

Intégration multisensorielle et variabilité interindividuelle

Marc Gueguen

▶ **To cite this version:**

Marc Gueguen. Intégration multisensorielle et variabilité interindividuelle. Psychologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2011. Français. NNT : 2011PA113009 . tel-00659199

HAL Id: tel-00659199
https://theses.hal.science/tel-00659199

Submitted on 12 Jan 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° D'ORDRE :

Université Paris-Sud 11

Ecole Doctorale 456

Laboratoire Complexité, Innovation et Activités Motrices et Sportives

Equipe Contrôle Moteur et Perception

THESE

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR EN

« Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain »

Présentée par

Marc GUEGUEN

INTEGRATION MULTISENSORIELLE ET VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE

Sous la direction de Brice ISABLEU

Soutenue publiquement le 8 décembre 2011 devant la commission d'examen composée de :

M.A. Amorim	Pr., Université Paris Sud 11	Examinateur
C. Assaiante	Dr., CNRS, Université de Provence	Rapporteur
I. Bonan	PU-PH, CHU Rennes	Rapporteur
B. Isableu	MCF HDR, Université Paris Sud 11	Directeur
T. Ohlmann	Pr., Université P. Mendès France, Grenoble 2	Examinateur

Remerciements

Je remercie M. Brice ISABLEU d'avoir accepté de diriger mon travail de thèse. Merci pour cette disponibilité et ces nombreux échanges qui ont permis de faire progresser ma réflexion.

Je remercie le laboratoire CIAMS de m'avoir accueilli pendant cette thèse, et plus particulièrement la directrice Mme Christine LE SCANFF de m'avoir offert la possibilité de faire cette thèse dans les meilleures conditions.

Je suis extrêmement reconnaissant aux membres du jury d'avoir pris le temps d'expertiser ce travail, en particulier Mesdames Christine ASSAIANTE et Isabelle BONAN d'avoir accepté d'être rapporteurs, et Messieurs Théophile OHLMANN et Michel-Ange AMORIM.

Je remercie l'ensemble des sujets qui ont donné de leur temps et accepté de passer les différentes expériences.

Je remercie l'ensemble des doctorants du laboratoire CIAMS pour la bonne humeur quotidienne.

Je remercie toute ma famille et mes amis pour leur soutien permanent, leur confiance et leur patience.

Je remercie Eliott et Emilie…

Introduction générale 1

Cadre théorique 7

I. Théorie sur l'orientation spatiale 7

A. Référentiel visuel 10

B. Référentiel gravitaire 13

C. Référentiel égocentré 20

D. Interrelations entre les référentiels 24

E. Processus vicariants 25

II. Théorie sur l'intégration multisensorielle 29

A. La repondération sensorielle 31

B. Le maximum de probabilité (MLE) 33

III. Bases neurales de l'intégration multisensorielle 40

IV. Hypothèses et prédictions 49

Partie expérimentale 55

I. Expérience 1 : Fiabilité du RFT 55

A. Méthodes et matériels 56

1. Echantillon de population 56

2. Méthodologie 56

3. Analyses statistiques 58

B. Résultats 59

C. Discussion 62

II. Expérience 2 : RFT 2D vs 3D 64

A. Méthodes et matériels 66

1. Echantillon de population 66
2. Méthodologie 66
3. Analyses statistiques 68
B. Résultats 69
C. Discussion 73
III. Expérience 3 : Zone d'incertitude 75
A. Méthodes et matériels 77
1. Echantillon de population 77
2. Méthodologie 78
a) Quantification de l'incertitude perçue 78
b) Quantification de l'incertitude intraessai 79
c) Quantification de l'incertitude interessai 80
3. Analyses statistiques 80
B. Résultats 81
C. Discussion 87
IV. Expérience 4 : Règles d'intégration des signaux et pondération des référentiels 91
A. Méthodes et matériels 96
1. Echantillon de population 96
2. Méthodologie 97
3. Analyses statistiques 101
B. Résultats 105
C. Discussion 120
V. Expérience 5 : Rôle des dynamiques d'équilibration posturale dans la perception de l'orientation du corps 131

A. Méthodes et matériels 137

1. Echantillon de population 137

2. Méthodologie 137

3. Analyses statistiques 142

B. Résultats 143

C. Discussion 147

VI. Expérience 6 : Relation entre l'utilisation de règles d'intégration multisensorielle et profil perceptif (DC vs IC) 156

A. Méthodes et matériels 160

1. Echantillon de population 160

2. Méthodologie 160

3. Analyses statistiques 164

B. Résultats 168

1. Sur l'ensemble des sujets (sans distinguer les sujets DC et IC) 168

2. Comparaison entre les sujets DC et IC 186

C. Discussion 216

Discussion générale 223

Conclusion 239

Bibliographie 241

Introduction générale

Tout être vivant extrait de ses informations sensorielles des invariants directionnels lui permettant de percevoir sa propre situation spatiale ainsi que celle des objets qui l'entourent. Dans les situations habituelles, les traitements relatifs à l'orientation spatiale s'effectuent à partir de référentiels relativement redondants. Cette redondance autorise à la fois la mise en place d'une sensibilité individuelle préférentielle à l'égard d'un de ces référentiels ainsi qu'une large flexibilité dans le choix du référentiel. Sous les contraintes situationnelles, le choix du système sensoriel nécessaire pour réaliser une tâche spatiale se trouve réduit et conduit l'ensemble des individus, n'ayant plus le choix du référentiel à exploiter, à basculer ainsi vers un processus similaire.

La perception de l'orientation spatiale résultent de l'intégration d'informations sensorielles provenant de plusieurs sources : visuelle, gravitaire et proprioceptive. Grâce à la spécificité de leurs capteurs, ces modalités sensorielles permettent de construire la connaissance des positions et des déplacements du corps dans l'espace, la configuration spatiale des différents segments corporels et la position des objets de l'espace extra-personnel. Sans cesse réactualisée, cette connaissance permet au cerveau de programmer et de corriger l'action (Lopez, Lacour, & Borel, 2005). Cette redondance d'informations en situations clémentes pose la question de leur contribution respective à la perception de l'orientation.

Cette recherche s'inscrit dans le domaine général de l'orientation spatiale et a pour but d'identifier la source d'informations sensorielles (visuel, gravitaire et proprioceptif) utilisée de façon préférentielle par les individus pour organiser leur cognition spatiale. Il est en effet apparu de fortes différences interindividuelles lors de l'exécution de tâches de perception de l'orientation spatiale. Différentes explications ont été données pour tenter d'expliquer ces différences, notamment la capacité des sujets dits "indépendants à l'égard du champ" (IC) à avoir recours à des invariants internes (ex : leur schéma corporel, la gravité,…) pendant que les sujets dits "dépendants à l'égard du champ" (DC) s'appuieraient davantage sur des références externe (ex : le flux visuel,…). L'hypothèse d'Ohlmann (Ohlmann, 1985) est que, « en présence d'un message sensoriel de nature quelconque, les sujets les plus indépendants privilégieraient la composante proprioceptive alors que les plus dépendants seraient réceptifs à la composante extéroceptive. On ne décrit plus la dépendance/indépendance à l'égard du champ (DIC) en terme de canal sensoriel (par ex. vision/proprioception) mais à partir de ce qui privilégié dans un canal quelconque ». La proprioception intervenant dans toutes les modalités sensorielles, il suppose que les dépendants seront sensibles aux caractéristiques spécifiques du message sensoriel tandis que les indépendants le seront aux aspects proprioceptifs du message ; il parle, concernant ces derniers, « d'une supramodalité ou amodalité des messages sensoriels leur assurant ainsi un caractère universel ». Une deuxième hypothèse concerne la plus grande hétérogénéité des DC et semble confirmer par l'étude des résultats de plusieurs expériences (7 sur 8 confirment cette hypothèse). Selon Darlot (Darlot, 1993) , les multiples systèmes sensoriels contribuant à la construction de la perception de l'espace ne pourraient être combinés qu'uniquement dans un même référentiel. L'objectif est de voir (i) si la manipulation des

cadres de références modifie leur pondération habituellement exercée par les individus et (ii) si cette nouvelle pondération est liée au profil sensoriel des sujets.

La partie théorique sera composée de trois parties. La première partie se centrera sur les trois sources d'informations disponibles lors de la perception d'orientation spatiale à savoir l'information visuelle, vestibulaire et proprioceptive. L'objectif sera de les définir et de détailler les différentes méthodes utilisées pour révéler la sensibilité des individus à l'un de ces trois référentiels. La deuxième partie portera sur les différents modèles d'intégration multisensorielle et visera à définir et à décrire les principales règles explorées dans la littérature. Enfin, le dernier chapitre de notre cadre théorique portera sur les bases neurales de l'intégration multisensorielle. Le système nerveux central (SNC) étant le siège de la construction de notre perception multisensorielle, l'une des hypothèses expliquant la variabilité individuelle pourrait se situer dans l'activité neurale et notamment dans une sollicitation hémisphérique différente d'un individu à l'autre.

Notre partie expérimentale décrira les différents résultats obtenus lors de nos expérimentations. Au cours d'expériences préliminaires (expériences 1 et 2), nous chercherons à développer le cadre méthodologique afin de nous mettre, pour les expériences suivantes, dans les conditions maximisant les effets de désorientation.

Lors des expériences suivantes (expériences 3, 4, 5 et 6), nous étudierons l'effet de la désorientation ou au contraire de la fiabilisation d'un ou plusieurs cadres de référence sur la perception d'orientation spatiale. Dans l'expérience 3, nous étudierons les conséquences de la manipulation d'un cadre de référence sur la perception

d'orientations spatiales, et notamment sur le niveau de certitude qui en découle. Nous mettrons ensuite en relation cette certitude perçue avec le degré de dépendance au champ des individus, l'hypothèse étant que plus un individu est dépendant à un cadre de référence plus son niveau de certitude sera important. Dans les expériences 4 et 5, nous essayerons ensuite de voir quelles peuvent être les stratégies utilisées par les individus pour combiner l'ensemble des informations sensorielles dont ils disposent. Enfin, dans l'expérience 6, nous tenterons de mettre en relation ces stratégies d'intégration multisensorielle avec le profil perceptif (DC/IC) des individus. Pour cela, nous manipulerons le cadre de référence visuel (via la présence ou non d'un environnement visuel non-aligné avec l'orientation gravitaire) et/ou le cadre de référence proprioceptif (via la déviation du centre de masse d'un segment corporel ou via la recherche d'un équilibre postural ou via la restitution d'information musculaire lors de la mise en charge de l'individu).

Dans une dernière partie, nous proposerons une discussion générale de l'ensemble de nos résultats et ouvrirons un champ d'investigations sur les interrelations existant entre la dépendance/indépendance au champ et les modes d'intégration multisensorielle.

Cadre théorique

I. Théorie sur l'orientation spatiale

Selon l'approche écologique développée par Gibson (Gibson, 1979), l'individu perçoit l'information directement sans traitement cognitif. Le rôle des systèmes perceptifs est d'extraire les informations présentes dans l'environnement mais sans les stocker en mémoire. Selon Gibson, la perception de l'environnement se ferait au travers d'*invariants* et d'*affordances*. Un *invariant* peut se définir comme un paramètre de l'environnement qui demeure constant en dépit des mouvements de l'observateur. Par exemple, lors du déplacement d'un individu vers une cible, l'ensemble des lignes de fuite générées par le flux optique ont la même direction durant l'ensemble du mouvement. Les *affordances* peuvent se définir comme l'ensemble des possibilités d'interaction offertes par l'environnement à un individu. Par exemple, face à un mur de 5m de haut, l'individu sait directement qu'il ne peut pas sauter par-dessus sans avoir besoin d'effectuer un traitement cognitif.

Cette théorie s'oppose au cognitivisme pour lequel la simple petite perception nécessite un travail de stockage et d'interprétation. L'information se dirige premièrement dans la mémoire sensorielle, qui se dirige ensuite dans la mémoire à court terme pour ensuite être traduite et classée dans la mémoire à long terme. La mémoire guide notre perception. Il y a deux traitements de l'information : le mode ascendant (d'une

information donnée, nous tirons des conclusions grâce à notre mémoire à long terme) et le mode descendant (grâce aux expériences perceptives antérieures que nous avons emmagasinés dans notre tête, nous sommes capables de prédire et d'anticiper des situations).

Dans la problématique de l'orientation spatiale, l'approche écologique ne permet pas d'expliquer les différences interindividuelles observées lors de tâches perceptives. Si l'information est extraite directement de l'environnement, comment se fait-il que certains individus perçoivent mieux (plus justement) certaines directions de l'environnement que d'autres ? En effet, l'information présente dans l'environnement est la même pour tous ; c'est donc bien dans le traitement de cette information que vont émerger les différences interindividuelles observées.

En considérant une approche plus cognitiviste de la perception de l'orientation spatiale, plusieurs hypothèses peuvent ainsi être avancées pour expliquer les différences interindividuelles.

Hypothèse 1 : La perception et le contrôle de l'orientation reposent sur la sélection et la spécification des référentiels spatiaux d'orientation. La variabilité interindividuelle résulte de choix de référentiels différents. La variabilité intra-individuelle résulte des changements de cadre de références et illustre les capacités adaptatives de l'individu.

Hypothèse 2 : La perception et le contrôle de l'orientation résultent d'opération de traitement de l'information visant à réduire l'incertitude spatiale. La variabilité interindividuelle résulte de l'utilisation de règles de combinaison des signaux sensoriels

différent d'un sujet à l'autre et plus ou moins efficace pour réduire les différentes sources d'incertitude (règles qui s'éloignent de la règle optimale de réduction de l'incertitude). La variabilité intra-individuelle résulte des changements de règles de combinaison des signaux sensoriels afin de garantir l'adaptation de l'individu à l'évolution des contraintes de la tâche et/ou de l'environnement.

Hypothèse 3 : La perception et le contrôle de l'orientation dépendent de l'efficacité avec laquelle nos capteurs sensoriels sont mobilisés afin d'extraire les invariants physiques pertinents. La variabilité interindividuelle résulte de compétences différentes dont les individus font preuve quant à la détection, sélection, exploitation de certains invariants spatiaux (perçu dans les modalités visuelle ou proprioceptive). La variabilité intra-individuelle illustre la capacité de l'individu à changer d'invariants spatiaux pour s'adapter à l'évolution des contraintes de la tâche et/ou de l'environnement.

L'objectif principal de cette thèse porte sur l'identification des facteurs responsables des différences interindividuelles observées lors de tâches perceptives d'orientation spatiale. Ces nombreuses différences interindividuelles rendent-elles compte de modes préférentiels d'interaction perceptive et sensorimotrice dans un environnement et une tâche donnée ou relèvent-elle seulement de la variance d'erreur ? La littérature (cf. Huteau (Huteau, 1987)) laisse apparaitre de nombreux facteurs visant à expliquer l'existence de différences interindividuelles lors de tâches perceptives (le sexe, les facteurs génétiques, les expériences perceptives et sensorimotrices antérieures,…). Parmi ces nombreux facteurs, les différences interindividuelles peuvent s'expliquer à deux niveaux de traitement : i) le choix du cadre de référence préférentiel ou ii) le mode d'intégration multisensorielle de ces différents référentiels. En physique,

ainsi que dans la plupart des sciences, l'étude d'un objet passe par la comparaison à une référence. Si l'on considère un individu ayant un point de vue sur l'emplacement d'un objet, ce dernier pourra sembler différent en fonction de sa position, de son ou de ses repères. Un référentiel peut donc se définir, en physique, comme un système de coordonnées de l'espace-temps, composé de trois coordonnées de l'espace et d'une coordonnée de temps, utilisé pour définir les notions de position, de vitesse et d'accélération. Effectuer une recherche sur les cadres de références ne peut se passer d'une définition des différents types de référentiels.

La structuration de l'espace chez l'homme est rendu possible par l'existence de trois directions fortement corrélées (lorsque l'axe longitudinal de l'individu est aligné sur la direction gravitaire) : visuelle, gravitaire et égocentrée. Dé-corréler ces trois directions permet de d'étudier le style perceptif des individus.

a. Référentiel visuel

Asch, Witkin et al. (Asch & Witkin, 1948b; Asch & Witkin, 1948a; Witkin & Asch, 1948a; Witkin & Asch, 1948b; Witkin, 1949; Witkin, 1950a) sont les premiers à s'être intéressé aux effets de la perturbation de l'environnement visuel sur la perception d'orientation spatiale. Des tests tels que le Rod-and-Frame Test (RFT), le Rod-and-Disk Test (RDT) ou le Body-Adjustment-Test (BAT) du Tilting-Room-Tilting-Chair-Test (TRTCT) ont mis en évidence l'existence d'une variabilité interindividuelle à la sensibilité au champ visuel. Certaines personnes apparaîtrons très influencées par la présence d'un environnement visuel perturbateur alors que d'autres vont y être insensibles. Par exemple dans le cas du RFT où la tâche consiste à réaligner une

baguette initialement inclinée sur une orientation donnée (généralement la verticale ou l'axe longitudinal du corps), celle-ci étant située dans un cadre lui-même incliné, on constate des erreurs d'ajustement proche de 0° (pour les indépendants au champ visuel) jusqu'à plus de 20° (pour les dépendants au champ visuel). Certains auteurs ont interprété ces erreurs d'ajustement comme un effet du cadre sur la posture qui, en retour, agit elle-même sur la baguette. Cette illusion d'inclinaison du corps provoquée par le cadre est appelée vection optostatique (en opposition à la vection optocinétique provoquée lors du RDT), ou plus communément « effet-cadre ». Dans le cas du RDT, la tâche consiste également à réaligner une baguette sur une orientation donnée (généralement la verticale ou l'axe longitudinal du corps) non plus en présence d'un cadre statique incliné mais en présence de points lumineux tournant de façon circulaire autour de la baguette pouvant provoquer une vection optocinétique. Tout comme pour le RFT, on constate une grande variabilité interindividuelle dans les erreurs d'ajustement. Dans le BAT du TRTCT, la tâche consiste non plus à aligner une baguette mais son propre corps sur la verticale face à une pièce incliné.

Dans une 1ère étude, Zoccolotti et al. (Zoccolotti, Antonucci, Goodenough, Pizzamiglio, & Spinelli, 1992) se sont intéressés, lors de la passation d'un RFT, aux mécanismes responsables des erreurs d'ajustement de la baguette en confrontant les erreurs obtenues avec un petit cadre à celles obtenues avec un grand cadre (10,5 degrés vs 47,5 degrés d'angle visuel). Ils ont testé deux hypothèses : i) les mécanismes visuo-vestibulaires seraient impliqués seulement lorsque la baguette était entourée par un grand cadre incliné (taille angulaire à 47,5°), ii) tandis que les erreurs de perception de la verticale obtenues avec un petit cadre (taille angulaire inférieure à 10,5°) seraient dues à des mécanismes purement visuel. Ils ont comparé les erreurs obtenues avec un

grand et un petit cadre quand le corps était vertical ou horizontal en faisant l'hypothèse que l'inclinaison du corps augmentait les erreurs obtenues avec un grand cadre mais pas avec un petit cadre. En effet, s'il existe des preuves suggérant qu'incliner le corps affecte les interactions visuo-vestibulaires, il n'y a aucune raison que l'inclinaison du corps affecte les interactions visuo-visuelles. L'hypothèse n'a pas été confirmée. En effet, ils ont montré qu'incliner le corps augmentait les erreurs avec un grand cadre autant qu'avec un petit cadre.

Dans une 2nd étude, ces mêmes auteurs (Zoccolotti, Antonucci, & Spinelli, 1993) se sont intéressés au rapport entre la taille de l'effet cadre et (1) la taille du cadre et (2) la taille de l'écart séparant les extrémités de la baguette et le bord intérieur du cadre. Ils ont constaté qu'avec de grands cadres (47,5° de taille angulaire), les ajustements de la baguette étaient déviés dans le sens de l'inclinaison du cadre (effets directs) et évoluait inversement à la taille de l'écart ; plus l'écart était important plus l'erreur d'ajustement était petite. Avec un petit cadre (10,5° de taille angulaire), les erreurs d'ajustements de la baguette allaient dans le sens de l'inclinaison du cadre lorsque celle-ci était comprise entre 7,5 et 15 degrés ; lorsque l'inclinaison était plus importante, les ajustements de la baguette allaient dans le sens opposé à l'inclinaison du cadre (effets indirects). L'augmentation de la taille de l'écart réduisait la taille des effets directs (i.e., dans le sens de l'inclinaison du cadre) mais, au contraire augmentait celle des effets indirects. La taille du cadre ainsi que l'écart entre la baguette et le cadre apparaissent donc être des facteurs déterminants pour évaluer la dépendance au référentiel visuel.

Certains sujets parviennent à se soustraire à l'influence d'un référentiel visuel biaisé. Dans le cadre de la théorie des référentiels spatiaux, cette résistance pourrait

s'expliquer par la capacité de certains sujets à s'appuyer davantage sur un référentiel non biaisé, par exemple le référentiel gravitaire.

b. Référentiel gravitaire

Contrairement au champ visuel facilement manipulable (ex : effectuer une expérience avec les yeux fermés ou en présence d'un environnement perturbateur), étudier la sensibilité des individus au référentiel gravitaire (ou gravito-inertiel) n'est pas chose aisée, la gravité étant présente de façon constante et permanente sur Terre. Le moyen le plus efficace consistant à effectuer des expériences en impesanteur étant difficilement réalisable, centrifuger les individus reste le moyen le plus simple. La combinaison de la force centrifuge créée et de la force gravitaire, appelée direction gravito-inertielle (force gravito-inertielle, FGI), va différer de la direction de la force gravitaire ; il devient alors possible d'étudier la sensibilité des individus au référentiel gravito-inertiel. L'expérience consistant à aligner son corps ou une baguette sur la verticale gravitaire réelle a mis en évidence des erreurs d'ajustement importantes allant dans le sens de cette nouvelle « direction gravito-inertielle » ; ce déplacement est appelé illusion « oculogravique ». En effet, certains sujets pourtant immobiles peuvent percevoir un déplacement de leur orientation. Lorsqu'on rajoute des références extérieures (ex : on éclaire le sujet ou la pièce), le sujet se retrouve face à un conflit de référentiel. Les erreurs seront en moyenne moins importantes mais les différences interindividuelles sont plus importantes, ce qui permet de distinguer les individus dépendants et indépendants à l'égard du référentiel gravitaire.

Le 1er auteur à avoir utilisé cette technique de centrifugation est Witkin (Witkin, 1950b). Il s'est intéressé à l'effet d'un changement des signaux posturaux sur la perception d'orientation. Pour accomplir de tels changements sur ces signaux posturaux, le sujet était mis en rotation, afin que la résultante de la force gravito-inertielle agissant sur son corps (résultante entre la force de gravité orientée vers le bas et la force centrifuge agissant de façon latérale) soit déviée par rapport à la direction de la force gravitaire. Durant la rotation, le sujet était assis dans une pièce complètement fermée (cf. Figure 1). Sa tâche était d'ajuster une baguette présentée en face de lui parallèlement à la direction de la verticale ou de l'horizontale gravitaire. Les sujets étaient soumis à deux conditions de vitesse de rotation de la nacelle. Dans chaque condition de vitesse, le sujet était testé en présence ou non d'un environnement visuel. 258 sujets ont passé l'expérience.

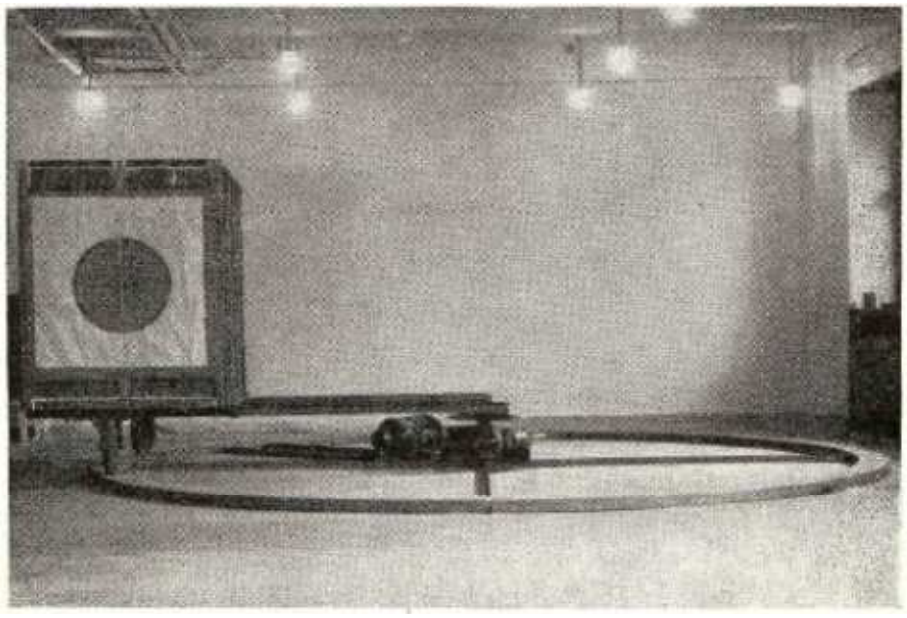


***Figure 1**. Photographie de la pièce rotative.*

Les résultats montrent que le changement de direction de la FGI à un effet significatif sur la perception de la verticale gravitaire, mais que cette effet est modulé par les directions présentes dans l'environnement visuel. Lorsqu'un environnement

visuel droit était présent, le changement de la force agissant sur le corps avait un très petit effet sur la perception d'orientation. Une déviation de 20,5° de la direction de la FGI par rapport à l'axe longitudinal du corps (condition de vitesse de rotation la plus faible) induit une erreur moyenne d'ajustement de la baguette à la verticale et à l'horizontale de seulement 3,1°. Une déviation de 33,4° de la direction de la FGI par rapport à l'axe longitudinal du corps (condition de vitesse de rotation la plus importante) induit une erreur moyenne d'ajustement de la baguette à la verticale et à l'horizontale de seulement 6,3°. En l'absence d'environnement visuel, la déviation de direction de la FGI a eu des effets plus importants sur la perception d'orientation. Avec la vitesse de rotation la plus faible, l'erreur moyenne d'ajustement montait à 10,7°, et à 24,7° avec une vitesse de rotation élevée. Non seulement la suppression de l'environnement provoque des erreurs plus importantes d'ajustements de la baguette, mais, dans de nombreux cas, cela induit le sentiment au sujet d'être lui-même incliné. Des différences interindividuelles marquées ont été observées dans la perception de la verticale, durant la rotation avec ou sans environnement visuel. Par exemple, avec la présence d'un environnement visuel, entrainant l'apparition d'un conflit entre la verticale indiquée visuellement ou de façon posturale, certains sujets percevaient l'environnement totalement droit, et alignaient simplement la baguette avec ses axes principaux. Pour d'autres sujets, la déviation de la direction de la FGI a eu un effet plus important, en donnant l'impression à l'environnement, objectivement droit, d'être incliné, et en menant à des ajustements de la baguette plus proche de la direction de cette force résultante.

Dans une autre étude (Witkin, 1952), ce même auteur s'est intéressé à l'effet de la rotation d'un sujet sur sa perception de l'orientation du corps lui-même et de l'environnement. L'appareil consistait en une petite nacelle complètement fermée qui se

déplaçait le long d'une piste circulaire. La pièce et la chaise à l'intérieur pouvaient être inclinées à droite ou à gauche, soit ensemble soit séparément. Le sujet devait, dans certains essais, "redresser" la pièce si elle leur paraissait inclinée et, pour d'autres essais, "redresser" leur corps s'il se sentait incliné. L'ajustement du corps était effectué avec la pièce allumée ou non (c.-à-d., en présence ou non d'environnement visuel). Les sujets étaient soumis à 4 vitesses de rotation, un groupe de jeunes adultes différent étant utilisé pour chaque vitesse.

Les résultats ont montré que, durant la rotation, les sujets percevaient la pièce, pourtant objectivement droite, comme inclinée par rapport à la véritable verticale. L'inclinaison moyenne perçue était cependant considérablement moins importante que l'amplitude du changement de direction de la FGI. Les résultats ont montré que le corps était aussi perçu comme incliné. Cependant, il était perçu moins incliné lorsqu'un environnement objectivement droit était présent comparé à la condition sans environnement visuel.

En général, la verticale subjective perçue était significativement différente entre les conditions avec un environnement visuel ou sans. En présence d'un environnement visuel objectivement droit, la verticale était perçue plus proche de la verticale gravitaire que de la direction de la FGI. Dans la condition d'environnement visuel sans cadre, la verticale perçue était déviée dans la direction de la FGI et ce d'autant plus fortement que la déviation de la FGI est importante. Lorsque la vitesse de rotation augmentait, l'amplitude du décalage entre la verticale perçue et la vraie verticale augmentait quelque soit la condition d'environnement visuel. Cette relation ne semblait pas être linéaire.

Les résultats de cette expérience font apparaître de fortes différences interindividuelles quant aux effets des différentes directions manipulées de manière isolées ou combinées sur la perception de la verticale. Lors de l'estimation de

l'orientation de l'environnement et du corps effectuée en présence d'un conflit entre les références visuelles et posturales, certains sujets s'appuyaient presque exclusivement sur l'une ou l'autre de ces références, tandis que d'autres sujets effectuaient un compromis entre les 2. Dans les jugements de position du corps effectué avec uniquement le standard postural (c.-à-d. sans environnement visuel), les sujets différaient dans l'amplitude du décalage entre l'orientation du corps perçue et la véritable verticale. Des différences significatives de perception entre les hommes et les femmes ont aussi été notées lors des conditions de conflit entre référence visuelle et posturale, les femmes étant plus fortement influencées par l'inclinaison du référentiel visuel.

D'autres auteurs (Clark & Graybiel, 1951) ont également utilisé cette technique de centrifugation. Dans leur étude, ils ont étudié les effets de la déviation de la direction de la FGI induite par centrifugation d'un individu sur sa perception de l'horizontalité. Pour cela, ils ont placé les sujets dans une chambre rotative de Pensacolo (cf. Figure 2). Ce système consiste à faire tourner un individu attaché à un siège autour d'un axe de rotation extérieur à ce siège et permet ainsi, grâce à la forge centrifuge, de dévier la direction de la FGI de la direction de la force gravitaire en introduisant et en contrôlant une composante d'accélération inertielle à la force gravitaire. Dans leur étude, trois sujets ont été exposés à une déviation de la direction de la FGI afin de tester l'hypothèse selon laquelle les variations de la HS (horizontale subjective) devraient survenir pendant et après les accélérations. Les sujets observaient, dans l'obscurité, une ligne lumineuse horizontale pendant qu'ils tournaient dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans la centrifugeuse humaine. Dans la partie I de l'expérience, la tâche des sujets consistait à maintenir la ligne dans une position horizontale au moyen d'un bouton, durant une accélération qui était immédiatement suivi d'une décélération. Dans la partie

II, la procédure était la même que dans la partie I sauf que l'accélération maximale était maintenue pendant 15 min avant le début de la décélération. Dans chaque expérience, une comparaison était faite entre les estimations de l'horizontale et la direction de la force résultante déterminée à partir d'un calcul théorique. Les résultats ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative entre les phases d'accélération et de décélération concernant la précision de la perception de l'horizontale. Cependant il est apparu que les sujets avaient tendance à estimer l'horizontale selon un angle plus important que la déviation de la direction de la FGI.

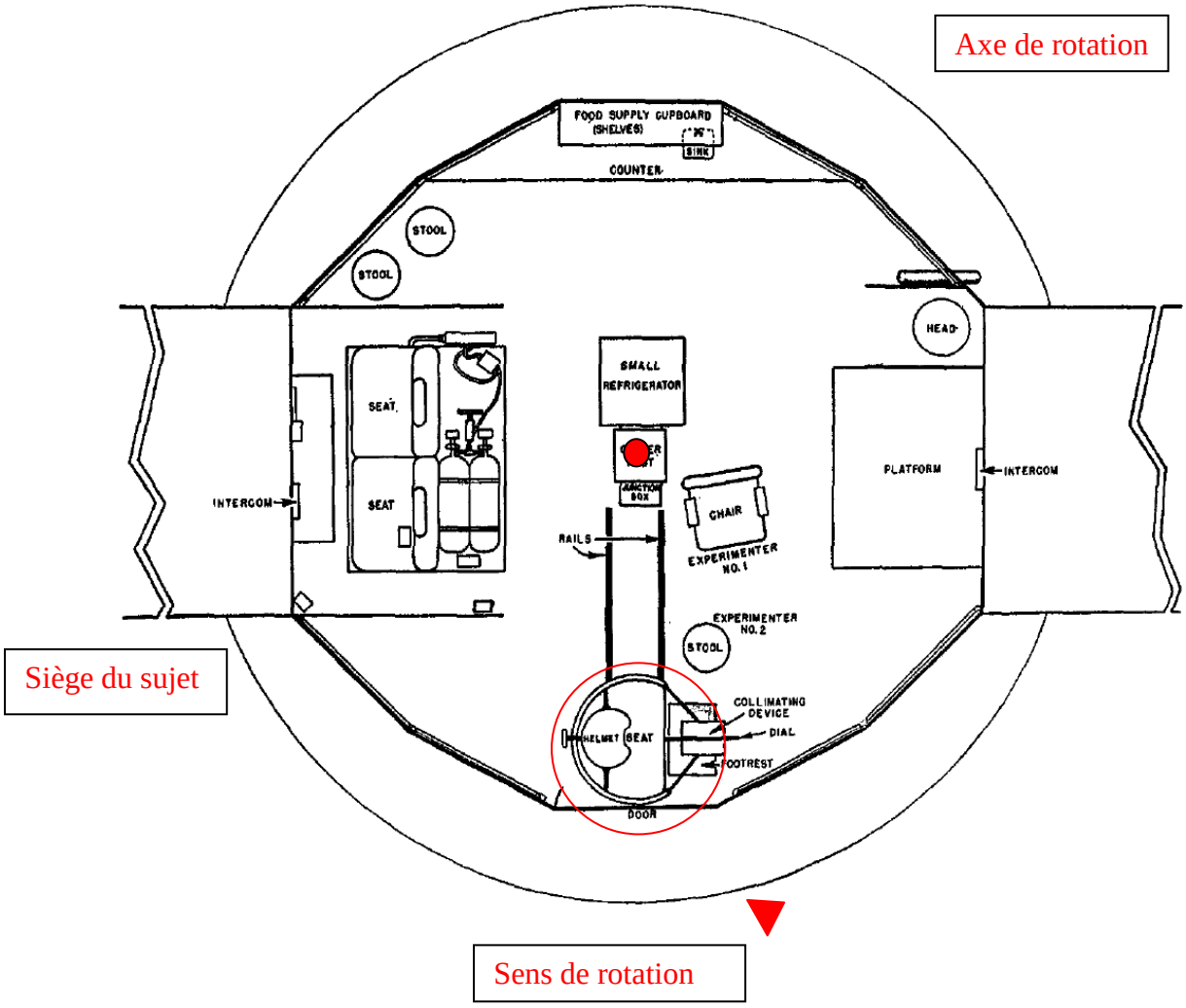


***Figure 2**. issue de (Clark & Graybiel, 1962). Vue de dessus d'une chambre rotative de Pensacolo.*

Ces dernières études ont ainsi mis en évidence l'importance de l'information gravitaire dans la perception de notre environnement et d'orientation spatiale. Certains auteurs se sont alors intéressés à l'effet de l'orientation posturale dans le champ gravitaire sur la perception de la verticalité de notre environnement. L'information en provenance des capteurs vestibulaires variant en fonction de l'orientation posturale, il a été supposé que certaines postures pourraient favoriser la perception d'orientation spatiale.

Les études d'Ohlmann ont ainsi montré que les postures pouvaient être hiérarchisées en fonction de l'intensité avec laquelle elles sollicitent l'invariant gravitaire. Ainsi de la plus facile à la plus difficile nous avons : la position couché sur le dos, assis incliné en arrière, assis « droit », assis incliné en avant, debout en position stable, debout en Romberg sensibilisé et debout à cloche-pied. D'après Stoffregen et Riccio (Stoffregen & Riccio, 1988), l'invariant gravitaire ne serait perçu qu'au travers des activités de rééquilibration posturale.

Les études précédentes ont montré que la perturbation des cadres de référence visuel et gravitaire impactait notre capacité à percevoir justement la direction de la verticale terrestre. Cependant, on peut constater que cet effet de la perturbation des cadres de références n'est pas complet. En effet lorsqu'on incline le cadre de référence visuel, la verticale subjective (VS) est certes déviée par rapport à la verticale terrestre mais n'est pas non plus parfaitement alignée avec la direction de cadre de référence visuel. Les mêmes observations peuvent être faites lors de la perturbation du cadre de référence gravitaire. On peut donc supposer que d'autres facteurs jouent un rôle afin de réduire l'effet des perturbations des cadres de référence visuel et gravitaire sur la VS.

L'un de ces facteurs permettant de se soustraire à une perturbation visuelle et/ou gravitaire pourrait se situer dans la capacité d'un individu à s'appuyer sur le référentiel égocentré.

c. Référentiel égocentré

Après les références visuelles et gravitaires, la dernière source d'informations disponible pour juger de l'orientation spatiale est la référence égocentré : l'axe Z (axe allant de la tête au pied). En effet, l'axe Z constitue un puissant référentiel permettant d'estimer la localisation et l'orientation d'objets environnants. Le test classique permettant d'étudier la sensibilité d'une personne à la référence égocentrée consiste à incliner cette personne dans le plan frontal ou sagittal et à lui demander de juger une orientation spatiale (horizontale ou verticale). Deux effets ont été observés :

- l'effet-Müller ou effet-E (Muller, 1916) est observé pour des inclinaisons du sujet inférieures à 60° ou supérieures à 135° (Kaptein & Van Gisbergen, 2005). Dans ce cas, la réponse du sujet va au-delà de la verticale physique dans le sens inverse de son inclinaison corporelle. L'angle corps/verticale gravitaire est surestimé (Ceyte, Cian, Trousselard, & Barraud, 2009),
- l'effet-A (Aubert, 1861) est le plus généralement observé pour des inclinaisons comprises entre 60° et 135° (Kaptein & Van Gisbergen, 2005). La réponse du sujet est comprise entre la verticale physique et son inclinaison corporelle qu'il aurait tendance à sous-estimer. La compensation ne saurait alors pas suffisante.

Plusieurs auteurs se sont intéressés au rôle joué par les informations proprioceptives dans la perception d'orientation spatiale et en particulier dans l'atténuation de la dépendance au référentiel visuel, égocentré ou gravito-inertiel.

Les deux expériences suivantes se sont intéressées aux relations entre la perception de la verticale et l'activité posturale.

Luyat et al. (Luyat, Ohlmann, & Barraud, 1997) se sont intéressés au rôle jouée par les dynamiques d'équilibration posturale dans la perception de la verticale. Selon Stoffregen et Riccio (Stoffregen & Riccio, 1988), les systèmes perceptifs sont coordonnés afin de détecter dans les dynamiques d'équilibre la direction de l'équilibre et non la direction de la verticale gravitaire ou gravito-inertielle (Riccio & Stoffregen, 1990; Riccio, Martin, & Stoffregen, 1992). L'enrichissement sensoriel induit par l'augmentation des contraintes d'équilibration devrait améliorer la perception de la direction de l'équilibre. Selon Luyat et al. (Luyat et al., 1997), lorsque la direction de l'équilibre est alignée avec la gravité, la perception de la verticale devrait, par conséquent, être améliorée lorsque les conditions de contrôle de l'équilibre génèrent de fortes dynamiques d'équilibre. Dans leur étude comprenant 3 expériences, les sujets devaient ajuster une baguette lumineuse en présence de 2 contextes visuels possibles : dans l'obscurité ou en présence d'un cadre incliné. Dans ces expériences, l'activité posturale a été manipulée en plaçant les sujets soit en situation de léger déséquilibre postural (expérience 1) soit en situation d'immobilisation (expérience 2). Dans les 2 situations, les résultats ont été comparés à une condition contrôle dans laquelle les sujets se tenaient droit (expérience 1) ou assis librement (expérience 2). Les résultats n'ont montré aucun effet principal de la posture active ou au contraire de l'immobilisation sur la perception visuelle de la verticale. Dans la 3ème expérience, les sujets étaient allongés

sur le dos avec l'axe Z de leur corps perpendiculaire au plan de la baguette lumineuse entrainant ainsi une modification de l'orientation du corps par rapport à la gravité et une réduction de l'activité motrice. Dans cette position, la verticale était perçue avec exactitude dans l'obscurité. Dans la condition avec le cadre incliné, la position du corps allongé a clairement amélioré l'estimation de la verticale. Ce dernier résultat peut s'expliquer par le fait qu'en position debout, l'inclinaison du cadre agit sur la posture du sujet qui a tendance à s'incliner dans le sens du cadre. La verticale subjective est alors déviée dans le sens du cadre. A l'inverse, en position couchée, l'inclinaison du cadre n'a pas d'effet sur la posture, la verticale gravitaire est alors mieux perçue. Ces résultats sont cohérents avec les hypothèses énoncées précédemment d'une variabilité intra-individuelle résultant des changements de cadre de références et illustrant les capacités adaptatives de l'individu. Dans leur étude, Bray et al. (Bray et al., 2004) se sont intéressé aux relations entre la perception de la verticale et l'activité posturale. Les sujets devaient ajuster une baguette sur la verticale gravitaire entourée ou non d'un cadre incliné. Ils étaient soumis à 3 conditions posturales : (1) assis sur une chaise, (2) debout avec les pieds légèrement écartés, (3) debout sur une poutre étroite avec un pied devant l'autre (Romberg sensibilisé). Les résultats ont montré, en présence d'un cadre incliné, une amélioration de 27% de la perception de la verticale gravitaire en passant de la condition (2) à la condition (3). Cela suggère que l'information provenant de la "dynamique d'équilibre" améliorent la perception d'orientation, soulignant l'aphorisme que "nous sommes plus conscient de notre orientation quand on tombe". De même que précédemment, ces résultats sont cohérents avec les hypothèses énoncées précédemment d'une variabilité intra-individuelle résultant des changements de cadre de références et illustrant les capacités adaptatives de l'individu.

Ces études montrent l'importance de la référence égocentrée dans la perception d'orientations spatiales.

Tout comme pour les références visuelles et gravitaires, on observe une grande variabilité interindividuelle dans l'utilisation des informations proprioceptives. Cependant, on constate que l'effet-A se manifeste systématiquement ce qui n'est pas le cas de l'effet-E. Selon Ohlmann (Ohlmann & Brenet, 1990), «si l'effet-E apparaît comme un avatar de la mécanique otolithique, l'origine de l'effet-A serait à rechercher dans une compétition entre la direction gravitaire et la direction du vecteur idiotropique ». L'effet A serait le produit de la combinaison vectorielle de la représentation interne du vecteur gravitaire (perception assurée par le système vestibulaire) avec le vecteur idiotropique (représentation interne de l'axe céphalo-caudal). Le système vestibulaire assurerait une perception biaisée de la direction de la gravité due aux déséquilibres saccule-utricule et générerait un fort effet-Müller. Pour limiter l'amplitude de ces effets-Müller, le SNC combinerait à la représentation interne biaisée de la gravité les informations d'orientation du corps (vecteur idiotropique). La compensation serait assez bonne jusqu'à 60°. Au-delà, le poids constant alloué au vecteur idiotropique serait responsable des forts effets-A. Les travaux de Mittelstaedt (Mittelstaedt, 1983) ont montré qu'en l'absence d'informations visuelles, on observe une tendance à déplacer la verticale subjective en direction de la verticale gravitaire mais également en direction de l'axe Z. Les fortes différences interindividuelles expriment une plus ou moins grande sensibilité au référentiel égocentré (les erreurs atteignent 50° chez certains individus (Kaptein & Van Gisbergen, 2005)).

Dans leur étude, Fourré et al. (Fourre et al., 2009) ont montré que la déviation du centre de masse (CM) de l'ensemble tête-tronc modifiait de façon significative la perception de la verticale gravitaire (VS) dans le sens opposé à la déviation du CM de l'ensemble tête-tronc alors même que l'axe longitudinal de l'ensemble tête-tronc restait aligné sur la verticale gravitaire. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse de la perception et du contrôle de l'orientation reposant sur la sélection et la spécification des référentiels spatiaux d'orientation.

d. Interrelations entre les référentiels

Après avoir constaté une évocabilité différentielle des différents référentiels, il s'est alors posé la question de leur interrelation.

On peut se demander si un individu sensible à la perturbation du cadre de référence visuel va l'être également à celle du cadre de référence gravitaire ou égocentré. Inversement, est-ce qu'un individu sensible à la perturbation du cadre de référence gravitaire va l'être également à celle du cadre de référence visuel ou égocentré ? Est-ce qu'il existerait, comme le propose Ohlmann (Ohlmann, 1990), une aptitude à bien percevoir l'environnement c.-à-d. une capacité des individus à toujours choisir le bon référentiel ? Différents travaux se sont ainsi intéressés aux relations existantes entre les différentes sensibilités aux différents cadres de référence, l'hypothèse était que si certains sujets se trouvent insensible à la perturbation d'un cadre de référence (par exemple visuel) c'est parce qu'ils s'appuient sur un autre cadre de référence (par exemple égocentré ou gravitaire) et lorsque ce dernier devient perturbé, alors ces sujets deviennent très désorientés. Cette hypothèse d'évocabilité préférentielle des référentiels spatiaux prédit une corrélation négative entre les différentes dépendances.

Plusieurs auteurs (Goodenough, Cox, Sigman, & Strawderman, 1985; Ohlmann & Chassouant, 1989; Witkin, 1949; Witkin et al., 1954; Witkin, Dyk, Faterson, Goodenough, & Karp, 1962) ont ainsi montré l'absence de lien entre la dépendance aux cadres de référence égocentré et visuel, signifiant que la capacité à se soustraire de l'environnement visuel perturbant ne provient pas d'une capacité à exploiter le référentiel égocentré.

Ces mêmes auteurs (Witkin, 1950a; Witkin et al., 1954; Witkin et al., 1962) ont également démontré l'existence d'une corrélation négative entre la dépendance au cadre de référence visuel et la dépendance au cadre de référence gravitaire. Il apparait ainsi que les sujets désorientés par la présence d'un cadre visuel perturbant ne le sont pas lorsque les références gravitaires sont modifiées et inversement.

L’existence de multiples sources d’informations disponibles pour le traitement des relations spatiales permet une flexibilité dans le choix du référentiel utilisé. En effet, en cas de perturbation de la source d’information privilégiée, l’individu a la possibilité d’utiliser une autre source d’information : ce processus évoqué par Reuchlin (Reuchlin, 1978) est appelé processus vicariant.

e. Processus vicariants

Ce modèle des processus vicariants proposé par Reuchlin (Reuchlin, 1978) s’appuie sur 2 points :

- chaque individu dispose de plusieurs processus pour traiter un stimulus,

- chaque individu utilise préférentiellement un processus.

i) Dans une situation peu contraignante, chaque individu choisit le processus préférentiel pour résoudre un problème, celui-ci pouvant varier d'un individu à l'autre. Les processus disponibles sont équi-efficaces pour résoudre la tâche car ils sont compatibles avec le niveau de contrainte de la tâche. ii) Dans une situation très contraignante, le choix du processus devient plus limité, la variabilité interindividuelle est alors diminuée. Par exemple, dans une tâche où on demande au sujet de réaligner un objet, qu'il tient dans ses mains, sur la verticale, il peut utiliser aussi bien l'information visuelle que l'information gravitaire ou proprioceptive ; s'il doit le faire avec les yeux fermés, seules les informations proprioceptives et gravitaires sont disponibles ; si l'ajustement est effectué par une tierce personne, l'information proprioceptive n'est alors plus disponible. Cependant, il faut noter que le passage d'une modalité sensorielle préférentielle à une autre ne s'effectue pas systématiquement au même niveau de contrainte pour tous les individus. Le seuil de contrainte entrainant un changement de processus préférentiel n'est pas identique à tous. Ohlmann (Ohlmann, 1995) prend l'exemple du passage de la marche au vol chez le canard ; ce changement de mode de déplacement n'intervient pas au même niveau de contrainte pour tous les canards. Pour de très courtes distances à parcourir, tous les canards vont marcher ; pour de très longues distances, tous les canards vont voler ; pour des distances intermédiaires, le mode de déplacement va varier d'un canard à l'autre. Cet exemple est transposable à l'Homme, chez qui le passage de la marche à la course ne se fait pas à la même vitesse de déplacement pour tout le monde (cf. Figure 3). Ohlmann (Ohlmann, 1995) parle alors de seuil d'affordance. Il distingue 2 types : les seuils absolus et les seuils optimums. Les premiers indiquent le niveau de contrainte au delà duquel tous les

individus fonctionnent selon le même processus ; les deuxièmes indiquent le niveau au delà duquel il est plus efficace, moins coûteux de changer de modalité mais où il est encore possible d'utiliser le premier processus.

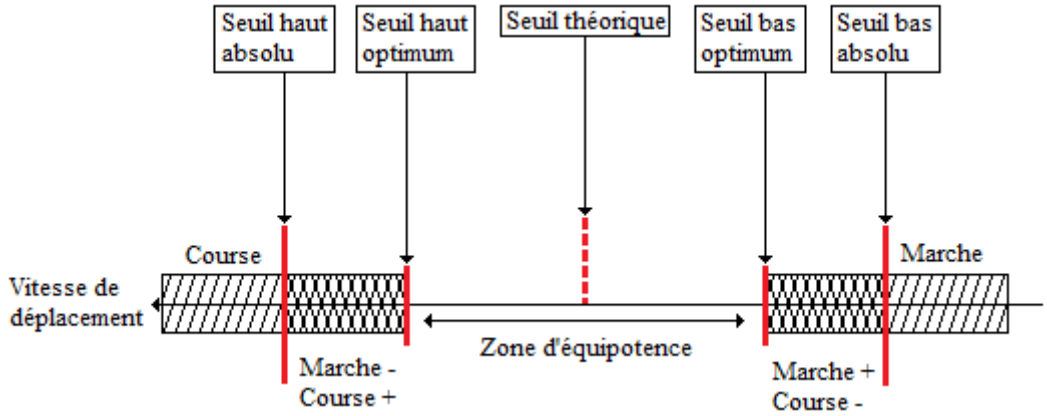


Figure 3*. (Adapté d'Ohlmann (Ohlmann, 1995)) Seuils d'affordances haut et bas. Le seuil bas absolu signifie qu'aucune personne ne court en dessous de cette vitesse, le seuil haut absolu signifie au contraire que toutes les personnes courent à partir de cette vitesse. Le seuil bas optimum détermine la limite en dessous de laquelle certaines personnes courent alors que la marche est plus efficace. De manière symétrique, au-delà du seuil haut optimum, certaines personnes peuvent encore marcher mais il serait préférable de courir.*

De la même manière, des études (Brenet, Ohlmann, & Marendaz, 1988; Isableu, Ohlmann, Cremieux, & Amblard, 1997) portant sur l'utilisation des différents référentiels en fonction de la posture ont montré que l'utilisation du référentiel gravitaire devenait impératif dans des situations où le déséquilibre postural était important (ex : position Romberg sur sol mou), alors qu'en situation de relative stabilité (ex : posture normale) le choix du référentiel sensoriel variait d'un individu à l'autre. De plus, il existe une variabilité interindividuelle dans le passage d'un référentiel à un autre ; dès les premiers signes de perturbation posturale, certaines personnes vont basculer du référentiel visuel vers le référentiel gravitaire, tandis que d'autres vont rester « ancrer » dans le référentiel visuel et vont attendre d'être à la limite de la chute pour effectuer ce changement.

Marendaz et al. (Marendaz, 1989) ont observé les mêmes phénomènes avec la tâche de Kopfermann, consistant à distinguer un carré posé sur sa base d'un carré posé sur un angle. Les résultats ont montré une unification des performances entre les sujets dépendants (DC) et indépendants (IC) à l'égard du champ visuel lorsque la tâche était effectuée dans des situations posturales extrêmes tels le Romberg sensibilisé tandis que, dans des situations peu contraignantes (par exemple, position assise), des différences interindividuelles émergent. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle les besoins posturaux moduleraient la prise de référentiel.

La variabilité interindividuelle peut donc s'expliquer à deux niveaux : 1) le choix du processus préférentiel dans une situation pas ou peu contraignante, 2) le seuil de contrainte entrainant le passage d'un processus à un autre.

Il est cependant important de noter que l'existence d'un référentiel préférentiel ne signifie pas que les autres référentiels ne s'expriment pas ; il existe une dominance du processus préférentiel. Ohlmann (Ohlmann, 1990) parle de « hiérarchie d'évocabilité des processus » qu'il définie comme la manière dont les processus sont connectés entre eux. Les processus seraient organisés de manière hiérarchique et propre à chaque individu. Les individus attribueraient un poids variable d'un référentiel à l'autre. Les référentiels semblent donc faire l'objet d'une pondération idiosyncrasique.

Pour percevoir son espace environnant et son espace personnel, l'Homme dispose donc de plusieurs sources d'informations (visuelle, proprioceptive, kinesthésique,…). Cela nous amène à se poser la question de leur intégration,

combinaison, fusion par le système nerveux central. La sélection des référentiels spatiaux peut s'envisager comme un moyen nécessaire à la réduction de l'incertitude. Mais est ce que la pondération idiosyncrasique de ces référentiels spatiaux répond à une règle de maximisation de la certitude ? Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer cette intégration multisensorielle.

II. Théorie sur l'intégration multisensorielle

Dans la littérature sur l'intégration sensorielle, deux terminologies sont employées : "l'intégration" et "la combinaison". Que signifient : "intégration" et " combinaison"? Selon la définition du dictionnaire Larousse la combinaison est un "Assemblage, arrangement selon une disposition, une proportion. Disposition des éléments mécaniques dont la configuration déclenche l'ouverture". L'intégration se définie comme "une opération qui consiste à assembler les différentes parties d'un système et à assurer leur compatibilité ainsi que le bon fonctionnement du système complet". Ernst et Bülthoff (Ernst & Bulthoff, 2004), définissent "l'intégration" et "la combinaison" comme suit:

•"L'intégration sensorielle décrit les interactions entre les signaux redondants. C'est-à-dire, pour être intégrée, l'estimation sensorielle doit être de même unité, mêmes coordonnées et de mêmes propriétés environnementales.".

•"La combinaison sensorielle décrit les interactions entre les signaux sensoriels qui ne sont pas redondants. C'est-à-dire qu'ils pourraient être dans des unités différentes, des systèmes de coordonnées, ou sur des aspects complémentaires des mêmes propriétés environnementales. "Désambiguïser" et "coopérer" sont des exemples pour de telles interactions.

Musolino et al. (Musolino, Loughlin, Sparto, & Redfern, 2006) définit “l’intégration” comme un terme indiquant que les signaux sensoriels sont combinés de nombreuses façons. Il peut être observé de nombreuses conceptions de “l’intégration” ou de la “combinaison” sensorielles dans la littérature. Ces conceptions sont : “l’intégration linéaire additive” (Jeka, Oie, & Kiemel, 2000; Peterka, 2003), “l’intégration non linéaire” (Maurer, Mergner, Bolha, & Hlavacka, 2000; Oie, Kiemel, & Jeka, 2001; Oie, Kiemel, & Jeka, 2002; van der Kooij, Jacobs, Koopman, & Grootenboer, 1999; van der Kooij, Jacobs, Koopman, & van der Helm, 2001), et “la combinaison linéaire pondérée” représentant une somme pondérée des entrées sensorielles (Battaglia, Jacobs, & Aslin, 2003; Deneve & Pouget, 2004; Ernst & Banks, 2002; Ernst & Bulthoff, 2004; Kording & Wolpert, 2004a; Zupan, Peterka, & Merfeld, 2000)

Les résultats d’un grand nombre de travaux semblent valider l’hypothèse que le SNC recourrait à des règles probabilistes (ou fonctionnerait de la sorte) afin de réduire l’incertitude spatiale. Le SNC accéderait à la fiabilité des signaux en leur accordant un poids proportionnel. Les connaissances antérieures (priors) peuvent également jouer un rôle afin de minimiser l’incertitude et ce d’autant plus fortement qu’elles sont fiables. Le produit de la combinaison des priors et des signaux ascendants au prorata de leur variance respective semble assez bien prédit par la règle Bayésienne. Nous allons nous intéresser à la théorie bayésienne qui peut décrire l’intégration sensorielle par un modèle probabiliste (i.e., le modèle de combinaison linéaire). Ce modèle a déjà été largement éprouvé dans les tâches de perception de la taille des objets (Ernst & Banks, 2002), de la forme des objets (Helbig & Ernst, 2007), des textures (Guest & Spence,

2003; Lederman, Thorne, & Jones, 1986), de l'inclinaison d'une surface (Ernst, Banks, & Bulthoff, 2000), de la profondeur et des perspectives (Oruc, Maloney, & Landy, 2003), de la localisation de stimuli auditif et visuel (Alais & Burr, 2004; Knill & Pouget, 2004), ou encore la perception de la vitesse (Stocker & Simoncelli, 2006). Nous supposons donc que la théorie bayésienne pourrait bien d'écrire l'intégration sensorielle dans nos tâches d'orientation spatiale.

Il apparait donc que plusieurs référentiels sont disponibles pour percevoir notre environnement et que, même si certains sont évoqués préférentiellement, tous s'expriment. Il semblerait ainsi que le SNC hiérarchiserait ces référentiels en leur attribuant un poids respectif variable en fonction des contraintes situationnelles.

a. La repondération sensorielle

Des auteurs, tels Oie, Kiemel ou Carver (Carver, Kiemel, & Jeka, 2006; Oie et al., 2001; Oie et al., 2002), ont établi des modèles de pondération et repondération dynamique des signaux sensoriels. Elle peut être définie comme un mécanisme qui attribut, de façon dynamique, à chaque modalité sensorielle une certaine valeur reflétant sa fiabilité et qui permet le passage d'une information au début fiable et devenu moins fiable à une information devenue plus fiable. Ils ont montré que pour contrôler leur équilibre postural, les sujets intègrent les signaux sensoriels en leur affectant un poids qui peut varier en fonction de l'évolution de la tâche. Il semblerait que le système nerveux central affecterait un poids d'autant plus important que le signal est fiable (non biaisé, bruit faible).

Oie et al. (Oie et al., 2001) ont testé cette hypothèse en effectuant l'expérience suivante : des sujets étaient placés debout à 40cm d'un écran projetant un stimulus visuel (pattern de points) et touchaient avec leur doigt une surface délivrant un stimulus somatosensoriel. Les sujets avaient pour consigne de rester dans cette position pendant 248s et leur balancement medio-latéral était enregistré. Les amplitudes des stimuli (visuel et somatosensoriel) étaient de 2, 4 et 8mm donnant ainsi, en combinant les 2 stimuli, 5 conditions (amplitude somato-sensorielle : amplitude visuelle) : 8:2 ; 4:2 ; 2:2 ; 2:4, 2:8. Les résultats ont montré que la stabilité posturale augmentait lorsque l'amplitude du stimulus visuel ou tactile augmentait. Les sujets perturbés par le champ visuel améliorent leur stabilité lorsque le stimulus somatosensoriel devient fiable. Ces résultats permettent aux auteurs de soutenir l'hypothèse selon laquelle les changements dans la stabilité posturale seraient dus aux changements dans la pondération sensorielle.

Carver et al. (Carver et al., 2006) ont montré, concernant l'étude du contrôle postural, que le SNC était capable de re-pondérer de façon dynamique les signaux sensoriels i.e., de tenir compte de l'évolution de leur fiabilité respective. Pour cela, ils ont observé les réponses posturales de sujets face à des changements brusques de l'amplitude du mouvement visuel et ont constaté une rapide repondération du stimulus visuel lorsque son amplitude augmente subitement, comportement nécessaire pour prévenir de la perte d'équilibre. Par contre, lorsque l'amplitude du stimulus visuel diminue et ne présente donc pas une menace pour l'équilibre, ils ont observé une repondération plus lente sans conséquence fonctionnelle.

Selon McGuire et Sabes (McGuire & Sabes, 2009), les signaux sensoriels qui pilotent la planification d'un mouvement arrivent dans une variété de « cadres de

références » et les intégrer et les comparer nécessite des transformations sensorielles. Ils proposent un modèle dans lequel les propriétés statistiques des signaux sensoriels et leurs transformations déterminent comment ces signaux sont utilisés. Ils ont montré que les patterns d'erreurs dépendantes du regard, souvent cités comme la preuve d'une planification de l'atteinte rétinotopique, peuvent être expliqué par un biais dans la transformation et ne sont pas liés exclusivement aux représentations rétinotopiques. De plus, la présence de multiples cadres de références permet une utilisation optimale de l'information sensorielle disponible et explique la repondération des signaux sensoriels en fonction de la tâche.

Parmi les modèles de pondération sensorielle, le modèle MLE (Maximum Likelihood Estimation) a régulièrement été appliquée pour rendre compte des stratégies d'intégration multisensorielle utilisées par les individus.

b. Le maximum de probabilité (MLE)

Ernst et Bülthoff (Ernst & Bulthoff, 2004) ont mis en évidence l'existence, chez l'homme, de 2 stratégies de traitement de l'information. La 1ère consiste à maximiser l'information délivrée à partir des différentes modalités sensorielles. La 2nd stratégie consiste à réduire la variance dans l'estimation sensorielle pour augmenter sa fiabilité. Les signaux individuels sont combinés proportionnellement à leur fiabilité. Ce mécanisme de pondération permet d'obtenir une estimation dans la condition multisensorielle plus fiable que la fiabilité des signaux pris un à un.

Dans leur étude, Bringoux et al. (Bringoux et al., 2009) ont montré que l'effet d'un cadre incliné sur la perception de la verticale, appelé Rod-and-Frame Effect (RFE), était réduit lorsque les ajustements se faisaient via les signaux visuels et kinesthésiques comparé aux ajustements visuels uniquement. Ils suggèrent que les signaux kinesthésiques pourraient contribuer à neutraliser, contrarier l'attraction visuelle induite par le cadre visuel. De plus, ils ont montré que le RFE augmentait entre le début et la fin de l'ajustement, laissant supposer une augmentation progressive de l'influence du référentiel visuel.

Dans une autre étude (Bringoux, Nougier, Barraud, Marin, & Raphel, 2003), ils se sont intéressé à la contribution des signaux otolitiques et somesthetiques à la perception des orientations du corps lors de tangage à très faibles vitesses ; et les résultats suggèrent que les informations somesthetiques basées sur la gravité sont plus riches en renseignements que les signaux otolitiques pour la perception d'orientation du corps quasi-statique.

Rock et Victor (Rock & Victor, 1964) ont montré une domination de la vision dans la perception pour les tâches spatiales, phénomène appelé « capture visuelle ». Shams, Kamitani et Shimojo (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000) ont, pour leur part, mis en évidence le phénomène de « capture auditive » correspondant à une domination de la modalité auditive dans la perception intégrée pour des jugements temporels. Selon ce modèle, le biais dans la condition combinée est le même que celui observée dans la modalité dominante, c'est un modèle dit « Winner-Take-All » (Bresciani et al., 2005). Il ne permet pas, dans la condition combinée, d'obtenir une estimation plus fiable que la fiabilité de l'estimation de la modalité dominante. Il diffère donc du modèle de

maximum de probabilité (MLE= Maximum Likelihood Estimation) qui a mis en évidence la domination de l'estimation dans la perception intégrée c'est-à-dire que ce n'est pas la modalité sensorielle (visuelle, auditive, haptique, …) qui domine pour la perception mais le fait que l'estimation qui en découle soit plus ou moins variable. Dans le modèle MLE, la perception intégrée *S* correspondrait alors à la somme des estimations s_i propre à chaque modalité, pondérée par la fiabilité du signal w_i.

$$S = \sum_i w_i s_i$$

Cette fiabilité w_i du signal est calculée à partir de la variance σ de chaque signal.

$$w_i = \frac{1/\sigma^2{}_i}{\left(1/_{\sigma^2{}_i}\right) + \left(1/_{\sigma^2{}_j}\right)}$$

La variance σ_{finale} de l'estimation finale est alors égale à :

$$\sigma^2{}_{ij} = \frac{\sigma^2{}_i \sigma^2{}_j}{\sigma^2{}_i + \sigma^2{}_j}$$

Lors de leur expérience manipulant la fiabilité du signal visuel (en ajoutant du bruit), Ernst et Bülthoff (Ernst & Bulthoff, 2004) ont montré le passage d'une domination visuelle dans la perception, lorsqu'il n'y avait pas de bruit ajouté sur l'écran, vers une domination haptique lorsque le signal visuel devenait bruité. De tels changements sont cohérents avec l'idée qu'il y aurait des variations, des ajustements

dans les poids attribués aux différents signaux sensoriels en fonction de leur fiabilité, et ce, essai par essai. Cela suggère que le SNC a un accès direct aux fiabilités sensorielles.

Rôle des connaissances antérieures (priors)

Selon Körding et Wolpert (Kording & Wolpert, 2006), les signaux de nos systèmes sensoriels et moteurs sont altérés par la variabilité ou le bruit. Afin d'effectuer une action optimale, les estimations de ces signaux doivent être combinées avec nos connaissances sur le coût ou l'apport potentiel de cette action. Ces auteurs montrent, dans leur revue de littérature, que pour résoudre de problèmes de décisions et d'estimations, le comportement humain est proche de celui prédit par la théorie de la décision bayésienne.

Selon Beierholm et al. (Beierholm, Quartz, & Shams, 2009), dans le cadre Bayésien, les priors représentent une information a priori à propos de l'environnement, c.-à-d. une information disponible avant de percevoir un stimulus et est donc indépendante de ce stimulus. Bien que cette interprétation soit considérée par beaucoup comme une caractéristique définissant l'approche Bayésienne, la règle Bayésienne en soi ne nécessite pas que les priors restent constant malgré les changements significatifs du stimulus. Ces auteurs ont étudié l'indépendance des priors par rapport aux probabilités en manipulant les probabilités présumées (en utilisant 2 ensembles de stimuli radicalement différents). Ils ont alors examiné si les estimations changeaient ou restaient identiques en fonction des changements de priors. Les résultats ont suggéré que les priors estimés étaient indépendants de l'entrée sensorielle.

