more the subjects were tilted forward, the more the earth-based judgments were underestimated relative to the physical horizontal reference. This phenomenon, in line with the idiotropic vector hypothesis suggested by Mittelstaedt to explain the errors in the subjective vertical during roll body tilt, can be defined in term of egocentric attraction induced by body tilt. Specifically, the egocentric attraction phenomenon was interpreted as the consequence of the influence of a concurrent egocentric reference frame on the earth-based reference frame normally required to perform the task.

However, it is well known that the earth-based perception of objects location is not only influenced by body tilt, but also by the visual context (Asch and Witkin, 1948 ; Dichgans et Brand, 1978 ; Matin et Li, 1992 ; 1995 ; Stoper et Cohen, 1989 ; Thilo et Gresty, 2002 ; Wu et al. 2005). The extent to which static visual information could influence the perception of Earth-based space has been largely investigated. For instance, it is now well-known that the adjustment of a visual rod to the vertical is systematically deviated in the direction of a tilted visual environment, with maximal deviations obtained between 18° and 28° of visual scene tilt (Asch and Witkin, 1948). In the same vein, the subjective visual horizon has been found deviated towards the orientation of a visual scene tilted in pitch (Matin and Li, 1992 ; 1995 ; Stoper and Cohen, 1989). In the latter case, the allocentric attraction was found about 50% of the angle of the tilted visual frame.

Similarly, when standing in front of a dynamic visual scene, most subjects experienced a similar phenomenon of allocentric attraction in the direction of visual motion (Dichgans and Brand, 1978 ; Thilo and Gresty, 2002 ; Wu et al. 2005). For example, Dichgans et Brandt (1978), and more recently Thilo and Gresty (2002), demonstrated that the rotation of the visual environment in the frontal plane significantly biased the perception of verticality and induced a systematic deviation of the subjective vertical towards the direction of the visual field rotation (with a maximal amplitude of 15 deg for a stimulation velocity of 40 deg.s⁻¹). Moreover, other studies demonstrated the influence of the direction of a translational visual motion upon Earth-based judgments. For instance, Wu et al (2005) showed that a dynamic visual scene simulating a linear forward motion of the observer could deviate the subjective visual horizon in the

direction of the optic flow orientation, after few minutes of observation. Overall, these studies stress the importance of vision during spatial perception tasks (Harris, 1974 ; Howard, 1982 ; Schöne, 1984 ; Warren, 1980). Nonetheless, the influence of dynamic visual information on the phenomena of egocentric attraction has not been studied yet.

The aim of the present study was to determine whether a horizontal (Earth-based) direction of self-motion, visually induced by optic flow, can help to reduce the egocentric influence exerted by body tilt, as previously observed in darkness on geocentric judgments. The question was addressed by testing the influence of body orientation on a particular Earth-based task which requires estimating the possibility of passing under high obstacles (Bringoux et al. 2008 ; Bourrelly et al. 2009). Here, the influence of visual versus postural information in the perception of Earth-based space is investigated. Specifically, if visual cues provide relevant information congruent with the Earth-based reference frame, one could expect a reduced egocentric attraction upon Earth-based judgments.

Methods

Subjects

Twelve subjects (8 males and 4 females; mean age 29.9 ± 8.45) gave their informed consent to participate in the study, in compliance with the ethical committee regulating human experimentation in France. All had normal or corrected-to-normal vision (by lens correction), and were free of known vestibular and neurological symptoms. They were naive as to the hypothesis under study.

Apparatus

Subjects were seated on a padded tilting chair allowing body rotations in pitch. They were restrained by means of a shoulder harness with their head strapped and secured on a headrest fixed on the chair. Head was positioned, so that the naso-occipital axis was orthogonal to the direction of gravity when the chair was vertically oriented. The chair was adjusted in height so that the subject's trans-ocular axis coincided with the axis of rotation of the chair. In this way, eye level was kept at the same height with respect to the floor reference (1.34 m) regardless of the tilt magnitude. Subjects were placed in front of a screen which described an elliptic visual angle of 81° horizontal $\times 48^\circ$ vertical when binocularly viewed by observers wearing customised goggle at a distance of 1.22 m. This

ensured that the squared edges of the screen were masked. A PC Dell Precision 380 computer generated the visual stimulus via our in-house ICE software. A video-projector (refresh rate set to 85 frames/s) projected the visual stimulus onto the screen. The visual stimulus was set to simulate an optic flow field viewed by an observer translating forward into a 3D cloud of 400 stationary dots (diameter = 5 mm without local expansion), at a constant speed of 66 m.s^{-1} (see Bourrelly et al. 2010 for more details; figure.1-a). Relative to the stationary observer, the projected stimulus consisted in a cluster of circular dots which radially expanded toward him (figure.1-b, 1-c). The central focus of expansion of the moving cloud of dots was kept in line with the subjects eye level, along their median plane (figure.1-b). In this way, the observer experienced a feeling of self-motion in a forward horizontal direction in the visual scene (figure.1-c). The total number of dots was always kept constant on the screen, so that new dots appeared at randomly determined positions in the screen when others went out. A horizontal bar (2 m long, 5 cm wide), looking like a parking barrier, was projected onto the screen at different heights relative to the subjects eye level (figure.1-d). Subjects were required to estimate if they could pass under the bar, imagining a forward horizontal displacement. Subjects held in both hands the digital response push buttons for judgement settings. Response recordings were performed by the ADwin-Gold system (Keithley©) piloted via our in-house Docometer software. Throughout the experiment, subjects were placed in darkness without any other external visual cue than the visual scene projected onto the screen.

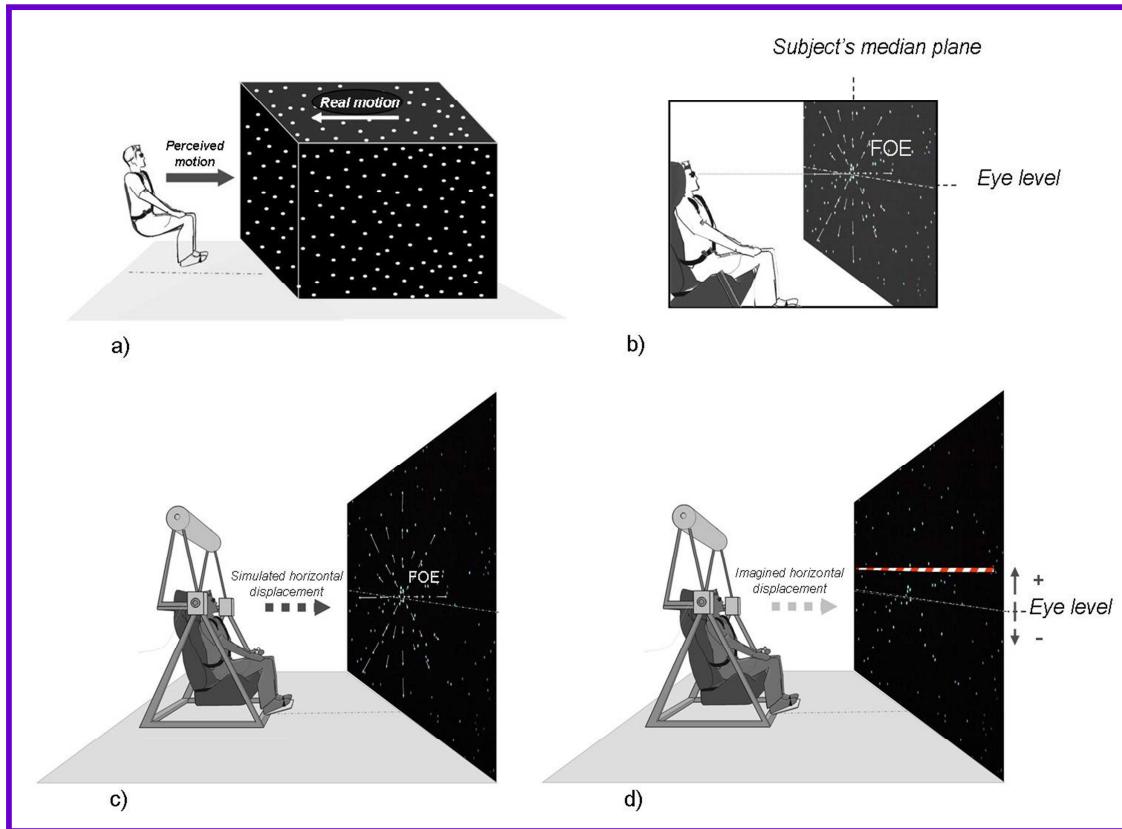


Figure 1: (a) Illustration of the optic flow display presented in a 3D-visual environment. The visual stimulus consisted in an optic flow field viewed by an observer translating forward into a 3D cloud of stationary dots. (b) Relative to the stationary observer, the projected stimulus consisted in a cluster of 400 circular dots which radially expanded toward him. The optic flow field was designed to simulate a horizontal displacement. This was obtained by projecting the focus of expansion (FOE), at the subjects' eye level, along their median plane. (c) The optic flow was projected for 2 s. (d) At t=2s, the optic flow stopped and the visual scene was kept static while a horizontal car park bar was projected at different heights onto the screen. Subjects had to respond about their possibility of passing under the bar imagining a horizontal displacement.

Procedure

Nine angles of body tilt (0° ; -5° , -10° , -15° , -20° forward; and $+5^\circ$, $+10^\circ$, $+15^\circ$, $+20^\circ$ backward relative to gravity) were manipulated in the present study. For each body orientation, eighteen bar elevations (0 ; $+2.5$, $+5$, $+7.5$, $+10$, $+12.5$, $+15$, $+17.5$, $+20$, $+25$ cm upward elevations; and -2.5 , -5 , -7.5 , -10 , -12.5 , -15 , -17.5 , -20 cm downward elevations cm from eye level; i.e., respectively, 0 , $\pm 1.2^\circ$, $\pm 2.4^\circ$, $\pm 3.5^\circ$, $\pm 4.7^\circ$, $\pm 5.9^\circ$, $\pm 7^\circ$, $\pm 8.2^\circ$, $\pm 9.6^\circ$ and $+11.6^\circ$ elevations from eye level) were randomly presented to the subjects. Before the lights were turned off, subjects were required to attentively consider the distance that separated them from the screen. A first presentation of the car park bar was given to the subjects in order to help them to evaluate its width and its distance of projection (kept constant across the trials). Subjects were asked to answer the following

question: ‘‘Do you think you could pass under the bar, in the present body orientation, imagining a horizontal displacement of your body?’’.

Subjects were first positioned at the desired body angle relative to gravity in complete darkness. The chair was rotated at constant velocity during 11 s, with a period of initial acceleration and final deceleration of 2 s ($0.4^{\circ}.\text{s}^{-1}$ and $0.2^{\circ}.\text{s}^{-2}$ for $\pm 5^{\circ}$ tilt, $0.8^{\circ}.\text{s}^{-1}$ and $0.4^{\circ}.\text{s}^{-2}$ for $\pm 10^{\circ}$ tilt, $1.2^{\circ}.\text{s}^{-1}$ and $0.6^{\circ}.\text{s}^{-2}$ for $\pm 15^{\circ}$ tilt, $1.6^{\circ}.\text{s}^{-1}$ and $0.8^{\circ}.\text{s}^{-2}$ for $\pm 20^{\circ}$ tilt). This was followed by 15 s of rest. This specific duration was chosen as a compromise between the weakest vestibular resting discharge allowing to consider post-rotational effects as negligible (Benson, 1990; Goldberg and Fernandez, 1977) and limited somatosensory adaptation due to the subsequent period of static tilt (Higashiyama and Koga, 1998). Stationary subjects were then asked to open their eyes and to observe the optic flow for 2 s. During this phase, subjects were required to orient their gaze in the direction toward which they felt translating. Then, the visual scene was frozen and the horizontal bar appeared on the screen for 0.3 s. while the subjects were required to gaze at the bar. (The delay of saccadic eye movements being 200 ms + 85 ms of decision process, one can easily consider that less than 300 ms was sufficient for the subjects to orient their gaze toward the bar; Robinson, 1973). Then, the visual scene disappeared and subjects were asked to respond about the possibility of passing under the bar, using a forced-choice judgement. None of the subjects reported any difficulty in following the task requirements. Judgment settings were recorded via the ADwin-Pro system (Keithley©) piloted via a in-house software (Docometre). At the end of the sequence, the chair was brought back to the vertical and the room lights were turned on for 5 s before a new sequence was launched. For a given body orientation, each visual stimulus was repeated 3 times in a pseudo-randomised order. This order was strictly counterbalanced for half of the subjects. Finally, the total number of judgments was 486 ($3 \times 18 \times 9$) for a total session duration of 60 min. The instructions were frequently repeated to keep subjects alert and concentrated on the task throughout the experiment. During the experiment, subjects were neither informed about the motion direction simulated by optic flow, nor about the number and height of bar elevations.

Data processing

Judgment settings were first converted into binary values. For each bar elevation, a score of 1 was attributed when subjects responded they pass under the bar, and a score

of 0 was attributed when subjects responded they could not pass under the bar. A subsequent “Probit” model, using a non-linear regression analysis for dichotomic variables, was achieved on the binary responses obtained for each body orientation in order to determine the probability p that subjects estimated at 50% they could pass under the bar. This permitted to determine mathematically an indirect variable, that is the subjective “passability”, corresponding to the minimal subjective height (in cm) relative to the eye level at which subjects estimated they could pass under the bar. The slope of the tangent at the inflection point of the Probit curve gave an indication about the discrimination sensitivity of the so-called subjective “passability” relative to the chosen increments. The sharper the slope, the higher the discrimination sensitivity. An analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was performed on the slopes of the Probit function to ensure there was no difference in the discrimination sensitivity whatever the experimental condition. Judgments of subjective “passability”, initially referred to eye-level for convenience, were subsequently reported to the top of the head, defined as the highest physical point of the head from the horizontal floor of the room measured for each subject in each body orientation. Hence data were expressed in term of vertical deviation (or error, in cm) relative to the top of the head (that is, the true level of “passability”). Positive values corresponded to an overestimation of the possibility of passing under obstacles relative to the top of the head and negative values corresponded to an underestimation of the possibility of passing under obstacles (figure.2). A repeated measures ANOVA was performed on the estimates of subjective “passability” relative to the top of the head to test the influence of body orientation upon judgments. A linear regression analysis was applied to the data to characterize the type of influence exerted by body orientation.

Results

Probit analysis

A non-linear regression analysis (Probit function) was performed on the binary values to determine the subjective “passability” for each subject in each experimental condition (see “Methods”). To assess the discrimination sensibility of the Probit processing, a one-way ANOVA with repeated measures was performed on the slopes calculated at the inflection point of the Probit function curve for each body orientation.

Results showed there was no significant difference in the discrimination sensitivity of the subjective “passability”, whatever the body orientation [$F_{(8,88)}=1.18$; $p=0.32$].

Mean comparisons of subjective "passability"

A one-way ANOVA with repeated measures was conducted on the estimates of subjective “passability” for each postural orientation. Results showed a significant difference between body orientation angles [$F_{(8,88)}=46.79$, $p<.001$]. Post-hoc analysis (Newman-Keuls test) is summarized in Table 1.

Table 1: Summary table of the Newman-Keuls pairwise comparisons for the mean estimates of subjective “passability” (*** = $p < .001$; ** = $p < .01$; * = $p < .05$; ns = no significant difference).

	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
20	—	ns	*	*	***	***	***	***	***
15		—	ns	ns	**	***	***	***	***
10			—	ns	*	***	***	***	***
5				—	*	***	***	***	***
0					—	*	***	***	***
-5						—	**	***	***
-10							—	ns	***
-15								—	*
-20									—

Linear regression analysis

A linear regression analysis was applied to the mean estimates of subjective “passability” in order to characterize the influence of body orientation upon the judgements (figure.2). Results showed a significant linear influence of body orientation on the estimates [$F_{(1,7)}=241.6$, $p<.001$]. The subjective “passability” was linearly dependant on the direction of body orientation, that is, the more the subjects were tilted forward, the more they underestimated their possibility of passing under a given obstacle.

The equation of the regression line was the following:

$$Y=0.46\theta-8.03$$

where 0.46 corresponds to the weight of the orientation influence, “ θ ” to the body orientation angle, “ Y ” to the subjective “passability”, and “8.03” to a negative offset

characterizing the general lowering of the subjective estimates relative to the top of the head, that is, the true level of “passability”.

