



UNIVERSITÉ DE GENÈVE

**FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE ET DES  
SCIENCES DE L'ÉDUCATION**

SECTION DE PSYCHOLOGIE

**Laboratoire de Psychologie Expérimentales des Perceptions**

40 bd. Du Pont d'Arve | CH-1205 Genève

Tél. 022 705 71 11 | Fax

**Les mouvements oculaires et la localisation  
spatiale lors d'un déplacement**

**Mémoire de licence en psychologie**

**Cyril Rebetez**

Enseignant responsable : **Prof. M. Flückiger**

**B. Baumberger**

Assistante :

**M. Schaub**

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
LES MOUVEMENT OCULAIRES .....	2
<i>Anatomie de l'œil humain</i> .....	3
<i>Les mouvements des yeux</i> .....	6
L'INFORMATION DISPONIBLE DANS L'ENVIRONNEMENT.....	10
<i>La disparité rétinienne</i> .....	10
<i>Les indices oculomoteurs</i> .....	11
<i>Les indices picturaux</i> .....	13
L'APPORT DU MOUVEMENT.....	17
<i>La notion de flux</i> :.....	17
<i>Les différents flux</i> .....	18
<i>L'information contenue dans le flux</i> .....	19
<i>La parallaxe de mouvement</i> .....	21
<i>Les indices basés sur le mouvement des objets</i> .....	23
L'ACTION ET LA PERCEPTION.....	25
<i>Le couplage perceptivo-moteur</i> .....	27
HYPOTHESES THEORIQUES .....	28
<b>METHODE.....</b>	<b>29</b>
POPULATION .....	29
PLAN EXPERIMENTAL.....	29
<i>Variables indépendantes</i> .....	29
<i>Variables dépendantes</i> .....	30
<i>Variables neutralisées</i> .....	30
<i>Variables contrôlées</i> .....	30
HYPOTHESES OPERATIONNELLES .....	31
DESCRIPTION DU MATERIEL .....	32
<i>Le dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires</i> .....	32
<i>Les différentes configurations d'arbres</i> .....	33
<i>La récolte des données</i> .....	34
<i>Matériel supplémentaire</i> .....	34
PROCEDURE .....	35
RECOLTE ET TRAITEMENT DES DONNEES.....	36
<i>Les mouvements oculaires</i> .....	36
<i>La localisation des arbres (erreur en latéral et en profondeur)</i> .....	37

<b>RESULTATS</b> .....	<b>38</b>
LES MOUVEMENTS OCULAIRES.....	38
<i>Les relations entre mouvements oculaires et capacité de localisation</i> .....	39
<i>Les patterns d'exploration oculaire</i> .....	41
LA LOCALISATION DES ARBRES.....	41
<i>Les différences d'erreur selon l'arbre et selon l'axe X ou Y</i> .....	42
<i>L'influence des configurations d'arbres</i> .....	43
ANALYSE PAR CONFIGURATION.....	43
<i>La configuration 0</i> .....	44
<i>La configuration 1</i> .....	47
<i>La configuration 3</i> .....	50
<i>La configuration 5</i> .....	53
<b>DISCUSSION</b> .....	<b>56</b>
DISCUSSION DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS.....	57
<i>La configuration 0</i> .....	57
<i>La configuration 1</i> .....	58
<i>La configuration 3</i> .....	58
<i>La configuration 5</i> .....	59
DISCUSSION GENERALE.....	60
<i>L'importance des jugements de profondeur</i> .....	60
<i>Les mouvements oculaires</i> .....	62
<i>Les configurations</i> .....	65
<i>La locomotion</i> .....	66
CONCLUSION.....	67
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>68</b>

## Résumé

L'exploration spatiale est liée de façon théorique d'une part aux mouvements de la tête et des yeux de et d'autre part au déplacement propre de l'observateur. Cette recherche propose de mettre en valeur l'importance de la façon d'explorer l'espace environnant pour en avoir une représentation précise. Des domaines théoriques tels que l'exploration oculaire, les liens entre perception et action ainsi que la parallaxe de mouvement différentielle (DMP) et les indices en découlant sont articulés dans ce travail. On s'intéresse à l'influence du déplacement actif, et de la liberté de mouvement oculaires des sujets sur leurs capacités de localisation spatiale, en plus de leurs stratégies d'exploration oculaire.

13 sujets (9 hommes et 4 femmes) âgés entre 21 et 54 ans ont participé à l'expérience. Les résultats sont peu significatifs et les mouvements oculaires enregistrés sont peu fiables. Néanmoins une analyse selon les configuration d'arbres a permis de relever l'importance des indices liés à la DMP. Les localisations sont toujours plus précises en profondeur qu'en latéral. Les stratégies d'exploration sont peu différenciées mais vont dans le même sens. Observer un emplacement aide à situer d'autres emplacements.

Les mauvais enregistrements des mouvements oculaires sont dus à un matériel inadapté et les référents du paradigme pourraient induire un effet sur les jugements latéraux. Les résultats de localisation permettent peut-être de discuter le lien entre action et perception selon la posture. Enfin, si le déplacement des participants semble plus important que le déplacement du regard pour la localisation spatiale, l'influence de ce dernier n'est pas à écarter.

(252 mots)

## INTRODUCTION

Qu'est-ce que le monde sinon une succession d'objets, de personnes et de structures positionnées tout autour de nous ? L'animal évolue (dans tous les sens du terme) dans ce monde fait d'éléments plus ou moins complexes, plus ou moins indépendants et plus ou moins mobiles. Au niveau purement optique l'environnement n'est qu'un embrouillamini de lumière sans cesse changeante. Afin d'en tirer de l'information utile, l'animal a développé, au fil de son évolution, un système sensoriel complexe : l'oeil. Ainsi l'être humain peut d'abord capter la lumière grâce à la rétine en décomposer le spectre des couleurs, c'est le rôle des cônes et des bâtonnets (les cellules photoréceptrices). Il peut ensuite diviser la scène qu'il a devant lui en de multiples zones se chevauchant et analyser toutes les informations disponibles dans son champ de vision (grâce aux différents types de cellules présentes encore dans la rétine). De complexes interactions corticales, au niveau des aires visuelles primaires et suivantes, permettent alors d'isoler des éléments séparés puis d'en connaître les caractéristiques, l'usage, et enfin le nom. Mais, identifier les objets environnants n'est de loin pas le seul usage du système visuel. Au contraire, il nous sert avant tout à nous rendre compte de l'espace disponible autour de nous en nous indiquant les positions relatives des différents éléments alentours. Ces positions peuvent être relatives à l'observateur (egocentrées) ou relatives à un autre élément (exocentrées) (Berthoz, 1997).

Cependant, le monde n'est pas statique et notre système visuel nous aide également à identifier les éléments se déplaçant autour de nous. De la même manière, il nous permet d'identifier les éléments alentours, alors que l'on se déplace soi-même autour d'eux. Ainsi, notre système perceptif nous permet de savoir où l'on est, où l'on va, ce qu'il y a autour de nous et comment ceci s'y déplace. La plus grande partie de la perception de notre environnement est donc assurée par le système visuel. Si ce rendre compte de ce fait est aisé, pour ne pas dire trivial, la compréhension des mécanismes sous-jacents fascine les chercheurs depuis plusieurs siècles (Gibson, 1950; Warren, 1998).

Des éléments de réponse se trouvent dans la nature même du monde alentours : les parties de l'environnement sont continues, elles se meuvent de façon cohérente, se masquent, varient en taille et en teinte avec la distance etc. D'autres éléments de réponse sont inhérents au système perceptif lui-même: deux récepteurs permettent une vision stéréoscopique, la scène change en fonction du point d'observation, les récepteurs sont donc capables de bouger. Ce mouvement peut d'ailleurs se faire au niveaux des globes oculaires indépendamment (changement du point

de fixation, poursuite d'un élément au cours du temps), ou au niveau du corps tout entier (déplacement de l'angle de vue, flux visuel, parallaxe de mouvement). Au long des études, de nombreux chercheurs ont donc su identifier autant d'indices, plus ou moins redondants, permettant à l'œil et à l'organisme d'évoluer et d'interagir avec son environnement. Actuellement le défi ne se situe plus tant dans la description d'indices que dans l'identification de ceux réellement importants et pertinents pour une tâche précise. En effet, l'information peut souvent se trouver à plusieurs endroits (il n'y a pas qu'un objet que l'on peut regarder pour savoir dans quelle direction on se déplace) et dans plusieurs indices à la fois (pour un même objet, sa vitesse, sa taille, son ombre ou encore sa netteté peuvent fournir des informations quant à sa distance). Cependant, dans une perspective psychologique, on ne cherche pas à connaître quel élément serait le plus pertinent, mais bel et bien celui qui est réellement utilisé par l'être humain environnement (Gregory, 2000; Rock, 2001; Sekuler & Blake, 1990).

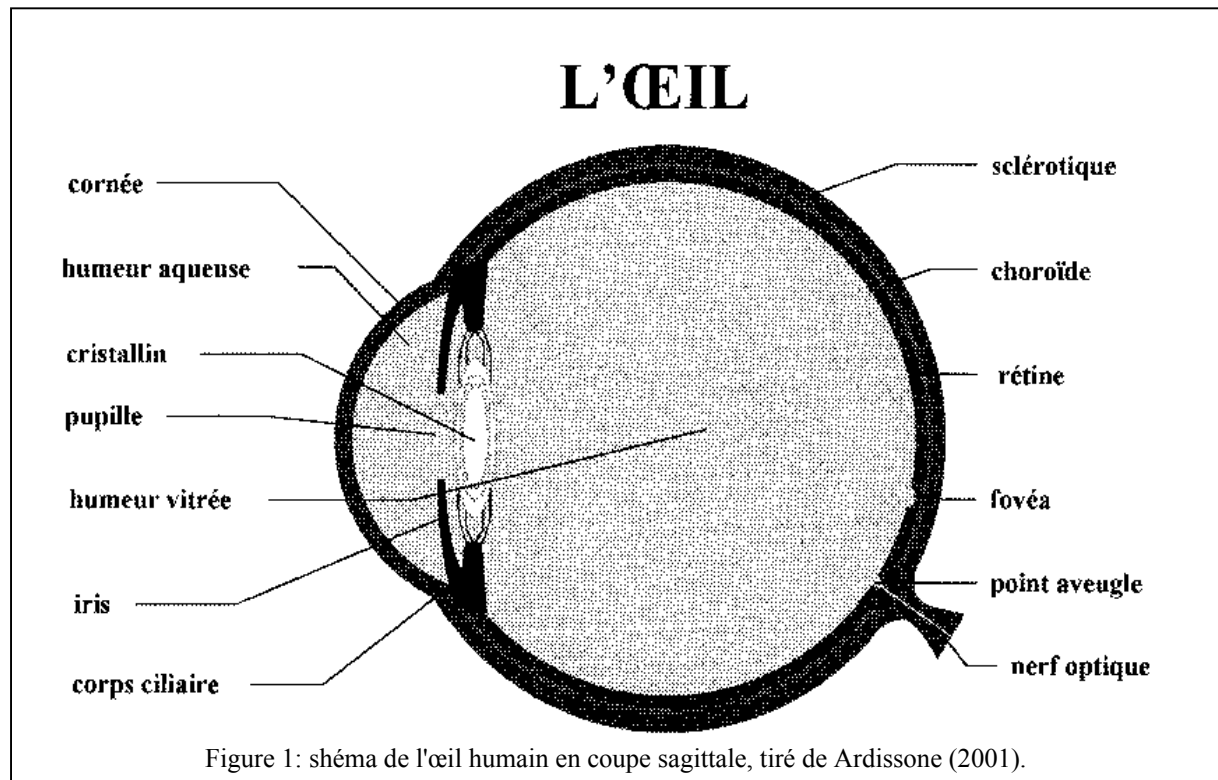
Dans cette perspective, le présent travail cherche à mieux comprendre l'importance du mouvement propre, et plus précisément des mouvements oculaires, dans la perception qu'ont les êtres humains de la position relative ou absolue des éléments environnants. La partie qui va suivre rassemble des faits théoriques concernant les indices sur lesquels se base le cerveau pour avoir une représentation la plus correcte possible de l'environnement.

## ***Les mouvement oculaires***

Regarder autour de soi revient normalement à déplacer son regard entre différents emplacements de l'environnement pour y quérir de l'information. Les récepteurs visuels humains, à savoir les yeux, ont en effet le grand avantage d'être mobiles. Fixer différents endroits, suivre des objets en mouvement ou en déplacement ou encore aller et venir entre des points d'importance diverses est une tâche commune pour l'homme. La question de savoir quelles informations sont récupérées par le système perceptif au cours et grâce à ces mouvements nous intéressera par la suite. Avant cela, un rapide survol de l'anatomie de l'œil est nécessaire. Puis nous passerons en revue les différents types de mouvements oculaires ainsi que leur intérêt et leur utilisation dans différentes tâches.

## Anatomie de l'œil humain

L'œil, au niveau du globe oculaire tel qu'il est représenté dans la figure 1, n'a pour fonction que de capter les rayons lumineux provenant de l'environnement de la façon la plus précise possible, l'information obtenue étant alors transmise aux aires visuelles via le nerf optique. Pour ce faire, il est composé des plusieurs parties distinctes.



### *La rétine*

Il s'agit de la partie sensible à la lumière. La rétine reçoit le stimulus lumineux puis le transforme en potentiels d'action qui sont relayés vers les aires visuelles primaires via le nerf optique, le corps genouillé latéral et les radiations optiques. La rétine se compose de deux types de cellules photoréceptrices, servant à capter les stimuli lumineux (Gregory, 2000; Sekuler & Blake, 1990):

- **Les cônes**, sont les photorécepteurs les plus sensibles, surtout pour une couleur particulière. On en distingue trois sortes en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse (couleur) à laquelle ils sont le plus sensibles (bleu, rouge ou vert). Leur bon fonctionnement nécessite des conditions de luminosité relativement importantes.

- **Les bâtonnets**, sont insensibles à la couleur mais sont efficaces même lors de mauvaises conditions de luminosité (crépuscule, nuit). Ils permettent néanmoins une moins bonne discrimination spatiale que les cônes.

Les cônes et les bâtonnets sont répartis inégalement sur la rétine, on compte en effet 3 millions de cônes pour 100 millions de bâtonnets. Une zone est cependant particulière : la **fovéa**, ou macula qui est le centre de la rétine. A cet endroit, la proportion de cônes est largement plus importante que celle des bâtonnets et la capacité de discrimination spatiale des éléments est nettement meilleure. Ainsi on distingue souvent la vision centrale (centrée sur la fovéa) permettant une excellente précision de l'analyse en terme de formes et de couleurs, de la vision périphérique (comportant une plus large proportion de bâtonnets) plus efficace pour détecter et analyser le mouvement quelle que soient les conditions de luminosité.