Dans leur étude, MacNeilage et al. (MacNeilage, Banks, Berger, & Bulthoff, 2007) se sont intéressé à la problématique de l'ambiguïté gravito-inertielle que les signaux otolithiques et canalaires ne peuvent résoudre. Ils ont supposé que les informations visuelles puissent lever cette ambiguïté et ont présenté un modèle Bayésien d'une combinaison statistiquement optimale des signaux visuels et vestibulaires. Pour cela, les sujets étaient placés sur une plateforme de mouvement, assis devant un écran de vidéo-projection et soumis à une stimulation vestibulaire et/ou visuelle. La stimulation vestibulaire était obtenue en faisant tanguer et/ou translater la plateforme de mouvement. La stimulation visuelle consistait en une vidéo affichée sur l'écran représentant (1) soit une rotation en tangage couplée à une translation vers l'avant à vitesse constante, (2) soit une accélération linéaire vers l'avant sans tangage, (3) soit une rotation en tangage couplé à une translation vers l'avant accélérée. Les sujets devaient comparer 2 stimulations de 9s séparées de 2s et dire durant quelle stimulation ils se sont senti le plus projeté en avant et/ou accéléré. Les prédictions du modèle ont été confirmées : (1) les signaux visuels ont affectés l'interprétation des signaux otolithiques, (2) les signaux les moins variables ont eu une influence plus importante sur la perception d'orientation et d'accélération que les signaux les plus variables, et (3) les estimations combinées ont été plus précises que les estimations établies à partir d'un seul signal.

Des auteurs tels De Vrijer, Medendorp et Van Gisbergen (De Vrijer M., Medendorp, & Van Gisbergen, 2009) ont montré que pour estimer la verticale visuelle selon les coordonnées terrestres, l'observateur doit combiner l'information à propos de l'orientation d'une ligne sur la rétine avec des signaux centraux compensant les effets de

l'inclinaison de la tête et la torsion de l'œil (cf. Figure 4). Si ces compensations sont seulement partielles, cela donnera lieu aux effets –A et –E.

L'idée générale derrière cette théorie est que l'observateur combine l'information sensorielle bruitée de l'inclinaison de la tête dans l'espace à celle de la rotation des yeux dans la tête, tout en prenant en compte l'angle d'inclinaison le plus vraisemblable estimé à partir de connaissances à priori.

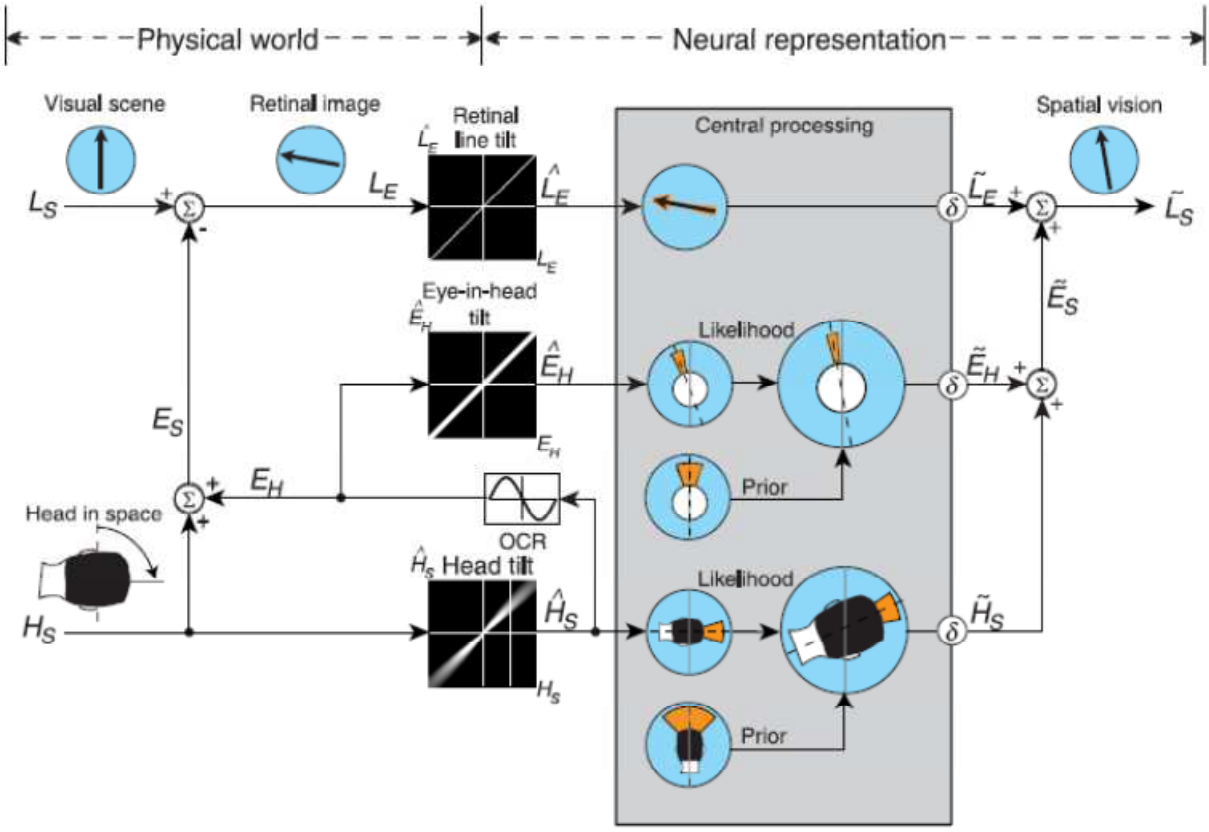


Figure 4. *Compensation neurale d'une inclinaison de la tête et de la torsion des yeux pour maintenir la stabilité de l'orientation visuelle. Le but de ce schéma est d'éclaircir les relations entre les variables physiques et les signaux internes engagés dans la perception spatiale visuelle. Une ligne verticale du monde (line-in-space, $L_S = 0$) apparait devant un observateur incliné (head-in-space, $H_S = 90°$). La rotation de la tête et la contre-torsion oculaire (OCR, eye-in-head E_H) a pour résultat une inclinaison de l'image rétinienne nette (line-on-eye, L_E) selon: $L_E = L_S - (H_S + E_H)$. Le signal $\hat{H}_S$, codant l'orientation de la tête dans l'espace, est supposé être précis mais est contaminé par le bruit Gaussien avec une amplitude qui augmente de façon linéaire avec l'angle de l'inclinaison (cadre noir ci-dessus, le niveau de gris code la probabilité). De même, le signal $\hat{E}_H$, codant l'orientation de l'œil dans la tête, est précis mais contaminé par un bruit Gaussien indépendant. L'observateur idéal utilise la stratégie Bayésienne pour obtenir une estimation optimale de la tête dans l'espace ($\sim H_S$) et de l'œil dans la tête ($\sim E_H$) pour reconstruire l'orientation de l'œil dans l'espace ($\sim E_S$). Ce dernier signal est alors combiné avec le signal de la rétine ($\sim L_E$) pour obtenir une estimation interne de l'orientation de la ligne par rapport à la gravité ($\sim L_S$). Les secteurs orange dans le schéma Bayésien symbolisent l'étendue des distributions sensorielles et préalables. La règle de décision (δ) sélectionne l'angle ayant une probabilité a posteriori maximum (MAP). Notons que les estimations de $\sim E_H$ et $\sim H_S$ ont des effets biaisant opposés sur l'orientation de la ligne perçue dans l'espace et que $\sim L_S$, dans l'exemple illustré, n'est pas véridique de telle façon qu'une ligne verticale du monde n'apparait pas droite pour l'observateur incliné. Si l'observateur, dans cet exemple particulier, devait ajuster la ligne sur la verticale subjective (SVV), le modèle prédit une erreur allant dans le sens des aiguilles d'une montre, ce qui reviendrait à obtenir un effet-A. Si l'erreur dans $\sim E_H$ est plus importante que dans $\sim H_S$, le modèle prédit un effet opposé (effet-E).*

L'utilisation des connaissances préalables affecte les estimations d'inclinaisons de la tête dans l'espace et de l'œil dans la tête de deux manières : cela biaise les estimations vers des angles plus petits (précision réduite) mais abaisse l'incertitude due au bruit sensoriel (fiabilité augmentée). Cette stratégie, l'échange précision-justesse, est particulièrement utile pour les petites inclinaisons, qui sont les plus courantes dans la vie quotidienne.

Le système nerveux central (SNC) étant le siège de la construction de notre perception multisensorielle, l'une des hypothèses expliquant la variabilité individuelle pourrait se situer dans l'activité neurale et notamment dans une sollicitation hémisphérique différente d'un individu à l'autre.

III. Bases neurales de l'intégration multisensorielle

Deneve et Pouget (Deneve & Pouget, 2004) ont soulevé 2 difficultés concernant l'intégration multisensorielle, (1) la fiabilité des modalités sensorielles varie de façon importante selon le contexte, et (2) chaque modalité sensorielle utilise un système de coordonnées différent pour coder les mêmes propriétés de l'environnement ou du corps. Des calculs élaborés sont alors nécessaires pour interpréter les réponses neurales correspondant au même objet dans différentes aires sensorielles. Suite à plusieurs études, ils ont montré que l'approche Bayésienne semblait être une méthode appropriée à l'intégration multisensorielle et nous propose une explication détaillée de l'utilisation de la règle Bayésienne en prenant l'exemple d'un objet qui serait vu et entendu simultanément.

Deneve et Pouget (Deneve & Pouget, 2004) (p250-251) : " La règle Bayésienne permet la combinaison de multiples sources d'information à propos d'une quantité *x*, par exemple la position d'un objet qui peut être vu et entendu en même temps. Etant donné le bruit contenu dans les réponses neurales dans le cortex visuel, $\mathbf{r}_{vis}$, la position de l'objet est très probablement proche des champs réceptifs des cellules les plus activées, mais cette position ne peut être déterminée avec une infime précision à cause de la présence du bruit neurale. Etant donnée l'incertitude associée à *x*, une stratégie optimale est de calculer la probabilité a postériori que l'objet soit à une position *x* étant donnée l'activité des neurones visuels, $P(x|\boldsymbol{r}_{vis})$. En utilisant la règle de Bayes, $P(x|\boldsymbol{r}_{vis})$ peut être obtenue en combinant la distribution de l'incertitude neurale $P(\boldsymbol{r}_{vis}|x)$ avec la connaissance de prior sur la distribution de la position de l'objet $P(x)$ et la probabilité des priors stockés en mémoire des réponses neurales $P(\boldsymbol{r}_{vis})$:

Equation (1)

$$P(x|\boldsymbol{r}_{vis}) = \frac{P(\boldsymbol{r}_{vis}|x)P(x)}{P(\boldsymbol{r}_{vis})}$$

Cette distribution est appelée une probabilité a postériori parce qu'elle renvoie à la probabilité d'estimer la position d'un objet après avoir pris en compte l'entrée sensorielle, $\boldsymbol{r}$ (en opposition au prior $P(x)$ qui est indépendant de $\boldsymbol{r}$). $P(x|\boldsymbol{r}_{vis})$ représente une densité de distribution bruitée parce que cela correspond à la variabilité des réponses neurales pour un stimulus donné, c.-à-d. à la variabilité qui n'est pas expliquée par le stimulus.

Notons plusieurs points importants à propos de l'équation (1). Tout d'abord, nous pouvons ignorer le dénominateur, $P(\boldsymbol{r}_{vis})$, parce qu'il est indépendant de *x*, et *x* est la seule variable à laquelle nous nous intéressons. Ensuite, $P(\boldsymbol{r}_{vis}|x)$ peut être mesurée

expérimentalement en présentant de façon répétitive un objet à la même position *x* et en mesurant la variabilité dans $\boldsymbol{r}_{vis}$ (c'est pourquoi nous appelons ce terme la densité de distribution "bruité"). Enfin, si nous arrivons à savoir que l'objet va plus vraisemblablement apparaitre à certains endroits que d'autres, nous pouvons représenter cette connaissance dans la distribution des priors *P(x)*. Dans cette partie, nous postulerons que toutes les positions sont également vraisemblable, c.-à-d. que $P(x) = c$, où *c* est une constante. Cela implique que *P(x)* ne dépend pas de *x*, dans ce cas nous pouvons l'ignorer aussi. Donc, l'équation (1) est réduite à :

Equation (2)

$$P(x|\boldsymbol{r}_{vis}) \propto P(\boldsymbol{r}_{vis}|x)$$

Une fois la distribution a postériori calculée, une estimation de la position d'un objet peut être obtenue en retrouvant la valeur de *x* qui maximise la distribution :

$$x_{vis} = arg\ max P(x|\boldsymbol{r}_{vis})$$

Ceci est connu comme l'estimation a posteriori maximum (maximum de vraisemblance), ou pour raccourcir l'estimation MAP.

Lorsque nous entendons l'objet, une distribution a postériori similaire, $P(x|\boldsymbol{r}_{aud})$, et son estimation correspondante, x_{aud}, peuvent être calculées en tenant compte de l'incertitude contenue dans les voies neurales en charge de l'audition, $\boldsymbol{r}_{aud}$.

Comment évolue l'incertitude lorsque l'objet est entendu et vu en même temps ? En utilisant la même approche, nous pouvons calculer l'estimation, x_{bim} ("bim" utilisé pour bimodale) maximisant la distribution a postériori, $P(x|\boldsymbol{r}_{vis},\boldsymbol{r}_{aud})$:

$$x_{bim} = arg\ max P(x|\boldsymbol{r}_{vis}, \boldsymbol{r}_{aud})$$

Pour calculer la distribution a postériori, nous utilisons la règle de Bayes, qui sous l'hypothèse d'une distribution des priors aplatie, est réduite à :

Equation (3)

$$P(x|\boldsymbol{r}_{vis}, \boldsymbol{r}_{aud}) \propto P(\boldsymbol{r}_{vis}, \boldsymbol{r}_{aud}|x)$$

Equation (4)

$$P(x|\boldsymbol{r}_{vis}, \boldsymbol{r}_{aud}) \propto P(\boldsymbol{r}_{vis}|x)P(\boldsymbol{r}_{aud}|x)$$

Equation (5)

$$P(x|\boldsymbol{r}_{vis}, \boldsymbol{r}_{aud}) \propto P(x|\boldsymbol{r}_{vis})P(x|\boldsymbol{r}_{aud})$$

Pour passer de l'équation (3) à (4), nous postulons que le bruit convoyé par les voies visuelles (corrompant l'estimation dans cette modalité) est indépendant de celui corrompant les neurones auditifs (ce qui semble raisonnable étant donné la distance séparant ces neurones dans le cortex). Le passage de l'équation (4) à (5) est une conséquence de l'équation (2). A partir de l'équation (5), nous voyons que la distribution a postériori bimodale peut être obtenue en faisant simplement le produit des distributions uni-modales. Un exemple de cette opération est illustré dans la Figure 5.

Lorsque $P(x|\boldsymbol{r}_{vis})$ et $P(x|\boldsymbol{r}_{aud})$ sont des distributions de probabilité gaussiennes, comme cela est le cas dans la Fig. 5, l'estimation bimodale x_{bim} peut être obtenue en

combinant linéairement les estimations uni-modales x_{vis} et x_{aud}, pondérée par leur fiabilité respectives :

Equation (6)

$$x_{bim} = \frac{1/\sigma^2_{vis}}{1/\sigma^2_{vis} + 1/\sigma^2_{aud}} x_{vis} + \frac{1/\sigma^2_{aud}}{1/\sigma^2_{vis} + 1/\sigma^2_{aud}} x_{aud}$$

où $1/\sigma^2_{vis}$ et $1/\sigma^2_{aud}$, la fiabilité respective des estimations auditives et visuelles, sont l'inverse des variances des probabilités a postériori visuelles et auditives. En particulier, si l'entrée visuelle est plus fiable que l'entrée auditive (σ^2_{vis} plus petit que σ^2_{aud}) alors l'estimation bimodale de la position (le pic max de la distribution = maximum de vraisemblance) devrait être plus proche de l'estimation visuelle et inversement si l'audition est plus fiable que la vision."

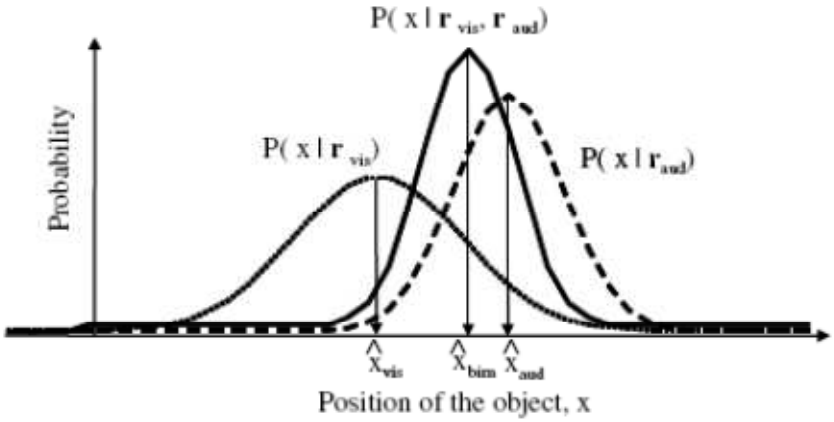


***Figure 5**. Probabilité a postériori de la position d'un objet en fonction du signal visuel (ligne pointillée), du signal auditif (tirets) et des signaux visuels et auditifs combinés (ligne pleine). x_{vis}, x_{aud} et x_{bim} correspondent à l'estimation MAP (a posteriori maximum) de la position de l'objet en s'appuyant sur le signal visuel seul, le signal auditif seul et la combinaison des 2 signaux.*

Malheureusement, le modèle Bayésien ne dit rien sur les mécanismes neuraux par lesquels une telle intégration peut être effectuée. La façon dont la distribution des fiabilités et des probabilités est représentée dans les réseaux de neurones n'est pas claire ; en particulier, la question de la correspondance sensorielle spatiale n'est pas résolue. L'existence de liens spatiaux entre les modalités sensorielles est appuyée par l'existence d'effets inter-modalité sur l'attention spatiale. Driver et Spence (Driver & Spence, 1998) ont montré la capacité du SNC à effectuer des transformations coordonnées entre les cadres de références lorsque ces derniers ont été modifiés. Les études effectuées sur des patients présentant des lésions cérébrales (Ladavas, Pavani, & Farne, 2001; Mattingley, Driver, Beschin, & Robertson, 1997) ont confirmé cette capacité. Présentés simultanément, un stimulus sensoriel (ex : visuel) éteint la perception d'un autre (ex : tactile) pourtant perçu lorsqu'il est isolé. La question des mécanismes neuraux mis en œuvre dans ces liens spatiaux inter-modalités se pose alors. Deux hypothèses ont été avancées : (1) la cartographie sensorielle où toutes les entrées sensorielles seraient recodées dans un cadre de référence commun dans une aire cérébrale multisensorielle et (2) l'influence inter-modalités directe où l'activité dans une aire cérébrale uni-modale influencerait l'activité dans une autre aire uni-modale. Macaluso et Driver (Macaluso & Driver, 2001) ont mis en évidence l'existence d'une aire multisensorielle activée par des stimuli tactile et visuel simultanés différente des aires uni-modales activées par les stimuli visuels ou tactiles seuls ; soutenant ainsi l'hypothèse (1) de la cartographie sensorielle. Cependant dans les mêmes études, ils ont observé que l'activité dans l'aire visuelle uni-modale en réponse à un stimulus visuel était renforcée par un stimulus tactile simultané au même endroit. Dans, leur étude, Brandt et al. (Brandt, Bartenstein, Janek, & Dieterich, 1998) ont mis en évidence l'existence d'interactions visuo-vestibulaires inhibitrices réciproques. En effet, ils ont

montré qu'une stimulation de mouvement visuel provoquant une vection circulaire (la vection circulaire est induite par une stimulation de mouvement visuel de grande taille angulaire durant laquelle le sujet immobile perçoit l'environnement en mouvement autour de lui comme stable et lui-même comme étant mobile) n'active pas seulement l'aire visuelle pariéto-occipital mais désactive simultanément le cortex vestibulaire pariéto-insulaire. D'autres études (Eimer & Driver, 2001; Kennett, Eimer, Spence, & Driver, 2001) ont démontrés l'existence d'interactions inter-modalité, concernant l'attention, lors de la modulation des réponses sensorielles uni-modales par les entrées venant d'autres modalités sensorielles, soutenant ainsi l'hypothèse (2) de l'influence inter-modalités directe. L'existence des zones de convergence sensorielle ainsi que des influences inter-modalités sur les aires cérébrales uni-modale suppose un effet feedforward des aires uni-modales sur les aires multimodales et un effet feedback des aires multimodales sur les aires uni-modales. Plusieurs études (Stein & Meredith, 1994; Wallace, Wilkinson, & Stein, 1996; Wallace, Meredith, & Stein, 1998) ont mis en évidence l'existence d'un phénomène appelé « renforcement multisensoriel » où l'activité des aires neurales en réponse à des stimuli bimodaux est plus importante que l'activité des aires neurales en réponse à un stimulus uni-modal. Ce renforcement est considéré comme une signature de l'intégration multisensorielle et disparaît lorsque les stimuli visuel et auditif ne sont pas congruent dans l'espace ou dans le temps.

Il apparait donc clair que le traitement des signaux sensoriels et leur intégration finale par le système nerveux central est dans une large mesure liée à la minimisation de l'incertitude spatiale, et ce dans un format rappelant celui des règles probabilistes Bayésiennes.

Dans leurs études, Zoccolotti et Oltman (Zoccolotti & Oltman, 1978) ont observé, lors de tâches de discernement de lettres, des différences de comportement entre des sujets indépendants et dépendants au champ visuel. Les premiers ont montré un temps de réaction significativement meilleur quand la tâche de discernement de lettres avait lieu dans l'hémichamp visuel droit comparé à une présentation dans l'hémichamp visuel gauche ; tandis que les deuxièmes n'ont montré aucune différence entre une présentation dans l'hémichamp visuel droit ou gauche. Dans une seconde étude, ils ont fait le même constat pour une tâche de discernement de lettres chez les indépendants au champ visuel, mais, ont en plus montré une supériorité significative de l'hémichamp visuel gauche pour une tâche de discernement de visage chez ces mêmes sujets. Les sujets dépendants ont montré aucune différence entre présentation dans l'hémichamp droit ou gauche et ce quelque soit le type de tâche. Ces résultats soutiennent l'hypothèse de l'existence d'un lien entre le profil sensoriel d'un individu et la spécialisation des fonctions de ses hémisphères cérébraux.

Selon Bradshaw et Nettleton (Bradshaw & Nettleton, 1981), l'hémisphère droit surpasserait le gauche dans le traitement holistique des signaux visuels tandis que le gauche le serait pour le traitement analytique. Le traitement analytique peut se définir comme un traitement segmenté de l'ensemble visuel, séparé en composants, traits ou éléments au contraire du traitement holistique qui met l'accent sur la configuration entière de la scène visuelle et sur les interrelations entre les différents composants, traits ou éléments.

Dans leur revue de littérature, Lopez et al. (Lopez et al., 2005) font apparaitre l'existence d'un "réseau d'aires vestibulaires largement distribuées sur le cortex cérébral", laissant penser qu'il n'existe pas de cortex vestibulaire primaire, contrairement à ce qui est observé pour les modalités visuelles ou auditives. Les aires vestibulaires seraient des aires d'intégration plurimodalitaire et assureraient la convergence d'informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. Des études réalisées en IRMf et en TEP font ressortir que non seulement de nombreuses aires cérébrales voient leur débit sanguin augmenter lors de stimulations vestibulaires, mais aussi que plusieurs aires cérébrales sont inactivées. Tiecks et al. (Tiecks, Planck, Haberl, & Brandt, 1996), ont, par exemple, montré une diminution du débit sanguin dans l'artère cérébrale postérieure irriguant le cortex visuel concomitante d'une augmentation du débit sanguin dans l'artère cérébrale moyenne irriguant le cortex vestibulaire, lors de stimulations vestibulaires caloriques. Dans le même esprit, Brandt et al. (Brandt et al., 1998) ont observé une inactivation du cortex vestibulaire pariéto-insulaire (CVPI) lors de stimulations optocinétiques, reflétant des interactions visuo-vestibulaires de nature inhibitrice. Ce mécanisme d'inhibition viserait à atténuer le poids des informations vestibulaires lorsque les informations visuelles acquièrent une pertinence forte pour coder les déplacements du corps dans un environnement donné. Ainsi, l'illusion de mouvement du corps propre (vection) induite par le déplacement d'une scène visuelle (par exemple, le mouvement d'un train à côté de celui à l'arrêt dans lequel je me trouve) pourrait s'expliquer par l'inactivation des aires vestibulaires empêchant ainsi de rectifier la "fausse" information de mouvement donnée par les récepteurs visuels.

Selon Berthoz (Berthoz, 1997), il y a 2 manières de concevoir l'élaboration de la verticale subjective. La 1ère consisterait à considérer qu'elle est le résultat d'une addition

de toutes les verticales perçues par les divers systèmes sensoriels. La 2nd consisterait à dire qu'il existe, au niveau cérébral, un modèle interne de la verticale qui serait modulé par la configuration des capteurs. Ces 2 conceptions n'impliquent pas la même organisation neurale : l'une va de la périphérie au centre, l'autre du centre à la périphérie.

Il existe donc plusieurs sources d'informations (visuelle, proprioceptive,…) pour se construire une perception adaptée de notre environnement. Les études précédentes portant sur les modèles de pondération ou repondération sensorielle (MLE, WTA,…) ne mentionnent pas de différence interindividuelle. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à cette problématique et essayons de voir si la variabilité interindividuelle résulte de l'utilisation de règles de combinaison des signaux sensoriels différent d'un sujet à l'autre et plus ou moins efficace pour réduire les différentes sources d'incertitude (règles qui s'éloignent de la règle optimale de réduction de l'incertitude).

IV. Hypothèses et prédictions

Lors de ce travail nous avons voulu tester deux hypothèses principales. La 1ère est que les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiales dépendent du choix du référentiel. La 2nd hypothèse est que l'un des facteurs explicatifs de la variabilité interindividuelle lors de tâches de perception d'orientation spatiale se situe au niveau des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus.

Enfin dans l'hypothèse de stratégie d'intégration multisensorielle avérée, nous essayerons de voir à quel niveau se situe-t-elle : 1) les référentiels, 2) les signaux, ou 3) les deux à la fois.

Les expériences menées durant ce travail ont ainsi pour objectif d'éclaircir cette problématique.

L'utilisation régulière du Rod-and-Frame Test (RFT) dans cette thèse nous amène, dans la 1ère expérience, à vérifier sa fiabilité lors d'une expérience en test-retest. L'hypothèse est qu'aucune différence ne devrait être observée entre 2 sessions expérimentales (test puis retest) espacé d'une heure.

Dans la 2ème expérience, nous essayerons de développer le cadre méthodologique afin de nous mettre, pour les expériences suivantes, dans les conditions maximisant les effets de désorientation. La littérature laissant apparaître une différence entre la passation d'un RFT 2D et d'un RFT 3D, nous avons cherché à développé un stimulus 2D enrichi en signaux géométriques (c.à.d. d'éléments parallèles ou orthogonaux) et cognitifs additionnels déterminant la direction visuelle haut/bas (c.à.d. d'objets polarisés significatifs) permettant d'amplifier la désorientation. L'hypothèse est que la passation d'un RFT avec ce type de stimuli devrait permettre d'obtenir des effets de désorientation proches de ceux obtenus lors de la passation d'un RFT 3D.

Dans l'expérience 3, nous étudierons les conséquences de la manipulation d'un cadre de référence sur la perception de la verticale gravitaire, et notamment sur le niveau de certitude qui en découle. Plusieurs méthodes d'estimation de la certitude seront comparées (la variabilité intraessai, la variance interessai et la zone de certitude perçue). Nous mettrons ensuite en relation cette certitude perçue avec le degré de

dépendance au champ des individus, l'hypothèse étant que plus un individu est dépendant à un cadre de référence plus son niveau de certitude sera important.

Dans les expériences 4 et 5, nous étudierons l'effet de la désorientation ou au contraire de la fiabilisation d'un ou plusieurs cadres de référence sur la perception de l'orientation spatiale. Nous essayerons de voir quelles peuvent être les stratégies utilisées par les individus afin de combiner l'ensemble des informations sensorielles dont ils disposent. Nous testerons plusieurs modèles d'intégration multisensorielle ou de combinaison de référentiels et faisons l'hypothèse qu'une règle de pondération des signaux sensoriels au prorata de leur fiabilité afin de minimiser l'incertitude pourrait être adaptée à une tâche de perception de l'orientation spatiale.

Enfin, dans l'expérience 6, nous tenterons de mettre en relation ces stratégies d'intégration multisensorielle avec le profil de dépendance perceptive à l'égard du référentiel visuel (DRV/IRV) des individus. Pour cela, nous confronterons 2 groupes d'individus (DRV et IRV) à plusieurs contextes environnementaux (perturbation du cadre de référence visuel et/ou fiabilisation de l'information proprioceptive) et testerons plusieurs règles d'intégration multisensorielle. L'hypothèse est que les 2 groupes d'individus diffèrent quant aux règles utilisées pour combiner l'ensemble des informations sensorielles.

Au cours de ce travail, nous tenterons de mettre en relation les stratégies d'intégration multisensorielle avec le profil perceptif (DRV/IRV) des individus. Pour cela, nous manipulerons le cadre de référence visuel (via la présence ou non d'un environnement visuel non-aligné avec l'orientation gravitaire) et/ou le cadre de

référence proprioceptif (via la déviation du centre de masse d'un segment corporel ou via la recherche d'un équilibre postural ou via la restitution d'information musculaire et proprioceptive lors de la mise en charge de l'individu). Nous mettrons les individus dans des situations où les référentiels sont fortement redondants (tous les cadres de références sont alignés, congruents) ou au contraire dans des situations où les référentiels ne sont pas redondants (plusieurs cadres de référence ne sont pas alignés entre eux, ils sont discongruents, par exemple le visuel et le proprioceptif) et testerons l'utilisation de différentes règles d'intégration multisensorielle. L'hypothèse est que les sujets les plus indépendants (IC) auraient tendance à utiliser des règles de pondération type MLE pour combiner les différents cadres de référence ; ils auraient en effet la capacité à repérer le(s) cadre(s) de référence biaisé(s) et seraient capables de mettre plus de poids sur le(s) cadre(s) de référence non biaisé(s). A contrario, les sujets dépendants (DC) ne seraient pas capables de se soustraire à l'influence du(es) cadre(s) de référence biaisé(s) et les combineraient sans hiérarchiser un cadre de référence. Une règle de combinaison des cadres de référence non-pondérée (i.e., une simple moyenne des différents cadres de référence) correspondrait ainsi davantage à ce type d'individu (cf. Figure 6). Une règle de combinaison pondérée (i.e., une moyenne pondérée des différents cadres de référence) aurait tendance à sous-estimer les résultats obtenus par les sujets dépendants (DC) tandis qu'une règle non-pondérée pourrait surestimer les résultats des indépendants (IC).

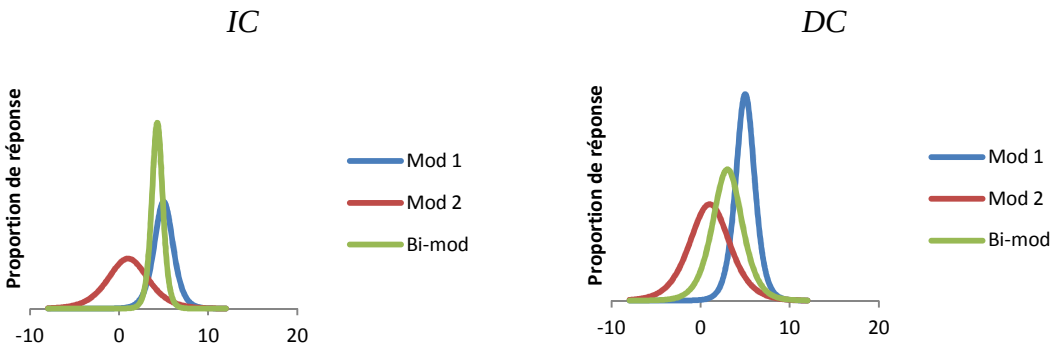


***Figure 6**. Hypothèse de probabilité de réponse attendue dans la modalité de réponse combinée (Bi-mod) à partir des résultats observés dans 2 modalités isolées (Mod 1 et Mod 2) en fonction du profil perceptif des individus (IC vs DC).*

Partie expérimentale

Au cours d'expériences préliminaires (expériences 1 et 2), nous chercherons à développer le cadre méthodologique afin de nous mettre, pour les expériences suivantes, dans les conditions maximisant les effets de désorientation. Lors des expériences suivantes (expériences 3, 4, 5 et 6), nous étudierons l'effet de la désorientation ou au contraire de la fiabilisation d'un ou plusieurs cadres de référence sur la perception de l'orientation spatiale et les stratégies visant à minimiser l'incertitude spatiale pouvant être utilisées par les individus afin combiner l'ensemble des informations sensorielles dont ils disposent.

I. Expérience 1 : Fiabilité du RFT

L'objectif de cette première expérience était d'évaluer la fiabilité test-retest de la dépendance-indépendance des sujets à l'égard du référentiel visuel (effet stable et reproductible dans le temps) obtenue via le Rod-and-Frame Test (RFT), test classiquement utilisé pour évaluer la dépendance-indépendance des sujets à l'égard du champ visuel (DIC) statique (Asch & Witkin, 1948a; Isableu, Gueguen, Fourre, Giraudet, & Amorim, 2008; Oltman, 1968; Witkin & Asch, 1948a) et que nous utiliserons régulièrement tout au long de cette thèse. Différentes études (Kato, 1965; Witkin et al., 1954), s'intéressant à cette question, ont affirmé que le RFT était un test fiable. Cependant, elles n'ont pas, à notre connaissance, distinguées la fiabilité du RFT en fonction du sens de l'inclinaison du cadre, or il apparait dans la littérature que l'effet

d'inclinaison du cadre semble différer selon le sens de cette inclinaison (Guerraz, Poquin, & Ohlmann, 1998). Un cadre incliné à gauche par rapport à la verticale gravitaire semblerait désorienter plus les individus qu'un cadre incliné à droite. Nous avons donc voulu vérifier la fiabilité du RFT, en comparant les scores obtenus lors de deux sessions expérimentales identiques espacées par un intervalle d'une heure.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

20 sujets volontaires d'au moins 18 ans, âgés en moyenne de 28 ans (±6,5 ans) et pouvant se rendre libre à 1h d'intervalle, ont réalisé cette expérience. Aucun sujet ne présentait de problème moteur, de trouble neurologique ou de déficit sensoriel connu pouvant affecter leur capacité à effectuer cette tâche d'orientation spatiale. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Les sujets étaient assis, la tête distante de 60 cm devant un écran blanc, sur lequel une baguette noire était projetée (1cm d'épaisseur, taille angulaire de 14° x 0,5°). L'écran était entouré par un cadre visuel statique (105cm de long, côté de 46 x 46cm) similaire à celui utilisé par Oltman (Oltman, 1968) (taille angulaire de 25° x 25°). Le cadre était incliné à ± 18°. Du point de vue de l'observateur, un codage négatif indiquait

une inclinaison à droite par rapport à la verticale gravitaire, et un codage positif signifiait une inclinaison à gauche, comme dans le sens trigonométrique. Afin de nous mettre dans les conditions maximisant l'effet du cadre, nous avons opté pour une version 3D du RFT offrant une stimulation visuelle d'une plus grande taille angulaire qu'une version 2D (Isableu et al., 2008) et pour une inclinaison du cadre de ± 18° car d'après la littérature (Brenet & Luyat, 1995; Bringoux et al., 2009; Oltman, 1968), ces orientations du cadre induisent un effet cadre de plus grande amplitude (cf. Figure 7).

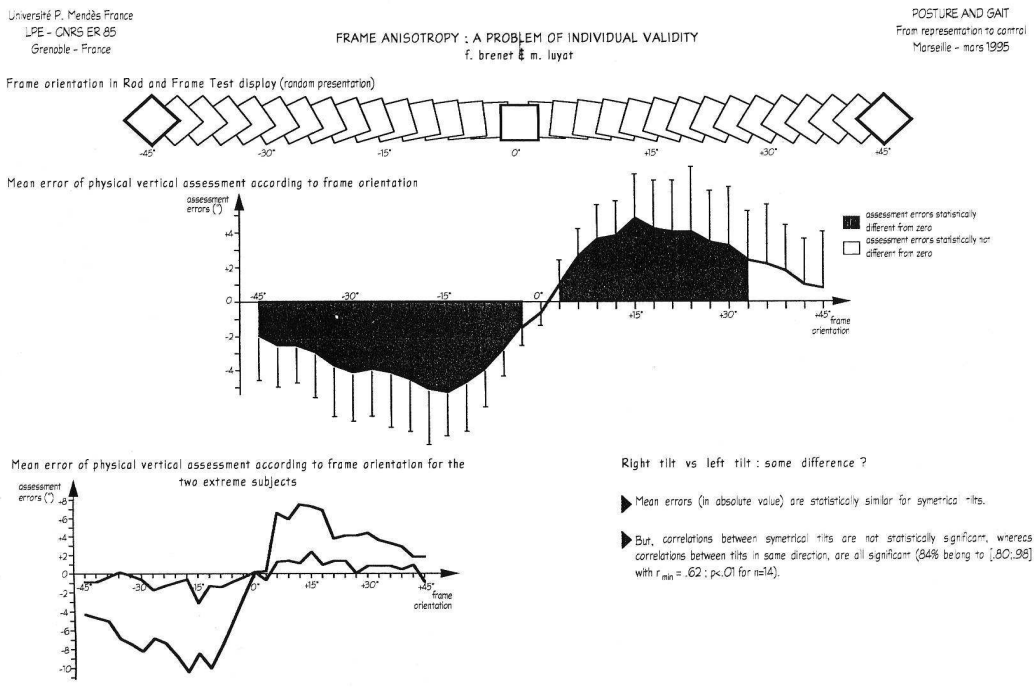


Figure 7*. Issue de Brenet et Luyat (Brenet & Luyat, 1995).*

Les sujets étaient en position assise, avec les jambes tendues reposant sur les talons et la tête libre (Bringoux et al., 2009; Isableu et al., 1997). Il leur était demandé de tourner la baguette, initialement incliné à ± 18°, en utilisant les flèches droite et gauche d'un clavier, afin de la réaligner sur la verticale gravitaire. Aucune limite de temps ne leur était donnée, ils devaient juste être le plus précis possible. A la fin de l'ajustement, l'orientation finale de la baguette était enregistrée (angle formé par l'axe

longitudinal de la baguette et la verticale gravitaire) au moyen d'un logiciel développé au sein du laboratoire CIAMS. Une nouvelle baguette, inclinée à ± 18°, apparaissait ensuite. La précision du système d'enregistrement était de 0,03°. 20 essais (10 avec une baguette initialement inclinée à -18° et 10 avec une baguette inclinée à +18°) était effectués face à un cadre statique incliné à -18° et 20 essais avec un cadre incliné à +18°. L'ordre des deux blocs de 20 essais était aléatoire, c.à.d. que 10 sujets ont commencé par les 20 essais avec le cadre incliné à -18° tandis que les 10 autres sujets ont commencé par les 20 essais avec le cadre incliné à +18°.

Les sujets ont répété l'expérience une heure après la fin de la 1ère session.

iii. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques suivantes ont été effectuées avec le logiciel R 2.0.1. Comme Pinsault et al. (Pinsault et al., 2008; Pinsault & Vuillerme, 2009), la fiabilité test-retest été estimé au moyen des coefficients de corrélation intra-classe (CCI). Nous avons suivi la classification de Fleiss (Fleiss, 1986) et estimé que :

- Une valeur du CCI supérieure à 0,75 signifiait une excellente fiabilité ;
- Une valeur du CCI comprise entre 0,40 et 0,75 signifiait une fiabilité moyenne ;
- Une valeur du CCI inférieure à 0,40 signifiait une faible fiabilité.

De plus, la méthode de Bland et Altman (Bland & Altman, 1986), qui inclue un nuage de point des différences entre test et retest par rapport à la moyenne test-retest, a aussi été utilisé pour définir l'ampleur de la divergence entre les valeurs du test et du retest. Cette méthode inclut également les limites d'agrément (LdA) à 95% des

différences, la différence moyenne et son intervalle de confiance à 95% (IC). Pour évaluer les changements au cours du temps chez un individu, l'ampleur du changement doit dépasser la variabilité inhérente aux résultats. Dans ce contexte, les LdA peuvent être utilisées pour estimer un changement réel dans la performance d'un individu (c.à.d. si la différence entre 2 mesures est extérieure aux LdA, alors il y a un réel changement dans la performance).

L'erreur standard de mesure (ESM) et l'IC à 95% des valeurs du CCI ont aussi été calculés pour toutes les variables dépendantes. L'utilisation de l'IC à 95% permet de montrer les variations possibles des valeurs de CCI si l'on reproduisait l'expérience, et l'ESM indique le degré d'imprécision de la mesure.

b. Résultats

Durant la première session, pour tous les essais avec le cadre incliné à +18°, l'erreur moyenne d'ajustement était de 6,2° ± 4,1° (moyenne ± écart-type) et de -5,8° ± 4,4° lorsque le cadre était incliné à -18°. Durant la 2ème session, l'erreur moyenne d'ajustement était de 5,1° ± 4,9° lorsque le cadre était incliné à +18° et -4,6° ± 4,1° avec le cadre incliné à -18°.

La moyenne (± écart-type,) pour le test et le retest ; la différence moyenne et l'IC à 95% ; l'ESM, le CCI, l'IC à 95% du CCI et les LdA à 95% obtenus lors de cette étude sont présentés dans le tableau 1 pour la condition où le cadre est incliné à +18° et dans le tableau 2 lorsque le cadre est incliné à -18°. Ces valeurs sont calculées pour chaque essai à partir des réponses des 20 sujets.

Numéro de l'essai	Inclinaison initiale de la baguette (°)	Test (°)	Retest (°)	Différence moyenne (IC à 95%)	ESM (°)	CCI (IC à 95%)	LdA à 95%
1	+18	5,1 (3,1)	3,6 (3,8)	1,5 (-0,4 – 3,5)	0,5	0,25 (0,00 – 0,69)	-6,8 – 9,8
	-18	6,8 (4,3)	5,0 (6,0)	1,9 (-0,8 – 4,6)	0,6	0,36 (0,00 – 0,91)	-9,8 – 13,6
2	+18	5,1 (3,2)	4,3 (4,0)	0,8 (-1,0 – 2,6)	0,6	0,35 (0,00 – 0,81)	-7,0 – 8,6
	-18	6,8 (4,1)	5,4 (5,5)	1,5 (-0,4 – 3,4)	0,6	0,5 (0,00 – 0,95)	-6,7 – 9,7
3	+18	5,1 (3,8)	4,3 (4,7)	0,8 (-1,1 – 2,7)	0,7	0,44 (0,00 – 0,84)	-7,4 – 8,9
	-18	7,3 (4,4)	5,7 (5,1)	1,5 (-0,1 – 3,2)	0,7	0,59 (0,12 – 0,96)	-5,5 – 8,6
4	+18	4,8 (3,8)	4,4 (4,6)	0,3 (-0,8 – 1,5)	0,8	0,60 (0,16 – 0,88)	-4,8 – 5,5
	-18	7,1 (4,2)	5,5 (5,3)	1,6 (-0,2 – 3,4)	0,8	0,61 (0,17 – 0,96)	-6,1 – 9,4
5	+18	5,6 (3,3)	4,1 (4,4)	1,5 (-0,5 – 3,6)	0,7	0,55 (0,06 – 0,88)	-7,4 – 10,4
	-18	6,6 (4,6)	5,2 (5,7)	1,4 (-0,7 – 3,5)	0,8	0,62 (0,18 – 0,97)	-7,5 – 10,4
6	+18	5,1 (4,3)	4,6 (4,3)	0,5 (-1,5 – 2,5)	0,8	0,56 (0,11 – 0,89)	-8,1 – 9,1
	-18	6,9 (4,5)	5,8 (5,4)	1,0 (-0,5 – 2,5)	0,8	0,66 (0,23 – 0,97)	-5,4 – 7,5
7	+18	5,1 (3,9)	4,6 (4,6)	0,5 (-1,1 – 2,1)	0,8	0,59 (0,12 – 0,90)	-6,3 – 7,3
	-18	7,0 (3,9)	5,8 (5,2)	1,3 (-0,2 – 2,7)	0,8	0,68 (0,26 – 0,97)	-5,0 – 7,6
8	+18	5,6 (4,2)	4,5 (4,0)	1,1 (-0,1 – 2,4)	0,8	0,63 (0,14 – 0,91)	-4,2 – 6,5
	-18	7,2 (4,7)	6,4 (5,5)	0,8 (-0,7 – 2,4)	0,8	0,70 (0,28 – 0,97)	-5,6 – 7,3
9	+18	6,2 (3,6)	5,1 (4,4)	1,1 (-0,7 – 3,0)	0,8	0,62 (0,16 – 0,92)	-6,9 – 9,2
	-18	7,4 (4,5)	6,2 (5,7)	1,2 (-0,7 – 3,0)	0,8	0,70 (0,29 – 0,97)	-6,8 – 9,1
10	+18	6,3 (3,9)	5,0 (5,2)	1,3 (-0,8 – 3,3)	0,8	0,62 (0,13 – 0,93)	-7,5 – 10,1
	-18	7,3 (4,3)	6,3 (5,8)	1,0 (-0,7 – 2,6)	0,8	0,71 (0,30 – 0,97)	-6,2 – 8,1

Tableau 1. *Moyenne (±écart-type,) ; la différence moyenne et l'IC à 95% ; l'ESM, le CCI, l'IC à 95% du CCI et les LdA à 95% lorsque le cadre est incliné à +18°.*

Numéro de l'essai	Inclinaison initiale de la baguette (°)	Test (°)	Retest (°)	Différence moyenne (IC à 95%)	ESM (°)	CCI (IC à 95%)	LdA à 95%
1	+18	-3.5 (3.8)	-2.6 (3.7)	-0.9 (-2.0 – 0.1)	0.9	0.79 (0.48 – 0.94)	-5.6 – 3.7
	-18	-6.7 (4.8)	-5.2 (4.1)	-1.6 (-2.4 – -0.8)	0.9	0.88 (0.73 – 0.94)	-5.0 – 1.8
2	+18	-4.2 (4.4)	-3.1 (3.5)	-1.2 (-2.4 – 0.1)	0.9	0.81 (0.53 – 0.94)	-6.3 – 4.0
	-18	-6.5 (4.4)	-4.7 (4.1)	-1.7 (-2.9 – -0.6)	0.9	0.84 (0.68 – 0.93)	-6.7 – 3.2
3	+18	-4.6 (4.0)	-3.7 (4.0)	-0.9 (-2.2 – 0.4)	0.9	0.83 (0.59 – 0.94)	-6.5 – 4.7
	-18	-6.5 (4.4)	-4.9 (4.2)	-1.6 (-2.6 – -0.5)	0.9	0.86 (0.71 – 0.94)	-6.0 – 2.9
4	+18	-5.0 (5.0)	-3.6 (3.9)	-1.5 (-3.2 – 0.2)	0.9	0.80 (0.53 – 0.92)	-8.7 – 5.8
	-18	-6.8 (4.3)	-5.2 (4.3)	-1.7 (-2.7 – -0.7)	0.9	0.86 (0.72 – 0.94)	-5.8 – 2.5
5	+18	-4.7 (4.3)	-4.2 (4.7)	-0.5 (-2.0 – 1.0)	0.9	0.80 (0.52 – 0.92)	-6.9 – 6.0
	-18	-6.8 (5.0)	-5.0 (4.1)	-1.9 (-3.3 – -0.4)	0.9	0.84 (0.67 – 0.93)	-8.2 – 4.5
6	+18	-5.3 (3.4)	-4.1 (3.9)	-1.2 (-2.5 – 0.2)	0.9	0.79 (0.54 – 0.92)	-7.1 – 4.7
	-18	-6.3 (4.9)	-5.0 (3.8)	-1.2 (-2.2 – -0.2)	0.9	0.86 (0.71 – 0.95)	-5.4 – 2.9
7	+18	-4.5 (3.7)	-4.6 (4.3)	0.2 (-1.1 – 1.5)	0.9	0.81 (0.51 – 0.93)	-5.3 – 5.7
	-18	-7.0 (4.3)	-5.3 (3.8)	-1.7 (-2.6 – -0.8)	0.9	0.87 (0.73 – 0.95)	-5.5 – 2.1
8	+18	-4.8 (4.4)	-4.5 (4.7)	-0.3 (-1.6 – 0.9)	0.9	0.83 (0.56 – 0.94)	-5.6 – 4.9
	-18	-6.8 (4.5)	-5.1 (4.0)	-1.7 (-2.7 – -0.6)	0.9	0.87 (0.72 – 0.95)	-6.2 – 2.9
9	+18	-5.4 (4.1)	-4.6 (4.6)	-0.8 (-2.0 – 0.3)	0.9	0.84 (0.60 – 0.94)	-5.7 – 4.1
	-18	-7.0 (4.2)	-5.9 (4.3)	-1.1 (-1.8 – -0.4)	0.9	0.88 (0.74 – 0.95)	-4.3 – 2.1
10	+18	-5.7 (4.1)	-4.9 (4.4)	-0.8 (-2.3 – 0.7)	0.9	0.84 (0.58 – 0.95)	-7.2 – 5.6
	-18	-7.0 (4.8)	-6.1 (3.9)	-0.9 (-1.9 – 0.0)	0.9	0.89 (0.77 – 0.95)	-4.9 – 3.1

Tableau 2. *Moyenne (± écart-type,) ; la différence moyenne et l'IC à 95% ; l'ESM, le CCI, l'IC à 95% du CCI et les LdA à 95% lorsque le cadre est incliné à -18°.*

Nous pouvons donc considérer que le RFT présente une "excellente" fiabilité des résultats lorsque le cadre est incliné à droite de l'observateur et ce dès le 1er essai. Quand le cadre est incliné à gauche, les résultats sont plus variables. Lorsque la baguette est initialement inclinée à droite, la fiabilité des résultats est "faible" pour le premier essai et "moyenne" pour les suivants ; tandis que lorsque la baguette est initialement inclinée à gauche, la fiabilité des résultats est "faible" pour les deux premiers essais et "moyenne" pour les suivants.

c. Discussion

Le but de cette étude était d'évaluer la fiabilité à cours terme en test-retest du RFT chez des sujets sains. La valeur du r de Bravais-Pearson (0,88) est cohérente avec celles obtenues dans la littérature (Kato, 1965; Witkin et al., 1954). Cependant, l'analyse des CCI a montré que la fiabilité des résultats dépendait du sens d'inclinaison du cadre. Une explication quant à la différence de fiabilité des résultats entre les deux sens d'orientation du cadre pourrait se trouver dans l'effet plus important du cadre incliné à gauche comparé au cadre incliné à droite ; l'étendue des réponses possibles est plus importante lorsque le cadre est incliné à gauche et la fidélité des réponses serait donc plus difficile à obtenir. Cette asymétrie dans la reproductibilité des résultats pourrait trouver son origine dans la cyclotorsion des yeux. Des auteurs (Goodenough, Sigman, Oltman, Rosso, & Mertz, 1979) ont montré qu'un cadre incliné, d'une taille angulaire visuelle supérieur à 10°, entrainait une rotation des yeux dans le même sens. Ils ont montré que les erreurs d'ajustement de la baguette sur la verticale étaient liées à la rotation des yeux ; plus les erreurs d'ajustement sont importantes, plus la rotation de l'œil est importante. Une hypothèse possible serait que la présence d'un cadre incliné d'un côté du sujet entrainerait une cyclotorsion d'un œil plus importante comparé à l'autre œil. Inversement, lorsque le cadre est incliné de l'autre côté, la cyclotorsion de l'autre œil pourrait être plus importante. Ainsi, lorsque le cadre est incliné du côté entrainant une cyclotorsion de l'œil directeur plus importante, il est possible que le sujet ait plus de difficultés à percevoir la verticale et donc que la reproductibilité des résultats soit plus difficile. Une étude sur la cyclotorsion des yeux en fonction du sens d'inclinaison du cadre pourrait permettre d'élucider ce point.

D'autres résultats rapportées dans cette étude sont similaire à ceux décrit dans de nombreuses qui ont observés une déviation de la verticale perçue allant dans le sens du cadre incliné (Spinelli, Antonucci, Daini, & Zoccolotti, 1995; Wenderoth & Beh, 1977). Cette effet a souvent été expliqué comme une interaction visuo-vestibulaire (Cian, Esquivie, Barraud, & Raphel, 1995; Ebenholtz & Glaser, 1982; Ebenholtz, 1985; Goodenough, Oltman, Sigman, Rosso, & Mertz, 1979; Goodenough et al., 1979; Goodenough, Nowak, Oltman, Cox, & Sigman, 1982; Sigman, Goodenough, & Flannagan, 1978; Zoccolotti et al., 1992; Zoccolotti et al., 1993; Cian et al., 1995; Ebenholtz & Glaser, 1982; Ebenholtz, 1985; Goodenough et al., 1979; Goodenough et al., 1979; Goodenough et al., 1982; Sigman et al., 1978; Zoccolotti et al., 1992; Zoccolotti et al., 1993). L'inclinaison du cadre entrainerait une perception inclinée du corps dans le sens opposé au cadre. Afin de compenser cette inclinaison perçue du corps, les sujets seraient tentés d'ajuster la baguette dans le sens d'inclinaison du cadre. En accord avec la littérature, cet effet s'est avéré plus important avec un cadre incliné à gauche comparé à une inclinaison du cadre à droite. A ce jour, cette asymétrie n'a jamais été clairement expliquée. Cela pourrait être lié à une asymétrie posturale (Isableu et al., 2010). Ces auteurs ont montré que le mode préférentiel de référentiation spatial est maintenu qu'il s'agisse d'une tâche de perception spatiale ou d'une tâche portant sur le contrôle moteur. Les sujets dépendant au champ visuel s'avèrent être, d'un point de vue postural, les plus inclinés et les plus instables lorsqu'ils se trouvent face à un cadre incliné ; les sujets indépendants au champ visuel restant stables. Etant donné que le corps humain n'est pas parfaitement symétrique (e.g., asymétrie liée au pied d'appui préférentiel), nous pouvons penser que l'effet du cadre incliné, à droite ou à gauche, sur la posture n'est pas non plus parfaitement symétrique et donc que l'effet cadre, qui en résulte, sur la perception spatiale ne l'est pas non plus.

Conformément à la littérature (Asch & Witkin, 1948b; Ohlmann & Marendaz, 1991; Spinelli et al., 1995; Asch & Witkin, 1948a; Ohlmann & Marendaz, 1991; Spinelli et al., 1995), l'effet cadre s'est avéré variable d'un sujet à l'autre. Cette variabilité interindividuelle pourrait être interprétée comme une différence de sensibilité au cadre de référence perçu via les systèmes visuels, vestibulaire, kinesthésique, l'hypothèse étant que certains sujets seraient capables de basculer d'un cadre de référence vers un autre quand l'un d'eux est biaisé ; l'erreur d'ajustement serait réduite car ces sujets s'appuieraient sur un cadre de référence non biaisé (p. ex. ici, basé sur les systèmes vestibulaires ou proprioceptifs). D'autres sujets resteraient accrochés à leur cadre de référence préférentiel (p. ex. ici, le système visuel) et seraient incapables de basculer vers un autre cadre de référence plus approprié. Cette théorie a introduit le concept de repondération sensoriel qui signifie que tous les sujets prendraient en compte tous les cadres de référence physique (McGuire & Sabes, 2009) ; la différence serait que certains sujets seraient capables de coordonner les entrées sensorielles pour affecter différents poids aux cadres de référence en fonction de leur caractère approprié à la tâche (Ernst & Bulthoff, 2004; Helbig & Ernst, 2008).

II. Expérience 2 : RFT 2D vs 3D

Dans cette seconde expérience, nous avons voulu vérifier l'effet des indices de profondeur d'un cadre visuel incliné sur la verticale subjective. Les contraintes matérielles ne nous permettant pas d'utiliser un RFT 3D similaire à celui de Oltman (Oltman, 1968) de façon systématique, il nous est alors apparu important de vérifier si l'amplitude de l'effet cadre observé avec un RFT 3D, reconnu dans la littérature comme

un puissant moyen de rendre compte de la DIC visuelle des sujets, persistait lors de la passation d'un RFT 2D informatisé. Le RFT 3D est constitué de quatre panneaux blancs long de 105cm reliés entre eux par des baguettes noires (RFT similaire à la version portable utilisé par Oltman (Oltman, 1968)). L'avantage de ce type de RFT est qu'il est reconnu comme étant un indicateur puissant de la dépendance-indépendance des sujets à l'égard du référentiel visuel. La taille des effets cadre observée est plus importante qu'avec un RFT 2D informatisé et permet donc une distinction plus nette des sujets dépendants à l'égard du champ visuel (DC) des indépendants (IC). L'inconvénient de cette version est qu'elle est difficilement transportable. Le RFT 2D informatisé est constitué d'un écran blanc sur lequel apparait un cadre noir. Ce type de RFT offre plus de facilité d'utilisation (notamment, la possibilité de pouvoir estimer la DIC des sujets en position couchée ou de le déplacer en divers endroit facilement,…) mais présente l'inconvénient d'être un indicateur de la dépendance à l'égard du champ visuel moins puissant.

Bringoux et al. (Bringoux et al., 2009) ont confirmé, en utilisant un environnement visuel immersif, que la taille de l'effet d'un cadre ou d'une pièce inclinée était fonction des caractéristiques de la scène visuelle (Ebenholtz & Callan, 1980; Streibel & Ebenholtz, 1982). Plus la scène contient de signaux géométriques (c.à.d. d'éléments parallèles ou orthogonaux) et plus la scène comprend de signaux cognitifs additionnels déterminant la direction visuelle haut/bas (c.à.d. d'objets polarisés significatifs), plus l'effet d'inclinaison sur la verticale subjective sera important. Nous avons alors voulu vérifier la reproductibilité de ces résultats dans un environnement 2D, et avons pour cela comparé les résultats obtenus lors de la passation d'un RFT 3D avec les résultats obtenus face à 2 stimuli 2D différents. Nous avons cherché à développer une stimulation visuelle permettant d'obtenir un effet cadre le plus important possible

afin de pouvoir différencier facilement les sujets dépendants au champ visuel (DC) des sujets indépendants (IC). Cette problématique s'avère primordiale pour mener des études différentielles.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

19 sujets (9 femmes et 10 hommes) volontaires ont participé à cette expérience. Ils avaient en moyenne 25 ans (± 3 ans et 9 mois). Aucun sujet ne présentait de problème moteur, de trouble neurologique ou de déficit sensoriel connu pouvant affecter leur capacité à effectuer ces tâches d'orientation spatiale. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Il était demandé aux sujets de réaliser un test similaire au RFT en étant soumis à trois conditions d'environnement visuel différentes. Dans la première condition, les sujets étaient assis à 60 cm devant un écran blanc, sur lequel une baguette noire était projetée (1cm d'épaisseur, taille angulaire de 14° x 0,5°). Les sujets regardaient l'écran à travers un dispositif dont la fonction était de fournir un cadre visuel statique (105cm de long, côté de 46 x 46cm, taille angulaire de 25° x 25°) similaire à celui utilisé par Oltman (Oltman, 1968) (cf. Figure 8a). Par la suite, nous appellerons cette condition

"RFT 3D". Dans la seconde condition, les sujets étaient assis à 60 cm devant un écran, sur lequel une baguette noire était projetée (1cm d'épaisseur, taille angulaire de 14° x 0,5°). La baguette était présentée au milieu d'une pièce virtuelle fournissant des indices de profondeur (perspective, gradient de texture, effet de lumière,…) et composée de différents objets polarisés afin de renforcer la direction haut-bas (c.à.d. des objets reconnus comme ayant un haut et un bas). (cf. Figure 8b). Par la suite, nous appellerons cette condition "RFT pseudo-3D". Dans la troisième condition, la baguette, identique aux précédentes conditions, était cette fois ci présenté sur un fond blanc au milieu d'un cadre noir de 46 x 46 cm (cf. Figure 8c). Par la suite, nous appellerons cette condition "RFT 2D". Pour les conditions "RFT pseudo-3D" et "RFT 2D", les sujets regardaient à travers un tunnel optique cylindrique noir long de 105 cm et de 62 cm de diamètre, afin de neutraliser les indices visuels périphériques fournis par la salle d'expérimentation.

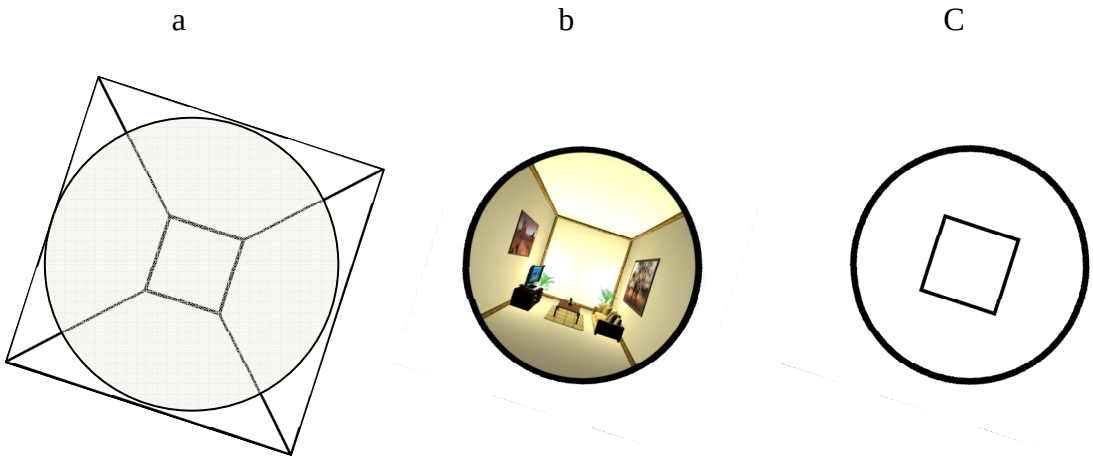


***Figure 8**. Conditions d'environnement visuel. a) "RFT 3D", le cercle représente la scène visuelle réellement vue, b) "RFT pseudo-3D", c) "RFT 2D".*

Pour chaque condition, le cadre/la pièce était incliné(e) à ± 18°. Du point de vue de l'observateur, un codage négatif indique une inclinaison à droite par rapport à la verticale gravitaire, et un codage positif signifie une inclinaison à gauche, comme dans le sens trigonométrique. Les sujets étaient en position assise, avec les jambes tendues

reposant sur les talons et la tête libre (Bringoux et al., 2009; Isableu et al., 1997; Oltman, 1968). Il leur était demandé de tourner la baguette, initialement incliné à ± 18°, en utilisant les flèches droite et gauche d'un clavier, afin de la réaligner sur la verticale. Aucune limite de temps ne leur était donnée, ils devaient juste être le plus précis possible. A la fin de l'ajustement, l'orientation finale de la baguette était enregistrée (angle formé par l'axe longitudinal de la baguette et la réelle verticale). Une nouvelle baguette, inclinée à ± 18°, apparaissait ensuite. La précision du système d'enregistrement était de 0,03°. 4 essais (2 avec une baguette initialement inclinée à -18° et 2 avec une baguette inclinée à +18°) était effectués face à un cadre statique incliné à -18° et 4 essais avec un cadre incliné à +18°. L'ordre des essais était aléatoire.

iii. Analyses statistiques

Nous avons utilisé la méthode de Nyborg (Nyborg, 1974) pour calculer l'effet cadre. Cette méthode consiste, pour chaque condition environnementale ("RFT 3D", "RFT pseudo-3D" ou "RFT 2D"), à soustraire l'erreur constante (c.à.d. l'erreur moyenne d'ajustement calculé à partir des huit essais effectués dans la condition d'environnement visuel) à la moyenne des quatre essais effectués dans une condition d'inclinaison de cadre. L'opération est ensuite répétée avec l'autre condition d'inclinaison de cadre. Cette méthode nous donne un effet cadre identique (au signe près) entre les deux conditions d'inclinaison de cadre et permet ainsi d'annihiler les effets asymétriques de l'inclinaison du cadre.

Toutes les analyses statistiques suivantes ont été effectuées avec le logiciel Statistica 7.1. Une analyse corrélationnelle a été effectuée afin de quantifier la relation

entre les effets cadre de chaque sujet obtenus pour chaque condition environnementale ("RFT 3D", "RFT pseudo-3D" ou "RFT 2D"). Une ANOVA à mesures répétées a également été effectuée portant sur les mêmes indicateurs.

b. Résultats

Dans la condition "RFT 3D", pour tous les essais avec le cadre incliné à +18°, l'erreur moyenne d'ajustement était de 5,4° ± 3,4° (moyenne ± écart-type) et de -3,6° ± 4,2° lorsque le cadre était incliné à -18°. Dans la condition "RFT pseudo-3D", pour tous les essais avec le cadre incliné à +18°, l'erreur moyenne d'ajustement était de 4,1° ± 3° et de -1,2° ± 2,6° lorsque le cadre était incliné à -18°. Dans la condition "RFT 2D", pour tous les essais avec le cadre incliné à +18°, l'erreur moyenne d'ajustement était de 1,4° ± 1,9° (moyenne ± écart-type) et de 0,7° ± 2,1° lorsque le cadre était incliné à -18°. La moyenne des effets cadre de l'ensemble des sujets est représentée en fonction de chaque condition d'environnement visuel dans la figure 9.