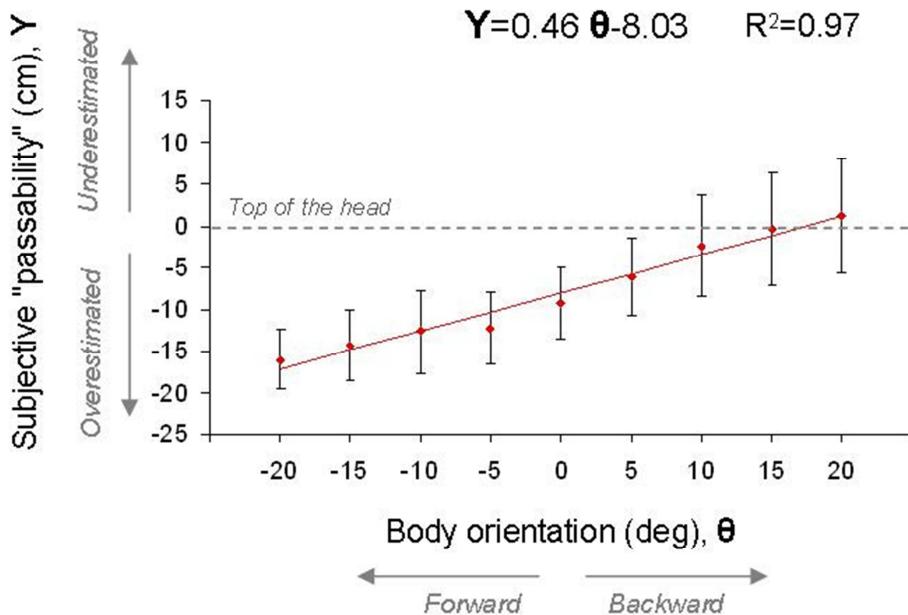


Figure 2: Linear regression line applied to the mean estimates of the subjective “passability” under obstacles (plotted with \pm confidence intervals) relative to the angle of tilt. The more the subjects were tilted forward (up to -20 deg), the lower the thresholds, that is, the more the subjects overestimated the elevation of an obstacle and their capacity of passing under. The equation of the regression line shows an influence of body orientation about 46% on the subjective estimates. The coefficient -8.03 shows a general lowering of the subjective “passability” relative to the top of the head, that is the true level of “passability”, at 0° of pitch body orientation. Overall, negative values indicated that the possibility of passing under the bar was overestimated. The R^2 provides a measure of how well the recorded data are likely to be predicted by the linear statistical model, (***) = $p < .001$).

Discussion

The present study aimed at investigating whether pitch body orientation affects the representation of Earth-based space when the horizontal earth-based direction was visually specified by optic flow. The question was addressed through a particular earth-based task which requires to estimate the possibility of passing under a barrier imagining a forward horizontal displacement (Bringoux et al. 2008 ; Bourrelly et al. 2009 ; 2011). The main finding of this study was that the estimated possibility of passing under the barrier was significantly affected by the angle of body tilt, even when the horizontal direction of displacement was clearly specified by the optic flow.

As previously observed by Bourrelly et al. (2009), our results showed that the mean subjective "passability" is -8.03 cm lower than the physical minimal height required to adequately perform the task. These results highlighted a global overestimation of the possibility of passing under obstacles (i.e. typically, subjects estimated they were able to pass under obstacles which were actually located below the top of their head; Bringoux et al. 2008, Bourrelly et al. 2009). Interestingly, a similar overestimation was found previously (about -8.24 cm) when using the same experimental setup (Bourrelly et al. 2009). This phenomenon may be related to the 30 degrees backward orientation of the saccular and utricular maculae relative to the head (Rosenhal, 1972 ; Bortolami et al. 2006). As a consequence, obstacles, whose elevation is referred to the subjective visual horizon, will be considered higher than they actually are, since the visual horizon is perceived lower than its true location in darkness.

Our results showed a significant effect of body orientation on estimating the possibility of passing under high obstacles. We found indeed a proportional influence of body orientation on Earth-based judgments in a ± 20 deg range. Specifically, the more the body was oriented downward, the more the possibility of passing under high obstacles was overestimated. Conversely, this overestimation was reduced when the body was oriented backward. The weight of the body orientation effect upon Earth-based judgments is close to that previously obtained by Bourrelly et al. (2009) for a similar task, but in complete darkness (46% vs 45%, respectively). These results suggest that judgments of subjective passability were obviously attracted toward a body-related direction despite the fact that the horizontal Earth-based direction was visually specified by optic flow. This emphasizes the assumption of a predominance of postural information versus visual cues during pitch body orientation in the range of the tested angles of tilt. Several hypotheses may be advanced to explain this finding. The first one relates to the richness of allocentric visual information. Considering the present results, it could be suggested that the structure of the projected optic flow is not rich enough to accurately specify self-motion direction while the body is tilted. However, the unambiguous feeling of self-motion reported here by the subjects is a strong support for considering the allocentric information as relevant. Nevertheless, complementary studies are needed to further investigate the influence of additional allocentric information through more natural and meaningful visual scenes. For instance, adding a fixed frame surrounding the dynamic visual scene could be of value for better understanding the effect of static vs motion-related visual information.

A second interpretation may be advanced to explain the predominant influence of postural orientation over the visual cues in the present experiment. This hypothesis relies on the level of subjects' spatial expertise as well as on the instructions given to perform the perceptual judgment. It has been shown that the intense practice of sports or daily professional activities requiring fine spatial abilities (Bringoux et al., 2000 ; Mars, 2004) could help to reduce spatial disorientation yielded by body tilt, even in presence of optic flow field (Roussieux and Crémieux ; 2005).

In complement, the way to explain the task to the observers could be crucial for them to rely or not (even unconsciously) on the egocentric reference frame to perform the judgments. For instance, simply referring to a horizontal displacement may be ambiguous for some subjects, which might have initially considered the horizon as the transverse plane of their head passing through their eyes. However, explicit illustrations (e.g., drawings) and references to gravity may have avoided such ambiguity in the present study. Nevertheless, this cognitive aspect needs to be further investigated, by explicitly specifying for instance the main (horizontal) direction of displacement given by the optic flow field. This could orient the subjects' attention onto such visual cues, and consequently help to reduce the egocentric attraction reported here.

Overall, in line with previous studies (Bourrelly et al. 2009, 2010 ; Bringoux, 2004 ; 2008) these results support the hypothesis of interaction between reference frames. Under this assumption, the perceived Earth-based space is thought to result from the partial overlapping of egocentric, allocentric and geocentric reference frames. In this type of interaction, spatial relationships are built depending on the weight attributed by the CNS to each reference frame. In turn, these weights may be closely related to the nature and the richness of the sensory information provided by the environment. Thus, in impoverished visual environments, the weight attributed to the allocentric reference frame could be minor relative to the egocentric and geocentric reference frames. On the other hand, in a full textured visual environment, the allocentric reference frame could become predominant, as illustrated by full body inversion illusions experienced in a tumbling room (Howard and Childerson, 1994).

Noteworthingly, the weight attributed to a specific reference frame is not straightforwardly equivalent to the sum of weights attributed to the underlying sensory inputs.

Indeed, some sensory cues are naturally and preferentially used in a specific reference frame. For instance, if somatosensory inputs can inform the observers about allocentric configuration (e.g., by haptic touch) or even about geocentric directions (e.g., through gravitational torque), they have been found specialized in conveying perceived egocentric directions (Darling and Miller, 1995 ; Darling and Honzinski 1999). Therefore, the reweighting processes which may act upon reference frames are not only dependent on the available sensory cues and their reliability but also on the relevance of these cues with respect to a given spatial reference frame.

Conclusion

In conclusion, this study strongly supports the hypothesis of egocentric attraction as a powerful phenomenon resistant to the presentation of earth-based cues in the visual scene. These findings could be particularly relevant in the context of aeronautics where pilots, oriented 30° backward (Roumes and Grau, 2003), may have to judge earth-based directions of space under poor visual conditions (under fog or darkness). This study may also constitute a good starting point for further research on multisensory implication in space perception. For example, it could be particularly interesting to question the contribution of specific sensory cues in the reweighting processes affecting the combination between available reference frames. In this vein, the changes observed in the weight of a specific spatial reference frame over time could be of value to better understand how these frames dynamically interact (Bringoux et al. 2009 ; Scotto Di Cesare et al. submitted).

Acknowledgements

Aurore Bourrelly was supported by a grant from DGA-CNRS (No.2007-746). The authors are grateful to F. Buloup, A. Donneaud and C. Goulon for technical expertise.

References

- Asch SE, Witkin HA (1948a) Studies in space orientation. I. Perception of the upright with displaced visual fields. *J Exp Psychol* 38:325-337
- Asch SE, Witkin HA (1948b) Studies in space orientation. II. Perception of the upright with displaced visual fields and with body tilted. *J Exp Psychol* 38:455-477
- Benson AJ (1990) Sensor functions and limitations of the vestibular system. In: Warren R, Wertheim AH (Eds.) *Perception and control of self-motion*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates pp 145-170
- Bortolami SB, Pierobon A, DiZio P, Lackner JR (2006) Localization of the subjective vertical during roll, pitch, and recumbent yaw body tilt. *Exp Brain Res* 173:364-373
- Bourrelly A, Bringoux L, Vercher JL (2009) Influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during body tilt. *Exp Brain Res* 193:19-28
- Bourrelly A, Vercher JL, Bringoux L (2010) Pitch body orientation influences the perception of self-motion direction induced by optic flow. *Neurosci Lett* 482:193-197
- Bourrelly A, Vercher JL, Bringoux L (2011) Postural configuration affects the perception of earth-based space during pitch tilt. *Acta Psychologica* (in revision)
- Bringoux L, Marin L, Nougier V, Barraud PA, Raphel C (2000) Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *J Vestib Res* 10:1-8
- Bringoux L, Bourdin C, Lepecq JC, Sandor PMB, Pergandi JM, Mestre D (2009) Interaction between reference frames during subjective vertical estimates in a tilted immersive virtual environment. *Perception* 38:1053-1071
- Bringoux L, Robic G, Gauthier GM, Vercher JL (2008) Judging beforehand the possibility of passing under obstacles without motion: the influence of egocentric and geocentric frames of reference. *Exp Brain Res* 185:673-80
- Bringoux L, Tamura K, Faldon M, Gresty MA, Bronstein AM (2004) Influence of whole-body pitch tilt and kinesthetic cues on the perceived gravity-referenced eye level. *Exp Brain Res* 155:385-392
- Darling WG, Hozinski JM (1999) Kinesthetic perceptions of earth- and body-fixed axes. *Exp Brain Res* 126:417-430
- Darling WG, Miller GF (1995) Perception of arm orientation in 3-dimensional space. *Exp Brain Res* 102:495-502
- Dichgans J, Brandt T (1978) Visual-vestibular interaction: effects on self-motion perception and postural control. In: Held R, Leibowitz HW, Teuler HL (Eds). *Handbook of sensory Physiology*. New-York: Springer-Verlag, Vol 8, pp 755-804
- Goldberg JM, Fernandez C (1977) Conduction times and background discharge of vestibular afferents. *Brain Res* 122:545-550
- Harris CS (1974) Beware of the straight –ahead shift- a non perceptual change in experiments on adaptation to displaced vision. *Perception* 3:461-476
- Higashiyama A, Koga K (1998) Apparent body tilt and postural aftereffect. *Percept Psychophys* 60:331-347
- Howard IP (1982) *Human visual orientation*. New-York: John Wiley

- Howard IP (1986) The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In Boff KR, Kaufman L, Thomas JP (eds) *Handbook of Perception and Human Performance*. NewYork: JohnWiley, Vol 1, Chapter 18, pp 1- 62
- Howard IP, Childerson L (1994) The contribution of motion, the visual frame, and visual polarity to sensations of body tilt. *Perception* 23:753-762
- MacDougall R (1903) The subjective horizon. *Psychol Rev* 4:145-166
- Mars F, Vercher JL, Blouin J (2004) Perception of the vertical with a head-mounted visual frame during head tilt. *Ergonomics* 47:1116-1130
- Mars F, Bringoux L, Cian C, Barraud PA, Raphel C, Vercher JL (2005) Perception de la verticale avec un cadre visuel solidaire de la tête : implications pour l'utilisation des visiocasques. *Le Travail Humain* 68:125-152
- Mast F, Jarchow T (1996) Perceived body position and the visual horizontal. *Brain Res Bull* 40:393-398
- Matin L, Fox CR (1989) Visually perceived eye level and perceived elevation of objects: linearly additive influences from visual field pitch and from gravity. *Vision Res* 29:315-324
- Matin L, Li W (1992) Visually perceived eye level: changes induced by a pitched from –vertical 2-line visual field. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 18:257-289
- Robinson DA (1973) Models of the saccadic eye movement control system. *Biological Cybernetics* 14:71-83
- Rosenhal U (1972) Vestibular macular mapping in man. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 81:339-351
- Roumes C, Grau JY (2003) Rafale: a human factors view of the man machine interface. *Médecine aéronautique et spatiale* 45:23-26
- Roussieux C, Crémieux J (2005) Perception de l'orientation visuelle chez des experts en taekwondo. *STAPS* 65:79-96
- Schöne H (1964) On the role of gravity in human spatial orientation. *Aerosp Med* 35:764 -772
- Scotto Di Cesare C, Bringoux L, Bourdin C, Sarlegna F, Mestre D (2011) Spatial localization investigated by continuous pointing during visual and gravitoinertial changes. *Acta Psychol* (Submitted)
- Stopper AE, Cohen MM (1989) Effect of structured visual environments on apparent eye level. *Percept Psychophys* 46:469-475
- Thilo KV, Gresty MA (2002) Visual motion stimulation, but not visually induced perception of self-motion, biases the perceived direction of verticality. *Cogn Brain Res* 14:258-263
- Warren WH Jr (1984) Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 10:683-703
- Warren WH Jr, Whang S (1987) Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13:671-383
- Warren DH (1980) Reponse factors in intermodality localization under conflict condition. *Percept psychophys* 27:25-32
- Wu J, He ZJ, Ooi TL (2005) Visually perceived eye level and horizontal midline of the body trunk influenced by optic flow. *Perception* 34:1045-1060

CHAPITRE 7

DISCUSSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail de thèse était de mieux comprendre la contribution du référentiel égocentré dans la perception de l'espace géocentré. Nous avons mené ce travail au travers de deux axes de recherche, l'un visant à mieux comprendre l'origine de l'influence égocentrale préalablement observée, dans l'obscurité, sur les aptitudes de localisation géocentrale, et l'autre ayant pour but d'évaluer la présence de ce phénomène dans un contexte visuel plus enrichi suite à l'ajout d'un flux optique. Pour ce faire, nous avons manipulé l'orientation du corps comme paradigme central dans toutes nos études. Deux tâches perceptives en rapport avec l'"horizon visuel subjectif ont également été utilisées. L'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts constitue notre tâche principale d'étude. Celle-ci est explicitement présentée aux sujets comme nécessitant la représentation d'un déplacement horizontal imaginé en direction de la barre à franchir. Nous avons dans les deux cas de figure cherché à caractériser l'influence de l'orientation du corps sur la perception de cette direction imaginée, dans un premier temps dans le noir complet (études 1 et 2), puis en présence d'un flux optique spécifiant visuellement ce déplacement (étude 4). L'étude 3 a alors été menée en prérequis à l'étude 4 de manière à mieux comprendre comment l'inclinaison du corps influence la perception de la direction de déplacement induit par le flux visuel.

De manière à aborder progressivement la discussion de ce travail, il nous parait nécessaire dans un premier temps de rappeler succinctement les apports principaux de nos quatre études. Aussi, les principaux résultats seront présentés de manière à apporter d'une part des éléments de réponse à nos hypothèses concernant l'origine de l'attraction égocentrale préalablement observée sur les jugements géocentres, et d'autre part à mieux comprendre l'incidence du contexte visuel sur la persistance de ce phénomène dans un environnement visuellement enrichi par un flux optique.

Dans un premier temps, les principaux résultats obtenus concernant l'origine de l'attraction égocentrale sont les suivants :

L'étude 1 rapporte, au même titre que l'orientation du corps, un effet systématique et directionnellement signé de l'orientation du regard, dans le noir, sur la perception de l'espace géocentré. Particulièrement, plus le regard est dirigé vers le bas, plus les possibilités de franchissement sont surestimées. De plus, les résultats montrent une combinaison additive de deux effets indépendants du corps et du regard dans l'élaboration du phénomène égocentré résultant. Ces résultats suggèrent que plusieurs références spatiales égocentrales peuvent être conjointement impliquées dans l'influence globale observée sur la perception de l'espace géocentré dans l'obscurité.

Avec le même type de protocole, l'étude 2 visait ainsi à étudier la contribution relative des différents segments du corps (tête, tronc, et jambes) dans le but de mieux comprendre comment des influences égocentrales spécifiques peuvent se combiner dans l'élaboration du phénomène d'attraction égocentrale résultant de l'inclinaison de l'ensemble du corps. Pour ce faire, une modification de la configuration posturale associée à l'orientation spécifique de certaines parties du corps des sujets a été opérée. Les résultats montrent des effets spécifiques de l'orientation du tronc et de la tête sur la perception de l'espace géocentré. La position des jambes (tendues vs fléchies), dans un premier temps, n'est pas apparue déterminante dans l'élaboration de la composante égocentrale. En parallèle, l'orientation du tronc seul génère un effet égocentré pour moitié moins important que ceux observés lors d'une inclinaison du corps entier. A l'inverse, l'orientation de la tête seule génère un effet plus important que lors d'une inclinaison du corps entier. Ces résultats, seront discutés dans le première point de ce chapitre en terme de combinaison d'influences égocentrales.