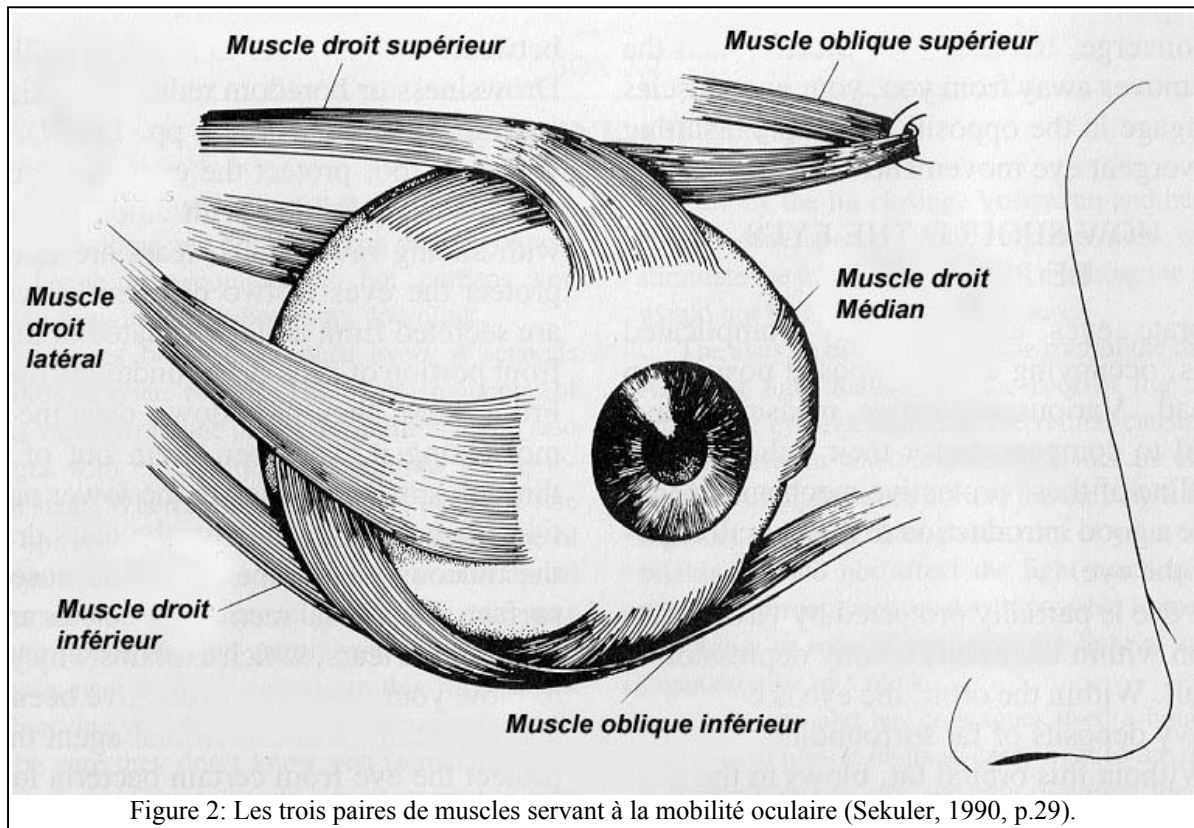
En plus des différents photorécepteurs, la rétine contient trois autres types de cellules servant à relayer et à déjà organiser l'information visuelle. Les cellules réceptrices sont connectées aux **cellules bipolaires** qui relayent les potentiels d'action aux **cellules ganglionnaires** dont les axones se rejoignent pour former le nerf optique. Il est à noter qu'à la base du nerf optique, la rétine ne contient aucun photorécepteur, cette zone est donc aveugle. C'est pourquoi on l'appelle **tache aveugle** ou papille. Les derniers types de cellules présents dans la rétine sont les **cellules horizontales** et les **cellules amacrines**, servant à associer et moduler la transmission entre les trois précédents niveaux de cellules rétinienne (Gregory, 2000; Rock, 2001; Sekuler & Blake, 1990; Yarbus, 1967).

Le **cristallin** est une lentille translucide capable de se densifier en fonction de la distance d'observation pour permettre la mise au point de l'image se projetant sur la rétine. L'indice d'accommodation, décrit plus loin, se base sur ce mécanisme (Gregory, 2000; Rock, 2001; Yarbus, 1967).

Les autres parties de l'œil dénommées dans la figure 1, si elles ont toutes une utilité bien précise quant au fonctionnement de l'appareil optique, ne sont pas d'une grande importance en ce qui concerne les mouvements oculaires.



## Les muscles de l'oeil



Au niveau musculaire, chaque œil est entouré par 3 paires de muscles servant à le faire tourner dans son orbite. Deux paires de muscles principales (les muscles droits supérieur et inférieur, ainsi que les muscles droits médian et latéral) s'attachent sur les côtés du globe oculaire. Les muscles droit supérieur et droit inférieur sont situés respectivement sur le dessus et le dessous de l'œil et permettent une rotation dans le plan sagittal. Les muscles droits médian et latéral sont positionnés sur le globe oculaire respectivement du côté du nez et des oreilles et permettent une rotation dans le plan horizontal. Deux muscles sont encore attachés à chaque œil. Il s'agit des muscles obliques supérieur et inférieur, attachés au globe oculaire respectivement sur le dessus et le dessous mais se dirigeant vers le nez (Gregory, 2000; Sekuler & Blake, 1990; Yarbus, 1967).

## Les mouvements des yeux

Avant de s'intéresser aux mouvements oculaires fonctionnels, Sekuler & Blake (1990) décrivent deux types de mouvements des yeux. Les mouvements conjonctifs sont effectués lorsque les deux yeux se déplacent ensemble dans la même direction. Les mouvements de vergence se produisent quand les yeux se meuvent dans des directions opposées (on distingue convergence et divergence selon que les yeux se dirigent vers le nez ou vers les oreilles).

A un niveau plus fonctionnel, on décrit particulièrement les saccades et les poursuites oculaires. Elles peuvent toutes deux se composer de mouvements des yeux aussi bien conjonctifs que disjonctifs (le plus souvent, il s'agit d'une combinaison des deux). Nous allons également passer en revue types de mouvements oculaires moins importants comme les dérives et les micro-saccades observées lors de fixations.

### *La saccade oculaire*

Une saccade correspond à un changement de la position du regard. Elle se traduit par une rotation des globes oculaires permettant à une nouvelle cible d'être projetée sur la fovéa des deux rétines. Une saccade est très rapide (jusqu'à 800°/s) et donc de très faible durée (50 à 150ms). Il s'agit du mouvement le plus rapide qu'un être humain peut produire. Une saccade sert normalement à changer de point de fixation, donc d'aller chercher de l'information ailleurs dans le champ visuel. Elle n'apporte pas, en elle-même, de l'information au niveau visuel, bien que les rétines et le système visuel fonctionnent toujours normalement pendant son occurrence (Becker, 1991; Berthoz, 1997; Deubel, Findlay, Jacobs, & Brogan, 1988; Kowler, 1990; Vurpillot, 1991; Yarbus, 1967).

Une saccade peut être initiée volontairement par l'observateur, ce sur n'importe quelle cible et à n'importe quel moment (Kowler, 1990). De plus, la saccade est souvent suivie d'un léger glissement, voire d'une autre saccade plus petite après la rotation de l'œil; ceci sert simplement à corriger la position du regard lorsque l'objectif de la saccade n'a pas été atteint. Ce type de mouvement oculaire n'est en effet pas toujours très précis, dans un paradigme où la cible disparaissait pendant la saccade, l'erreur de précision pouvait atteindre 30-50% de la taille du trajet à effectuer (Timberlake, Wyman, Skavenski, & Steinman, 1972 cité par Kowler, 1990). La précision spatiale des saccades est en effet limitée par les mécanismes codant la localisation de l'image. Il a ainsi été montré que le contrôle précis de petites saccades oculaires (moins de 30°) est difficile et montre une plus grande variabilité de

précision que pour des saccades plus importantes (Kowler, 1990). Le système visuel, grâce aux fovéas, est en effet capable d'estimer des distances très précisément dans les 30°, beaucoup plus précisément qu'il n'est capable d'y faire des saccades. En fait ces petites saccades sont difficiles à effectuer et sans réel intérêt pour le système visuel : la résolution spatiale est suffisamment bonne, recentrer la fovéa dans un intervalle si petit n'apporte pas plus d'information (Kowler, 1990).

Les saccades sont utilisées pour l'exploration spatiale. Observer quelque chose revient, au niveau des mouvements oculaires, à fixer son regard en plusieurs endroits bien précis, dans un ordre déterminant. L'œil passe bien évidemment d'un point de fixation à un autre en effectuant des saccades. Yarbus (1967) a relevé que l'observation d'objets stationnaires, comme des images par exemple, se traduit par une suite de saccades et de fixations sur des points-clés de l'objet observé. Le regard se déplace entre les endroits portant le plus d'information. Plus une localisation comporte d'information, plus longue est la fixation qui y est faite. La figure 3 montre bien que des localisation comme les yeux, la bouche, les oreilles ou les contours en général sont plus observés par les sujets. De plus la tâche à effectuer par le sujet lors de l'exploration d'une image

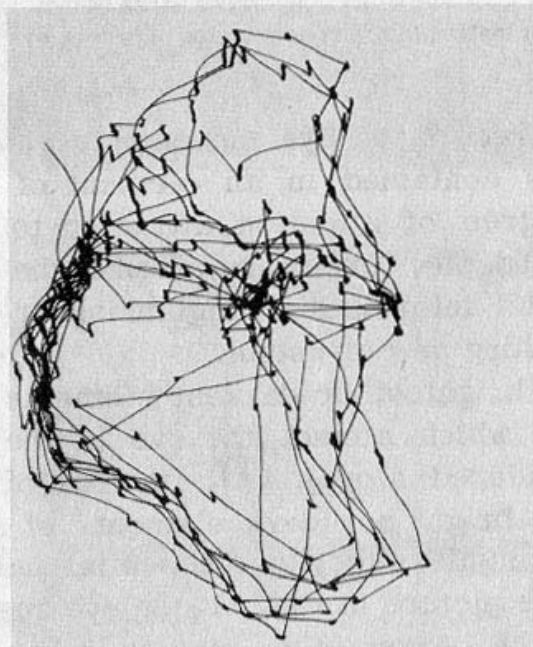
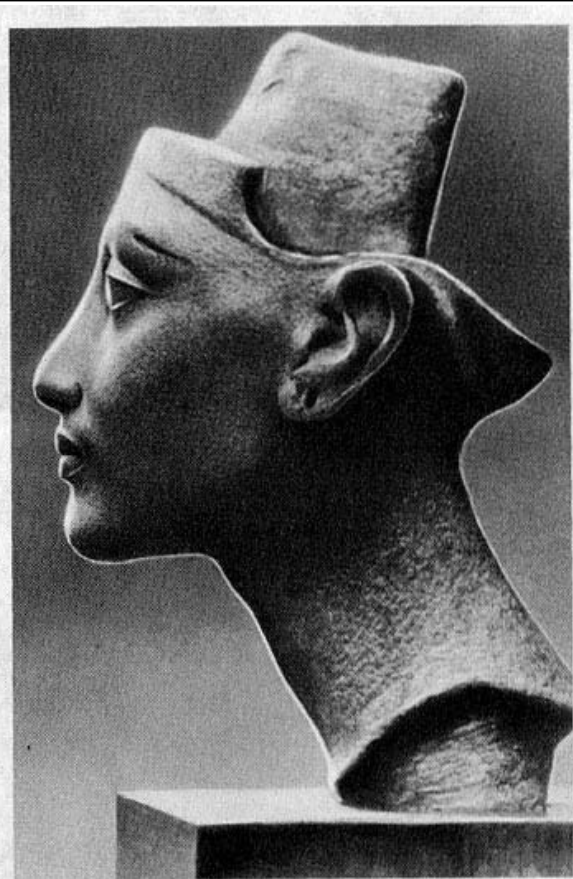


Figure 3: le buste de la reine Nefertiti et le résultat de l'enregistrement des mouvements oculaires d'une observation libre avec les deux yeux pendant 2 minutes (Yarbus, 1967, p.181).

complexe influence grandement la stratégie exploratoire. Ce ne sont pas forcément les mêmes points qui sont fixés et ils ne le sont pas dans le même ordre ni pendant la même durée, selon que le sujet explore librement une image, doit décrire l'activité des personnages ou se souvenir de leurs vêtements ou de leurs sexes. La durée d'exposition au stimulus permet également de différencier les points les plus importants car ceux-ci sont fixés en premier. Deubel et al. (1988) suggèrent que ce sont les régions comportant des discontinuités au niveau de la luminosité, de l'orientation des structures, de la fréquence spatiale ou même d'autres propriétés de textures plus complexes qui montrent le plus de saillance pour les mouvements oculaires. Cette suggestion est en concordance avec les observations de Yarbus (1967) montrant que c'est le pourtour des objets qui est le plus fixé et qui, donc, est le plus porteur d'information (Deubel et al., 1988).

La saccade en elle-même ne semble pas apporter d'information visuelle proprement dite, en tout cas ce n'est pas son utilité. Par contre il a été observé que des neurones du corps genouillé latéral, situé dans le thalamus et relayant l'information rétinienne vers les aires visuelles primaires et suivantes, ont une activité liée à la saccade elle-même. Il semble donc que la commande motrice puisse modifier en quelque manière l'entrée sensorielle, *l'action modifie la perception à sa source* (Berthoz, 1997 p. 221).

### *La poursuite oculaire*

Une poursuite se produit lorsque les yeux continuent à fixer conjointement le même point alors que celui-ci se déplace sur la rétine. Le mouvement d'une cible sur la rétine peut être dû soit au déplacement réel de la cible, soit au déplacement de l'observateur (locomotion, rotation de la tête, etc). Ce type de mouvement est lent et ne peut être initié volontairement en l'absence de déplacement sur la rétine. Le but est de maintenir un point sur la fovéa alors que celui-ci se déplace. La poursuite oculaire réduit effectivement le mouvement d'une cible sur la rétine mais sans néanmoins jamais l'abolir complètement (Kowler, 1990). Puisque le mouvement des yeux est relativement lent, une grande résolution spatiale est conservée et il est toujours possible de tirer de l'information de la cible poursuivie. Bien sûr le mouvement des yeux peut se faire en conjonction comme en disjonction (Yarbus, 1967).

## *La fixation*

Il ne s'agit pas à proprement parler de mouvement oculaire puisque la fixation est l'activité des yeux lorsqu'il restent plus ou moins longtemps positionnés sur le même point. Il s'agit donc de l'activité des yeux lorsque ceux-ci ne bougent pas. A ce moment la cible d'intérêt de l'environnement est reflétée sur la fovéa des deux yeux et peut donc être analysée avec un maximum de discrimination spatiale (Vurpillot, 1991; Yarbus, 1967). Cependant, même pendant une fixation, les yeux continuent de bouger selon trois types de mouvements : la dérive, le tremor et les micro-saccades involontaires.

- La dérive (drift) s'observe comme un déplacement lent et irrégulier des axes optiques indépendamment l'un de l'autre. Néanmoins, on remarque que la dérive des yeux n'est pas complètement aléatoire puisque la cible de la fixation est toujours gardée dans la fovéa.
- Le tremor (tremblement), est un mouvement difficile à observer puisqu'il s'agit d'un mouvement constant et indépendant des yeux, de faible amplitude (20-40 secondes d'angle) mais de haute fréquence (70-90 Hz).
- Les micro-saccades, sont quant à elles de minuscules saccades, semblables pour les deux yeux. Elles peuvent avoir une dimension minimale de 2-5 minutes d'angle et surviennent de façon involontaire.

Ces trois types de mouvements (et surtout la dérive) semblent avoir comme principale utilité d'assurer une variation légère, mais constante, de la stimulation lumineuse sur la rétine. Il a en effet été observé un arrêt de la perception lors de la projection continue de la même stimulation sur la rétine. les photorécepteurs étant toujours mis a contribution de la même manière (avec la même intensité), il s'ensuit une habitude au niveau physiologique, et l'information n'est plus transmise jusqu'au cortex visuel (Kowler, 1990; Yarbus, 1967).

Les mécanismes des mouvements oculaires à présent explicités, nous pouvons nous intéresser aux informations que les yeux captent grâce à leurs caractéristiques, et en particulier à leur mobilité.

## ***L'information disponible dans l'environnement***

Il semble évident que les animaux, humains y compris, doivent être capables d'appréhender la disposition des objets autour d'eux ; leur capacité à se déplacer et même à survivre en dépendent. La recherche en psychologie tente de mettre à jour les différents indices propres à cette tâche. Rock (2001) les a regroupés en quatre catégories : la disparité rétinienne, les indices oculomoteurs, les indices picturaux et les indices de mouvements. Les trois premières catégories vont être exposées ci-après, les indices de mouvements quant à eux feront l'objet de la partie suivante. Pour la plupart des indices perceptifs présentés-ci après, Cutting et Vishton (1995) ont déterminé leur pertinence et leur capacité de discrimination en fonction de la distance de l'objet. Les limites de chaque indice sont donc explicitées ici et seront reprises plus loin à un niveau plus général.

### **La disparité rétinienne**

L'être humain dispose de deux yeux. Ceux-ci n'étant pas situés exactement au même endroit (ils sont positionnés en moyenne à 6cm l'un de l'autre), ils ont donc chacun un point de vue différent de la scène visuelle. La disparité rétinienne est l'indice se basant sur cette différence. On appelle *vision stéréoscopique* la perception tridimensionnelle basée sur la disparité rétinienne. Elle permet une estimation absolue et égocentrée de la distance des éléments. De nombreuses techniques ont été mises au point afin de permettre de percevoir la profondeur à l'aide de cet indice sur des supports photographiques, picturaux ou cinématographiques. Les stéréogrammes, ou encore les films utilisant des lunettes polarisées ou bicolores sont des exemples de ces techniques (Gregory, 2000; Rock, 2001).