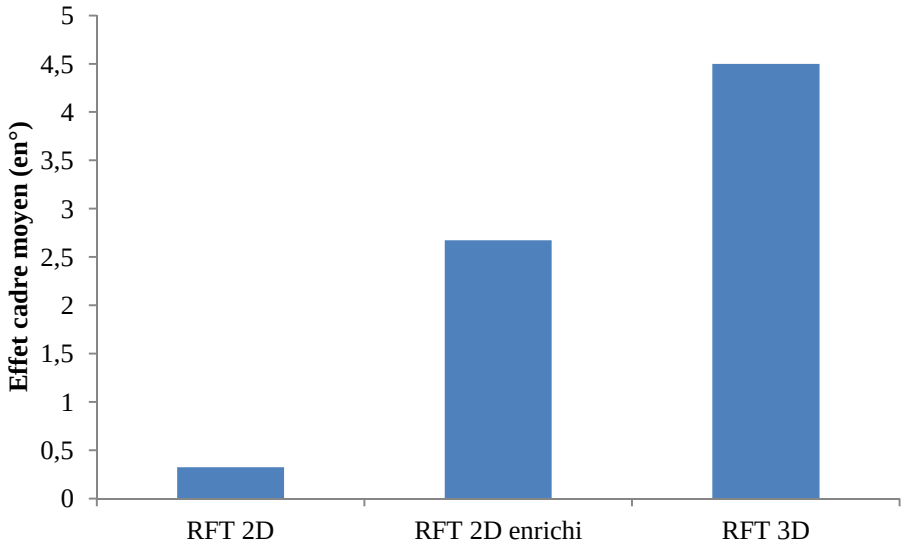


***Figure 9**. Effet cadre moyen en fonction des conditions environnementales.*

L'erreur moyenne d'ajustement (± écart-type), l'erreur constante ainsi que l'effet cadre, calculés selon la méthode de Nyborg, pour chaque inclinaison de cadre et chaque individu sont présentés dans le tableau 3) pour la condition "RFT 3D", 4) pour la condition "RFT pseudo-3D" et 5) pour la condition "RFT 2D".

N° de sujet	Erreur moyenne (± écart-type)		Erreur constante	Effet cadre	
	C-18	C+18		C-18	C+18
1	-1,65 (± 0,64)	1,55 (± 0,30)	-0,05	-1,60	1,60
2	0,00 (± 1,19)	9,60 (± 1,83)	4,80	-4,80	4,80
3	-9,00 (± 0,99)	10,10 (± 1,10)	0,55	-9,55	9,55
4	-1,25 (± 1,39)	3,00 (± 1,17)	0,88	-2,12	2,12
5	-2,55 (± 1,17)	3,10 (± 1,44)	0,28	-2,83	2,83
6	0,70 (± 0,74)	2,55 (± 1,23)	1,62	-0,92	0,92
7	-7,30 (± 2,11)	7,45 (± 1,34)	0,07	-7,37	7,37
8	-4,15 (± 0,93)	1,85 (± 0,64)	-1,15	-3,00	3,00
9	-1,55 (± 3,23)	5,85 (± 1,06)	2,15	-3,70	3,70
10	-3,45 (± 0,91)	3,90 (± 0,89)	0,23	-3,68	3,68
11	-4,80 (± 4,68)	6,40 (± 2,73)	0,80	-5,60	5,60
12	-0,90 (± 0,35)	5,35 (± 1,64)	2,22	-3,12	3,12
13	0,45 (± 0,81)	4,75 (± 0,55)	2,60	-2,15	2,15
14	-3,45 (± 1,15)	6,30 (± 1,15)	1,42	-4,87	4,87
15	-5,25 (± 2,67)	8,35 (± 3,98)	1,55	-6,80	6,80
16	-2,65 (± 1,27)	4,00 (± 0,54)	0,68	-3,33	3,33
17	-13,35 (± 6,12)	12,95 (± 1,11)	-0,20	-13,15	13,15
18	-8,40 (± 1,88)	2,10 (± 2,31)	-3,15	-5,25	5,25
19	0,20 (± 0,86)	3,50 (± 1,55)	1,85	-1,65	1,65

***Tableau 3**. Erreur moyenne d'ajustement (± écart-type), erreur constante et effet cadre pour chaque inclinaison de cadre et chaque individu dans la condition "RFT 3D".*

N° de sujet	Erreur moyenne (± écart-type)		Erreur constante	Effet cadre	
	C-18	C+18		C-18	C+18
1	0,57 (± 1,35)	1,38 (± 0,64)	0,97	-0,40	0,40
2	0,20 (± 3,66)	5,98 (± 4,36)	3,09	-2,89	2,89
3	-4,25 (± 0,79)	9,98 (± 0,56)	2,86	-7,11	7,11
4	-1,80 (± 1,17)	1,90 (± 1,49)	0,05	-1,85	1,85
5	-0,75 (± 1,63)	2,15 (± 1,57)	0,70	-1,45	1,45
6	0,45 (±0,64)	2,40 (± 1,12)	1,42	-0,98	0,98
7	-2,57 (± 2,17)	6,45 (± 1,16)	1,94	-4,51	4,51
8	-1,68 (± 0,21)	1,50 (± 0,72)	-0,09	-1,59	1,59
9	2,05 (± 2,02)	8,25 (± 1,73)	5,15	-3,10	3,10
10	-3,03 (± 0,86)	3,10 (± 1,28)	0,04	-3,06	3,06
11	-0,13 (± 1,24)	3,88 (± 0,79)	1,88	-2,00	2,00
12	0,73 (± 0,26)	5,62 (± 1,24)	3,17	-2,45	2,45
13	1,80 (± 0,93)	5,75 (± 0,57)	3,77	-1,97	1,97
14	-3,98 (± 0,64)	6,02 (± 1,52)	1,02	-5,00	5,00
15	-1,20 (± 0,62)	3,40 (± 1,66)	1,10	-2,30	2,30
16	-1,58 (± 1,15)	2,13 (± 1,27)	0,27	-1,85	1,85
17	-2,95 (± 2,15)	5,72 (± 4,77)	1,39	-4,34	4,34
18	-6,75 (± 1,13)	1,08 (± 1,59)	-2,84	-3,91	3,91
19	1,45 (± 1,01)	1,42 (± 0,63)	1,44	0,01	-0,01

***Tableau 4**. Erreur moyenne d'ajustement (± écart-type), erreur constante et effet cadre pour chaque inclinaison de cadre et chaque individu dans la condition "RFT pseudo-3D ".*

N° de sujet	Erreur moyenne (± écart-type)		Erreur constante	Effet cadre	
	C-18	C+18		C-18	C+18
1	1,33 (± 0,17)	0,65 (± 0,66)	0,99	0,34	-0,34
2	2,68 (± 2,44)	1,75 (± 1,40)	2,21	0,46	-0,46
3	2,15 (± 1,51)	2,63 (± 0,52)	2,39	-0,24	0,24
4	0,93 (± 0,71)	2,33 (± 0,46)	1,63	-0,70	0,70
5	1,03 (± 0,88)	-0,22 (± 1,06)	0,40	0,62	-0,62
6	2,33 (± 0,45)	1,38 (± 0,83)	1,85	0,48	-0,48
7	-0,18 (± 3,78)	2,87 (± 4,51)	1,35	-1,52	1,52
8	-0,52 (± 0,67)	0,83 (± 0,38)	0,15	-0,67	0,67
9	1,10 (± 0,92)	2,38 (± 0,17)	1,74	-0,64	0,64
10	-1,47 (± 0,65)	2,18 (± 0,53)	0,35	-1,82	1,82
11	0,40 (± 1,26)	-0,63 (± 0,32)	-0,11	0,51	-0,51
12	1,80 (± 0,71)	1,13 (± 0,83)	1,46	0,34	-0,34
13	2,55 (± 1,14)	4,25 (± 0,78)	3,40	-0,85	0,85
14	0,95 (± 1,07)	2,88 (± 0,98)	1,91	-0,96	0,96
15	-0,10 (± 0,98)	2,08 (± 0,39)	0,99	-1,09	1,09
16	-0,82 (± 1,04)	0,40 (± 1,44)	-0,21	-0,61	0,61
17	1,65 (± 0,89)	0,42 (± 2,28)	1,04	0,61	-0,61
18	-4,80 (± 0,59)	-1,83 (± 0,68)	-3,31	-1,49	1,49
19	2,45 (± 0,66)	0,22 (± 0,76)	1,34	1,11	-1,11

***Tableau 5**. Erreur moyenne d'ajustement (± écart-type), erreur constante et effet cadre pour chaque inclinaison de cadre et chaque individu dans la condition "RFT 2D".*

Une analyse corrélationnelle a été effectuée sur l'effet cadre de chaque condition visuelle. Il apparait que les conditions "RFT 3D" et "RFT pseudo-3D" corrèlent significativement ($p<0,05$; $r^2=0,56$) mais pas les conditions "RFT 3D" et "RFT 2D" ($p>0,05$), ni les conditions "RFT pseudo-3D" et "RFT 2D" ($p>0,05$). La corrélation significative entre les conditions "RFT 3D" et "RFT pseudo-3D" est représentée dans la figure 10.

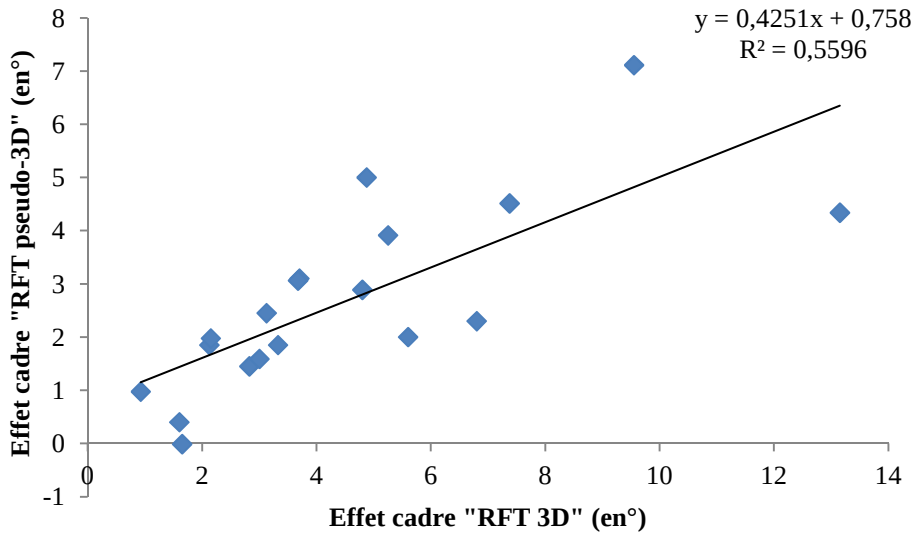


***Figure 10**. Corrélation entre l'effet cadre dans la condition "RFT 3D" et l'effet cadre dans la condition "RFT pseudo-3D".*

D'après de le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov, la distribution des effets cadre de chacune des conditions visuelles suit la loi normale. Une ANOVA à mesures répétées a ainsi été effectuée sur l'effet cadre de chaque condition visuelle et a révélé un effet significatif de l'environnement visuel. Une différence significative apparait entre les conditions "RFT 3D" et "RFT pseudo-3D" ($F(1, 18)=14,578$; $p<0,05$), entre les conditions "RFT 3D" et "RFT 2D" ($F(1, 18)=34,616$; $p<0,05$) ainsi qu'entre les conditions "RFT pseudo-3D" et "RFT 2D" ($F(1, 18)=41,418$; $p<0,05$).

Une analyse corrélationnelle a été effectuée entre la taille de l'effet cadre dans la condition "RFT 3D" et la réduction de cette effet cadre lors du passage à une autre stimulation visuelle ("RFT 2D" ou "RFT pseudo-3D"). Il apparait que la taille de l'effet cadre dans la condition "RFT 3D" corrèle significativement avec la réduction de cet effet cadre lors du passage à la condition "RFT 2D" ($p<0,05$; $r^2=0,39$). Autrement dit, plus un sujet est dépendant à l'égard du référentiel visuel lors de la passation d'un RFT 3D, plus cette dépendance diminuera face à stimulation visuelle 2D (cf. Figure 11). Aucune corrélation significative n'est apparue entre la taille de l'effet cadre dans la condition "RFT 3D" et la réduction de cet effet cadre lors du passage à la condition "RFT pseudo-3D".

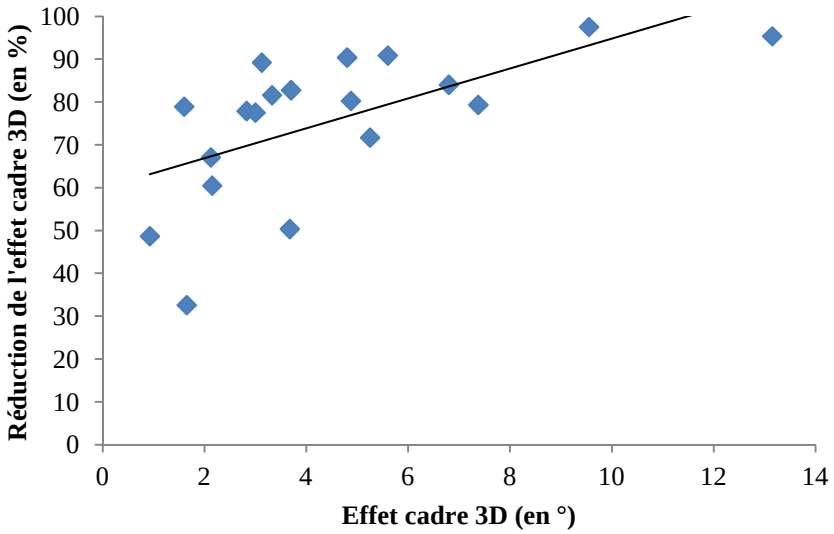


***Figure 11**. Corrélation entre l'effet cadre dans la condition "RFT 3D" et la réduction de cet effet lors du passage au "RFT 2D".*

c. Discussion

Le but de cette étude était de vérifier si l'enrichissement d'une scène visuelle 2D en indices de profondeur (perspective, gradient de texture, effet de lumière) augmente la dépendance visuelle des sujets. Nos résultats confortent ceux de la littérature (Asch &

Witkin, 1948a; Bringoux et al., 2009; Witkin & Asch, 1948a). Bringoux et al. (Bringoux et al., 2009) ont récemment montré, en utilisant un environnement visuel immersif, que la taille de l'effet d'inclinaison d'un cadre ou d'une pièce dépendait des caractéristiques de la scène visuelle, et notamment du nombre d'indices géométriques (c.à.d. d'éléments parallèles ou orthogonaux) et cognitifs additionnels déterminant la direction visuelle haut/bas (c.à.d. d'objets polarisés significatifs). De la même manière, nous avons montré, en utilisant un environnement visuel non immersif (taille angulaire de 25° x 25°), que l'enrichissement de la scène en indices géométriques (c.à.d. d'éléments parallèles ou orthogonaux) et en indices cognitifs additionnels déterminant la direction visuelle haut/bas (c.à.d. d'objets polarisés significatifs) permettait d'augmenter la taille de l'effet d'inclinaison du cadre. L'effet cadre moyen s'est avéré significativement plus grand dans la condition "RFT pseudo-3D" que dans la condition "RFT 2D". Cependant, nos résultats montrent que, bien que cet enrichissement de la scène visuelle 2D permette d'augmenter son caractère perturbant, il ne permet d'atteindre la taille de l'effet induit par un environnement 3D. L'effet cadre moyen dans la condition "RFT 2D enrichi" n'atteint pas le niveau de l'effet cadre d'un RFT 3D type Oltman (Oltman, 1968). Une explication de cette différence se situe probablement dans la taille angulaire de la stimulation visuelle. En effet, lors de la passation du "RFT pseudo-3D", la stimulation visuelle avait une taille angulaire de 25° x 25°, tandis qu'avec le "RFT 3D", l'ensemble du champ visuel était stimulé. Plusieurs auteurs ont relevé l'importance de la taille angulaire du cadre (Zoccolotti et al., 1992) ainsi que l'écart formé entre le bord intérieur du cadre et les extrémités de la baguette (Zoccolotti et al., 1993) sur l'effet de désorientation spatiale.

Nous pouvons donc affirmer que pour maximiser l'effet d'une perturbation visuelle, il est préférable d'utiliser une version 3D du RFT. Cependant, si les contraintes matérielles ne permettent pas son utilisation, une version 2D enrichi d'indices de profondeur apparait être un bon compromis.

III. Expérience 3 : Zone d'incertitude

Dans cette troisième expérience, nous nous sommes intéressés aux différentes formes de variabilité des estimations engendrées par la passation d'un RFT 3D. La littérature (Ohlmann, 1985) laisse apparaitre l'existence d'une forte variabilité interindividuelle lors de l'exécution de tâches d'orientations spatiales comme le RFT ; certains sujets étant très sensibles au contexte visuel (DC), d'autres beaucoup moins (IC). Il apparait par ailleurs que les sujets les plus sensibles (DC) semblent présenter une plus grande variabilité dans leurs estimations comparés aux sujets les moins sensibles (IC). Traditionnellement, cette variabilité intra-sujet est estimée à partir de la variance de l'ensemble des résultats observés dans une condition. Elle traduit donc la variabilité moyenne des estimations du sujet pour une condition. Cette variabilité est par ailleurs régulièrement utilisée dans certains modèles d'intégration multisensorielle, afin de calculer, dans le cadre par exemple de l'application de la règle du Maximum Likehood Estimation (MLE), les poids alloués à chacun des signaux disponibles et de définir leur fiabilité respective. Le souci avec cette variabilité interessai est qu'elle rend compte de l'incertitude moyenne d'un sujet sur un laps de temps plus ou moins long mais pas à un moment précis. Le mode de quantification de cette incertitude pose donc problème. En effet, le nombre d’essais et la durée intraessai et interessai plus ou moins variable expose le sujet à produire des estimations d’orientation spatiale dont les

variations peuvent résulter de la mise en œuvre de facteurs non neutralisés. Les sources de cette incertitude et de son augmentation avec la dépendance visuelle restent mal comprises. La variance importante des estimations d'un sujet pourrait traduire un sentiment de désorientation important, mais pourrait également résulter de fluctuations attentionnelles, de changement progressif de référentiel (un sujet dépendant devient indépendant et inversement), d'un renforcement de l'influence d'un référentiel (un sujet devient plus dépendant ou plus indépendant) ou même évoluer en fonction de l'état de fatigue ou de l'intérêt-désintérêt que le sujet porte à l'expérience.

Les sources pouvant influencer l'incertitude spatiale liées à la sélection des référentiels spatiaux sont nombreuses et leurs expressions d'autant facilité que la durée de passation des essais nécessaire à la quantification de incertitude est importante. Un moyen de réduire l'expression des sources d'incertitude est de réduire le temps d'exposition aux stimuli afin de se rapprocher du niveau d'incertitude (instantanée) traité par les mécanismes de pondération des signaux sensoriels ou des référentiels spatiaux au moment de l'estimation de la verticale subjective ou de l'orientation de l'axe Z. La quantification de l'incertitude instantanée et sa comparaison avec d'autres modes de quantification de l'incertitude (interessai, intraessai) à pour objectif d'identifier les différentes sources responsable des variations de cette incertitude (telles que les changements d'utilisation de cadre de référence qui vont nécessairement impacter la variance). L'incertitude propre à un cadre de référence peut alors être surestimée. A notre connaissance, le niveau de certitude instantanée n'a jamais été étudié. Le but de cette étude est alors d'estimer l'incertitude instantanée d'un individu et de la mettre en relation avec le niveau de dépendance visuel et la variabilité interessai de l'individu (incertitude moyenne). Nous faisons l'hypothèse que, tout comme la variabilité moyenne (interessai), la variabilité instantanée (intraessai) est corrélée avec le niveau de

dépendance/indépendance au champ d'un individu. De plus, très peu d'essais (1 pourrait suffire) suffiraient afin d'estimer l'incertitude spatiale instantanée, avantage méthodologique qui pourrait être mis à profit dans de nombreux protocoles chez des sujets pathologiques. Trois types de variabilité vont ainsi être quantifiés : la variabilité intraessai, la variance interessai et la zone de certitude perçue. Nous faisons l'hypothèse que chacune de ces variabilités devraient être corrélés positivement avec le degré de dépendance à l'égard du champ visuel.

En théorie, il pourrait être possible d'identifier les sources constitutives de cette incertitude en analysant la structure de la variance et en la manipulant.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

23 sujets (8 femmes et 15 hommes) volontaires ont participé à cette expérience. Ils avaient en moyenne 23 ans et 1 mois (± 4 ans). Aucun sujet ne présentait de problème moteur, de trouble neurologique ou de déficit sensoriel connu pouvant affecter leur capacité à effectuer ces tâches d'orientation spatiale. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Il était demandé au sujet de réaliser un test type "RFT 3D". Le sujet était assis sur un tabouret face à un écran de TV sur lequel était projetée une baguette. Il était séparé de cet écran par un tunnel optique type "RFT 3D" (cf. chapitre expérience 3). La procédure de passation de l'expérience est la même que l'expérience précédente (jambes tendues, les talons reposant sur le sol).

1) Quantification de l'incertitude perçue

L'incertitude perçue était quantifiée à partir de la taille de la zone de verticalité. Pour chaque essai, le sujet estimait trois orientations de baguette : la verticale subjective et les limites de la zone de verticalité c.-à-d. les orientations droite et gauche de la baguette au-delà desquelles il était sûr que la baguette n'était plus verticale. Chaque essai comprenait 2 phases. Lors de la phase 1, le sujet avait pour consigne de réajuster la baguette affichée sur l'écran, initialement inclinée à ± 18°, parallèlement à la verticale gravitaire à l'aide des flèches d'un clavier, correspondant à la verticale subjective du sujet. Lors de l'ajustement, il lui était demandé d'appuyer de façon continue sur les flèches jusqu'à ce que la baguette atteigne une orientation proche de leur verticale perçue. Cette consigne nous permettait ensuite d'estimer la variabilité intraessai. Lors de la phase 2, le sujet devait définir les limites de la zone de verticalité. Pour cela, il devait estimer les orientations de la baguette les plus proches possibles de la verticale subjective au-delà desquelles il était sûr que la baguette n'était plus verticale. Pour cela, le sujet faisait tourner la baguette, orientée initialement comme la verticale subjective perçue lors de la phase 1, sur sa droite jusqu'au moment précis où il était sûr que la

baguette n'était plus verticale. Une fois cette orientation enregistrée, la baguette reprenait l'orientation de la verticale subjective perçue lors de la 1ère phase et le sujet effectuait la même chose mais en tournant la baguette sur sa gauche. Cela nous donnait les limites droite et gauche de la zone de verticalité ou cône de verticalité (Ito & Gresty, 1996; Ito & Gresty, 1997). La zone d'incertitude perçue est calculée en faisant la différence entre les deux orientations (droite et gauche) de la zone de verticalité.

2) Quantification de l'incertitude intraessai

Lors de la phase 1, l'orientation finale de la baguette était enregistrée, ainsi que ses déplacements au cours du temps. La variabilité intraessai est obtenue en analysant l'évolution des déplacements de la baguette au cours du temps. Les sujets ayant la consigne d'effectuer un appui continu sur les flèches du clavier jusqu'à arriver proche de la zone de verticalité, le 1er arrêt du déplacement de la baguette marquait le début de l'enregistrement que nous allions analyser. La variabilité intraessai correspond à la différence entre les 2 orientations extrêmes (minimale et maximale) obtenues dans cette partie de l'essai (cf. Figure 12).

Pour chaque essai, nous enregistrons donc 3 valeurs : la verticale subjective, la variabilité intraessai et la zone d'incertitude perçue.

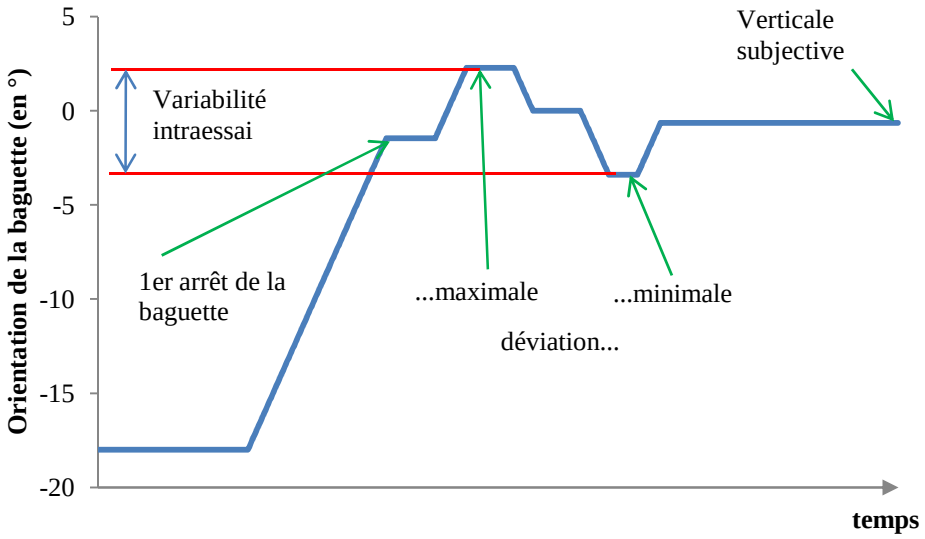


***Figure 12**. Exemple d'évolution de l'orientation de la baguette au cours du temps lors de la phase 1 et illustration du calcul de variabilité intraessai.*

3) Quantification de l'incertitude interessai

Le sujet effectuait 7 blocs d'essais correspondant aux 7 orientations prises par le cadre : -28°, -18°, -8°, 0°, +8°, +18°, +28°. Chaque bloc comprenait 6 essais : 3 avec la baguette initialement inclinée à -18° et 3 avec la baguette à +18°. L'ordre des 6 essais ainsi que l'ordre de passation des 7 blocs étaient randomisés d'un bloc à l'autre et d'un sujet à l'autre. Le sujet effectuait donc un total de 42 essais (6 x 7). Le sujet effectuait une pause de 5 mn entre chaque bloc. La variance interessai était calculée pour chaque bloc et chaque sujet.

iii. Analyses statistiques

La variabilité intraessai, la zone d'incertitude perçue et la variance interessai ayant par défauts des valeurs positives, nous avons retenu les valeurs absolues de la verticale subjective pour nos analyses de corrélation. Toutes les analyses statistiques suivantes ont été effectuées avec le logiciel Statistica 7.1. Une analyse corrélationnelle a

été effectuée afin de mettre en relation la verticale subjective absolue moyenne, la variabilité intraessai moyenne, la zone d'incertitude moyenne et la variance interessai de chaque sujet pour chaque condition d'inclinaison du cadre. Une ANOVA à mesures répétées a également été effectuée sur la variabilité intraessai moyenne, la zone d'incertitude moyenne et la variance interessai.

b. Résultats

Pour tous les essais avec le cadre incliné à +28°, l'erreur moyenne d'ajustement était de 4,8°, de 5,3° lorsque le cadre était incliné à +18°, de 2,9° lorsque le cadre était incliné à +8°, de -0,2° lorsque le cadre était droit (à 0°), de -4,5° lorsque le cadre était incliné à -8°, de -5,8° lorsque le cadre était incliné à -18° et de -4,4° lorsque le cadre était incliné à -28°. La forme sinusoïdale de la courbe représentant l'erreur moyenne d'ajustement en fonction de l'inclinaison du cadre (cf. Figure 13) est conforme à la littérature (Brenet & Luyat, 1995; Bringoux et al., 2009; Oltman, 1968), l'erreur moyenne d'ajustement maximum se trouvant aux alentours d'une inclinaison du cadre de ± 18°.

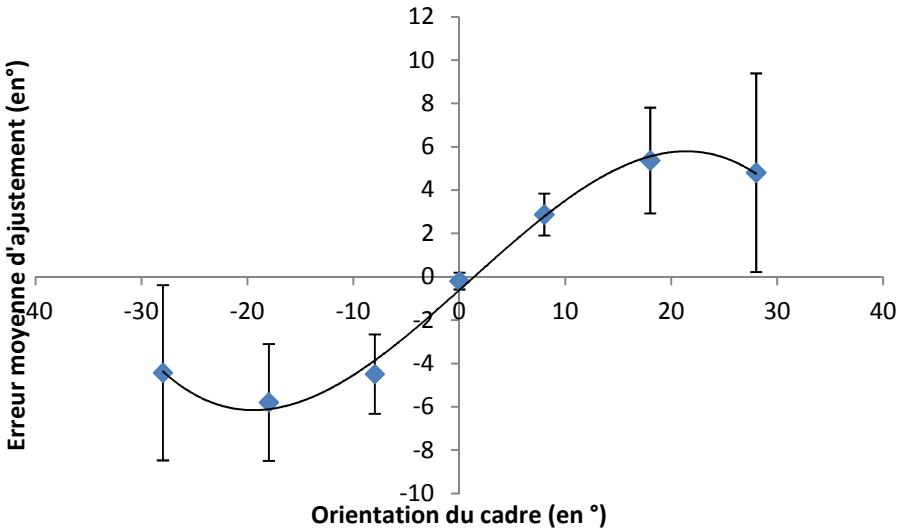


***Figure 13**. Erreur moyenne d'ajustement et variance interessai intrasujet moyenne (barres d'erreur) en fonction de l'inclinaison du cadre.*

L'erreur moyenne d'ajustement (EMA), l'erreur absolue moyenne d'ajustement (EAMA), l'incertitude perçue moyenne (IPM), la variabilité intraessai moyenne (VIaEM) et la variance interessai moyenne (VIeEM) pour chaque inclinaison de cadre sont présentées dans le tableau 6.

Angle cadre	Erreurs d'ajustements		Incertitude		
	EMA	EAMA	IPM	VIaEM	VIeEM
-28	-4,43	5,27	13,61	2,72	4,05
-18	-5,80	5,99	11,52	2,25	2,70
-8	-4,49	4,50	9,98	2,10	1,84
0	-0,20	0,72	8,41	1,67	0,38
8	2,87	3,71	11,30	2,38	0,97
18	5,37	5,69	12,65	2,46	2,44
28	4,81	6,05	13,90	3,10	4,58

***Tableau 6**. Erreur moyenne d'ajustement (EMA), erreur absolue moyenne d'ajustement (EAMA), incertitude perçue moyenne (IPM), variabilité intraessai moyenne (VIaEM) et variance interessai moyenne (VIeEM) pour chaque inclinaison de cadre.*

Une analyse corrélationnelle a été effectuée entre chacune des variables présentées ci-dessus à partir des moyennes calculées pour chaque sujet et chaque condition d'inclinaison de cadre. Il apparait que l'erreur absolue moyenne d'ajustement

corrèle négativement et significativement avec l'incertitude perçue ($r=-0,20$; $p<0,05$), positivement et significativement avec la variabilité intraessai moyenne ($r=0,45$; $p<0,05$) et la variance interessai ($r=0,41$; $p<0,05$). De plus, il apparait également que la variabilité intraessai moyenne corrèle positivement et significativement avec la variance interessai ($p<0,05$; $r=0,29$). Toutes les corrélations significatives sont représentées dans la figure 14.

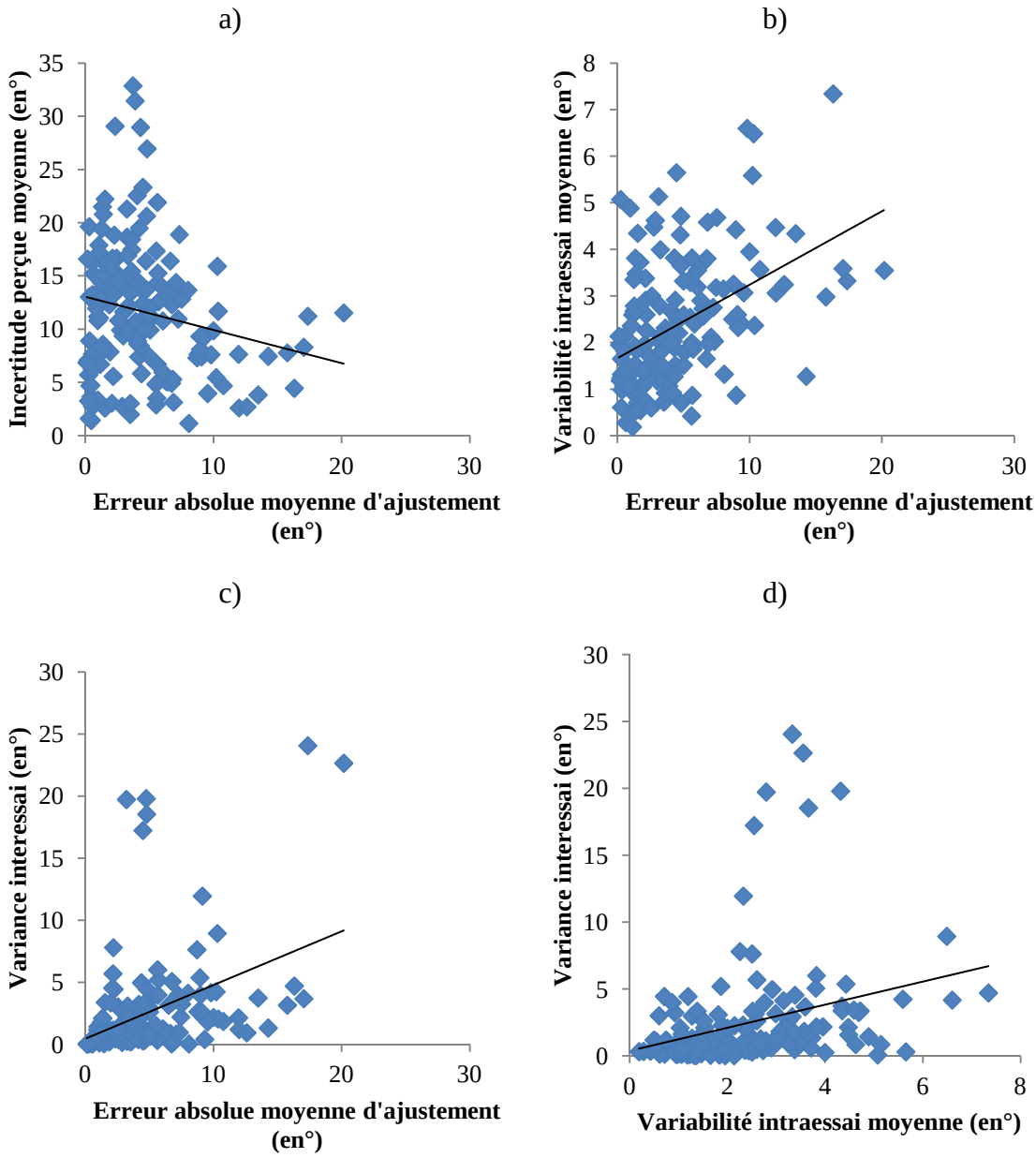


Figure 14. *Corrélation entre erreur absolue moyenne d'ajustement et (a) incertitude perçue, (b) variabilité intraessai moyenne et (c) variance interessai. Corrélation entre variabilité intraessai et variance interessai (d).*

Une ANOVA à mesures répétées a été effectuée et a révélé l'existence d'une différence significative entre l'incertitude perçue et la variabilité intraessai ($F(1, 160)=342,34$; $p<0,05$) et entre l'incertitude perçue et la variance interessai $F(1, 160)=288,69$; $p<0,05$). Aucune différence significative n'apparait entre la variabilité intraessai et la variance interessai $F(1, 160)=0,017$; $p=0,90$). Les moyennes de chacune

de ces variables sont représentées, en fonction de l'inclinaison du cadre, dans la figure 15.

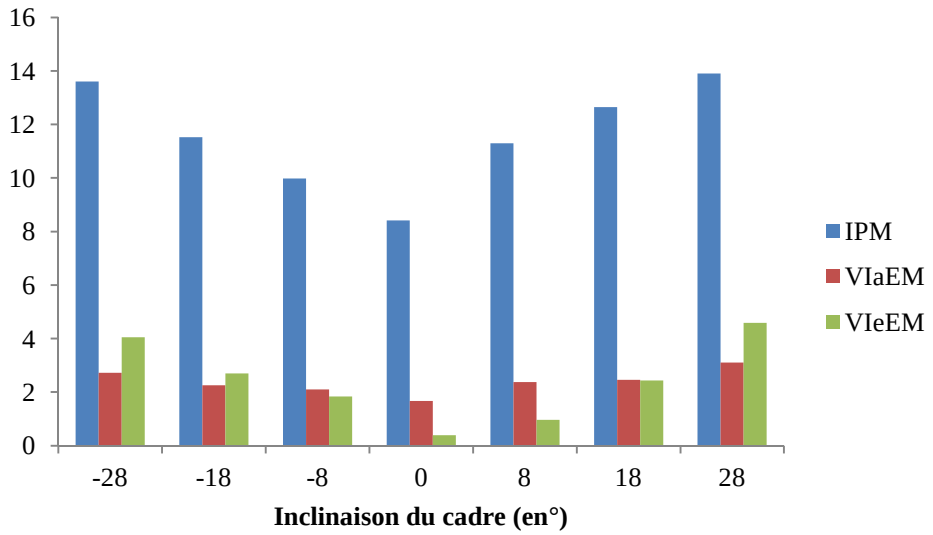


Figure 15. *Moyennes (en °) pour l'ensemble des sujets de l'IPM, de la VIaEM et de la VIeEM en fonction de l'inclinaison du cadre.*

Un examen plus approfondi des résultats a été effectué en prêtant attention aux données individuelles de chaque sujet. Précédemment, nous avons affirmé que, traditionnellement l'incertitude d'un individu était estimée à partir de la variabilité de ces estimations. Cette variabilité, calculée à partir de la variance des estimations observées dans une condition traduisant donc une incertitude moyenne, pose le problème de son origine (fluctuations attentionnelles, changement progressif de référentiel, renforcement de l'influence d'un référentiel ou même évolution en fonction de l'état de fatigue du sujet). L'incertitude traitée par les mécanismes d'orientation spatiale sollicités au moment de l'estimation de la VS a pu alors être surestimée selon le choix ou les fluctuations de choix des cadres de référence. L'exemple suivant illustre un sujet dont la dépendance au référentiel visuel évolue au cours des essais (cf. Figure 16, sujet 11). L'analyse de l'évolution des variabilités interessai, intraessai et perçue associée à cette augmentation de la dépendance visuelle, révèle que la variabilité interessai augmente en

conséquence. Par conséquent, l'incertitude interessai sous-estime probablement l'incertitude intraessai ou perçue lorsque l'individu change de cadre de référence ou renforce le poids d'un référentiel préférentiel au cours d'une même condition. En effet, le probable changement de cadre de référence entre les essais 3 et 4 entraine une augmentation de la variance interessai, tandis que dans le même temps, l'incertitude perçue et la variabilité intraessai restent relativement stables. L'incertitude propre au cadre de référence établie à partir de la variance des résultats des 6 essais est ainsi surestimée.

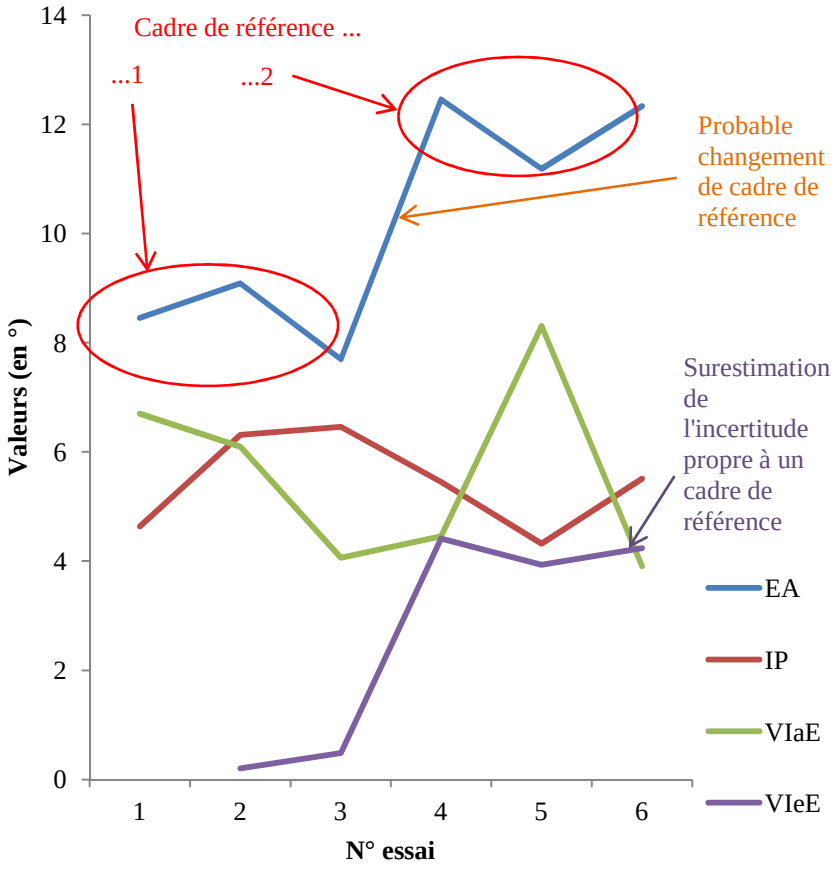


***Figure 16**. Exemple de l'erreur d'ajustement (EA), l'incertitude perçue (IP), la variabilité intraessai (VIaE) et la variance interessai (VIeE) chez le sujet 11 dans la condition cadre à +28°.*

Inversement, l'exemple suivant illustre un sujet dont la dépendance au référentiel visuel reste stable (cf. Figure 17, sujet 14). L'analyse de l'évolution des variabilités interessai, intraessai et perçue associée à cette dépendance visuelle, révèle que la relative stabilité de l'erreur d'ajustement au cours du temps est également associée à une variance interessai relativement faible et variant peu, tandis que dans le même temps l'incertitude perçue par le sujet est forte tout en ayant tendance à augmenter.

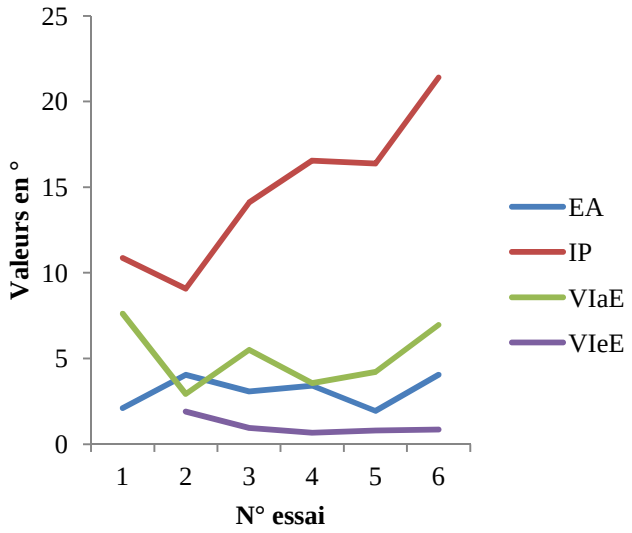


***Figure 17**. Exemple de l'erreur d'ajustement (EA), l'incertitude perçue (IP), la variabilité intraessai (VIaE) et la variance interessai (VIeE) chez le sujet 14 dans la condition cadre à +18°.*

c. Discussion

Conformément à la littérature (Brenet & Luyat, 1995; Bringoux et al., 2009; Oltman, 1968), nos résultats montrent que le pic maximal des erreurs moyennes d'ajustement de la VS induite par l'inclinaison du cadre se situe aux alentours de ± 18°. Afin de maximiser la dépendance au champ visuel, il paraitra donc judicieux d'utiliser ces inclinaisons dans de futures expériences.

Le but de cette étude était d'explorer les différentes formes de variabilités inhérentes à la passation d'un RFT 3D. La corrélation positive entre l'erreur absolue moyenne d'ajustement et la variance interessai est conforme à la littérature (Ohlmann, 1985) ; plus le sujet est dépendant au champ visuel (DC) plus la variabilité de ces résultats sera importante et inversement. De façon intéressante et conformément à nos hypothèses, on constate également une corrélation positive entre l'erreur absolue moyenne d'ajustement et la variabilité intraessai moyenne. Plus le sujet est dépendant au champ visuel, plus il testerait un large éventail d'orientations de baguette. Ceci s'expliquerait peut être par une exploration visuelle plus importante chez les sujets dépendants (DC). Des auteurs (Ohlmann, Cian, & Mendelsohn, 1984) ont montré que les sujets les plus dépendants présentaient bien "une labilité de leurs mouvements oculaires, dispersés ainsi sur l'ensemble de la scène visuelle alors que les indépendants au champ visuel les centrent dans le secteur utile". De plus l'absence de différence significative entre la variabilité intraessai et la variance interessai laisse supposer que ces deux indices traduisent le même niveau d'incertitude. Cependant, il parait intéressant de noter que la variabilité intraessai offre la possibilité d'observer l'incertitude d'un individu instantanément, et permet ainsi d'en observer son évolution au cours d'une tâche, contrairement à la variance interessai qui traduit une incertitude moyenne sur un laps de temps plus long et pouvant être influencée par différentes sources (fluctuations attentionnelles, changement progressif de référentiel, renforcement de l’influence d’un référentiel ou même évolution en fonction de l'état de fatigue du sujet). Nous avons ainsi pu voir l'exemple de 2 sujets dont la variance interessai a été probablement sur ou sous-estimée et pour lesquels, l'utilisation d'un indice de certitude instantanée pourrait s'avérer judicieux. L'utilisation de la variabilité intraessai pourrait ainsi être utilisée dans de futures expériences afin de quantifier la fiabilité accordée aux signaux sensoriels ou

aux référentiels spatiaux disponibles et par conséquent la pondération qu'il leur serait alloué en fonction de changements provoqués de fiabilité des référentiels.

Les résultats observés montrent que l'estimation consciente de son niveau de certitude, via l'estimation des limites de la zone de verticalité, est moins bonne. Elle traduirait une tendance à sous-estimer sa capacité à discerner différentes orientations spatiales. En effet, l'incertitude perçue s'est avéré significativement plus importante que l'incertitude instantanée (intraessai) ou globale (interessai). Nous pouvons cependant constater que l'incertitude perçue fait l'objet d'une forte variabilité interindividuelle, forte chez certains sujets et faible chez d'autres. Tout comme il est possible d'effectuer un continuum de dépendance/indépendance au champ visuel en se basant sur l'erreur moyenne d'ajustement, il semblerait qu'il soit possible de faire de même en se basant sur le niveau de certitude du sujet (cf. Figure 18). Une nouvelle classification semble alors possible : les sujets ayant un fort niveau de certitude et les sujets ayant un faible niveau de certitude. Cette nouvelle classification pourrait s'avérer pertinente dans l'étude des mécanismes de pondération ou repondération des signaux sensoriels. En effet, une des hypothèses expliquant les différences interindividuelles observées (DC vs IC) lors de perception d'orientation spatiale est que les individus utiliseraient des règles d'intégration multisensorielle différente (MLE, WTA, …) en fonction de leur profil perceptif. Il semblerait cependant qu'au sein d'un groupe d'individu du même profil perceptif (i.e., DC ou IC), l'incertitude propre à un cadre de référence varie. Une classification des individus établie sur la base de leur niveau de certitude perçue serait peut être plus pertinente pour dégager une règle d'intégration multisensorielle spécifique d'un profil perceptif. On peut supposer par exemple, qu'un individu ayant un fort niveau de certitude utiliserait davantage une règle d'intégration multisensorielle type MLE (i.e.,

une pondération des entrées sensorielles), tandis qu'un individu avec un faible niveau de certitude s'appuierait sur une stratégie de moyenne non-pondérée des différentes entrées sensorielles.

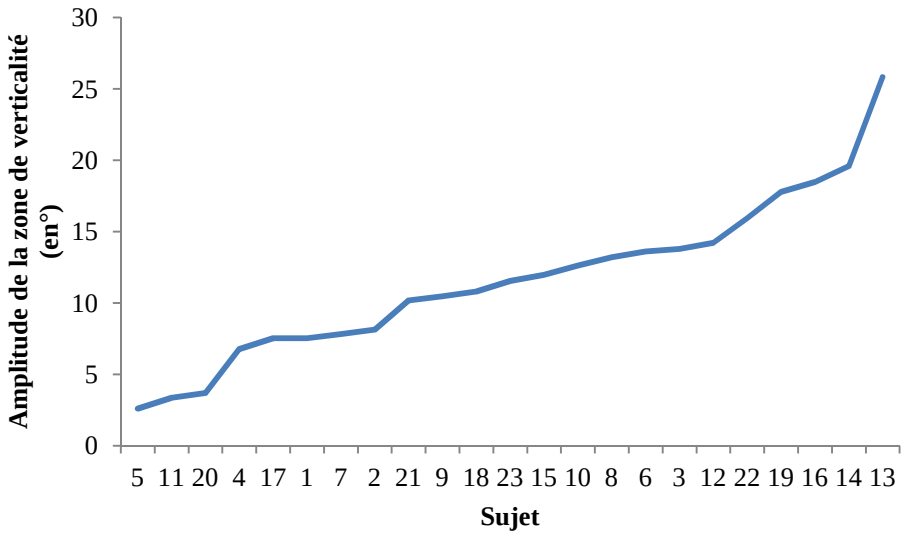


***Figure 18**. Illustration du continuum des valeurs d'incertitude moyenne perçue (via l'estimation de la zone de verticalité).*

Dans l'étude suivante, nous essayerons d'identifier quelles sont les stratégies de combinaison des différentes informations disponibles utilisées par les individus afin d'établir une perception optimale de l'environnement. Dans un deuxième temps, nous évaluerons la capacité propre à chaque individu à faire évoluer le poids attribué à chaque référentiel et ce en fonction du caractère approprié ou non de ce dernier.

Deux hypothèses explicatives des différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiale peuvent être avancées :

- i) les sujets diffèrent dans leur capacité à estimer la fiabilité de chaque signal et/ou référentiel et à leur allouer un poids proportionnel à celle-ci (fiabilité),
- ii) ou les sujets diffèrent dans leur capacité à estimer le caractère approprié des référentiels exo-centrés avec lesquels ils géreront l'alignement avec le référentiel égocentré.

IV. Expérience 4 : Règles d'intégration des signaux sensoriels et pondération des référentiels

Notre capacité à percevoir et contrôler quotidiennement notre orientation spatiale dans le champ gravito-inertiel (CGI) est basée sur l'alignement des axes du cadre de référence égocentrique (Fourre et al., 2009; Isableu et al., 2009; Isableu et al., 2010), sur les directions du vecteur force gravito-inertielle (FGI) ou sur un substitut de la direction gravitaire, à savoir les axes du cadre de référence visuel. La gestion de cette interaction va dépendre de la nature des axes du référentiel égocentré que les individus vont privilégier (les axes géométriques articulaires (Guerraz, Poquin, Luyat, & Ohlmann, 1998; Guerraz et al., 1998; Guerraz, Luyat, Poquin, & Ohlmann, 2000) et/ou les axes liés à la distribution des masses du corps (Bernardin, Isableu, Fourcade, & Bardy, 2005; Fourre et al., 2009; Isableu et al., 2009; Pagano & Turvey, 1995)) afin de s'adapter à l'évolution des contraintes spécifique à la tâche et à l'environnement (Isableu et al., 2009). La sélection des cadres de références (CDR) ou référentiels (les deux termes étant équivalent) exo-centrés appropriés semble également être un facteur clé dans l'élaboration d'une perception spatiale et dans la production d'interactions robustes avec notre environnement, mais fait aussi l'objet de préférences stylistiques.

La précision et la justesse avec laquelle nous percevons l'orientation de l'axe de la tête (orientation subjective de la tête, OST) contribue à l'efficacité de ces interactions spatiales.

Il est clairement établi que notre perception de l'orientation du corps (orientation subjective du corps, OSC) est modifiée durant une inclinaison passive du corps en roulis (Aubert, 1861; Mittelstaedt, 1983; Witkin & Asch, 1948b). L'inclinaison du corps altère la perception de l'orientation du corps (l'axe céphalo-caudal). Deux sortes d'erreurs sont

classiquement observées en fonction de l'inclinaison du corps. Pour les inclinaisons inférieures à 60°, l'OSC sous-estime l'angle physique entre le corps et la direction gravitaire (c.à.d. l'orientation du corps est perçu comme étant moins inclinée que dans la réalité). Au-delà d'une inclinaison de 90°, l'OSC surestime l'angle corps-gravité (c.à.d. l'orientation du corps est perçue comme étant plus inclinée que dans la réalité). Ces erreurs d'estimations ont souvent été imputées au caractère passif des conditions d'inclinaison du corps qui ont pour effet notamment de supprimer ou de limiter fortement l'accès aux dynamiques d'équilibre (Riccio et al., 1992; Stoffregen & Bardy, 2001). La réalisation de cette tâche lors d'une inclinaison active du corps à permis de répondre à cette question. Les résultats obtenus par Van Beuzekom et al. (Van Beuzekom, Medendorp, & Van Gisbergen, 2001) montrent que la restitution des signaux somato-proprioceptifs et des copies efférentes améliorent la perception de l'OC. De récentes études menées au laboratoire CIAMS, portant non plus sur la perception de l'OC mais sur la verticale visuelle subjective (VVS), ont aussi montré que la déviation du centre de masse de l'ensemble tête-tronc, lors du maintien actif de l'alignement du corps avec la direction de la force gravitaire, modifiait la perception de la verticale visuelle (Fourre et al., 2009). Ces résultats suggèrent que les signaux proprioceptifs liés à la distribution des masses du corps participent largement à l'élaboration de la verticale subjective. Cette hypothèse a reçu un soutient direct (Barra et al., 2010) et indirect (Anastasopoulos, Bronstein, Haslwanter, Fetter, & Dichgans, 1999; Bernardin et al., 2005; Yardley, 1990). Il est aussi clairement établi que le non-alignement des axes du cadre de référence visuel (c.à.d. un cadre incliné) avec la direction des axes du corps modifie à la fois la verticale subjective et la verticale posturale (Guerraz et al., 2001; Lopez, Lacour, Magnan, & Borel, 2006; Vingerhoets, De, Van Gisbergen, & Medendorp, 2009).

L'étude des erreurs de perception de l'OT est un moyen d'accéder aux processus computationnels à l'origine de notre perception de l'orientation du corps. L'objectif de cette expérience est d'étudier plus particulièrement la façon dont les différentes modalités sensorielles (visuel, vestibulaire, proprioception) sont combinées ensemble lors d'une tâche de perception de l'OT. La combinaison optimale de multiples signaux sensoriels permet d'obtenir des estimations plus fiables et moins biaisées (Ernst & Banks, 2002). De récentes études ont apportées des preuves indirectes d'une combinaison optimale des signaux lors de tâches portant sur la VVS (Bringoux et al., 2009). Ces auteurs ont montré dans une tâche d'estimation de la VVS dans un environnement visuel biaisé que le "Rod and Frame Effect" (RFE) sur la VVS diminuait dans la condition d'ajustement visuo-haptique (c.à.d. la baguette était ajustée en la tenant et en la voyant) comparé à une condition visuelle (c.à.d. la baguette visuelle était ajustée par une télécommande). Ce résultat suggère que l'amplitude de l'effet cadre augmente avec l'appauvrissement des modalités de réponse sensorielle. Additionner et combiner les signaux issus de différentes modalités sensorielles réduit l'effet cadre, mais ne l'annule pas complètement (Bringoux et al., 2009; Graybiel, 1952). Cette dépendance résiduelle au CDR visuel pourrait refléter les règles de traitement centrales appliquées par le système nerveux aux cadres de référence (pondération plus forte du CDR visuel chez les sujets DRV et du CDR proprioceptif-vestibulaire chez les IRV). Cependant, les règles d'intégration sensorielle régissant la diminution du RFE dans la modalité de réponse visuo-kinesthésique sur la VVS restent inconnues. Est-ce que la combinaison des modalités visuelles et kinesthésiques réduit aussi l'effet du centre de masse sur la OST ?

L’objectif de cette expérience consiste à identifier les règles d’intégration multisensorielle et de sélection des référentiels spatiaux qui participent à l’estimation de l'orientation de la tête (OST). Il s’agira plus particulièrement d’étudier comment les différentes modalités de réponse (visuelle, haptique et visuo-haptique) et les indices relatifs à l’orientation d’une baguette relativement à l’axe de la tête, sont combinés et si les règles utilisées varient en fonction du cadre de références privilégié. Afin de répondre à cette question, les sujets seront confrontés à un CDR visuel dévié et/ou à une déviation du centre de masse (CM) de la tête. La question était d'estimer si les effets d'un cadre visuel incliné et/ou de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OST peuvent être désambigüisés, c.à.d. réduis en combinant plusieurs signaux, et si le bénéfice résulte de la mise en application d'une règle optimale.

Cette question sera étudiée en lien avec les importantes différences interindividuelles (DI) observées de façon systématique lors de ces tâches de perception d'orientations spatiales (Asch & Witkin, 1948b; Ernst & Bulthoff, 2004; Ohlmann & Marendaz, 1991; Witkin & Goodenough, 1981). L'origine de ces différences reste peu comprise. Il est suggéré que ces DI reflètent des préférences dans l'utilisation de CDR (Isableu et al., 1997; Isableu et al., 2010; Ohlmann, 1985; Ohlmann & Marendaz, 1991). Cependant, des hypothèses alternatives pourraient expliquer de telles idiosyncrasies, et porteraient sur la manière dont les sujets combinent les signaux provenant de différentes modalités sensorielles en dépit du caractère approprié (ou inapproprié) des CDR disponibles. Plusieurs règles d'intégration multisensorielle ont déjà été identifiées. Le modèle Winner-Take-All (WTA) laisse entendre qu'un individu favorise la modalité la plus fiable, c.à.d. la modalité avec la plus petite variance (Bresciani, Dammeier, & Ernst, 2006). Le biais d'estimation ainsi que la variance perçue dans la condition

multimodale serait similaire à celui obtenu avec la modalité la plus fiable seule. La règle Maximum Likehood Estimation (MLE) (Ernst & Banks, 2002) suppose que l'individu attribue un poids à chaque modalité sensorielle. Ce poids est proportionnel à leur fiabilité, et mène à une moyenne pondérée des modalités sensorielles dans la condition multimodale. Dans les deux cas, l'ajustement multisensoriel de la baguette sur l'orientation de la tête devrait être biaisé dans le sens de la modalité la plus fiable. Le biais peut être réduit (ou augmenté) avec une plus grande importance en utilisant la règle WTA, tandis que la variance de la perception de l'OT devrait être réduit de façon optimale en utilisant la règle MLE pour tomber proche de la modalité la plus fiable.

La question soulevée par le problème des DI dans le domaine de la perception d'orientation spatiale est de savoir si oui ou non ces les modes préférentiels de référentiation spatiale reflètent l'incapacité de certains sujets à pondérer les signaux sensoriels au prorata de leur fiabilité ou s'ils échouent à identifier le caractère approprié des référentiels disponibles (le degré de congruence avec la direction gravitaire) afin de combiner de façon optimale les signaux sensoriels, ou, finalement, s'ils pondèrent les CDR en se basant sur leur fiabilité sans tenir compte du degré de congruence avec la direction gravitaire. Le but de cette étude était aussi de tester si l'utilisation d'une règle optimale d'intégration multisensorielle explique mieux les donnés obtenues par la combinaison des signaux visuel et haptique pour produire une perception optimale de l'OT.

Plus précisément, nous faisons l'hypothèse que l’intégration des signaux visuel et haptique procède selon i) la règle MLE lorsque les CDR disponibles sont congruents et non-biaisés ; ii) la règle WTA lorsqu'un CDR est biaisé parce qu'il contraint les

individus à privilégier le CDR fiable restant ; iii) une simple moyenne algébrique non-pondérée (MNP) lorsque plusieurs CDR sont biaisés. Par conséquent, la combinaison multimodale devrait être sous-tendue i) par une règle MLE lorsque la congruence entre les CDR est maximale et aboutirait à une perception optimale de l'OT. La perception de l'OT devrait être plus fiable en condition multimodale (la variance des estimations multimodales est plus faible que la variance des estimations uni-modales) et biaisée en direction de la modalité sensorielle la plus fiable, ii) par une règle non-pondérée de combinaison des modalités sensorielles lorsque la discongruence entre les CDR est maximale et se traduire par un équilibre des influences réciproques des modalités sensorielles sur le biais et la variance de la perception de l'OT.

Concernant la question des DI dans la sélection des CDR visuel et égocentrique, nous avons testé si ces dépendances aux CDR contraignent les modes d'intégration visuelle et haptique de la perception de l'OT en aval.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

13 sujets, âgés de 25 ans et 2 mois (± 2 ans et 2 mois), ont volontairement pris part à l'expérience. Tous étaient droitiers ne présentaient aucun historique de blessure ou pathologie pouvant affecter leurs capacités à effectuer les tests d'orientation spatiale. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Estimation de la dépendance individuelle au CDR visuel : Effet d'un cadre incliné sur la perception de l'OT

La dépendance au CDR visuel a été estimée au moyen d'un RFT 3D adapté de la version originale développé par Oltman (Oltman, 1968). La baguette du RFT 3D était affichée un écran de TV HD et isolé par 1) un tunnel optique de forme cylindrique ; ou par 2) un tunnel optique rectangulaire 3D (similaire au RFT 3D standard d'Oltman) (Oltman, 1968). Le tunnel optique cylindrique était de couleur noire, de 105,5 cm de long et de 62,5 cm de diamètre. Le tunnel optique rectangulaire 3D (long de 105,5 cm, et de 46 cm de côté) fait de plastique blanc translucide a été préféré à un affichage 2D afin de maximiser l'amplitude de l'effet cadre visuel sur les estimations perceptives (Isableu et al., 2008). Une baguette noire affichée sur la TV, pouvant être inclinée indépendamment du cadre, était positionnée au bout de chacun des deux types de tunnels optiques. Les sujets assis à l'autre bout du tunnel optique étaient soumis à trois contextes visuels (pas de cadre vs cadre incliné à 18° à droite vs cadre incliné à 18° à gauche). La contribution des signaux cutanés provenant du contact des pieds avec le sol était limitée par la consigne donnée au sujet de tendre les jambes afin d'avoir uniquement les talons en contact avec le sol. La tête n'était pas attachée, mais l'effet des signaux vestibulaire était limité par la consigne donnée au sujet de garder la tête droite et aussi stable que possible. Bringoux et al. (Bringoux et al., 2009) ont montré aucune modulation de l'amplitude de l'effet cadre selon les conditions de maintien de la tête (attachée ou non-attachée).

Estimation de la dépendance individuelle au CDR égocentrique : Effet de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OT

Le référentiel égocentrée est constitué de différents systèmes de coordonnées intriquées (systèmes de coordonnées propres aux axes articulaires, aux masses et aux inerties (Bernardin et al., 2005; Isableu et al., 2009; Pagano & Turvey, 1995; van de Langenberg, Kingma, & Beek, 2008). La dépendance des sujets à une altération de la distribution des masses du référentiel égocentrée à été évaluée au moyen du Rod and Mass Alteration Test (RMAT, (Fourre et al., 2009)). Le centre de masse (CM) de la tête était dévié par des masses positionnées sur un casque de manière excentrée par rapport à l'axe longitudinal de la tête (définit par l'axe C7-vertex) (cf. Figure 19). Les masses étaient fixées de façon asymétrique sur le côté de la tête au sommet du casque. Une masse de 187g était placée en moyenne à 12,7cm (±2,16cm) du centre de l'axe de la tête pour dévier le CM de la tête de 9,24° (±0,22°). La déviation était codée négativement lorsque la masse ajoutée entrainait une déviation du CM de la tête sur la gauche du sujet et inversement. Les conditions de déviation du CM de la tête étaient les suivantes : -9°, 0° et +9°. La condition contrôle, correspondant à une absence de déviation du CM de la tête, était obtenue sans ajouter de masse sur le casque. Les déviations du CM de la tête étaient calculées en utilisant la protocole utilisé par (Kwon, 2002) qui est une adaptation du modèle géométrique d'Hanavan (Hanavan, 1964).

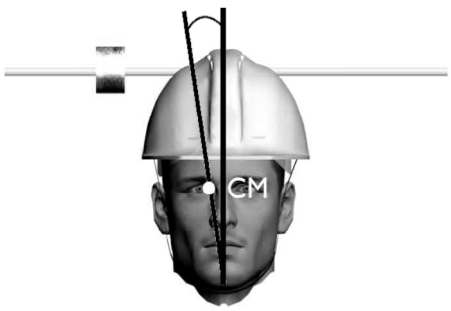


Figure 19*. Illustration du dispositif utilisé afin de dévier le CM de la tête.*

Les sujets avaient pour consigne d'ajuster la baguette parallèlement à l'axe longitudinal de leur tête dans 9 conditions : 3 contextes visuels (sans cadre vs cadre incliné à 18° à droite vs cadre incliné à 18° à gauche) combinés à 3 déviations du CM de la tête (absence de déviation vs déviation à gauche vs déviation à droite). Aucune contrainte de temps n'était donnée au sujet pour effectuer leur estimation, il devait uniquement ajuster la baguette parallèlement à l'axe Z de la tête le plus précisément possible. Avant chaque ajustement, la baguette utilisée afin d'estimer l'OT était incliné à 18° soit à gauche soit à droite. Les sujets avaient pour consigne de garder leur tête droite (l'orientation de la tête était vérifiée visuellement par l'expérimentateur à l'aide d'un fil à plomb fixé derrière le sujet). Une période d'exploration de 30s était donnée au sujet afin d'apprécier la modification de la distribution des masses de la tête. L'ordre des conditions était aléatoire d'un sujet à l'autre. Les sujets effectuaient 4 essais par condition (2 avec la baguette initialement inclinée à droite et 2 à gauche).

Modalités de réponse sensorielle

Pour chacune des 9 conditions les sujets devaient ajuster la baguette parallèlement à l'axe longitudinal perçu de la tête (axe Z de la tête c.-à-d. l'axe allant de C7 à l'occiput, C7 étant le centre de rotation de la tête) selon 3 modalités de réponse : (1) visuel, (2) haptique ou (3) visuo-haptique.

(1) Dans la modalité de réponse visuelle (cf. Figure 20a), les sujets devaient ajuster une baguette virtuelle visuelle (d'une taille angulaire de 14° verticale et 0,5° horizontale) affichée sur l'écran de TV, au moyen d'un clavier d'ordinateur.

(2) Dans la modalité de réponse haptique (cf. Figure 20b), les sujets devaient ajuster une baguette physique (mesurant 25cm de long et 1cm de diamètre) tenue dans leurs mains (entre le pouce et l'index de chaque main). Les sujets ne pouvaient pas voir la baguette qu'ils tenaient.

(3) Dans la modalité de réponse visuo-haptique (cf. Figure 20c), le déplacement de la baguette physique était associé, en temps réel, au même déplacement de la baguette virtuelle sur l'écran de TV. Le co-alignement de la baguette virtuelle avec la baguette physique a été vérifié avant l'expérience.