Dans un deuxième temps, les principaux résultats concernant l'incidence du contexte visuel dynamique (flux optique) sur le phénomène d'attraction égocentrale sont les suivants :

L'étude 3 démontre, tout comme en situation visuellement appauvrie, une influence proportionnelle de l'orientation du corps sur la perception de l'espace géocentré en présence de flux optique. Plus précisément, lorsque le flux optique simule un

déplacement linéaire de l'observateur vers l'avant dans la scène visuelle, la direction de déplacement horizontal subjectif, qui sert de référence dans l'estimation des directions du haut et du bas, est « attirée » dans le sens de l'orientation du corps. En conséquence, pour une même direction de déplacement simulée visuellement, plus les sujets sont inclinés vers l'avant, plus ils ont tendance à répondre qu'ils descendent dans la scène visuelle. A l'inverse, plus les sujets sont inclinés vers l'arrière, plus ils ont tendance à répondre qu'ils montent. Nous avons vu précédemment que de nombreuses tâches spatiales géocentriques sont affectées par une mauvaise perception de la référence horizontale par rapport à la référence physique. C'est précisément ce que nous avons cherché à vérifier pour l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts, lorsque la direction de déplacement horizontal vers la barre est induite par un flux visuel, dans l'étude 4 de ce présent manuscrit.

L'étude 4 montre effectivement que bien que la direction horizontale de déplacement soit explicitement spécifiée dans la scène visuelle, l'orientation du corps, au même titre que dans le noir complet, modifie l'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts. Ces résultats suggèrent que le phénomène d'attraction égocentré est un phénomène puissant et persistant à l'enrichissement de la scène visuelle par un flux optique. Ces résultats, seront discutés dans un deuxième point relatif à l'incidence du contexte visuel sur la perception de l'espace géocentré.

Le présent chapitre est séparé en 4 points de discussion. Nous discuterons dans un premier point des apports de nos travaux concernant l'élaboration du référentiel égocentré influençant la perception de l'espace géocentré. Nous chercherons pour cela à caractériser la nature de l'influence égocentrale mise en évidence au travers de l'expression des mécanismes qui sous-tendent son apparition. Nous discuterons dans un deuxième point de l'influence du contexte visuel sur le phénomène d'attraction égocentrale précédemment observé. Nous soulignerons à travers cette partie l'importance des contextes postural et visuel dans les processus de construction de l'espace géocentré subjectif. Nous discuterons, dans un troisième point, de l'utilisation effective des référentiels spatiaux dans la perception de l'espace géocentré. Nous présenterons pour cela différentes hypothèses centrées autour des processus de combinaison inter référentiels. Pour finir, et dans une perspective d'ouverture de notre travail de thèse aux préceptes de la perception directe, nous proposerons une définition resserrée de l'affordance dans l'expression des

relations qui lient un acteur à son environnement, en termes de capacité d'action évoquée par le contexte visuel environnant mais également en termes de possibilités d'actions naturellement suggérées par le contexte postural de l'individu.

7.1. ELABORATION DU REFERENTIEL EGOCENTRE

Les expériences conduites au cours de cette thèse ont toutes montré un effet significatif de l'orientation du corps entier sur la perception de l'espace géocentré. Cet effet, systématiquement signé dans le sens de l'orientation du corps pour des angles d'inclinaison compris entre $\pm 20^\circ$ conforte les résultats précédemment obtenus par Bringoux et al. (2008) pour une tâche d'estimation du franchissement d'obstacles hauts manipulée dans des conditions expérimentales similaires. Cet effet d'inclinaison, interprété en termes d'attraction égocentrale sur les jugements géocentrés suggère que le corps entier puisse constituer une référence égocentrale influente dans la perception de l'espace géocentré. Le corps étant lui-même constitué d'un assemblage de différents segments susceptibles de constituer autant de références égocentrales influençant la perception de l'espace géocentré, le présent travail de thèse soulève alors deux questions : quels sont ces effets spécifiques? -et surtout, de manière plus intéressante, comment se combinent-ils ?

Mittelstaedt (1983) est l'un des premiers auteurs à avoir avancé l'idée d'une influence égocentrale spécifique exercée par l'axe Z longitudinal corporel pour expliquer les erreurs de jugement perceptif de la verticalité associées à des inclinaisons corporelles en roulis. De leur côté, Ito et Gresty (1997) considèrent également que le corps entier peut exercer un effet égocentré spécifique, mais sur la base d'une ligne reliant les jambes à la tête en position assise suggérant que la configuration posturale des sujets (assis vs debout) peut amener à des influences égocentrales différentes sur la perception de l'espace géocentré. Les travaux de Guerraz et al. (1998), Mittelstaedt, (1983), Wade, (1970) et Wetzig et Baumgarten (1990) sur la perception de la verticalité lors d'une orientation du corps entier en roulis, suggèrent que l'axe de la tête, en association avec d'autres facteurs comme notamment l'axe du tronc, pourrait constituer un des déterminants majeurs des erreurs géocentrales observées lors d'une inclinaison du corps entier.

Toutes ces études, y compris les nôtres, suggèrent que des effets spécifiques en provenance de plusieurs parties du corps peuvent se combiner conjointement de manière à influencer les jugements géocentriques (Figure 7.1.). Néanmoins, la manière dont ces influences spécifiques interagissent dans l'élaboration d'une influence égocentrique résultante reste encore très discutée. A ce jour, deux hypothèses explicatives ont été avancées dans la littérature (Figure 7.2.). Une première hypothèse suggère que des effets égocentriques spécifiques issus de différentes parties du corps peuvent se combiner de manière additive et avec des poids constants dans l'élaboration de la composante égocentrique résultante. En accord avec cette hypothèse, les résultats de l'étude 1 suggèrent que l'orientation du corps et du regard sont la source de deux influences égocentriques indépendantes qui se combinent de manière additive pour constituer un effet égocentrique résultant. Cette hypothèse d'additivité est également supportée par Mittelstaedt (1983), Guerraz et al. (1998) et Wetzig et Baumgarten (1990) qui suggèrent que l'effet d'orientation du corps entier peut être interprété comme la conséquence de l'addition de l'effet de l'orientation de la tête et du tronc. Notre étude 2 montre que l'importance de l'effet d'orientation du tronc seul correspond à la moitié de celle caractérisant l'effet d'une inclinaison du corps entier. Néanmoins, avec un effet d'inclinaison de la tête seule plus important que l'effet d'orientation du corps entier, (ce qui a également été vérifié par Poquin et al. 1995, Wade 1968 ; 1969 et Witkin et Asch, 1948), nos résultats suggèrent que d'autres processus, plus complexes, sont certainement à envisager pour expliquer l'émergence du phénomène égocentrique résultant.

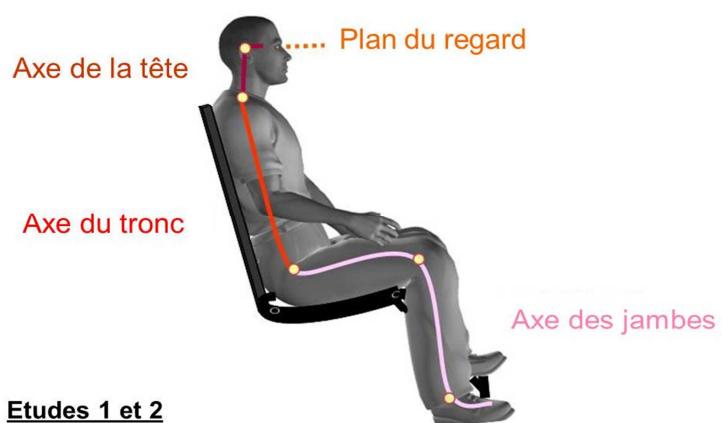


Figure 7.1. Les études 1 et 2 mettent en évidence l'existence d'effets égocentriques spécifiques en provenance de plusieurs parties du corps. Il s'agit du plan du regard, de l'axe de la tête, de l'axe du tronc et de l'axe des jambes. Les effets égocentriques issus de l'orientation du regard et du corps entier sont indépendants et se combinent de manière additive dans la perception de l'espace géocentrique, alors qu'au sein même de l'effet corps, les effets de l'orientation de la tête et du tronc interagissent de manière non-additive.

Une seconde hypothèse peut alors être présentée, tenant compte des différentes interactions observées entre les configurations posturales que nous avons manipulées. Cette hypothèse suggère qu'un processus de repondération évolutive (ou dynamique) pourrait s'opérer entre les différents effets spécifiques impliqués dans l'élaboration du phénomène égocentré résultant. Il se pourrait alors que ce processus de repondération dépende de la fiabilité des informations sensorielles disponibles pour une configuration posturale donnée. Plus précisément, cette hypothèse, en accord avec l'hypothèse du maximum de vraisemblance supportée par l'approche bayésienne de la perception, stipule que si on attribue des poids plus importants aux entrées sensorielles les plus fiables et des poids moins importants aux entrées les moins fiables, le système nerveux peut alors optimiser l'intégration sensorielle et résoudre les ambiguïtés relatives à la représentation de l'espace pour une tâche donnée (Ernst et Banks, 2002 ; Ernst et Bülthoff, 2004 ; Mars et al. 2005). Le processus de repondération entre les différentes parties du corps dépendrait alors de la nature des informations sensorielles impliquées (i.e., vestibulaires et proprioceptives) et de leur adéquation par rapport au jugement requis par la tâche.

Nos résultats montrent un effet égocentré du tronc seul inférieur à l'effet d'orientation du corps entier. Dans cette logique, ces observations semblent souligner que les entrées vestibulaires sont plus fiables que les entrées proprioceptives dans l'estimation des jugements géocentrés quand la tête est maintenue dans l'axe gravitaire (Wade, 1970). Cependant, au cours de l'inclinaison du corps entier, une diminution de la fiabilité vestibulaire (lié aux propriétés de décharge des récepteurs vestibulaires au cours de l'inclinaison ; Schöne, 1964) pourrait expliquer une influence croissante des entrées graviceptives issues du tronc au cours de l'inclinaison sur les jugements géocentrés. En outre, une inclinaison de la tête seule induit une modification des entrées proprioceptives du cou et des entrées vestibulaires. Alors que les entrées vestibulaires tendent à devenir plus ambiguës dès lors que la tête quitte l'orientation verticale, le SNC a la possibilité d'interpréter les entrées proprioceptives issues du cou de deux manières, qui traduisent soit un mouvement de la tête par rapport au tronc, soit un mouvement du tronc par rapport à la tête. Il se pourrait alors dans cette situation que le SNC puisse sélectionner par précaution l'orientation de la tête comme référence de verticalité. Cette hypothèse semble en accord avec le rôle de plateforme stabilisatrice attribuée à la tête dans un grand nombre de tâches perceptivo-spatiales (Pozzo et al, 1998 ; Berthoz, 1997).

Pour résumer, on pourrait considérer que le poids attribué à l'axe Z de la tête est augmenté dans le cas d'une dissociation de la tête et du tronc, ce qui est compatible avec le fait que l'attraction égocentrale observée dans d'autres études est d'autant plus importante que la configuration posturale est atypique (voir Chassouant, 1994, p 75; Schöne et Hudo de Haes, 1968 ; Wade, 1972).

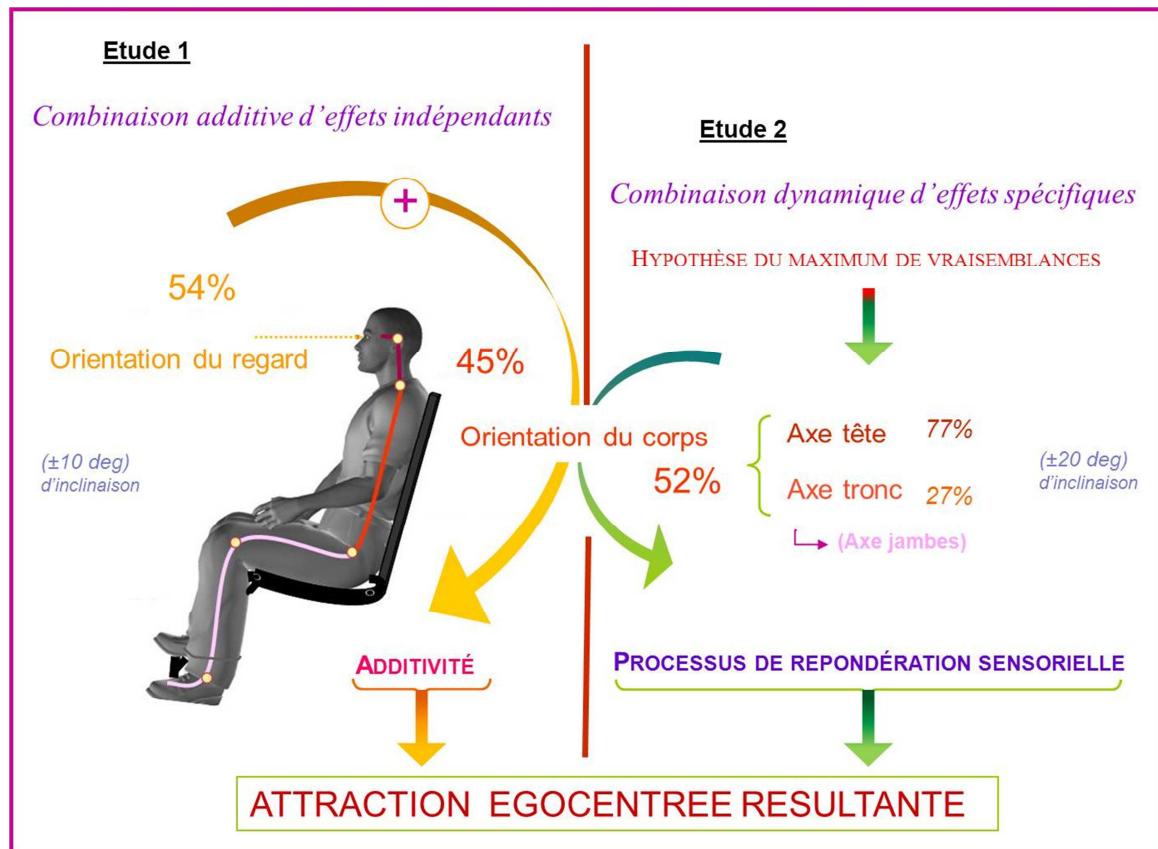


Figure 7.2. : Deux hypothèses explicatives concernant l'origine de l'attraction égocentrale résultante et le mode de combinaison de différents effets spécifiques sont mises en évidence dans les études 1 et 2. Nos résultats supportent l'existence d'une sommation d'effets indépendants dans l'étude 1, et d'un processus de repondération sensorielle basé sur l'hypothèse du maximum de vraisemblances dans l'étude 2. Particulièrement, les résultats mis en évidence dans l'étude 2 suggèrent que dans des configurations posturales particulières où l'orientation de la tête et du tronc sont dissociées, la pondération associée aux différentes parties du corps dans l'élaboration du phénomène d'attraction égocentrale résultant est très probablement modifiée en fonction de l'angle d'inclinaison manipulé.

Pour finir, la question de savoir pourquoi, dans un cas (étude 1) nos résultats montrent des processus additifs d'effets indépendants de l'orientation du regard et du corps entier dans la construction du phénomène égocentrale résultant, et dans l'autre (étude 2) une évolution des poids attribués à différents segments au sein même de l'orientation du corps reste assez énigmatique. Une piste de réponse pourrait se trouver dans la caractéristique d'une liaison égocentrale –allocentrale pour l'orientation du regard

que l'on ne trouve pas pour l'orientation des différents segments corporels. L'orientation du regard, d'ordinaire plus à même d'offrir à l'individu un ancrage de type allocentré, pourrait plus facilement amener l'individu à considérer l'orientation du corps et du regard comme deux entités indépendantes alors qu'au sein même de l'orientation du corps, les effets spécifiques des différents segments n'offrent pas cette possibilité de liaison égocentré-allocentré. De nouvelles recherches restent toutefois nécessaires pour asseoir ces conclusions. Il pourrait-être par exemple question d'interroger de nouveau le mode de contribution des différents segments corporels dans l'élaboration d'un phénomène égocentré résultant lorsqu'une autre modalité que la vision (e.g., auditive ou haptique) permet d'accéder de manière spécifique à l'espace allocentré.

De plus, dans l'état actuel de nos recherches, de nombreuses questions demeurent quant à la manière dont les influences égocentréées segmentaires se combinent dans la construction du phénomène égocentré résultant. Notamment, un certain nombre de contraintes matérielles liées aux limitations mécaniques de notre dispositif ne nous permet pas à ce jour de conclure de manière plus exhaustive sur la contribution de l'effet de la tête et du tronc dans l'élaboration de l'influence égocentré corps entier. Aussi, dans une perspective d'investigations futures, il pourrait être particulièrement intéressant d'approfondir ces données par la manipulation conjointe de l'orientation de la tête et du tronc avec des moyens techniques plus adaptés. Plus précisément, il pourrait être question de réduire le temps de passation, qui constitue le principal facteur limitant de cette étude, d'une part, par le développement d'un dispositif expérimental particulièrement bien adapté à la manipulation conjointe l'orientation de la tête et du tronc, et d'autre part par la mise en place d'un protocole de psychophysique permettant de cibler très rapidement la zone de seuil perceptif des sujets. La présentation, par exemple, d'une échelle statistique adaptative qui recalcule les caractéristiques du stimulus à projeter en fonction de la réponse préalable des sujets, plutôt que via un paramétrage préétabli, constitue également une solution intéressante pour optimiser le temps passé sur l'étude.