La vision stéréoscopique perd de sa pertinence avec la distance d'observation car les différences entre les images arrivant dans les deux yeux s'amenuisent rapidement (avec le carré de la distance). Cutting et Vishton (1995) se sont intéressés à la pertinence de cet indice et montrent qu'il n'est raisonnablement utilisable que dans les 20 mètres. De plus, les performances varient beaucoup avec les sujets car tous n'ont pas la même sensibilité stéréoscopique, les cas de faiblesse voire d'absence de vision binoculaire liés à la dominance d'un œil sur l'autre sont effectivement fréquents (Sekuler & Blake, 1990).

## Les indices oculomoteurs

Il s'agit des indices basés sur les informations de profondeur donnés par les yeux sans prendre en compte les images projetées sur la rétine. On les appelle oculomoteurs car ils dépendent des mouvements des yeux. On distingue deux indices oculomoteurs :

### 1. La convergence

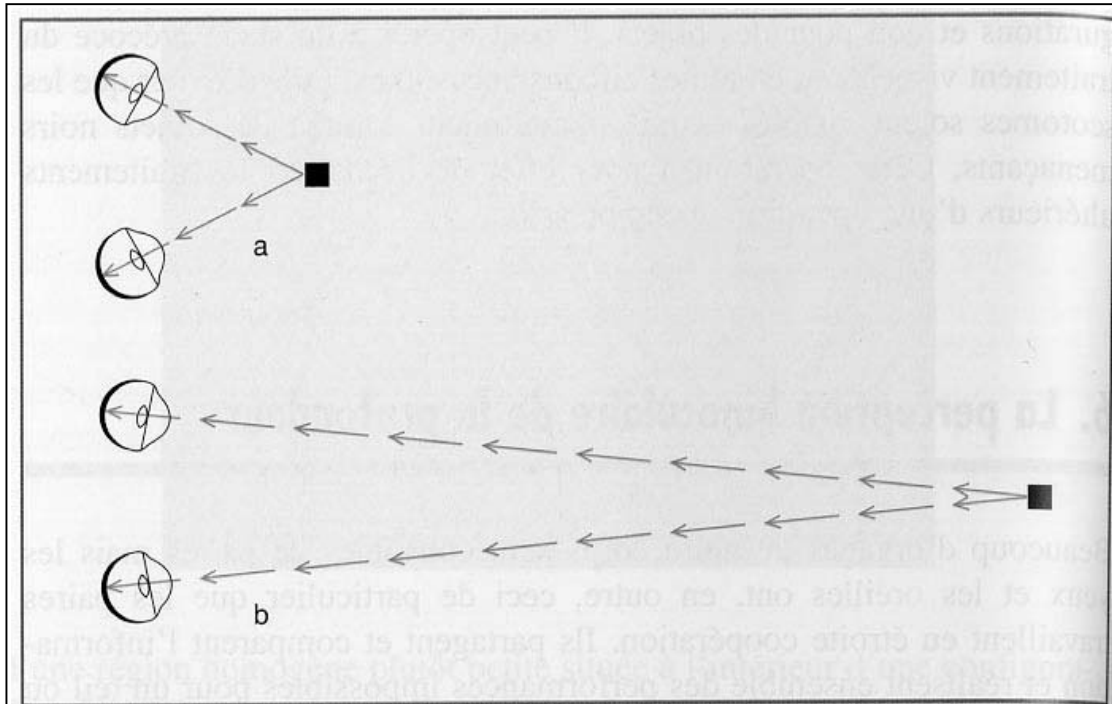


Figure 4: selon que l'objet fixé est proche (a) ou plus lointain (b), les yeux ne forment pas le même angle de convergence (tiré de Gregory, 1998, p.82).

Cet indice est binoculaire et se base sur le fait que les yeux bougent dans leur orbite de façon qu'un même objet se projette sur des points correspondants des deux rétines (voir la figure 4). Ainsi les yeux forment un angle d'autant plus grand que l'objet fixé est proche. La prise en compte de cet angle (disponible à partir des récepteurs proprioceptifs des muscles oculaires ainsi que dans la copie éférente) permet de déterminer la distance de l'objet observé (estimation absolue et egocentrée). Cependant, à partir d'une distance de 6m environ, l'angle de convergence est trop petit pour être utilisable (les yeux regardent tous deux droit devant), cet indice est donc limité (Cutting & Vishton, 1995; Sekuler & Blake, 1990).

## *2. L'accommodation*

Afin que l'image sur la rétine reste toujours nette, le cristallin de l'œil change son épaisseur et sa densité de façon réflexe. La connaissance de ces éléments par le système perceptif permet de déterminer d'une part la profondeur de l'objet fixé; et d'autre part la distance, en profondeur, des autres objets par rapport au premier, en fonction de leur degré de flou. Il s'agit donc dans ce cas d'une série d'estimations de distances absolues et egocentrées. Néanmoins cet indice n'est efficace que pour de petites distances (1 mètre au maximum), de plus son efficacité décroît beaucoup avec l'âge (à cause de l'augmentation de la presbytie) (Cutting & Vishton, 1995; Rock, 2001).

Ces deux indices, la convergence et l'accommodation, sont très fortement liés : lorsqu'un sujet observe un stimulus avec un seul œil, le cristallin s'accommode automatiquement mais l'autre œil (pourtant fermé) s'oriente néanmoins de façon que les deux yeux convergent toujours vers le même point (Sekuler & Blake, 1990). C'est pourquoi ces deux indices sont généralement étudiés ensemble et regroupés sous le terme d'indices oculomoteurs. Ils semblent utilisables pour des distances inférieures à 3.5m (Rock, 2001), mais d'autres auteurs n'assument leur pertinence que pour des distances inférieures au mètre (Cutting & Vishton, 1995).



## Les indices picturaux

On regroupe sous ce terme les indices utilisés par les artistes, surtout depuis la Renaissance, pour représenter la profondeur sur une surface bidimensionnelle. Ces indices sont suffisamment précis pour fournir des informations relatives, si ce n'est absolues, quant aux distances entre les éléments de la scène. Il s'agit d'indices monoculaires statiques car l'observateur en dispose déjà même s'il ne se sert que d'un œil et qu'il ne se déplace pas (comme pour une photographie). On distingue quatre types d'indices picturaux : l'occlusion, la perspective, les ombres et la taille familière.

### *1. L'occlusion*

Aussi dénommé interposition ou recouvrement partiel, cet indice stipule qu'un élément en recouvrant ou en obscurcissant un autre est forcément situé devant celui-ci. Des estimations de distances relatives et exocentrées sont ainsi possibles. Il s'agit d'un indice très puissant. D'une part, parce qu'il est immédiatement pris en compte et qu'il peut prendre le pas sur d'autres indices (Gregory, 2000; Rock, 2001). D'autre part, parce qu'il est cohérent et fournit une indication sûre à n'importe quelle distance d'observation. En fait, tant qu'il est possible pour le système visuel, de percevoir quelque chose, l'occlusion est efficace pour donner des indications sur la profondeur relative des objets (Cutting & Vishton, 1995). Il semble même qu'il s'agisse du premier indice utilisé par les nourrissons : à 7 mois déjà les enfants peuvent appréhender des distances relatives sur la base de l'occlusion (Sekuler & Blake, 1990).

### *2. La perspective*

On se réfère ici aux changements d'apparence des objets avec la distance d'observation, on y distingue un grand nombre d'éléments (Gregory, 2000; Rock, 2001):

**La perspective aérienne :** les objets lointains sont perçus plus difficilement, ils sont bleutés et effacés. Cet effet est dû à la densité de l'atmosphère et à ses impuretés qui masquent les éléments les plus éloignés. Cet indice ne permet cependant pas d'effectuer des jugements quant à la distance absolue d'objets car l'effet dépend trop des conditions atmosphériques, par contre il peut servir à des jugements de distance relative entre deux éléments. Son efficacité n'apparaît qu'à grande distance (au delà du kilomètre) mais peut s'approcher lors d'une densité atmosphérique plus forte (dans les 100m par brouillard, moins sous l'eau) (Cutting & Vishton, 1995).

**Hauteur dans le champ visuel** : des objets plus lointains ont leur base située plus proche de la ligne d'horizon. Cela signifie, pour des objets au sol, qu'un objet plus éloigné semblera posé plus haut sur le sol qu'un autre, plus proche. On peut donc s'en servir pour des estimations de distance relatives. Cet indice, s'il est disponible à partir de quelques mètres déjà, perd de son efficacité avec la distance. Car, plus les objets sont lointains, moins leur différence de hauteur sera importante pour une même distance relative. A grande distance, il devient impossible de distinguer des écarts sur cette base. Bien sûr, si le sol n'est pas plat, cet indice peut être grandement influencé voire devenir inutilisable (Cutting & Vishton, 1995).

**Taille et densité relative** : pour deux objets de même taille réelle, le plus éloigné sera plus petit que l'autre sur la rétine. Il en va de même pour la densité de la texture d'une surface qui sera plus compacte à une plus grande distance. Des estimations de distances relatives ou absolues peuvent ainsi être effectuées. Cet indice est également fiable quelque soit la distance à laquelle se situent les objets, cependant dans la nature il est rare que deux éléments aient réellement la même taille, des erreurs peuvent donc se produire (Cutting & Vishton, 1995).

**Le gradient de texture** : la plupart des surfaces des objets ont une texture, les surfaces qui s'éloignent ont une texture qui se densifie progressivement avec la distance. De plus, des changements abruptes dans la texture signalent des angles ou des coins (Gibson, 1950). Néanmoins cet indice peut être interprété comme la variation en taille des multiples éléments répétitifs qui constituent la texture. Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'un indice à part entière et serait une sous catégorie de l'indice de taille et de densité relative. il posséderait donc les mêmes caractéristiques (Cutting & Vishton, 1995 ; Rock, 2001).

**La perspective linéaire** : illustre le fait que des lignes parallèles s'éloignant dans l'environnement se projettent sur la rétine en convergeant. La notion de point de fuite en dessin technique et artistique en découle (Rock, 2001). Cependant, de la même manière que pour l'indice précédent, la perspective linéaire est, pour certains auteurs, un cas particulier de l'indice de taille et de densité relative (Cutting & Vishton, 1995).

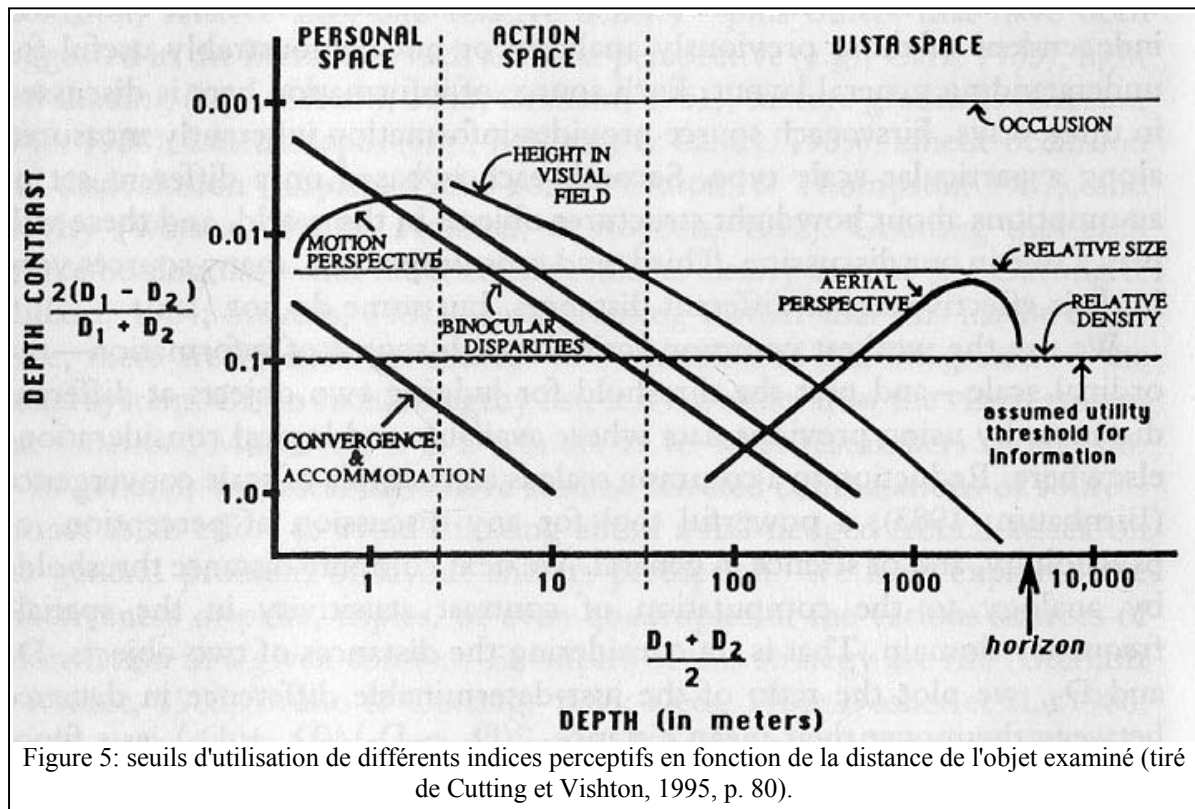
### **3. Les ombres**

Les surfaces planes ne projettent pas d'ombre, la présence d'une ombre trahit donc la présence d'un relief. Le système visuel associe immédiatement une surface plus sombre à une ombre et donc à un objet tridimensionnel, d'une taille proportionnelle à celle-ci, dans la direction de la source lumineuse (Sekuler & Blake, 1990). Un simple gradient d'intensité peut provoquer une impression d'ombrage et induire une impression de relief dans un dessin. Cependant, le stimulus peut parfois être ambigu : une dépression ou une élévation provoquent toutes deux une ombre d'un côté ou de l'autre. Seule la connaissance de la position de la source de lumière peut parfois nous permettre de savoir ce qui est creux et ce qui est bosse. Toutefois, lorsque cette information n'est pas disponible, l'homme interprète systématiquement la figure en considérant que la lumière vient d'en haut (comme dans sa vie de tous les jours) (Rock, 2001). L'ombre permet également de déterminer si un objet est posé sur le sol (ombre attachée) ou en l'air (ombre portée) et, dans ce dernier cas, à quelle profondeur se situe l'objet ne touchant pas le sol.

### **4. La taille familière.**

Comme la taille des objets sur la rétine décroît proportionnellement à leur éloignement, on peut penser qu'il est possible d'estimer la distance d'un objet sur la base de sa taille angulaire et de la connaissance de ses dimensions réelles. Dans le cas d'un objet peu familier, la présence d'un autre, connu, à proximité peut servir à déterminer sa taille et, de la même manière, sa distance au niveau absolu (Sekuler & Blake, 1990). Néanmoins, la taille familière pourrait bien être plus un jugement intellectuel qu'un véritable indice. En effet, qu'un objet soit si grand qu'il semble réellement proche n'implique pas qu'il soit perçu ainsi. De plus, le travail de réflexion et de comparaison sous-jacent à l'estimation de distance sur la base de cet indice semble plus cognitif que purement perceptif (Rock, 2001).

Signalons encore que si tous les indices cités précédemment sont bel et bien porteurs d'information sur la disposition des objets dans l'espace, tous n'ont pas la même pertinence, ni la même précision. En effet, si certains peuvent théoriquement donner des informations de distance absolue à n'importe quelle profondeur (taille et densité relative, taille familière), il n'en va pas de même pour tous.



Cutting et Vishton (1995) ont entrepris de comparer la pertinence et l'apport relatif de tous ces indices. Il ressort de leur étude (voir figure 5) que certains indices sont effectivement plus informatifs, plus fiables que d'autres, utilisables à toutes les distances, fournissant des informations relatives ou absolues et que certains ne sont que l'expression de cas particuliers d'autres indices (voir plus haut pour la perspective linéaire et le gradient de texture). Néanmoins ces auteurs soulignent l'importance de la redondance d'information: les animaux et les êtres humains doivent toujours être capable de percevoir la disposition de leur environnement. L'absence, l'ambiguïté d'une source à un moment donné doit pouvoir être compensé immédiatement par un ou plusieurs autres indices. De plus, La présence simultanée de plusieurs sources d'information renforce leur contraste et peut mener à des estimations de distance plus précises, voire toujours absolues.