Les modalités de réponse haptique et visuo-haptique diffèrent légèrement dans notre étude de celles utilisées par Bringoux et al. ((Bringoux et al., 2009). Etant donné que la baguette était tenue entre le pouce et l’index de chaque main, à proximité du tronc (environ 20cm), le rôle des signaux haptiques était augmenté, alors que les variables biomécaniques et kinesthésiques des membres supérieurs étaient minimisées contrairement à l'étude de Bringoux et al. (Bringoux et al., 2009). Pour cette raison, nous avons qualifié ces conditions de réponse "haptique" et "visuo-haptique" et non "kinesthésique" et "visuo-kinesthésique".

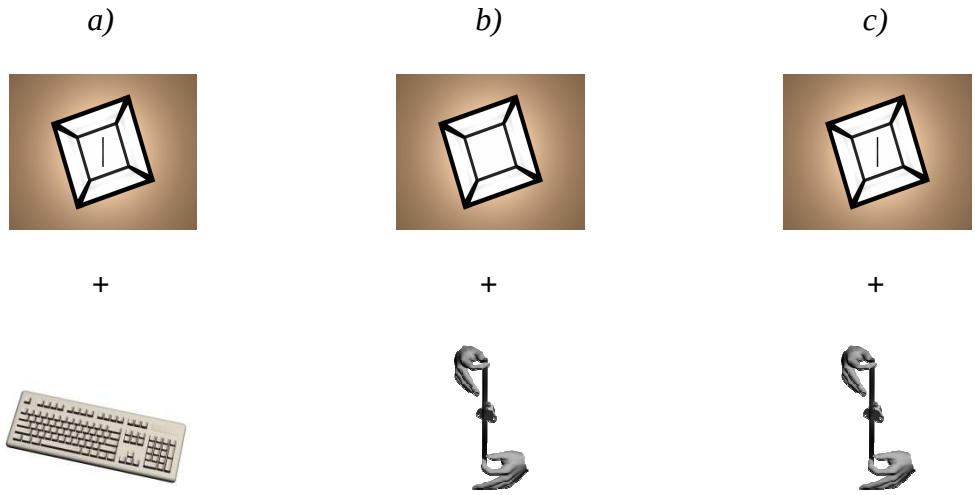


Figure 20*. Illustration des modalités de réponse sensorielle : visuelle (a), haptique (b) et visuo-haptique (c).*

iii. Analyses statistiques

L'orientation finale de la baguette visuelle était enregistrée à chaque essai avec une précision de 0,03°. Pour les modalités de réponse haptique et visuo-haptique, l'orientation finale de la baguette était enregistrée en utilisant un capteur magnétique, Flock of Birds™ (Fourre et al., 2009). La précision de la mesure d'orientation de la baguette physique était de 0,05°.

Nous nous sommes intéressés à la précision et à l'exactitude de la mesure de la perception de l'OT. Une rapide inspection de nos données a révélé un effet principal de la position de départ de la baguette, presque significatif, dans la modalité de réponse haptique ($F(1, 12)=4,127$, $p=0,06$). Aucun effet de la position de départ de la baguette n'a été observé ni dans la modalité de réponse visuelle ($F(1, 12)=1,148$, p=ns) ni dans la modalité de réponse visuo-haptique ($F(1, 12)=0,021$, p=ns). L'effet de la position de départ de la baguette résulte du positionnement des mains sur la baguette. Lorsque la baguette est initialement inclinée à gauche par rapport à l'axe longitudinal du sujet, la

main gauche est positionnée au dessus de la baguette, et inversement, lorsque la baguette est initialement inclinée à droite par rapport à l'axe longitudinal du sujet, la main droite est positionnée au dessus de la baguette. Cet effet de la position initiale de la baguette et/ou de la main sur l'orientation finale de la baguette est vraisemblablement dû à un effet moteur et pourrait fortement influencer la mesure de la variance et de la moyenne des estimations de la perception de l'OT dans tout son ensemble. Afin d'annuler cet effet de la position de départ de la baguette de la variance totale, nous avons d'abord calculé la différence entre la moyenne des essais dans chaque condition de position de départ de la baguette et la moyenne de tous les essais dans chaque condition quelle que soit la position de départ de la baguette. La valeur obtenue a alors été soustraite aux valeurs obtenues à chaque essai. La variance et la moyenne des perceptions de l'OT obtenues reflètent alors l'effet de la perturbation du CDR (visuel ou égocentrique) sans l'effet de la position initiale de la baguette. A partir des valeurs corrigées, nous avons calculé l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition et chaque modalité de réponse.

Règles d'intégration multisensorielle

Finalement, afin de vérifier si la diminution de l'effet d'un cadre visuel incliné sur la perception de l'OT dans la modalité de réponse visuo-haptique est due à l'utilisation d'une règle optimale de combinaison des informations visuelle et haptique (type MLE), nous avons calculé la valeur prédite dans la modalité de réponse combinée visuo-haptique à partir des données obtenues dans les modalités réponses visuelle et haptique seules. Dans le modèle Winner-Take-All (WTA), l'estimation combinée (S) des 2 sources d'informations sensorielles et la variance associée est équivalente à

l'estimation et à la variance de l'information sensorielle qui à la plus petite variance (Bresciani et al., 2006).

Dans la règle de Maximum Likehood Estimation (MLE) (Ernst & Banks, 2002), l'estimation combinée (S) des 2 sources d'information sensorielle est équivalente à la somme des estimations (S_i) de chaque information sensorielle seule, pondérée par la fiabilité de chaque signal (w_i).

Equation (7)

$$S = \sum_i w_i S_i$$

La fiabilité (w_i) de chaque signal est calculée à partir de la variance (σ_i) de chaque signal.

Equation (8)

$$w_i = \frac{1/\sigma^2{}_i}{\left(1/_{\sigma^2{}_i}\right) + \left(1/_{\sigma^2{}_j}\right)}$$

La variance σ_{ij} de l'estimation finale est

Equation (9)

$$\sigma^2{}_{ij} = \frac{\sigma^2{}_i \sigma^2{}_j}{\sigma^2{}_i + \sigma^2{}_j}$$

Règles de combinaison des référentiels spatiaux d'orientation

Après avoir vérifié si l'intégration de différents signaux sensoriels suivait une règle d'intégration multisensorielle optimale, nous avons également cherché à savoir si ces règles s'appliquaient à la combinaison de plusieurs cadres de références. Pour cela, nous avons calculé la valeur prédite par nos différents modèles (WTA, MLE) dans les conditions où 2 CDR étaient perturbés (cadre visuel incliné + déviation du CM de la tête) à partir des données obtenues lorsqu'un seul CDR était perturbé (cadre visuel incliné sans déviation du CM de la tête ou déviation du CM de la tête sans cadre visuel).

Les valeurs d'orientation finale de la baguette ont été sujettes à une analyse de variance appropriée afin d'estimer l'effet des modalités sensorielles d'ajustement de la baguette (visuel vs haptique vs visuo-haptique) sur l'amplitude de l'effet du cadre visuel et sur l'effet de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OT. Seuls les résultats significatifs ($p<0,05$) seront rapportés. Les ANOVAs ont été effectués à l'aide du logiciel STATISTICA 7®.

Afin d'explorer la relation entre les dépendances aux CDR visuel et égocentrique, et également pour éliminer les effets asymétriques du cadre et de la déviation du CM de la tête, nous avons appliqué le calcul de l'effet cadre de Nyborg (Nyborg, 1974) sur nos données corrigées. Pour calculer l'effet du cadre, nous avons calculé l'erreur constante d'ajustement de la baguette pour chaque modalité de réponse (visuelle vs haptique vs visuo-haptique) et pour chaque déviation du CM de la tête. L'erreur constante a été calculée en moyennant, pour chaque sujet, les 8 essais (4 essais avec le cadre à -18° et 4 avec le cadre à +18°) effectués dans chaque modalité de réponse sensorielle (visuelle vs haptique vs visuo-haptique) et chaque déviation du CM

de la tête (-9°, 0°, +9°). L'effet cadre a alors été calculé en soustrayant l'erreur constante de la moyenne des 4 essais effectué avec le cadre incliné à gauche (toujours pour chaque déviation du CM de la tête). Cette procédure de calcul a été appliquée aux déviations du CM de la tête (-9° et +9°) afin d'obtenir l'effet du déplacement du CM de la tête dans chaque modalité de réponse. Pour ceci, nous avons calculé l'erreur constante d'ajustement de la baguette pour chaque modalité de réponse (visuelle vs haptique vs visuo-haptique) et pour chaque inclinaison de cadre. L'erreur constante a été calculée en moyennant, pour chaque sujet, les 8 essais (4 essais avec le CM de la tête dévié à -9° et 4 avec le CM dévié +9°) effectués dans chaque modalité de réponse sensorielle (visuelle vs haptique vs visuo-haptique) et chaque inclinaison du cadre (-18°, 0°, +18°). L'effet de la déviation du CM de la tête a alors été calculé en soustrayant l'erreur constante de la moyenne des 4 essais effectué avec le CM déplacé à gauche (toujours pour chaque inclinaison de cadre).

b. Résultats

Effets du CDR visuel incliné et de la déviation du CM de la tête sur l'OST

Les performances moyennes de perception de l'OT pour chacune des 9 conditions (3 inclinaisons de cadre x 3 déviations du CM de la tête) pour les modalités de réponse visuelle, haptique et visuo-haptique sont rapportées dans le tableau 8. Une ANOVA à mesures répétées effectuée pour chaque modalité de réponse a révélé un effet principal significatif de l'orientation du cadre dans les modalités de réponse visuelle ($F(2, 24)=58{,}172$, $p<0{,}05$) et visuo-haptique ($F(2, 24)=32{,}38$, $p<0{,}05$) mais pas dans la modalité de réponse haptique. L'effet de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OT n'a été observé dans aucune modalité de réponse. Une ANOVA à

mesures répétées effectuée pour chaque sujet a révélé un effet principal significatif de l'orientation du cadre pour l'ensemble des 13 sujets sur 13 dans la modalité de réponse visuelle, pour 3 sujets sur 13 dans la modalité de réponse haptique et pour 11 sujets sur 13 dans la modalité de réponse visuo-haptique. La même analyse individuelle a révélé un effet principal significatif de la déviation du CM de la tête pour 4 sujets sur 13 dans la modalité de réponse visuelle, pour 2 sujets sur 13 dans la modalité de réponse haptique et pour 8 sujets sur 13 dans la modalité visuo-haptique.

Nous avons alors cherché à savoir si la dépendance à un CDR (i.e. le CDR visuel) était inversement corrélée à la non-utilisation d'un autre CDR (i.e. un CDR non visuel). Dans ce but, l'effet cadre visuel (dépendance au référentiel visuel) de chaque individu a été calculé à partir des estimations d'OT réalisées dans la modalité de réponse visuelle dans la condition "pas de déviation du CM de la tête". Ces effets cadres visuels ont ensuite été corrélés aux effets de la déviation du CM de la tête obtenus dans la modalité de réponse haptique dans la condition "pas de cadre". L'effet cadre visuel et l'effet de la déviation du CM de la tête ont été calculé à partir de la méthode de Nyborg (Nyborg, 1974). L'analyse corrélationnelle a révélé une relation négative significative (R^2=0,60 ; $p<0,05$) entre la dépendance au CDR visuel et la dépendance au CDR égocentrique (cf. Figure 21). Ce résultat suggère que plus les sujets s'appuient sur le CDR visuel, moins ils sont influencés par la déviation du CM de la tête, et inversement.

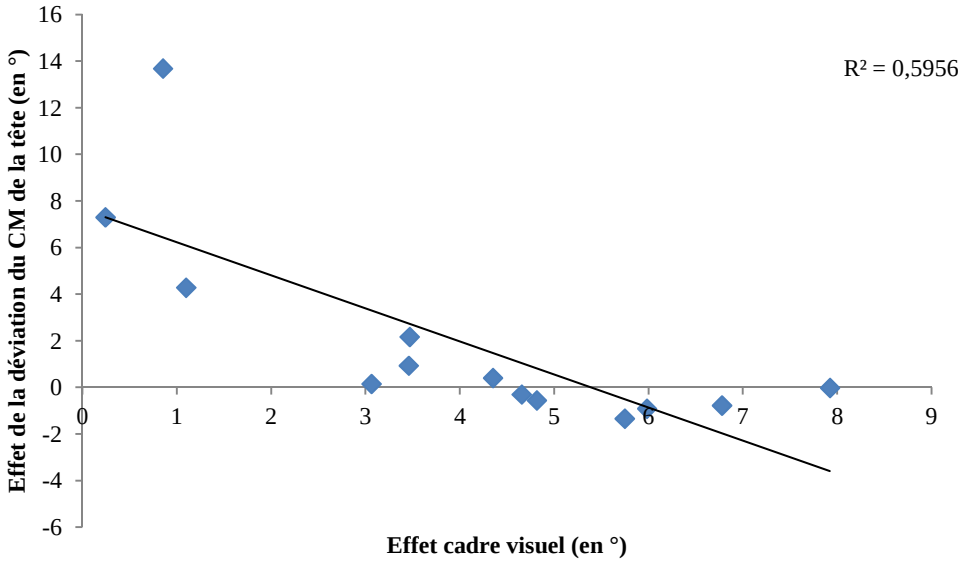


Figure 21. *Corrélation entre les effets cadre individuels obtenus dans la modalité de réponse visuelle dans la condition "pas de déviation du CM de la tête" et les effets individuels de la déviation du CM de la tête dans la modalité de réponse haptique dans la condition "pas de cadre".*

Effets des modalités sensorielles de réponse sur l'OST

Nous avons cherché à savoir si la combinaison de plusieurs modalités de réponse sensorielles (i.e. visuo-haptique) lors de l'ajustement de la baguette permettait de réduire l'effet de l'inclinaison du CDR visuel et de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OT. Pour cela, nous avons examiné les réponses obtenues dans les modalités de réponse visuelle et haptique séparément, puis dans la modalité de réponse visuo-haptique pour chaque condition.

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'enrichissement des modalités de réponses permettait de réduire l'effet de dépendance à un cadre de référence (Bringoux et al., 2009), une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour chaque condition. Le tableau 7 récapitule la présence ou non d'effet principal significatif de la modalité de réponse en fonction des conditions.

	C-18	SC	C+18
CM-9	S (F(2, 24)=7,375, p<0,05)	NS	ES (F(2, 24)=12,333, p<0,05)
CM0	S (F(2, 24)=3,463, p<0,05)	NS	ES (F(2, 24)=27,107, p<0,05)
CM+9	S (F(2, 24)=4,696, p<0,05)	NS	ES (F(2, 24)=12,483, p<0,05)

Tableau 7*. Résumé des effets significatifs (S) ou non significatif (NS) de la modalité de réponse.*

Lorsque l'effet de la modalité de réponse est significatif, l'amplitude de l'erreur moyenne en VH est systématiquement réduite et se situe entre l'erreur moyenne visuelle et l'erreur moyenne haptique (cf. Figure 22). La dépendance au référentiel visuel diminue dans la modalité de réponse VH (ajustement haptique d'une baguette tenue entre les mains et affichée visuellement sur l'écran TV) par rapport à la modalité de réponse V (ajustement de la baguette visuelle sur l'écran TV au moyen du clavier).

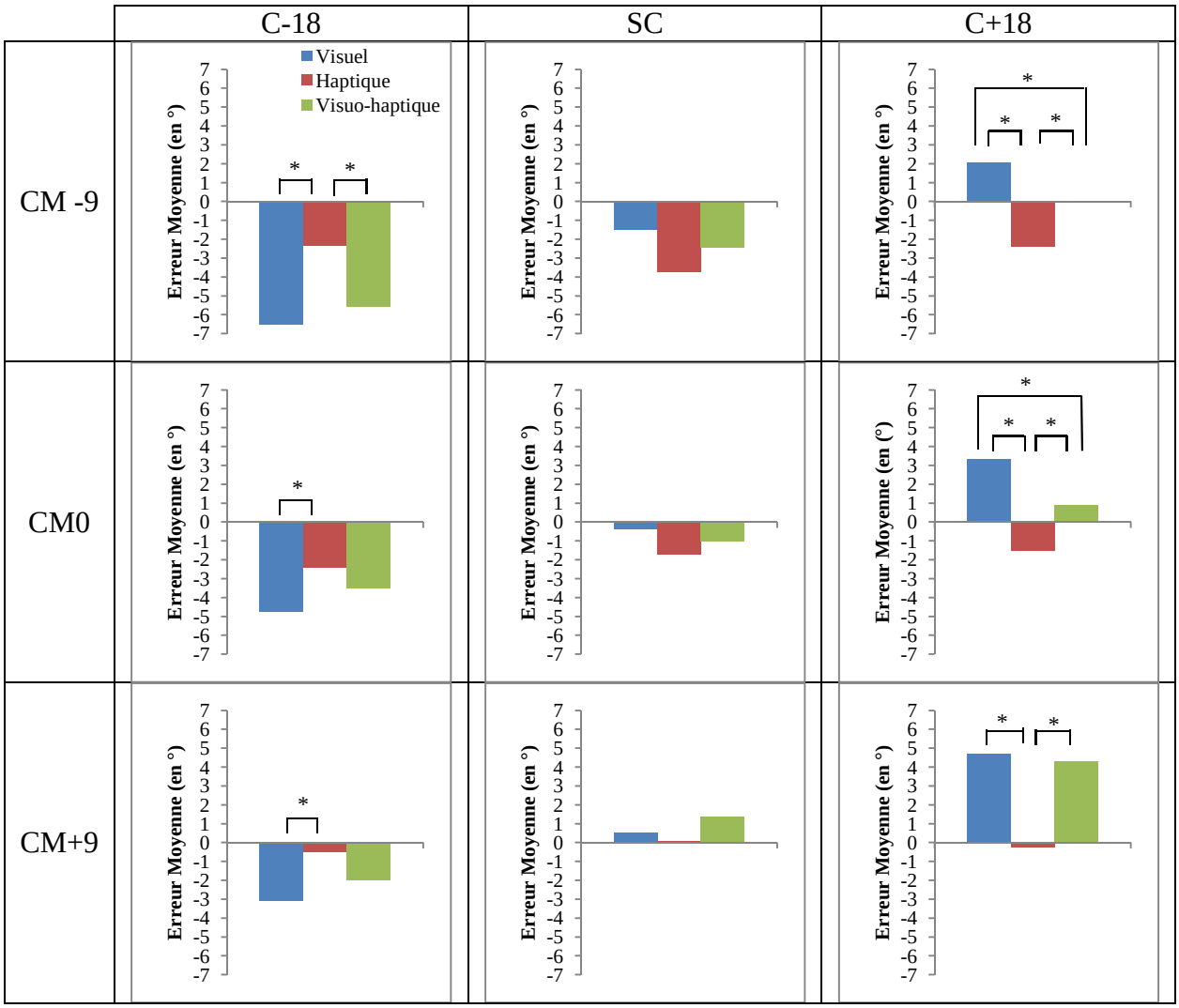


***Figure 22**. Effets des modalités de réponse (visuel = bleu, haptique = rouge, visuo-haptique = vert) en fonction de l'inclinaison du cadre et de la déviation du CM de la tête pour l'ensemble des sujets.*

Règle optimale d'intégration sensorielle (MLE) appliquée aux signaux

Afin de vérifier si la diminution de l'effet d'un cadre visuel incliné sur la perception de l'OT dans la modalité VH découle de l'utilisation d'une règle optimale de combinaison des signaux visuels et haptiques, nous avons décidé de calculer la règle MLE à partir des données des ajustements visuels et haptiques. Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) (cf. Analyses statistiques, p 102) afin de calculer l'erreur moyenne et la variance VH prédites dans chacune des 9 conditions. L'erreur VH prédite par l'utilisation d'une règle MLE a alors été comparée aux données VH observées. Dans

l'hypothèse de l'utilisation d'une règle MLE, l'erreur moyenne d'ajustement dans la modalité de réponse VH devrait se situer entre les erreurs moyennes observées dans les modalités de réponse V et H et biaisée dans la direction de la modalité la plus fiable. La variance VH attendue devrait quant à elle être plus petite que les variances observées dans les modalités de réponse V et H prises isolément.

Les résultats ont montré que le premier critère de validation de l'utilisation de la règle MLE est observé, puisque le biais VH moyen observé n'est pas significativement différent de l'erreur VH moyenne prédite par la règle MLE. Le second critère relatif à la variance n'est cependant pas rempli. En effet, la variance VH observée est significativement différente de la variance VH prédite par la règle MLE ($F(1, 116)=21{,}326$; $p<0{,}05$)). La variance observée dans la modalité VH est toujours plus importante que celle prédite par la règle MLE.

Nous avons fait l'hypothèse que les estimations de l'OT sont optimales lorsque la règle MLE est appliquée lorsque les CDR étaient non-biaisés. La même analyse a été effectuée pour chaque condition (3 conditions de cadre x 3 conditions de déviation du CM de la tête). Les résultats ont montré que l'erreur moyenne VH prédite par la règle MLE ne se différenciait pas de l'erreur moyenne VH observée pour 8 des 9 conditions. Lorsque le cadre était incliné à +18° sans déviation du CM de la tête, on relève une différence significative entre l'erreur moyenne prédite par la règle MLE dans la réponse VH et l'erreur moyenne observé dans la réponse VH ($F(1, 12)=4{,}907$; $p<0{,}05$)), mais pas entre la variance prédite par la règle MLE dans la réponse haptique et la variance observée dans la réponse VH).

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux signaux

Les données VH observées ont aussi été comparées à l'erreur VH prédite par le modèle WTA. Les résultats suggèrent que le modèle WTA explique le biais moyen VH observé. Le premier critère de validation de l'utilisation de cette règle est donc satisfait (aucune différence entre l'erreur prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH). Cependant, ce résultat n'a pas été observé pour la variance (différence significative entre la variance prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH ($F(1, 116)=18,776$; $p<0,05$)) ; la variance observée dans la modalité VH est toujours plus importante que celle prédite par le modèle WTA est ne satisfait donc pas le second critère (variance = ou > à la variance de la modalité la plus fiable). Nous avons fait l'hypothèse que la perception de l'OT pourrait relever de l'utilisation d'une règle WTA des modalités sensorielles dans la condition où un CDR est biaisé. La même analyse a été appliquée pour chaque condition. Les résultats ont montré qu'une règle WTA semble expliquer la moyenne VH observée quelque soit les conditions d'orientation des CDR (aucune différence entre l'erreur prédite par la règle WTA dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ; aucune différence entre la variance prédite par la règle WTA dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH).

Finalement, les données VH observées ont aussi été comparées à l'erreur VH prédite par la moyenne non-pondérée algébrique (MNP) des erreurs et de la variance obtenue dans les modalités visuelle et haptique seule. Dans l'hypothèse de l'utilisation d'une règle MNP, l'erreur moyenne d'ajustement dans la modalité de réponse VH devrait être égale à la moyenne des erreurs moyennes observées dans les modalités de réponse V et H. De même, la variance VH attendue devrait être égale à la moyenne des

variances observées dans les modalités de réponse V et H prises isolément. Les résultats suggèrent que ce modèle explique le biais moyen VH observé (aucune différence entre l'erreur prédite par ce modèle dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH). De plus, les variances observées sont conformes aux prédictions de la règle MPN (aucune différence significative entre la variance prédite par ce modèle dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH). La même analyse a ensuite été appliquée dans chaque condition. Les résultats suggèrent la règle MNP explique la moyenne VH observée que les CDR visuel et égocentrique soient biaisés ou non (aucune différence entre l'erreur prédite par la règle MNP dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ; aucune différence entre la variance prédite par la règle MNP dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH).

L'ensemble des résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) sont présentés dans le tableau 8 et la figure 23.

		V		**H**		**VH obs**		**VH MLE**		**VH WTA**		**VH MNP**	
		EM	**Var**	**EM**	**Var**	**EM**	**Var**	**EM**	**Var**	**EM**	**Var**	**EM**	**Var**
C-18	**CM-9**	-6,53	1,46	-2,35	15,42	-5,56	7,61	-4,49	0,67	-5,17	1,08	-4,44	8,44
	CM0	-4,74	0,98	-2,39	2,04	-3,51	0,91	-3,61	0,51	-4,00	0,77	-3,56	1,51
	CM+9	-3,11	0,69	-0,52	6,53	-1,97	5,09	-2,43	0,48	-2,76	0,61	-1,81	3,61
SC	**CM-9**	-1,49	2,14	-3,75	3,06	-2,45	3,88	-2,12	0,98	-2,52	1,52	-2,62	2,60
	CM0	-0,37	0,19	-1,72	5,68	-1,03	5,32	-0,49	0,14	-0,47	0,17	-1,05	2,93
	CM+9	0,55	0,64	0,09	9,85	1,36	7,74	0,73	0,47	0,97	0,57	0,32	5,25
C+18	**CM-9**	2,08	1,79	-2,38	1,87	0,05	9,34	0,33	0,62	0,13	0,90	-0,15	1,83
	CM0	3,33	0,75	-1,52	13,86	0,91	9,66	2,76	0,48	2,66	0,57	0,90	7,30
	CM+9	4,70	2,02	-0,24	17,22	4,31	7,49	3,34	1,23	2,90	1,97	2,23	9,62

Tableau 8*. Erreurs Moyennes (EM) et Variances (Var) en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=estimations observées dans la modalité de réponse visuo-haptique, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la moyenne non-pondérée, C-18=cadre incliné à 18° à gauche, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à droite, CM-9=déviation du centre de masse de la tête à 9° à gauche, CM0=pas de déviation du centre de masse de la tête, CM+9=déviation du centre de masse de la tête à 9° à droite.*

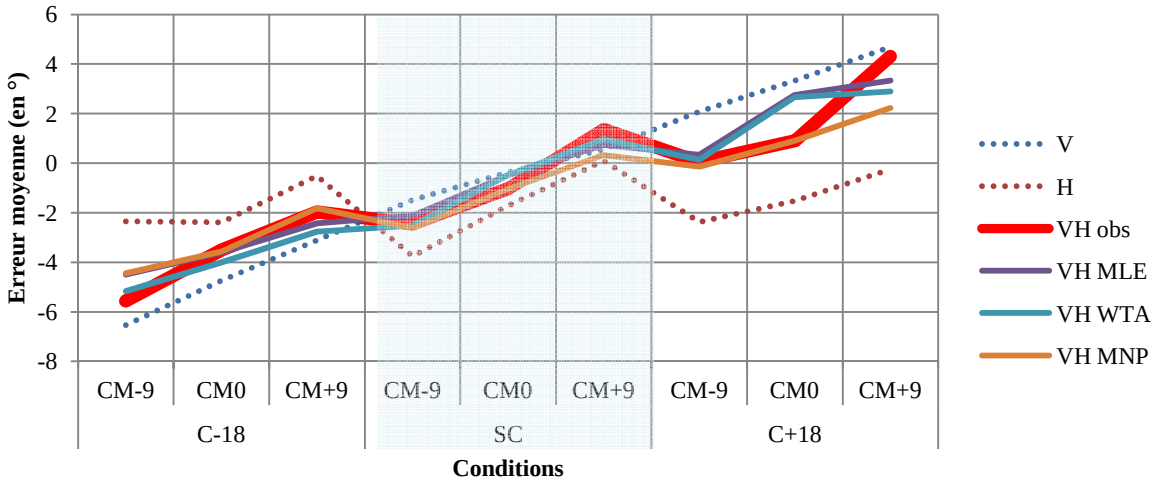


Figure 23*. Erreurs moyennes d'OST en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=modalité de réponse visuo-haptique observées, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique moyenne non-pondérée prédites, C-18=cadre incliné à 18° à gauche, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à droite, CM-9=déviation du centre de masse de la tête à 9° à gauche, CM0=pas de déviation du centre de masse de la tête, CM+9=déviation du centre de masse de la tête à 9° à droite.*

Lien entre DIC visuelle et égocentrique et règles d'intégration multisensorielle

Nous avons cherché à savoir si l'utilisation de la règle MLE était modulée par le degré de dépendance du sujet au CDR visuel ou non-visuel (CM). Afin de vérifier cette hypothèse, la pente entre la réponse VH prédite par la règle MLE et la réponse VH observée a été calculée pour chaque sujet. Une pente égale à 1 signifie que la règle MLE prédit parfaitement les résultats observés. Une pente supérieure à 1 signifie que la règle MLE surestime les résultats observés et inversement une pente inférieure à 1 signifie que la règle MLE sous-estime les résultats observés. Les pentes individuelles obtenues ont ensuite été utilisées pour l'analyse de corrélation avec la dépendance au CDR visuel ou égocentrique (cf. Figure 24). L'analyse a montrée que ces pentes étaient significativement corrélées avec la dépendance au CDR visuel (R^2=0,36 ; $p<0,05$) mais pas avec la dépendance au CDR égocentrique. Les résultats indiquent que plus les sujets sont extrêmes (les plus dépendants aux CDR visuel ou non-visuel) ; plus la règle MLE

sous-estime ou surestime l'erreur moyenne observée dans la modalité de réponse VH sur la perception de l'OT.

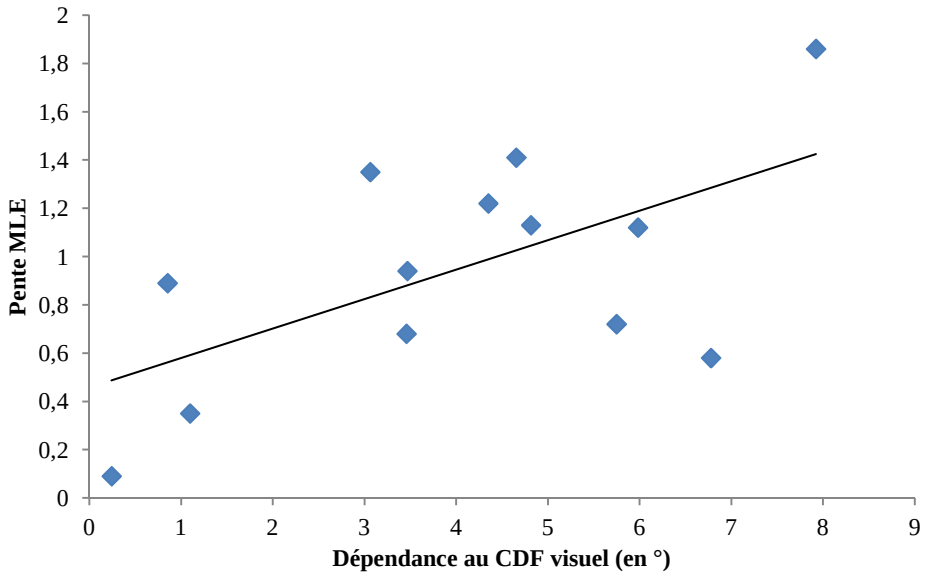


Figure 24. *Corrélation entre l'effet cadre visuel individuel dans la modalité de réponse visuelle dans la condition "pas de déviation du CM de la tête" et les valeurs de la pente obtenue entre la réponse visuo-haptique prédite par la règle MLE et la réponse visuo-haptique observée.*

La même analyse a été effectuée avec la règle WTA (cf. Figure 25). L'analyse a révélé une corrélation significative entre les pentes et la dépendance au CDR visuel (R^2=0,40 ; p<0,05) mais pas entre les pentes et la dépendance au CDR égocentrique. Les résultats montrent que plus les sujets sont extrêmes (les plus dépendants aux CDR visuel ou non-visuel) ; plus la règle WTA sous-estime ou surestime l'effet cadre VH observé sur la perception de l'OST.

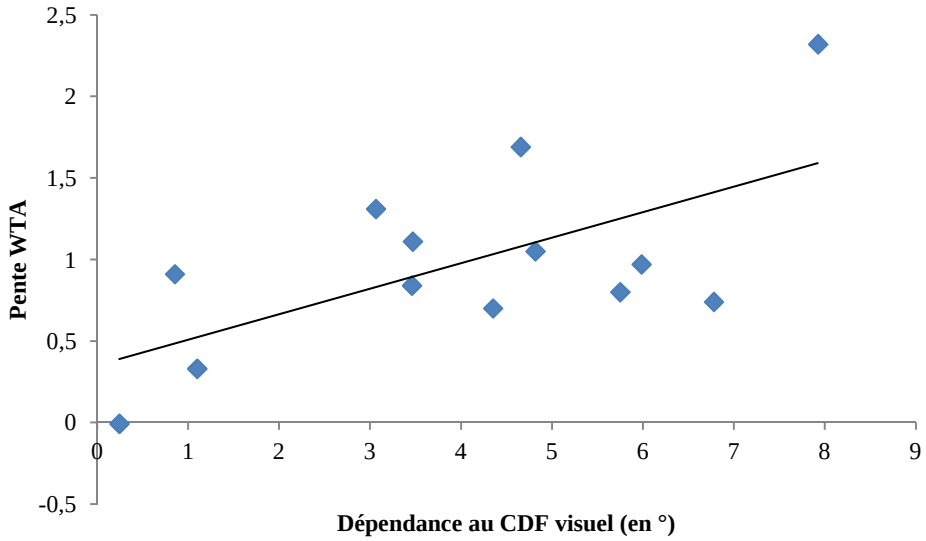


Figure 25. *Corrélation entre l'effet cadre visuel individuel dans la modalité de réponse visuelle dans la condition "pas de déviation du CM de la tête" et les valeurs de la pente obtenue entre la réponse visuo-haptique prédite par la règle WTA et la réponse visuo-haptique observée.*

La même analyse a été effectuée avec la règle MNP, et a révélé aucune corrélation significative entre les pentes et la dépendance au CDR visuel ou entre les pentes et la dépendance au CDR égocentrique.

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux CDR

L'objectif est ici d'identifier les règles de sélection des référentiels spatiaux et en particulier s'ils résultent de l'utilisation d'une règle optimale d'intégration multisensorielle. Nous avons décidé de calculer la règle MLE, non plus à partir des modalités de réponse (en prédisant la réponse visuo-haptique à partir des données observées lors des ajustements visuels et haptiques), mais à partir des CDR, c.-à-d. que nous avons prédit les réponses dans les conditions de doubles perturbations (cadre visuel incliné accompagné d'une déviation du CM de la tête) à partir des données observées lorsqu'un seul CDR était perturbé (cadre visuel incliné sans déviation du CM de la tête ou déviation du CM de la tête sans cadre visuel). Nous avons appliqué les

équations (7), (8) et (9) (cf. Analyses statistiques, p 102) afin d'obtenir l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition de doubles perturbations des référentiels pour chaque modalité de réponse (cf. Figure 26). Les erreurs dans les conditions de doubles perturbations prédites par l'utilisation d'une règle MLE ont été comparées aux erreurs observées. Les résultats ont montré que la règle MLE semble expliquer le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par la règle MLE et l'erreur moyenne observée). Cependant, en ce qui concerne la variance, ce résultat n'est pas observé (différence significative entre la variance prédite par la règle MLE et la variance observée pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 51)=12.015$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 51)=11.302$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 51)=9.82$; $p<0.05$)).

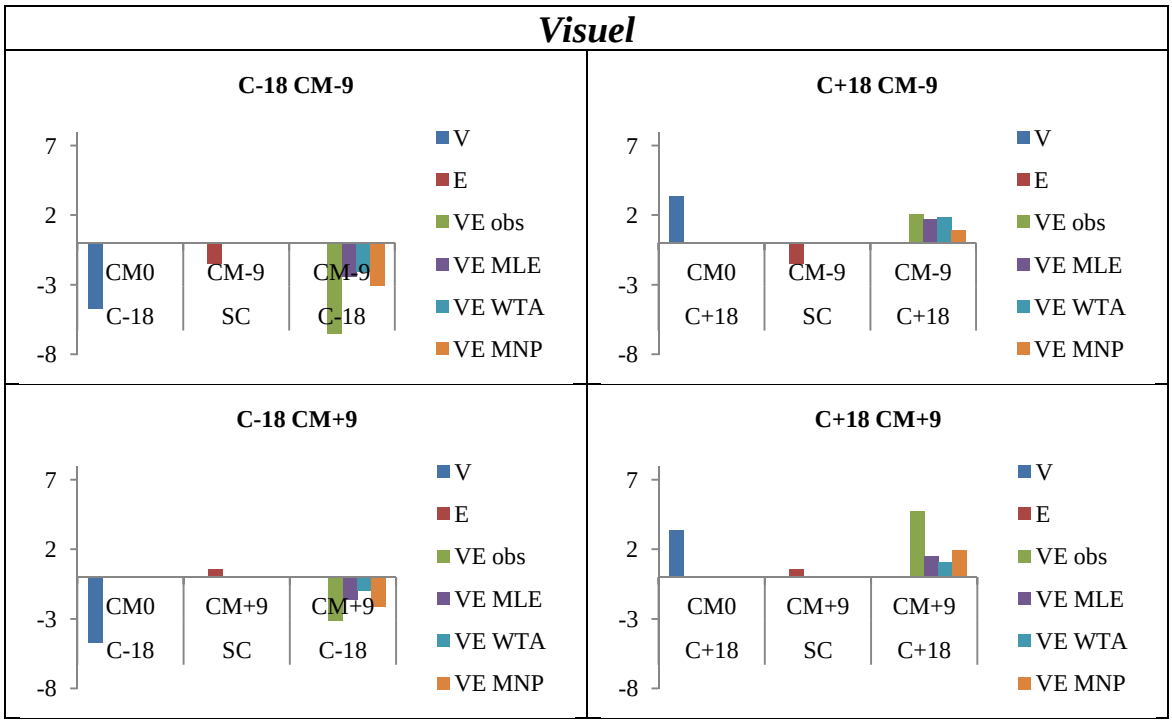
Autres règles de combinaison (WTA, MNP) appliquée aux CDR

Les données observées dans les conditions de doubles perturbations ont également été comparées aux erreurs prédites par le modèle Winner-Take-All. Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec l'utilisation d'une règle MLE dans la mesure où il n'y a pas de différence significative entre les erreurs moyennes prédites par le modèle WTA et les erreurs moyennes observées mais par contre il existe bien une différence significative entre la variance prédite et la variance observée dans la modalité de réponse visuelle ($F(1, 51)=9.594$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 51)=8.594$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 51)=6.976$; $p<0.05$)).

Pour finir, les données observées dans les conditions de doubles perturbations ont été comparées aux erreurs et aux variances prédites par la moyenne algébrique non-pondérée (MNP) des erreurs et des variances obtenues lorsqu'un seul CDR était perturbé (soit le cadre visuel incliné, soit la déviation du CM de la tête). Les résultats suggèrent

que cette règle explique aussi bien le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par ce modèle et l'erreur moyenne observée) que la variance observée (pas de différence significative entre la variance prédite par ce modèle et la variance observée).

L'ensemble des résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) appliquées aux référentiels sont présentés dans la figure 26.



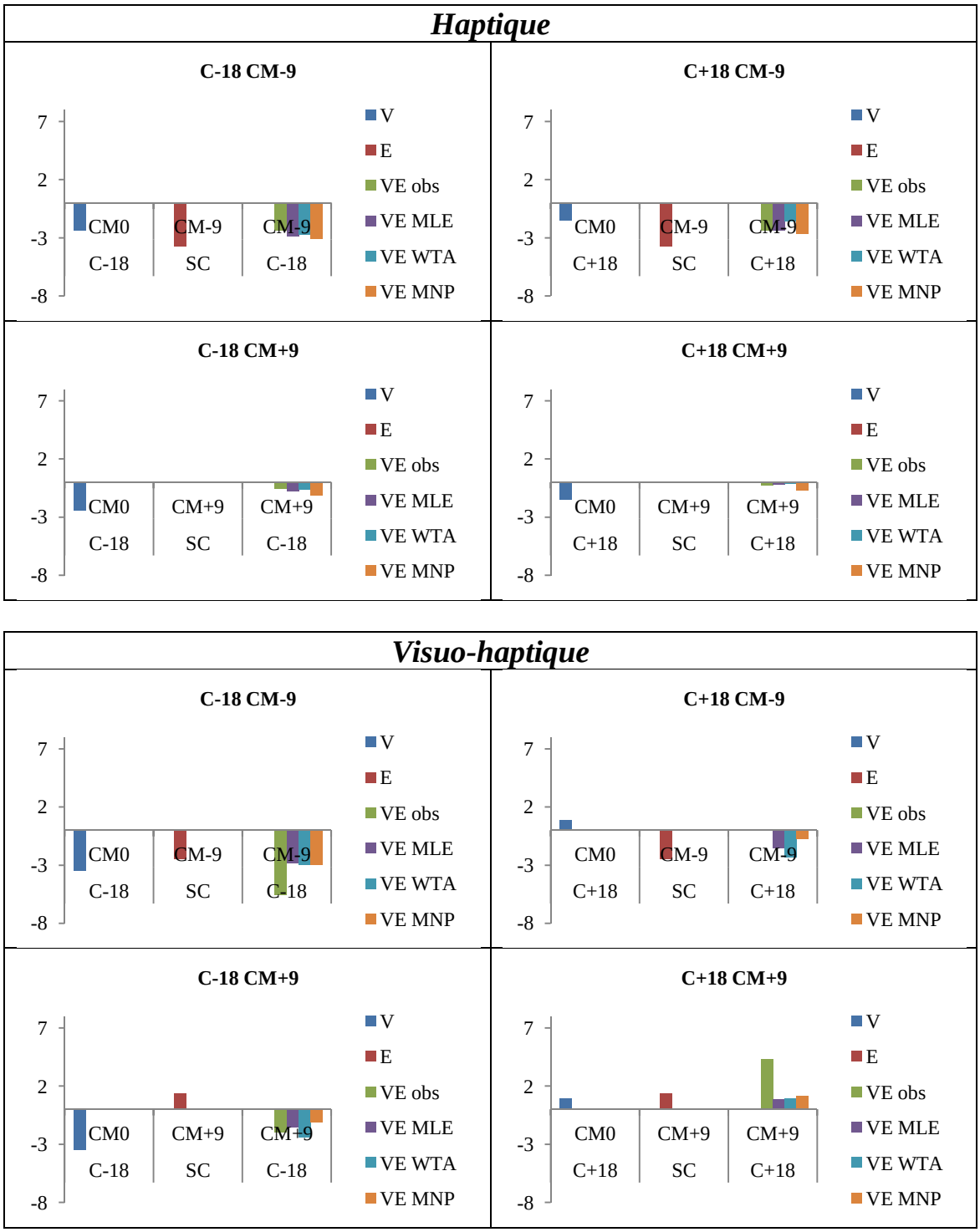


***Figure 26**. Erreurs moyennes en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=erreur moyenne lorsque seul le CDR visuel est perturbé (C±18° et CM0), E=erreur moyenne lorsque seul le CDR égocentrique est perturbé (SC et CM±9°), VE obs=erreur moyenne observée lorsque les CDR visuel et égocentrique sont perturbés (C±18° et CM±9°), VE MLE=erreur moyenne calculée avec la règle MLE, VE WTA=erreur moyenne calculée avec le modèle WTA, VE MNP=erreur moyenne calculée avec la règle MNP. C-18=cadre incliné à 18° à gauche, SC=tunnel optique cylindrique de forme circulaire, C+18= cadre incliné à 18° à droite, CM-9=déviation du centre de masse de la tête de 9° à gauche, CM0=aucune déviation du CM de la tête, CM+9= déviation du centre de masse de la tête de 9° à droite.*

Comme pour les signaux sensoriels, nous avons vérifié si l'utilisation d'une règle MLE était modulée par le degré de dépendance du sujet au CDR visuel ou non-visuel. Dans cette perspective, la pente entre la réponse en condition de doubles perturbations prédite par la règle MLE et la réponse en condition de doubles perturbations observée a été calculée pour chaque sujet. Les pentes individuelles obtenues ont ensuite été utilisées pour l'analyse de corrélation avec la dépendance au CDR visuel ou égocentrique. L'analyse n'a révélé aucune corrélation significative entre ces pentes et la dépendance au CDR visuel ni entre ces pentes et la dépendance au CDR égocentrique.

La même analyse a été effectuée avec la règle WTA. L'analyse n'a révélé aucune corrélation significative entre les pentes et la dépendance au CDR visuel ni entre les pentes et la dépendance au CDR égocentrique.

Enfin, la même analyse a été effectuée avec la règle MNP (cf. Figure 27) et a révélé une corrélation significative entre les pentes et la dépendance au CDR visuel ($R^2=0.35$; $p<0.05$) mais pas entre les pentes et la dépendance au CDR égocentrique. Les résultats montrent que plus les sujets sont dépendants au CDR visuel, plus la règle MNP prédit efficacement les réponses dans les conditions de doubles perturbations (pente proche de 1).

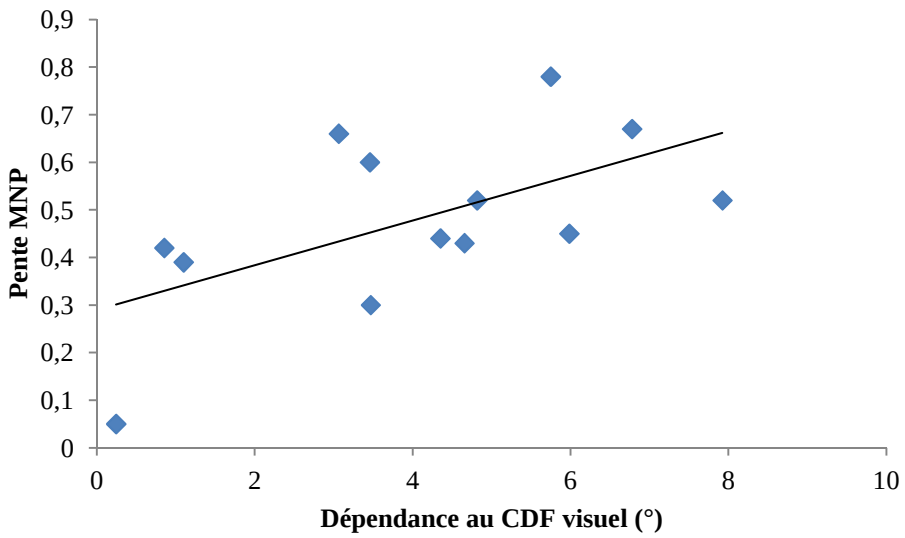


Figure 27. *Corrélation entre l'effet cadre visuel individuel dans la modalité de réponse visuelle dans la condition "pas de déviation du CM de la tête" et les valeurs de la pente obtenue entre la réponse prédite par la règle MNP en condition de doubles perturbations et la réponse observée.*

c. Discussion

Effets du CDR visuel incliné et de la déviation du CDR égocentrique sur la perception de l'OT

Les résultats montrent que les estimations visuelles de l'orientation de l'axe de la tête ont été en moyenne biaisées par un CDR visuel incliné mais pas par la déviation du CM de la tête. Les analyses individuelles ont révélées que l'ensemble des sujets (13 sur 13, 100% de la population totale) montraient un effet significatif de l'inclinaison du CDR visuel tandis que seulement 4 sujets sur 13 (31% de la population totale) montraient un effet significatif de la déviation du CM de la tête. Les estimations haptiques de l'orientation de la tête n'ont en moyenne pas été biaisées ni par la déviation du CM de la tête ni par le CDR visuel incliné. Cependant, l'analyse individuelle a montré que 3 sujets sur 13 (23% de la population totale) présentaient un effet significatif de l'orientation du cadre et 2 sur 13 (15% de la population totale) présentaient un effet significatif de la déviation du CM de la tête. L'effet d'un cadre

carré incliné sur la VVS est un effet bien connu (Bray et al., 2004; Goodenough et al., 1979; Witkin & Asch, 1948a; Zoccolotti et al., 1993) et cet effet s'étend à l'orientation de la tête ou du corps (Isableu et al., 1997; Isableu et al., 2010). L'influence d'un cadre incliné sur les estimations de l'OT des sujets montrent qu'ils alignent de façon préférentielle la baguette selon les axes du CDR visuel. Inversement, l'absence d'effet du cadre incliné sur les ajustements haptique ou visuo-haptique de la baguette chez certains sujets suggère que la baguette est préférentiellement alignée selon les axes du CDR non-visuel (Fourre et al., 2009). De façon intéressante, les résultats présents montrent que l'inclinaison du cadre visuel n'altère pas la perception de l'OT, lorsque l'ajustement de la baguette est réalisé dans la modalité haptique. Ce résultat suggère que les signaux haptiques et kinesthésiques ainsi que la commande motrice jouent vraisemblablement un rôle significatif pour désambiguïser l'effet cadre visuel (ECV). Cela contraste avec les résultats antérieurs rapportant un ECV dans une condition sensorimotrice active fournissant des signaux vestibulaires et proprioceptifs fiables et non-biaisés. Bray et al. (Bray et al., 2004) ont montré que le renforcement des dynamiques d'équilibration posturale réduisait l'ECV, sans l'annuler complètement. Cette réduction est plus vraisemblablement due à une contribution augmentée des signaux non-visuels (proprioceptif, vestibulaire et commandes motrices).

Ces résultats suggèrent que l'ECV pourrait affecter le traitement haptique des relations spatiales sous tendant la perception et le contrôle de l'orientation du corps excepté lorsque cela implique le contrôle des membres supérieurs. Les résultats présents font penser à ceux obtenu par Bock (Bock, 1997) qui avait conclu que l'environnement visuel n'avait pas en moyenne d'effet sur l'exécution et les erreurs de pointage final lors

de mouvements d'atteinte vers une cible. Cependant, il est important de noter qu'aucune analyse individuelle n'avait été effectuée.

L'observation moins fréquente d'effet de la déviation du CM de la tête sur la perception de l'OT au niveau individuelle et ce quelle que soit la modalité de réponse pourrait s'expliquer par la possibilité offerte au sujet de s'appuyer sur les axes articulaires tête-tronc, qui restent une source fiable et non-biaisée de signaux proprioceptifs tout au long de l'expérience. En effet, l'information des récepteurs de Ruffini des capsules articulaires traduisant l'orientation des segments corporels les uns par rapport aux autres reste fiable et non biaisée (les angles articulaires ne changent pas tout au long de l'expérience). A l'inverse les mécanorécepteurs musculaires et tendineux (fuseaux neuromusculaires et organes tendineux de Golgi) percevant l'activité des muscles du cou reçoivent une information similaire à celle obtenue lorsque la tête est inclinée susceptible de créer l'illusion d'inclinaison de la tête. Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle les déviations du CM de la tête faussent la perception de l'orientation de la tête il serait nécessaire de faire des études supplémentaires où les signaux proprioceptifs liés aux axes articulaires de la tête ou du tronc seraient biaisés ou floutés (van de Langenberg, Kingma, & Beek, 2007; van de Langenberg et al., 2008). L'expérience consisterait à manipuler la pertinence et la fiabilité des signaux musculaires et tendineux (fuseaux neuromusculaires et organes tendineux de Golgi) et/ou des signaux articulaires (récepteurs de Ruffini des capsules articulaires) et d'en observer les conséquences sur la perception de l'OT.

Nous avons montré que les dépendances aux CDR visuel et égocentrique lié aux masses étaient négativement corrélées. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse d'une

organisation hiérarchique des préférences aux CDR (Isableu et al., 2010; Maurer & Peterka, 2005; Ohlmann, 1988; Ohlmann & Marendaz, 1991). Les sujets les plus influencés par l'inclinaison du cadre sont en revanche les moins influencés par la déviation du CM de la tête. Ce résultat suggère l'existence d'une organisation préférentielle des référentiels spatiaux envers le CDR visuel. Inversement, les sujets ayant l'effet du CM de la tête le plus important présentaient le plus petit effet cadre, montrant leur préférence pour le CDR égocentrique.

De façon intéressante, les résultats présents ont montré que si biaiser le CDR visuel (en utilisant un cadre incliné) affecte la perception de l'orientation de l'axe de la tête (OST), cet effet est néanmoins modulé par la richesse du contexte sensoriel dans lequel les estimations sont réalisées.

Effets des modalités de réponse sensorielle sur l'OST

La condition de réponse multisensorielle (i.e. visuo-haptique) a permis de réduire la dépendance visuelle, améliorant ainsi la perception de l'OT. En d'autres termes, les signaux haptiques d'orientation générés durant l'ajustement de la baguette physique combinée avec son affichage visuelle sur l'écran de TV ont permis aux sujets de désambiguïser l'ECV. Ces résultats sur la perception de l'OT sont cohérents avec et prolongent ceux de Bringoux (Bringoux et al., 2009) obtenus dans une tâche de verticale subjective qui a montré que l'ajustement visuo-kinesthésique réduisait l'effet d'un cadre incliné (Rod-and-Frame Effect (RFE)). De plus, la réduction VH de l'effet cadre a été observée seulement lorsque le CDR visuel était incliné. En effet, le bénéfice VH n'a jamais été observé dans les conditions "sans cadre". Les faibles erreurs

constatées dans ces conditions, lors de l'ajustement visuel seul ou haptique seul, peuvent expliquer le manque de bénéfice VH dans ces conditions.

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux signaux

Les résultats suggèrent que les entrées sensorielles haptiques et visuelles sont effectivement combinés pour réduire l'effet du non-alignement des axes du CDR visuel sur la perception de l'OT (i.e. dépendance visuelle). Les résultats montrent que les règles d'intégration ou de combinaison multisensorielle testée (MLE, WTA et MNP) semblent toutes en mesure d'expliquer l'amélioration VH observée (la réduction des erreurs moyennes observées). L'examen de la variance des estimations VH de l'OT est un moyen efficace de départager laquelle des trois règles est effectivement exploitée par les sujets. La règle MLE prédit que la variance des estimations VH devrait être plus petite que la variance des estimations V et H. La règle WTA prédit que la variance des estimations VH devrait être au mieux égale (i.e., jamais inférieure) à la variance des estimations de la modalité (V ou H) la plus fiable (modalité ayant la plus petite variance). Enfin, la règle MNP prédit que la variance des estimations VH devrait être égale à la moyenne des variances des estimations V et H, traduisant un compromis équilibré des influences des modalités sensorielles. Les résultats présents montrent que la dispersion des estimations VH observées pour toutes les conditions combinées ne suit pas la variance des estimations VH prédites par la règle MLE. Un tel conflit a déjà été rapporté dans des situations où l'incongruence spatiale entre les signaux devenaient trop importante (Oruc et al., 2003), menant ainsi la règle de combinaison à produire des estimations sous-optimales (i.e., moins fiables que prévues), forçant les sujets à s'appuyer plus fortement sur l'une des autres sources sensorielles disponibles (i.e. une

variance plus grande que prévue). Notons que dans leur étude, ces auteurs (Oruc et al., 2003) n'ont pas testé d'autres règles alternatives à la règle MLE.

La nature des instructions données aux sujets pourrait avoir joué un rôle important. Dans cette étude, les sujets avaient la consigne de réajuster aussi précisément que possible, mais n'avaient pas pour consigne de minimiser l'étendue (la variance, la dispersion) des estimations. Des études supplémentaires seront nécessaires afin d'aborder les questions de la précision et de l'exactitude de la perception de l'OT en relation avec les modes préférentiels de référentiation spatiales.

Il était supposé que la règle MLE devrait principalement être utilisée quand la congruence entre les CDR est maximale. Un examen approfondi de nos données dans chaque condition a révélé que la règle MLE ne semble pas expliquer les améliorations VH dans les conditions où les CDR sont fortement (CDR visuel et égocentrique perturbés) ou moyennement non-congruents (CDR visuel ou égocentrique perturbé) ni dans les conditions où la congruence des CDR est maximale (i.e., lorsque les CDR visuel et égocentrique ne sont pas perturbés). L'utilisation d'une règle MLE apparait ainsi être inadaptée lors de tâches de perception d'orientation spatiale. Des conclusions similaires pourraient être tirées concernant la règle WTA.

Les résultats ont montré, cependant, que la moyenne et la variance non-pondérée (i.e., règle MNP) des 2 modalités de réponse seule expliquent le mieux les estimations de la perception de l'OST observées dans la modalité de réponse VH. Ces résultats s'appliquent dans les conditions où les CDR sont congruents ou non.

Relation entre l'utilisation de règle d'intégration multisensorielle et la dépendance au CDR visuel

Les résultats font apparaitre une relation significative entre la dépendance au CDR visuel et l'utilisation de stratégies d'intégration multisensorielle type MLE. Chez les sujets hautement dépendants au CDR visuel, la règle MLE surestime la perception réelle de plusieurs signaux sensoriels. Inversement, chez les sujets les moins dépendants au CDR visuel, la règle MLE sous-estime la perception réelle de plusieurs signaux sensoriels. Des relations similaires ont été constatées avec la règle WTA d'intégration multisensorielle. Ces résultats sont cohérents avec la théorie selon laquelle les différences interindividuelles pourraient s'expliquer par une utilisation variable des différents signaux sensoriels. Les stratégies d'intégration multisensorielle type MNP semblent être indépendantes de la dépendance au CDR visuel.

Orientation spatiale et sélection de CDR spatiaux

Ces résultats démontrent l'importance de la sélection d'un CDR approprié lors de l'élaboration de l'OST. La déviation des axes du CDR visuel de l'axe Z de la tête modifie la précision des estimations de l'OT. Ces résultats mettent l'accent sur la manière dont les référentiels spatiaux sont traités par le SNC. De plus, ils sont en lien avec une hypothèse déjà avancée par certains auteurs, selon laquelle la sélection d'un CDR approprié est nécessaire pour produire des estimations optimales (Deneve & Pouget, 2004; Isableu et al., 2010).

De plus, cette recherche a démontré que la dépendance au CDR visuel (dépendance au champ) persiste même après la combinaison des signaux visuels et haptiques. La pondération du CDR visuel pour l'estimation de l'orientation de la tête

reste un processus difficilement compréhensible. En effet, les systèmes vestibulaires et proprioceptifs fournissent des signaux fiables et appropriés concernant l'orientation de la tête ou du corps, par rapport à la surface du sol ou à l'espace. La question qui persiste est pourquoi le caractère approprié des CDR non visuels n'a pas été détecté afin de produire des estimations de la perception de l'OT plus précise et plus juste. Nous constatons de plus que les différences interindividuelles persistent dans la modalité de réponse VH. La corrélation négative entre l'ECV et l'effet du CM est cohérent avec l'hypothèse des processus vicariants (Reuchlin, 1978) impliqués dans la sélection des CDR (Isableu et al., 2010; Marendaz, 1989; Ohlmann & Marendaz, 1991). Les contraintes de la tâche, relativement clémentes, pourraient générer ces DI. Cette particularité spatiale pourrait refléter les préférences stylistiques concernant l'utilisation de CDR disponible, entrainant leur organisation hiérarchique. Dans cette théorie, le niveau de difficulté de la tâche pourrait impacter l'utilisation hiérarchisée de ces CDR, d'une manière adaptative vers l'utilisation des CDR les moins habituels, et comme conséquence modifier l'étendue de ces DI (émergence ou disparition). Quand la situation n'est pas très contraignante, différents modes de référentiation spatiale peuvent coexister en raison de leur équi-efficacité à résoudre la tâche, conduisant ainsi à l'émergence de fortes différences interindividuelles. Inversement, la résolution d'une tâche requérant l'utilisation d'un référentiel spécifique réduirait du même coup l'expression des modes adaptatifs variés de référentiation spatiale et obligeraient les individus à sélectionner le CDR le plus approprié pour contrôler efficacement leur interaction spatiale (vraisemblablement d'une manière optimale). Par conséquent, l'exploitation d'un seul et même référentiel se traduirait par une disparition des différences interindividuelles. Notre étude a montré que ces préférences de CDR persistaient dans la modalité de réponse VH. De futures études consisteront à manipuler

la difficulté de la tâche afin de vérifier si les DI disparaissent ou pas, malgré l'augmentation de la certitude spatiale apportée par la multiplication des signaux VH pour désambigüiser la situation.

La diminution de l'effet cadre sur la perception de l'OT dans la modalité de réponse VH a été observée lorsque le CDR visuel n'était pas aligné avec l'orientation de l'axe de la tête. Une explication plausible est que dans la condition sans cadre, la différence entre la perception de l'OT et l'orientation réelle de la tête est trop petite afin de réduire le biais d'estimation de l'OT dans la modalité de réponse VH.

Relation entre l'utilisation de règle de combinaison des CDR et la dépendance au CDR visuel

Les résultats font apparaitre une relation significative entre la dépendance au CDR visuel et l'utilisation de stratégies de combinaison des CDR type MNP. Chez les sujets hautement dépendants au CDR visuel, la règle MNP prédit efficacement les réponses observées dans les conditions de doubles perturbations. En effet, chez ces sujets, la pente entre les valeurs prédites par la règle MNP et les réponses observées approxime la valeur de 1. Chez les sujets les moins dépendants au CDR visuel, cette même pente est plus petite, montrant ainsi une sous-estimation des réponses observées par le modèle MNP. La dépendance visuelle semble donc résulter de l'utilisation d'une règle de pondération MNP des référentiels visuel et non visuel (équilibre des influences réciproques de tous les référentiels).

Pris ensemble, les résultats présents pourraient être interprétés dans le cadre de l'hypothèse de CDR "composites" subjectifs (Bringoux, Robic, Gauthier, & Vercher,

2008; Bringoux et al., 2009; Luyat, Gentaz, Corte, & Guerraz, 2001). Cette hypothèse pourrait expliquer les erreurs de verticale subjective plus petites que prévues, qui sont induites pas seulement par une modification de CDR variés, par exemple, l'inclinaison du cadre visuel (Asch & Witkin, 1948a; Isableu et al., 1997; Witkin & Asch, 1948a), mais aussi par l'inclinaison du corps (Schöne, 1964), les modifications du champ gravitationnel (Clark & Graybiel, 1968) ou même la modification de la distribution des masses du tronc (Fourre et al., 2009). De ce point de vue, et en lien avec les résultats présents, la perception de l'OT n'est alignée parfaitement ni avec le CDR égocentrique, ni avec le CDR visuel. Les résultats peuvent donc être interprétés comme la conséquence des influences multiples des différents CDR. Le SNC pourrait réinterpréter les différents CDR pour créer un nouveau CDR subjectif "composite". Ce nouveau CDR subjectif "composite" est créé en attribuant un poids à chaque CDR en fonction de la contrainte de la tâche. En d'autres termes, moins un CDR est fiable, plus le poids attribués aux autres sera important. Cette hypothèse est cohérente avec les travaux de Howard (Howard, 1982; Howard, 1986), qui a montré que différents CDR contribuaient à la détermination cognitive de la VS. Cependant, les résultats de McGuire et Sabes (McGuire & Sabes, 2009) infirment les hypothèses selon lesquelles le pattern d'erreurs perceptive devrait refléter la dépendance différentielle à soit un CDR spécifique, soit un CDR commun ou soit un CDR hybride. Les auteurs ci-dessus ont proposé que la perception de l'environnement soit simultanément spécifiée dans les multiples CDR et que leur fiabilité statistique respective influence leur pondération relative. L'effet d'un cadre visuel sur la perception de l'OT observé dans cette expérience pourrait refléter les influences simultanées de l'ensemble des différents CDR. Les sujets indépendants au CDR (IRV) visuel parviendrait ainsi à détecter le caractère approprié et fiables des CDR

non biaisés restants, contrairement aux sujets dépendants (DRV). On peut ainsi supposer que les IRV font preuve d'une plus grande capacité d'adaptation que les DRV.

Orientation spatiale et bases neurales de la sélection et du changement de CDR

Deneve et Pouget (Deneve & Pouget, 2004) ont proposé 2 hypothèses pour expliquer la mise en œuvre des mécanismes neuraux des liens spatiaux intermodaux. La 1ère hypothèse concernerait la mise en place d'un "codage de toutes les entrées sensorielles dans un CDR commun dans une aire cérébrale multisensorielle". La 2nd hypothèse concernerait l'existence d'une "influence intermodale directe, par laquelle l'activité sensorielle dans une aire cérébrale uni-modale influencerait les activités sensorielles dans une autre aire uni-modale". Plusieurs études validant l'une ou l'autre des 2 hypothèses, les auteurs suggèrent l'existence d'un "rôle à la fois des connections feed-forward des aires uni-modales sur les aires multimodales et des connections feedback des aires multimodales sur les aires uni-modales". Des études neurophysiologiques menés par différents auteurs ont permis d'établir l'existence d'un mécanisme de pondération et repondération sensorielle lors de la perception de vection circulaire (Brandt et al., 1998) ou lors de stimulation vestibulaire et/ou visuelle (Deutschlander et al., 2002). Ces auteurs font apparaitre l'existence d'interactions inhibitrices réciproques (IIR) fonctionnelles inter-sensorielles sous-jacent à l'activation et à la désactivation observée durant la mise en concurrence des entrées visuelles et vestibulaires. Ces IIR sont vraisemblablement activées quelque soit les canaux sensoriels impliqués. Néanmoins, la force des ces IIR inter-sensorielles pour la pondération des signaux et donc pour la réduction des discordances sensorielles dépend vraisemblablement des expériences antérieures (les priors), qui sont connues pour façonner les cartes somesthésiques (Coq & Xerri, 2001). La résistance au CDR visuel

perturbant pourrait ainsi dépendre des expériences sensorimotrices des sujets, qui, en améliorant la définition et la structure des cartes égocentriques somato-proprioceptives (Elbert et al., 1998; Pantev, Engelien, Candia, & Elbert, 2001) devraient améliorer leur capacité à percevoir précisément les orientations proprioceptives de leurs membres. Plusieurs auteurs ont suggéré que la dépendance au CDR visuel pourrait être due à des difficultés d'utilisation des signaux vestibulaires ou proprioceptifs pour vérifier le caractère approprié du CDR à la résolution de la tâche ainsi que pour susciter un changement de CDR le cas échéant si nécessaire (Isableu et al., 2010).

V. Expérience 5 : Rôle des dynamiques d'équilibration posturale dans la perception de l'orientation du corps

Les résultats des expériences précédentes ont permis d'établir que l'exactitude avec laquelle nous percevons notre l'orientation spatiale s'améliore lorsque les estimations sont réalisées en conditions multimodales. Nous avons également appris que la dépendance au référentiel visuel était réduite mais persistait en conditions multimodale d'ajustement de la baguette. La dépendance visuelle résulterait d'une incapacité des individus à exploiter le caractère approprié des CDR non biaisés disponibles.