7.2. INTERACTIONS VISUO-POSTURALES : L'INCIDENCE DU CONTEXTE VISUEL

Nous avons vu dans les études 3 et 4 de ce présent manuscrit que l'ajout d'un flux optique ne permet pas d'éviter l'apparition du phénomène d'attraction égocentrale observé dans le noir complet sur la perception de l'espace géocentré. Dans le présent paragraphe, nous discuterons de l'influence relative du contexte visuel et postural sur ce phénomène d'attraction égocentrale. Nous avons vu précédemment (au chapitre 3) que le contexte visuel pouvait à lui seul influencer de manière importante la perception de l'espace géocentré pour des sujets non inclinés. La puissance de cette influence, que l'on peut qualifier en parallèle d'attraction allocentrale, conduit à considérer le contexte visuel comme un élément prépondérant dans des tâches de perception spatiale (Harris, 1974 ; Howard, 1982 ; Schöne, 1984 ; Warren, 1980). Quand est-il cependant lorsque l'orientation du corps et de la scène visuelle sont toutes deux manipulées ? Quel poids peut-on attribuer au contexte visuel vs postural dans la perception de l'espace géocentré ?

Les travaux de Witkin et Asch (1948) soutiennent historiquement l'idée que quelle que soit l'orientation manipulée (orientation du corps, du cadre visuel, ou des deux) l'information visuelle domine l'information posturale dans une tâche d'ajustement géocentré. Précisément la VVS et l'HVS ont été étudiées dans différentes conditions expérimentales où la position du corps (droite et inclinée à 28 deg sur la gauche), et l'orientation de la scène visuelle (28 deg à droite et 28 deg à gauche) ont été manipulées. Les résultats montrent une influence significative de l'orientation du cadre, le plus souvent dans le sens de l'inclinaison visuelle sur la perception géocentrale. Particulièrement, l'erreur moyenne de 6 deg en direction du cadre pour une orientation de corps érigée, augmente jusqu'à 9.4 deg lorsque le corps et la scène visuelle sont inclinés dans la même direction, et de 11.4 deg lorsque le cadre et le corps sont inclinés dans des directions opposées. Ces résultats suggèrent que le poids attribué à l'information visuelle augmente dès lors que l'orientation du corps quitte la direction de la gravité, ce qui supporte l'idée d'une dominance de l'information visuelle sur l'information posturale dans la perception de l'espace géocentré. Les individus semblent alors adopter le référentiel allocentré comme référentiel principal plutôt que le référentiel égocentré défini par l'orientation du corps dans l'évaluation des directions géocentriques.

L'hypothèse d'une prédominance visuelle sur les informations posturales ne fait pas toutefois l'unanimité au regard des nombreuses études plus récemment réalisées sur le sujet. Ces travaux mettent en exergue une importance plus prononcée du contexte postural dans la perception de l'espace géocentré (Barnett-Cowan 2009; Dyde et al. 2006 ; Jenkin et al. 2003). Par exemple, les travaux de Jenkin et al. (2003), et Dyde et al. (2006) réalisés sur des tâches de reconnaissance de l'orientation préférentielle des objets et de leur illumination montrent que le « *perceptual upright* » est très majoritairement dirigé dans le sens de l'orientation du corps, que le corps soit inversé par rapport à une scène visuelle non inclinée, ou orienté avec la scène visuelle à 90 deg par rapport à la gravité. Deux tendances de réponse dans la situation où le corps est couché à 90 deg par rapport à la gravité et la scène visuelle non inclinée sont observées. Avec 55% des jugements réalisés dans le sens de l'orientation du corps et 45% dans le sens de la scène visuelle, ces résultats soulignent l'importance du contexte postural dans la perception de l'espace géocentré.

Avec un poids attribué à l'orientation du corps sur la perception de l'espace géocentré équivalent à 40%, aussi bien dans le noir complet (étude 1 et 2), qu'en présence d'une scène visuelle structurée (Flux ; étude 3 et 4), nos résultats supportent également l'hypothèse d'une prédominance de l'information posturale sur l'information visuelle lorsque que l'orientation du corps est manipulée. De plus, contrairement à ce qui pourrait être logiquement attendu, la présentation explicite d'une direction de déplacement géocentrique dans la scène visuelle (étude 4) ne contribue pas à limiter le poids de l'attraction égocentrique. Ces résultats corroborent l'hypothèse selon laquelle l'attraction égocentrique est un phénomène particulièrement puissant puisqu'il s'avère résistant à l'enrichissement d'une scène visuelle par un flux allocentré.

Différentes raisons peuvent être avancées pour expliquer ce résultat. La première fait tout d'abord référence à la nature même de l'information allocentrale. Se pourrait-il par exemple que par nature, un flux visuel ne soit pas suffisamment riche pour spécifier de manière prégnante une direction de déplacement allocentrale lorsque le corps est orienté? Cette hypothèse semble à première vue assez peu probable compte tenu du fait qu'un flux visuel peut être interprété comme la conséquence directe d'un mouvement propre de l'observateur dans son environnement. Le sentiment devection qui

accompagne très fréquemment la stimulation visuelle souligne le caractère puissant de l'information allocentrale présentée. Néanmoins, l'absence de cadre réel structurant la scène visuelle associé au caractère inhabituel de la situation posturale et visuelle peut expliquer le fait que SNC juge l'information posturale plus fiable et moins ambiguë que l'information visuelle pour la perception géocentrale. Une manière très simple de questionner cet effet de la richesse allocentrale, pourrait-être dans un premier temps de rajouter un cadre autour de la scène visuelle dynamique et de questionner l'émergence d'un effet cadre lorsque le corps est incliné. Il pourrait être envisageable de rajouter ensuite une scène visuelle plus naturelle afin de mieux appréhender le type d'information pertinente (e.g., sémantique) dans l'émergence de cet effet.

Le niveau d'expertise spatiale semble être également une piste intéressante à explorer pour mieux comprendre la contribution relative des entrées visuelles vs posturales dans la perception de l'espace géocentré. Au cours de nos différentes études, nous avons pu par exemple observer les profils de réponse de deux sujets particuliers, S14 et S15, ancien pratiquants d'une activité sportive de haut niveau (respectivement sauteur en hauteur et handballeur). Bien que les contraintes d'équilibration statique et de maintien de configuration posturale ne soient pas forcément au cœur de ces deux activités sportives, les profils de réponse pour ces deux sujets, testés dans les mêmes paradigmes expérimentaux que les études 1, 2 et 3, suggèrent qu'ils aient développé par leur pratique une forme d'expertise spatiale (**Figures 7.3 et 7.4**).

Par exemple, lorsqu'un flux visuel est rajouté dans la scène et simule une direction de déplacement vers le haut ou vers le bas par rapport à l'HV (paradigme expérimental de l'étude 3), la **figure 7.3.** montre une relative stabilité dans les réponses perceptives des sujets S14 et S15 qui n'existe pas pour le reste des sujets testés dans l'étude 3. Comparé au profil moyen des réponses obtenues dans l'étude 3, les sujets S14 et S15 ne montrent pas un effet significatif de l'orientation du corps sur la perception de l'espace géocentré. [S14 : $y = -0.006 x -2.8$, $R^2 = 0.006$; S15 : $y = 0.04 x -0.9$, $R^2 = 0.07$; **Moyenne étude 3:** $y = 0.39 x -3.57$, $R^2 = 0.99$, $EC = 0.125$].

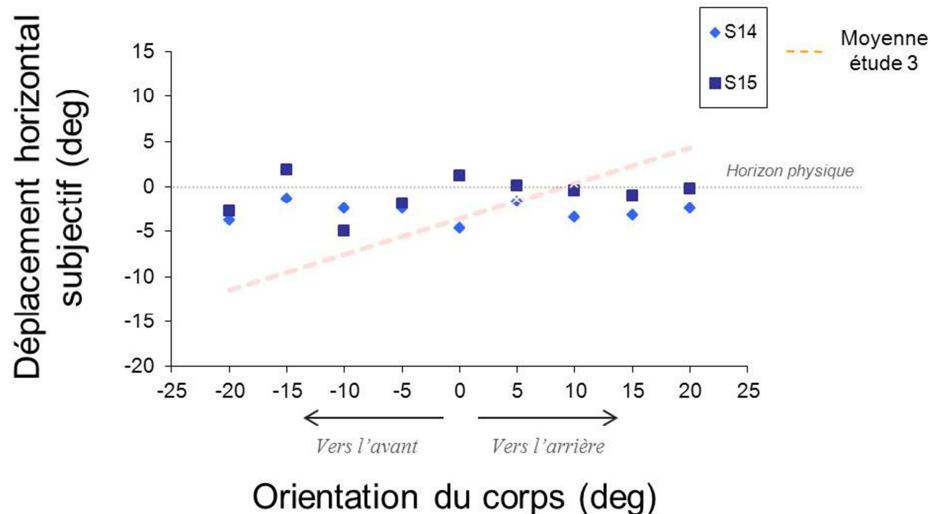


Figure 7.3. Profils de réponse de deux sujets particuliers [pente S14 et S15 > pente moyenne de l'**étude 3** $\pm 2 \times$ EC] sur la perception de la direction de déplacement horizontal induit en fonction de l'orientation du corps (paradigme expérimental de l'étude 3). Les résultats montrent que chez ces 2 sujets, les réponses ne sont pas affectées par la manipulation de l'orientation du corps contrairement aux résultats moyens obtenus dans l'étude 3. [S14 : $y = -0.006x - 2.8$; S15 : $y = 0.04x - 0.9$; Moyenne étude 3: $y = 0.39x - 3.57$]

Aussi, comparé au profil de réponse de ces deux mêmes sujets testés dans le noir dans des paradigmes expérimentaux similaires aux études 1 et 2 (condition d'orientation du corps entier), les résultats suggèrent que l'ajout d'un flux optique semble contribuer à limiter sensiblement l'émergence des effets égocentriques observés dans le noir chez ces deux sujets. La **figure 7.4.** montre les profils de réponse des sujets S14 et S15 testés dans un paradigme d'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts. Les données suggèrent, notamment pour le sujet 14, une réduction de l'importance de l'effet égocentrique. Ces résultats suggèrent que la pratique intense d'une activité sportive pourrait contribuer à améliorer la perception de l'espace géocentrique où l'information visuelle n'a pas besoin d'être richement structurée pour stabiliser la perception. De nouvelles recherches avec un nombre plus important de sujets sont bien sûr à considérer pour asseoir ces conclusions, mais il semblerait, dans une certaine mesure, que l'activité sportive puisse contribuer à l'utilisation optimale et dissociée des différents référentiels égo, allo et géocentriques (Bringoux et al. 2000, voir également Roussieux et Crémieux, 2005 pour une étude différentielle sur les sportifs de haut niveau).

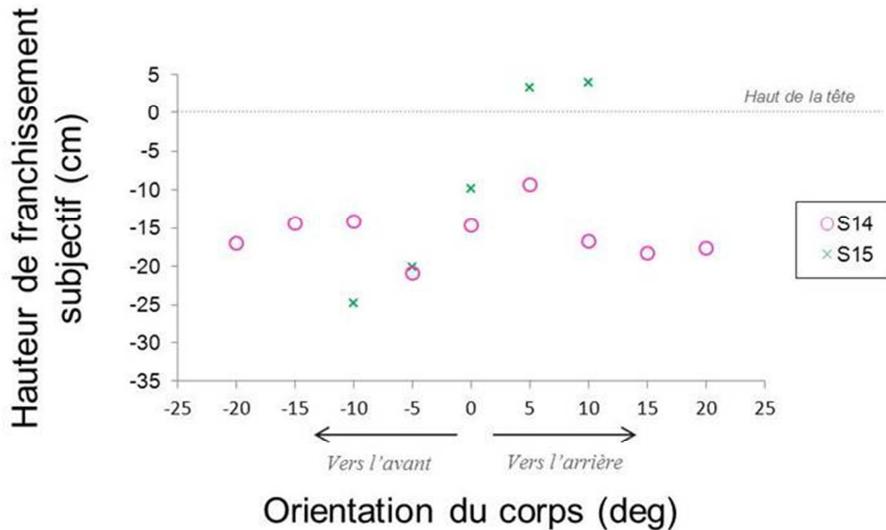


Figure 7.4. Profils de réponse de deux sujets particuliers, dans l'estimation des possibilités de franchissement en fonction de l'orientation du corps, avec les paradigmes expérimentaux de l'étude 1 (x) et l'étude 2 (o) pour la condition d'inclinaison du corps entier. Les résultats montrent, notamment pour S14, une réduction du panel angulaire des effets.

Dans un dernier point, la question relative à l'ambiguïté de la consigne concernant la réalisation de la tâche géocentrale peut également être relevée. Le déplacement horizontal imaginé pour réaliser la tâche, même s'il est préalablement défini de manière géocentrale peut être confondu par le sujet avec le plan transverse au corps. On peut alors envisager que la manière de présenter la consigne aux sujets puisse influencer les résultats observés. Nos résultats (études 1 et 2) montrent notamment une influence égocentrale deux fois plus importante (40% vs 20%) que les résultats obtenus par Bringoux et al. (2008) pour le même paradigme expérimental utilisé dans le noir complet. Cette augmentation assez remarquable de l'effet par rapport à l'étude de Bringoux et al. (2008) pourrait être imputée à la présentation légèrement différente de la tâche, qui consiste, dans une condition parallèle à la tâche de franchissement également manipulée, à évaluer de manière assez directe la position d'une barre par rapport à la perception de l'horizon visuel. La tâche, « juger la hauteur d'une barre par rapport à l'HVS », est ici présentée de manière extérieure au sujet (« l'HVS est l'endroit où le ciel rencontre la mer ») ; alors que dans nos études, la tâche implique la représentation d'un déplacement propre des sujets. La manière de présenter la tâche aux sujets semble alors pouvoir contribuer à lever l'ambiguïté relative à la nature de la référence horizontale à considérer (explicitement définie comme perpendiculaire à la gravité) ; tandis que dans l'autre cas, cette ambiguïté pourrait au contraire être accentuée en incitant implicitement les sujets à se référer au plan transverse du corps dans l'estimation de leur direction de déplacement.

Enfin, toujours dans le but de questionner l'impact de la consigne sur la perception géocentrale, il pourrait être intéressant d'étudier l'effet d'un feedback informatif sur les directions géocentriées portées par la scène visuelle allocentrale. Par exemple, dans la continuité de l'étude 4, il serait intéressant d'informer les sujets du caractère horizontal du flux visuel projeté. Cette nouvelle consigne pourrait offrir aux sujets la possibilité d'un ancrage visuel allocentré susceptible de diminuer l'effet de l'attraction égocentrale observé.

7.3. VERS UNE INTERPENETRABILITE DES REFERENTIELS SPATIAUX ?

Nous avons vu dans la partie introductive de ce manuscrit que la perception que nous avons de l'espace environnement peut être reliée à la prise en compte de certaines caractéristiques physiques de l'espace qui constituent, indépendamment de la perception qu'on en a, des référentiels spatiaux au sens physique du terme. Cependant, l'utilisation que nous faisons de ces entités spatiales reste encore aujourd'hui très discutée. Les référentiels spatiaux constituent-ils des entités cognitives indépendantes les unes des autres d'un point de vue représentationnel à partir desquels un état perçu de l'espace serait élaboré ? Ou bien ces représentations spécifiques et distinctes n'existent pas et l'état perçu émerge de l'utilisation combinée d'indices spatiaux appartenant aux différents référentiels physiques ?

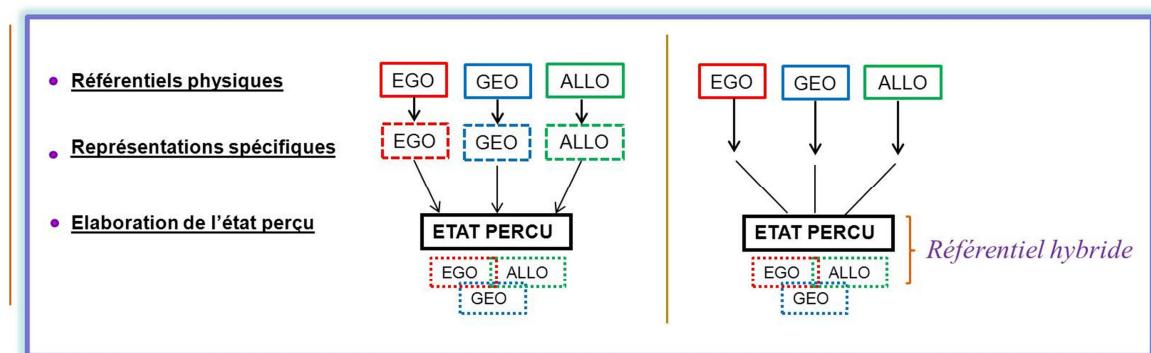


Figure 7.5. : Deux hypothèses explicatives concernant l'utilisation des référentiels spatiaux dans l'élaboration d'un état perçu. Dans le premier cas, les référentiels spatiaux constituent des entités cognitives indépendantes à partie duquel l'état perçu est élaboré. Dans ce cas il est possible de passer facilement d'un référentiel à un autre par un phénomène de transition totale. Dans le deuxième cas, l'état perçu est une entité mixte résultant de la combinaison de plusieurs référentiels physiques.