## ***L'apport du mouvement***

Nous n'avons étudié jusqu'ici que les indices visuels disponibles lorsque l'observateur ne se déplace pas. Il se trouve que lors du déplacement d'autres éléments entrent en jeu et peuvent donner de nouvelles informations quant à la position des objets dans l'espace, et également quant à la direction de déplacement du sujet. La description systématique de l'effet du déplacement d'un observateur sur sa scène visuelle est due en premier lieu à Helmholtz à la fin du XIXe (Helmholtz, 1991), puis à Gibson (Gibson, 1950 ; Gibson, 1979). Ces travaux sont restés célèbres et ont permis de mettre en évidence ce que l'on appelle le flux visuel.

### La notion de flux :

Dans le cadre de son travail pour l'US Air Forces, Gibson tenta de décrire quels étaient les indices visuels qu'utilisaient les pilotes de l'air pour atterrir. Il formula ces indices en termes de gradients optiques produits par des configurations d'objets se déplaçant sur une surface plane. Il s'est penché sur un gradient en particulier : celui de la déformation de la scène visuelle sur la rétine durant le mouvement de l'observateur (Gibson, 1950), gradient qu'il baptisa « flux ». Il avait remarqué que l'image prise depuis le devant d'un avion est déformée de manière systématique lorsqu'elle est projetée sur un écran plane. En traçant les vecteurs des déplacements des objets sur l'image, on obtient un pattern du flux. Ce pattern représente le flux comme un champ de vitesse à deux dimensions, dans lequel chaque vecteur correspond à une vitesse optique et à une direction de déplacement d'un élément de l'environnement.

Gibson s'aperçut que ce flux était porteur d'informations sur le déplacement propre de l'observateur. L'image, projetée devant des sujets naïfs, procurait une impression de déplacement vers un point précis. Ce dernier, duquel semblent provenir tous les vecteurs du flux, est appelé focus d'expansion (FOE), et spécifie le point vers lequel l'observateur se dirige.

Parmi les remarques émises par Gibson au sujet du flux, il mentionne qu'une poursuite oculaire peut déformer le flux rétinien car celle-ci ajoute une constante au déplacement de chaque point dans l'image. Cependant, le gradient du déplacement rétinien reste inchangé, permettant tout de même à l'observateur de connaître son mouvement. Ainsi, la direction de déplacement (qu'on appelle le heading) peut être déterminée par ce gradient malgré que l'œil effectue une rotation. Le flux rétinien peut dès lors se révéler des plus utiles, en particulier

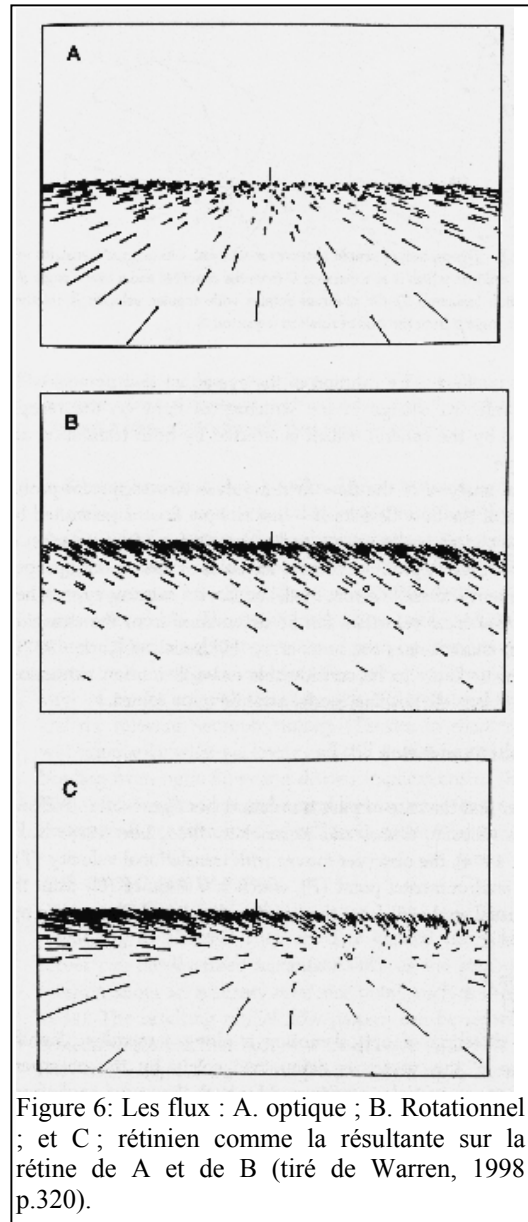
dans le contrôle de l'action. Il est l'un des exemples les mieux décrits de la causalité circulaire entre la perception et l'action : le flux est utilisé pour guider le mouvement et le mouvement résultant, produit des changements dans le flux rétinien. Nous reviendrons sur les rapports entre perception et action dans la partie qui leur est consacrée.

### Les différents flux

N'importe quel déplacement curvi-linéaire d'un observateur peut être décrit comme la somme d'une translation et d'une rotation depuis un point de référence arbitraire, par exemple l'œil lui-même (Whittaker 1944, cité par Warren, 1998). La composante **translationnelle** ou radiale est proche du flux optique (figure 6), car elle se réfère au changement dans la structure d'une zone optique, depuis un point d'observation en mouvement qui n'est pas affecté par la rotation de l'œil. Ce qui se traduit par un éloignement des points de l'environnement, dans toutes les directions, depuis le focus d'expansion. A ce flux optique s'ajoute un flux **rotationnel**, induit par le mouvement de rotation des yeux et de la tête. Ce qui est perçu sur la rétine de l'observateur correspond au flux rétinien, somme du flux optique et du flux rotationnel (voir la figure 1). D'où la formule désormais classique :

Flux rétinien = flux optique + flux rotationnel

(Cutting, Springer, Barren, & Johnson, 1992)



## L'information contenue dans le flux

Nous l'avons vu, le fait qu'un observateur se déplace induit un flux. Ce flux est produit par le déplacement des différents éléments de l'environnement sur la rétine. La manière dont ces éléments se déplacent dépend de leur position dans l'espace. Prendre en compte le déplacement d'un objet spécifique dans le flux peut donc permettre de déterminer sa distance. En effet, plus un élément est situé loin de l'observateur, moins son déplacement sur la rétine sera important. Un élément se déplaçant plus vite qu'un autre est donc situé plus près. Déterminer la position des objets grâce aux flux visuel revient donc à prendre en compte la taille des vecteurs du flux, Gibson a appelé cet indice **perspective de mouvement**.

D'autre part, la direction de déplacement (heading), en cas de translation pure (comme dans la figure 6.A), est déterminé uniquement par l'excentricité et l'élévation du focus d'expansion (FOE). Etant donné que la direction (mais pas la grandeur) des vecteurs est indépendante de leur distance, le pattern du flux permet de trouver le heading dans n'importe quel environnement. Comme Gibson (1950) l'observait, même lorsque le FOE lui-même n'est pas visible, sa localisation est possible par la triangulation de deux ou trois vecteurs du flux. Trouver sa direction de déplacement correspond donc à localiser le FOE en s'intéressant aux directions des vecteurs du flux.

Dans le cas de la rotation pure (qui serait similaire à une rotation de l'observateur sur lui-même, donc si le flux rétinien était comme en figure 6.B), la direction de mouvement des vecteurs s'effectue de manière parallèle. Dans ce cas, la direction et la grandeur des vecteurs du flux sont indépendants de la distance du point de fixation. La rotation ne contient donc aucune information sur la structure de l'environnement, que ce soit au niveau de la distance des objets comme de la direction de mouvement (mais il n'y a dans ce cas aucun mouvement - translation- a proprement parler). Le pattern de flux rétinien (constitué uniquement de flux rotationnel dans ce cas) spécifie l'axe et la vitesse de la rotation, qui sont des informations sur le déplacement de soi qui ne sont pas fournies dans le flux optique.

Lorsque l'observateur ne regarde pas dans la direction de son déplacement, les deux composantes du flux rétinien sont présentes et rendent plus difficile l'extraction de ces différentes informations. Bien entendu, il s'agit du cas de figure le plus courant (Figure 6.C). Un piéton ne dirige en effet son regard que 10% du temps dans les 5° autour de sa direction de déplacement (Wagner, Baird & Barbaresi, 1981, cité par Cutting, Wang, Flückiger, & Baumberger, 1999). Deux approches générales ont été proposées pour régler le problème de la

rotation : des théories extra-rétiniennes et des théories liées au flux rétinien. Pour la première approche, la composante rotationnelle du pattern du flux peut être déterminée à partir d'informations autres que celle provenant de la rétine (Crowell & Banks, 1993; Royden, 1994; Royden, Crowell, & Banks, 1994). On pourrait retenir la copie efférente des muscles extra-oculaires et de la nuque, les informations proprioceptives de la rotation de la tête et des yeux, ainsi que les informations vestibulaires de la rotation de la tête. La composante rotationnelle pourrait ainsi être déterminée et soustraite du flux rétinien pour retrouver la composante translationnelle et obtenir le heading de façon immédiate.

Selon la seconde approche se basant sur le champ visuel, le heading peut être déterminé directement dans le flux rétinien lui-même. De nombreux modèles de traitement ont démontré qu'il était formellement possible de retrouver le heading directement à partir des vecteurs de vitesse, par exemple en se basant sur les éléments les plus lointains, dominés par le flux rotationnel (Hildreth & Royden, 1998; Li, 2000; Warren, 1998; Warren, 1995b).

Il a été également envisagé que la composante translationnelle soit directement extractible du flux rétinien. Les modèles postulant cette hypothèse se basent sur la parallaxe de mouvements (les éléments les plus proches se déplacent plus rapidement que les éléments lointains), nous y reviendrons plus loin. La composante translationnelle du flux dépend de la distance à laquelle se trouve l'objet, ce qui n'est pas le cas de la composante rotationnelle. Le flux optique étant le seul affecté par la parallaxe de mouvement, une différence entre deux vecteurs du flux rétinien est due uniquement à la translation. La parallaxe s'approchant de zéro autour du FOE, il est donc possible d'identifier celui-ci, donc la direction de mouvement propre (Cutting, 1996; Cutting, Alliprandini, & Wang, 2000; Cutting et al., 1992; Cutting & Vishton, 1995; Cutting, Vishton, & Braren, 1995; Cutting et al., 1999; Cutting, Vishton, Flückiger, Baumberger, & Gerndt, 1997).

Les investigations dans ce domaine mènent les chercheurs à proposer toujours plus d'expériences mettant toujours en jeu la capacité du sujet à trouver la direction de son déplacement dans des environnements plus ou moins structurés et plus ou moins chargés en informations (Crowell & Banks, 1993 ; Cutting et al., 1992 ; Cutting et al., 1999 ; Cutting et al., 1997 ; Li, 2000). Le paradigme le plus souvent utilisé est une tâche dite de wayfinding : le sujet doit trouver quelle est sa direction de mouvement au cours d'un déplacement simulé par une présentation informatique.



## La parallaxe de mouvement

Un observateur crée ce phénomène sur sa rétine en fixant un point et en bougeant la tête de côté ou en regardant ailleurs que dans sa direction de déplacement. Cet indice se traduit par un mouvement apparent des objets situés au-delà du point de fixation dans le même sens que le mouvement de l'observateur (voir figure 7). A contrario, les objets situés entre l'observateur et le point de fixation semblent se déplacer dans le sens inverse à l'observateur (Rock, 2001; Sekuler & Blake, 1990).

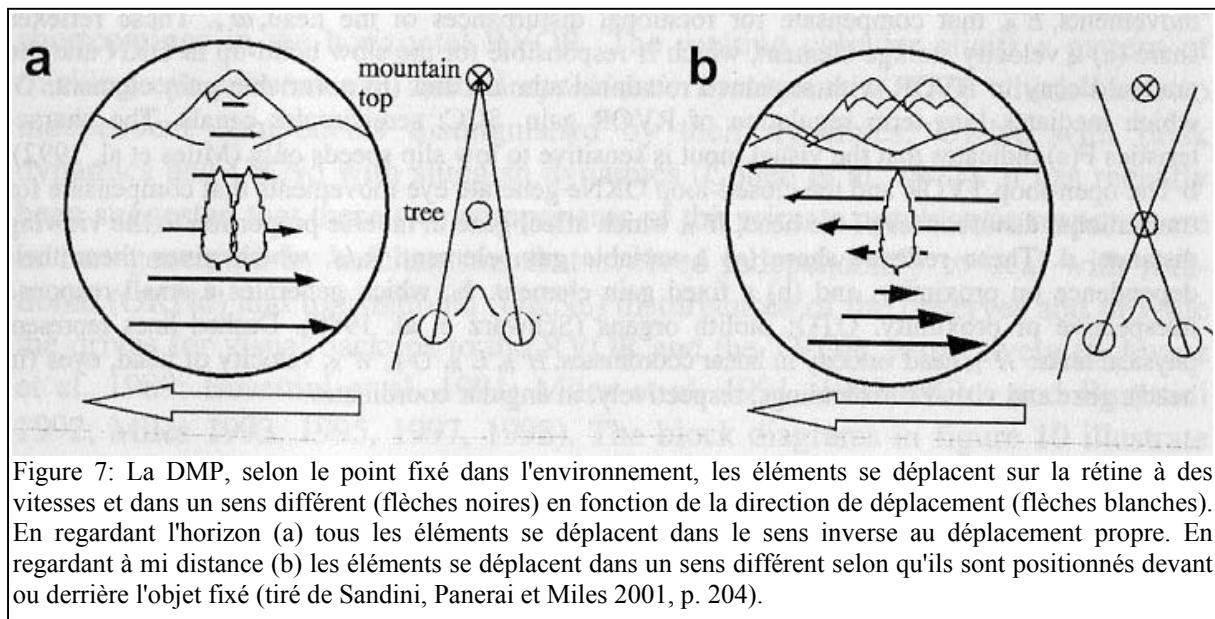


Figure 7: La DMP, selon le point fixé dans l'environnement, les éléments se déplacent sur la rétine à des vitesses et dans un sens différent (flèches noires) en fonction de la direction de déplacement (flèches blanches). En regardant l'horizon (a) tous les éléments se déplacent dans le sens inverse au déplacement propre. En regardant à mi distance (b) les éléments se déplacent dans un sens différent selon qu'ils sont positionnés devant ou derrière l'objet fixé (tiré de Sandini, Panerai et Miles 2001, p. 204).

N'importe quel observateur capable de se déplacer pourra donc facilement faire des jugements de profondeur relatifs. Il lui suffira de fixer un objet et de bouger latéralement, suivant la façon de se déplacer des autres objets, l'observateur saura s'ils sont situés plus près ou plus loin. Pour avoir une idée de la profondeur ordinale de tous les objets dans le champ, il suffira de recommencer l'opération en fixant chaque fois un autre objet. Les mouvements oculaires sont donc d'une grande importance pour l'exploration visuelle et peuvent fournir énormément d'informations conjointement à la parallaxe de mouvement, nous les étudierons plus en détail dans la partie suivante.

La vitesse du mouvement latéral des éléments est proportionnelle à leur distance du point de fixation. C'est-à-dire que les éléments situés très loin, au delà du point de fixation sembleront se déplacer rapidement et dans le même sens que l'observateur. Les objets proches et plus loin que le point de fixation, se déplaceront lentement dans le même sens que l'observateur. Les objets devant le point de fixation mais proches de celui-ci seront lent et iront dans le sens

inverse au mouvement de l'observateur. Enfin, les objets lointains du point de fixation mais devant celui-ci, c'est-à-dire les objets proches de l'observateur, passeront rapidement dans le sens inverse à son mouvement. Des jugements de profondeur relative sont donc possibles en se basant sur le déplacement latéral des objets sans même changer de point de fixation, en comparant simplement la façon de bouger de deux objets alors qu'on en fixe un troisième. Cet indice est appelé parallaxe de mouvement différentielle (DMP).

Cutting et ses collaborateurs ont beaucoup travaillé sur ce dernier indice ainsi que sur ses dérivés dans des problématiques de wayfinding (Cutting, 1996; Cutting et al., 1999; Cutting et al., 1997). Il en est ressorti qu'un sujet en mouvement peut déterminer sa direction de déplacement en utilisant les informations issues de la vitesse et du déplacement relatif des objets proches et lointains par rapport à son point de fixation. Le heading est simplement opposé au déplacement des objets les plus proches.