Ces résultats ont des limites. Les estimations sont réalisées dans des conditions de réception passive des signaux sensoriels et nécessitant une motricité minimale (maintien postural tronc-tête à la verticale) alors que l'orientation spatiale résulte d'un processus d'alignement actif moteur et multisensoriel du référentiel égocentré sur les référentiels exo-centrés.

Les objectifs de cette étude sont d'analyser le rôle i) des dynamiques d'équilibre (Bray et al., 2004; Van Beuzekom et al., 2001) et ii) du système vestibulaire dans la détection de l'invariant gravitaire dans la sélection des référentiels spatiaux. Est-ce i) et ii) réduisent la dépendance au référentiel visuel (DRV) lorsqu'on augmente la fiabilité des référentiels non visuels et en particulier l'interaction d'alignement corps/sol.

De récents modèles de combinaison multisensorielle s'appuyant sur des découvertes neurophysiologiques (Brandt et al., 1998), perceptives (Ernst & Bulthoff, 2004) et comportementales (Oie et al., 2002) indiquent que l'adaptation à des changements environnementaux s'appuie sur des règles de repondération sensorielle pour optimiser l'intégration des entrées sensorielles (maximiser la fiabilité de nos estimations). La repondération est déterminée par l'estimation de maximum de vraisemblance (Maximum Likehood Estimation, MLE) de telle façon que le cerveau apparait comme un estimateur Bayésien quasi-optimal des caractéristiques de l'objet (Ernst & Banks, 2002).

Bien qu'acceptant l'existence de règles statistiques générales comme étant la base de l'intégration multisensorielle lors de tâches de perception de l'orientation spatiale, les observations fréquentes d'importantes différences interindividuelles (DI) dans le comportement spatial remettent en cause l'application universelle du MLE dans la perception humaine. Historiquement, ces DI dans la relation aux cadres de référence visuels ou non-visuels ont été identifiées dans des tâches de perception spatiales (Asch & Witkin, 1948b) et ont été plus récemment le focus du contrôle sensorimoteur (Isableu, Ohlmann, Cremieux, & Amblard, 2003; Kluzik, Horak, & Peterka, 2005; Streepey, Kenyon, & Keshner, 2007). Il est communément accepté que les sujets qui sont biaisés par la perturbation du contexte visuel (dépendants au champ visuel)

organisent leur traitement spatial préférentiellement au sein du cadre de référence (CDR) visuel. Inversement, les sujets les moins désorientés visuellement (indépendants au champ visuel) devrait favoriser les cadres de référence inertiel, égocentrique (Bernardin et al., 2005; Isableu & Vuillerme, 2006; Kluzik et al., 2005), basant ainsi les estimations perceptives sur des cadres de référence plus appropriés. Cependant, nous avons vu précédemment que l'ensemble des sujets tiennent compte des différents CDR disponibles. La différence entre les sujets IRV et DRV proviendrait d'une capacité des premiers à pouvoir exploiter préférentiellement les CDR non-biaisé en leur attribuant un poids plus important.

Nous abordons la question de l'intégration multisensorielle comme la base de la perception au sein du cadre de l'orientation spatiale, en se focalisant sur les jugements de l'axe Z longitudinal du corps (AZC) chez des sujets allongés sur le dos. La perception de l'orientation est synthétisée à partir des signaux provenant du labyrinthe, de la proprioception, des capteurs de pression de la peau et d'informations reçues via les dynamiques impliquées dans la posture et l'équilibre (Riccio et al., 1992). Les perceptions de l'orientation des sujets deviennent moins précises (Goodenough, Oltman, Sigman, & Cox, 1981; Lackner & Dizio, 2000; Thilo, Guerraz, Bronstein, & Gresty, 2002) et plus sensibles aux illusions de vection et d'inclinaison (Day & Cole, 2002; Howard & Childerson, 1994; Howard & Hu, 2001) quand ils sont allongés et en microgravité (Young, Shelhamer, & Modestino, 1986), les deux régulant les signaux sensoriels importants pour l'orientation dans le champ gravitationnel (Riccio et al., 1992). Cependant, la perception de l'orientation peut être renforcée chez des sujets allongés et en chute libre si le corps est artificiellement chargé (rétablissant ainsi l’alignement corps/sol que le sujet régule habituellement en position debout), par

exemple avec des tendeurs, pour exercer une force le long de l'axe Z reproduisant la force gravitationnelle (Roll et al., 1993; Young et al., 1986).

Comment les sujets combinent les entrées sensorielles afin d'organiser leurs estimations de l'orientation de l'axe Z longitudinal du corps ? Aligner une baguette parallèlement à l'axe longitudinal du corps (orientation subjective du corps, OSC) aussi précisément que possible nécessite de maximiser l'alignement entre l'orientation de la baguette et l'orientation de l'axe Z du corps (le vecteur "idiotropique", (Mittelstaedt, 1983)). Minimiser le biais d'orientation avec un maximum de fiabilité (faible variance) permet, idéalement, au sujet de percevoir son orientation de façon optimale. Cependant, les importantes différences interindividuelles observées lors de tâches d'orientation spatiale montrent que certains sujets effectuent des estimations perceptives de faible variabilité mais erronées car ils sont biaisés par la perturbation des références visuelles, suggérant ainsi que l'orientation et la fiabilité (l'inverse de la variance) des estimations s'appuient sur des mécanismes différents. Que fait le sujet pour percevoir de façon optimale lors d'une tâche d'orientation spatiale ? Est-ce que le sujet priorise la minimisation de la variance ou la minimisation du biais de l'orientation ou un compromis entre deux? Est-ce que la manière dont les signaux sensoriels sont combinés (par exemple, via une règle MLE) et le choix des cadres de référence impactent différemment ces deux processus (minimisation des biais d'orientation et de la variance des estimations) ? Certains auteurs (Avillac, Deneve, Olivier, Pouget, & Duhamel, 2005; Deneve & Pouget, 2004; Isableu et al., 2003; Knill & Pouget, 2004) ont suggéré que l'information spécifiant l'état de l'interaction sujet-tâche-environnement (alignement et fiabilité des signaux sensoriels) est optimale lorsque les cadres de référence sélectionnés sont appropriés.

Nous faisons l'hypothèse que la perception optimale de notre orientation dans l'espace repose sur la combinaison de signaux pertinents à l'intérieur d'un cadre de référence approprié afin minimiser l'incertitude spatiale à la fois au niveau de l'orientation moyenne (le biais) et de la dispersion des estimations (variance). Cela signifie que le SNC doit mobiliser les entrées sensorielles de façon à sélectionner le CDR adéquat et de les combiner afin réduire la variance des estimations.

Notre étude a été conçue afin de confirmer si les DI rencontrées dans une tâche d'estimation de l'orientation spatiale peuvent être interprétées dans le cadre du MLE. Les sujets avaient pour consigne d'estimer de la l'orientation de l'axe Z par l'alignement d'une baguette visuelle vue à l'intérieur d'un cadre de référence visuel biaisé. Dans ce paradigme, nous avons manipulé la fiabilité des relations spatiales en manipulant à la fois le nombre de canaux sensoriels d'information (les modalités) et les cadres de références (visuel et surface d'appui des pieds) afin de vérifier si les sujets étaient capable de combiner les indices sensoriels disponibles selon une règle MLE afin d'améliorer leurs estimations (orientation et fiabilité) de l'axe Z lorsque les informations d'alignement corps/sol et les dynamiques d'équilibration sont rétablies.

La densité des mécanorécepteurs distribués sur l'ensemble du dos est relativement faible (comparée à la main et aux pieds). De plus, la taille importante de leurs champs réceptifs à pour effet de limiter leur résolution spatiale et par conséquent leur contribution à la précision des estimations perceptives (Inglis, Kennedy, Wells, & Chua, 2002; Kennedy & Inglis, 2002). Enfin, en position allongée, ces mécanorécepteurs renvoient des indices d'orientation orthogonaux à l'orientation du corps, rendant peu probantes leur éventuelle contributions dans les estimations de

l’orientation du corps. Inversement, il est reconnu que la densité et la discrimination des mécanorécepteurs cutanés distribués sur la plante des pieds fournissent des signaux spatiaux plus résolutifs et donc plus fiables que ceux provenant du dos (Inglis et al., 2002; Kennedy & Inglis, 2002).

Par conséquent, le sujet était allongé sur le dos et passif afin de minimiser l'apport des signaux vestibulaires (dont l'orientation est orthogonale à celle du corps et donc peut pertinente) et somatosensoriels pour l'alignement du corps. Nous avons alors examiné si les estimations perceptives de l'axe Z pouvaient être améliorées lorsque le sujet avait successivement accès à : i) des signaux somato-proprioceptifs augmentés (SPA) par la mise en charge du corps, afin de rétablir les signaux (sensoriels et moteurs) d'alignement de l'axe Z avec la surface d’appui sous les pieds, ii) une ex-proprioception visuelle augmentée (E) (c.-à-d. des feed-back visuels d'orientation du sujet par rapport à la scène visuelle, (Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975)) par un balancement actif du corps autour de l'axe Z, iii) aux signaux SPA et E combinés ($SPAE_{obs}$) par la mise en charge du sujet et le balancement actif du corps autour de l'axe Z. La condition combinée (SPA+E), en rétablissant les co-variations intermodales, devrait réduire l'ambiguïté sensorielle dans la perception de l'orientation de l'axe Z, et améliorer les estimations de l'axe Z de façon plus importantes que lorsque celles-ci sont réalisées un condition appauvries (i.e., SPA ou E seul).

Notre première hypothèse était que l'adaptation à un environnement visuel bruité par l'utilisation de signaux corporels d’orientation fiables et pertinents devrait suivre une règle MLE dans la condition SPA+E combinée. Notre deuxième hypothèse est que la capacité à exploiter des signaux provenant d'SPA et E (isolé ou combiné) par la règle MLE devrait varier en fonction des préférences individuelles de référentiation spatiale.

Par exemple, des sujets pourraient être tenté de maintenir leurs préférences de référentiation spatiale en utilisant seulement une modalité d'information (comme avec la stratégie du Winner-Take-All, (Bresciani & Ernst, 2007)) et ainsi éviter d'utiliser la règle MLE.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

25 hommes sains, âgés entre 19 et 25 ans ayant une vision normale ou corrigée ont volontairement participé à l'expérience. Aucun sujet ne présentait de problème moteur, de maladie neurologique ou de déficit sensoriel. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Les sujets étaient attachés sur un chariot (cf. Figure 28) en position allongée sur le dos, les sujets devaient aligner une baguette visuelle avec l'axe Z (défini comme l'axe pieds/tête) aussi précisément que possible. La baguette était vue sur un fond visuel perturbant consistant en un cadre statique lumineux incliné à 18° par rapport à l'axe Z et en un disque de points lumineux tournant à une vitesse de 36°/s soit dans le sens des aiguilles d'une montre soit dans le sens inverse. Chaque environnement visuel faisait 50° de taille angulaire et était vu à une distance de 0,78m. Une mousse de 3cm

d'épaisseur recouvrait le chariot afin d'améliorer le confort, mais aussi dans le but de limiter les signaux haptiques provenant du dos. Les sujets étaient fermement attachés au chariot au niveau de la tête, des épaules et de la taille afin de limiter les mouvements de cisaillement produit durant le balancement du corps sur le chariot dans la condition "chariot instable". La tête était fixée dans l'alignement du tronc à la fois dans la condition de chariot instable et dans la condition de chariot stable.

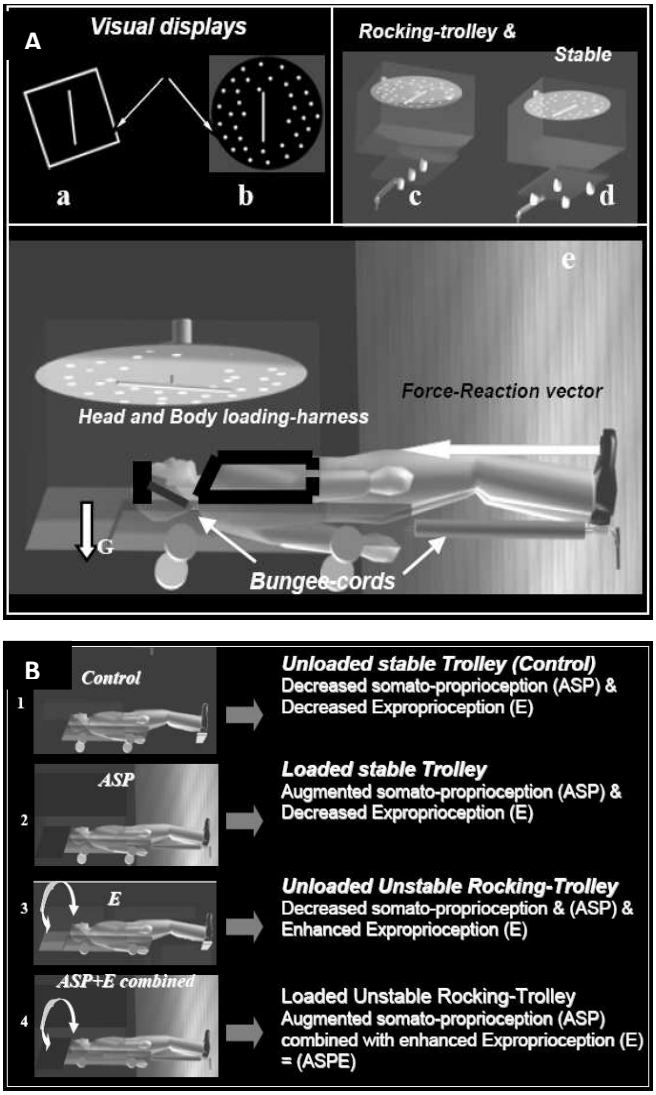


***Figure 28**. La partie supérieure illustre les différentes conditions expérimentales : les deux types de type de perturbations visuelles (RFT (a) et RDT (b)) en haut à gauche ; les deux conditions d'équilibre posturale (instable (c) et stable (d)) en haut à droite ; le principe de mise en charge (e) au milieu. La partie inférieure (B) récapitule l'ensemble des conditions (contrôle, SPA, E ou $SPAE_{obs}$).*

Les sujets estimaient l'orientation de leur axe Z dans 2 conditions d'équilibre postural (chariot stable vs chariot instable) combinées à 2 conditions cinétiques liées à la présence ou non des forces de mise en charge (chargé vs non-chargé, cf. Figure 28) (4 conditions au total).

(1) Dans la condition de contrôle chariot stable et sujet non chargé, les sujets étaient passifs. Dans cette condition posturale, les signaux somatosensoriels, d'ex-proprioception visuelle et les commandes motrices sont fortement atténués. Les signaux somatosensoriels d'orientation du corps par rapport à la surface d'appui des pieds sont absents (pas de contact pied/support). Les signaux somatosensoriels restants proviennent du contact sol/dos et sol/talons, qui donnent, dans les deux cas, des signaux orthogonaux à l'axe Z. Nous avons fait l'hypothèse que la spécification de l'orientation de l'axe Z à partir de ces signaux était faible. Les signaux visuels ex-proprioceptifs, c.-à-d. le feedback visuel d'orientation du sujet par rapport à la scène visuelle (Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975) sont également fortement atténué étant donné l'absence de mouvement du corps.

(2) Dans la condition chariot stable et sujet mis en charge (signaux somato-proprioceptifs augmentés (SPA), et ex-proprioception visuelle atténuée), les sujets avaient pour consigne de pousser contre le mur et de maintenir cette poussée afin de résister à la force de rappel générée (approximativement égal à 85% du poids de leur corps) par des tendeurs (Roll et al., 1993; Young et al., 1986). Dans cette condition, la production de pression plantaire entraine l'apparition du vecteur de la force de réaction, qui quand il est entre les deux pieds et donc aligné avec l'axe Z, peut informer les sujets sur la direction de l'axe Z du corps. Cette manipulation permet de générer des signaux

somatosensoriels relatifs à l'orientation de l'axe Z par rapport à la surface d'appui des pieds. Les signaux visuels d'ex-proprioception sont aussi fortement atténués étant donné l'absence de mouvement du corps.

(3) Dans la condition chariot instable et sujet non-chargé (ex-proprioception augmentée (E), et signaux somato –proprioceptifs atténués), les contacts talons/sol étaient les seuls contacts autorisés afin d'exercer les forces nécessaires à la régulation active de l'équilibre du système corps/chariot. Cette condition demande aux sujets de contrôler la rotation du corps autour de l'axe talon/tête, fournissant ainsi un feedback visuel de l'orientation du sujet par rapport à la scène visuelle (ex-proprioception). Comme dans la condition (1), nous avons fait l'hypothèse que les signaux somatosensoriels provenant des contacts talons/sol et du contact du dos fourniraient des indices peu pertinents d'orientation et d'alignement du corps par rapport à la surface d'appui. Le contrôle de l'équilibre du corps nécessite de générer un moment de rotation articulaire à partir des talons qui pourrait donner à la fois des signaux somatosensoriels d'orientation du corps et des signaux visuels dynamiques concomitant des mouvements corporels, c.-à-d. des signaux d'ex-proprioception. Même si les commandes motrices et les signaux somatosensoriels sont présents, ils fournissent des signaux d'orientation et d'alignement du corps par rapport à la surface d'appui limités et peu pertinents (la surface d'appui disponible en contact avec les surfaces du corps fournie des indices directionnels orthogonaux non pertinents et de plus fortement atténué par l'interposition de la mousse). On peut ainsi supposer que les signaux visuels (mouvement visuel et signaux d'orientation par rapport à l'affichage) devrait dominer les estimations perceptives étant donné l'importance du cadre de référence visuel.

(4) Dans la condition chariot instable combiné à la mise en charge du sujet (signaux somatosensoriels et ex-proprioception augmentés (SPA+E)), les sujets devaient se maintenir sur le chariot instable à l'horizontale tout en exerçant les forces de pression nécessaire sur le mur afin de résister à la force de rappel générée par les tendeurs. Dans cette condition, le rétablissement du vecteur force de réaction dans les plans x, y couplée à la rotation du corps induit des feedbacks plantaires et somatosensoriels corporels augmentés quasi aligné avec l'axe longitudinal du corps. Dans cette condition, les informations relatives aux directions principales du cadre de référence visuel et à l'alignement du corps par rapport à la surface d'appui ont été rétablies offrant l'opportunité de combiner les signaux d'orientation E et SPA suivant une règle MLE.

Chaque sujet effectuait 8 ajustements de baguette parallèlement à leur axe Z aussi précisément que possible pour chaque condition. Les 8 ajustements se composaient de 4 combinaisons de cadre (ou disque) et baguette, soit couplées (dans la même direction) ou dissociées (direction opposée) répétés 2 fois donnant un total de 64 essais. La dépendance/indépendance a priori des sujets au champ visuel a été estimée en utilisant le Rod-and-Frame Test en position assise (voir méthode de (Isableu et al., 1997)).

La comparaison de la règle MLE calculée (basée sur la procédure utilisée par (Ernst & Banks, 2002)) à partir des estimations SPA et E isolées avec les estimations SPA+E nous a permis de tester l'hypothèse selon laquelle les sujets utiliseraient la règle MLE dans la condition SPA+E, conditions maximisant la fiabilité des signaux sensoriels et moteurs d'orientation du corps et le nombre de cadres de références

disponibles afin de réaliser les estimations perceptives. Dans l'hypothèse, où les sujets combineraient effectivement les densités des distributions des conditions SPA et E dans la construction de leur estimation de l'axe Z, les estimations prédites ($SPAE_{MLE}$) à partir des données individuelles des conditions SPA et E devraient ajuster les estimations observées ($SPAE_{obs}$) et se traduire par une diminution de la variance et une erreur d'orientation biaisée dans le sens de la modalité la plus fiable. Le modèle prédit que même lorsqu'un signal est inapproprié à la réussite tâche, celui-ci est quand même intégré et influencera le percept final bien que dans une proportion moindre (Ernst & Bulthoff, 2004). L'hypothèse est que le cerveau combine les densités de distribution de chaque signal (SPA et E) en pondérant plus fortement le signal le plus fiable. La stratégie Winner-Take-All (WTA) (Bresciani et al., 2006) a aussi été considérée comme une règle sensorielle alternative. Cette tactique du "tout ou rien" prédit que le sujet opère un choix entre les modalités sensorielles. La modalité la plus précise est alors choisie (c.-à-d. un poids de 1 lui est assignée), tandis que l'autre est ignorée, mais contrairement à la règle MLE la variance de l'estimation multimodale sera au mieux égale à celle de la modalité la plus fiable seule. Cette règle du WTA prédit également que l'erreur perceptive d'orientation en condition multimodale sera également proche du biais observée dans la modalité la plus fiable.

iii. Analyses statistiques

Des analyses de régression multiple ont été utilisées afin d'identifier quel modèle d'intégration multisensorielle (modèle MLE vs. WTA) explique le mieux les estimations produites dans la condition de proprioception et d'ex-proprioception augmentée combinée. Les règles multisensorielles contribuant au modèle sont celles qui

maximisent le plus à la fois la pente (proche de 1, gain positivement ou négativement proportionnel) et le R^2 global (proche de 1, un maximum de variance expliqué), et minimise l'ordonnée à l'origine (proche de 0).

b. Résultats

La figure 29 montre la contribution relative des signaux SPA, E ou $SPAE_{obs}$ dans les estimations de l'axe Z pour chaque sujet. La règle MLE prédit que l'erreur $SPAE_{obs}$ devrait se situer dans un intervalle défini par les estimations obtenues dans les conditions SPA et E, et être biaisée vers les estimations de la condition (SPA ou E) la plus fiable. Les sujets pour lesquels les valeurs moyennes de la condition $SPAE_{obs}$ tombent dans cet intervalle ont été regroupés dans le groupe 1 (G1). Les sujets restant, dont les estimations $SPAE_{obs}$ tombent en dehors de cet intervalle, ont été rangés dans deux autres groupes. Dans le groupe 2 (G2), les signaux SPA et E utilisés de façon isolée ont conduit à une amélioration de la perception de l'axe Z systématiquement meilleure que dans leur utilisation combinée ($SPAE_{obs}$). Dans le groupe 3 (G3), contrairement aux G1 et G2, l'utilisation combinée des signaux SPA et E ($SPAE_{obs}$) a permis de produire des estimations de l'axe Z meilleures que lors de leur utilisation séparée. Pour faciliter la lecture des données, les données des G1, G2 et G3 ont été triées en fonction de leur degré de dépendance obtenu à partir des données d'$SPAE_{obs}$ dans un ordre décroissant. Pour confirmer notre classification empirique, une analyse K-means a été effectuée sur les données SPA, E et $SPAE_{obs}$. Les résultats valident notre répartition des sujets selon 3 types de comportement différents, pour lesquels l'écart entre chaque sujet d'un groupe était minimisé et l'écart entre les groupes était maximisé ($F(2, 47)=48.24$, $p<0.05$).

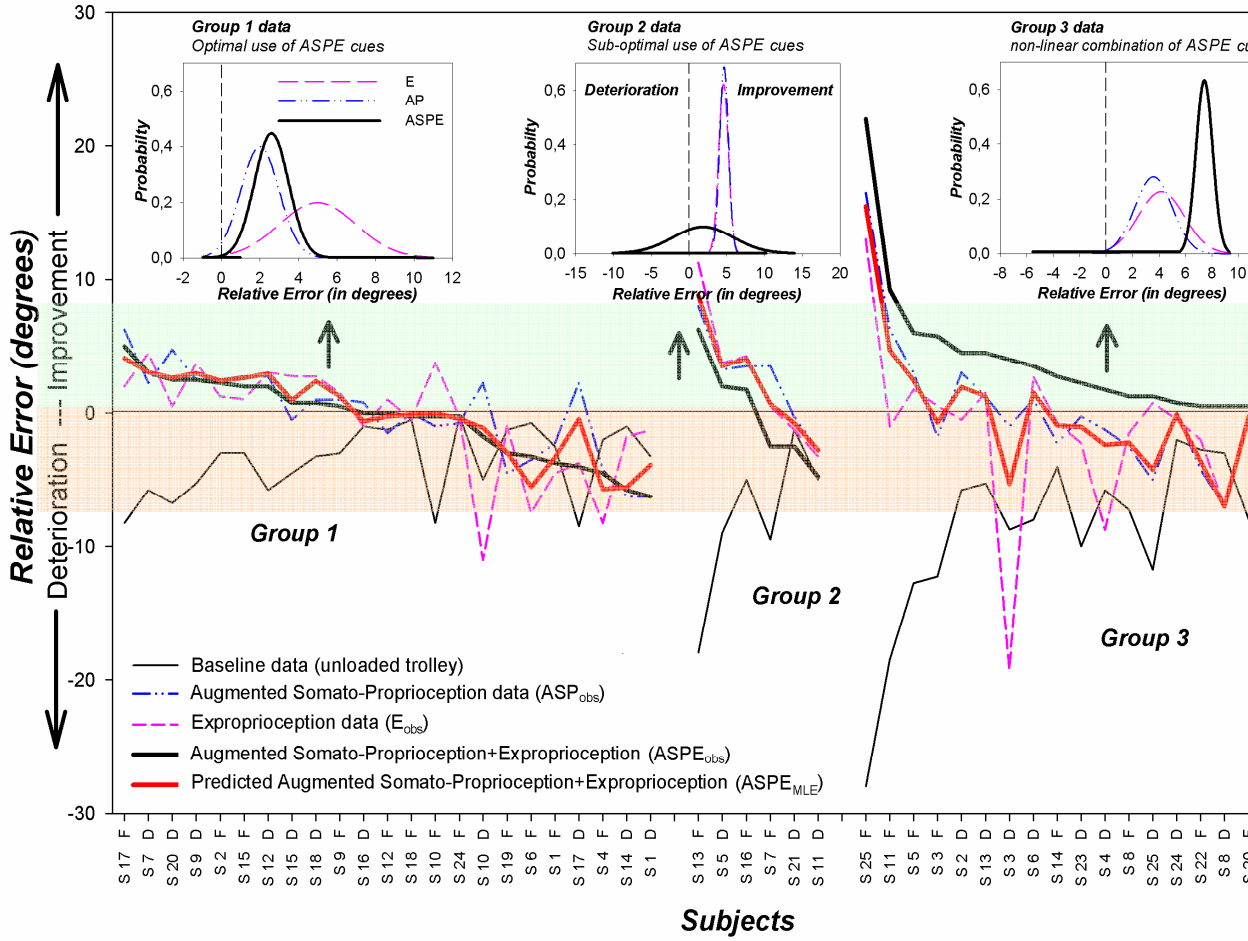


Figure 29. *Tous les sujets sont placés sur l'axe des ordonnées et classés dans 3 groupes (groupes 1 à 3) en fonction de la correspondance entre les estimations observées SPAE$_{obs}$ (ligne noire épaisse) et celles prédites SPAE$_{MLE}$ (ligne rouge épaisse). La ligne "baseline data" correspond aux estimations dans la condition "chariot stable, sujet non chargé", la ligne "SPA$_{obs}$" correspond aux estimations dans la condition "chariot stable, sujet mis en charge" et la ligne "E$_{obs}$" correspond aux estimations dans la condition "chariot instable, sujet non chargé". Les données observées pour chaque groupe et présentées sous forme de distribution sont affichées dans les graphiques de la partie supérieure.*

i) La figure 29 montre que les erreurs individuelles SPAE observées dans le G1 varient entre les estimations SPA et E et semblent plutôt bien s'ajuster aux erreurs prédites SPAE$_{MLE}$ (c.-à-d. pas de différence entre SPAE$_{obs}$ et SPAE$_{MLE}$ ($F(1, 22)=1,95$,

p=ns). Une analyse de régression multiple a montré que la règle MLE explique principalement la variation des estimations d'orientation de l'axe Z dans la condition SPAE ($y(SPAE_{obs})=0,93 \times y(SPAE_{MLE}) + 0,35$; $R^2=0,86$; $F(1, 21)=125,93$, $p<0,05$; Ordonnée à l'origine : +0.35 ; $t(21)=1,43$, p=ns). L'absence de corrélation significative entre l'exploitation des signaux SPA et E lorsqu'ils sont utilisés de façon isolés est cohérente avec l'hypothèse d'orthogonalité requise dans la combinaison des densités de distribution (i.e., indépendance des indices d'orientation fournis par les différentes modalités sensorielles) ($r=0,25$, $p>0,05$).

ii) Les sujets appartenant au G2 ont montré une amélioration plus importante de leur estimations lors de l'utilisation des signaux SPA et E séparément comparé à leur utilisation combinée ($SPAE_{obs}$). Les résultats ont montré que les erreurs obtenues lors de l'utilisation combinée des signaux SPA et E ne s'ajustaient pas aux erreurs prédites $SPAE_{MLE}$ ($F(1, 5)=83,18$, $p<0,05$). Les conditions multimodales d'estimation de l'orientation de l'axe Z ne permettent pas de désambigüiser l'effet perturbateur des scènes visuelles (cadre incliné et disque tournant). Un examen approfondi des données individuelles montre que 4 sujets de ce groupe s'appuieraient sur une autre règle de combinaison multisensorielle (G1 ou G3) : 2 d'entre eux s'appuieraient sur l'utilisation d'une règle MLE (c.-à-d. G1) ; les 2 autres sur la stratégie du G3.

iii) Dans le G3, les erreurs individuelles observées dans la condition multimodale SPAE étaient largement supérieures à celles commises dans les conditions SPA et E et ne s'ajustent pas aux erreurs prédites $SPAE_{MLE}$ ($F(1, 20)=61.51$, $p<0,05$). De plus, la capacité des sujets à utiliser les entrées sensorielles seules semble être plutôt limitée voir même inefficace (13% des sujets ne réduisent pas leur dépendance visuelle

initiale (condition contrôle : chariot stable, non chargée) et par conséquent n'améliorent pas leurs jugements de l'orientation de l'axe Z en utilisant les signaux SPA et E de façon isolée) comparée au sujet du G1. Une analyse de régression multiple a montré que la règle WTA explique principalement la variation des estimations de l'axe Z dans la condition SPAE ($y(SPAE_{obs})=0,92 \times y(SPAE_{WTA}) - 3,53$; $R^2=0,83$; $F(1, 19)=94,84$, $p<0,05$; Ordonnée à l'origine : -3,53 ; $t(19)=-7,81$, $p<0,05$). Cependant, l'importance de l'ordonnée à l'origine observée reflétant l'offset entre les courbes $SPAE_{obs}$ et $SPAE_{MLE}$ (cf. Figure 29, G3) nous amène à reconsidérer l'utilisation effective de la règle Winner-Take-All (WTA) que nous avons identifiée ici. Des priors (Kording & Wolpert, 2004a) pourraient potentiellement expliquer l'offset observé avec les données du G3. La dépendance-indépendance au champ visuel (DIC) prise comme un prior (mesurée avec le RFT) n'apparaît pas contribuer significativement au modèle (excepté une relation modérée entre la DIC et l'utilisation des signaux E : $r=-0,45$, $p<0,05$).

Pour conclure, les sujets peuvent être répartis en 2 groupes principaux (c.-à-d. G1 ou G3), chacun mettant l'accent sur une combinaison sensorielle a priori ou des stratégies de référencement spatial pour estimer l'axe Z différentes, qui restent stable en face des 2 contextes visuels statiques et dynamiques. Comme attendu de la règle MLE, la fiabilité observée dans la condition $SPAE_{obs}$ est inférieure ou égale à celle du signal le plus fiable dans le G1 (respectivement 39% et 13% ; total : 52%) et dans le G3 (respectivement 62% et 29% ; total 71%).

c. Discussion

L'utilisation d'un modèle probabiliste type MLE dans la perception a été un succès pour mieux comprendre comment la fiabilité de différentes sources d'information, en incluant les connaissances préalables (par exemple, les connaissances testées et avérées de l'environnement), pouvaient être combinée par le système perceptif. Des applications récentes des modèles MLE ont montré que le système perceptif humain peut ajuster de façon dynamique les poids des différentes sources d'information, souvent d'une manière quasi-optimale (Ernst & Banks, 2002; Ernst & Bulthoff, 2004; Hillis, Ernst, Banks, & Landy, 2002; Kording & Wolpert, 2004b; Kording & Wolpert, 2004a). De façon intéressante, la contribution sensorielle au contrôle postural semble obéir à la même règle de repondération dynamique permettant l'adaptation du sujet aux changements environnementaux (Bronstein, 1986; Jeka et al., 2000; Kiemel, Oie, & Jeka, 2002; Oie et al., 2002; Vuillerme, Nougier, & Prieur, 2001). Par exemple, les signaux du contact du sol et du pied peuvent supprimer des perceptions de rotation ou translation de l'axe Z du corps induites visuellement et ainsi aider les sujets à distinguer leur propre mouvement des mouvements de l'environnement (Carver, Kiemel, van der Kooij, & Jeka, 2005).

Contrairement aux protocoles classiques, nous avons augmenté peu à peu la fiabilité des signaux somesthésiques et introduit des activités motrices compensatoires en faisant l'hypothèse qu'elles pourraient induire une augmentation équivalente de la fiabilité des estimations perceptives. Si le cerveau utilise des modèles probabilistes d'intégration multisensorielle comme la règle MLE, afin que l'axe Z soit perçu d'une manière quasi-optimale, il devrait tirer avantage de cette augmentation de la saillance

des signaux réels d'orientation par une pondération appropriée et ainsi diminuer le poids des signaux visuels perturbants provenant de l'affichage du cadre et du disque. Si de telles conditions sont remplies, la règle MLE prédit un changement de la probabilité postérieure vers l'entrée sensorielle disponible la plus fiable durant la mise en charge (SPA) et la mise en charge couplée au balancement (SPAE).

Dans la condition SPAE, certaines estimations perceptives de l'orientation de l'axe Z sont prédites par la combinaison MLE des estimations obtenues dans SPA et E séparément. Cependant, certains sujets (G3) ont montré une augmentation soudaine de la précision des estimations perceptives qui ne pouvait être prédite par le MLE. Ces sujets semblent avoir accès à une source d'information à propos de l'axe Z qui est plus précise que ce qui peut être prédit par d'SPA et E selon les règles MLE ou WTA. Des connaissances antérieures pourraient avoir été utilisées pour réduire les erreurs d'estimations de l'AZC. Néanmoins, aucune relation n'a été trouvée entre les styles perceptifs dépendant-indépendant (pris comme un prior) mesuré lors d'un RFT assis et les règles d'intégration multisensorielle sous-tendant à la perception de l'axe Z.

Les importantes améliorations du G3 observées dans la condition SPAE pourraient s'expliquer par l'utilisation d'heuristiques cognitives. Un sujet qui a soupçonné que l'affichage était perturbant pour le traitement des relations spatiales pourrait développer une stratégie d’estimation de son orientation spatiale visant à réduire sa dépendance visuelle et qui consisterait à augmenter l’écart entre l’orientation de la baguette et celle du CDR visuel un peu plus à chaque essai (impliquant une tendance ou une signature dans les données essai par essai). Cette tactique devrait lui permettre de maximiser l'alignement (c.-à-d. en réduisant le biais) de la baguette avec

l'axe Z indépendamment de l'exploitation des priors basés sur le CDR proprioceptif ou de modèles formels d'intégration multisensorielle. Cette tactique met l'accent sur les difficultés du sujet à traiter les relations spatiales à l'intérieur d'un CDR approprié (par exemple, les priors basés sur le CDR somato-proprioceptif) tout en admettant que les effets du CDR visuel restent irrépressibles. L'utilisation d'une telle stratégie peut être une solution adaptative satisfaisant les instructions expérimentales, mais ne fournit pas la preuve que la désorientation perceptive et la dépendance visuelle soient pour autant réduites. Certains sujets (cf. Figure 30, sujet S11F) ont montré une diminution linéaire du biais essai après essai avec les données SPA et E et cette tendance linéaire semblent prédire les estimations $SPAE_{obs}$. Cette stratégie, due à sa simplicité d'utilisation, pourrait être adaptée en situation de désorientation spatiale.

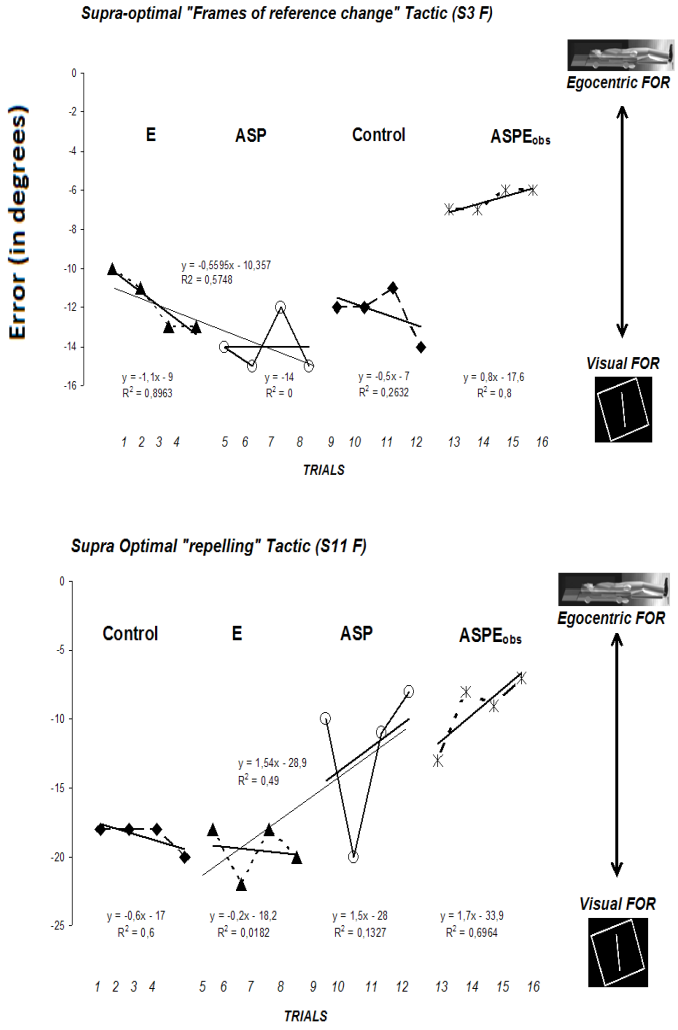


Figure 30. *Exemple de la stratégie du G3 menant à une amélioration des estimations dans la condition $SPAE_{obs}$ plus importante que celle prévue par $SPAE_{MLE}$. Les conditions expérimentales sont présentées dans l'ordre des essais (1 à 16) effectués durant la session entière. La ligne avec les losanges noirs représente les essais effectués dans la condition contrôle (chariot stable, sujet non-chargé). Les lignes avec les triangles, les cercles et les croix représentent les essais effectués dans les conditions E, SPA et $SPAE_{obs}$.*

En fait, la plupart des sujets du G3 (≈70%) ont montré un changement non-linéaire soudain (c.-à-d. d'un essai à un autre) dans la condition $SPAE_{obs}$ (loin de la direction du CDR visuel qui a provoqué une détérioration des estimations SPA et E). A cause de notre utilisation restrictive des données SPA et E dans le calcul de $SPAE_{MLE}$, nous ne pouvons écarter avec certitude la possibilité que de tels résultats résultent d'une règle d'optimisation. Introduire les cadres de référence comme de potentiels priors

pertinents pourrait permettre d'obtenir une perception optimale et produirait de tels changements non-linéaires. Par exemple, les sujets pourraient vouloir changer leur CDR préalable pour sélectionner celui égocentrique (par exemple, le vecteur idiotropique (Mittelstaedt, 1983)), quand ils sentent une déviation et une proximité trop importante avec l'entrée visuelle biaisée (cadre incliné). La figure 30 montre un sujet typique (voir S3 F) respectant cette stratégie. Elle montre aussi que si la tendance essai par essai observée avec les données SPA et E avait été maintenue dans $SPAE_{obs}$, une augmentation continue des erreurs dans le sens du CDR visuel aurait été observée, ce qui n'a pas été le cas. Le changement soudain des estimations $SPAE_{obs}$ pourrait suggérer que la compétition entre les CDR (c.-à-d. visuel vs. égocentrique) s'est soldée par un changement vers le CDR du prior le plus approprié, le CDR égocentrique (par exemple, le vecteur idiotropique). Ainsi lorsque la direction du vecteur force de réaction est restaurée par la mise charge et alignée avec l'axe Z (vecteur idiotropique), les indices cinétiques des SPA pourrait être désambiguïsés au moyen des indices cinématiques E (les indices d'orientation du corps par rapport à l'affichage) et à leur tour, les indices E (mouvement du corps vs. mouvement de l'affichage) pourrait être désambiguïsés grâce aux indices cinétiques SPA (indices d'orientation du corps par rapport au support d'appui des pieds). La comparaison va-et-vient entre ces deux modes de référencement spatial mène à une extraction plus efficace des informations concernant l'axe Z en présence de circonstances visuelles bruitées (disque ou cadre incliné) avec en conséquence une convergence vers une estimation de l'axe Z plus fiable. Les entrées sensorielles peuvent donc être d'abord utilisées pour identifier le CDR le plus adéquat et ensuite pour accroitre la fiabilité des estimations de l'axe Z. Nous avons fait l'hypothèse que les dynamiques du corps dans SPAE devraient générer des signaux spécifiques à propos de l'orientation de l'axe Z donnant accès à un CDR plus important/riche qui n'est

pas disponible dans SPA et E seuls. Les sujets appartenant au G3 pourraient changer pour utiliser ces signaux lors de leurs estimations perceptives. La question qui se pose est alors "comment ces sujets savent que les signaux supplémentaires, uniquement disponibles dans la condition SPAE, sont meilleurs pour percevoir l'orientation de l'axe Z ? Cela vient-il de connaissance a priori sur l'équilibre ? Pourquoi certains sujets ne réalisent pas que ces signaux sont présents et ne les utilisent pas ?".

Dans le même esprit, les conditions offrants de multiples CDR (c.-à-d. condition SPAE) contiennent de l'incertitude à propos de la pertinence des CDR. Cela peut mener certains sujets à les neutraliser en leur assignant un poids équivalent en faisant la moyenne des signaux d'orientation de l'axe Z relatifs au contact pieds/support et à l'affichage visuel (cf. Figure 30). L'utilisation d'une telle stratégie peut aussi mener à une amélioration plus importante que celle obtenue en utilisant la règle MLE lors de la combinaison des estimations effectuées dans les conditions d'un CDR à la fois (SPA et E seuls). Cette neutralisation réciproque des CDR devrait permettre à certains sujets (par exemple, ceux étant les plus fortement désorientés dans les conditions offrant un CDR à la fois, c.-à-d. les conditions SPA et E) de minimiser le risque de commettre un biais d'orientation trop fort si le CDR sélectionné n'était pas le plus pertinent.

Nos résultats suggèrent que le mécanisme de repondération des informations sensorielles pour percevoir et agir pointe 2 processus statistiques sous-jacents différents. Le 1er serait consacré à minimiser le biais d'orientation (maximisation de l'alignement, pour améliorer la justesse) et le 2nd consacré à minimiser la variance dans les estimations multimodales (maximisation de la fiabilité, pour améliorer la précision), prolongeant ainsi la notion de perception optimale. Des changements appropriés dans

les CDR (ce qui est naturellement demandé par les changements incessants des contextes environnementaux) jouent vraisemblablement un rôle important dans les mécanismes de repondération pour maximiser l'alignement. Il est vraisemblable que la règle MLE s'applique aussi à la sélection des CDR, dans lesquels la fiabilité de l'alignement (minimisation du biais d'orientation) et donc la pertinence du CDR devrait organiser, en amont, la manière dont les signaux sensoriels sont d'abord utilisés. De récentes avancées dans le cadre Bayésien ont signalé la nécessité des CDR spatiaux (voir (Avillac et al., 2005; Deneve & Pouget, 2003; Knill & Pouget, 2004)) pour combiner (pour maximiser l'information) ou intégrer (pour réduire la variance des estimations sensorielles et augmenter la fiabilité) de multiples signaux sensoriels (Ernst & Bulthoff, 2004; Hillis et al., 2002).

La compétition entre les CDR pourrait causer un écart par rapport à la règle MLE. Des écarts par rapport à la règle MLE optimale, c.-à-d. des règles non-linéaires de combinaison multisensorielle, ont déjà été observés (Alvarado, Vaughan, Stanford, & Stein, 2007; Stanford & Stein, 2007). Alvarado et al. (Alvarado et al., 2007) ont montré, dans colliculus supérieur, qu'il y avait des représentations disproportionnées des réponses supra-additives (c.-à-d. dépassant la somme des réponses uni-sensorielles) durant l'intégration multisensorielle de stimulus inter-modalité. Les limites du MLE ont aussi été mises en évidence quand, par exemple, des stimuli multi-sensoriels sont spatialement ou temporellement incohérents. Dans ces cas, les réponses comportementales peuvent être significativement dégradées (Frens, Van Opstal, & Van der Willigen, 1995; Stein, Huneycutt, & Meredith, 1988) et l'activité neurale peut être significativement diminuée (Meredith, Nemitz, & Stein, 1987; Wallace et al., 1996).

Des découvertes neurophysiologiques ont prouvé l'existence de compétition entre les CDR. Dans cet ordre d'idées, des interactions inhibitrices réciproques (IIR) inter-sensorielles fonctionnelles sous-jacentes à l'activation et à la désactivation cérébrale corticale sensorielle ont été observées durant la mise en concurrence des informations visuelles et vestibulaires (Brandt et al., 1998; Deutschlander et al., 2002; Dieterich & Brandt, 2000). Ces IIR sont vraisemblablement actionnées quelque soit les canaux sensoriels impliqués. Néanmoins, la force de ces IIR inter-sensorielles pour la repondération des signaux et donc pour réduire la discordance sensorielle est vraisemblablement liée à l'expérience antérieure induisant les cartes somesthésiques bien nettes et bien structurées (Coq & Xerri, 2001). De longues années d'entrainement et de pratique par des musiciens professionnels ont pour conséquence des représentations élargies des aires somato-sensorielles (Pantev et al., 2001). Pareillement, Elbert et al. (Elbert et al., 1998) ont montré une extension de la représentation des différentes parties des doigts dans le cortex somatosensoriel primaire chez les joueurs d'instruments à corde. Ainsi, plus les cartes égocentriques somato-proprioceptives sont précises et structurées plus les directions proprioceptives des segments corporels devraient être perçues avec exactitude et précision et plus la résistance à des signaux visuels perturbants devrait être augmentée. Dans le même esprit, des résultats sur IRMf obtenus par Merabet et al. (Merabet et al., 2008) lors d'une étude de privation visuelle de 5 jours chez des sujets sains voyants ont souligné la capacité à éveiller le cortex occipital dans le traitement d'entrées sensorielles tactiles. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives sur le mécanisme biologique à la base de l'intégration sensorielle. Suite à ces résultats, on peut supposer qu'une utilisation particulière de ce mécanisme pourrait être le cœur des différences interindividuelles. Nous faisons l'hypothèse que certains

sujets présentent une capacité à traduire des signaux proprioceptifs via ces voies visuelles plus importante.

Une approche génétique des différences interindividuelles (Friedman et al., 2008) a apporté des résultats récents à partir d'une étude portant sur 3 fonctions exécutives. Les auteurs ont mis en évidence que les différences individuelles dans les fonctions exécutives sont presque entièrement d'origine génétique (99%).

En résumé, au-delà de la mise à l'épreuve des modèles d'intégration multisensorielle, nous avons fourni la preuve que la variabilité interindividuelle concernant la perception spatiale est en grande partie liée à l'exploitation individuelle des différents CDR pour pondérer les signaux sensoriels et réduire ainsi le biais d'orientation et la variance des estimations. Dans l'expérience suivante, nous tenterons de mettre en relation les différentes stratégies d'intégration multisensorielle étudiées dans les études précédentes avec le profil perceptif (DC/IC) des individus. L'hypothèse est que deux groupes d'individus distincts (un groupe de dépendant au champ visuel (DC) vs un groupe d'indépendant (IC)) devraient différer dans la stratégie utilisée pour combiner l'ensemble des informations sensorielles.

VI. Expérience 6 : Relation entre l'utilisation de règles d'intégration multisensorielle et profil perceptif (DC vs IC)

Les résultats des expériences précédentes laissent penser qu'un des facteurs responsable de la variabilité interindividuelle observée lors de tâches d'orientation spatiale pourrait se situer au niveau de la sélection, pondération des cadres de références disponibles. En effet, les résultats de l'étude 4 ont fait apparaitre une relation significative entre la dépendance au CDR visuel et l'utilisation de stratégies d'intégration multisensorielle type MLE lors de la combinaison de plusieurs signaux sensoriels (visuel et haptique). Chez les sujets hautement dépendants au CDR visuel, la règle MLE surestime la perception réelle (i.e., le biais d'orientation) de plusieurs signaux sensoriels. Inversement, chez les sujets les moins dépendants au CDR visuel, la règle MLE sous-estime la perception réelle (i.e., le biais d'orientation) de plusieurs signaux sensoriels. Des observations similaires peuvent être faites en utilisant les stratégies d'intégration multisensorielle type WTA. Ces résultats sont cohérents avec la théorie selon laquelle les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiale pourraient trouver leur origine dans une exploitation différente des signaux sensoriels disponibles.

Dans cette dernière expérience, nous avons cherché à identifier les règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) en fonction des préférences que les individus accordent à tel ou tel référentiels, le but étant d'associer une stratégie d'intégration multisensorielle à un profil perceptif (DC ou IC). Dans cette perspective,

les résultats obtenus par 2 groupes d'individus distincts (IC vs DC), sélectionnés sur la base de leur score obtenus lors de la passation d'un RFT, étaient confrontés aux résultats prédits par l'utilisation de différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP). Notre hypothèse est que, face à des situations perturbantes (c.-à-d. lorsqu'un ou plusieurs CDR sont perturbés) les sujets les plus indépendants au champ (IC) sont capables de basculer vers un CDR adéquat et ainsi lui attribuer un poids plus important. L'utilisation d'une règle d'intégration multisensorielle de type MLE ou WTA serait plus probable chez ce type de sujets. A contrario, les sujets dépendants au champ (DC), incapables de se soustraire au CDR perturbé, accorderaient autant d'importance à chaque CDR et s'appuieraient ainsi sur une règle type MNP.

Une 2ème hypothèse concerne la fiabilisation des cadres de références. Afin de tester la capacité des sujets à prendre en compte la fiabilité des signaux sensoriels et des référentiels, nous manipulerons la saillance du cadre de référence (CDR) proprioceptif via le principe de mise en charge du sujet (cf. étude 5). Nous faisons l'hypothèse que, dans les conditions où la saillance du CDR proprioceptif est augmentée, les sujets devraient plus facilement s'appuyer sur ce CDR non biaisé et ainsi réduire l'effet de la perturbation de l'environnement visuel. Nous faisons l'hypothèse que ceci devrait être d'autant plus vrai que l'ancrage initial au CDR visuel est important ; autrement dit nous supposons que plus un sujet est dépendant au CDR visuel, plus la réduction de l'effet de la perturbation du CDR visuel induite par le rétablissement des informations proprioceptives relative l'orientation du corps par rapport à la surface d'appui via la mise en charge devrait être importante. Une autre hypothèse concerne l'interaction entre le niveau de fiabilité des cadres de références et l'évolution de la variabilité associée. Il est apparu que moins un CDR est fiable, plus la variance des résultats associée (variance

interessai) est importante. Dans cette étude nous faisons l'hypothèse que, comme la variance interessai, la zone de certitude perçue devrait évoluer en fonction du niveau de fiabilité des cadres de références. Autrement dit, nous supposons que l'amplitude de la zone de certitude devrait être plus importante lorsque le CDR visuel est dévié comparé à la condition où il ne l'est pas. De même, cette même zone de certitude devrait être réduite lorsque la saillance du CDR proprioceptif est augmentée (via la mise en charge du sujet).

Les modèles de pondération d'intégration multisensorielle, type MLE, utilise la variabilité intra-sujet pour attribuer un poids à une modalité sensorielle. Classiquement, cette variabilité intra-sujet est estimé à partir de la variance de l'ensemble des essais observés dans une condition et traduit donc la variabilité moyenne des estimations du sujet pour une condition. Dans le cadre des expérimentations menées dans le domaine de la perception et du contrôle de l'orientation spatiale, la variabilité interessai est susceptible d'être contaminée par un grand nombre de facteur. Cette variabilité interessai rend compte de l'incertitude moyenne d'un sujet sur un certain laps de temps mais pas à un moment précis ; les fluctuations attentionnelles ainsi que les changements de cadre de référence préférentiel conduisent invariablement à une augmentation de cette variance et par conséquent à une sous-estimation de la fiabilité du CDR.

L'objectif de cette étude est de tester différentes méthodes d'estimation de la variance et en particulier de nous rapprocher le plus possible de l'incertitude que le sujet doit traiter au moment d'une estimation unique (i.e., de la variance instantanée). Les différentes méthodes développées viseront à quantifier la zone de certitude perçue (cf. expérience 3) et appréhender si celle-ci peut être utilisée comme un indice de fiabilité

du signal dans les modèles de pondération multisensorielle et ainsi être utilisé pour calculer le poids attribué à un signal. Nous faisons l'hypothèse que la zone de certitude perçue pourrait être un bon indice de fiabilité et pourrait ainsi être utilisé comme outil statistique afin d'établir le poids attribué par un individu à un signal sensoriel ou à un référentiel ; autrement dit, la zone de certitude pourrait, au même titre que la variance interessai, être utilisé dans les modèles de pondération type MLE ou WTA pour définir le poids attribué à un signal. Le modèle Winner-Take-All (WTA) laisse entendre qu'un individu favorise la modalité la plus fiable (Bresciani et al., 2006). Nous supposons qu'un individu utilisant ce type de stratégie devrait obtenir un biais d'estimation ainsi qu'une zone de certitude perçue dans la condition multimodale similaire à ceux obtenus dans la condition uni-modale ayant la plus petite zone de certitude. La règle Maximum Likehood Estimation (MLE) (Ernst & Banks, 2002) prédit que l'individu attribue un poids à chaque modalité sensorielle et ce proportionnellement à leur fiabilité respective. L'estimation dans la condition multimodale résulte d'une moyenne pondérée des modalités sensorielles uni-modales. Nous supposons que la fiabilité attribuée à chaque modalité sensorielle puisse être calculé, non plus à partir de la variance de l'ensemble des essais, mais à partir de l'amplitude de la zone de certitude. Autrement dit, nous supposons que la modalité sensorielle ayant la plus petite zone de certitude devrait se voir attribuer le poids le plus important.

Une autre hypothèse concerne la relation entre de l'amplitude de la zone de certitude et le degré de dépendance/indépendance à l'égard du champ (DIC). La littérature (Ohlmann, 1985) laisse apparaitre une relation entre le degré de dépendance d'un individu et la variance des résultats (variance interessai). Plus un sujet est dépendant (DC) plus la variance interessai est importante. Notre hypothèse est que, tout

comme la variance interessai, la zone de certitude perçue devrait être positivement corrélée au degré de dépendance de l'individu. Autrement dit, plus un sujet est dépendant, plus l'amplitude de sa zone de certitude devrait être importante.

a. Méthodes et matériels

i. Echantillon de population

10 sujets (4 femmes et 6 hommes) volontaires ont participé à cette expérience. Ils avaient en moyenne 23 ans et 2 mois (± 4 ans). Aucun sujet ne présentait de problème moteur, de trouble neurologique ou de déficit sensoriel connu pouvant affecter leur capacité à effectuer ces tâches d'orientation spatiale. Les sujets ont été sélectionnés sur la base de leur score obtenu lors de la passation d'un RFT "3D" similaire à celui proposé dans l'expérience 2. Les 10 sujets (les 5 plus dépendants au champ visuel et les 5 plus indépendants) les plus extrêmes ont été retenus pour cette expérience. Conformément à la déclaration d'Helsinki et après avoir été informé sur les conditions de l'expérience, un accord écrit de participation a été demandé aux sujets. De plus cette étude a fait l'objet d'une approbation par le comité d'éthique local EA 4042.

ii. Méthodologie

Il était demandé aux sujets de réaliser un test de perception de l'axe longitudinal de leur corps (orientation subjective du corps, OSC) en étant soumis à 3 conditions différentes d'environnement visuel couplées à 2 conditions proprioceptives. Les sujets étaient couchés sur le dos et attachés au sol, grâce à des lanières, à 4 niveaux différents :

taille, poitrine, épaules et tête. Ils faisaient face à un écran de rétroprojection et devaient réaligner une baguette sur l'axe Z de leur corps (axe allant de la tête aux pieds). L'ajustement se faisait selon 3 modalités de réponse possible : visuel (V), haptique (H) et visuo-haptique (VH) (cf. méthodologie de l'expérience 4).

Modalité de réponse sensorielle

Dans la modalité de réponse visuelle (cf. Figure 31a), les sujets devaient ajuster une baguette virtuelle visuelle (d'une taille angulaire de 17° verticale et 1° horizontale) affichée sur l'écran, au moyen d'un clavier d'ordinateur.

Dans la modalité de réponse haptique (cf. Figure 31b), les sujets devaient ajuster une baguette physique (mesurant 20 cm de long et 2 cm de diamètre) tenue dans leurs mains (entre le pouce et l'index de chaque main). Les sujets ne pouvaient pas voir la baguette qu'ils tenaient.

Dans la modalité de réponse visuo-haptique (cf. Figure 31c), le déplacement de la baguette physique était associé, en temps réel, au même déplacement de la baguette virtuelle sur l'écran. Le co-alignement de la baguette virtuelle avec la baguette physique a été vérifié avant l'expérience.

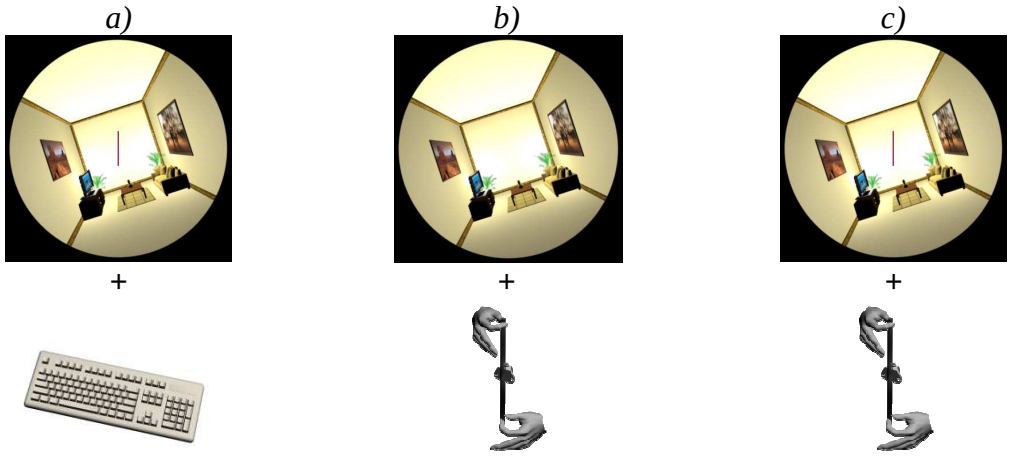


***Figure 31**. Illustration des modalités de réponse sensorielle : visuelle (a), haptique (b) and visuo-haptique (c).*

Effet d'un cadre incliné sur la perception de l'OSC

Dans la 1ère condition d'environnement visuel, le sujet faisait face à un écran blanc sur lequel la baguette était projetée, si l'ajustement s'effectuait dans la modalité de réponse visuel ou visuo-haptique. Si l'ajustement s'effectuait dans la modalité de réponse haptique, l'écran restait blanc durant les essais. Dans les 2ème et 3ème conditions d'environnement visuel, le sujet face à une pièce inclinée à ± 18° (pièce identique à celle utilisée dans la condition "2D enrichi" lors de l'expérience 2). Ces 3 conditions d'environnement visuel étaient combinées à 2 conditions proprioceptives : chargé ou non chargé.

Effet de la mise en charge sur la perception de l'OSC

Dans la condition "non chargé", le sujet était passif. Les signaux somatosensoriels d'orientation du corps par rapport à l'appui des pieds sont absents (pas de contact pied/support). Les signaux somatosensoriels restants proviennent du contact sol/dos et sol/talons, qui donnent, dans les deux cas, des signaux orthogonaux à l'axe Z. Nous avons théorisé ces signaux comme faiblement indicatifs de l'axe Z. Les signaux visuels ex-proprioceptifs, c.-à-d. le feedback visuel d'orientation du sujet par rapport à

l'affichage (Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975) sont fortement diminués étant donné l'absence de mouvement du corps par rapport à la scène visuelle.

Dans la condition "chargé", le sujet devait pousser avec ses jambes sur un support en bois. La poussée était égale à 85% du poids du corps du sujet. Dans cette condition, la force de pression exercée au niveau des pieds afin de lutter contre la force de rappel des élastiques entraine l'apparition du vecteur de la force de réaction dont la direction est alignée avec l'axe Z. Les indices directionnels provenant de la mise en tension de toute la chaine proprioceptive et musculaire du corps peuvent informer les sujets sur la direction de l'axe Z du corps. Cette manipulation restaure la possibilité d'extraire les signaux somatosensoriels de l'orientation de l'axe Z par rapport à l'appui des pieds.

Le sujet était ainsi soumis à 6 conditions (3 conditions d'environnement visuel x 2 conditions proprioceptives) pour chaque modalité de réponse. Pour chaque condition, le sujet effectuait 10 essais : 5 avec une baguette initialement inclinée à +18° et 5 à -18°. Pour chaque essai, le sujet estimait l'orientation subjective du corps (OSC). Au bout de 5 essais (correspondant à la fin des essais avec la baguette initialement incliné à ±18°), le sujet estimait les limites de la zone de certitude c.-à-d. les orientations droite et gauche de la baguette au-delà desquelles il était sûr que la baguette n'était plus alignée avec son corps (cf. méthodologie expérience 3).

Pour chaque essai, nous enregistrons l'OSC. Pour chaque condition, nous disposons de 3 valeurs : l'OSC moyenne, la zone de certitude perçue et la variance

interessai. La variance intraessai étant similaire à la variance interessai (cf. résultats expérience 3) n'a pas été étudiée dans cette étude.

L'ordre de passation des 3 modalités de réponse était randomisé d'un sujet à l'autre ainsi que l'ordre des 6 conditions à l'intérieur de chaque modalité de réponse. Enfin l'ordre des 2 blocs d'essais (correspondant aux positions initiales de la baguette) à l'intérieur de chaque condition était également randomisé.

iii. Analyses statistiques

Les orientations de la baguette étaient enregistrées pour chaque essai avec une précision de 0,03°. Pour les modalités de réponse haptique et visuo-haptique, les orientations finales de la baguette étaient enregistrées en utilisant un capteur magnétique, Flock of Birds^{TM} (Fourre et al., 2009). Aucune contrainte de temps n'était donnée au sujet pour effectuer leur estimation, il devait uniquement ajuster la baguette parallèlement à l'axe Z de leur corps le plus précisément possible.

Nous nous sommes intéressés à la précision et à l'exactitude de la mesure de la perception de l'OC. Nous avons calculé l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition et chaque modalité de réponse. Comme lors de l'étude 4, nous avons effectué une rapide inspection de nos données pour observer la présence ou non d'effet significatif de la position de départ de la baguette. Une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif de la position de départ de la baguette dans la modalité de réponse haptique ($F(1, 9)=7,2234$, $p<0,05$). Aucun effet de la position de départ de la baguette n'a été observé ni dans la modalité de réponse visuelle ($F(1, 9)=1,3830$, p=ns)

ni dans la modalité de réponse visuo-haptique ($F(1, 9)=3,144$, p=ns). Cet effet de la position initiale de la baguette est vraisemblablement dû à un effet moteur et pourrait fortement influencer la mesure de la variance et de la moyenne des estimations de la perception de l'OC dans tout son ensemble. Afin d'annuler cet effet de la position de départ de la baguette de la variance totale, nous avons, comme pour l'expérience 4, calculé la différence entre la moyenne des essais dans chaque condition de position de départ de la baguette et la moyenne de tous les essais dans chaque condition quelque soit la position de départ de la baguette. La valeur obtenue a alors été soustraite aux valeurs obtenues à chaque essai.

Afin de pouvoir étudier l'effet de la perturbation visuelle et de la mise en charge du sujet, les valeurs corrigées d'orientations finales de baguette enregistrées pour chaque essai ont été comparées à la moyenne des essais de la condition neutre, c.-à-d. la condition où le sujet faisait face à un écran blanc sans être mis en charge ; ceci pour chaque modalité de réponse. La moyenne des essais de la condition neutre obtenue dans une modalité de réponse (V, H ou VH) a été soustraite à l'ensemble des essais obtenus dans cette même modalité.

A partir de cette valeur corrigée, nous avons calculé l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition et chaque modalité de réponse.

Identification des règles d'intégration multisensorielle

Afin de vérifier si la diminution de l'effet d'un cadre visuel incliné sur la perception de l'OC dans la modalité de réponse visuo-haptique est due à l'utilisation d'une règle optimale de combinaison des informations visuelle et haptique, nous avons calculé la valeur prédite dans la modalité de réponse combinée visuo-haptique en utilisant les données obtenues dans les modalités réponses visuelle et haptique seules.

Nous avons alors calculé l'estimation combiné visuo-haptique en utilisant le modèle Winner-Take-All (VH_{WTA}), la règle Maximum Likehood Estimation (VH_{MLE}) et la moyenne non-pondéré (VH_{MNP}). Dans le modèle Winner-Take-All (WTA), l'estimation combinée (*S*) des 2 sources d'informations sensorielles et la variance associée est équivalente à l'estimation et à la variance de l'information sensorielle qui à la plus petite variance (Bresciani et al., 2006). Dans la règle de Maximum Likehood Estimation (MLE) (Ernst & Banks, 2002), l'estimation combinée (*S*) des 2 sources d'information sensorielle est équivalente à la somme des estimations (S_i) de chaque information sensorielle seule, pondérée par la fiabilité de chaque signal (w_i) (cf. expérience 4).

Nous avons également fait l'hypothèse que la zone de certitude perçue pouvait être un bon indice de fiabilité et pouvait ainsi être utilisé comme outil statistique afin d'établir le poids attribué par un individu à un signal sensoriel dans les modèles de pondération type MLE ou WTA. Dans le modèle WTA, l'estimation combinée (*S*) des 2 sources d'informations sensorielles et la zone de certitude associée est équivalente à l'estimation et à la zone de certitude de l'information sensorielle ayant la plus petite zone de certitude. Avec la règle MLE, l'estimation combinée (*S*) des 2 sources d'information sensorielle est équivalente à la somme des estimations (S_i) de chaque information sensorielle seule, pondérée par la fiabilité de chaque signal (w_i).