De manière à répondre à cette question, plusieurs hypothèses ont été proposées dans la littérature (**Figure 7.5**). La première hypothèse suggère qu'il pourrait s'opérer une transition radicale d'un référentiel à un autre en fonction des contraintes de la tâche (Brotchie et al. 1995 ; Ghafouri et al. 2002 ; Pouget et Sejnowski, 1995 ; Snyder et al. 1998). Par exemple Ghafouri et al. (2002) soulignent, lors d'une tâche de pointage, la capacité du SNC à adapter le comportement au niveau articulaire pour transformer les performances motrices à partir d'un référentiel spatial centré sur l'environnement à un autre centré sur le corps. Dans ce contexte, les référentiels seraient supportés par des structures neurophysiologiques pré-existantes et exclusives les unes des autres (Galati et al. 2000). Cette hypothèse est très largement partagée par Snyder et al. (1997 ; 1998) qui soulignent notamment la ségrégation anatomique de l'information spatiale au niveau du cortex pariétal, avec une voie qui supporte les informations égocentrales pour le contrôle de l'orientation du regard vers la cible à localiser, et une autre qui supporte l'information allocentrale pour assurer une tâche de navigation, ou tout autre tâche qui nécessite l'utilisation d'un référentiel absolu.

La deuxième hypothèse supporte l'existence d'états intermédiaires, dans lesquels les sources égo, allo et géocentrales pourraient se regrouper dans un référentiel hybride (Flanders et Soechting, 1995; Kappers, 2002; 2004; Paillard, 1991; Soechting et Flanders, 1992). Par exemple, Kappers (2004) montre une contribution combinée des sources allocentrales et égocentrales dans l'ajustement haptique d'une barre test devant être placée parallèlement à une barre de référence dans le plan sagittal médian. De la même manière, Coello et Iwanow (2006) montrent une influence des sources allocentrales issues d'un environnement visuel structuré sur une tâche de pointage égocentré. Enfin, Flanders et Soechting (1995) montrent que l'orientation perçue de l'oblique (i.e. d'une pente à 45°), lorsqu'il s'agit d'atteindre et de serrer un objet, peut résulter d'un compromis entre un référentiel allocentré, fixe dans l'espace, et égocentré, fixe sur la main. Le codage spatial des mouvements d'atteinte et de préhension apparaît caractéristique d'une de plusieurs référentiels, à la fois d'un point de vue des structures neurales sous-jacentes et de leur expression comportementale. Cette combinaison a été évoquée en termes d'« *interpénétrabilité* » entre référentiels spatiaux (Bringoux et al. 2004 ; 2008 ; Paillard, 1982).

D'un point de vue comportemental, deux cas d'interpénétrabilité ont été rapportés dans la littérature. Le premier décrit l'existence d'un état intermédiaire dynamique, où le poids attribué à chaque référentiel évolue au cours de la tâche (Diedrichsen et al. 2004 ; Smetanin et Popov, 1997). Dans ce cas, le référentiel utilisé subit l'influence croissante d'un autre référentiel perturbateur. Spécifiquement, ce phénomène a été observé sur l'effet cadre lors de l'inclinaison de la tête seule (DiLorenzo et Rock, 1982) ou du corps entier (Bishof, 1974 ; Goodenough et al. 1985 ; Zoccolotti et al. 1992). Par exemple il a été montré qu'une inclinaison de la tête de 45 deg induit une augmentation de l'influence de l'inclinaison du cadre visuel sur les jugements de la verticale visuelle par rapport à une position de tête droite (DiLorenzo et Rock, 1982). L'augmentation de l'effet cadre peut être expliquée par la diminution de l'efficacité des sources graviceptives disponibles pendant l'inclinaison de la tête, mais peut aussi être compris comme une augmentation du poids du référentiel allocentré lorsque la tête n'est plus alignée avec la gravité. D'autres études suggèrent également l'existence d'états intermédiaires où les référentiels égocentrés, géocentrés ou allocentrés sont combinés et s'influencent à la manière d'une interaction évolutive (Diedrichsen et al. 2004 ; Smetanin et Popov, 1997). Ainsi, Diedrichsen et al. (2004) soutiennent que les erreurs de pointage vers une cible visuelle mémorisée peuvent être expliquées par une représentation indépendante du contexte de la cible par rapport à une référence corporelle (i.e., égocentrale), rapidement suivie par une représentation de la cible par rapport à d'autres objets (i.e., allocentrale). Dans ce cas, le poids des deux référentiels évolue progressivement au cours du temps.

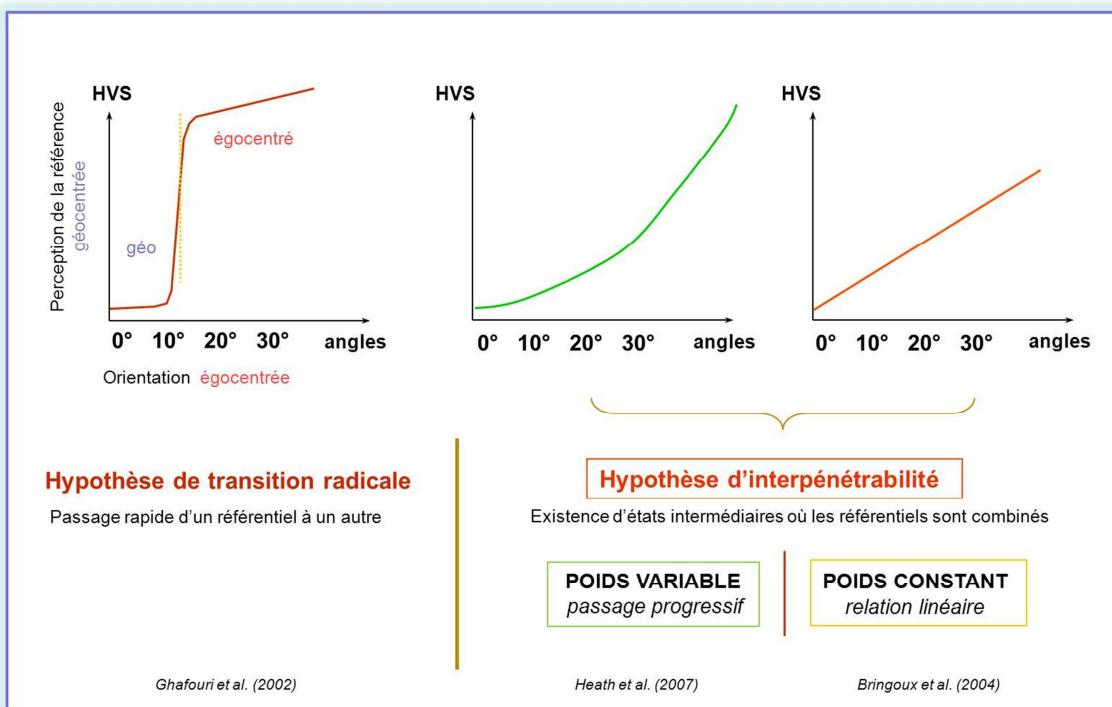


Figure 7.6. Trois hypothèses explicatives autour de l'utilisation des référentiels spatiaux. La première concerne le passage radical d'un référentiel à un autre à l'image d'une transition bipolaire, où les référentiels pourraient constituer des entités représentationnelles indépendantes les unes des autres. La deuxième concerne le passage progressif d'un référentiel à un autre. Dans ce cas, les poids attribués à chaque référentiel évoluent au cours de la tâche. Le troisième concerne une interaction constante entre référentiels spatiaux. Dans les deux derniers cas, les jugements sont réalisés dans un référentiel hybride qui rend compte d'une interpénétrabilité entre référentiels spatiaux (inspiré des travaux de Robic, 2006).

Le deuxième cas concerne l'existence d'un référentiel intermédiaire dans lequel la contribution de chaque source, égo, allo et géocentrale demeure constante (en terme de poids relatif) tout au long de la tâche (Bringoux et al. 2004 ; 2007 ; 2008 ; Kappers, 2003 ; 2004 ; Luyat et al. 2005 ; Neggers et al. 2005). Par exemple Bringoux et al. (2008) montrent que le référentiel égocentré peut influencer la perception de la position des objets par rapport à des références géocentriques, chacun avec des poids relatifs constants, quel que soit l'angle d'inclinaison. De la même manière, Neggers et al. (2005) montrent une interaction linéaire entre les référentiel égocentriques et allocentriques lors d'un test classique de bisection de ligne, où les sujets doivent estimer la position d'une barre verticale soit par rapport au plan sagittal médian (tâche égocentrique), soit par rapport au centre d'une barre horizontale (tâche allocentrique), alors que celle-ci est située dans les deux cas derrière la cible à évaluer. La combinaison pondérée des différents référentiels spatiaux permet par ailleurs d'envisager l'existence d'influences croisées entre ces référentiels (Kappers, 2003, 2004 ; Sterken et al. 1999). Par exemple, si l'orientation d'un référentiel allocentré est capable d'influencer la perception de l'espace égocentré, l'effet

inverse est en théorie aussi attendu. La position égocentrale d'un objet devrait pouvoir influencer les jugements de sa position allocentrale, au même titre que la position allocentrale de l'objet influence son estimation de distance égocentrale. Cette relation bidirectionnelle entre les référentiels spatiaux a notamment été vérifiée par Kappers (2003 ; 2004) sur l'effet de l'oblique, et Sterken et al. (1999) dans un paradigme de saut de cible où la position de l'objet est évaluée d'une part de manière égocentrale par rapport au corps et d'autre part de manière allocentrale par rapport à un environnement visuel placé derrière la cible.

En accord avec cette dernière hypothèse, les analyses de régressions linéaires réalisées dans nos études soulignent toutes le caractère proportionnel (i.e., linéaire) de l'attraction égocentrale sur les jugements spatiaux géocentriques, dans la gamme des inclinaisons manipulées. La pente des droites de régression est non nulle ce qui supporte l'hypothèse d'une combinaison avec poids constant entre les référentiels égocentriques et géocentriques. Nos études suggèrent fortement que les erreurs observées dans l'estimation du franchissement d'obstacles peuvent résulter de l'interpénétrabilité entre référentiels égo et géocentriques. Il semblerait dans ce cas que l'état perçu résulte de l'élaboration d'un nouveau référentiel correspondant à un état intermédiaire ou hybride entre un référentiel géocentrique normalement requis pour réaliser la tâche et un référentiel égocentrique perturbateur. De manière plus générale, nos données suggèrent que ce phénomène peut être généralisé à la combinaison de référentiels égo, allo et géocentriques, lorsque l'espace visuel devient présent et structurant (cf. étude 4).

D'un point de vue neuroanatomique, cette hypothèse d'interaction entre référentiels spatiaux trouve un fondement certain dans de nombreuses études d'IRMf où un recouvrement partiel des zones neurales impliquées dans le codage spatial a fréquemment été observé. (Batista, 2002 ; Committeri et al. 2004 ; Fink et al. 2003 ; Galati et al. 2000 ; Lopez et al. 2005). Particulièrement, le cortex pariétal droit et le cortex pré moteur ventral droit semblent constituer le locus de l'interaction entre des référentiels égocentriques et allocentriques (Committeri et al. 2004 ; Fink et al. 2003 ; Galati et al. 2000). Le cortex insulaire, en tant que région centrale du réseau des aires corticales vestibulaires, et la jonction temporaux pariétale, pourraient constituer le locus de l'interaction entre des référentiels égocentriques, allo et géocentriques (Brandt et Dieterich, 1994 ; Fink et al. 2003, et Lopez et al. 2005, pour une revue de littérature).

Dans ce type d'interaction entre référentiels, l'élaboration des relations spatiales est vue comme dépendante du poids exercé par un référentiel sur un autre. Ce poids respectif de l'influence de chaque référentiel pourrait être directement lié à la nature et la richesse des informations fournies dans l'environnement. Ainsi, dans l'obscurité totale, le poids attribué au référentiel allocentré pourrait être perçu comme négligeable face aux informations gravitaires (géocentrées) et somesthésiques (égocentrées), alors que dans un environnement visuel riche, le référentiel allocentré pourrait devenir prédominant, comme illustré par les illusions vécues dans une chambre inclinable. Néanmoins, il convient de préciser que, si la l'analogie est forte, ce phénomène de repondération entre référentiels spatiaux ne se limite pas à une simple repondération sensorielle des différentes entrées visuelles, auditives ou haptiques fournies par le contexte sensoriel du sujet. En effet, si certaines entrées sensorielles sont naturellement plus aptes à spécifier une information égo, allo ou géocentrale, un recouplement de ces entrées peut également être observé au sein d'un même référentiel spatial. La repondération des différentes référentiels nécessite alors de prendre en compte l'ensemble des caractéristiques (spécifiques et combinées) de ces différentes entrées sensorielles et leur fiabilité au sein de chaque référentiel. La pondération des différents référentiels spatiaux est alors dépendante de la contrainte initiale de la tâche (comme les caractéristiques visuelles et posturales, et le mode de réalisation de la tâche).

Les études 3 et 4 de ce présent manuscrit ont notamment montré que l'ajout d'un flux optique spécifiant visuellement une direction de l'espace géocentré ne suffit pas à augmenter le poids du référentiel géocentré par rapport au référentiel égocentré. Ces observations pourraient faire notamment l'objet d'une étude beaucoup plus vaste concernant les implications multisensorielles dans les aptitudes de localisation spatiale. L'évolution des poids des référentiels au cours du temps constitue également une perspective d'étude intéressante (Bringoux et al. 2009 ; Scotto Di Cesare et al. 2011).

7.4. VERS UN COMPLEMENT DE DEFINITION DE L'AFFORDANCE?

Comme nous l'avons évoqué dans la partie théorique de ce manuscrit, le concept d'affordances a été développé par Gibson dans les années 50 afin de rendre compte des relations fonctionnelles existant entre un individu et son environnement. Ces relations,

directes et univoques, sont décrites en termes de possibilités d'actions suggérées par l'environnement. De nombreuses études menées sur le sujet suggèrent que ces possibilités d'actions, spécifiées visuellement par les caractéristiques inhérentes à l'objet suscitant l'action, peuvent être perçues en référence à des propriétés intrinsèques à l'individu, comme le haut de la tête ou le niveau des yeux (Mark, 1987; van Der Meer, 1997). Particulièrement, si on manipule de manière artificielle la hauteur du sol, ou le niveau des yeux du sujet (par le port de prismes), une diminution du niveau des yeux subjectif est observée, modifiant en retour les possibilités d'action aussi bien pour le franchissement d'obstacles dans une dimension latérale que dans une dimension verticale (Marcilly et Luyat, 2008 ; Warren et Whang, 1987). Dans ce cas, l'affordance spécifiant le franchissement est exprimée sous la forme d'un invariant correspondant au ratio entre la hauteur physique de la porte et une référence intrinsèque corporelle préalablement déterminée (comme le niveau des yeux, la hauteur de la tête, ou encore la largeur des épaules).

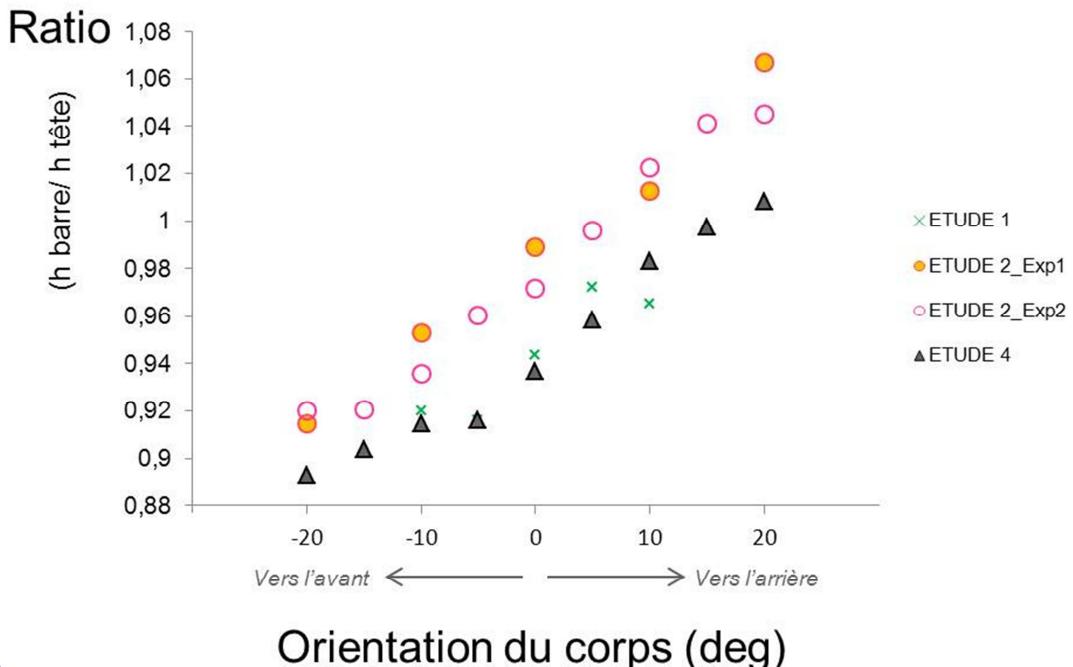
Les études menées sur l'estimation du franchissement d'obstacles hauts montrent que dans des conditions de franchissement dynamique naturel (i.e. en environnement visuellement structuré et en pleine lumière), ce ratio équivaut à $\pi = 1.04$ fois la hauteur du sujet, pour un adulte, quelle que soit sa taille, marchant à vitesse normale (van der Meer, 1997). Ce ratio supérieur à 1, est révélateur d'un comportement globalement précautionneux de la part des sujets, puisqu'ils estiment pouvoir passer sous la barre sans se pencher seulement lorsque celle-ci atteint 1.04 fois la hauteur normalement requise pour son franchissement. Parallèlement, dans des conditions de jugement statique, c'est-à-dire en l'absence de mouvement propre de la part des sujets vers la barre à franchir, Wagman et Malek (2008) montrent que l'affordance du passage sous une barre pour un sujet debout sur le sol est de $\pi = 1.02$ fois la hauteur du sujet. Le mouvement réel du sujet semble alors induire un comportement d'autant plus précautionneux des sujets, avec une augmentation de la marge de sécurité pour le franchissement, sans doute pour compenser la variabilité dans le contrôle des oscillations posturales pendant le mouvement vers la barre (van den Meer, 1997).