Ces mêmes auteurs ont démontré que dans les situations où les règles de la DMP sont violées, on observe une chute des performances par rapport à celles où ces règles sont respectées. On peut donc considérer que les observateurs en déplacement utilisent la DMP et que cette dernière est un bon indicateur de performance dans une tâche de Wayfinding (Cutting et al., 1992).

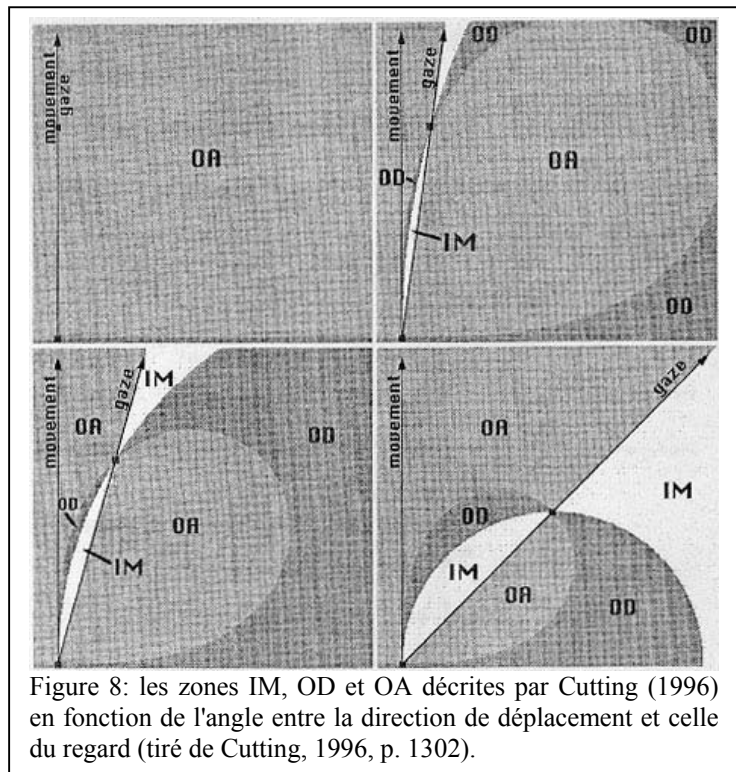
D'après Vishton et Cutting (1995), la capacité à trouver son chemin est meilleure lorsque le déplacement de l'observateur est plus rapide. Ces auteurs montrent que cette différence de performance est en fait plutôt due à l'augmentation des déplacements relatifs des stimuli environnementaux (consécutivement à l'augmentation de la vitesse), qu'à l'augmentation de leurs vitesses relatives. La vitesse de l'observateur a cependant bien une influence (mais indirecte) sur ses performances (car plus de vitesse implique plus de mouvement). Ces chercheurs proposent ensuite une théorie qui n'est plus issue de l'estimation basée sur les vecteurs de déplacement de multiples éléments du flux optique (Cutting, 1996; Cutting et al., 1999), mais basée sur le déplacement de quelques objets spécifiques du flux rétinien ainsi que de la connaissance de la profondeur relative de tous ces objets (Cutting & Vishton, 1995; Vishton & Cutting, 1995). On retrouve donc l'importance de la connaissance de la profondeur des objets : pour savoir où on va il faut d'abord savoir à quelle distance sont les objets. Toutes les problématiques de wayfinding sont donc, d'après Vishton et Cutting (1995), dépendantes de la connaissance de l'ordre de profondeur des éléments de l'environnement, la distance des objets entre eux est donc cruciale pour tout sujet en déplacement.

## Les indices basés sur le mouvement des objets

Par la suite, les mêmes auteurs (Cutting, 1996; Cutting et al., 1999; Cutting et al., 1997), définissent plusieurs zones du champ visuel dans lesquelles les objets bougent de manière identique sur la rétine. Deux de ces zones sont informatives pour le sujet, dans le sens qu'elles lui donnent des indications sur son heading. Il s'agit des zones "d'outward deceleration" (OD) et "d'inward motion" (IM) décrites ci-après. Les zones "d'outward acceleration" (OA) sont moins informatives (voir figure 8). Un autre indice basé sur le mouvement des objets et donnant également beaucoup d'informations quant à celui du sujet est la direction de déplacement de l'objet le plus large (DDLO) développée plus bas.

### *L'IM et l'OD*

(Cutting, 1996), reprend des indices déjà présentés auparavant (Cutting et al., 1992) lors de l'investigation de la DMP et les remet sur le devant de la scène. Ces indices : "l'Inward Motion" (IM), "l'Outward Deceleration" (OD) et "l'Outward Acceleration" (OA), sont en fait diverses régions de l'espace, dans lesquelles le déplacement dans le flux rétinien des objets y étant disposés est particulier. La figure 8 illustre les emplacements relatifs de ces différentes zones. Les objets en IM



se déplacent dans la direction de la ligne du regard, ils peuvent être situés devant ou derrière le point de fixation. Les objets en OD, s'éloignent de la ligne du regard en ralentissant et peuvent également se trouver en deçà ou au-delà du point de fixation. Enfin, les objets en OA qui s'éloignent de la ligne du regard en accélérant peuvent également se situer à plusieurs profondeurs.

Cutting et ses collaborateurs montrent que certains de ces indices : l'IM et l'OD sont très pertinents pour la réussite nominale au wayfinding (répondre si on se dirige vers la droite ou vers la gauche d'un repère) (Cutting, 1996; Cutting et al., 1992). En effet, le mouvement d'un objet en OD ou en IM situé au-delà du point de fixation du sujet indiquera à coup sûr et avec précision la direction de heading de l'observateur. Inversement, un objet en OD ou en IM situé moins loin que le point de fixation signalera toujours le sens inverse du heading. L'avantage de ces deux indices est qu'ils sont d'une part orthogonaux (un même objet ne peut se situer dans deux zones à la fois) et d'autre part, parfaitement corrélés au heading : ils indiquent toujours la bonne direction (soit celle du heading soit l'inverse selon que l'objet est situé derrière ou devant le point de fixation). C'est pourquoi on parle d'invariants (Cutting et al., 2000; Cutting et al., 1999). Cependant, pour pouvoir utiliser ces indices, il est nécessaire d'avoir des connaissances sur les objets du champ visuel, en particulier sur leur profondeur relative. En effet, il faut savoir si l'objet repéré comme se déplaçant en IM est situé devant ou derrière le point de fixation pour savoir si le heading est dans le sens inverse ou dans le même sens que celui de l'objet en question. Il en va de même pour les objets en OD (Cutting et al., 1999; Vishton & Cutting, 1995). Enfin, accélérations et décélérations sont difficiles à détecter (contrairement à la vitesse) ; l'IM est donc plus informatif, car il ne faut pas confondre les objets en OA de ceux en OD.

### *Le DDLO*

Un autre indice explique encore mieux les capacités des sujets à trouver leur direction de déplacement. Il s'agit de la direction de déplacement de l'objet le plus grand (Direction of Displacement of the Largest Object, DDLO). Il a été observé (Cutting, 1996; Cutting et al., 1999; Cutting et al., 1997), que la direction de mouvement se trouvait la plupart du temps dans la direction inverse du DDLO. En effet, lorsqu'on regarde où l'on va (direction de heading), le mouvement relatif des objets environnants varie selon 3 facteurs : le côté du trajet sur lequel ils se trouvent (un objet situé à droite s'approche sur la droite, ou de gauche s'il est à gauche), la distance de l'obstacle (Un objet deux fois plus lointain a une vitesse deux fois moindre), et l'angle entre la direction de l'objet et la direction de mouvement (plus l'objet est écarté, plus il se déplace à l'horizontale).

Lorsqu'on regarde où l'on se dirige, le DDLO ne donne pas vraiment d'information car dans ce cas il n'y a que du flux optique et 50% des objets viennent par la droite et 50% par la gauche (s'ils sont répartis aléatoirement). Par contre, si on ne regarde pas où l'on va mais sur un point de fixation ex-centré (avec une poursuite oculaire pendant le déplacement), il y a alors une plus grande probabilité que le DDLO soit à l'opposé du heading. Plus l'angle GMA (l'angle entre la direction du regard et la direction du déplacement) est grand, plus la probabilité que le DDLO se déplace ainsi est grande. Cependant, le DDLO n'est pas parfaitement corrélé avec le heading, c'est pourquoi on parle d'un indice heuristique, dans le sens qu'il n'est pas fiable et précis dans tous les cas (Cutting et al., 2000).

Les indices actuellement mis en avant par (Cutting et al., 2000) sont en premier lieu le DDLO, suivi de l'IM et de l'OD. L'importance de ces divers indices ainsi que des expériences basées sur l'exploration active du sujet semblent montrent que cette dernière est importante pour la perception spatiale de l'environnement, et plus particulièrement en situation réelle donc naturelle (Gibson, 1979; Peruch, Vercher, & Gauthier, 1995).

### ***L'action et la perception***

La perception sert à tout être vivant, elle est son lien avec l'environnement. Son rôle est un apport continu d'informations à l'organisme. De l'autre côté, l'animal peut agir ou réagir par le biais de l'action. Perception et action sont déjà intimement liées, simplement de part le fait qu'elles se servent l'une de l'autre et se complètent. La perception sert donc au contrôle de l'action. Berthoz (1997) affirme même que la perception est une « action simulée », donc qu'elle n'existe que dans le but d'agir : percevoir quelque chose c'est penser comment agir sur cette chose. Longtemps, on a cru que percevoir revenait simplement à tirer des informations objectives de l'environnement pour obtenir une description générale de celui-ci. S'intéresser à la perception visuelle au cours de l'action, permet d'en révéler l'importance, en particulier à travers ce mécanisme circulaire perception-action (Warren, 1995b).

Le but de la perception n'est pas de fournir une description générale de la scène, mais plutôt d'extraire de l'environnement, à chaque instant des informations bien particulières, qui sont spécifiques à la tâche à accomplir. De plus, les animaux sont généralement liés à l'environnement de deux manières : d'une part en tirant de l'information de leurs systèmes perceptifs et d'autre part, en agissant sur lui par le biais de systèmes effecteurs et locomoteurs, donc par l'action. Lors d'un mouvement, l'environnement disponible change, la perception du mouvement change donc également. L'action génère de nouvelles informations qui peuvent, à leur tour, servir à exécuter une autre action et ainsi de suite. Cette circularité montre que la perception s'inscrit dans une continuité temporelle et ne donne pas lieu simplement à une succession de « percepts » instantanés (Shaw, Turvey, & Mace, 1981). Les jugements peuvent être qualitatifs ou même ponctuellement erronés, mais ils se précisent et s'inscrivent dans la continuité de l'interaction entre l'animal et son environnement. De plus, le flux ne donne pas uniquement des informations sur la position des objets, mais également sur le déplacement propre du sujet. C'est d'ailleurs ce qui est à l'origine de l'adage de Gibson : « We perceive in order to move but we must also move in order to perceive » (Gibson, 1979).

En s'intéressant plus précisément à un niveau locomoteur et postural de l'action sur l'environnement, Warren (1995a) distingue quatre grands systèmes perceptifs impliqués : 1) Le système visuel ; 2) le système vestibulaire (canaux semi-circulaires et otolithes) ; 3) le système somato-sensoriel (récepteurs musculaires, articulaires et cutanés) ; 4) le système auditif. Les systèmes visuels et auditifs ont des rôles plus prospectifs et anticipatoires alors que les systèmes vestibulaires et somato-sensoriels sont plus mécaniques et fournissent de l'information sur l'action en cours et sur d'éventuelles perturbations. En situation ordinaire, ces quatre systèmes donnent une information redondante mais, en cas de conflit, certains systèmes peuvent prendre le pas sur d'autres. Il semble que les systèmes de locomotion et de posture soient d'abord influencés par la vision et par le système somato-sensoriel.

## Le couplage perceptivo-moteur

Pour une perception optimale de l'environnement, les systèmes visuel et moteur de l'individu doivent pouvoir interagir. Dans une expérience classique portant sur le couplage visuo-moteur, Held et Hein (1963) ont placé deux chatons en face au même environnement visuel ; le premier en situation d'interaction motrice et le second n'en bénéficiant pas de cette expérience. Au cours de son développement, le premier animal a ainsi pu expérimenter les effets de l'interaction entre ses propres déplacements et les flux visuels tandis que le second a reçu ces informations par le biais de déplacements passifs. L'étude montre que le chat n'ayant pas bénéficié de l'interaction visuo-motrice s'avère incapable d'éviter la collision avec les objets de l'environnement lors de son déplacement dans l'espace. Une corrélation entre les afférences visuelles et motrices doit s'opérer pour pouvoir se déplacer de façon adéquate.

Une expérience exercée en milieu virtuel menée par Peruch, Vercher et Gauthier (1995) porte sur des sujets qui explorent un espace de manière active (ils créent eux même leur parcours) et d'autres de manière passive (ils suivent un parcours précalculé). Les participants devaient ensuite retourner à des objets dans l'espace par le chemin le plus court. Les sujets ayant pu mener une exploration active montrent de meilleurs résultats que les sujets en exploration dirigée. Une fois de plus, l'activité motrice améliore la perception de l'environnement. Mais pour ces chercheurs, une activité n'améliore la connaissance de l'espace que dans la mesure où elle respecte le couplage action-perception (cohérence des afférences motrices et perceptives). Un feedback des estimations effectuées doit également être disponible.

Dans la même lignée Lee et Lishman (1977) soulignent la pertinence de la perception induite par une exploration active de l'environnement pour l'extraction d'informations invariantes et co-variantes. C'est-à-dire les informations sur l'environnement qui ne changent pas du tout, ainsi que celles qui changent en fonction du mouvement propre.

Le lien entre perception et action n'est donc plus à faire. Une bonne exploration, pouvant amener une connaissance optimale de l'environnement alentour, passe par une liberté de mouvement et surtout par une relation directe et non-altérée entre les mouvements du corps et l'information disponible. Le mouvement et le déplacement seraient donc des éléments déterminants pour la perception visuelle. Ainsi, le type de déplacement peut avoir une influence considérable sur la perception et donc sur les performances de localisation spatiale.

## ***Hypothèses théoriques***

Au vu des différents apports théoriques présentés jusqu'ici, des hypothèses quant à l'influence de plusieurs facteurs dans des tâches de localisation spatiale peuvent être formulées. Puisque le point fixé dans l'espace apporte de l'information sur différents autres objets de l'espace (grâce à la DMP et aux divers indices tels que le DDLO, l'IM et l'OD), fixer plusieurs endroits peut apporter plusieurs fois diverses informations (Cutting et al., 2000; Cutting et al., 1999; Cutting et al., 1997; Warren, 1998). On s'attend donc à ce que la possibilité d'explorer librement l'espace visuel (c'est-à-dire d'effectuer librement des mouvements oculaires) ou non, influence les performance de localisation du sujet.

De même, comme nous avons pu le voir avec les travaux de (Berthoz, 1997; Held & Hein, 1963; Peruch et al., 1995), la locomotion et la motricité en général sont très intimement liées à la perception. On peut donc s'attendre à ce que les capacités de localisation des objets dans l'espace soient influencées par le déplacement actif ou passif du sujet observant.

Enfin, pour en revenir aux mouvements oculaires, lorsque ceux-ci peuvent être effectués librement, on peut s'attendre à ce qu'ils ne le soient pas de façon aléatoire. Une stratégie d'exploration oculaire propre à la localisation spatiale des objets pendant le mouvement devrait pouvoir être mise en évidence (Deubel et al., 1988; Yarbus, 1967).

L'expérience qui va suivre tente de répondre à ces hypothèses de la manière la plus efficace que possible.



# MÉTHODE

## ***Population***

13 personnes (9 hommes et 4 femmes) ont participé à cette expérience. Leur âge varie entre 21 et 54 ans ( $m = 28$  ;  $e-t = 8.7$ ). Il s'agit pour la plupart d'étudiants et d'assistants de la faculté de psychologie ainsi que des proches des expérimentateurs. Tous les participants ont une vision normale ou corrigée. De plus, 76.92% des sujets ont déjà participé à ce type d'expérience.