Equation (10)

$$S = \sum_i w_i S_i$$

La fiabilité (w_i) de chaque signal n'est alors plus calculée à partir de la variance (σ_i) de chaque signal mais à partir de la zone de certitude (zc_i).

Equation (11)

$$w_i = \frac{1/zc_i}{(1/zc_i) + (1/zc_j)}$$

La zone de certitude (zc_{ij}) de l'estimation finale est

Equation (12)

$$zc_{ij} = \frac{zc_i zc_j}{zc_i + zc_j}$$

Identification des règles de combinaison des référentiels spatiaux d'orientation

Après avoir vérifié si l'intégration de différents signaux sensoriels suivait une règle d'intégration multisensorielle optimale, nous avons également cherché à savoir si ces modèles d'intégration multisensorielle pouvaient s'appliquer à la combinaison de plusieurs cadres de références. Pour cela, nous avons calculé la valeur prédite par nos différents modèles (WTA, MLE) dans les conditions où 2 CDR étaient manipulés (cadre visuel incliné + mise en charge du sujet) à partir des données obtenus lorsqu'un seul CDR était manipulé (cadre visuel incliné sans mise en charge du sujet ou mise en charge du sujet sans cadre visuel).

Les orientations finales de la baguette ont été sujettes à une analyse de variance appropriée afin d'estimer l'effet des modes sensoriels d'ajustement de la baguette (visuel vs haptique vs visuo-haptique) sur l'amplitude de l'effet du cadre visuel et sur l'effet de la mise en charge du sujet sur la perception de l'OC. Seuls les résultats significatifs

($p<0,05$) seront rapportés. Les ANOVAs ont été effectués en utilisant le logiciel STATISTICA 7®.

Afin d'explorer la relation entre les dépendances aux CDR visuel et égocentrique, et également pour éliminer les effets asymétriques du cadre et de la mise en charge du sujet, nous avons appliqué le calcul de Nyborg (Nyborg, 1974) sur nos données (cf. expériences précédentes).

b. Résultats

i. Sur l'ensemble des sujets (sans distinguer les sujets DC et IC)

Effets du CDR visuel incliné et de la mise en charge du sujet sur…

… l'erreur d'OSC

Les performances moyennes de perception de l'OC pour chacune des 6 conditions (3 inclinaisons de cadre x 2 conditions de mise en charge) pour les modalités de réponse visuelle, haptique et visuo-haptique sont affichées dans le tableau 12. Une ANOVA à mesures répétées effectuée pour chaque modalité de réponse a révélé un effet principal significatif de l'orientation du cadre dans les modalités de réponse visuelle ($F(2, 18)=25,785$, $p<0,05$), haptique ($F(2, 18)=4,0493$, $p<0,05$) et visuo-haptique ($F(2, 18)=19,888$, $p<0,05$). Un effet principal significatif de la mise en charge du sujet a été observé pour la modalité de réponse haptique ($F(1, 9)=7,4133$, $p<0,05$) mais pas dans les modalités de réponse visuelle et visuo-haptique. Un effet significatif d'interaction entre l'orientation du cadre et la mise en charge du sujet a été observé l'OSC dans la modalité de réponse visuelle ($F(2, 18)=5,8917$, $p<0,05$) et visuo-haptique

(F(2, 18)=4,1531, p<0,05) mais pas dans la modalité de réponse haptique. Les résultats montrent que l'effet cadre est amplifié par la mise en charge du sujet.

… la variance des estimations d'OC :

i) zone de certitude perçue

Les mêmes analyses ont été effectuées sur l'amplitude de la zone de certitude perçue et sont affichées dans le tableau 13. Une ANOVA à mesures répétées effectuée pour chaque modalité de réponse a révélé un effet principal significatif de l'orientation du cadre dans la modalité de réponse visuelle (F(2, 18)=4,0708, p<0,05), mais pas dans les modalités de réponse haptique et visuo-haptique. Les résultats montrent que la présence d'un cadre incliné à ± 18° augmente la taille de la zone de certitude perçue. Un effet principal significatif de la mise en charge du sujet a été observé dans la modalité de réponse haptique (F(1, 9)=18,205, p<0,05) mais pas dans les modalités de réponse visuelle et visuo-haptique. Les résultats montrent que la mise en charge du sujet augmente la taille de la zone de certitude perçue. Aucun effet significatif d'interaction entre l'orientation du cadre et la mise en charge du sujet n'a été observé sur l'amplitude de la zone de certitude.

ii) la variance interessai

Les mêmes analyses ont été effectuées sur la taille de la variance interessai et sont affichées dans le tableau 12. Une ANOVA à mesures répétées effectuée pour chaque modalité de réponse a révélé un effet principal significatif de l'orientation du cadre dans les modalités de réponse visuelle (F(2, 18)=3,8733, p<0,05) et visuo-haptique (F(2, 18)=4,2874, p<0,05), mais pas dans la modalité de réponse haptique. Les résultats montrent que la présence d'un cadre incliné à ± 18° augmente la taille de la

variance interessai. Un effet principal significatif de la mise en charge du sujet a été observé pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 9)=17,784$, $p<0,05$) mais pas pour les modalités de réponse haptique et visuo-haptique. Les résultats montrent que la mise en charge du sujet permet de réduire la taille de la variance interessai. Aucun effet significatif d'interaction entre l'orientation du cadre et la mise en charge du sujet n'a été observé sur la variance interessai.

Effets des modalités de réponse sensorielles…

… sur l'erreur d'OSC

Nous avons cherché à savoir si la combinaison de plusieurs modalités de réponse sensorielles (i.e., visuo-haptique) permettait de réduire l'effet de l'inclinaison du CDR visuel et de la mise en charge du sujet sur la perception de l'OC (réduction du biais moyen d'estimation de l'OC). Pour cela, nous avons examiné les réponses obtenues dans les modalités de réponse visuelle et haptique séparément, puis dans la modalité de réponse visuo-haptique pour chaque condition.

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'enrichissement des modalités de réponses permettait de réduire l'effet de dépendance à un cadre de référence, une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour chaque condition. Le tableau 9 récapitule la présence ou non d'effet principal significatif de la modalité de réponse en fonction des conditions. La moyenne des résultats en fonction des conditions est présentée dans la figure 32.

	C-18	SC	C+18
Ch	S (F(2, 18)=3,7051, p<0,05)	S (F(2, 18)=5,4799, p<0,05)	S (F(2, 18)=13,608, p<0,05)
NCh	NS	NS	S (F(2, 18)=10,935, p<0,05)

***Tableau 9**. Résumé des effets significatifs (=S) ou non significatifs (=NS) de la modalité de réponse sur la perception de l'OC.*

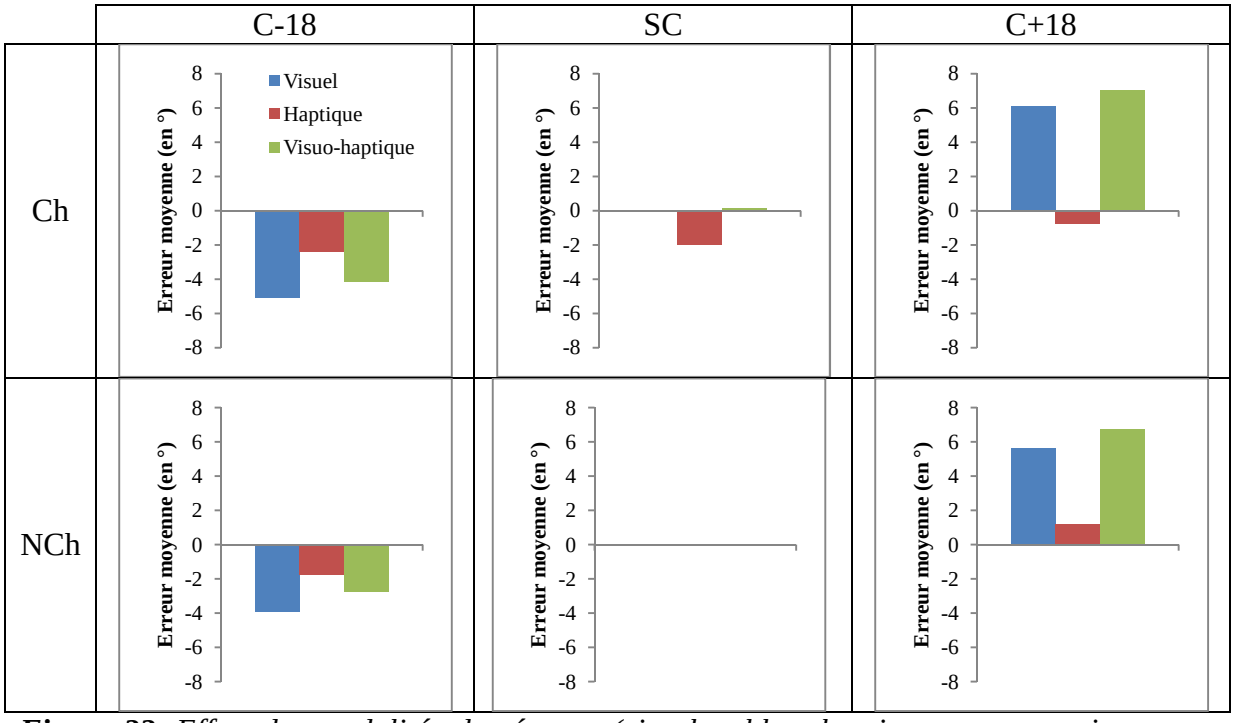


***Figure 32**. Effets des modalités de réponse (visuel = bleu, haptique = rouge, visuo-haptique = vert) en fonction de l'inclinaison du cadre et de la mise en charge du sujet sur la perception de l'OC.*

…sur la variance des estimations :

i) zone de certitude perçue

Dans le même but, nous avons cherché à savoir si la combinaison de plusieurs modalités de réponse sensorielles permettait de réduire l'effet de l'inclinaison du CDR visuel et de la mise en charge du sujet sur l'amplitude de la zone de certitude. Les mêmes analyses ont été effectuées. Le tableau 10 récapitule la présence ou non d'effet principal significatif de la modalité de réponse en fonction des conditions. La moyenne des zones de certitude en fonction des conditions est présentée dans la figure 33.

	C-18	SC	C+18
Ch	S (F(2, 18)=6,1083, p<0,05)	S (F(2, 18)=15,824, p<0,05)	S (F(2, 18)=13,372, p<0,05)
NCh	NS	S (F(2, 18)=7,1084, p<0,05)	S (F(2, 18)=5,6565, p<0,05)

***Tableau 10**. Résumé des effets significatifs (=S) ou non significatifs (=NS) de la modalité de réponse sur l'amplitude de la zone de certitude.*

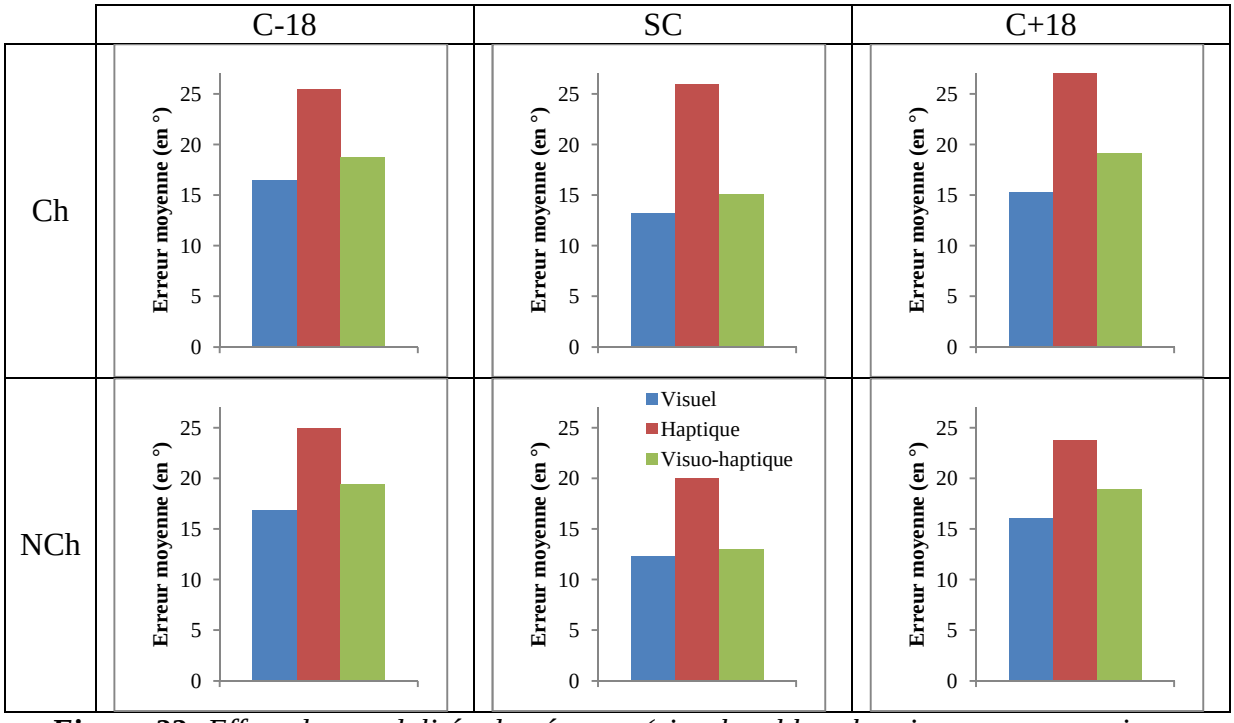


***Figure 33**. Effets des modalités de réponse (visuel = bleu, haptique = rouge, visuo-haptique = vert) en fonction de l'inclinaison du cadre et de la mise en charge du sujet sur l'amplitude de la zone de certitude.*

ii) sur la variance interessai

Enfin, nous avons cherché à savoir si la combinaison de plusieurs modalités de réponse sensorielles avait un impact sur la variance des résultats. Les mêmes analyses ont été effectuées. Le tableau 11 récapitule la présence ou non d'effet principal significatif de la modalité de réponse en fonction des conditions. La moyenne des variances interessai en fonction des conditions est présentée dans la figure 34.

	C-18	SC	C+18
Ch	S (F(2, 18)=6,3199, p<0,05)	S (F(2, 18)=13,927, p<0,05)	S (F(2, 18)=6,4472, p<0,05)
NCh	NS	S (F(2, 18)=13,321, p<0,05)	NS

***Tableau 11**. Résumé des effets significatifs (=S) ou non significatifs (=NS) de la modalité de réponse sur la variance interessai.*

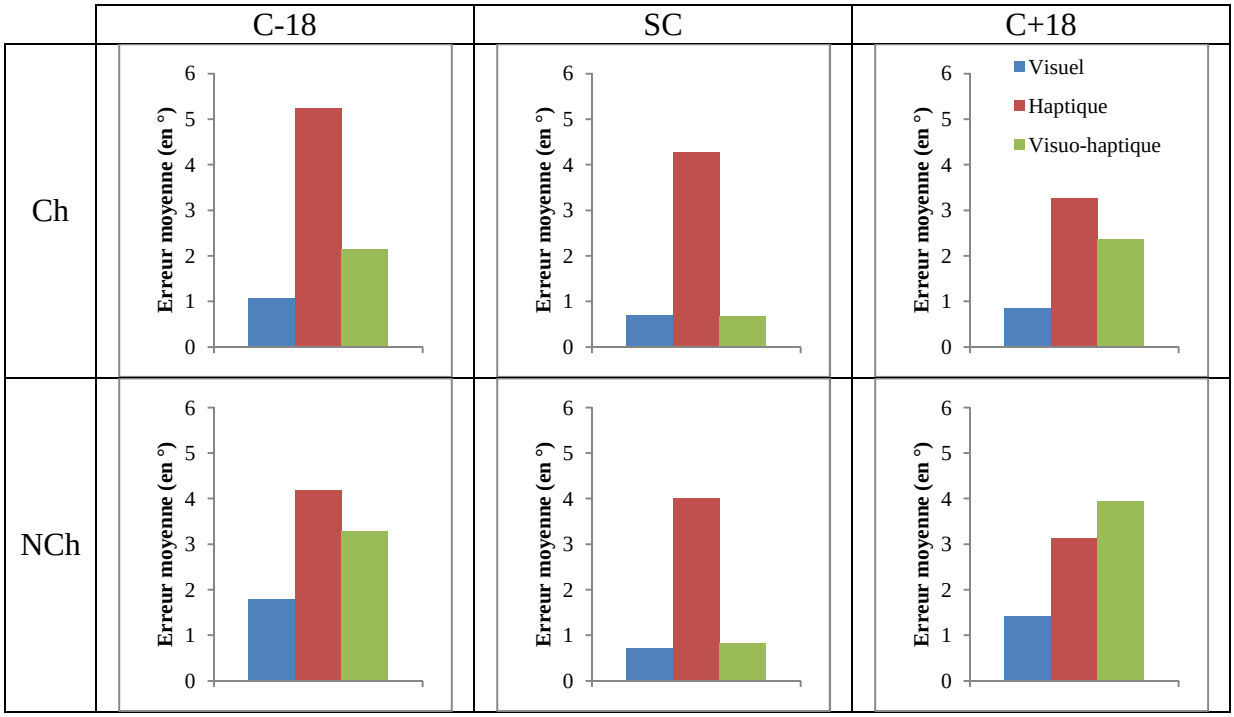


***Figure 34**. Effets des modalités de réponse (visuel = bleu, haptique = rouge, visuo-haptique = vert) en fonction de l'inclinaison du cadre et de la mise en charge du sujet sur la variance interessai.*

Règle optimale d'intégration sensorielle (MLE) appliquée aux signaux en utilisant la variance interessai comme indice de fiabilité

Afin de vérifier si le changement d'amplitude de l'effet cadre visuel incliné sur la perception de l'OC dans la modalité VH découle d'une règle optimale d'intégration des signaux visuels et haptiques, nous avons décidé de calculer la règle MLE à partir des données des ajustements visuels et haptiques. Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) (cf. Etude 4, Analyses statistiques, p 102) afin d'obtenir l'erreur moyenne et la variance VH prédites pour les 6 conditions. L'erreur VH prédite par l'utilisation d'une règle MLE a alors été comparée aux données VH observées. Dans l'hypothèse de

l'utilisation d'une règle MLE, l'erreur moyenne d'ajustement dans la modalité de réponse VH devrait se situer entre les erreurs moyennes observées dans les modalités de réponse V et H et déviée dans la direction de la modalité la plus fiable. La variance attendue devrait quant à elle être plus petite que les variances observées dans les modalités de réponse V et H.

Les résultats ont montré que la règle MLE ne semble pas expliquer le biais moyen VH observé (différence significative entre l'erreur prédite par la règle MLE dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=11,193$, $p<0,05$)), ni la variance observée (différence significative entre la variance prédite par la règle MLE dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=19,602$, $p<0,05$)).

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux signaux en utilisant la variance interessai comme indice de fiabilité

Les données VH observées ont aussi été comparées à l'erreur VH prédite par le modèle WTA. Les résultats suggèrent que le modèle WTA explique le biais moyen VH observé (aucune différence entre l'erreur prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH). Cependant, ce résultat n'a pas été observé pour la variance (différence significative entre la variance prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=12,912$, $p<0,05$)).

Finalement, les données VH observées ont été comparées à l'erreur VH prédite par la moyenne non-pondérée algébrique (MNP) des erreurs et de la variance obtenue

dans les modalités visuelle et haptique seule. Les résultats suggèrent que ce modèle n'explique pas le biais moyen VH observé (différence significative entre l'erreur prédite par ce modèle dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ($F(1,59)=11,818$, $p<0,05$)) mais expliquerait la variance observée (aucune différence significative entre la variance prédite par ce modèle dans la réponse VH et la variance observée dans la réponse VH). L'ensemble des résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) sont présentés dans le tableau 12 et la figure 35.

		V		H		VH obs		VH MLE		VH WTA		VH MNP	
		EM	Var	EM	Var	EM	Var	EM	Var	EM	Var	EM	Var
C-18	Ch	-5,09	1,07	-2,37	5,25	-4,18	2,15	-4,79	0,69	-5,11	0,95	-3,73	3,16
	NCh	-3,92	1,79	-1,81	4,17	-2,76	3,27	-3,52	0,97	-3,5	1,48	-2,86	2,98
SC	Ch	-0,01	0,69	-1,99	4,28	0,17	0,68	-0,34	0,54	-0,01	0,69	-1	2,48
	NCh	0	0,72	0	3,99	0	0,83	0	0,56	0	0,72	0	2,36
C+18	Ch	6,07	0,85	-0,77	3,26	7,03	2,36	4,79	0,6	6,07	0,85	2,65	2,05
	NCh	5,64	1,42	1,16	3,12	6,73	3,94	4,11	0,91	5,64	1,42	3,4	2,27

***Tableau 12**. Erreurs Moyennes (EM) et Variances (Var) en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=estimations observées dans la modalité de réponse visuo-haptique, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la moyenne non-pondérée, C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

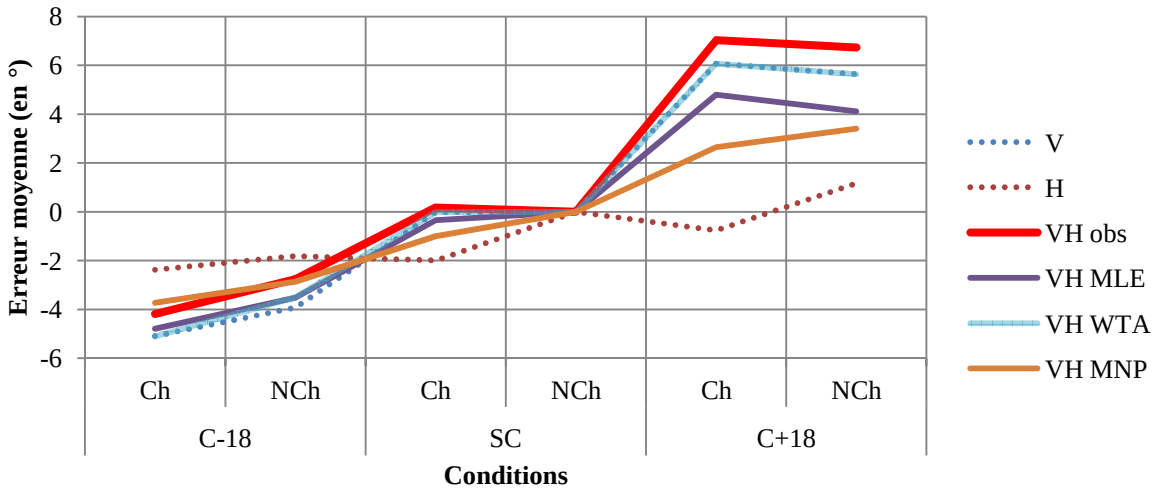


Figure 35. *Erreurs moyennes d'OSC en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=estimations observées dans la modalité de réponse visuo-haptique, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la moyenne non-pondérée, C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

Règle optimale d'intégration sensorielle (MLE) appliquée aux signaux en utilisant la zone de certitude (zc) comme indice de fiabilité

Nous avons fait l'hypothèse que la zone de certitude perçue pouvait être un bon indice de fiabilité et pouvait ainsi être utilisé comme outil statistique afin d'établir le poids attribué par un individu à un signal sensoriel. Nous avons donc effectué les mêmes analyses que précédemment mais en utilisant non plus la variance des résultats pour calculer la fiabilité d'un signal mais la zone de certitude perçue. Nous avons appliqué les équations (10), (11) et (12) (cf. Analyses statistiques, p 165-166) pour obtenir l'erreur moyenne et la zone de certitude VH prédites pour les 6 conditions. L'erreur VH prédite par l'utilisation d'une règle MLE a alors été comparée aux données VH observées.

Les résultats ont montré que la règle MLE ne semble pas expliquer le biais moyen VH observé (différence significative entre l'erreur prédite par la règle MLE dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=12,873$, $p<0,05$)), ni la zone de certitude observée (différence significative entre la zone de certitude prédite par la règle MLE dans la réponse VH et la zone de certitude observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=67,693$, $p<0,05$)).

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux signaux en utilisant la zone de certitude comme indice de fiabilité

Les données VH observées ont été comparées à l'erreur VH prédite par le modèle WTA. Les résultats suggèrent que le modèle WTA explique le biais moyen VH observé (aucune différence entre l'erreur prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH). Cependant, ce résultat n'a pas été observé pour la zone de certitude (différence significative entre la zone de certitude prédite par le modèle WTA dans la réponse VH et la zone de certitude observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=13,291$, $p<0,05$)).

Finalement, les données VH observées ont été comparées à l'erreur VH prédite par la moyenne non-pondérée algébrique (MNP) des erreurs et de la zone de certitude obtenue dans les modalités visuelle et haptique seule. Les résultats suggèrent que ce modèle n'explique pas le biais moyen VH observé (différence significative entre l'erreur prédite par ce modèle dans la réponse VH et l'erreur moyenne observée dans la réponse VH ($F(1,59)=11,818$, $p<0,05$)) ni la zone de certitude observée (différence significative entre la zone de certitude prédite par ce modèle dans la réponse VH et la zone de certitude observée dans la réponse VH ($F(1, 59)=9,7371$, $p<0,05$)). L'ensemble des

résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) sont présentés dans le tableau 13 et la figure 36.

		V		H		VH obs		VH MLE		VH WTA		VH MNP	
		EM	ZC	EM	ZC	EM	ZC	EM	ZC	EM	ZC	EM	ZC
C-18	Ch	-5,09	16,48	-2,37	25,42	-4,18	18,77	-4,28	9,51	-4,78	15,69	-3,73	20,9
	NCh	-3,92	16,85	-1,81	24,95	-2,76	19,44	-3,15	9,57	-3,47	15,7	-2,86	20,9
SC	Ch	-0,01	13,16	-1,99	25,93	0,17	15,09	-0,75	8,38	-0,01	13,16	-1	19,5
	NCh	0	12,25	0	20,03	0	12,97	0	6,97	0	10,86	0	16,1
C+18	Ch	6,07	15,24	-0,77	27,08	7,03	19,08	3,82	9,25	6,07	15,24	2,65	21,1
	NCh	5,64	16,09	1,16	23,73	6,73	18,89	3,92	9,04	5,29	14,78	3,4	19,9

***Tableau 13**. Erreurs Moyennes (EM) et Zones de Certitude (ZC) en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=estimations observées dans la modalité de réponse visuo-haptique, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la moyenne non-pondérée, C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

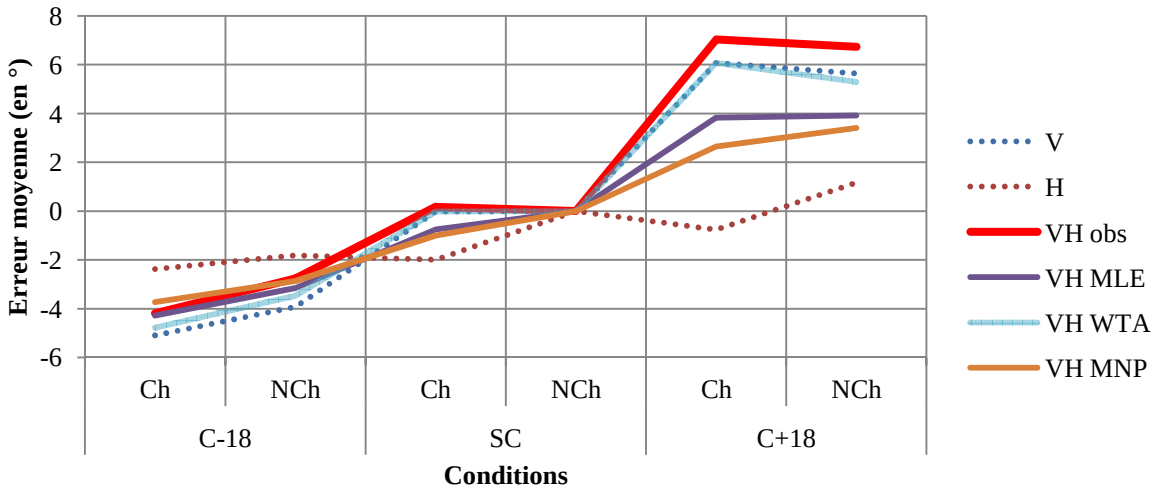


***Figure 36**. Erreurs moyennes d'OSC en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique, VH obs=estimations observées dans la modalité de réponse visuo-haptique, VH MLE=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle MLE, VH WTA=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la règle WTA, VH MNP=estimations visuo-haptique prédites calculées avec la moyenne non-pondérée, C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique (sans cadre), C+18=cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

En résumé, les résultats montrent que la perception de l'OC dans la modalité VH ne semble pas découler de l'utilisation d'une règle MLE quelque soit l'indice de fiabilité utilisé (différence significative entre l'erreur d'OSC observée dans la modalité VH et celle prédite par la règle MLE, entre la variance observée dans la modalité VH et celle prédite par la règle MLE et entre la zone de certitude perçue dans la modalité VH et celle prédite par la règle MLE).

Les résultats montrent que l'utilisation d'une règle WTA semble partiellement appropriée. Aucune différence significative n'est apparue entre l'erreur d'OSC observée dans la modalité VH et celle prédite par la règle WTA et ce quelque soit l'indice de fiabilité utilisé (variance interessai ou amplitude de la zone de certitude). Cependant, ce résultat n'est pas observé pour la variance interessai ni pour la zone de certitude perçue (différence significative entre la variance observée dans la modalité VH et celle prédite par la règle WTA et entre la zone de certitude perçue dans la modalité VH et celle prédite par la règle WTA).

Enfin, les résultats montrent que l'utilisation d'une règle MNP ne semble pas non plus appropriée. En effet seule la variance interessai semble expliquée par ce modèle (aucune différence significative entre la variance interessai observée dans la modalité VH et celle prédite par la règle MNP).

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux CDR en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

De façon similaire à l'intégration des signaux sensoriels, nous avons cherché à savoir si l'intégration des CDR résultait de l'utilisation d'une règle optimale d'intégration multisensorielle. Nous avons décidé de calculer la règle MLE, non plus à partir des modalités de réponse mais à partir des CDR, c.-à-d. que nous avons prédit les réponses

dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés (cadre visuel incliné et mise en charge du sujet) à partir des données observées lorsqu'un seul CDR était manipulé (cadre visuel incliné sans mise en charge du sujet ou mise en charge du sujet sans cadre visuel). Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) (cf. Etude 4, Analyses statistiques, p 102) afin d'obtenir l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition où les deux CDR étaient manipulés pour chaque modalité de réponse (cf. Figure 37). Les erreurs prédites par l'utilisation d'une règle MLE ont été comparées aux erreurs observées. Les résultats ont montré que la règle MLE semble expliquer le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par la règle MLE et l'erreur moyenne observée quelque soit la modalité de réponse). Cependant, en ce qui concerne la variance, ce résultat n'est pas observé (différence significative entre la variance prédite par la règle MLE et la variance observée pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 19)=20,869$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 19)=15,606$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 19)=8,2409$; $p<0.05$)).

Autres règles de combinaison (WTA, MNP) appliquée aux CDR en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont également été comparées aux erreurs prédites par le modèle Winner-Take-All. Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec l'utilisation d'une règle MLE c.-à-d. qu'il n'y a pas de différence significative entre les erreurs moyennes prédites par le modèle WTA et les erreurs moyennes observées mais par contre il existe bien une différence significative entre la variance prédite et la variance observée pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 19)=11,004$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 19)=6,5075$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 19)=6,8967$; $p<0.05$)).

Pour finir, les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont été comparées aux erreurs et aux variances prédites par la moyenne algébrique non-pondérée (MNP) des erreurs et des variances obtenues lorsqu'un seul CDR était manipulé (soit le cadre visuel incliné, soit la mise en charge du sujet). Les résultats suggèrent que cette règle explique aussi bien le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par ce modèle et l'erreur moyenne observée) que la variance observée (pas de différence significative entre la variance prédite par ce modèle et la variance observée).

L'ensemble des résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) sont présentés dans la figure 37.

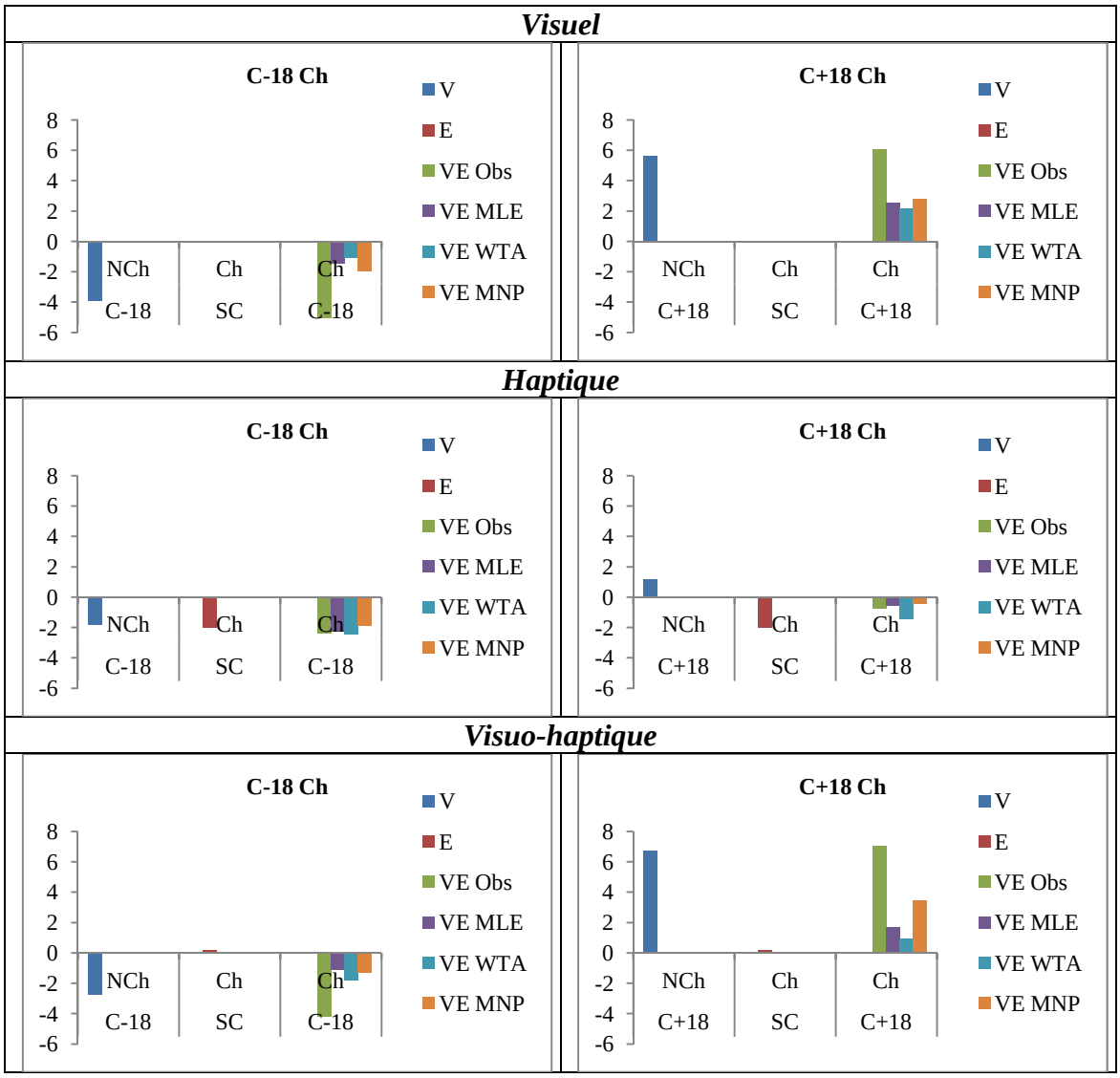


Figure 37*. Erreurs moyennes en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=erreur moyenne lorsque seul le CDR visuel est manipulé (C±18° et NCh), E=erreur moyenne lorsque seul le CDR égocentrique est manipulé (SC et Ch), VE obs=erreur moyenne observée lorsque les CDR visuel et égocentrique sont manipulé (C±18° et Ch), VE MLE=erreur moyenne calculée avec la règle MLE, VE WTA=erreur moyenne calculée avec le modèle WTA, VE MNP=erreur moyenne calculée avec la règle MNP. C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique de forme circulaire, C+18= cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non mis en charge.*

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux CDR en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité

Comme précédemment, nous avons effectué les mêmes analyses en utilisant non plus la variance des résultats pour calculer la fiabilité d'un CDR mais la zone de certitude perçue. Nous avons appliqué les équations (10), (11) et (12) (cf. Analyses

statistiques, p 165-166) pour obtenir l'erreur moyenne et la zone de certitude pour chaque condition où les deux CDR étaient manipulés pour chaque modalité de réponse (cf. Figure 38). Les erreurs prédites par l'utilisation d'une règle MLE ont été comparées aux erreurs observées.

Les résultats ont montré que la règle MLE semble expliquer le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par la règle MLE et l'erreur moyenne observée quelque soit la modalité de réponse). Cependant, ce résultat n'est pas observé pour la zone de certitude (différence significative entre la zone de certitude prédite par la règle MLE et la zone de certitude observée pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 19)=42,868$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 19)=96,593$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 19)=48,138$; $p<0.05$)).

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux CDR en utilisant la zone de certitude comme indice de fiabilité

Les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont également été comparées aux erreurs prédites par le modèle Winner-Take-All. Les résultats sont similaires à ceux obtenus avec l'utilisation d'une règle MLE c.-à-d. qu'il n'y a pas de différence significative entre les erreurs moyennes prédites par le modèle WTA et les erreurs moyennes observées mais par contre il existe bien une différence significative entre la zone de certitude prédite et la zone de certitude observée pour la modalité de réponse visuelle ($F(1, 19)=16,679$; $p<0.05$), haptique ($F(1, 19)=11,84$; $p<0.05$) et visuo-haptique ($F(1, 19)=26,622$; $p<0.05$)).

Pour finir, les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont été comparées aux erreurs et aux zones de certitudes prédites par la

moyenne algébrique non-pondérée (MNP) des erreurs et des zones de certitude obtenues lorsqu'un seul CDR était manipulé (soit le cadre visuel incliné, soit la mise en charge du sujet). Les résultats suggèrent que cette règle explique le biais moyen observé (pas de différence significative entre l'erreur moyenne prédite par ce modèle et l'erreur moyenne observée). Concernant la zone de certitude, les résultats suggèrent que cette règle explique la zone de certitude observée pour les modalités de réponse visuelle et haptique (pas de différence significative entre la zone de certitude prédite par ce modèle et la zone de certitude observée) mais pas pour la modalité visuo-haptique (différence significative entre la zone de certitude prédite et la zone de certitude observée ($F(1, 19)=6,427$; $p<0.05$)).

L'ensemble des résultats observés et prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) sont présentés dans la figure 38.

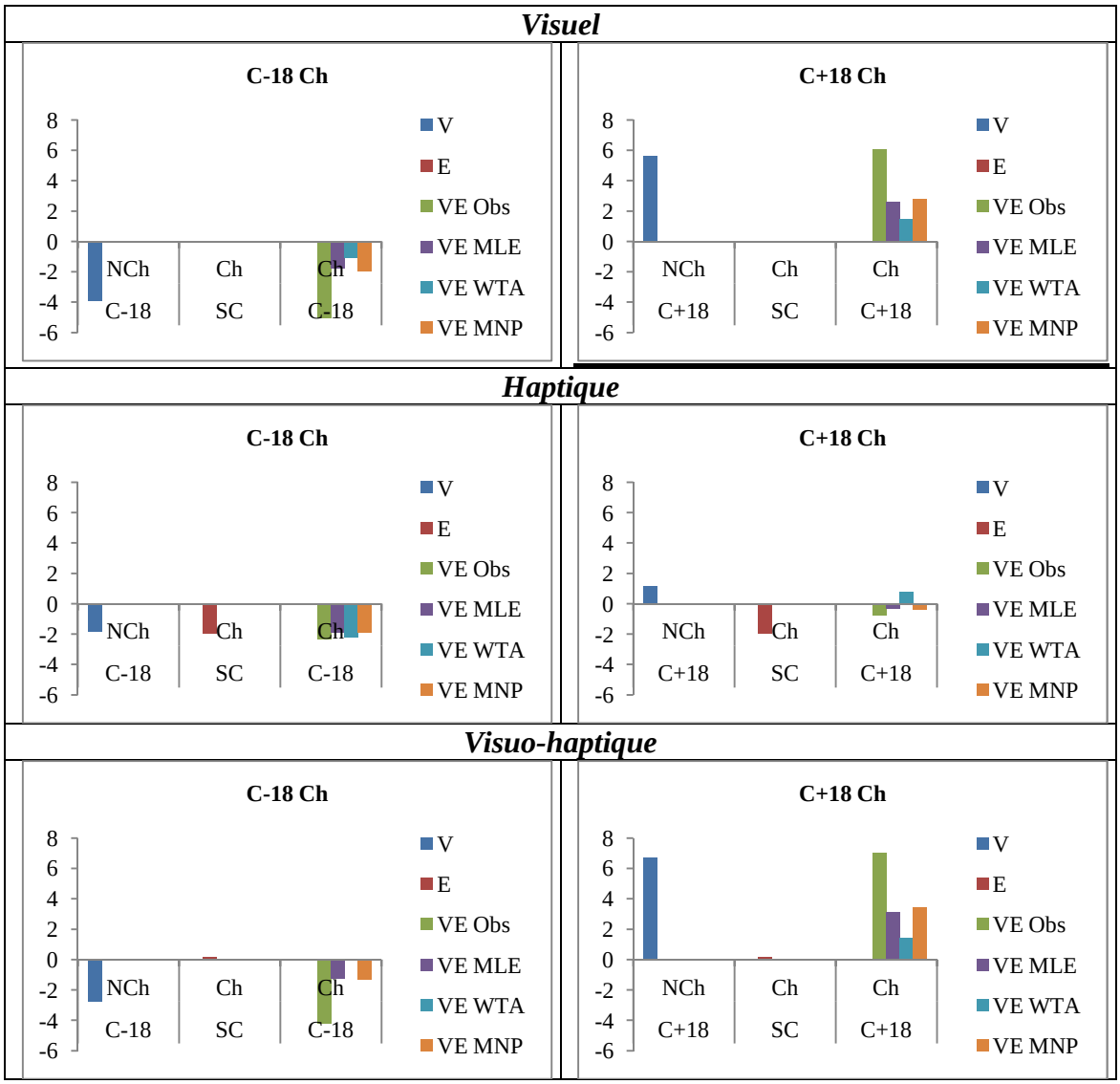


Figure 38. *Erreurs moyennes en fonction des conditions et des modalités de réponse. V=erreur moyenne lorsque seul le CDR visuel est manipulé (C±18° et NCh), E=erreur moyenne lorsque seul le CDR égocentrique est manipulé (SC et Ch), VE obs=erreur moyenne observée lorsque les CDR visuel et égocentrique sont manipulé (C±18° et Ch), VE MLE=erreur moyenne calculée avec la règle MLE, VE WTA=erreur moyenne calculée avec le modèle WTA, VE MNP=erreur moyenne calculée avec la règle MNP. C-18=cadre incliné à 18° à droite, SC=tunnel optique cylindrique de forme circulaire, C+18= cadre incliné à 18° à gauche, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non mis en charge.*

En résumé, les résultats montrent que la perception de l'OC dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés semble partiellement découler de l'utilisation d'une règle MLE. En effet, quelque soit l'indice de fiabilité utilisé (variance interessai ou zone de certitude) aucune différence significative n'est apparue entre l'erreur d'OSC observée

et celle prédite par la règle MLE. Cependant, ce résultat n'est observé ni pour la variance interessai, ni pour la zone de certitude.

Le même constat peut être fait à propos de l'utilisation d'une règle WTA.

Enfin, les résultats montrent que l'utilisation d'une règle MNP semble la plus appropriée. En effet, aucune différence significative n'est apparue entre l'erreur d'OSC observée et celle prédite par la règle MNP ainsi qu'entre la variance observée et celle prédite par la règle MNP. Cependant, ce résultat n'est pas observé pour la zone de certitude (différence significative entre la zone de certitude perçue et celle prédite par la règle MNP).

ii. Comparaison entre les sujets DC et IC

Un des objectifs principal de cette étude étant d'explorer les différences interindividuelles, nous nous effectuerons, dans cette partie, des analyses de variances et de corrélations en distinguant les sujets indépendants (IC) des sujets dépendants (DC).

Perception de l'OC

Une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet principal sur la perception de l'OC de la modalité de réponse ($F(2, 8)=5,8609$, $p<0,05$), de l'inclinaison du cadre ($F(2, 8)=15,643$, $p<0,05$) et de la mise en charge du sujet ($F(1, 4)=14,146$, $p<0,05$) mais pas du profil perceptif du sujet (i.e., DC vs IC). Cette même analyse a révélé un effet d'interaction entre la mise en charge du sujet et le profil perceptif du sujet ($F(1, 4)=88,027$, $p<0,05$; cf. Figure 39) et entre la modalité de réponse, la mise en charge du sujet et le profil perceptif ($F(2, 8)=6,5417$, $p<0,05$; cf. Figure 40).

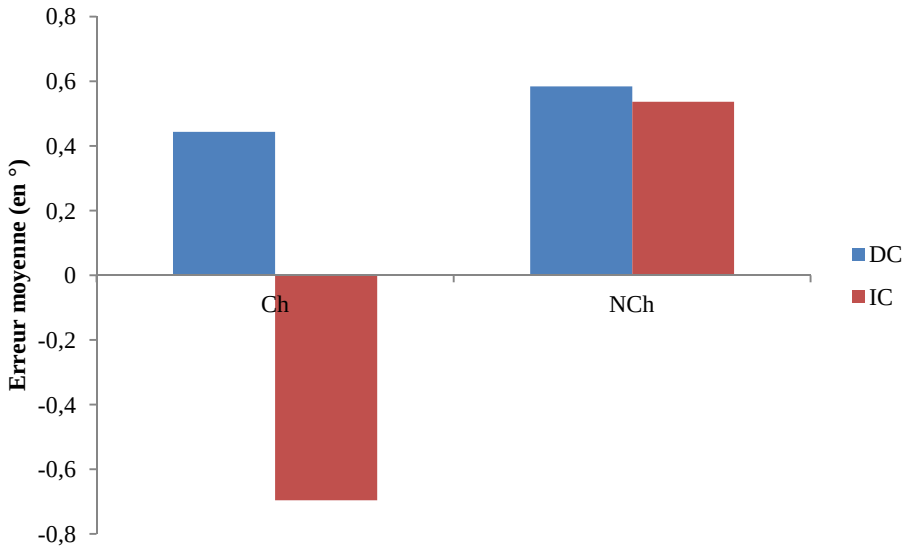


Figure 39. *Erreur moyenne de perception de l'OC en fonction de la mise en charge ou non du sujet et du profil perceptif (DC vs IC). Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

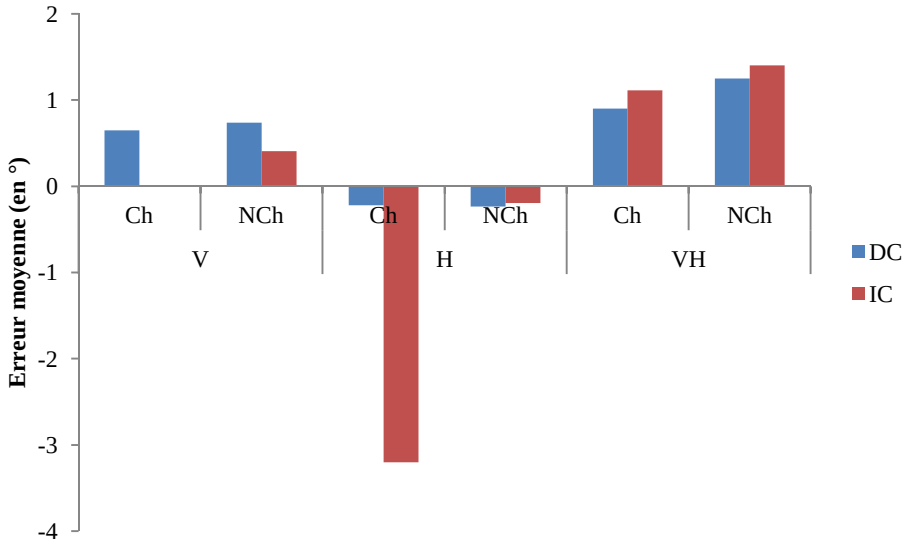


Figure 40. *Erreur moyenne de perception de l'OC en fonction de la modalité de réponse, de la mise en charge ou non du sujet et du profil perceptif (DC vs IC). V=modalité de réponse visuelle, H=modalité de réponse haptique VH=modalité de réponse visuo-haptique, Ch=sujet mis en charge, NCh=sujet non chargé.*

Les résultats montrent que la mise en charge dégrade la perception de l'OC chez les sujets IC dans la modalité de réponse haptique. La mise en charge semble néanmoins améliorer la perception de l'OC chez les sujets IC dans la modalité visuelle et l'ensemble des sujets dans la modalité visuo-haptique.

Amplitude de la zone de certitude

Une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet principal sur la zone de certitude perçue de la modalité de réponse ($F(2, 8)=15,045$, $p<0,05$) et de l'inclinaison du cadre ($F(2, 8)=28,705$, $p<0,05$) mais pas de la mise en charge du sujet ni du profil perceptif du sujet (i.e., DC vs IC).

Taille de la variance interessai

Une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet principal sur la taille de la variance interessai de la modalité de réponse ($F(2, 8)=9,7895$, $p<0,05$) mais pas de l'inclinaison du cadre, de la mise en charge du sujet ni du profil perceptif du sujet (i.e., DC vs IC).

Nous allons nous intéresser aux relations entre l'utilisation des différentes règles d'intégration multisensorielle (MLE, WTA, MNP) et le profil perceptif des individus. Un résumé de l'ensemble des résultats est présenté dans les tableaux 14, 15, 16 et 17 situés à la fin de ce chapitre (p 214).

Règle optimale d'intégration sensorielle (MLE) appliquée aux signaux en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) (cf. Etude 4, Analyses statistiques, p 102) pour obtenir l'erreur moyenne et la variance VH prédites pour les 6 conditions. L'erreur VH prédite par l'utilisation d'une règle MLE a alors été comparée aux données VH observées.

Chez les sujets dépendant au champ (DC), une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMLE}=0,8749 x y_{VHobs} – 0,73 ; R^2=0,86 ; p<0,05) (cf. Figure 41). Ce résultat n'est pas observé pour la variance (p=ns).

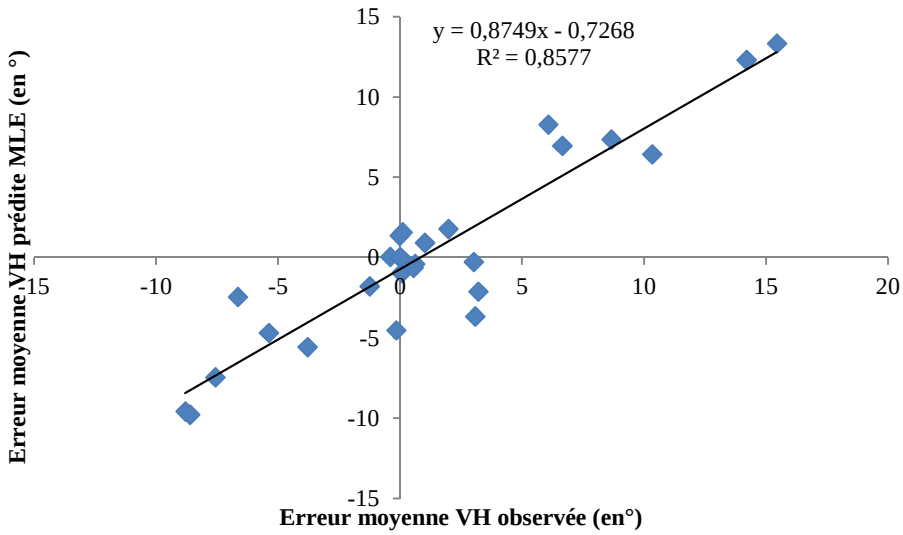


Figure 41. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les DC.*

Chez les sujets indépendant au champ (IC), une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMLE}=0,5437 x y_{VHobs} – 0,81 ; R^2=0,70 ; p<0,05) (cf. Figure 42) ainsi que la variance des résultats (y_{VHMLE}=0,0996 x y_{VHobs} + 0,57 ; R^2=0,27 ; p<0,05) (cf. Figure 43).

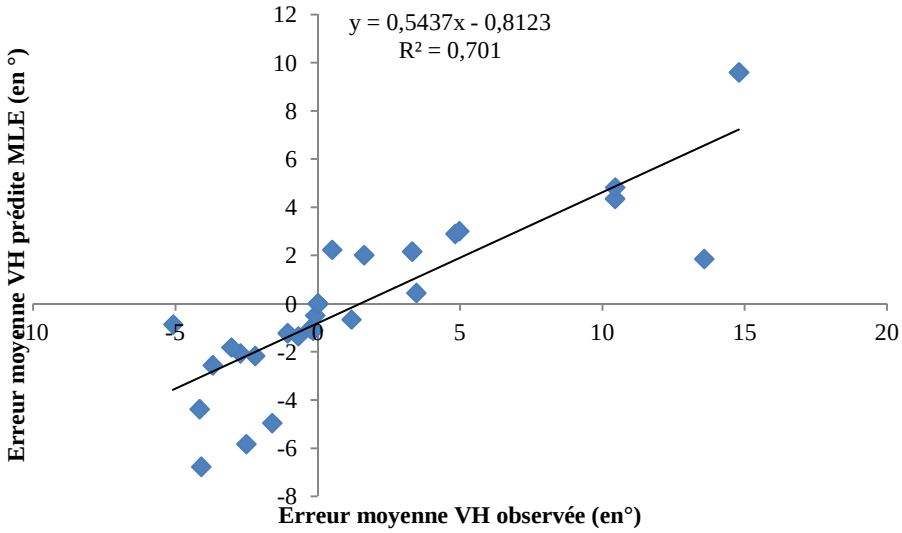


Figure 42. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les IC.*

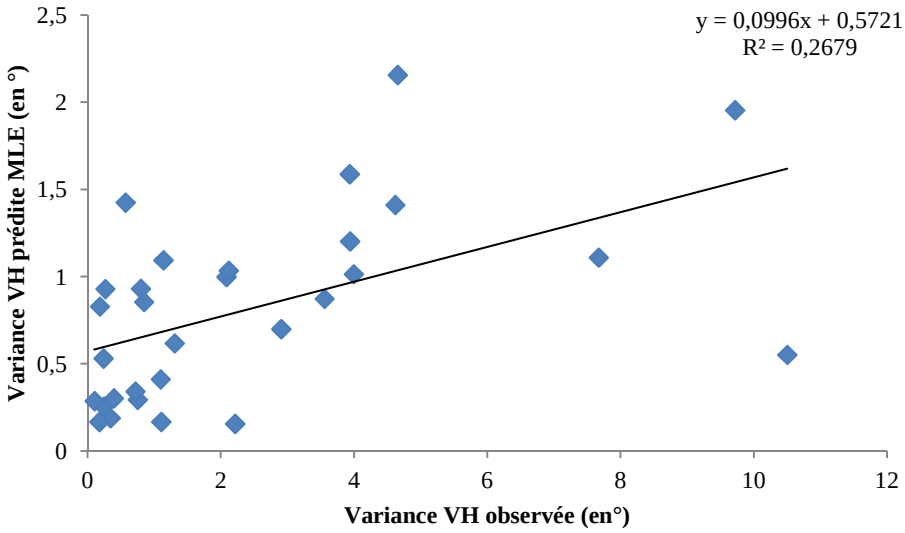


Figure 43. *Corrélation entre la variance des résultats observée dans la modalité de réponse VH et la variance prédite par la règle MLE chez les IC.*

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux signaux en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Les données VH observées ont aussi été comparées à l'erreur VH prédite par le modèle WTA.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHWTA}=0,9746 x y_{VHobs}

– 0,36 ; R^2=0,83 ; p<0,05) (cf. Figure 44). Ce résultat n'est pas observé pour la variance (p=ns).

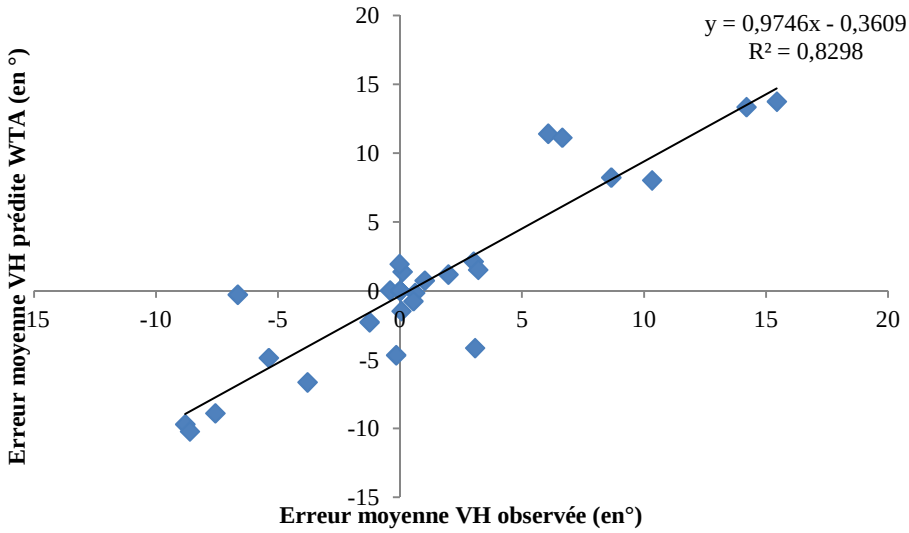


***Figure 44**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHWTA}=0,6458 x y_{VHobs} – 0,47 ; R^2=0,75 ; p<0,05) (cf. Figure 45) ainsi que la variance des résultats (y_{VHWTA}=0,1899 x y_{VHobs} + 0,74 ; R^2=0,34 ; p<0,05) (cf. Figure 46).

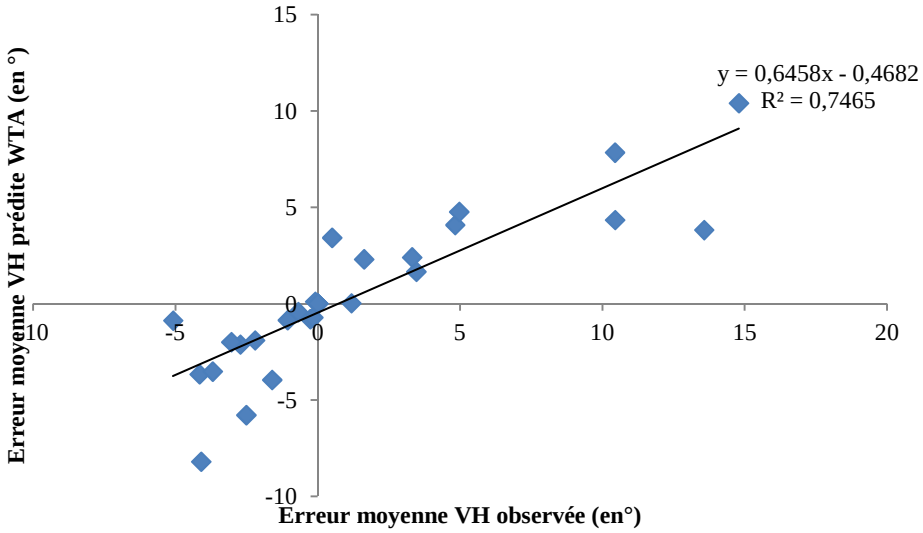


***Figure 45**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les IC.*

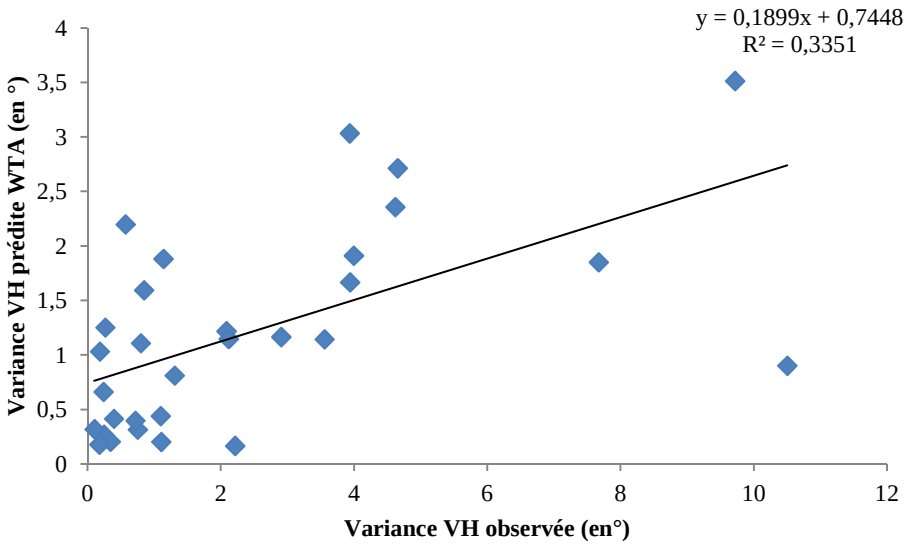


***Figure 46**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans la modalité de réponse VH et la variance prédite par la règle WTA chez les IC.*

Finalement, les données VH observées ont été comparées à l'erreur VH prédite par la moyenne non-pondérée algébrique (MNP) des erreurs et de la variance obtenue dans les modalités visuelle et haptique seule.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMNP}=0,6253 x y_{VHobs}

– 0,44 ; R^2=0,82 ; p<0,05) (cf. Figure 47) ainsi que la variance des résultats (y_{VHMNP}=0,2658 x y_{VHobs} + 2,11 ; R^2=0,20 ; p<0,05) (cf. Figure 48).

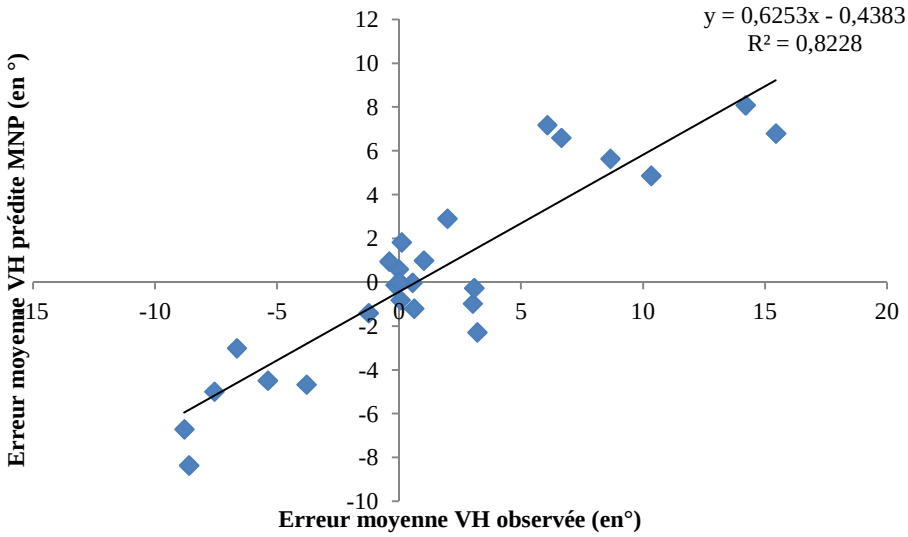


***Figure 47**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les DC.*

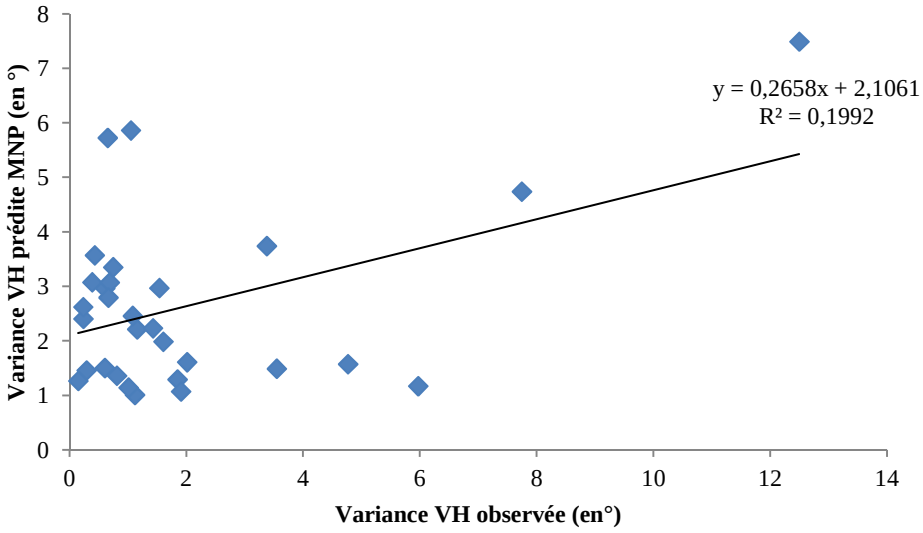


***Figure 48**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans la modalité de réponse VH et la variance prédite par la règle MNP chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMNP}=0,4039 x y_{VHobs}

– 1,25 ; R^2=0,57 ; p<0,05) (cf. Figure 49). Ce résultat n'est pas observé pour la variance (p=ns).