Dans nos études, nos résultats, une fois convertis sous forme de ratio (hauteur minimale de franchissement de subjectif / hauteur de la tête), montrent que les sujets assis en condition d'inclinaison nulle estiment pourvoir passer sous la barre sans baisser la tête

pour un ratio $\pi = 0.94$ (EC ± 0.06 ; étude 1), $\pi = 0.98$ (EC ± 0.09 ; étude 2), et $\pi = 0.94$ (EC ± 0.05 ; étude 4). Contrairement aux résultats obtenus en position debout, nos résultats montrent une absence de marge de sécurité dans l'évaluation du franchissement d'obstacles. Ces observations se rapprochent des données obtenus par Wagman et Malek (2008) lorsque des sujets doivent estimer leur possibilité de franchissement d'une barre depuis une position assise sur le sol ($\pi = 0.98$).

De plus, nos résultats montrent une évolution des ratios obtenus au cours de l'orientation du corps entier en tangage (**Figure 7.7.**). Pour l'ensemble des études 1, 2 et 4 les profils des ratios obtenus lors de l'inclinaison du corps entier (condition B) montrent une évolution comparable. Aussi, nos résultats soulignent ici que π n'est pas un invariant perceptif, mais évolue bien en fonction du contexte postural des sujets. Pourtant, la configuration optique des éléments présentés aux sujets, elle, n'est pas modifiée. On note également une variabilité inter-sujets importante dans la détermination des ratios.

Quelques explications peuvent être avancées pour éclairer ces résultats. Tout d'abord, les différences observées pour un même type de tâche pour des sujets assis et debout peuvent s'expliquer par le fait qu'en position assise, les possibilités d'actions définies par le contexte sont différentes que pour un sujet debout. Le type d'implication motrice pour estimer le franchissement de la barre est différent. Aussi, l'absence de marge de sécurité observée (les sujets estiment pouvoir passer sous la barre quand celle-ci se trouve en au niveau de leur front) pourrait être liée au caractère inhabituel du contexte postural dans lequel se trouvent les sujets pour effectuer ce type de tâche. Cette observation, quoiqu'en soit assez contre-intuitive, rappelle les résultats Wagman et Malek (2008) qui soulignent une influence de la posture assise sur la détermination de cette marge de précaution. Le rôle de la pratique (comme un entraînement avec fauteuil roulant ; Stoffregen et al. 2009) peut alors améliorer l'exactitude des jugements en permettant aux sujet de sélectionner le type d'information adéquat. Le rôle de l'expérience et de l'apprentissage ne semble donc pas à négliger dans ce genre de tâche.



Inclinaison du corps entier		-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
ETUDE 1	×	M			0,92	0,92	0,94	0,97	0,97	
		EC			0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	
ETUDE 2_Exp1	●	M	0,91		0,95		0,99		1,01	1,07
		EC	0,09		0,07		0,10		0,10	0,09
ETUDE 2_Exp2	○	M	0,92	0,92	0,94	0,96	0,97	1,00	1,02	1,04
		EC	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09
ETUDE 4	▲	M	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
		EC	0,04	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08

Figure 7.7. Ratio moyen π et leur écart-type obtenus lors de l'orientation du corps entier en tangage dans les études 1, 2 et 4 pour une tâche d'estimation du franchissement d'obstacles hauts. Les résultats montrent une évolution de ce ratio en fonction de l'angle d'orientation du corps.

Néanmoins, il se pourrait également que l'information susceptible de décrire la relation qui lie l'individu à son environnement soit tout simplement rendue inopérante par un contexte visuellement appauvri. L'absence d'informations visuelles stabilisatrices pour le sujet pourrait alors générer une ambiguïté sur les possibilités d'actions, pouvant conduire à la forte variabilité inter-sujets observée. Les individus semblent alors amenés à se focaliser sur les informations restantes, (i.e., la position de leur corps), et à déterminer leurs possibilités d'action sur ce que celle-ci suggère le plus naturellement. Ainsi, une orientation de corps dirigée vers l'avant suggère un franchissement facilité par une direction de déplacement vers le bas. A l'inverse, une orientation de corps dirigée vers l'arrière peut suggérer un franchissement contrarié par une direction de déplacement vers

le haut. Pour résumer, lorsque l'information environnementale est extrêmement réduite ou rendue ambiguë par un contexte visuel diminué, les possibilités d'action semblent être évaluées à partir des informations posturales restantes, sur la base de la situation la plus naturellement suggérée.

Depuis sa définition originelle délivrée par Gibson (1950), le concept d'affordance a maintes fois été remanié. De nombreux auteurs y ont fait part de leur questionnement concernant notamment le rôle de l'inné, de l'expérience, ou encore de l'affect dans la définition des relations qui lient un acteur à son environnement (Chawla et Heft, 2002; Chemero 2003 ; Heft, 2001 ; Jones, 2003 ; Michaels, 2003 ; Stoffregen 2000 ; Turvey, 1992). Aussi, dans une perspective d'ouverture de notre travail de thèse aux préceptes de la perception directe, nous proposons ici une définition plus complète de l'affordance, exprimée non seulement en termes de capacité d'action évoquée par le contexte visuel environnant, mais également en termes de possibilités d'actions naturellement suggérées par le contexte postural de l'individu. Ainsi, si l'affordance sous-entend la complémentarité entre l'animal et l'environnement, il convient alors de préciser que la variable posturale, au même titre qu'une variable optique peut avoir une signification inhérente à un certain type de comportements. Contextes visuel et postural apparaissent alors comme deux éléments complémentaires et indissociables dans la mise en place des relations qui lient un acteur à son environnement.

CONCLUSION

A la lumière de nos résultats, le présent travail de thèse permet de dire que l'orientation du corps, du regard et le contexte postural général de l'individu sont à l'origine d'une influence égocentrale très prononcée sur la perception de l'espace géocentré. Ce phénomène puissant, systématique, et directionnellement signé dans le sens de l'orientation s'observe aussi bien dans des conditions d'obscurité totale que dans un contexte visuellement enrichi par un flux optique. Les résultats, discutés en termes d'interpénétrabilité entre référentiels spatiaux, offrent un éclairage concernant les processus sous-tendant la perception de l'espace environnant.

Aussi, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées à l'aune de ce travail. La première concerne la manipulation active versus passive du contexte postural dans l'élaboration du phénomène d'attraction égocentrale influençant la perception de l'espace géocentré. Initialement, de nombreuses études ont jugé indispensable la manipulation passive de l'orientation du corps dans l'apparition du phénomène égocentré (Aubert, 1861 ; voir Chassouant 1994, pour une revue de littérature). Néanmoins, d'autres études, plus récentes, montrent également l'apparition de ce phénomène suite à la manipulation active de certaines parties du corps (Luyat et al. 2001 ; Bringoux et al. 2004). Dans une étude future, il pourrait être intéressant de questionner plus spécifiquement l'implication du type de mouvement, actif vs passif, sur le phénomène d'attraction égocentrale. Il se pourrait alors, comme observé dans l'étude 2, que le mouvement plus ou moins actif du sujet puisse non pas limiter le poids de l'attraction égocentrale en renseignant sur la position du segment par rapport à la gravité, mais au contraire perturber d'autant plus le jugement géocentré en direction de l'axe corporel incliné (Bringoux et al. 2004). A ce propos, Darling et Miller (1995) et Darling et Hozinski (1999) soulignent que le référentiel structurant la perception de l'orientation du bras est préférentiellement égocentré. Par ailleurs, la question du moment de réalisation du jugement (e.g., pendant ou après le déplacement) pourra également être étudiée.

La deuxième perspective de recherche concerne l'influence de la richesse de l'information visuelle sur le phénomène d'attraction égocentrale classiquement observé

dans des conditions de noir complet. Nos études ont montré que l'ajout d'un flux optique dans la scène visuelle ne suffit à limiter l'apparition de cet effet. Il serait donc intéressant, dans la continuité de ce travail de thèse, de pousser l'enrichissement de la scène visuelle (avec une structuration géométrique et polaire croissante), afin de déterminer à partir de quel degré de richesse, le contexte visuel devient dominant sur le contexte postural et inhibe progressivement l'effet d'attraction égocentrale. Il pourrait également s'agir de questionner la saillance de certains objets ainsi que leur pouvoir sémantique dans la nature des relations spatiales suggérées par l'environnement au sujet. Pour augmenter l'impact du contexte visuel, ces études pourraient être menées en environnement virtuel immersif (**Figure 10.1.**).

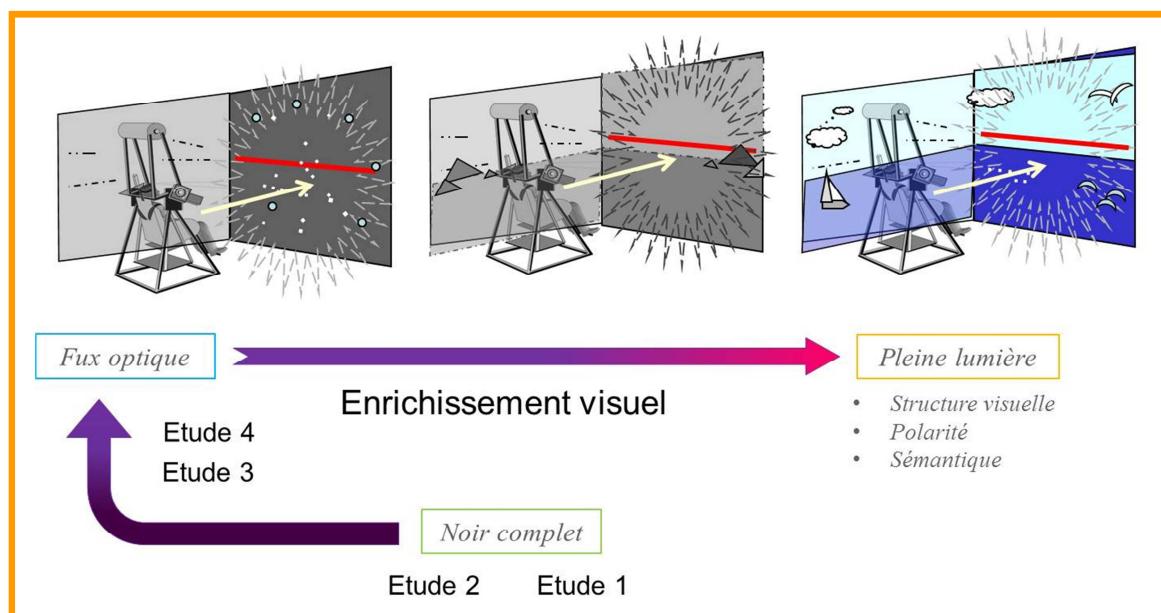


Figure 10.1. Perspective de recherche sur l'enrichissement visuel. Une perspective d'étude pourrait être de répliquer notre tâche de franchissement pour scènes visuelles de texture et de richesse croissantes. La question posée aux sujets reste identique : « *Pensez-vous passer sous la barre dans votre configuration de corps actuelle suivant une direction horizontale de déplacement imaginé ?* ». Une diminution du poids du phénomène égocentré est attendue avec l'enrichissement visuel. Il pourrait être question d'évaluer quel type d'information visuelle est la plus susceptible d'induire une diminution du phénomène égocentré.

Enfin, nos résultats pourraient avoir d'importantes répercussions dans le domaine de l'aéronautique où les pilotes, habituellement inclinés de 30° en arrière, doivent maintenir le cap et l'attitude de leur avion par rapport à des directions de l'espace terrestre (Roumes et Grau, 2003). Une attraction égocentrale comparable à celle observée dans nos études sur des estimations géocentriques peut survenir en rapport au contexte postural particulier des pilotes qui varie d'une position assise à presque couchée selon les modèles de siège. De plus, un phénomène similaire peut également s'observer lorsque les

pilotes ont à éléver leur regard vers le dispositif d'affichage visuel tout en contrôlant l'attitude de leur avion par rapport à la surface terrestre (**Figure 10.2.**). Mars et al. (2004; 2005) montrent que l'orientation de la tête et du corps entier ont une grande importance dans l'évaluation du tangage en avion. Nos études suggèrent qu'au même titre que l'orientation du corps, l'orientation du regard et la configuration assise du pilote devraient être pris en considération dans la conception des dispositifs de navigation (affichage visuels et réglages du siège) pour prévenir les risques de désorientation spatiale fréquemment rencontrées par les pilotes dans des conditions de vol où la visibilité est réduite comme en pleine nuit ou par temps nuageux (Braithwaite et al. 1998; Kirkham et al. 1978).

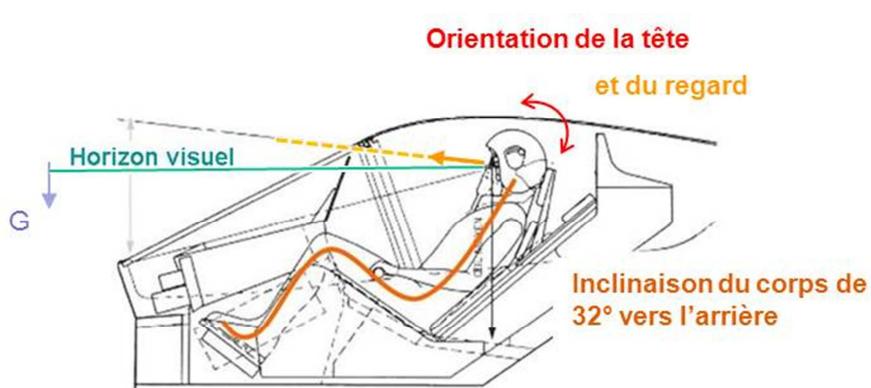


Figure 10.2. Configuration posturale d'un pilote dans le Rafale, avion de combat français. Différents éléments posturaux peuvent être pris en compte dans l'élaboration de solutions ergonomiques pour pallier les phénomènes de désorientation spatiale fréquemment rencontrées par les pilotes dans des conditions de navigation en environnement visuellement appauvri.

En conclusion, de nombreuses recherches sont encore nécessaires pour comprendre de manière plus complète comment l'individu se représente l'espace. Néanmoins, les connaissances actuelles et à venir permettent d'entrevoir des solutions ergonomiques tout à fait prometteuses concernant la sécurité humaine dans le domaine de la perception/ navigation spatiale. Aussi, l'atteinte de cet objectif passe notamment par l'évaluation des relations spatiales dans des conditions expérimentales de plus en plus naturelles et/ou plus riches sensoriellement.