## ***Plan expérimental***

### Variables indépendantes

1. Mouvements oculaires

- Libres
- Fixes

2. Déplacement du sujet

- Actif
- Passif

		Mouvements oculaires	
		Libres	Fixes
Déplacement du sujet	Actif		
	Passif		

Figure 9: le plan expérimental

Le plan expérimental (figure 9) est donc de type intra-sujet, avec 4 (2X2) conditions expérimentales pour chaque sujet et 4 types de configurations d'arbres par condition. L'expérience est donc divisée en 16 parties (séquences) pour chaque sujet.

### Variables dépendantes

1. Erreur latérale (X) de localisation des arbres (en m)
2. Erreur en profondeur (Y) de localisation des arbres (en m)
3. Stratégie d'exploration oculaire (dans les situations avec mouvements oculaires libres)

### Variables neutralisées

- L'ordre de passation des différentes conditions expérimentales est contrebalancé
- On utilise 4 configurations d'arbres différentes comprenant chacune deux arbres à replacer.

### Variables contrôlées

- La distance de déplacement du sujet est toujours la même (20m).
- La durée de déplacement est maintenue aussi constante que possible (12s).
- L'ordre des différentes configurations d'arbres dans les conditions expérimentales est toujours la même.
- Toutes les configurations comportent 2 arbres mobiles, un blanc et un noir, placés dans les intervalles entre 3 arbres fixes. Tous les arbres ont la même taille et la même forme.
- Tous les sujets ont une vision normale ou corrigée.
- Un test de paper-folding sera covarié aux performances de localisation pour annuler un effet des capacités de rotation mentale.

## ***Hypothèses opérationnelles***

- Au niveau des performances de localisation spatiale, on s'attend à observer de meilleures performances (donc des erreurs moins grandes) dans les conditions avec mouvement oculaires libres que dans les conditions sans.

MOC < non-MOC

- De plus, le déplacement actif, plus réaliste et couplant mieux la perception et l'action, entraînera également de meilleures performances que le déplacement passif du sujet.

Déplacement actif < Déplacement passif

- Une interaction entre ces deux variables indépendantes, sur le plan de la localisation, n'est pas à envisager.
- Aucune hypothèse opérationnelle précise n'est faite concernant les stratégies de mouvements oculaires. On s'attend seulement à pouvoir mettre en évidence un ou plusieurs liens entre différentes mesures de mouvements oculaires et bonnes performances de localisation. On mettra ainsi en avant des stratégies d'exploration visuelle plus pertinentes que d'autres.

## **Description du matériel**

### Le dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires

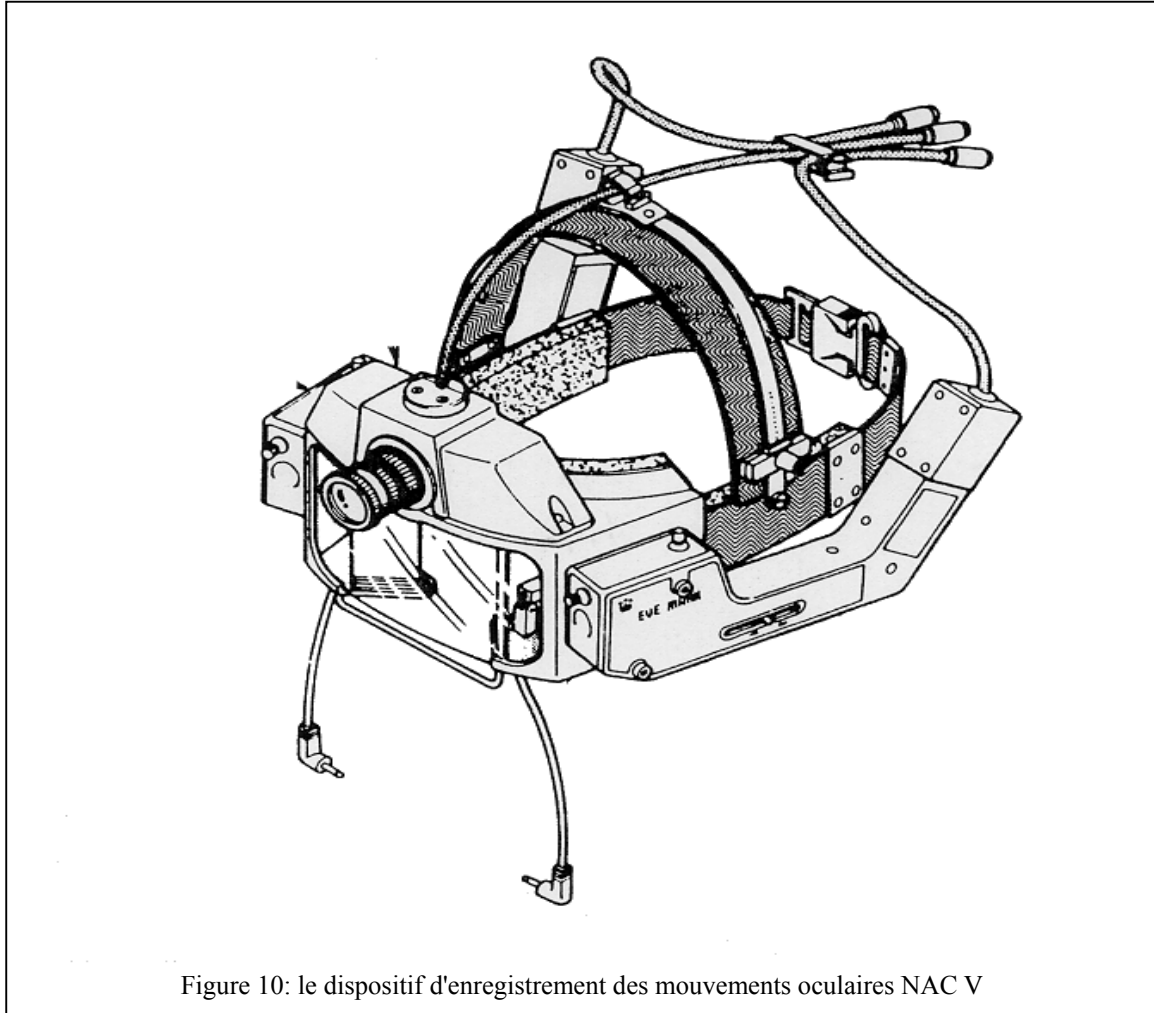
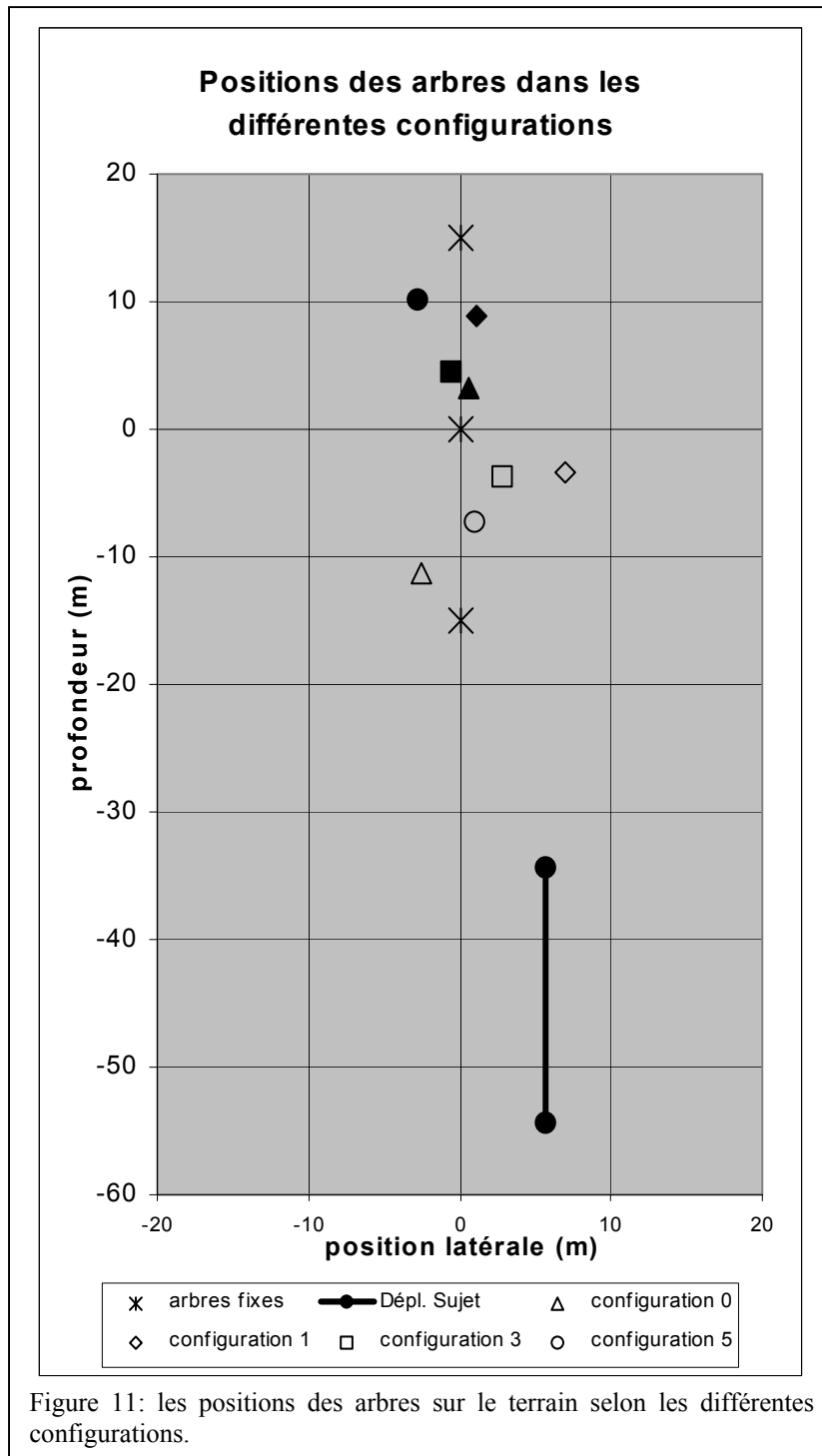


Figure 10: le dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires NAC V

Ce dispositif (NAC Eye Mark Recorder V) se présente sous la forme d'un casque comportant une visière, trois caméras et deux diodes (voir figure 10). Devant chaque œil du participant, une caméra repère le reflet d'une diode sur la cornée et suit ses mouvements. La troisième caméra, placée sur le front, filme la scène face au sujet. Un dispositif électronique coordonne les informations des trois caméras et au final il est possible d'enregistrer, à l'aide d'un magnétoscope, le champ de vision du participant avec une marque à l'endroit où ses yeux se dirigent. L'enregistrement permet alors d'analyser, image par image, la position du regard du sujet et ses mouvements tout au long de la passation.

## Les différentes configurations d'arbres

Tout d'abord, comme l'expérience se déroule dans la réalité et non plus dans une simulation



virtuelle en laboratoire, un terrain de grandes dimensions, plat, uniforme et avec un minimum d'éléments en arrière-plan est utilisé.

Ensuite, pour créer les différentes configurations, cinq arbres de forme semblable sont fabriqués à l'aide de bois : tous les arbres mesurent 2.40m de haut et comportent trois branches de 90cm, trois arbres sont de couleur brune, un est blanc et le dernier est noir. L'emplacement des trois arbres bruns (fixes) ne varie pas au cours de l'expérimentation, par contre les deux autres arbres (dits mobiles) changent de place au cours des quatre configurations. Les diverses positions des arbres correspondent à des

configurations utilisées en laboratoire, c'est pourquoi elles ont les numéros 0, 1, 3 et 5 (voir figure 11). Pour que la passation se fasse rapidement, les diverses positions des arbres sont préparées à l'avance en plaçant des supports métalliques dans le sol.

## La récolte des données

La récolte des données sur le sujet et sur ses résultats s'est faite grâce à :

- deux questionnaires remplis avant et après la passation (disponibles en annexe A),
- des exemplaires du "paper folding test" (exemplaire et consigne en annexe B),
- diverses feuilles de papier A4 pour les réponses de positionnement des arbres
- et surtout le dispositif d'enregistrement des mouvements oculaires décrit précédemment.

## Matériel supplémentaire

Tout d'abord, afin de pouvoir manipuler les capacités de déplacement du sujet, un dispositif constitué d'une chaise sur roulettes comportant divers espaces pour les appareils électroniques (magnétoscope, transformateurs, NAC, câbles...) est utilisé.

Une feuille comportant le numéro du sujet, de la séquence et la condition expérimentale est présentée devant les sujets avant chaque passation. Elle est ainsi filmée par le NAC et permet un archivage des données au niveau des enregistrements des mouvements oculaires.

Enfin, un parapluie est ouvert devant le sujet au début et à la fin de chaque passation, ceci afin de limiter le temps de stimulation visuelle à la durée de déplacement.

## **Procédure**

Une fois le participant arrivé sur le lieu d'expérimentation, il est convié à remplir le questionnaire pré-test ainsi que le Paper-Folding test. Après quoi l'expérience lui est expliquée (consigne en annexe C). La moitié des sujets sont alors équipés du NAC pour l'enregistrement de leurs mouvements oculaires. Les mouvements oculaires de la moitié des sujets seulement sont enregistrés car cette procédure nécessite beaucoup de temps et de disponibilité. Les sujets ne voulant pas s'investir autant, passent néanmoins l'expérience pour augmenter la validité des résultats de localisation.

Le participant est emmené au point de départ du trajet (en prenant bien garde à ce qu'il ne voie pas les arbres avant de commencer.) La tâche précise que le sujet avait à remplir est précisée (marcher à côté du chariot ou s'asseoir dessus, regard libre ou fixe sur l'arbre central.)

L'expérience peut commencer et un expérimentateur s'occupe de pousser le chariot, toujours à la même vitesse, et de déclencher l'enregistrement des mouvements oculaires. Pendant ce temps, un autre a pour tâche de présenter les numéros des séquences à la caméra, préparer les feuilles de réponses de localisation et cacher les arbres à l'aide d'un parapluie avant et après les déplacements. Un dernier expérimentateur se tient à proximité des arbres, mais hors du champ visuel du sujet, et change la position des arbres blanc et noir entre chaque séquence. Lors de l'utilisation du NAC, la bonne calibration de celui-ci est vérifiée régulièrement et il est immédiatement réglé en cas de problème.

A la fin de chaque séquence, lorsque le chariot s'arrête, le participant doit positionner les arbres noir et blanc à l'aide d'un crayon. Le support est constitué d'une feuille de papier sur laquelle sont indiqués les trois arbres fixes.

Après chaque condition (4 séquences, une pour chaque configuration d'arbres), on précise au participant exactement ce qu'il aura à faire pour la condition suivante et la passation reprend. En cas de pluie, l'expérience est immédiatement arrêtée en raison des multiples appareils électroniques utilisés et difficiles à protéger.

Lorsque les 4 conditions sont terminées, le participant est invité à remplir un dernier questionnaire avant de prendre congé (questionnaire post-test en annexe A). La passation peut durer entre 20 min et 1h30 selon l'utilisation ou non du NAC et les éventuels problèmes de recalibration en cours d'expérimentation.

## **Récolte et traitement des données**

### Les mouvements oculaires

L'enregistrement des mouvements oculaires est archivé sous Excel. L'analyse est fastidieuse car elle se fait image par image. Lorsqu'on peut déterminer que l'œil fixe un nouveau point de l'espace, on note le temps de début de fixation ainsi que ses coordonnées par rapport à des repères de la scène visuelle. Le point (l'arbre) fixé peut alors être retrouvé.

Grâce à ces données, il est alors possible de déterminer un certain nombre de facteurs pouvant potentiellement refléter une stratégie d'exploration de l'espace:

- **la durée de la séquence**, c'est-à-dire le temps en millisecondes pendant lequel le sujet a été réellement en contact visuel avec les arbres.
- **Le nombre de mouvements oculaires (mocs)**, le nombre de mocs produits par le sujet durant la séquence, sans distinctions.
- **La moyenne de durée des mocs**, cet indice parle de lui-même.
- **Le nombre de mocs sur chacun des arbres**, chacun des 5 arbres a son propre indice.
- **La durée totale de fixation sur chacun des arbres**, en ms.
- **La durée moyenne de fixation sur chacun des arbres**, en ms également.
- **La proportion de temps de fixation de chacun des arbres**, en pourcentage.