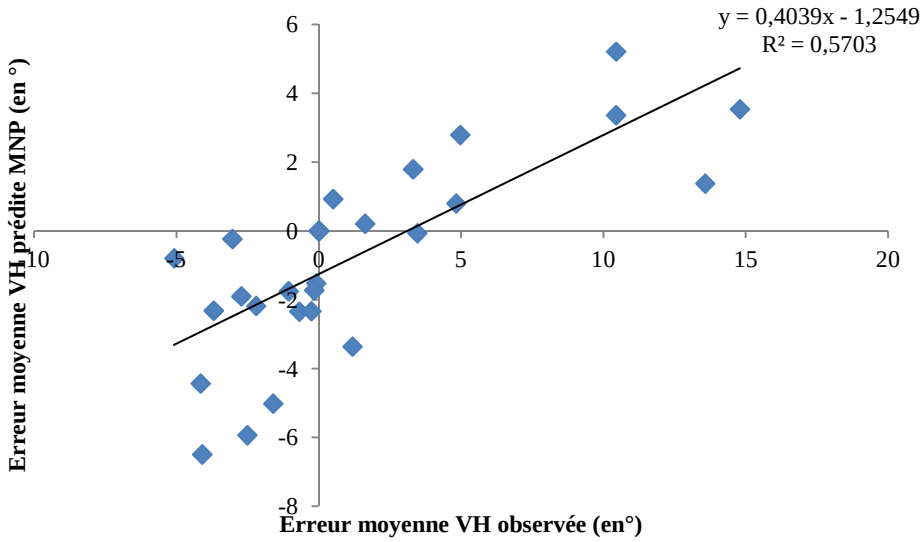


***Figure 49**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les IC.*

Règle optimale d'intégration sensorielle (MLE) appliquée aux signaux en utilisant la zone de certitude (zc) comme indice de fiabilité

Nous avons appliqué les équations (10), (11) et (12) (cf. Analyses statistiques, p 165-166) pour obtenir l'erreur moyenne et la variance VH prédites pour les 6 conditions. L'erreur VH prédite par l'utilisation d'une règle MLE a alors été comparée aux données VH observées.

Chez les sujets dépendants au champ (DC), une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMLE}=0,7951 x y_{VHobs} – 0,47 ; R^2=0,92 ; p<0,05) (cf. Figure 50), ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHMLE}=0,5746 x y_{VHobs} – 0,35 ; R^2=0,77 ; p<0,05) (cf. Figure 51).

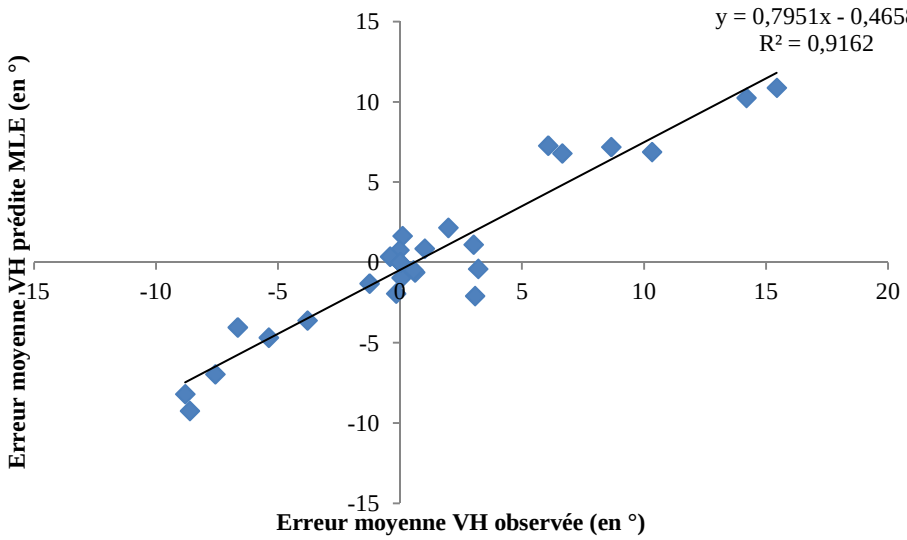


***Figure 50**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les DC.*

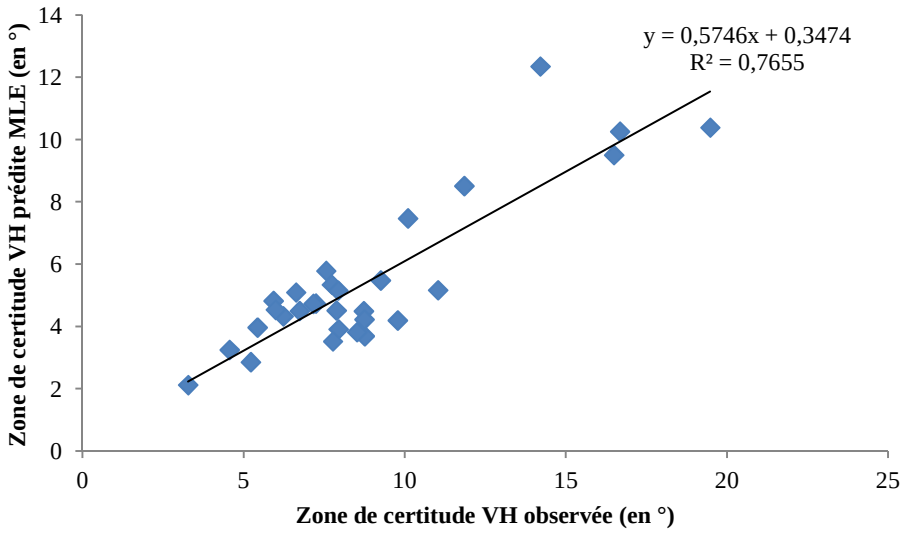


***Figure 51**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle MLE chez les DC.*

Chez les sujets indépendants au champ (IC), une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMLE}=0,457 x y_{VHobs} – 1,11 ; R^2=0,66 ; p<0,05) (cf. Figure 52), ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHMLE}=0,383 x y_{VHobs} – 2,23 ; R^2=0,67 ; p<0,05) (cf. Figure 53).

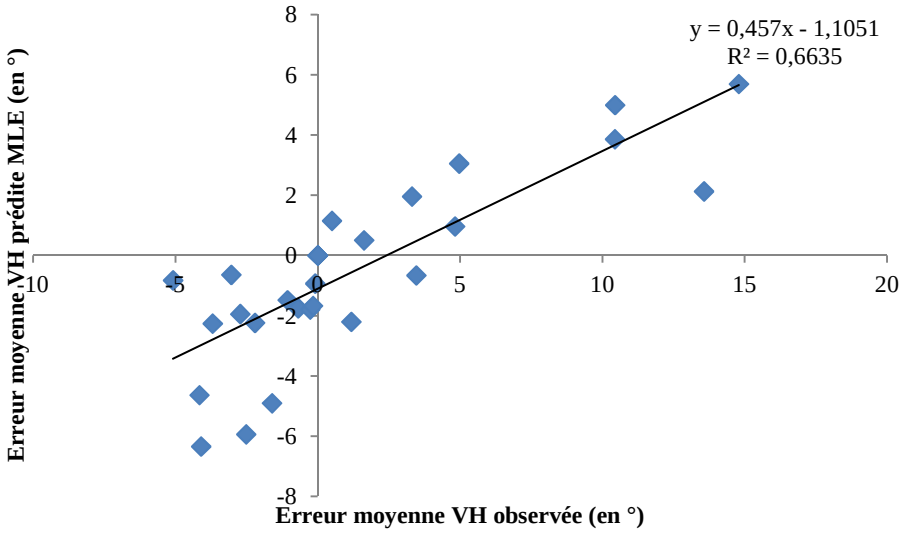


***Figure 52**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les IC.*

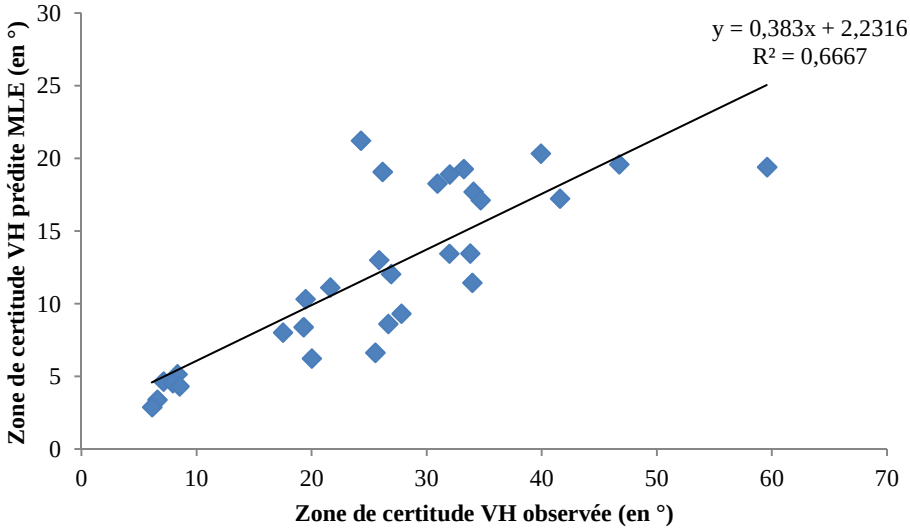


***Figure 53**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle MLE chez les IC.*

Autres règles d'intégration sensorielle (WTA, MNP) appliquée aux signaux en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité

Les données VH observées ont aussi été comparées à l'erreur VH prédite par le modèle WTA.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHWTA}=0,9934 x y_{VHobs}

– 0,37 ; R^2=0,87 ; p<0,05) (cf. Figure 54) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHWTA}=1,2391 x y_{VHobs} – 2,85 ; R^2=0,79 ; p<0,05) (cf. Figure 55).

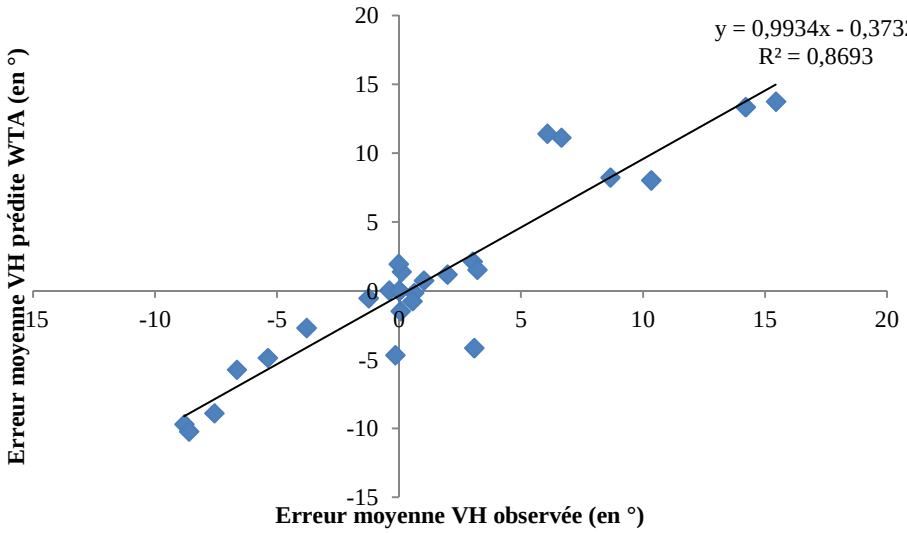


***Figure 54**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les DC.*

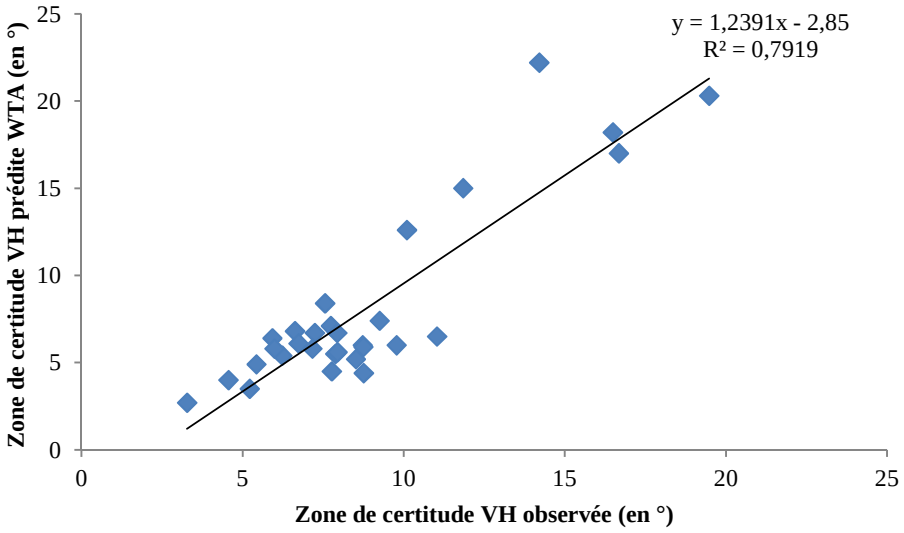


***Figure 55**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle WTA chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHWTA}=0,6108 x y_{VHobs}

– 0,43 ; R^2=0,73 ; p<0,05) (cf. Figure 56) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHWTA}=0,6177 x y_{VHobs} – 4,38 ; R^2=0,56 ; p<0,05) (cf. Figure 57).

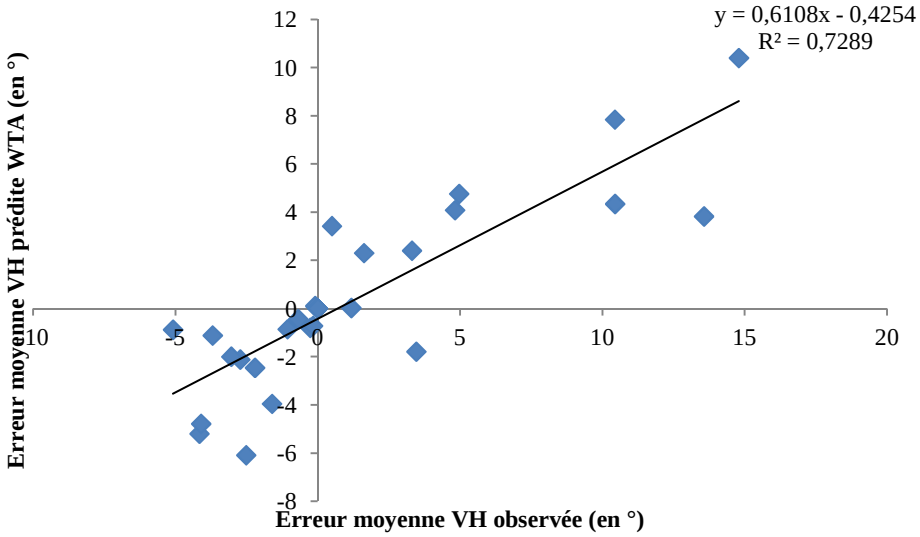


***Figure 56**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les IC.*

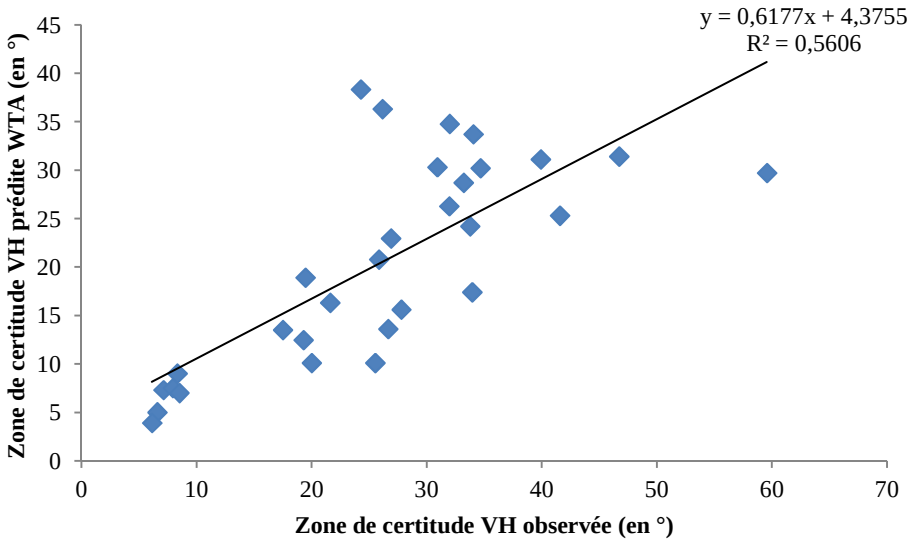


***Figure 57**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle WTA chez les IC.*

Finalement, les données VH observées ont été comparées à l'erreur et à la zone de certitude VH prédite par la moyenne non-pondérée algébrique (MNP) des erreurs et de la zone de certitude obtenue dans les modalités visuelle et haptique seule.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMNP}=0,6253 x y_{VHobs} – 0,44 ; R^2=0,82 ; p<0,05) (cf. Figure 58) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHMNP}=0,858 x y_{VHobs} + 6,18 ; R^2=0,63 ; p<0,05) (cf. Figure 59).

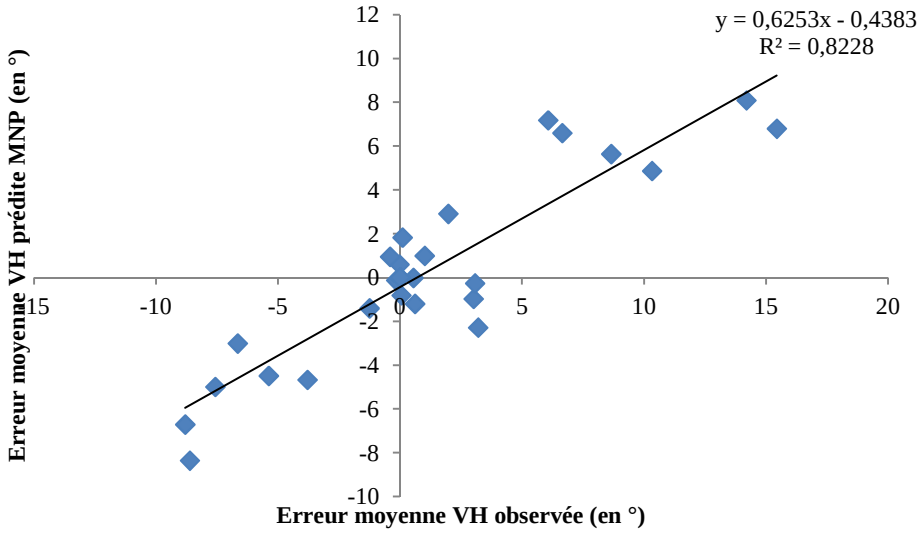


***Figure 58**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les DC.*

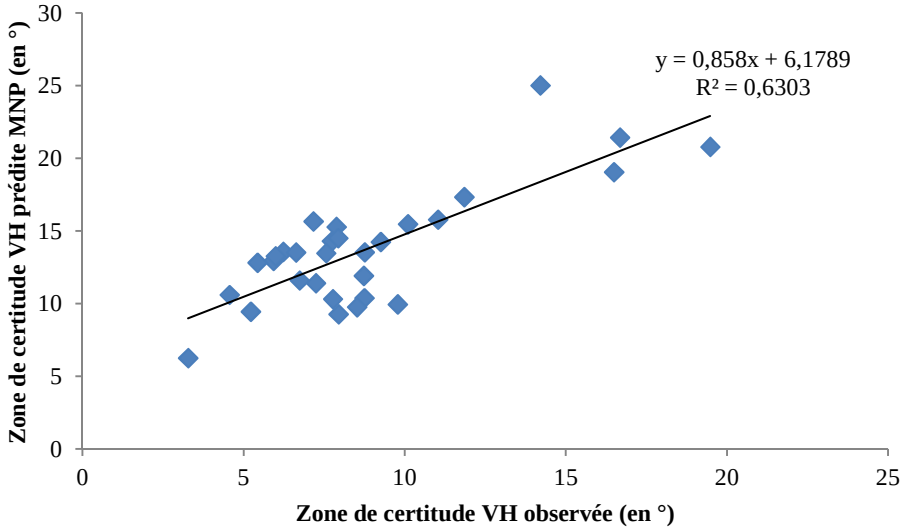


***Figure 59**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle MNP chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans la condition VH (y_{VHMNP}=0,4039 x y_{VHobs} – 1,25 ; R^2=0,57 ; p<0,05) (cf. Figure 60) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{VHMNP}=0,1063 x y_{VHobs} + 2,21 ; R^2=0,05 ; p<0,05) (cf. Figure 61).

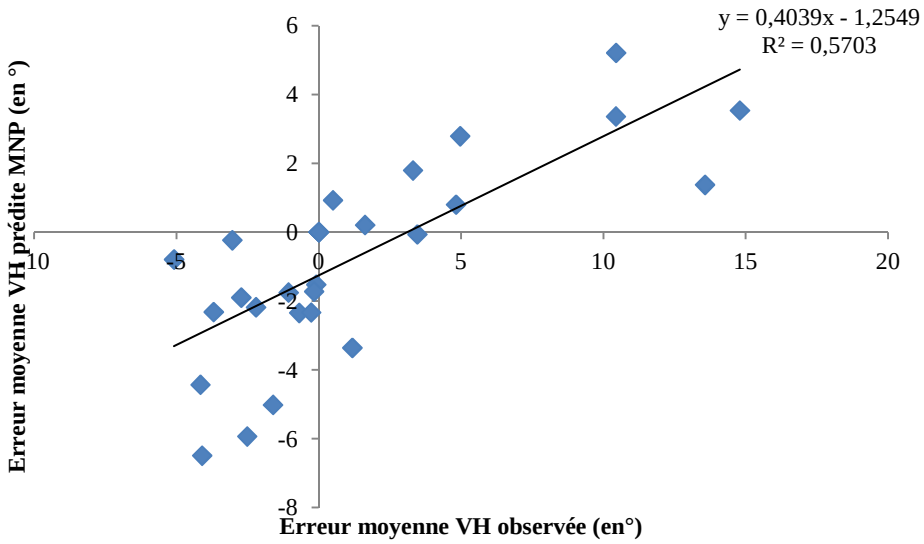


***Figure 60**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans la modalité de réponse VH et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les IC.*

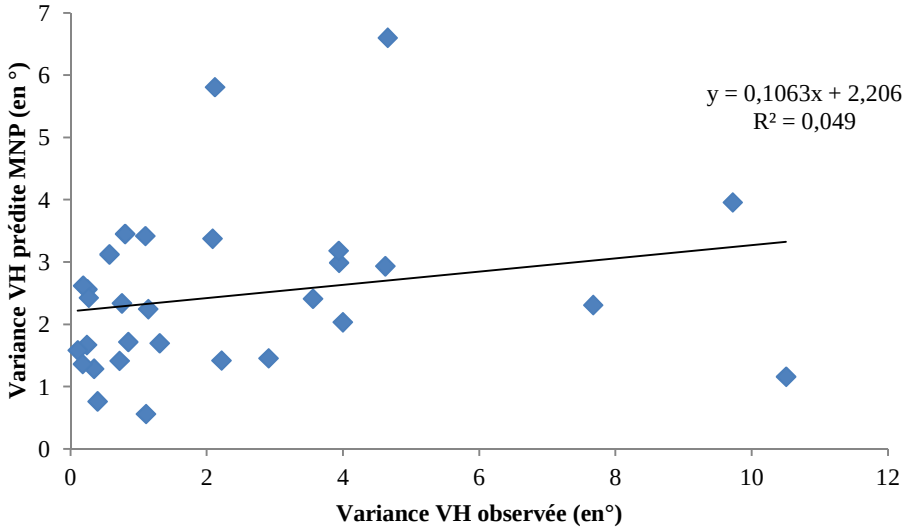


***Figure 61**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse VH et la zone de certitude prédite par la règle MNP chez les IC.*

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux CDR en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Nous avons décidé de calculer la règle MLE, non plus à partir des modalités de réponse mais à partir des CDR, c.-à-d. que nous avons prédit les réponses dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés (cadre visuel incliné et mise en charge du sujet) à partir des données observées lorsqu'un seul CDR était manipulé (cadre visuel incliné sans mise en charge du sujet ou mise en charge du sujet sans cadre visuel). Nous avons appliqué les équations (7), (8) et (9) (cf. Etude 4, Analyses statistiques, p 102) afin d'obtenir l'erreur moyenne et la variance pour chaque condition où les deux CDR étaient manipulés pour chaque modalité de réponse. Les erreurs prédites par l'utilisation d'une règle MLE ont été comparées aux erreurs observées.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique principalement les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MLE}=0,4909 x y_{obs} + 0,21 ; R^2=0,75 ; p<0,05) (cf. Figure 62) ainsi que la variance des résultats (y_{MLE}=0,1851 x y_{obs} + 0,49 ; R^2=0,35 ; p<0,05) (cf. Figure 63).

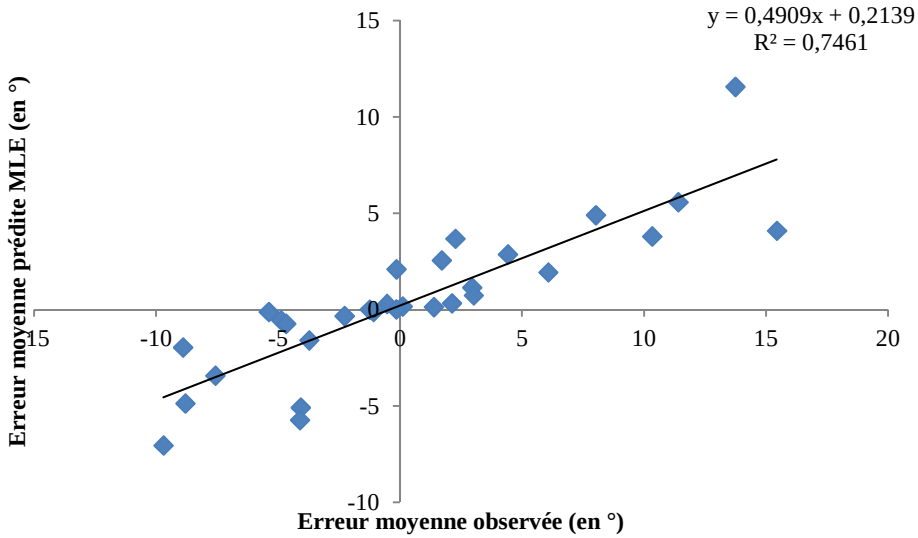


Figure 62*. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les DC.*

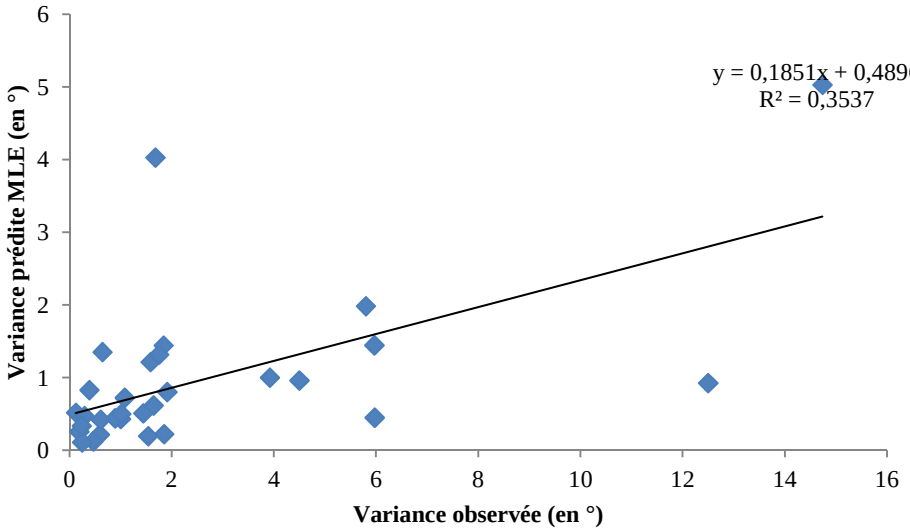


***Figure 63**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle MLE chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MLE}=0,1768 x y_{obs} - 0,80 ; R^2=0,28 ; p<0,05) (cf. Figure 64) ainsi que la variance des résultats (y_{MLE}=0,1869 x y_{obs} + 0,30 ; R^2=0,39 ; p<0,05) (cf. Figure 65).

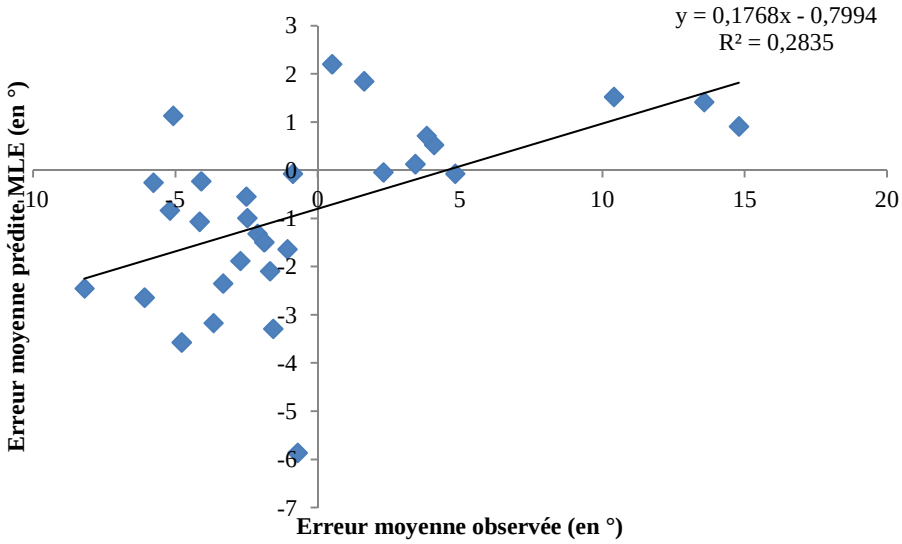


***Figure 64**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les IC.*

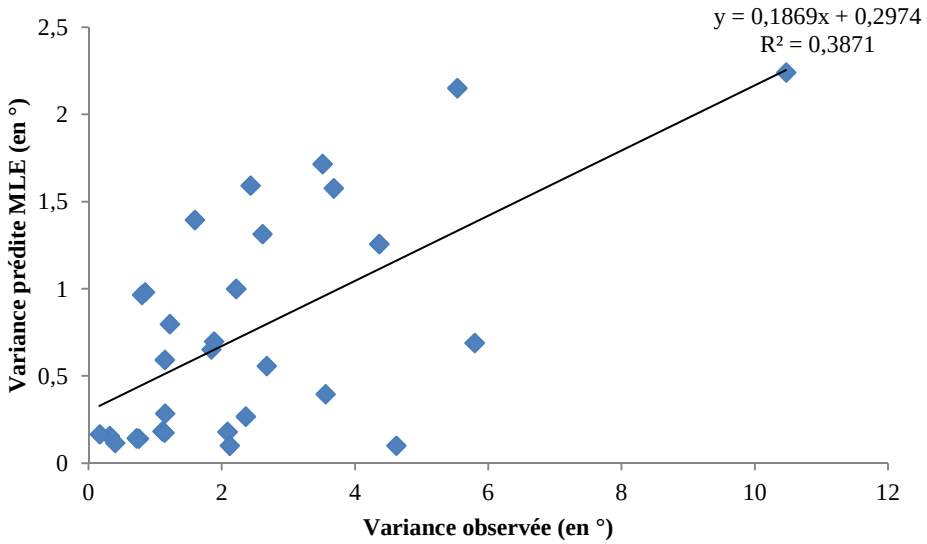


***Figure 65**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle MLE chez les IC.*

Autres règles de combinaison (WTA, MNP) appliquées aux CDR en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont également été comparées aux erreurs prédites par le modèle WTA.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{WTA}=0,4855 x y_{obs} - 0,08 ; R^2=0,48 ; $p<0,05$) (cf. Figure 66) ainsi que la variance des résultats (y_{WTA}=0,323 x y_{obs} + 0,63 ; R^2=0,37 ; $p<0,05$) (cf. Figure 67).

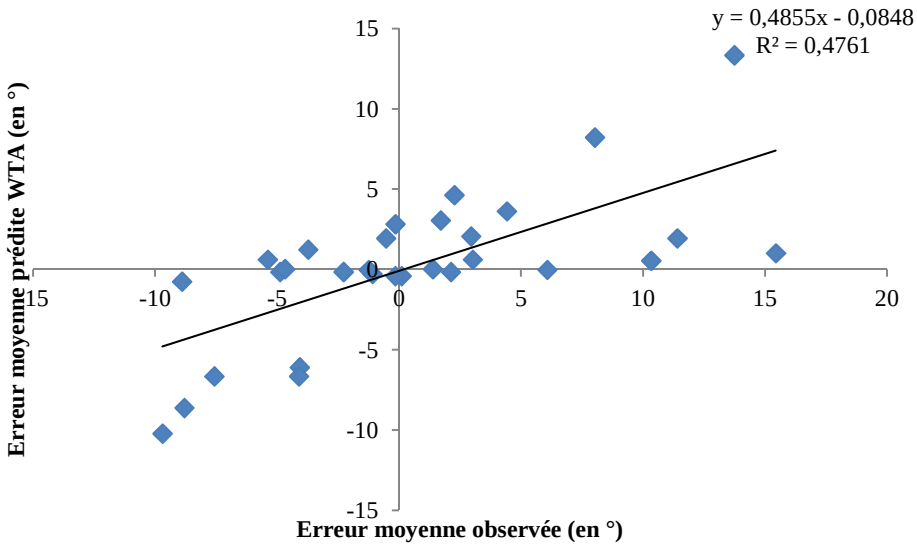


***Figure 66**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les DC.*

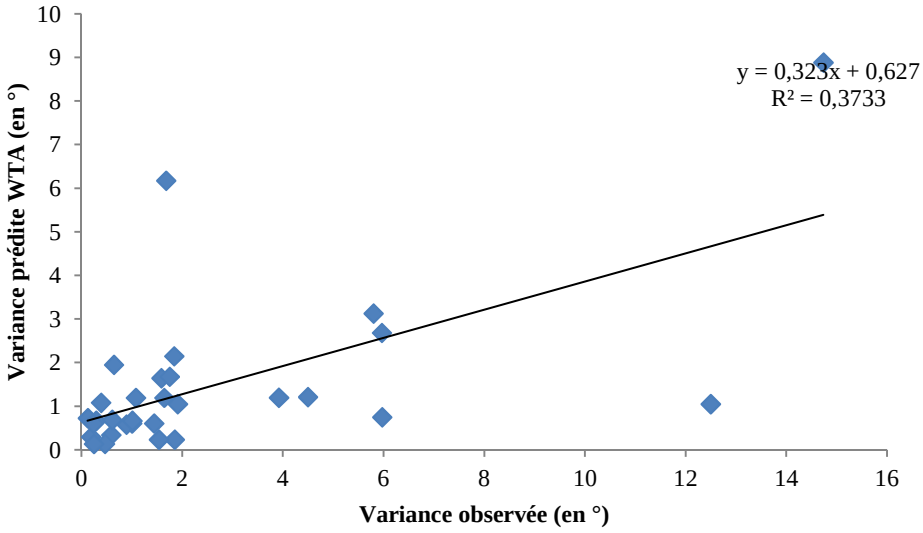


***Figure 67**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle WTA chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique la variance des résultats dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{WTA}=0,2895 x y_{obs} + 0,42 ; R^2=0,33 ; p<0,05) (cf. Figure 68). Ce résultat n'est pas observé pour les estimations de l'OSC (p=ns).

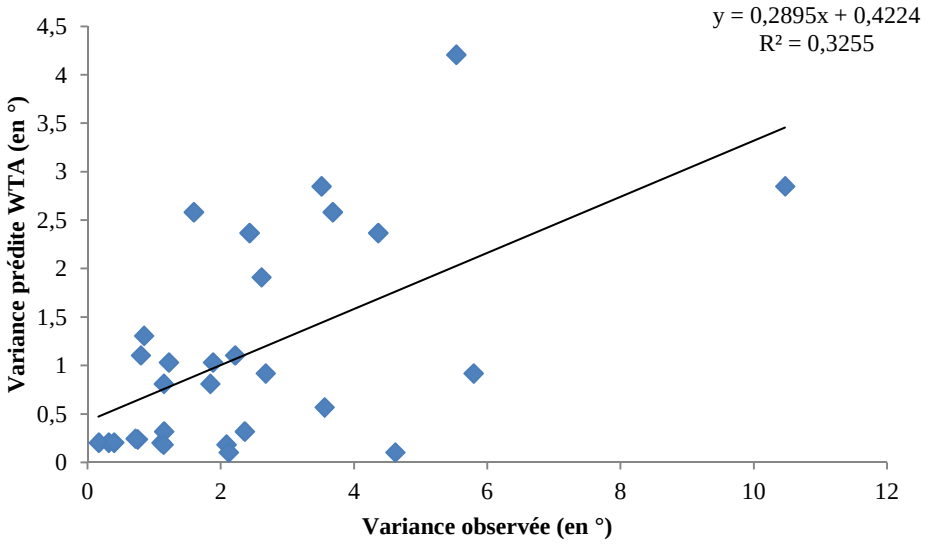


***Figure 68**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle WTA chez les IC.*

Finalement, les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont été comparées aux erreurs et aux variances prédites par la moyenne algébrique non-pondérée (MNP) des erreurs et des variances obtenues lorsqu'un seul CDR était manipulé (soit le cadre visuel incliné, soit la mise en charge du sujet).

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MNP}=0,4905 x y_{obs} + 0,33 ; R^2=0,91 ; $p<0,05$) (cf. Figure 69) ainsi que la variance des résultats (y_{MNP}=0,4261 x y_{obs} + 1,39 ; R^2=0,43 ; $p<0,05$) (cf. Figure 70).

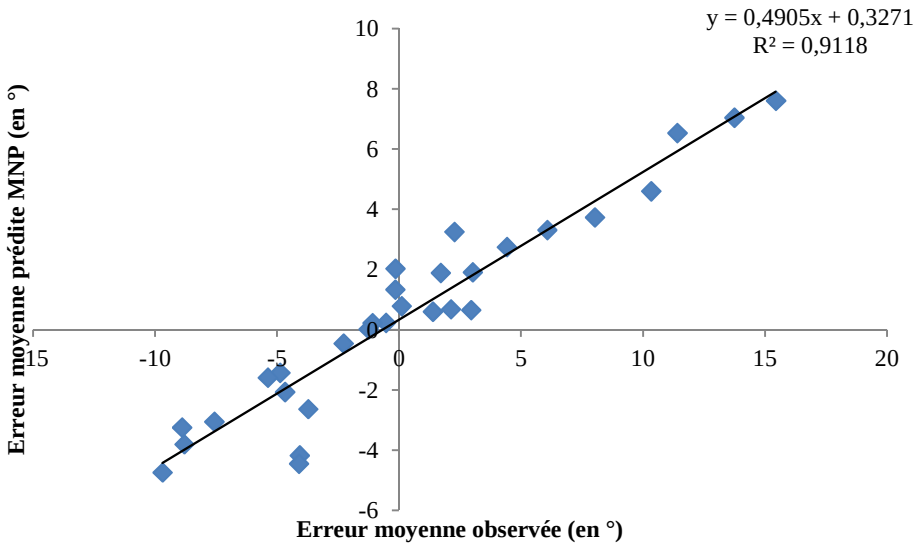


***Figure 69**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les DC.*

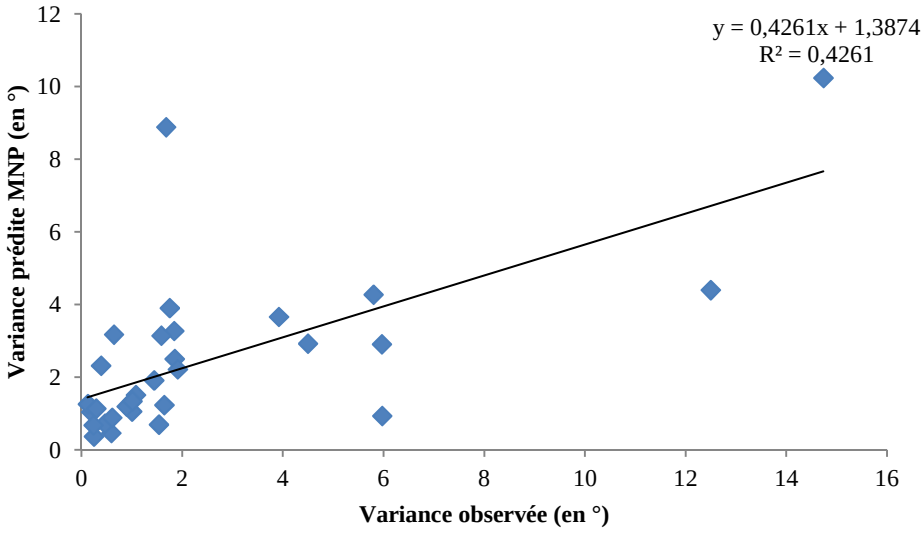


***Figure 70**. Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle MNP chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MNP}=0,4027 x y_{obs} - 0,23 ; R^2=0,78 ; p<0,05) (cf. Figure 71) ainsi que la variance des résultats (y_{MNP}=0,438 x y_{obs} + 1,29 ; R^2=0,32 ; p<0,05) (cf. Figure 72).

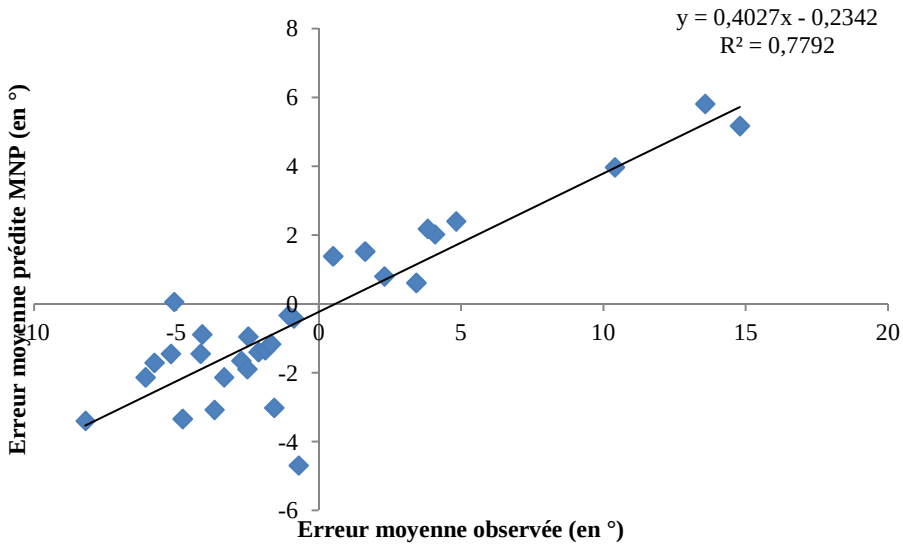


Figure 71. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les IC.*

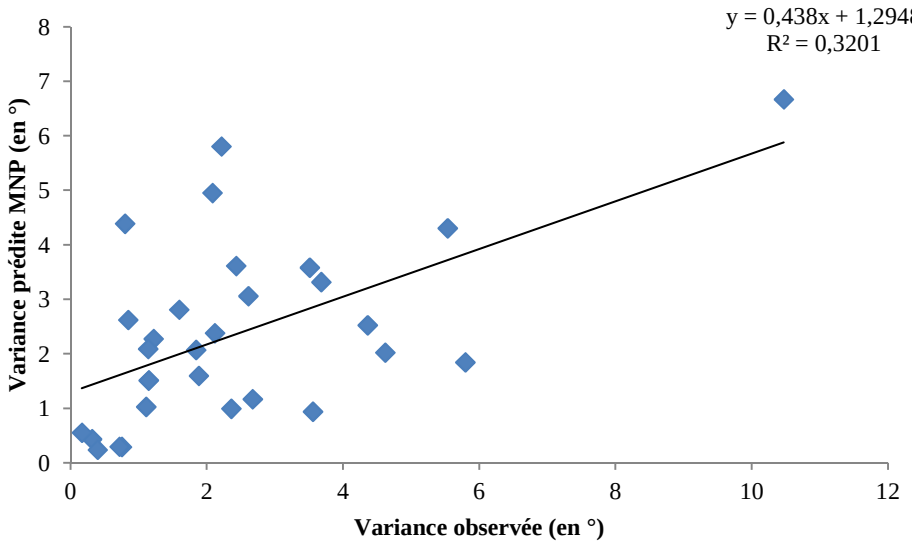


Figure 72. *Corrélation entre la variance des résultats observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la variance prédite par la règle MNP chez les IC.*

Règle optimale de combinaison (MLE) appliquée aux CDR en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité

Comme précédemment, nous avons effectué les mêmes analyses en utilisant non plus la variance des résultats pour calculer la fiabilité d'un CDR mais la zone de certitude perçue. Nous avons appliqué les équations (10), (11) et (12) (cf. Analyses

statistiques, p 165-166) pour obtenir l'erreur moyenne et la zone de certitude pour chaque condition où les deux CDR étaient manipulés pour chaque modalité de réponse. Les erreurs et les zones de certitudes prédites par l'utilisation d'une règle MLE ont été comparées aux données observées.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MLE}=0,4691 x y_{obs} + 0,32 ; R^2=0,91 ; p<0,05) (cf. Figure 73) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{MLE}=0,4024 x y_{obs} + 0,37 ; R^2=0,91 ; p<0,05) (cf. Figure 74).

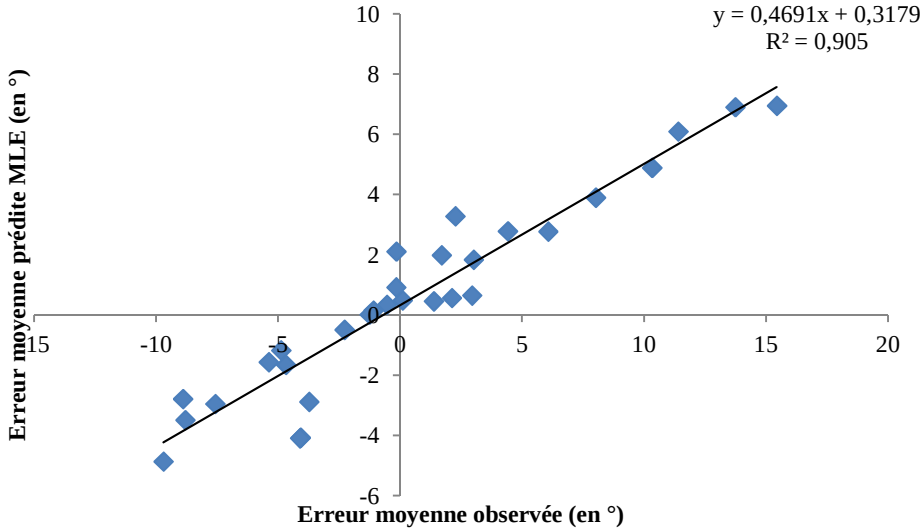


***Figure 73**. Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les DC.*

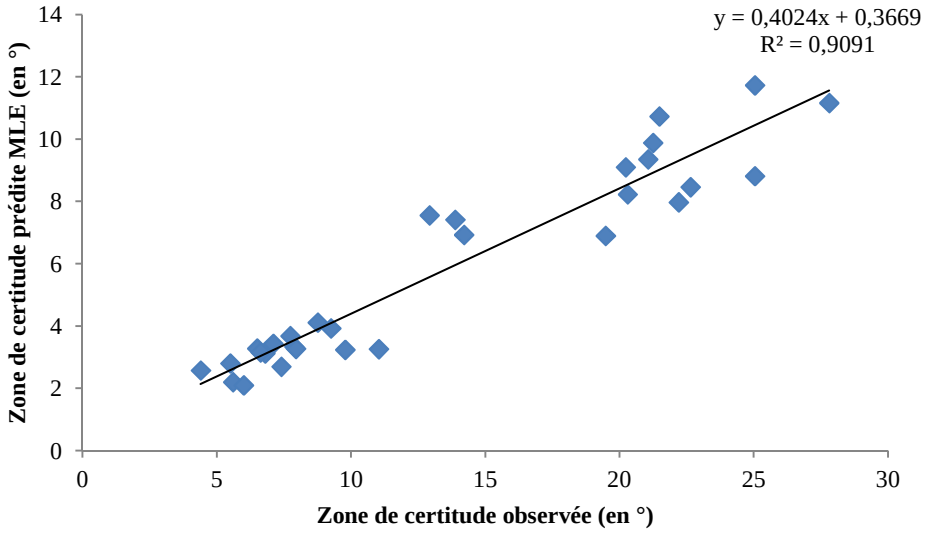


Figure 74. *Corrélation entre la zone de certitude observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle MLE chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MLE explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MLE}=0,347 x y_{obs} - 0,29 ; R^2=0,71 ; p<0,05) (cf. Figure 75) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{MLE}=0,5053 x y_{obs} - 0,88 ; R^2=0,93 ; p<0,05) (cf. Figure 76).

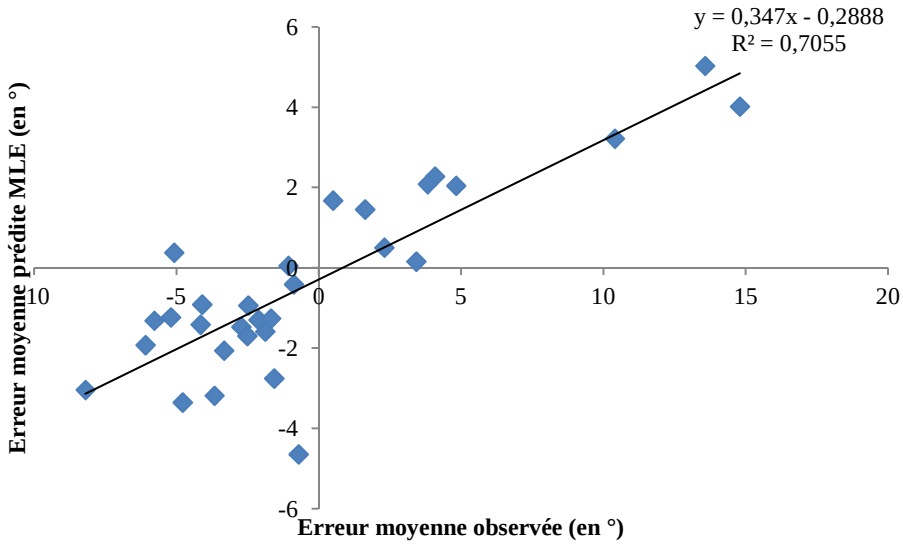


Figure 75. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MLE chez les IC.*

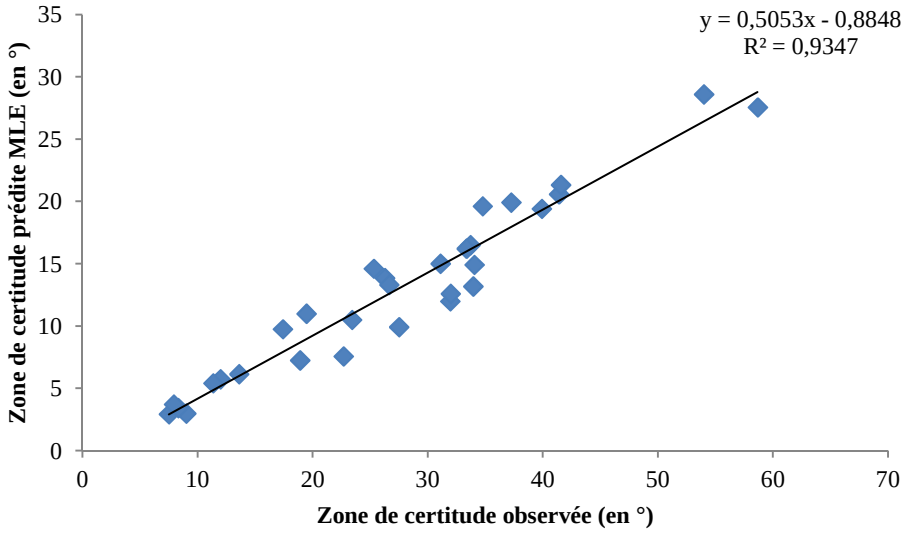


***Figure 76**. Corrélation entre la zone de certitude observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle MLE chez les IC.*

Autres règles de combinaison (WTA, MNP) appliquées aux CDR en utilisant la variance des résultats comme indice de fiabilité

Les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont également été comparées aux erreurs prédites par le modèle WTA.

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{WTA}=0,2886 x y_{obs} + 0,33 ; R^2=0,29 ; $p<0,05$) (cf. Figure 77) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{WTA}=0,7358 x y_{obs} + 0,67 ; R^2=0,88 ; $p<0,05$) (cf. Figure 78).

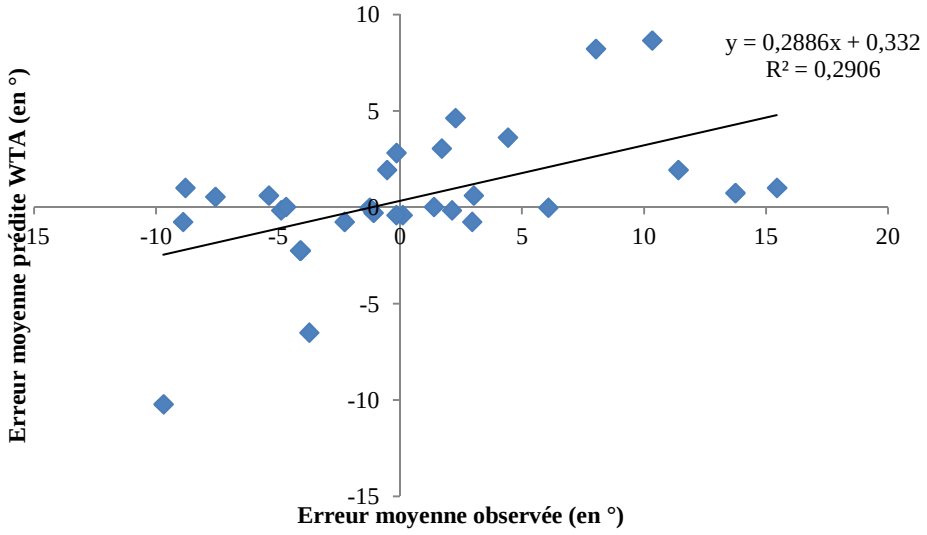


Figure 77. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle WTA chez les DC.*

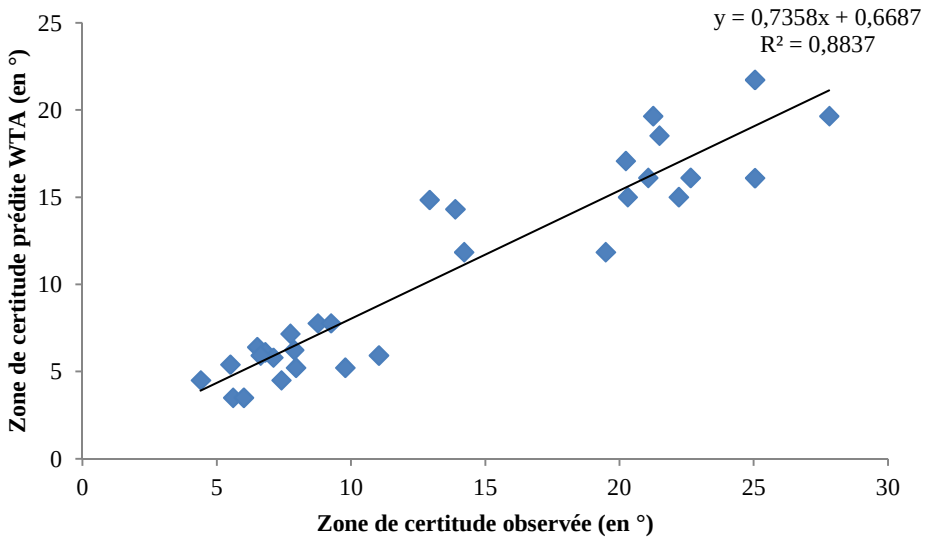


Figure 78. *Corrélation entre la zone de certitude perçue dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle WTA chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle WTA explique la zone de certitude perçue dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{WTA}=0,9489 x y_{obs} - 2,57 ; R^2=0,90 ; p<0,05) (cf. Figure 79). Ce résultat n'est pas observé pour les estimations de l'OSC (p=ns).

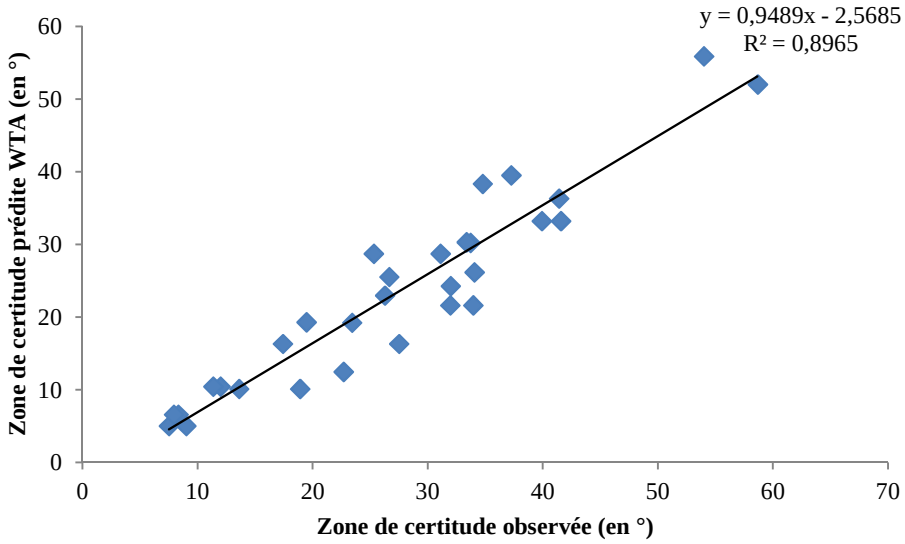


***Figure 79**. Corrélation entre la zone de certitude perçue dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle WTA chez les IC.*

Finalement, les données observées dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés ont été comparées aux erreurs et aux zones de certitude prédites par la moyenne algébrique non-pondérée (MNP) des erreurs et des zones de certitude obtenues lorsqu'un seul CDR était manipulé (soit le cadre visuel incliné, soit la mise en charge du sujet).

Chez les DC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique principalement les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MNP}=0,4905 x y_{obs} + 0,33 ; R^2=0,91 ; p<0,05) (cf. Figure 80) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{MNP}=0,8114 x y_{obs} + 0,81 ; R^2=0,91 ; p<0,05) (cf. Figure 81).

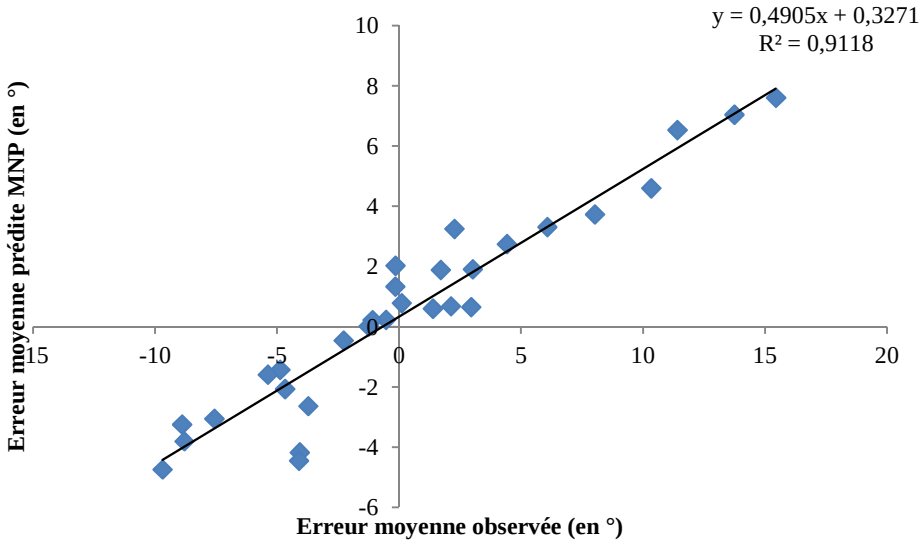


Figure 80. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les DC.*

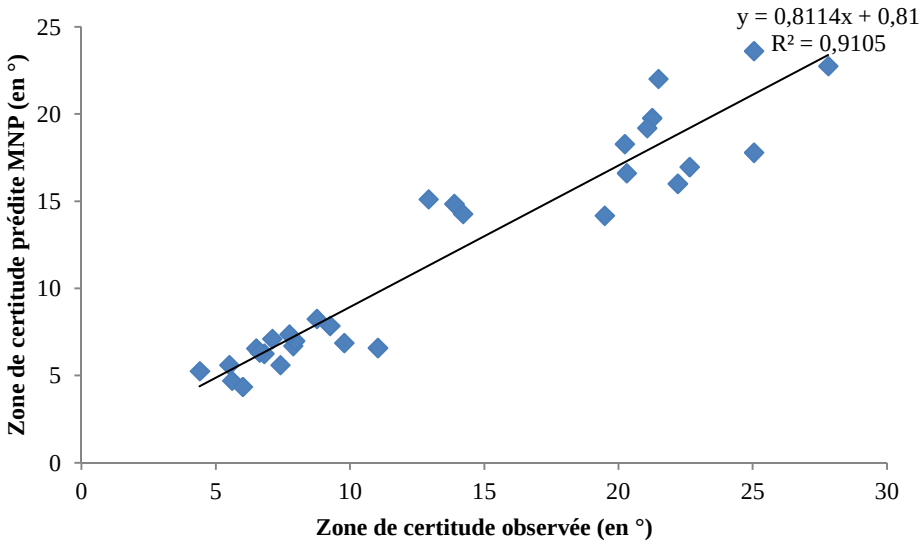


Figure 81. *Corrélation entre la zone de certitude perçue dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle MNP chez les DC.*

Chez les IC, une analyse de corrélation montre que la règle MNP explique les estimations de l'OSC dans les conditions où les deux CDR sont manipulés (y_{MNP}=0,4027 x y_{obs} - 0,23 ; R^2=0,78 ; $p<0,05$) (cf. Figure 82) ainsi que la zone de certitude perçue (y_{MNP}=1,0188 x y_{obs} – 1,40 ; R^2=0,94 ; $p<0,05$) (cf. Figure 83).

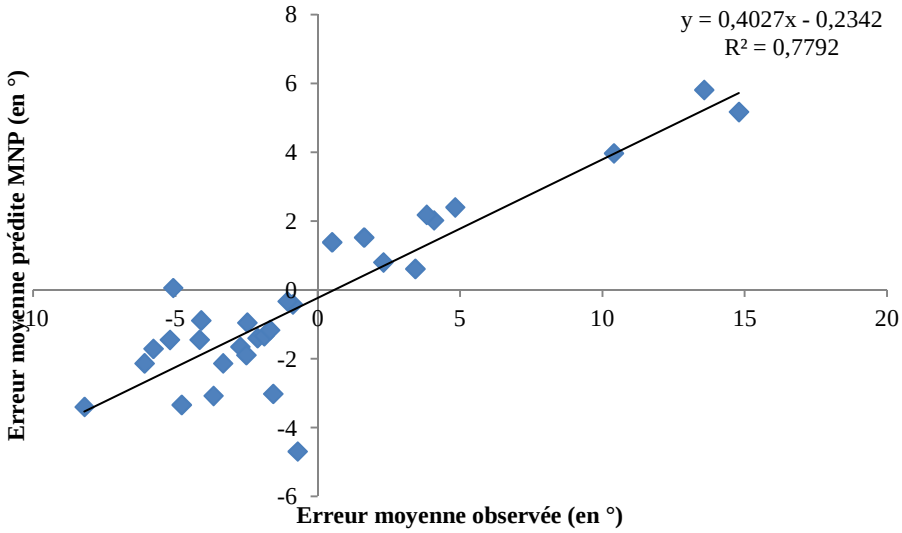


Figure 82. *Corrélation entre l'erreur moyenne de perception de l'OC observée dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et l'erreur moyenne prédite par la règle MNP chez les IC.*

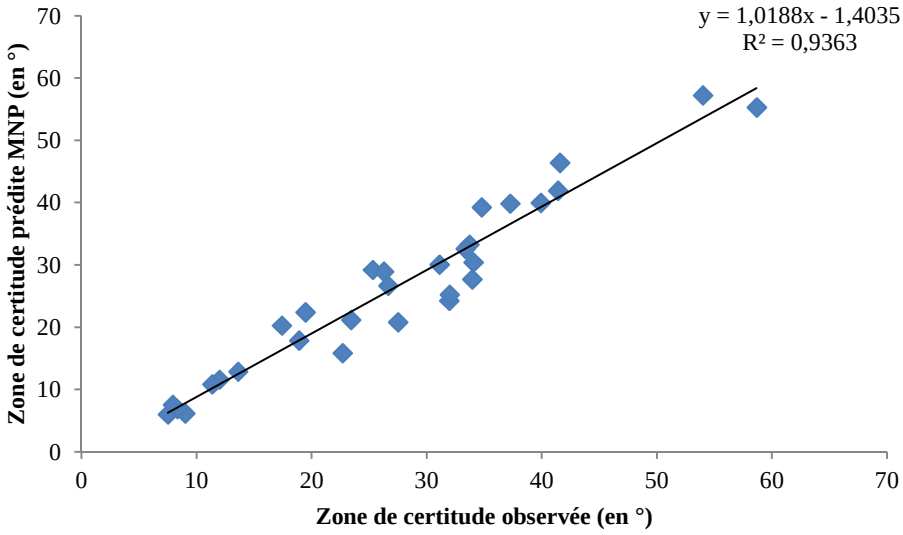


Figure 83. *Corrélation entre la zone de certitude perçue dans les conditions où les deux CDR étaient manipulés et la zone de certitude prédite par la règle MNP chez les IC.*

L'ensemble des corrélations signalées précédemment sont récapitulées dans les tableaux 14, 15, 16 et 17.