BIBLIOGRAPHIE

-A-

Asch SE, Witkin HA (1948a) Studies in space orientation. I. Perception of the upright with displaced visual fields. *J Exp Psychol* 38:325-337

Asch SE, Witkin HA (1948b) Studies in space orientation. II. Perception of the upright with displaced visual fields and with body tilted. *J Exp Psychol* 38:455-477

Aubert H (1861) Eine scheinbare bedeutende Drehung von Objecten bei Neigung des Kopfes nach rechts oder links. *Virchows Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie* 20:381-393

-B-

Barnett-Cowan M (2009) Multisensory spatial perception: sex and neurological differences. Doctoral dissertation, York University of Toronto

Batista A (2002) Inner space: reference frames. *Curr Biol* 12:380-383

Bauermeister M (1964) Effect of body tilt on apparent verticality, apparent body position, and their relation. *J Exp Psychol* 67:142-147

Bauermeister M (1978) Difference between right versus left lateral body tilt in its effect on the visual and tactile perception of verticality. *Psychol Res* 40:183-187

Benson AJ (1990) Sensor functions and limitations of the vestibular system. In: Warren R, Wertheim AH (Eds.) *Perception and control of self-motion*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates pp 145-170

Bertamini M, Yang TL, Proffitt DR (1998) Relative size perception at a distance is best at eye level. *Percept Psychophys* 60:673-682

Berthoz A (1997) Le sens du mouvement. Paris : Odile Jacob

Bischof N, (1974) Optic-vestibular orientation to the vertical. In Kornhuber HH (ed) *Handbook of Sensory Physiology*. New York: Springer, Vol 6, Chapter 2, pp 155-190

Bischof N, Scheerer E (1970) Systemanalyse der optisch-vestibulären Interaktion bei der Wahrnehmung der vertikalen. *Psychol Forsch* 34:99-181

Braithwaite, MG, Durnford SJ, Crowley JS, Rosado NR, Albano JP (1998) Spatial disorientation in U.S. Army rotary-wing operations. *Aviat Space Environ Med* 69:1031-1037

Brandt T, Dieterich M (1994) Vestibular syndromes in the roll plane: topographic diagnosis from brainstem to cortex. *Ann Neurol* 36: 337-347

Bringoux L, Marin L, Nougier V, Barraud PA, Raphel C (2000) Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *J Vestib Res* 10:1-8

Bringoux L, Bourdin C, Lepecq JC, Sandor PMB, Pergandi JM, Mestre D (2009) Interaction between reference frames during subjective vertical estimates in a tilted immersive virtual environment. *Perception* 38:1053-1071

Bringoux L, Mezey LE, Faldon M, Gresty MA, Bronstein AM (2007) Influence of pitch tilts on the perception of gravity-referenced eye level in labyrinthine defective subjects. *Neuropsychologia* 45:350-356

Bringoux L, Robic G, Gauthier GM, Vercher JL (2008) Judging beforehand the possibility of passing under obstacles without motion: the influence of egocentric and geocentric frames of reference. *Exp Brain Res* 185:673-80

Bringoux L, Tamura K, Faldon M, Gresty MA, Bronstein AM (2004) Influence of whole-body pitch tilt and kinesthetic cues on the perceived gravity-referenced eye level. *Exp Brain Res* 155:385-392

Brotchie PR, Andersen RA, Snyder LH, Goodman SJ (1995) Head position signals used by parietal neurons to encode locations of visual stimuli. *Nature* 385:232-235

Bronstein AM (1999) The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality. The effects of labyrinthine and CNS disease. *Ann N Y Acad Sci* 871:324-333

Brooks JN, Sherrick MF (1994) Induced motion and the visual vertical: effects of frame size. *Percept Mot Skills* 79:1443-50

Butterworth G, Hicks L (1977) Visual proprioception and postural stability in infancy. A developmental study. *Perception* 6:255-62

-C-

Carriot J, Barraud PA, Nougier V, Cian C (2006) Difference in the perception of the horizon during true and simulated tilt in the absence of semicircular canal cues. *Exp Brain Res* 174:158-166

Catz N (1992) Contribution à l'étude de la perception de la verticale: Perception de l'axe corporel en fonction de la dépendance/indépendance à l'égard du champ et de la posture. Mémoire de Master, Université Pierre Mendès-France - Grenoble II

Ceyte H (2006) Perception visuelle de l'espace egocentré : Contribution différenciées des informations sensorielles à la localisation et l'orientation du plan médian corporel. Mémoire de thèse, Université Joseph Fourier – Grenoble I

- Ceyte H, Cian C, Trousselard M, Barraud PA (2009)** Influence of perceived egocentric coordinates on the subjective visual vertical. *Neurosci Lett* 462:85-88
- Chassouant N (1994)** Perturbation des référentiels d'orientation spatiale et effets d'inclinaison corporelle : vers une nouvelle analyse des causes de l'effet Aubert. Mémoire de thèse. Université Pierre Mendès-France - Grenoble II
- Chawla L, Heft H (2002)** Children's competence and the ecology of communities: a functional approach to the evaluation of participation. *J Environ Psychol* 22: 201-216
- Chemero A (2003)** An outline of a theory of affordances. *Ecol Psychol* 5:181-195
- Cian C, Raphel C, Barraud PA (2001)** The role of cognitive factors in the rod-and-frame effect. *Perception* 30:1427-1438
- Clark B, Graybiel A (1963)** Perception of the postural vertical in normals and subjects with labyrinthine defects. *J Exp Psychol* 65:490-494
- Clark B, Graybiel A (1968)** Influence of contact cues on the perception of the oculogravice illusion. *Acta Otolaryngol* 65:373 -380
- Clément G, Moore ST, Raphan T, Cohen B (2001)** Perception of tilt (somatogravice illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight. *Exp Brain Res* 138: 410-418
- Coello Y, Iwanow O (2006)** Effect of structuring the workspace on cognitive and sensorimotor distance estimation: no dissociation between perception and action. *Percept Psychophys* 68:278-89
- Cohen MM (1973)** Elevator illusion: influences of otolith organ activity and neck proprioception. *Percept Psychophys* 14:401-406
- Committeri G, Galati G, Paradis AL, Pizzamiglio L, Berthoz A, LeBihan D (2004)** Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object-, and landmark-centered judgments about object location. *J Cogn Neurosci* 16:1517-1535
- Crowell JA, Bancks MS, Shenoy V, Andersen RA (1998)** Visual self-motion perception during head turns. *Nature Neurosci* 1:732-737
- Cutting JE (1986)** Perception with an eye for motion. Boston: MIT Press
- D-**
- Darling WG, Hozinski JM (1999)** Kinesthetic perceptions of earth- and body-fixed axes. *Exp Brain Res* 126:417-430
- Darling WG, Miller GF (1995)** Perception of arm orientation in 3-dimensional space. *Exp Brain Res* 102:495-502

Day RH, Wade NJ (1969) Mechanisms involved in visuel orientation constancy. *Psychol Bull* 71:33-42

Dichgans J, Brandt T (1978) Visual-vestibular interaction: effects on self-motion perception and postural control. In: Held R, Leibowitz HW, Teuler HL (Eds). *Handbook of sensory Physiology*. New-York: Springer-Verlag, Vol 8, pp 755-804

Dichgans J, Diener HC, Brandt T (1974) Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta otolaryngologica* 78:391-398

Dichgans J, Held R, Young LR, Brandt T (1972) Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science* 178:1217-1219

Diedrichsen J, Werner S, Schmidt T, Trommershäuser J (2004) Immediate spatial distortions of pointing movements induced by visual landmarks. *Percept Psychophys* 66:89-103

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

DiZio P, Li W, Lackner JR, Matin L (1997) Combined influences of gravitoinerital force level and visual field pitch on visually perceived eye level. *J Vest Res* 7:1-12

Dyde RT, Jenkin MR, Harris LR (2006) The subjective visual vertical and the perceptual upright. *Exp Brain Res* 173:612-622

-E-

Ebenholtz SM (1970) Perception of the vertical with body tilt in the median plane. *J Exp Psychol* 83:1-6

Ebenholtz SM (1977) Determinants of the rod and frame effect: the role of retinal size. *Percept Psychophys* 22:531-538

Ernst MO, Banks MS (2002) Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 415:429-433

Ernst MO, Bülthoff HH (2004) Merging the senses into a robust percept. *Trends Cog Sci* 8:162-169

-F-

Fink GR, Marshall JC, Weiss PH, Stephan T, Grefkes C, Shah NJ, Zilles K, Dieterich M (2003) Performing allocentric visuospatial judgments with induced distortion of the egocentric reference frame: an fMRI study with clinical implications. *Neuroimage* 20:1505-1517

Flanders M, Soechting JF (1995) Frames of reference for hand orientation. *J Cogn Neurosci* 7:182-195

-G-

Galati G, Lobel E, Vallard G, Berthoz A, Pizzamiglio L, Le Bihan D (2000) The neural basis of egocentric and allocentric coding of space in human: a functional magnetic resonance study. *Exp Brain Res* 133:156-164

Gardner PL, Mon-Williams M (2001) Vertical gaze angle: absolute height-in-scene information for the programming of prehension. *Exp Brain Res* 136:379-385

Ghafouri M, Archambault PS, Adamovich SV, Feldman AG (2002) Pointing movements may be produced in different frames of reference depending on the task demand. *Brain Res* 929:117-128

Gibson JJ (1979) The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin

Gibson JJ (1950) The perception of the visual world. Boston: Houghton Mifflin

Gibson JJ (1952) The relation between visual and postural determinants of the phenomenal vertical. *Psychol Rev* 59:370-375

Gibson JJ, Gibson E (1955) Perceptual learning: differentiation or enrichment? *Psychol Rev* 62:32-41

Gibson JJ, Mowrer OH (1938) Determinants of the perceived vertical and horizontal. *Psychological Review* 45:300-323

Goldberg JM, Fernandez C (1977) Conduction times and background discharge of vestibular afferents. *Brain Res* 122:545-550

Goodenough, DR, Cox PW, Sigman E, Strawderman WE (1985) A cognitive-style conception of the field-dependence dimension. *Cah Psychol Cognitive* 5:687-705

Graybiel A (1952) Oculogravie illusion. *AMA Arch Ophthalmol* 48:605-615

Green AM, Angelaki DE (2007) Coordinate transformations and sensory integration in the detection of spatial orientation and self-motion: from models to experiments. *Prog Brain Res* 165:155-180

Gu Y, Watkins PV, Angelaki DE, DeAngelis GC (2006) Visual and non-visual contributions to 3D heading selectivity in area MSTd. *J Neurosci* 26:73-85

Guedry FE (1992) Perception of motion and position to the earth. In Chen B, Tomko DL, Guedry FE (Eds). *Sensing and controlling motion. Vestibular and sensorimotor function*. New-York: Academy of Sciences, pp 315-328

Guerraz M, Poquin D, Luyat, M, Ohlmann T (1998) Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. *Percept Mot Skills* 87:643-648

-H-

Harris CS (1974) Beware of the straight –ahead shift- a non perceptual change in experiments on adaptation to displaced vision. *Perception* 3:461-476

Heft H (2001) Ecological psychology in context: James Gibson, Roger Barker, and the legacy of William James's radical empiricism. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Inc

Higashiyama A, Koga K (1998) Apparent body tilt and postural aftereffect. *Percept Psychophys* 60:331-347

Howard IP (1978) Recognition and knowledge of the water-level principle. *Perception* 7:151-160

Howard IP (1982) Human visual orientation. New-York: John Wiley

Howard IP (1986) The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In Boff KR, Kaufman L, Thomas JP (eds) *Handbook of Perception and Human Performance*. NewYork: JohnWiley, Vol 1, Chapter 18, pp 1- 62

Howard IP, Childerson L (1994) The contribution of motion, the visual frame, and visual polarity to sensations of body tilt. *Perception* 23:753-762

Howard IP, Templeton WB (1966) Human Spatial Perception. New-York: Wiley

Huang JK, Young LR (1988) Visual field influence on manual roll and pitch stabilization. *Aviat Space Environ Med* 56:611-619

Hughes PC (1972) The influence of the visual field upon the visual vertical in relation to ocular torsion of the eye. Doctoral dissertation, Oklahoma City

-I-

Ishak S, Adolph KE, Lin GC (2008) Perceiving affordances for fitting through apertures. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 34:1501-1514

Ito Y, Gresty MA (1996) Shift of subjective reference and visual orientation during slow pitch tilt for the seated human subjects. *Brain Res Bul* 40:417-421

Ito Y, Gresty, MA (1997) Subjective postural orientation and visual vertical during slow pitch tilt for the seated human subject. *Aviat Space Environ Med* 68:3-12

-J-

Jenkin HL, Dyde RT, Jenkin MR, Howard IP, Harris LR (2003) Relative role of visual and non-visual cues in determining the direction of 'up': experiments in the York tilted room facility. *J Vest Res* 13:287-293

Jones KS (2003) What is an affordance? *Ecol psychol* 15:107-114

-K-

Kappers AML (2002) Haptic perception of parallelity in the midsagittal plane. *Acta Psychol* 109:25-40

Kappers AML (2003) Large systematic deviations in a bimanual parallelity task: further analysis of contributing factors. *Acta Psychol* 114:131-145

Kappers AML (2004) The contributions of egocentric and allocentric reference frames in haptic spatial tasks. *Acta Psychol* 117:333-340

Kirkham WR, Collins WE, Grape PM, Simpson JM, Wallace TF (1978) Spatial disorientation in general aviation accidents. *Aviat Space Environ Med* 49:1080-1086

Kleint H (1936) Versuche übe die Wahrnehmung. *Zeischrift für psychologie* 138:1-34

Koffka K (1935) Principle of Gestalt psychology. New York: Harcourt Brace

-L-

Lackner JR (1978) Head movement in low and high gravitoinertial force environments elicit motion sickness: implication for space motion sickness. *Aviat Space Environ Med* 58:212-217

Lackner JR, Graybiel A (1980) Visual and postural motion aftereffects following parabolic flight. *Aviat Space Environ Med* 51:230-233

Lechner-Steinleitner S (1978) Interaction of labyrinthine and somatoreceptor inputs as determinants of the subjective vertical. *Psychol Res* 40:65-76

Lee DN, Aronson E (1974) Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception Psychophys* 15:529-532

Lepecq JC, Bringoux L, Pergandi JM, Coyle T, Mestre D (2009) Afforded actions as a behavioral assessment of physical presence in virtual environments. *Virtual Reality* 13:141-151

Lestienne F, Soechting J, Berthoz A (1977) Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Exp Brain Res* 28:363-384

Li W, Matin L (1995) Differences in influence between pitched-from-vertical lines and slanted-from-frontal horizontal lines on egocentric localization. *Percept Psychophys* 57:71-83

Li W, Matin L (1996) Visually perceived eye level is influenced identically by lines from erect and pitched planes. *Perception* 25:831-52

Li W, Li W, Matin L (1998) Change in visually perceived eye level without change in perceived pitch. *Perception*. 27:553-72

Li W, Dallal N, Matin L (2001) Influences of visual pitch and visual yaw on visually perceived eye level (VPEL) and straight ahead (VPSA) for erect and rolled-to-horizontal observers. *Vision Res* 41(22):2873-2894

Lishman, JR, Lee DN (1973) The autonomy of visual kinaesthesia. *Perception* 2:287-294

Loomis JM, Blascovich JJ, Beall AC (1999) Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behav Res Meth Instr Comp* 31:557-564

Lopez C, Lacour M, Borel L (2005) Perception de la verticalité et représentation spatiale dans les aires corticales vestibulaires. In: Lacour M, Weber B (Eds) Bipédie, contrôle postural et représentation corticale. Marseille : Solal pp 35-86

Luyat M, Gentaz E, Regia Corte T, Guerraz M (2001) Reference frames and haptic perception of orientation: body and head tilt effects on the oblique effect. *Percept Psychophys* 63:540-554

Luyat M, Mobarek S, Leconte C, Gentaz E (2005) The plasticity of gravitational reference frame and the subjective vertical: Peripheral visual information affects the oblique effect. *Neurosci Lett* 385:215-219

-M-

MacDougall R (1903) The subjective horizon. *Psychol Rev* 4:145-166

Mann CM, Passey GE (1951) Perception of the vertical: V. Adjustement to the postural vertical as a function of the magnitude of postural tilt and duration of exposure. *J Exp Psychol* 41:108-113

Marcilly R, Luyat M (2008) The role of eye height in judgment of an affordance of passage under a barrier. *Curr Psychol Lett* 24:12-24

Mark LS (1987) Eyeheight-scaled information about affordances: A study of sitting and stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13:361-370

Mars F, Vercher JL, Blouin J (2004) Perception of the vertical with a head-mounted visual frame during head tilt. *Ergonomics* 47:1116-1130

- Mars F, Bringoux L, Cian C, Barraud PA, Raphel C, Vercher JL (2005)** Perception de la verticale avec un cadre visuel solidaire de la tête : implications pour l'utilisation des visiocasques. *Le Travail Humain* 68:125-152
- Mast F, Jarchow T (1996)** Perceived body position and the visual horizontal. *Brain Res Bull* 40:393-398
- Matin L, Fox CR (1989)** Visually perceived eye level and perceived elevation of objects: linearly additive influences from visual field pitch and from gravity. *Vision Res* 29:315-324
- Matin L, Li W (1992)** Visually perceived eye level: changes induced by a pitched from – vertical 2-line visual field. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 18:257-289
- Matin L, Li W (1994)** Mirror symmetry and parallelism: two opposite rules for the identity transform in space perception and their unified treatment by the Great Circle Model. *Spat Vis* 8:469-489
- Matin L, Li W (1995)** Multimodal basis for egocentric spatial localization and orientation. *J Vestib Res* 5:499-518
- Matin L, Li W (1999)** Averaging and summation of influences on visually perceived eye level between two long lines differing in pitch or roll-tilt. *Vision Res* 39:307-329
- McFarland JH, Clarkson F (1966)** Perception of orientation: Adaptation to lateral body-tilt. *Am J Psychol* 79:265-271
- Michaels CF (2003)** Affordances: Four points of debate. *Ecol Psychol* 15:135-148
- Miller EF, Graybiel A (1966)** Magnitude of gravitoinertial force, an independent variable in egocentric visual localization of the horizontal. *J Exp Psychol* 71:452-60
- Miller EF, Fregly AR, Graybiel A (1968)** Visual horizontal-perception in relation to otholith-function. *Am J Psychol* 81:448-496
- Mittelstaedt H (1983)** A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften* 70:272-281
- Mittelstaedt H (1986)** The subjective vertical as a function of visual and extraretinal cues. *Acta Psychol* 63:63-85
- Mittelstaedt H (1988)** The information processing structure of the subjective vertical. A cybernetic bridge between its psychophysics and its neurobiology. In: Marko H, Hauske G, Stuppner A (eds) *Processing structures for perception and action*. Weinheim: VCH
- Mittelstaedt H (1996)** Somatic graviception. *Biol Psychol* 42:53-74

Mulder ME (1888) Ons oordeal over vertical, bij neiging van het hoofd nar rechts of links. Archiv für Anatomie und Physiologie 2:340-352

Müller G (1916) Über das Aubertsche Phänomen. Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane 49:109-246

-N-

Neggers SFW, Schölvinck ML, van der Lubbe RHJ, Postma A (2005) Quantifying the interactions between allo- and egocentric representations of space. Acta Psychol 118:25-45

-O-

O’Shea RP, Ross H (2007) Judgments of visually perceived eye level (VPEL) in outdoor scenes: Effects of slope and height. Perception 36:1168-1178

Ohlmann T (1988) La perception de la verticale. Variabilité interindividuelle dans la dépendance à l’égard des référentiels spatiaux. Mémoire de thèse, Université Paris VIII

Oltman PK (1968) A portable Rod-and-Frame Apparatus. Percept Motor Skills 26:503-506

Ooi TL, Wu B, He ZJ (2001) Distance determined by the angular declination below the horizon. Nature 414:197-200

-P-

Paillard A (2010) Perception de l’horizon visuel en milieu d’hyperpesanteur: Rôle des systèmes oculomoteur, otolithique et somesthésique. Mémoire de thèse, Université Joseph Fourier - Grenoble I

Paillard J (1982) Le corps et ses langages d'espace. In: Juddi E (ed) Le corps en psychiatrie. Paris : Masson, pp 53-69

Paillard J (1991) Motor and representational framing of space. In: Paillard J (ed) Brain and Space. Oxford: Oxford University Press, Chapter 10 pp 163-182

Parker DE, Poston RL, Gullede WI (1983) Spatial orientation : visual-vestibular-somatic interaction. Percept Psychophys 33:139-146

Philbeck JW, Loomis JM (1997) Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. J Exp Psychol: Hum Percept Perf 23:72-85

Piaget J, Inhelder B (1956) The child's conception of space. London: Routledge.