Bien entendu, cette procédure n'est utilisée que pour les conditions dans lesquelles le sujet a le droit d'explorer librement l'espace visuel. Dans les autres cas, on vérifie simplement que le sujet n'a pas triché et a effectivement fixé l'arbre central tout au long de la séquence.



## La localisation des arbres (erreur en latéral et en profondeur)

Les réponses de localisation des sujets sur les feuilles de papier sont transformées en coordonnées euclidiennes à l'aide d'un transparent millimétré. Les données ainsi obtenues sont rassemblées et mises en forme sous Microsoft Excel. La coordonnée latérale a été appelée X et celle de profondeur Y. Pour trouver l'erreur de localisation, la coordonnée réelle est soustraite de la réponse du sujet. En parlant d'erreur de localisation on parle donc de la différence entre la position moyenne du nuage de points des réponses des sujet et la position réelle de l'arbre. Le logiciel SPSS 9.0 pour Windows a été utilisé pour réaliser les différents traitements statistiques inférentiels.

Pour permettre de comparer les performances de localisation aux enregistrements des mouvements oculaires, différents résultats de localisation sont calculés pour chaque sujet :

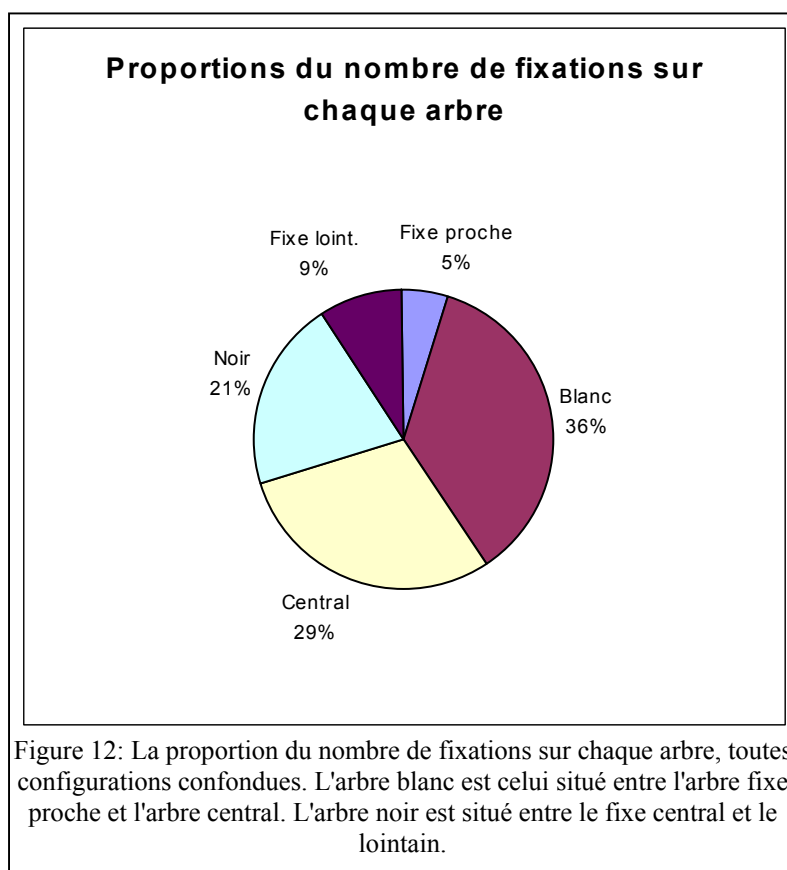
- **l'erreur en X, en Y**, il s'agit simplement de l'erreur moyenne latérale (X) ou en profondeur (Y) faite par les sujets,
- **l'erreur totale**, l'erreur moyenne aussi bien en X qu'en Y,
- **l'erreur sur l'arbre noir, blanc**, comme l'erreur totale mais uniquement sur l'arbre blanc, ou sur l'arbre noir,
- **l'erreur en X, en Y, sur l'arbre noir, blanc**, selon le même principes que les précédents, on a ici quatre indices différents,
- 

De plus, tous ces indices ont été retenus une seconde fois en tenant compte de la valeur absolue de l'erreur. Ainsi, les réponses situées d'un côté ou de l'autre des arbres fixes sont considérés de la même manière.

## RESULTATS

Une fois les données récoltées et organisées, nous avons commencé une analyse plutôt descriptive des mouvements oculaires. Ensuite, l'effet des deux variables indépendantes sur les performances de localisation ont été analysées. Cependant, l'absence de résultats dans cette dernière analyse nous fit aller plus loin en prenant en compte les résultats des sujets dans chaque configuration d'arbres séparément. Les stratégies d'exploration oculaires sont également re-étudiées de cette manière.

### **Les mouvements oculaires**



Les enregistrements des mouvements oculaire récoltées étaient de piètre qualité et peu se sont révélées réellement utilisables. Au total, seules 13 séquences sur 2 sujets différents ont pu être prises en compte pour l'analyse (voir en annexe D). C'est avec un objectif plus prospectif qu'explicatif que ces données ont été rassemblées observées de plusieurs manières différentes.

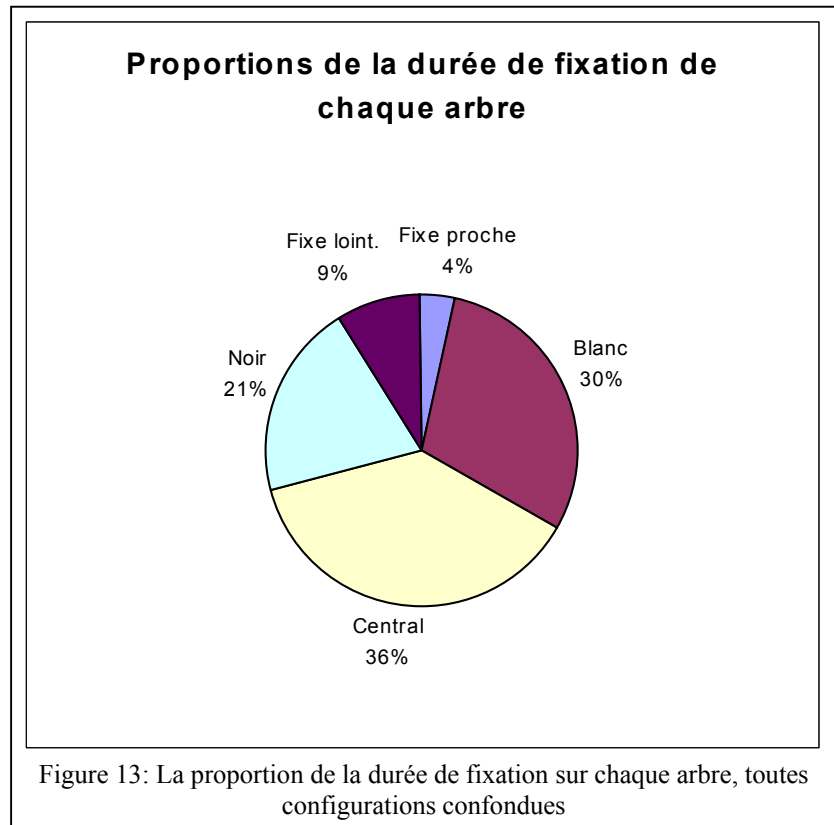
Tout d'abord, nous pouvons comparer les proportions de

fixation de chacun des arbres, du point de vue du nombre ainsi que du temps cumulé de fixation.

On peut remarquer sur la figure 12 que l'arbre fixe central et l'arbre blanc (proche) sont fixés le plus grand nombre de fois. Le dernier arbre mobile (noir) est également fixé souvent alors que les deux arbres fixes proche et lointain semblent peu importants. L'information pertinente semble donc obtenue en fixant souvent les arbres centraux du dispositif (à savoir l'arbre central et les deux arbres mobiles).

En s'intéressant à la durée de fixation sur chaque arbre (figure 13), on retrouve, à peu de choses près, les mêmes proportions que pour le nombre de fixations. L'arbre fixe central est le plus longtemps observé et les arbres blanc (proche) et noir (lointain) suivent de près. A nouveau, les arbres les plus ex-centrés sont peu observés.

De manière générale, il semble donc que les sujets ne regardent pas les arbres de manière aléatoire, puisque tous ne sont pas observés autant longtemps ni autant de fois.



### Les relations entre mouvements oculaires et capacité de localisation

Pour comparer ces deux types de données, les divers facteurs dérivés des mocs enregistrés ont été mis en corrélation avec les divers résultats de localisation, tous ces indices sont décrits plus haut (dans la partie "récolte et traitement des données" de la méthode). On a donc au total 23 indices concernant les mocs corrélés à 18 autres concernant les performances de localisation. La matrice complète des corrélations de Pearson se trouve en annexe E.

Des corrélations significatives retenons que :

1. La durée de la séquence est corrélée positivement à quatre indices (Erreur en X ( $r = 0.58$ ;  $p = .04$ ) ; erreur totale ( $r = 0.69$ ;  $p = .01$ ); erreur absolue en X ( $r = 0.63$ ;  $p = .02$ ) ; erreur absolue totale ( $r = 0.68$ ;  $p = .01$ ). Une séquence plus longue semble donc augmenter les erreurs des sujets au total, ainsi qu'en latéral.
2. Le nombre de saccades en direction de l'arbre mobile blanc est fortement corrélée aux erreurs absolues totales ( $r = 0.73$ ;  $p < .01$ ). Fixer cet arbre un grand nombre de fois nuit aux performances d'ensemble.
3. Fixer l'arbre du fond un grand nombre de fois diminue les erreurs latérales et totales de localisation de l'arbre noir ( $r = -0.57$  et  $p = .04$  à chaque fois). Par contre les erreurs augmentent du point de vue de l'indice d'erreur absolue totale sur l'arbre noir ( $r = 0.61$ ;  $p = .03$ ).
4. Plus la durée de fixation sur l'arbre blanc est longue, plus les erreurs de localisation sont grandes au niveau de l'arbre blanc ( $r = 0.56$ ;  $p < .05$ ), de l'erreur totale absolue ( $r = 0.66$ ;  $p = .01$ ) ainsi que de l'estimation de l'arbre noir en absolu ( $r = 0.58$ ;  $p = .04$ ). On remarque la même chose au niveau de la proportion de fixation de l'arbre blanc sur les trois mêmes résultats de localisation ( $r = 0.57$ ;  $0.59$  et  $0.59$ ;  $p = .04$ ;  $.03$  et  $.03$ )
5. Les erreurs absolues en profondeur (Y) sur l'arbre mobile blanc sont souvent influencées par la durée de fixation de l'arbre noir, plus celui-ci est observé, plus la localisation est précise. ( $r = -0.66$ ;  $-0.63$  et  $-0.70$  et  $p < .05$ ;  $.01$  et  $.02$  pour, respectivement, la durée totale de fixation, la durée moyenne de fixation et enfin la proportion de fixation de l'arbre noir.)

D'une manière plus générale, on peut remarquer que souvent l'observation d'un arbre a plus de conséquences sur la localisation des autres arbres que sur celle de l'arbre fixé (points 2, 3 et 5). La localisation de l'arbre observé semble même être parfois altérée (point 4).

## Les patterns d'exploration oculaire

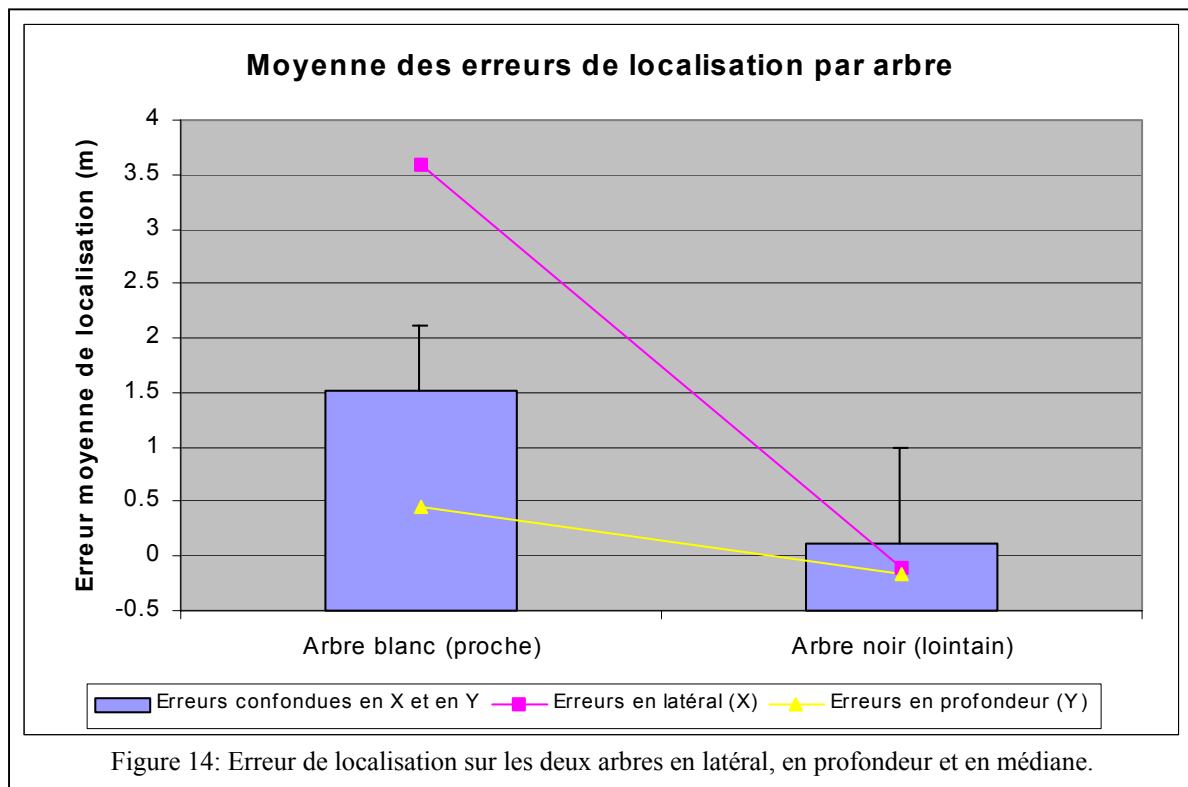
En observant les données d'un peu plus près, on peut remarquer que les sujets adoptent souvent des patterns de mouvements oculaire : ils fixent différents arbres dans un ordre précis, qui se répète plusieurs fois de suite, en séquence. Il est difficile de tirer un indice quantifiable de tous ces patterns, mais on en retrouve dans 9 séquences sur les 13 observées. On peut en trouver jusqu'à trois dans la même séquence, ils durent entre 4 et 9 mocs (ou entre 1.7 et 11.84 sec). Un pattern-type est celui du sujet n°4 qui dans l'enregistrement n°5 accomplit un total de 18 mocs sur lesquels 17 sont consacrés alternativement à l'arbre blanc (proche) et à l'arbre fixe central (voir en annexe D).

**Le nombre de patterns présents, le nombre de mocs par pattern (longueur) ainsi que la proportion du nombre de mocs faisant partie d'un pattern** sont tous trois corrélés positivement avec la grandeur des erreurs pour la plupart des indices de localisation utilisés précédemment (voir en annexe E). Les corrélations sont quelques fois significatives, mais toujours dans le sens d'une augmentation de l'erreur avec l'importance du pattern. L'indice d'erreur de localisation totale en particulier est corrélé significativement aux trois indices relatifs aux patterns de mocs ( $r_{(total/pattern)}=0.68$  ;  $p = .01$  ;  $r_{(total/LongueurPattern)}= 0.75$  ;  $p < .01$  ;  $r_{(total/PropPattern)}= 0.6$  ;  $p = .03$ ). On retrouve la même chose au niveau des erreurs en X face à la proportion de mocs dans un pattern ( $r =0.61$ ;  $p=.03$ ), et face à la longueur des patterns ( $r=.57$ ;  $p=.04$ ). D'autres corrélations vont également dans ce sens. Il semble donc que répéter plusieurs fois des yeux le même parcours sur les différents arbres ne soit pas vraiment positif pour connaître leur position.

## ***La localisation des arbres***

Les données, une fois leur distribution normale vérifiée (voir annexe F), ont été soumises à une analyse de variance à mesures répétées. Aucun effet d'aucune variable indépendante n'est significatif à un seuil  $p < .05$  (Détails en annexe G). Nous avons néanmoins poussé l'analyse un peu plus loin et observé l'influence de variables neutralisées comme l'arbre proche/lointain ou les différentes configurations.