	DC			IC		
	MLE	WTA	MNP	MLE	WTA	MNP
OSC	0,87	0,97	0,63	0,54	0,65	0,40
Var	NS	NS	0,27	0,10	0,19	NS

Tableau 14*. Valeur de la pente entre les résultats VH observés (erreur d'OSC et variance interessai) et les résultats prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle en utilisant la variance interessai comme indice de fiabilité. NS = corrélation non significative.*

	DC			IC		
	MLE	WTA	MNP	MLE	WTA	MNP
OSC	0,80	0,99	0,63	0,46	0,61	0,40
ZC	0,57	1,24	0,86	0,38	0,62	0,11

Tableau 15*. Valeur de la pente entre les résultats VH observés (erreur d'OSC et zone de certitude perçue) et les résultats prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité. NS = corrélation non significative.*

	DC			IC		
	MLE	WTA	MNP	MLE	WTA	MNP
OSC	0,49	0,49	0,49	0,18	0,29	0,40
Var	0,19	0,32	0,43	0,19	NS	0,44

Tableau 16*. Valeur de la pente entre les résultats observés dans les conditions où les 2 CDR étaient manipulés (erreur d'OSC et variance interessai) et les résultats prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle en utilisant la variance interessai comme indice de fiabilité. NS = corrélation non significative.*

	DC			IC		
	MLE	WTA	MNP	MLE	WTA	MNP
OSC	0,47	0,29	0,49	0,35	0,95	0,40
ZC	0,40	0,74	0,81	0,51	NS	1,02

Tableau 17*. Valeur de la pente entre les résultats dans les conditions où les 2 CDR étaient manipulés observés (erreur d'OSC et zone de certitude perçue) et les résultats prédits par les différentes règles d'intégration multisensorielle en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité. NS = corrélation non significative.*

Concernant les DC, les résultats montrent que l'utilisation d'une règle type WTA semble la plus appropriée pour expliquer la perception de l'OC dans la modalité de réponse VH (pente proche de 1) quelque soit l'indice de fiabilité utilisé. Cependant l'utilisation d'une stratégie type MNP semble quant à elle plus appropriée pour expliquer la variance des estimations (variance interessai et zone de certitude perçue).

Concernant la règle de pondération des CDR, l'utilisation d'une règle MNP semble être la plus appropriée pour expliquer la perception de l'OC ainsi que pour la variance des estimations (pentes les plus proches de 1).

Concernant les IC, les résultats montrent que l'utilisation d'une règle type WTA semble la plus appropriée pour expliquer la perception de l'OC dans la modalité de réponse VH ainsi que pour la variance des estimations (pentes les plus proches de 1).

Concernant la règle de pondération des CDR, si la variance interessai est utilisée comme indice de fiabilité, l'utilisation d'une règle type MNP semble être la plus appropriée pour expliquer la perception de l'OC. Si la zone de certitude perçue est utilisée comme indice de fiabilité, alors l'utilisation d'une règle type WTA semble plus appropriée pour expliquer la perception de l'OC. Enfin, les résultats montrent que l'utilisation d'une règle MNP semble être la plus appropriée pour expliquer la variance des estimations (variance interessai et zone de certitude perçue).

c. Discussion

L'un des objectifs de cette étude était d'identifier les règles d'intégration multisensorielle propre au style perceptif des sujets (DC vs IC). Nous faisions l'hypothèse que les sujets DC, incapables de se soustraire à un CDR perturbé, accorderaient autant d'importance à chaque CDR et s'appuieraient ainsi sur une règle type MNP. Les résultats montrent que cela semble se vérifier ; en effet, les corrélations entre les estimations observées (OSC, variance interessai et zone de certitude perçue) et les estimations prédites par la règle MNP se sont avérées systématiquement significatives, ce qui n'est pas le cas avec les autres stratégies d'intégration

multisensorielle (MLE ou WTA). De plus la valeur de la pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par la règle MNP est, de façon quasi-systématique, plus proche de 1 que les valeurs de pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par les autres règles d'intégration multisensorielle.

Nous faisions également l'hypothèse que, à contrario, les sujets IC seraient capables de basculer vers un CDR adéquat et de lui attribuer un poids plus important ; l'utilisation d'une règle type MLE ou WTA devenant plus probable chez ce type de sujet. Les résultats montrent que l'utilisation d'une règle type WTA semble appropriée. En effet, la valeur de la pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par la règle WTA est, de façon quasi-systématique, plus proche de 1 que les valeurs de pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par les autres règles d'intégration multisensorielle.

Ces résultats sont cohérents avec notre hypothèse principale selon laquelle un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situerait dans la manière dont le SNC combinerait les différentes informations. Les sujets dépendants (DC) ne semblent donc pas être des sujets incapables de s'appuyer sur le "bon" CDR (i.e., le CDR étant le plus approprié, le moins biaisé) mais plutôt des sujets incapables de minimiser l'influence des "mauvais" CDR en diminuant leur poids respectifs.

Une 2ème hypothèse abordée dans cette étude concernait la fiabilisation des cadres de références. Nous supposions que dans les conditions où la saillance du CDR proprioceptif est augmentée (via le principe de mise en charge), les sujets devaient plus facilement s'appuyer sur ce CDR non biaisé et ainsi diminuer l'effet de la perturbation visuel. Contrairement à nos prédictions, la mise en charge du sujet n'a pas systématiquement améliorer la perception de l'OC (i.e., une dégradation de la perception

de l'OC est apparu chez les sujets IC dans la modalité de réponse haptique). Une explication possible est que l'introduction d'une nouvelle information sensorielle perturbe plus la perception de l'OC qu'elle ne l'améliore, en particulier au début de la stimulation (Vuillerme, Nougier, & Teasdale, 2000). Les sujets considèrent les nouveaux signaux comme du bruit (i.e., une nouvelle source d'incertitude) avant de les intégrer avec les autres signaux. Une autre explication possible est que le vecteur force de réaction produit lors de la mise en charge du sujet ne soit pas parfaitement aligné avec l'axe Z du corps dû une poussée légèrement asymétrique (poussée plus forte d'une jambe par rapport à l'autre) ou un décalage du support sur lequel pousse le sujet (support pas parfaitement perpendiculaire à l'axe Z du corps du sujet). L'effet escompté est alors inverse, à savoir que la mise en charge du sujet vient perturber la perception de l'OC. Quoi qu'il en soit, ce résultat vient conforter l'idée que l'information proprioceptive (qu'elle soit adaptée ou non) en provenance des récepteurs cutanés de la voute plantaire et des récepteurs musculaires joue un rôle important dans la construction de la perception de l'OC.

De plus, les résultats ont montré que l'effet de la mise en charge du sujet (qu'on peut donc définir comme une perturbation proprioceptive) était plus importante chez les sujets IC. Ce résultat est cohérent avec l'idée selon laquelle les IC s'appuieraient davantage sur l'information proprioceptive pour se soustraire à une perturbation visuelle. A l'inverse, les DC, étant ancrés sur le CDR visuel, ne se trouvent pas affectés par le principe de mise en charge.

Une autre hypothèse abordée concernait l'interaction entre le niveau de fiabilité des CDR et l'évolution de la variabilité associée. Les résultats montrent que cette prédiction s'est vérifiée lorsque l'ajustement était effectué dans la modalité de réponse

correspondant au CDR perturbé (c.-à-d. que la perturbation du CDR visuel a impacté la zone de certitude perçue lorsque l'ajustement était effectué dans la modalité de réponse visuel, et la perturbation du CDR proprioceptif a impacté la zone de certitude perçue lorsque l'ajustement était effectué dans la modalité de réponse haptique). Ainsi, et conformément à notre prédiction, l'amplitude de la zone de certitude dans la modalité de réponse visuelle s'est avérée plus importante dans les conditions où le CDR visuel est dévié (i.e., cadre visuel incliné à ± 18°) comparées à la condition où il ne l'est pas. De même, dans la modalité de réponse haptique, la zone de certitude perçue est apparue plus importante dans la condition de mise en charge comparé à la condition où le sujet n'était pas chargé.

Ces résultats sont cohérents avec la théorie selon laquelle la fiabilité des CDR serait perçue par les individus et intégrer par le SNC pour construire une perception la plus juste et la plus certaine possible de leur environnement.

Une autre hypothèse concernait l'utilisation de la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité dans les modèles de pondération multisensorielle (MLE ou WTA). Nos résultats montrent qu'en utilisant la zone de certitude perçue comme indice de fiabilité, les estimations prédites par les différents modèles d'intégration multisensorielle corrèlent de façon quasi-systématique avec les estimations observées, que cela concerne l'intégration des différents signaux sensoriels ou la combinaison des CDR.

Enfin, contrairement à notre hypothèse, l'amplitude de la zone de certitude perçue n'est pas apparue lier au niveau de dépendance/indépendance à l'égard du champ. Les sujets DC ne sont pas apparu comme étant les plus "incertains" (c.-à-d. ceux ne sont

pas les sujets ayant systématiquement la plus grande amplitude moyenne de zone de certitude perçue) et inversement, les sujets IC ne sont pas apparu comme étant les plus "certains". Il semblerait donc que, comme nous l'avons vu dans l'expérience 3, un autre type de classification des individus soit possible (les sujets ayant un fort niveau de certitude et les sujets ayant un faible niveau de certitude) et que cette classification soit indépendante du niveau de dépendance/indépendance au champ. Explorer cette nouvelle forme de classification pourrait peut être permettre de mieux comprendre la manière dont les individus fonctionnent pour construire la perception de leur environnement.

Discussion générale

Ce travail de recherche s'inscrit dans le domaine de l'orientation spatiale et visait à identifier les interrelations existant entre la dépendance/indépendance aux référentiels et les modes d'intégration multisensorielle. Deux hypothèses principales ont été testées. La 1ère était que les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiales dépendaient du choix du référentiel. La 2ème est que l'un des facteurs explicatifs de la variabilité interindividuelle se situe au niveau des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus. En effet, Les différences interindividuelles peuvent refléter une difficulté pour certains sujets à estimer le caractère approprié des cadres de référence disponibles pour percevoir leur environnement (hypothèse 1) ou provenir d'une difficulté à estimer la "fiabilité" respective des signaux sensoriels disponibles et influencer leur capacité à pondérer ou à re-pondérer ces signaux (hypothèse 2). Une autre hypothèse est que le choix d'un référentiel contraint de façon systématique le poids des signaux sensoriels indépendamment de leur fiabilité (i.e., un sujet dépendant à l'égard du champ visuel (DC) pondérera toujours plus fortement les indices visuels et un sujet indépendant à l'égard du champ visuel (IC) les indices non-visuels).

Les deux premières expériences visaient à développer le cadre méthodologique afin de nous mettre, pour les expériences suivantes, dans les conditions maximisant les effets de désorientation et ainsi pouvoir facilement différencier les profils perceptifs des individus (sujets dépendants (DC) vs sujets indépendants (IC)). Cette problématique

s'avère primordiale pour mener des études différentielles. Le Rod-and-Frame Test (RFT) étant un outil fréquemment utilisé lors de ce travail de recherche, la 1ère expérience avait pour but de vérifier sa fiabilité lors d'une expérience de test-retest. Les résultats ont montré que la fiabilité des résultats dépendait du sens d'inclinaison du cadre. Le RFT a présenté une "excellente" fiabilité des résultats lorsque le cadre était incliné à droite de l'observateur et une fiabilité "moyenne" lorsque le cadre était incliné à gauche de l'observateur. Ces résultats montrent que dans l'hypothèse où la durée de l'expérimentation s'avère trop importante et nécessite de réduire le nombre de conditions, le choix d'un cadre incliné à droite de l'observateur plutôt qu'à gauche s'avère plus judicieux. Lors de ce travail, nous ne nous sommes jamais retrouvés dans l'obligation d'effectuer un choix et avons donc systématiquement utilisé les deux sens d'inclinaison de l'environnement visuel.

Le but de la 2ème étude était de vérifier si l'enrichissement d'une scène visuelle 2D en indices de profondeur (perspective, gradient de texture, effet de lumière) augmentait la dépendance visuelle des sujets. Les résultats ont montré que plus la scène visuelle était enrichie en indices géométriques (c.à.d. d'éléments parallèles ou orthogonaux) et cognitifs additionnels déterminant la direction visuelle haut/bas (c.à.d. d'objets polarisés significatifs) plus la taille de l'effet d'inclinaison du cadre ou de la pièce était important. L'effet cadre moyen s'est avéré significativement plus grand dans la condition "RFT pseudo-3D" que dans la condition "RFT 2D". Cependant, nos résultats ont montré que, bien que cet enrichissement de la scène visuelle 2D permette d'augmenter son caractère perturbant, il ne permet d'atteindre la taille de l'effet induit par un environnement 3D. L'effet cadre moyen dans la condition "RFT 2D enrichi" n'atteint pas le niveau de l'effet cadre d'un RFT 3D type Oltman (Oltman, 1968). Lors des études suivantes, nous avons donc privilégié l'utilisation d'une version 3D RFT ou,

si les contraintes matérielles n'en permettent pas son utilisation, une version 2D enrichi d'indices de profondeur.

Ces deux premières études ne nous permettent pas d'affirmer que la variabilité interindividuelle observée lors de ces tâches de perception d'orientation spatiale relève du choix du référentiel (hypothèse 1) ou des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus (hypothèse 2). En effet, si certains sujets semblent capables de se soustraire au cadre de référence visuel biaisé (c.-à-d., les sujets ayant le plus petit effet-cadre (les sujets IC)), il nous est impossible d'en expliquer l'origine. Ont-ils été capables de faire abstraction du cadre de référence visuel en s'appuyant uniquement sur le cadre de référence proprioceptif non-biaisé ? Ont-ils minimisé l'influence du cadre de référence visuel en diminuant son poids alloué ?

Le but de la 3ème étude était d'explorer les différentes formes de variabilités inhérentes à la passation d'un RFT 3D. Conformément à la littérature (Ohlmann, 1985), nos résultats laissent apparaitre une corrélation positive entre l'erreur absolue moyenne d'ajustement et la variance des résultats. Plus un sujet est dépendant au champ visuel (DC) plus la variabilité de ces résultats sera importante et inversement. Cependant, comme nous l'avons évoqué précédemment, cette variance interessai rend compte d'une incertitude moyenne sur un laps de temps plus ou moins long et pourrait ainsi être contaminer par des facteurs non-neutralisés. Une variance importante des estimations d'un sujet pourrait traduire un sentiment de désorientation important, mais aussi résulter de fluctuations attentionnelles, de changement progressif de référentiel ou même évoluer en fonction de l'état de fatigue du sujet, de sa motivation ou de son intérêt/désintérêt pour la tâche.

Obtenir une variance "fiable" s'avère essentiel pour le calcul des règles de type MLE ou WTA afin de définir le poids attribué à chaque signal sensoriel ou référentiel. Un moyen de réduire l'expression des sources d'incertitude est de réduire le temps d'exposition aux stimuli afin de se rapprocher du niveau d'incertitude instantanée traité par les mécanismes de pondération des signaux sensoriels ou des référentiels spatiaux. Nous nous sommes donc intéressés à la variabilité intraessai en faisant l'hypothèse qu'elle pourrait rendre compte d'un niveau de certitude/incertitude instantanée. Nos résultats ont montré que la variabilité intraessai et la variance interessai semblaient traduire le même niveau de certitude (pas de différence significative entre ces deux indices de fiabilité). Ce résultat n'a, à notre connaissance, jamais été montré dans la littérature.

Nous nous sommes également intéressés aux estimations conscientes du niveau de certitude (via l'estimation des limites de la zone de verticalité). Il est apparu que le niveau de certitude/incertitude perçu par les individus évoluait positivement avec le degré de congruence du cadre de référence visuel avec les cadres de référence gravitaire et égocentré (cf. Figure 15). Plus le cadre de référence visuel est incliné, plus l'incertitude perçue augmente. L'autre résultat intéressant concernant cette incertitude perçue est la forte variabilité interindividuelle dont elle fait l'objet ; un continuum basé sur le niveau de certitude semble alors possible (cf. Figure 18). Une classification des individus non plus basé sur l'erreur moyenne d'ajustement mais sur le niveau de certitude perçue pourrait permettre de mieux expliquer les différences interindividuelles observées et notamment les stratégies d'intégration multisensorielle utilisées.

Ces résultats, même s'ils ne nous permettent pas d'affirmer que la variabilité interindividuelle observée lors de ces tâches de perception d'orientation spatiale relève du choix du référentiel (hypothèse 1) ou des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus (hypothèse 2), nous apportent une 1ère piste d'explications possibles. En effet, il apparait clairement que le niveau de certitude et par conséquent la fiabilité du signal et/ou référentiel est intégrée par les individus et que celle-ci fait l'objet d'une forte variabilité interindividuelle. Ces résultats montrent que les sujets diffèrent dans leur capacité à estimer la fiabilité de chaque signal et/ou référentiel. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle la perception et le contrôle de l'orientation résultent d'opération de traitement de l'information visant à réduire l'incertitude spatiale. La variabilité interindividuelle résulte de l'utilisation de règles de combinaison des signaux sensoriels différent d'un sujet à l'autre et plus ou moins efficace pour réduire les différentes sources d'incertitude (règles qui s'éloignent de la règle optimale de réduction de l'incertitude). Certains auteurs ont déjà validé l'hypothèse selon laquelle le système nerveux centrale recourrait à des règles probabilistes (ou fonctionnerait de la sorte) afin de réduire l'incertitude spatiale lors de tâches de perception de la taille des objets (Ernst & Banks, 2002), de la forme des objets (Helbig & Ernst, 2007), des textures (Guest & Spence, 2003; Lederman et al., 1986), de l'inclinaison d'une surface (Ernst et al., 2000), de la profondeur et des perspectives (Oruc et al., 2003), de la localisation de stimuli auditif et visuel (Alais & Burr, 2004; Knill & Pouget, 2004), ou encore de la perception de la vitesse (Stocker & Simoncelli, 2006). A notre connaissance, ces résultats n'ont jamais été démontrés lors de tâches de perception de l'orientation spatiale.

Manipulation de multiples cadres de références

Dans les 3 dernières expériences, afin d'étudier les stratégies de combinaison des de différents référentiels, le cadre de référence égocentré a été manipulé en plus du cadre de référence visuel. Dans l'expérience 4, le cadre de référence égocentré a été bruité par l'ajout de masse sur le côté de la tête permettant de dévier le centre de masse de la tête. Dans les expériences 5 et 6, ce même cadre de référence a été fiabilisé via le principe de mise en charge et/ou par la restauration des dynamiques d'équilibration posturale.

Les résultats de ces différentes expériences ont montré un effet quasi-systématique de la manipulation du cadre de référence visuel sur l'ensemble des sujets mais pas de celle du cadre de référence égocentrique. En effet, les résultats de l'expérience 4 ont montré un effet significatif de l'inclinaison du cadre de référence visuel (lorsque les estimations étaient effectuées dans la modalité de réponse visuelle) mais pas de la déviation du centre de masse de la tête. Une explication avancée concernant cette absence d'effet significatif de la perturbation du cadre de référence égocentrique est la possibilité offerte au sujet de s'appuyer sur les axes articulaires tête-tronc, qui restent une source fiable et non-biaisée de signaux proprioceptifs. Les résultats de l'expérience 6 ont montré que la fiabilisation du cadre de référence égocentrique, via le principe de mise en charge, n'a pas systématiquement améliorer la perception de l'OC (i.e., une dégradation de la perception de l'OC est apparu chez les sujets IC dans la modalité de réponse haptique). Une explication possible est que l'introduction d'une nouvelle information sensorielle perturbe plus la perception de l'OC qu'elle ne l'améliore, en particulier au début de la stimulation (Vuillerme et al., 2000). Une autre explication possible est que le vecteur force de réaction produit lors de la mise en charge du sujet ne soit pas parfaitement aligné avec l'axe Z du corps. L'effet escompté est alors inverse, à savoir que la mise en charge du sujet vient perturber la

perception de l'axe Z du corps. Enfin, une autre explication possible est que, les sujets n'étant chargés qu'à 80% de leur poids de corps, l'intensité du vecteur force de réaction est plus faible qu'en posture orthostatique (debout) ne permettant pas une amélioration de la perception de l'orientation du corps.

Des analyses individuelles effectuées lors de ces différentes études ont cependant révélé que la manipulation du cadre de référence égocentrique avait un effet significatif chez certains sujets (entrainant une amélioration ou une dégradation de la perception de l'orientation du corps).

Ces résultats confortent l'idée que l'information proprioceptive (qu'elle soit adaptée ou non) joue un rôle important dans la construction de la perception de l'OC et soutiennent l'hypothèse selon laquelle les différences interindividuelles observées proviendraient d'une différence dans le choix du référentiel à exploiter pour réaliser la tâche. Il apparait donc que certains sujets semblent privilégier le référentiel visuel tandis que d'autres privilégieraient le référentiel égocentrique. Les résultats de l'expérience 4 montrent par ailleurs qu'il existe une corrélation négative entre la dépendance à l'égard du champ visuel et celle à l'égard du champ égocentrique (i.e., plus un individu est dépendant à l'égard du champ visuel moins il l'est à l'égard du champ égocentrique, et inversement). Ces résultats montrent donc que plusieurs cadres de référence peuvent être exploités afin de construire notre perception de l'environnement. Cependant, ils ne nous permettent pas d'affirmer que l'ensemble des référentiels sont pris en compte par chaque individu. Même s'ils ne rejettent pas l'hypothèse selon laquelle les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception pourraient provenir de stratégies différentielles de combinaison des référentiels spatiaux, ces résultats ne nous permettent pas d'accepter cette hypothèse.

Les résultats de l'expérience 6 ont par ailleurs montré que la manipulation des différents cadres de référence (visuel et égocentrique) avait un effet sur le niveau de certitude perçue par les individus. En effet, la zone de certitude perçue et la variance des résultats (i.e., variance interessai) sont apparues plus importante en présence d'un cadre visuel incliné comparé à la condition sans cadre visuel. Le même constat peut être effectué quant à la mise en charge ou non des sujets. Autrement dit, la manipulation des cadres de référence n'affecte pas seulement la perception d'orientation spatiale mais également le niveau de certitude/incertitude de cette perception. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle la perception et le contrôle de l'orientation résultent d'opération de traitement de l'information visant à réduire l'incertitude spatiale.

Effet des modalités de réponse sensorielle

Les expériences 4 et 6 ont également permis d'étudier dans quelle mesure l'enrichissement des modalités de réponse permettait de réduire les effets provoqués par la manipulation de différents cadre de référence (visuel ou proprioceptif). Les résultats de l'étude 4 ont montré que la condition de réponse multisensorielle (i.e. visuo-haptique) a permis de réduire la dépendance visuelle, améliorant ainsi la perception de l'orientation de la tête. En d'autres termes, les signaux haptiques d'orientation générés durant l'ajustement de la baguette physique combinée avec son affichage visuelle sur l'écran de TV ont permis aux sujets de désambiguïser l'effet cadre visuel. Dans la même lignée, les résultats de l'expérience 6 ont montré que l'erreur moyenne d'ajustement obtenue dans la modalité de réponse visuo-haptique était systématiquement plus petite que celle obtenue dans la modalité de réponse visuelle seule suggérant aussi une désambiguïsation de l'effet cadre par les signaux haptiques.

Ces résultats montrent que l'ensemble des signaux sensoriels sont exploités afin de construire notre perception de l'environnement et soutiennent ainsi l'hypothèse selon laquelle les stratégies d'intégration multisensorielle pourraient s'appliquer au niveau des signaux sensoriels et pas uniquement au niveau des cadres de références.

De plus, les résultats de l'expérience 6 ont montré que l'enrichissement des modalités de réponses (i.e., modalité de réponse visuo-haptique) a eu un effet sur le niveau de certitude perçue par les individus. En effet, la zone de certitude perçue et la variance des résultats (i.e., variance interessai) obtenues dans la modalité de réponse visuo-haptique sont apparues systématiquement plus importantes que celles obtenues dans la modalité de réponse visuelle mais plus petites que celles obtenues dans la modalité de réponse haptique. Il semblerait ainsi que l'apport des signaux haptiques dans la modalité visuo-haptique a "pollué" l'estimation visuelle et augmenté ainsi le niveau d'incertitude. Une réserve est cependant à émettre : la plus grande incertitude obtenue lors des ajustements haptiques n'est peut être pas seulement due à une plus grande incertitude liée à l'exploitation des signaux haptiques, mais peut être à une précision moins importante du système moteur par rapport au système visuel (les résultats montrent que dans 10% des cas, la variance interessai ou la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse visuelle se sont avérées plus importante que celle obtenue dans la modalité de réponse haptique).

Quoi qu'il en soit, ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle la perception et le contrôle de l'orientation résultent d'opération de traitement de l'information visant à réduire l'incertitude spatiale.

Règles d'intégration multisensorielle

Ces dernières expériences (4 et 6) ont également permis de tester différents modèles d'intégration multisensorielle.

Les résultats de l'expérience 4 ont montré que les règles d'intégration multisensorielle testées (MLE, WTA et MNP) semblent toutes en mesure d'expliquer l'amélioration observée dans la condition de réponse multimodale (la réduction des erreurs moyennes observées) mais pas la variance observée dans cette même condition de réponse multimodale. Seule une règle de type "moyenne non-pondérée" (MNP) semble en mesure d'expliquer à la fois la moyenne des résultats observés ainsi que leur variance. Dans les modèles type MLE ou WTA, le signal sensoriel le plus fiable (i.e., celui présentant la plus petite variabilité) se voit attribuer le poids le plus important. Classiquement, la fiabilité du signal est estimée à partir de la variance des résultats obtenus dans une condition. Comme nous avons pu le voir précédemment, cette variance interessai présente des limites (sur ou sous-estimation due à des fluctuations attentionnelles, à des changements de cadre de référence ou à l'évolution de l'état de fatigue du sujet). Dans l'expérience 6, les mêmes règles d'intégration multisensorielle ont été testées mais en utilisant un autre indice de fiabilité pour calculer le poids attribué à chaque signal sensoriel : la zone de certitude perçue. Le poids attribué à chaque signal sensoriel n'a pas été calculé uniquement à partir de la variance des résultats obtenus dans une condition mais également à partir de l'incertitude perçue par les sujets via l'amplitude de la zone de certitude. Les résultats ont montré que quelque soit l'indice de fiabilité utilisée (i.e., la variance interessai ou la zone de certitude perçue) la règle MLE ne semble pas en mesure d'expliquer les résultats observés dans la condition multimodale (ni le biais moyen, ni la variance interessai, ni la zone de certitude perçue). La non-validation de l'utilisation d'une règle MLE peut s'expliquer par la variabilité interindividuelle induite par la population sélectionnée lors de cette dernière expérience,

à savoir deux groupes d'individus opposés dans leur comportement. En effet, si l'hypothèse selon laquelle un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situe au niveau des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus, il est possible que l'un des deux groupes utilise une règle type MLE pour combiner les signaux sensoriels mais pas le second, entrainant ainsi un échec de la règle MLE afin d'expliquer les résultats observés dans la condition multimodale.

Les résultats ont montré que la règle WTA semble en mesure d'expliquer l'erreur moyenne perçue dans la condition multimodale quel que soit l'indice de fiabilité utilisé mais pas la variabilité (ni la variance interessai, ni la zone de certitude perçue). A l'inverse, la règle MNP semble en mesure d'expliquer la variabilité (i.e., la variance interessai ou la zone de certitude perçue) dans la condition multimodale mais pas le biais moyen. Tout comme pour la règle MLE, nous pouvons penser que l'échec quant à l'utilisation de ces règles d'intégration multisensorielle peut s'expliquer par la variabilité interindividuelle induite par la population sélectionnée.

Règles de combinaison des référentiels spatiaux

Les résultats de l'expérience 4 ont montré que les règles de combinaison des référentiels spatiaux testées (MLE, WTA et MNP) semblent toutes en mesure d'expliquer l'erreur moyenne observée dans les conditions où les deux cadres de référence sont biaisés (i.e., présence du cadre visuel incliné et déviation du centre de masse de la tête) mais pas la variance observée dans ces mêmes conditions. Seule une règle type "moyenne non-pondérée" (MNP) semble en mesure d'expliquer à la fois la moyenne des résultats observés et leur variance. Les résultats de l'expérience 5 ont montré que l'utilisation d'une règle type MLE n'est pas systématique. En effet, certains sujets ont montré une augmentation soudaine de la précision des estimations perceptives

ne pouvant être prédite par la règle MLE. Les résultats de l'expérience 6 ont montré que, quel que soit l'indice de fiabilité utilisé, les règles MLE ou WTA permettent d'expliquer le biais moyen observé dans les conditions de double perturbation (i.e., conditions où les deux cadres de référence sont biaisés) mais pas la variabilité. La règle MNP permet d'expliquer à la fois le biais moyen et la variabilité (à l'exception de la zone de certitude perçue dans la modalité de réponse visuo-haptique). L'échec quant à l'utilisation (en moyenne) systématique d'une règle de combinaison des référentiels spatiaux peut s'expliquer par la variabilité interindividuelle. En effet, les résultats de l'expérience 4 ont fait apparaitre une relation significative entre la dépendance au cadre de référence visuel et l'utilisation de stratégies de combinaison des référentiels. Nous avons alors testé l'hypothèse selon laquelle un des facteurs explicatifs de la variabilité interindividuelle lors de tâches de perception d'orientation spatiale se situe au niveau des règles de combinaison des référentiels utilisées par les individus.

Relation entre l'utilisation de règle de combinaison des référentiels spatiaux et la dépendance au cadre de référence visuel

Les résultats de l'expérience 4 ont fait apparaitre une relation significative entre la dépendance au cadre de référence visuel et l'utilisation de stratégies de combinaison des référentiels spatiaux type MNP. Chez les sujets hautement dépendants au cadre de référence visuel (DC), la règle MNP a prédit efficacement les réponses observées dans les conditions de doubles perturbations. En effet, chez ces sujets, la pente entre les valeurs prédites par la règle MNP et les réponses observées a approximé la valeur de 1. Chez les sujets les moins dépendants au cadre de référence visuel (IC), cette même pente est plus petite, montrant ainsi une sous-estimation des réponses observées par le modèle MNP. La dépendance visuelle semble donc résulter de l'utilisation d'une règle

de pondération MNP des référentiels visuel et non visuel (équilibre des influences réciproques de tous les référentiels).

Les résultats de l'expérience 5 ont par ailleurs montré des comportements variables d'un individu à l'autre. Chez certains sujets, les erreurs observées dans la condition où les signaux proprioceptifs (ASP) et visuel (E) étaient combinés ($ASPE_{obs}$) correspondaient plutôt bien aux erreurs prédites par la règle MLE en condition multimodales ($ASPE_{MLE}$). Pour d'autres sujets, la règle WTA semblait plus en mesure d'expliquer les résultats observés dans la condition multimodale ($ASPE_{obs}$).

Les résultats de l'expérience 6 ont confirmé ces résultats. En effet, les résultats ont montré que, chez les sujets dépendants au champ visuel (DC), les corrélations entre les estimations observées (orientation subjective du corps, variance interessai et zone de certitude perçue) et les estimations prédites par la règle MNP se sont avérées systématiquement significatives. De plus la valeur de la pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par la règle MNP est, de façon quasi-systématique, plus proche de 1 que les valeurs de pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par les autres règles d'intégration multisensorielle.

Les résultats ont montré, chez les sujets indépendants au champ visuel (IC), que l'utilisation d'une règle type WTA semble plus appropriée. En effet, la valeur de la pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par la règle WTA est, de façon quasi-systématique, plus proche de 1 que les valeurs de pente corrélant les estimations observées et les estimations prédites par les autres règles d'intégration multisensorielle.

Ces résultats sont cohérents avec notre hypothèse principale selon laquelle un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situerait dans la manière dont le SNC combinerait les différentes informations. Les sujets dépendants (DC) ne

semblent donc pas être des sujets incapables de s'appuyer sur le "bon" cadre de référence (i.e., le CDR étant le plus approprié, le moins biaisé) mais plutôt des sujets incapables de minimiser l'influence des "mauvais" cadre de référence en diminuant leur poids respectifs (Isableu et al., 2010). A l'inverse, les sujets indépendants (IC) semblent en mesure de repérer le référentiel le plus approprié (i.e., le moins biaisé) en lui attribuant un poids plus important et diminuer ainsi le poids du cadre de référence le moins approprié (i.e., le plus biaisé). Bien que plusieurs auteurs (Ernst et al., 2000; Ernst & Banks, 2002; Knill & Pouget, 2004) avaient déjà validé l'hypothèse selon laquelle le système nerveux central recourrait à des règles probabilistes afin de réduire l'incertitude spatiale, ces études ne s'étaient jamais intéressées à la problématique des différences individuelles. Est-ce que l'ensemble des individus utilisent les mêmes processus pour construire leur perception de l'environnement ? Si oui, comment expliquer l'existence des nombreuses différences interindividuelles observées lors de tâches perceptives (Asch & Witkin, 1948b; Asch & Witkin, 1948a; Clark & Graybiel, 1951; Isableu et al., 1997; Isableu et al., 2003; Isableu & Vuillerme, 2006; Ohlmann, 1985; Ohlmann, 1990; Witkin & Asch, 1948b; Witkin, 1949; Witkin, 1950b) ? Notre étude, sans remettre en cause l'utilisation de règles probabilistes, a permis, grâce à une approche plus individualiste des comportements, d'éclaircir cette problématique. Les résultats ont en effet montré que l'un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situerait dans la manière dont les individus combinent les différents signaux et référentiels dont ils disposent. Ceci n'avait, à notre connaissance, jamais été démontré.

Perspectives

Suite à ces travaux de recherche, plusieurs perspectives semblent envisageables. Le système nerveux central (SNC) étant le siège de la construction de notre perception multisensorielle, l'une des hypothèses expliquant la variabilité individuelle pourrait se situer dans l'activité neurale et notamment dans une sollicitation hémisphérique différente d'un individu à l'autre. L'utilisation de système permettant l'enregistrement de l'activité cérébrale (IRMf, MEG, EEG…) lors d'une tâche de perception de l'orientation spatiale permettrait d'apporter quelques éléments de réponse. Une étude par hémichamp (étude consistant à stimuler uniquement la moitié du champ visuel, et ainsi à activer l'hémisphère cérébrale controlatéral à la stimulation) ou sur des patients présentant des troubles cérébraux pourrait également apporter des éléments de réponse.

Il est apparu au cours de ces travaux que la perception et le contrôle de l'orientation semblent résulter d'opération de traitement de l'information visant à réduire l'incertitude spatiale. Le niveau de certitude/incertitude perçue apparait donc être une donnée essentielle pour comprendre les mécanismes de combinaison des référentiels spatiaux. Une autre perspective envisageable serait de tester différents modèles d'intégration multisensorielle ou de combinaison des référentiels spatiaux en distinguant non plus les sujets dépendants au champ visuel des sujets indépendants mais en distinguant les sujets ayant un fort niveau de certitude des sujets ayant un faible niveau de certitude.

Dans la même veine, une étude manipulant la fiabilité des signaux et/ou des cadres de références en ajoutant plus ou moins de bruit (en floutant plus ou moins le signal et/ou le référentiel visuel, en vibrant plus ou moins le corps et/ou la baguette physique…) pourrait permettre d'apporter des éléments de réponse quant au rôle de l'incertitude perçue dans les mécanismes de combinaison des référentiels spatiaux.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse était d'identifier les facteurs responsables des différences interindividuelles observées lors de tâches perceptives d'orientation spatiale. Deux hypothèses principales ont ainsi été testées. La 1ère est que les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiales dépendent du choix du référentiel. La 2nd hypothèse est que l'un des facteurs explicatifs de la variabilité interindividuelle lors de tâches de perception d'orientation spatiale se situe au niveau des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus. L'analyse des résultats montre que l'ensemble des cadres de références semblent pris en compte par les individus rejetant ainsi la 1ère hypothèse selon laquelle les différences interindividuelles s'expliqueraient par la capacité de certains sujets à exploiter le "bon" cadre de référence. Les résultats montrent que l'un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situe dans la manière dont le SNC combinerait les différentes informations, certains sujets (DC) semblant incapables de minimiser l'influence des "mauvais" cadre de référence (les moins appropriés, les plus biaisés) en diminuant leur poids respectifs.

Bibliographie

Alais, D. & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Curr.Biol., 14,* 257-262.

Alvarado, J. C., Vaughan, J. W., Stanford, T. R., & Stein, B. E. (2007). Multisensory versus unisensory integration: contrasting modes in the superior colliculus. *J.Neurophysiol., 97,* 3193-3205.

Anastasopoulos, D., Bronstein, A., Haslwanter, T., Fetter, M., & Dichgans, J. (1999). The role of somatosensory input for the perception of verticality. *Ann.N.Y.Acad.Sci., 871,* 379-383.

Asch, S. E. & Witkin, H. A. (1948a). Studies in space orientation; perception of the upright with displaced visual fields. *J.Exp.Psychol., 38,* 325-337.

Asch, S. E. & Witkin, H. A. (1948b). Studies in space orientation; 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, 20,* 381-393.

Avillac, M., Deneve, S., Olivier, E., Pouget, A., & Duhamel, J. R. (2005). Reference frames for representing visual and tactile locations in parietal cortex. *Nat.Neurosci., 8,* 941-949.

Barra, J., Marquer, A., Joassin, R., Reymond, C., Metge, L., Chauvineau, V. et al. (2010). Humans use internal models to construct and update a sense of verticality. *Brain, 133,* 3552-3563.

Battaglia, P. W., Jacobs, R. A., & Aslin, R. N. (2003). Bayesian integration of visual and auditory signals for spatial localization. *J.Opt.Soc.Am.A Opt.Image Sci.Vis., 20,* 1391-1397.

Beierholm, U. R., Quartz, S. R., & Shams, L. (2009). Bayesian priors are encoded independently from likelihoods in human multisensory perception. *J.Vis., 9,* 23-29.

Bernardin, D., Isableu, B., Fourcade, P., & Bardy, B. G. (2005). Differential exploitation of the inertia tensor in multi-joint arm reaching. *Exp.Brain Res., 167,* 487-495.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. (Odile Jacob ed.) Paris.

Bland, J. M. & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet, 1,* 307-310.

Bock, O. (1997). Effects of a tilted visual background on human sensory-motor coordination. *Exp.Brain Res., 115,* 507-512.

Bradshaw, J. L. & Nettleton, N. C. (1981). The nature of hemispheric specialization in man. *The Behavioral and Brain Sciences, 4,* 51-63.

Brandt, T., Bartenstein, P., Janek, A., & Dieterich, M. (1998). Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex. *Brain, 121 (Pt 9),* 1749-1758.

Bray, A., Subanandan, A., Isableu, B., Ohlmann, T., Golding, J. F., & Gresty, M. A. (2004). We are most aware of our place in the world when about to fall. *Curr.Biol., 14,* R609-R610.

Brenet, F. & Luyat, M. (1995). Frame anisotropy : a problem of individual validity. 1995. Ref Type: Personal Communication

Brenet, F., Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1988). Interaction vision/posture lors de la localisation d'une cible enchâssée. *Bulletin de Psychologie, 388,* 22-30.

Bresciani, J. P., Dammeier, F., & Ernst, M. O. (2006). Vision and touch are automatically integrated for the perception of sequences of events. *J.Vis., 6,* 554-564.

Bresciani, J. P. & Ernst, M. O. (2007). Signal reliability modulates auditory-tactile integration for event counting. *Neuroreport, 18,* 1157-1161.

Bresciani, J. P., Ernst, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Exp.Brain Res., 162,* 172-180.

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

Bringoux, L., Nougier, V., Barraud, P. A., Marin, L., & Raphel, C. (2003). Contribution of somesthetic information to the perception of body orientation in the pitch dimension. *Q.J.Exp.Psychol.A, 56,* 909-923.

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.

Bronstein, A. M. (1986). Suppression of visually evoked postural responses. *Exp.Brain Res., 63,* 655-658.

Carver, S., Kiemel, T., & Jeka, J. J. (2006). Modeling the dynamics of sensory reweighting. *Biol.Cybern., 95,* 123-134.

Carver, S., Kiemel, T., van der Kooij, H., & Jeka, J. J. (2005). Comparing internal models of the dynamics of the visual environment. *Biol.Cybern., 92,* 147-163.

Ceyte, H., Cian, C., Trousselard, M., & Barraud, P. A. (2009). Influence of perceived egocentric coordinates on the subjective visual vertical. *Neurosci.Lett., 462,* 85-88.

Cian, C., Esquivie, D., Barraud, P. A., & Raphel, C. (1995). Respective contribution of orientation contrast and illusion of self-tilt to the rod-and-frame effect. *Perception, 24,* 623-630.

Clark, B. & Graybiel, A. (1951). Visual perception of the horizontal following exposure to radial acceleration on a centrifuge. *J.Comp Physiol Psychol., 44,* 525-534.

Clark, B. & Graybiel, A. (1962). Visual perception of the horizontal during prolonged exposure to radial acceleration on a centrifuge. *J.Exp.Psychol., 63,* 294-301.

Clark, B. & Graybiel, A. (1968). Influence of contact cues on the perception of the oculogravic illusion. *Acta Otolaryngol., 65,* 373-380.

Coq, J. O. & Xerri, C. (2001). Sensorimotor experience modulates age-dependent alterations of the forepaw representation in the rat primary somatosensory cortex. *Neuroscience, 104,* 705-715.

Darlot, C. (1993). The cerebellum as a predictor of neural messages--I. The stable estimator hypothesis. *Neuroscience, 56,* 617-646.

Day, B. L. & Cole, J. (2002). Vestibular-evoked postural responses in the absence of somatosensory information. *Brain, 125,* 2081-2088.

De Vrijer M., Medendorp, W. P., & Van Gisbergen, J. A. (2009). Accuracy-precision trade-off in visual orientation constancy. *J.Vis., 9,* 9-15.

Deneve, S. & Pouget, A. (2003). Basis functions for object-centered representations. *Neuron, 37,* 347-359.

Deneve, S. & Pouget, A. (2004). Bayesian multisensory integration and cross-modal spatial links. *J.Physiol Paris, 98,* 249-258.

Deutschlander, A., Bense, S., Stephan, T., Schwaiger, M., Brandt, T., & Dieterich, M. (2002). Sensory system interactions during simultaneous vestibular and visual stimulation in PET. *Hum.Brain Mapp., 16,* 92-103.

Dieterich, M. & Brandt, T. (2000). Brain activation studies on visual-vestibular and ocular motor interaction. *Curr.Opin.Neurol., 13,* 13-18.

Driver, J. & Spence, C. (1998). Crossmodal attention. *Curr.Opin.Neurobiol., 8,* 245-253.

Ebenholtz, S. M. (1985). Depth separation fails to modulate the orientation-inhibition effect. *Percept.Psychophys., 37,* 533-535.

Ebenholtz, S. M. & Callan, J. W. (1980). Tilt adaptation as a feedback control process. *J.Exp.Psychol.Hum.Percept.Perform., 6,* 413-432.

Ebenholtz, S. M. & Glaser, G. W. (1982). Absence of depth processing in the large-frame rod-and-frame effect. *Percept.Psychophys., 32,* 134-140.

Eimer, M. & Driver, J. (2001). Crossmodal links in endogenous and exogenous spatial attention: evidence from event-related brain potential studies. *Neurosci.Biobehav.Rev., 25,* 497-511.

Elbert, T., Candia, V., Altenmuller, E., Rau, H., Sterr, A., Rockstroh, B. et al. (1998). Alteration of digital representations in somatosensory cortex in focal hand dystonia. *Neuroreport, 9,* 3571-3575.

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., Banks, M. S., & Bulthoff, H. H. (2000). Touch can change visual slant perception. *Nat.Neurosci., 3,* 69-73.

Ernst, M. O. & Bulthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends Cogn Sci., 8,* 162-169.

Fleiss, J. L. (1986). Reliability of measurement. In *Design and Analysis of Clinical Experiments* (pp. 1-32). New-York: Wiley.

Fourre, B., Isableu, B., Bernardin, D., Gueguen, M., Giraudet, G., Vuillerme, N. et al. (2009). The role of body centre of mass on haptic subjective vertical. *Neurosci.Lett., 465,* 230-234.

Frens, M. A., Van Opstal, A. J., & Van der Willigen, R. F. (1995). Spatial and temporal factors determine auditory-visual interactions in human saccadic eye movements. *Percept.Psychophys., 57,* 802-816.

Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., Defries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *J.Exp.Psychol.Gen., 137,* 201-225.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*.

Goodenough, D. R., Cox, P. W., Sigman, E., & Strawderman, W. E. (1985). A cognitive style conception of the field dependence dimension. *Cahiers de Psychologie Cognitive, 5,* 687-705.

Goodenough, D. R., Nowak, A., Oltman, P. K., Cox, P. W., & Sigman, E. (1982). A visually induced illusion of body tilt in a horizontal plane. *Percept.Psychophys., 31,* 268-272.

Goodenough, D. R., Oltman, P. K., Sigman, E., & Cox, P. W. (1981). The rod-and-frame illusion in erect and supine observers. *Percept.Psychophys., 29,* 365-370.

Goodenough, D. R., Oltman, P. K., Sigman, E., Rosso, J., & Mertz, H. (1979). Orientation contrast effects in the rod-and-frame test. *Percept.Psychophys., 25,* 419-424.

Goodenough, D. R., Sigman, E., Oltman, P. K., Rosso, J., & Mertz, H. (1979). Eye torsion in response to a tilted visual stimulus. *Vision Res., 19,* 1177-1179.

Graybiel, A. (1952). Oculogravic illusion. *AMA.Arch.Ophthalmol., 48,* 605-615.

Guerraz, M., Luyat, M., Poquin, D., & Ohlmann, T. (2000). The role of neck afferents in subjective orientation in the visual and tactile sensory modalities. *Acta Otolaryngol., 120,* 735-738.

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.

Guerraz, M., Poquin, D., & Ohlmann, T. (1998). The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Percept.Psychophys., 60,* 287-295.

Guerraz, M., Yardley, L., Bertholon, P., Pollak, L., Rudge, P., Gresty, M. A. et al. (2001). Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain, 124,* 1646-1656.

Guest, S. & Spence, C. (2003). What role does multisensory integration play in the visuotactile perception of texture? *Int.J.Psychophysiol., 50,* 63-80.

Hanavan, E. P. Jr. (1964). A mathematical model of human body. *AMRL.TR.,* 1-149.

Helbig, H. B. & Ernst, M. O. (2007). Optimal integration of shape information from vision and touch. *Exp.Brain Res., 179,* 595-606.

Helbig, H. B. & Ernst, M. O. (2008). Visual-haptic cue weighting is independent of modality-specific attention. *J.Vis., 8,* 21-16.

Hillis, J. M., Ernst, M. O., Banks, M. S., & Landy, M. S. (2002). Combining sensory information: mandatory fusion within, but not between, senses. *Science, 298,* 1627-1630.

Howard, I. P. (1982). Human visual orientation. *Londres: Wiley*.

Howard, I. P. (1986). The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In K.R.Booff, J. Thomas, & L. Kaufmann (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance* (Londres: John Wiley.

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

Howard, I. P. & Hu, G. (2001). Visually induced reorientation illusions. *Perception, 30,* 583-600.

Huteau, M. (1987). *Style cognitif et personnalité : la dépendance-indépendance à l'égard du champ*. (Presse Universitaire de Lille ed.).

Inglis, J. T., Kennedy, P. M., Wells, C., & Chua, R. (2002). The role of cutaneous receptors in the foot. *Adv.Exp.Med.Biol., 508,* 111-117.

Isableu, B., Gueguen, M., Fourre, B., Giraudet, G., & Amorim, M. A. (2008). Assessment of visual field dependence: comparison between the mechanical 3D rod-and-frame test developed by Oltman in 1968 with a 2D computer-based version. *J.Vestib.Res., 18,* 239-247.

Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Exp.Brain Res., 114,* 584-589.

Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., & Amblard, B. (2003). Differential approach to strategies of segmental stabilisation in postural control. *Exp.Brain Res., 150,* 208-221.

Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., Vuillerme, N., Amblard, B., & Gresty, M. A. (2010). Individual differences in the ability to identify, select and use appropriate frames of reference for perceptuo-motor control. *Neuroscience, 169,* 1199-1215.

Isableu, B., Rezzoug, N., Mallet, G., Bernardin, D., Gorce, P., & Pagano, C. C. (2009). Velocity-dependent changes of rotational axes in the non-visual control of unconstrained 3D arm motions. *Neuroscience, 164,* 1632-1647.

Isableu, B. & Vuillerme, N. (2006). Differential integration of kinaesthetic signals to postural control. *Exp.Brain Res., 174,* 763-768.

Ito, Y. & Gresty, M. A. (1996). Shift of subjective reference and visual orientation during slow pitch tilt for the seated human subject. *Brain Res.Bull., 40,* 417-421.

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

Jeka, J., Oie, K. S., & Kiemel, T. (2000). Multisensory information for human postural control: integrating touch and vision. *Exp.Brain Res., 134,* 107-125.

Kaptein, R. G. & Van Gisbergen, J. A. (2005). Nature of the transition between two modes of external space perception in tilted subjects. *J.Neurophysiol., 93,* 3356-3369.

Kato, N. (1965). A fundamental study of the Rod-and-Frame Test. *Japanese psychological Research, 7,* 61-88.

Kennedy, P. M. & Inglis, J. T. (2002). Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole. *J.Physiol, 538,* 995-1002.

Kennett, S., Eimer, M., Spence, C., & Driver, J. (2001). Tactile-visual links in exogenous spatial attention under different postures: convergent evidence from psychophysics and ERPs. *J.Cogn Neurosci., 13,* 462-478.

Kiemel, T., Oie, K. S., & Jeka, J. J. (2002). Multisensory fusion and the stochastic structure of postural sway. *Biol.Cybern., 87,* 262-277.

Kluzik, J., Horak, F. B., & Peterka, R. J. (2005). Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface. *Exp.Brain Res., 162,* 474-489.

Knill, D. C. & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends Neurosci., 27,* 712-719.

Kording, K. P. & Wolpert, D. M. (2004a). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature, 427,* 244-247.

Kording, K. P. & Wolpert, D. M. (2004b). The loss function of sensorimotor learning. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A, 101,* 9839-9842.

Kording, K. P. & Wolpert, D. M. (2006). Bayesian decision theory in sensorimotor control. *Trends Cogn Sci., 10,* 319-326.

Kwon, Y. (2002). Flexibility of the experimental simulation approach to the analysis of human airborne movements: body segment parameter estimation. *International Research in Sport Biomechanics,* 44-55.

Lackner, J. R. & Dizio, P. (2000). Artificial gravity as a countermeasure in long-duration space flight. *J.Neurosci.Res., 62,* 169-176.

Ladavas, E., Pavani, F., & Farne, A. (2001). Auditory peripersonal space in humans: a case of auditory-tactile extinction. *Neurocase., 7,* 97-103.

Lederman, S. J., Thorne, G., & Jones, B. (1986). Perception of texture by vision and touch: multidimensionality and intersensory integration. *J.Exp.Psychol.Hum.Percept.Perform., 12,* 169-180.

Lee, D. N. & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics, 15,* 529-532.

Lee, D. N. & Lishman, R. (1975). Visual porprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Study, 1,* 87-95.

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

Lopez, C., Lacour, M., Magnan, J., & Borel, L. (2006). Visual field dependence-independence before and after unilateral vestibular loss. *Neuroreport, 17,* 797-803.

Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T. R., & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation: body and head tilt effects on the oblique effect. *Percept.Psychophys., 63,* 541-554.

Luyat, M., Ohlmann, T., & Barraud, P. A. (1997). Subjective vertical and postural activity. *Acta Psychol.(Amst), 95,* 181-193.

Macaluso, E. & Driver, J. (2001). Spatial attention and crossmodal interactions between vision and touch. *Neuropsychologia, 39,* 1304-1316.

MacNeilage, P. R., Banks, M. S., Berger, D. R., & Bulthoff, H. H. (2007). A Bayesian model of the disambiguation of gravitoinertial force by visual cues. *Exp.Brain Res., 179,* 263-290.

Marendaz, C. (1989). Selection of reference frames and the 'vicariance' of perceptual systems. *Perception, 18,* 739-751.

Mattingley, J. B., Driver, J., Beschin, N., & Robertson, I. H. (1997). Attentional competition between modalities: extinction between touch and vision after right hemisphere damage. *Neuropsychologia, 35,* 867-880.

Maurer, C., Mergner, T., Bolha, B., & Hlavacka, F. (2000). Vestibular, visual, and somatosensory contributions to human control of upright stance. *Neurosci.Lett., 281,* 99-102.

Maurer, C. & Peterka, R. J. (2005). A new interpretation of spontaneous sway measures based on a simple model of human postural control. *J.Neurophysiol., 93,* 189-200.

McGuire, L. M. & Sabes, P. N. (2009). Sensory transformations and the use of multiple reference frames for reach planning. *Nat.Neurosci., 12,* 1056-1061.

Merabet, L. B., Hamilton, R., Schlaug, G., Swisher, J. D., Kiriakopoulos, E. T., Pitskel, N. B. et al. (2008). Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch. *PLoS.One., 3,* e3046.

Meredith, M. A., Nemitz, J. W., & Stein, B. E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *J.Neurosci., 7,* 3215-3229.

Mittelstaedt, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften, 70,* 272-281.

Muller, G. E. (1916). Uber das Aubertsche Phänomen. *Zeitschrift für Sinnesphysiologie, 49,* 109-244.

Musolino, M. C., Loughlin, P. J., Sparto, P. J., & Redfern, M. S. (2006). Spectrally similar periodic and non-periodic optic flows evoke different postural sway responses. *Gait.Posture., 23,* 180-188.

Nyborg, H. (1974). A method for analysing performance in the rod and frame test. *Scandinavian Journal of Psychology, 15,* 119-132.

Ohlmann, T. (1985). Variabilité intra-individuelle et dépendance-indépendance à l'égard du champ visuel. In J.Drevillon, M. Huteau, F. Longeot, M. Moscato, & T. Ohlmann (Eds.), *Fontionnement cognitif et individualité* (pp. 185-229). **Mardaga,P.**

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

Ohlmann, T. (1990). Evocabilité différentielle des référentiels spatiaux, posture et orientation spatiale. In V.Nougier & J. P. Blanchi (Eds.), *Pratiques sportives et modélisation du geste* (pp. 215-240). Grenoble.

Ohlmann, T. (1995). Processus vicariants et théorie neutraliste de l'évolution : une nécessaire convergence. In J.Lautrey (Ed.), *Universel et Différentiel en Psychologie* (Presses Universitaires de France ed., pp. 77-105). Paris.

Ohlmann, T. & Brenet, F. (1990). Les bases posturales de la dépendance-indépendance à l'égard du champ visuel. *Psychologie et Education, 2,* 35-73.

Ohlmann, T. & Chassouant, N. (1989). Incidence des perturbations gravito-inertielles et visuelles sur l'effet-Aubert visuel. Ref Type: Personal Communication

Ohlmann, T., Cian, C., & Mendelsohn, P. (1984). Caractéristiques des mouvements oculaires lors d'une tâche de découverte de la verticale dans un contexte perturbateur. Ref Type: Unpublished Work

Ohlmann, T. & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection/control of frames of reference and spatial aspects of field dependence-independence. In S.Wapner & J. Demick (Eds.), *Field dependence-independence: Cognitive style across the life Span* (pp. 105-129). Publisher Hillsdale New Jersey.

Oie, K. S., Kiemel, T., & Jeka, J. J. (2001). Human multisensory fusion of vision and touch: detecting non-linearity with small changes in the sensory environment. *Neurosci.Lett., 315,* 113-116.

Oie, K. S., Kiemel, T., & Jeka, J. J. (2002). Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Brain Res.Cogn Brain Res., 14,* 164-176.

Oltman, P. K. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. *Percept.Mot.Skills, 26,* 503-506.

Oruc, I., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2003). Weighted linear cue combination with possibly correlated error. *Vision Res., 43,* 2451-2468.

Pagano, C. C. & Turvey, M. T. (1995). The inertia tensor as a basis for the perception of limb orientation. *J.Exp.Psychol.Hum.Percept.Perform., 21,* 1070-1087.

Pantev, C., Engelien, A., Candia, V., & Elbert, T. (2001). Representational cortex in musicians. Plastic alterations in response to musical practice. *Ann.N.Y.Acad.Sci., 930,* 300-314.

Peterka, R. J. (2003). Simplifying the complexities of maintaining balance. *IEEE Eng Med.Biol.Mag., 22,* 63-68.

Pinsault, N., Fleury, A., Virone, G., Bouvier, B., Vaillant, J., & Vuillerme, N. (2008). Test-retest reliability of cervicocephalic relocation test to neutral head position. *Physiother.Theory.Pract., 24,* 380-391.

Pinsault, N. & Vuillerme, N. (2009). Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Med.Eng Phys., 31,* 276-286.

Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences interindividuelles. *Journal de Psychologie, 2,* 133-145.

Riccio, G. E., Martin, E. J., & Stoffregen, T. A. (1992). The role of balance dynamics in the active perception of orientation. *J.Exp.Psychol.Hum.Percept.Perform., 18,* 624-644.

Riccio, G. E. & Stoffregen, T. A. (1990). Gravitoinertial force versus the direction of balance in the perception and control of orientation. *Psychol.Rev., 97,* 135-137.

Rock, I. & Victor, J. (1964). Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science, 143,* 594-596.

Roll, J. P., Popov, K., Gurfinkel, V., Lipshits, M., Andre-Deshays, C., Gilhodes, J. C. et al. (1993). Sensorimotor and perceptual function of muscle proprioception in microgravity. *J.Vestib.Res., 3,* 259-273.

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

Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. (2000). Illusions. What you see is what you hear. *Nature, 408,* 788.

Sigman, E., Goodenough, D. R., & Flannagan, M. (1978). Subjective estimates of body tilt and the rod-and-frame test. *Percept.Mot.Skills, 47,* 1051-1056.

Spinelli, D., Antonucci, G., Daini, R., & Zoccolotti, P. (1995). Local and global visual mechanisms underlying individual differences in the rod-and-frame illusion. *Percept.Psychophys., 57,* 915-920.

Stanford, T. R. & Stein, B. E. (2007). Superadditivity in multisensory integration: putting the computation in context. *Neuroreport, 18,* 787-792.

Stein, B. E., Huneycutt, W. S., & Meredith, M. A. (1988). Neurons and behavior: the same rules of multisensory integration apply. *Brain Res., 448,* 355-358.

Stein, B. E. & Meredith, M. A. (1994). *The Merging of the Senses*. Cambridge: MIT Press.

Stocker, A. A. & Simoncelli, E. P. (2006). Noise characteristics and prior expectations in human visual speed perception. *Nat.Neurosci., 9,* 578-585.

Stoffregen, T. A. & Bardy, B. G. (2001). On specification and the senses. *Behav.Brain Sci., 24,* 195-213.

Stoffregen, T. A. & Riccio, G. E. (1988). An ecological theory of orientation and the vestibular system. *Psychol.Rev., 95,* 3-14.

Streepey, J. W., Kenyon, R. V., & Keshner, E. A. (2007). Visual motion combined with base of support width reveals variable field dependency in healthy young adults. *Exp.Brain Res., 176,* 182-187.

Streibel, M. J. & Ebenholtz, S. M. (1982). Construct validity of perceptual style: role of stimulus size in the embedded-figures test and the rod-and-frame test. *Percept.Psychophys., 31,* 128-138.

Thilo, K. V., Guerraz, M., Bronstein, A. M., & Gresty, M. A. (2002). Percept-related changes in horizontal optokinetic nystagmus at different body orientations in space. *Exp.Brain Res., 145,* 215-221.

Tiecks, F. P., Planck, J., Haberl, R. L., & Brandt, T. (1996). Reduction in posterior cerebral artery blood flow velocity during caloric vestibular stimulation. *J.Cereb.Blood Flow Metab, 16,* 1379-1382.

Van Beuzekom, A. D., Medendorp, W. P., & Van Gisbergen, J. A. (2001). The subjective vertical and the sense of self orientation during active body tilt. *Vision Res., 41,* 3229-3242.

van de Langenberg, R., Kingma, I., & Beek, P. J. (2007). Perception of limb orientation in the vertical plane depends on center of mass rather than inertial eigenvectors. *Exp.Brain Res., 180,* 595-607.

van de Langenberg, R., Kingma, I., & Beek, P. J. (2008). The perception of limb orientation depends on the center of mass. *J.Exp.Psychol.Hum.Percept.Perform., 34,* 624-639.

van der Kooij, H., Jacobs, R., Koopman, B., & Grootenboer, H. (1999). A multisensory integration model of human stance control. *Biol.Cybern., 80,* 299-308.

van der Kooij, H., Jacobs, R., Koopman, B., & van der Helm, F. (2001). An adaptive model of sensory integration in a dynamic environment applied to human stance control. *Biol.Cybern., 84,* 103-115.

Vingerhoets, R. A., De, V. M., Van Gisbergen, J. A., & Medendorp, W. P. (2009). Fusion of visual and vestibular tilt cues in the perception of visual vertical. *J.Neurophysiol., 101,* 1321-1333.

Vuillerme, N., Nougier, V., & Prieur, J. M. (2001). Can vision compensate for a lower limbs muscular fatigue for controlling posture in humans? *Neurosci.Lett., 308,* 103-106.

Vuillerme, N., Nougier, V., & Teasdale, N. (2000). Effects of a reaction time task on postural control in humans. *Neurosci.Lett., 291,* 77-80.

Wallace, M. T., Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1998). Multisensory integration in the superior colliculus of the alert cat. *J.Neurophysiol., 80,* 1006-1010.

Wallace, M. T., Wilkinson, L. K., & Stein, B. E. (1996). Representation and integration of multiple sensory inputs in primate superior colliculus. *J.Neurophysiol., 76,* 1246-1266.

Wenderoth, P. & Beh, H. (1977). Component analysis of orientation illusions. *Perception, 6,* 57-75.

Witkin, H. A. (1949). Perception of body position and of the position of the visual field. *Psychological Monographs, 63,* 1-46.

Witkin, H. A. (1950a). Individual differences in ease of perception of embedded figures. *J.Pers., 19,* 1-15.

Witkin, H. A. (1950b). Perception of the upright when the direction of the force acting on the body is changed. *J.Exp.Psychol., 40,* 93-106.

Witkin, H. A. (1952). Further studies of perception of the upright when the direction of the force acting on the body is changed. *J.Exp.Psychol., 43,* 9-20.

Witkin, H. A. & Asch, S. E. (1948a). Studies in space orientation; further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *J.Exp.Psychol., 38,* 762-782.

Witkin, H. A. & Asch, S. E. (1948b). Studies in space orientation; perception of the upright in the absence of a visual field. *J.Exp.Psychol., 38,* 603-614.

Witkin, H. A., Dyk, R. B., Faterson, H. F., Goodenough, D. R., & Karp, S. A. (1962). Psychological Differenciation. *New-York: Wiley*.

Witkin, H. A. & Goodenough, D. R. (1981). Cognitive styles: essence and origins. Field dependence and field independence. *Psychol.Issues,* 1-141.

Witkin, H. A., Lewis, H. B., Hertzman, M., Machover, K., Weissner, B. P., & Wapner, S. (1954). Personality through Perception. *New-York : Harper and Brothers.*.

Yardley, L. (1990). Contribution of somatosensory information to perception of the visual vertical with body tilt and rotating visual field. *Percept.Psychophys., 48,* 131-134.

Young, L. R., Shelhamer, M., & Modestino, S. (1986). M.I.T./Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 2. Visual vestibular tilt interaction in weightlessness. *Exp.Brain Res., 64,* 299-307.

Zoccolotti, P., Antonucci, G., Goodenough, D. R., Pizzamiglio, L., & Spinelli, D. (1992). The role of frame size on vertical and horizontal observers in the rod-and-frame illusion. *Acta Psychol.(Amst), 79,* 171-187.

Zoccolotti, P., Antonucci, G., & Spinelli, D. (1993). The gap between rod and frame influences the rod-and-frame effect with small and large inducing displays. *Percept.Psychophys., 54,* 14-19.

Zoccolotti, P. & Oltman, P. K. (1978). Field dependence and lateralization of verbal and configurational processing. *Cortex, 14,* 155-163.

Zupan, L. H., Peterka, R. J., & Merfeld, D. M. (2000). Neural processing of gravito-inertial cues in humans. I. Influence of the semicircular canals following post-rotatory tilt. *J.Neurophysiol., 84,* 2001-2015.

Titre : Intégration multisensorielle et variabilité interindividuelle.

Résumé : Tout individu extrait de ses informations sensorielles des invariants directionnels lui permettant de percevoir sa propre situation spatiale ainsi que celle des objets qui l'entourent. Dans les situations habituelles, les traitements relatifs à l'orientation spatiale s'effectuent à partir de référentiels relativement redondants. Cette redondance autorise à la fois la mise en place d'une sensibilité individuelle préférentielle à l'égard d'un de ces référentiels ainsi qu'une large flexibilité dans le choix du référentiel. Lors de ce travail nous avons voulu tester deux hypothèses principales. La 1ère est que les différences interindividuelles observées lors de tâches de perception d'orientation spatiales dépendent du choix du référentiel. La 2nd hypothèse est que l'un des facteurs explicatifs de la variabilité interindividuelle lors de tâches de perception d'orientation spatiale se situe au niveau des règles d'intégration multisensorielle utilisées par les individus. Les résultats montrent que l'ensemble des cadres de références semblent pris en compte par les individus rejetant ainsi la 1ère hypothèse selon laquelle les différences interindividuelles s'expliqueraient par la capacité de certains sujets à exploiter le "bon" cadre de référence. Les résultats montrent que l'un des facteurs explicatifs des différences interindividuelles se situe dans la manière dont le système nerveux central combinerait les différentes informations, certains sujets (DC) semblant incapables de minimiser l'influence des "mauvais" cadre de référence (les moins appropriés, les plus biaisés) en diminuant leur poids respectifs.

Mots-clés : intégration multisensorielle, variabilité interindividuelle, référentiel spatial

Title: Multisensory integration and interindividual variability.

Abstract: Each person extract from sensory information directional invariant which allow him to perceive his spatial situation as well as those of objects surround him. In usual situations, processing relative to spatial orientation is carried out from relatively redundant reference. This redundancy allows both the setting up of preferential individual sensibility regarding those reference and important flexibility in choice of reference. Durant this work, we tested two main hypotheses. The first one is that observed interindividual differences during spatial orientation perception task depend on reference choice. The second one is that one of explanatory factors of interindividual differences during spatial orientation perception task be set in multisensory integration rules level used by the person. Results show that all frame of reference seem to consider by the people rejecting the first hypothesis according to which interindividual differences be explained by the ability of some subjects to exploit the "good" frame of reference. Results show that one of explanatory factors of interindividual differences is set in the way of central nervous system combine several information, some subjects (DC) seems unable to minimize "wrong" frame of reference influence (the least appropriate, the most biased) by reducing respective weight.

Key-words: multisensory integration, interindividual variability, spatial frame of reference