Poquin D, Guerraz M, Ohlmann T, Marendaz C, Brenet F, Raphel C (1995) Visual disturbance and the Aubert effect. *Curr Psychol Cogn* 14:231-253

Poljac E, van den Berg AV (2005) Localization of the plane of regard in space. *Exp Brain Res* 163:457-467

Post RB, Welch RB (1996) The role of retinal versus perceived size in the effects of pitched displays on visually perceived eye level. *Perception* 25:853-859

Post RB, Welch RB, Clark VD (2000) Why do pitched horizontal lines have such a small effect on visually perceived eye level? *Percept Psychophys* 62:726-734

Pouget A, Sejnowski TJ (1995) Spatial representations in the parietal cortex may use basis function. *Adv Neural Inf Process Syst* 7:157-164

Pozzo T, Papaxanthis C, Stapley P, Berthoz A (1998) The sensorimotor and cognitive integration of gravity. *Brain Res Rev* 28: 92-101

-R-

Raphel C, Barraud PA (1994) Perceptual thresholds of radial accelerations as indicated by visually perceived eye level. *Aviat Space* 65:204-208

Raphel C, Barraud PA, Koessler C, Cian C (1996) Effects of a visual frame and of low accelerations on the visually perceived eye level. *Percept Psychophys* 58:906-914

Rebelsky F (1964) Adult perception of the horizontal. *Percept Mot Skills* 19:371-374

Robic G (2006) Perception de la hauteur et du franchissement d'obstacle hauts : Rôles des référentiels égocentriques et géocentriques. Mémoire de Master, Université de la Méditerranée

Roumes C, Grau JY (2003) Rafale: a human factors view of the man machine interface. *Médecine aéronautique et spatiale* 45:23-26

Roussieux C, Crémieux J (2005) Perception de l'orientation visuelle chez des experts en taekwondo. *STAPS* 65:79-96

-S-

Sandström CI (1954) A note on the Aubert phenomenon. *J Exp Psychol* 48:209-210

Schöne H, Udo de Haes H (1968) perception of gravity-vertical as a function of head and trunk position. *Zeitschrift für Vergleichende physiologie* 60:440-444

Schöne H (1964) On the role of gravity in human spatial orientation. *Aerospace Med* 35:764-772

Schöne H (1984) Spatial orientation: the spatial control of behavior in animals and man. Princeton: Princeton University Press

Scotto Di Cesare C, Bringoux L, Bourdin C, Sarlegna F, Mestre D (2011) Spatial localization investigated by continuous pointing during visual and gravitoinertial changes. *Acta Psychol (Soumis)*

Sedgwick HA (1973) The visible horizon: A potential source of visual information for the perception of size and distance. Doctoral dissertation, Cornell University

Sedgwick A (1983) Environment-centered representation of spatial layout: Available visual information from texture and perspective. In: Beck J, Hope B, Rosenfeld A (eds) *Human and machine vision*. Academic Press, New York, pp 425-458

Sedgwick HA (1986) Space perception. In: Boff KR, Kaufman L, Thomas JP (eds) *Handbook of perception and human performance*. New York: Wiley, Vol 1, Chapter 21, pp 1-57

Sharp WL (1934) An experimental study concerning visual localization in the horizontal plane. *J Exp Psychol* 17:787-797

Shebilske WL, Fogelgren LA (1977) Eye-position aftereffects of backwards head tilt manifested by illusory visual direction. *Percept Psychophys* 21:77-82

Smedslund J (1963) The concept of correlation in adults. *Scandinavian Journal of Psychology* 4:165-173

Smetanin BN, Popov KE (1997) Effect of body orientation with respect to gravity on directional accuracy of human pointing movements. *Eur J Neurosci* 9:7-11

Snyder LH, Batista AP, Andersen RA (1997) Coding of intention in the posterior parietal cortex. *Nature* 386:167-170

Snyder LH, Grieve KL, Brotchie P, Andersen RA (1998) Separate body- and world-referenced representations of visual space in parietal cortex. *Nature* 394:887-891

Soechting JF, Flanders M (1992) Moving in three-dimensional space: frames of reference, vectors and coordinate systems. *Annu Rev Neurosci* 15:197-191

Soechting JF, Flanders M (1995) Psychophysical approaches to motor control. *Curr Opin Neurobiol* 5:742-8

Soechting JF, Tillery SIH, Flanders M (1990) Transformation from head- to shoulder centered representation of target direction in arm movements. *J Cogn Neurosci* 2:32-43

Spinelli D, Antonucci G, Goodenough DR, Pizzamiglio L, Zoccolotti P (1991) Psychological mechanisms underlying the rod and frame illusion. In: Wapner S, Demick J (eds) *Field dependence-independence cognitive style accros the life span*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, pp 37-60

Steffanucci JK, Geuss NM (2010) Duck! Scaling the height of a horizontal barrier to body height. *Atten Percept Psychophys* 72:1338-1349

Sterken Y, Postma A, de Haan EHF, Dingemans A (1999) Egocentric and exocentric spatial judgements of visual displacement. *Quar J Exp Psychol* 52:1047-1055

Stoffregen TA (2000) Affordances and events. *Ecol Psychol* 12:1-28

Stoffregen TA, Yang CM, Giveans MR, Flanagan M, Bardy BG (2009) Movement in the perception of an affordance for wheelchair locomotion. *Ecol Psychol* 21:1-36

Stopper AE, Cohen MM (1986) Judgements of eye level in light and in darkness. *Percept Psychophys* 40:311-306

Stopper AE, Cohen MM (1989) Effect of structured visual environments on apparent eye level. *Percept Psychophys* 46:469-475

-T-

Templeton WB (1973) The role of gravitational cues in the judgment of visual orientation. *Percept Psychophys* 14:451-457

Thilo KV, Gresty MA (2002) Visual motion stimulation, but not visually induced perception of self-motion, biases the perceived direction of verticality. *Cogn Brain Res* 14:258-263

Thomas H, Jamison W, Hummel DD (1973) Observation Is Insufficient for Discovering that the Surface of Still Water Is Invarantly Horizontal. *Science* 181:173-174

Tribukait A, Einken O (2005) Perception of the head transversal plane and subjective horizontal during gondola centrifugation. *Percept Psychophys* 67:369-382

Trincker D (1962) The transformation of mechanical stimulus into nervous excitation by the labyrinthine receptors. *Symp Soc Exp Biol* 16:289

Trousselard M, Barraud PA, Nougier V, Raphel C, Cian C (2004) Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Cogn Brain Res* 20:355-362

Turvey MT (1992) Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecol Psychol* 4:173-187

-U-

Udo De Haes HA (1970) Stability of apparent vertical and ocular countertorsion as function of lateral tilt. *Percept Psychophys* 8:137-142

-V-

van Beuzekom AD, van Gisbergen JAM (2000) Properties of the internal representation of gravity inferred from spatial-direction and body-tilt estimates. *J Neurophysiol* 84:11-27

van den Berg AV (1996) Judgements of heading. *Vision Res* 36:2337-2350

van der Meer ALH (1997) Visual guidance of passing under a barrier. *Early Dev Parent* 6:149-157

-W-

Wade NJ (1968) Visual orientation during and after lateral head, body, and trunk tilt. *Percept Psychophys* 3:215-219

Wade NJ (1969) Visual orientation as a function of head tilt. *Percept. Motor Skills* 29:573-574

Wade NJ (1970) Effect of prolonged tilt on visual orientation. *Q J Exp Psychol* 22:423-439

Wade NJ (1972) Effect of forward head inclination on visual orientation during lateral body tilt. *J Exp Psychophys* 3:215-219

Wade NJ (1992) The representation of orientation in vision. *Aust J Psychol* 44:139-163

Wade NJ, Schone H (1971) The influence of force magnitude on the perception of body position. I. Effects of head posture. *Br J Psychol* 62:157-163

Wagman J B, Taylor KR (2005) Perceiving affordances for aperture crossing for the person-plus-object system. *Ecol Psychol* 17:105-130

Wagman JB, Malek EA (2008) Perception of whether an object affords walking under from different points of observation. *Ecol Psychol* 20:65-83

Wagman JB, Malek EA (2009) Geometric, kinetic-kinematic, and intentional constraints influence willingness to pass under a barrier. *Exp Psychol* 56:409-417

Wallach H, O'Leary A (1982) Slope of regard as a distance cue. *Percept psychophys* 31:145-148

Warren WH Jr (1984) Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 10:683-703

Warren WH Jr, Whang S (1987) Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13:671-383

- Warren WH Jr, Morris MW, Kalish M (1988)** Perception of translational heading from optical flow. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 14:646-660
- Warren DH (1980)** Response factors in intermodality localization under conflict condition. *Percept Psychophys* 27:25-32
- Warren DH (1995)** Self-motion: visual perception and visual control. In: Epstein W, Rogers S (eds) *Perception Space and motion*. San Diego: Academic Press, pp 263-325
- Welch RB, Cohen MM, Deroshia CW (1996)** Reduction of the elevator illusion from continued hypergravity exposure and visual error-corrective feedback. *Percept Psychophys* 58:22-30
- Welch RB, Post RB (1996)** Accuracy and adaptation of reaching and pointing in pitched visual environment. *Percept Psychophys* 58:383-389
- Wenderoth PM (1977)** An analysis of the rod-and-frame illusion and its variants. In : Day RH, Stanley GS (eds) *Studies in Perception*. Perth: University of Western Australia, pp 95 -141
- Wenderoth PM, Beth H (1977)** Component analysis of orientation illusions. *Perception* 6:57-75
- Wertheimer M (1912)** Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie* 61:161-265
- Wetzig J, von Baumgarten RJ (1990)** Influence of neck receptor stimulation on eye rotation and on the subjective vertical: experiments on the tilt table, under water, and in weightlessness. In: Berthoz WG, Vidal PP (eds) *The head-neck sensorimotor system*. Chichester: Wiley, pp 198-200
- Wexler M (2003)** Voluntary head movement and allocentric perception of space. *Psychol Sci* 14:340-346
- 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
- Wood RW (1895)** The 'Haunted Swing' illusion. *Psychological Review* 2:277-278
- Wraga M (1999)** Using eye height in different postures to scale the heights of objects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 25:518-530
- Wu J, He ZJ, Ooi TL (2005)** Visually perceived eye level and horizontal midline of the body trunk influenced by optic flow. *Perception* 34:1045-1060

-Y-

Young LR (1984) Perception of the body in space: mechanisms. In : Smith I (ed) The nervous system. Handbook of Physiology. New York: Academic Press, pp 1023-1066

Young LR, Shelhamer M (1990) Microgravity enhances the relative contribution of visually-induced motion sensation. *Aviat Space Environ Med* 61:525-30

Young LR, Jackson DK, Groleau N, Modestino S (1992) Multisensory integration in microgravity. *Ann N Y Acad Sci* 656:340-353.

-Z-

Zoccolotti P, Antonucci G, Goodenough DR, Pizzamiglio L, Spinelli D (1992) The role of frame size on vertical and horizontal observers in the rod-and-frame illusion. *Acta Psychol* 9:171-187

ANNEXES

Exp Brain Res (2009) 193:19–28
DOI 10.1007/s00221-008-1589-0

RESEARCH ARTICLE

Influence of gaze elevation on estimating the possibility of passing under high obstacles during body tilt

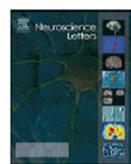
Aurore Bourrelly · Lionel Bringoux ·
Jean-Louis Vercher

Neuroscience Letters 482 (2010) 193–197



Contents lists available at ScienceDirect

Neuroscience Letters
journal homepage: www.elsevier.com/locate/neulet



Pitch body orientation influences the perception of self-motion direction induced by optic flow

A. Bourrelly*, J.-L. Vercher, L. Bringoux

UMR CNRS 6233, 'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey', CNRS & Aix-Marseille Université, 163, avenue de Luminy, CP 910, 13288 Marseille, France

RÉSUMÉ

INFLUENCES EGOCENTREES SUR LA PERCEPTION DE L'ESPACE GEOCENTRE -OBJECTIVATION AU TRAVERS DE L'ESTIMATION DU FRANCHISSEMENT D'OBSTACLES HAUTS

Percevoir son espace d'évolution est une activité déterminante dans l'élaboration des relations spatiales que nous tissons avec notre environnement. En neurosciences comportementales, l'étude de ces relations a généralement été abordée selon deux perspectives théoriques. L'une d'elles s'attache à décrire les relations au monde au travers des processus de perception directe impliquant notamment la notion d'affordances (i.e. de possibilités d'actions naturellement offertes par l'environnement) ; tandis que d'autres s'intéressent d'avantage aux aspects cognitifs de la perception avec la mise en place de processus de représentation spatiale. Cette dernière reflète notamment l'existence d'état(s) représenté(s) qu'il est possible de décrire à travers de la combinaison d'espaces stables appelés référentiels spatiaux. L'objectif de ce travail de thèse vise à mieux comprendre la contribution du référentiel égocentré (i.e. corporel) dans la perception de l'espace géocentré (i.e. gravitaire). La question a notamment été abordée autour de deux axes de recherche interrogeant d'une part (i) l'origine de l'influence égocentrale préalablement observée dans le noir sur la perception géocentrale, et d'autre part (ii) la présence du phénomène égocentré dans un contexte visuel plus enrichi suite à l'ajout d'un flux optique. Pour ce faire quatre études centrées autour d'un paradigme d'estimation des possibilités de franchissement d'obstacles hauts ont été réalisées. Pris dans leur ensemble, les résultats expérimentaux soulignent le caractère particulièrement puissant et complexe du phénomène égocentré corporel observé sur la perception de l'espace gravitaire. Ces résultats, discutés en termes d'interpénétrabilité entre référentiels spatiaux offrent un support d'étude intéressant sur la manière dont les référentiels sont utilisés dans les processus de représentation spatiale.

Mots clefs : Perception spatiale – Orientation posturale – Direction de déplacement induit – Flux optique – Référentiels égocentré, géocentré et allocentré – Intégration multisensorielle

ABSTRACT

EGOCENTRIC INFLUENCE ON GEOCENTRIC SPATIAL PERCEPTION - ESTIMATING THE POSSIBILITY OF PASSING UNDER HIGH OBSTACLES

Perceiving space is a relevant task in determining our relationships with the environment. In behavioral neuroscience, investigating this spatial relationship can classically be explored with two theoretical approaches. The first one uses direct perception to describe the spatial relationships, involving affordances (i.e. the action ability naturally offered by the environment). The other one investigates the cognitive aspect of perception implying the use of spatial representation process. The later one traduces the existence of represented states which can be described through the interaction of different stable states called spatial reference frames. The present work investigates the contribution of the egocentric reference frame (body-related) on the perception of the geocentric space (earth-based). This was questioned through two research lines, (i) the origin of egocentric influence previously observed in darkness upon geocentric perception, (ii) the existence of the egocentric phenomenon in an enriched visual scene. To answer these questions, four experiments were conducted where the paradigm of passing under high obstacles was used. Overall, these results stress the powerful and complex aspect of the egocentric phenomenon observed upon geocentric perception. This work, discussed in term of interpenetrability between reference frames, provide an interesting support on the way how spatial reference frames are used in perceiving space.

Keywords: Spatial perception – Postural orientation – visually induced self-motion – Optic flow – Egocentric, geocentric, allocentric reference frame – Multisensorial integration