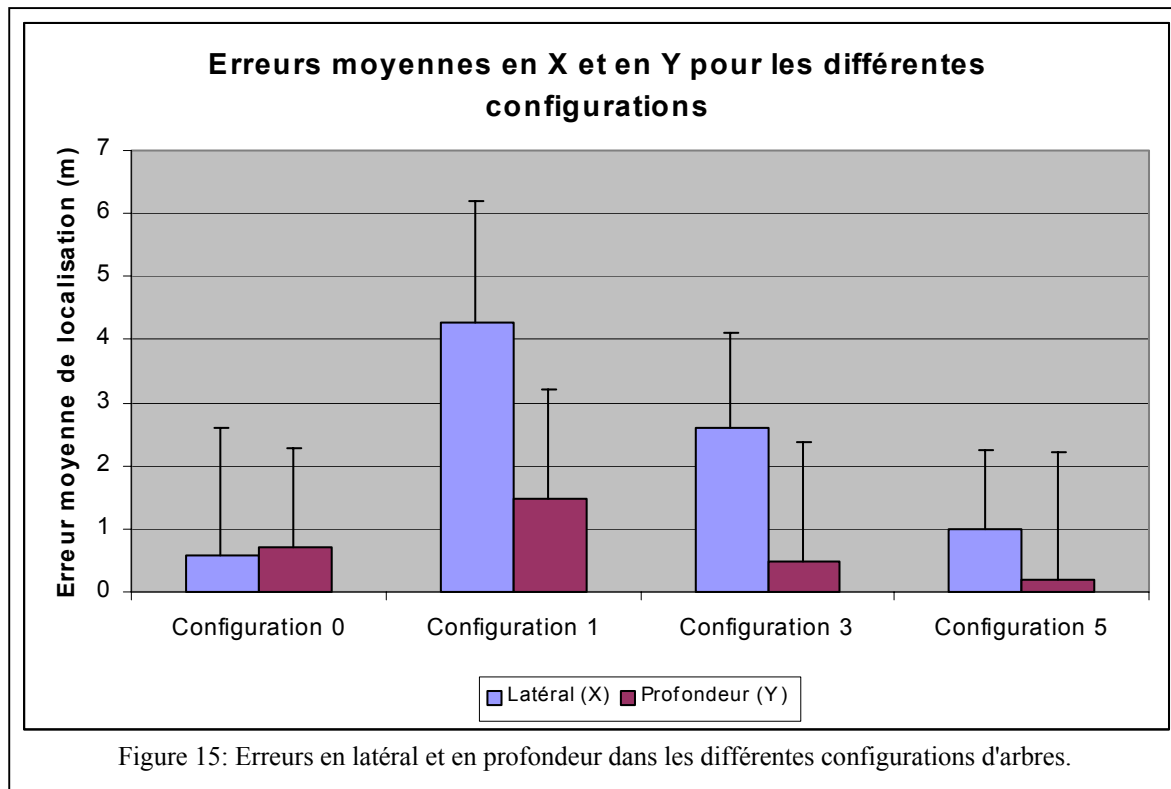
## Les différences d'erreur selon l'arbre et selon l'axe X ou Y



Au niveau de la médiane des erreurs en X et en Y (figure 14), on remarque, que les sujets ont tendance à faire de plus grandes erreurs en remplaçant l'arbre blanc qu'en remplaçant l'arbre noir. Néanmoins, en observant les différences au du point de vue des erreurs en latéral (X) et des erreurs en profondeur (Y), on peut remarquer que la différence est due essentiellement à une différence de performance de localisation en X. Les erreurs en Latéral sur l'arbre blanc sont effectivement nettement plus importantes que sur l'arbre noir. Un test de Student apparié nous révèle la significativité des différences entre les erreurs en X et les erreurs en Y sur l'arbre blanc (paire blanc X-blanc Y:  $T_{(12)} = 8.64$  ;  $p < .001$ ). Il en va de même pour la différence des erreurs en X sur l'arbre blanc et sur l'arbre noir (paire noir X-blanc X:  $T_{(12)} = -8.458$  ;  $p < .001$ ) (Voir les détails en annexe H).

Remarquons encore qu'on a regroupé ici les résultats des 4 configurations d'arbres. Les différences de performances observées peuvent être dues plus aux configurations qu'à l'arbre en lui-même, comme nous allons le voir immédiatement.

## L'influence des configurations d'arbres



Nous avons poussé la curiosité jusqu'à tenter de connaître l'influence de la variable neutralisée qu'est la configuration. Les 4 configurations étaient en effet sensées augmenter le nombre d'observations pour chaque condition expérimentale afin d'avoir une mesure plus stable. La figure 15 nous conforte dans l'idée d'une difficulté plus grande pour les configurations 1 et 3 (et surtout au niveau de la localisation latérale). Il semble donc judicieux d'analyser l'influence des diverses variables indépendantes dans chaque configuration indépendamment.

### **Analyse par configuration**

Pour chacune des quatre configurations d'arbres, deux nouvelles analyses de variances ont été effectuées. La première pour définir l'influence des deux variables indépendantes de mouvements oculaires et de locomotion sur les performances de localisation sur l'axe X (latéral). La seconde pour évaluer les mêmes variables mais au niveau de la localisation en Y (profondeur). Ces analyses ont été faites une première fois à l'aide d'une série d'ANOVA à mesure répétées (voir en annexe I), mais les résultats n'ont rien apporté. Le score au paper folding a alors servi de variable covariée pour contrôler l'effet des capacités de rotation mentale. C'est donc bien une série d'ANCOVA à mesures répétées qui ont été effectuées (les résultats précis sont à chaque fois disponibles en annexe J).

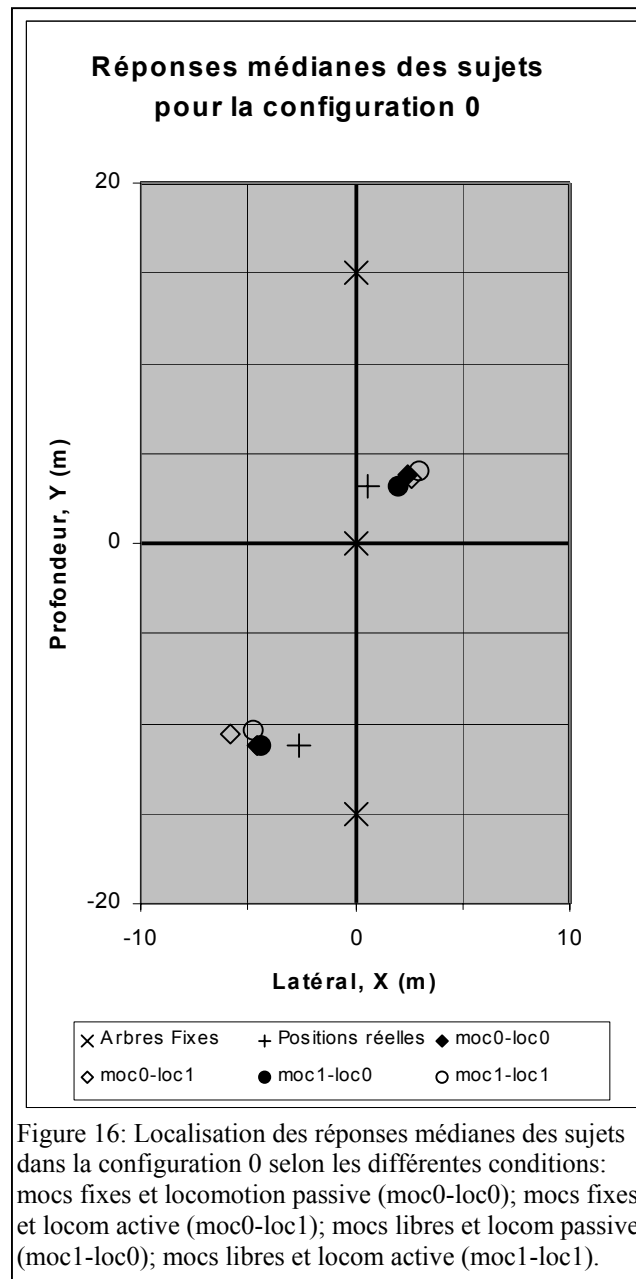
Les stratégies d'utilisation des mouvements oculaires sont également observées selon la configuration des arbres. Et à chaque fois, la séquence enregistrée la plus différente des autres du point de vue des mocs effectués est comparée aux autres du point de vue des résultats de localisation pour tenter de définir des stratégies d'exploration plus ou moins pertinentes.

### La configuration 0

Comme on peut le voir dans la figure 16, les réponses des sujets selon la condition expérimentale sont relativement groupées et toujours situées un peu plus éloignées sur l'axe latéral. Les sujets semblent toujours surévaluer la distance latérale qui sépare les arbres mobiles des arbres fixes.

#### *Localisation en latéral*

Dans cette configuration, la variable de locomotion semble avoir une importance puisqu'elle a une influence significative ( $F_{(1,12)}=4.160$  ;  $p = .048$ ). Cette différence semble d'ailleurs venir principalement d'un effet sur la localisation de l'arbre noir, puisque la variable indépendante de localisation à un effet significatif sur la localisation en latérale de l'arbre noir ( $F_{(1,12)} = 9.153$ ;  $p = .012$ ) alors qu'il ne l'est pas sur l'arbre blanc. Les erreurs sont toujours plus grandes lorsque le sujet est en locomotion active (marche).



De même, l'interaction entre les deux VI (mouvements oculaires et locomotion) est significative aussi bien au niveau global, c'est-à-dire sur les deux arbres ( $F_{(1,12)} = 4.151$ ;  $p=.049$ ), qu'au niveau de l'arbre noir uniquement ( $F_{(1,12)} = 9.127$ ;  $p= .012$ ). Lorsqu'ils n'ont pas le droit d'utiliser les mouvements oculaires, les sujets font des erreurs en remplaçant l'arbre



noir qui sont comparables qu'ils aient eu ou non une locomotion active. Par contre, avec une liberté d'exploration oculaire, l'erreur augmente si le sujet se déplace activement alors qu'elle réduit lorsqu'il est poussé sur la chaise.

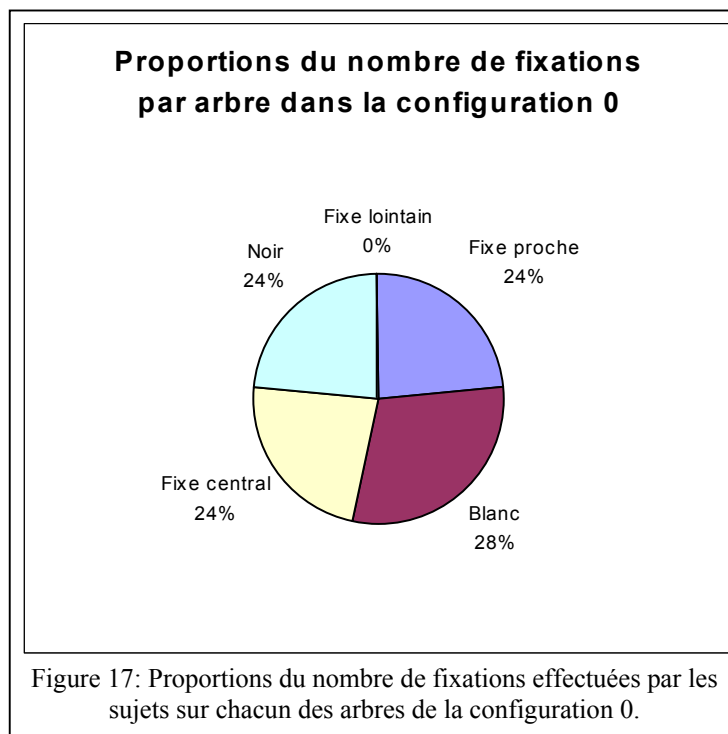
Enfin, l'interaction entre la VI de locomotion et le score au paper folding sur l'arbre noir uniquement est significativement importante ( $F_{(1,12)} = 6.832$ ;  $p = .024$ ); tout comme l'interaction triple entre les deux VI et le score sur l'arbre noir ( $F_{(1,12)} = 6.305$ ;  $p = .029$ ).

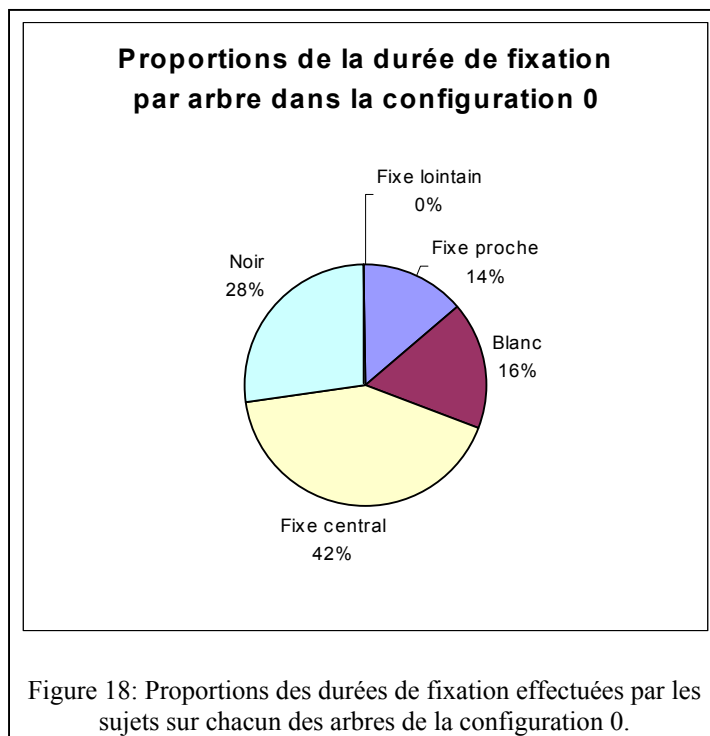
### *Localisation en profondeur*

L'ANCOVA à mesures répétées révèle qu'aucune des deux variables indépendantes ne produit de différence de performance selon ses différentes modalités. Que ce soit au niveau des effets principaux, des interactions ou des effets simples, en regroupant ou en différenciant les arbres blanc et noir, aucun résultat n'est significatif à un seuil  $\alpha < .05$ .

### *Les stratégies d'exploration oculaire*

Comme on le voit dans la figure 17, l'arbre le plus lointain n'est jamais regardé par aucun sujet. Par contre les quatre autres arbres sont tous fixés un nombre de fois comparable.





La figure 18 nous révèle cependant qu'au niveau de la durée de fixation des différents arbres, ceux-ci ne sont plus égaux. En effet, l'arbre central est observé pendant nettement plus de temps que les autres, suivent les arbres mobiles et enfin l'arbre proche.

### *Différences de stratégies d'exploration oculaire*

En étudiant les différentes séquences enregistrées (annexe D), sur cette configuration particulière, on peut remarquer que le sujet N°4 dans l'enregistrement 2, a une activité oculaire nettement différente des deux autres enregistrements de cette configuration. En effet il fait un total de 23 saccades contre 5 et 8 pour les autres, en outre il est le seul à observer l'arbre fixe proche (8 fois, pour un total de 5.6 secondes) et à faire des patterns (2 séries, pour 8 mots au total).

Néanmoins, en comparant les résultats de localisation de ce sujet dans cette séquence précise aux autres résultats pour la même configuration, on ne trouve pas de réelle différence en terme de performances. Le sujet, dans cette séquence fait même plutôt des erreurs intermédiaires par rapport à celles des autres séquences de la même configuration.

Signalons encore que cette séquence particulière est également la seule qui a été enregistrée alors que le sujet était déplacé passivement. Dans les autres séquences, le sujet marchait.

On ne trouve donc, pour la configuration 0, aucune stratégie d'exploration menant à des différences en terme de performance de localisation spatiale.

## La configuration 1

Pour cette configuration également, les réponses des sujets sont relativement groupées (figure 19). La distance latérale semble à nouveau surévaluée et la distance en profondeur sous-évaluée. L'arbre blanc est ici un excellent exemple puisque les sujets surévaluent la distance latérale aux arbres fixes jusqu'à une valeur double de ce qu'elle est réellement.

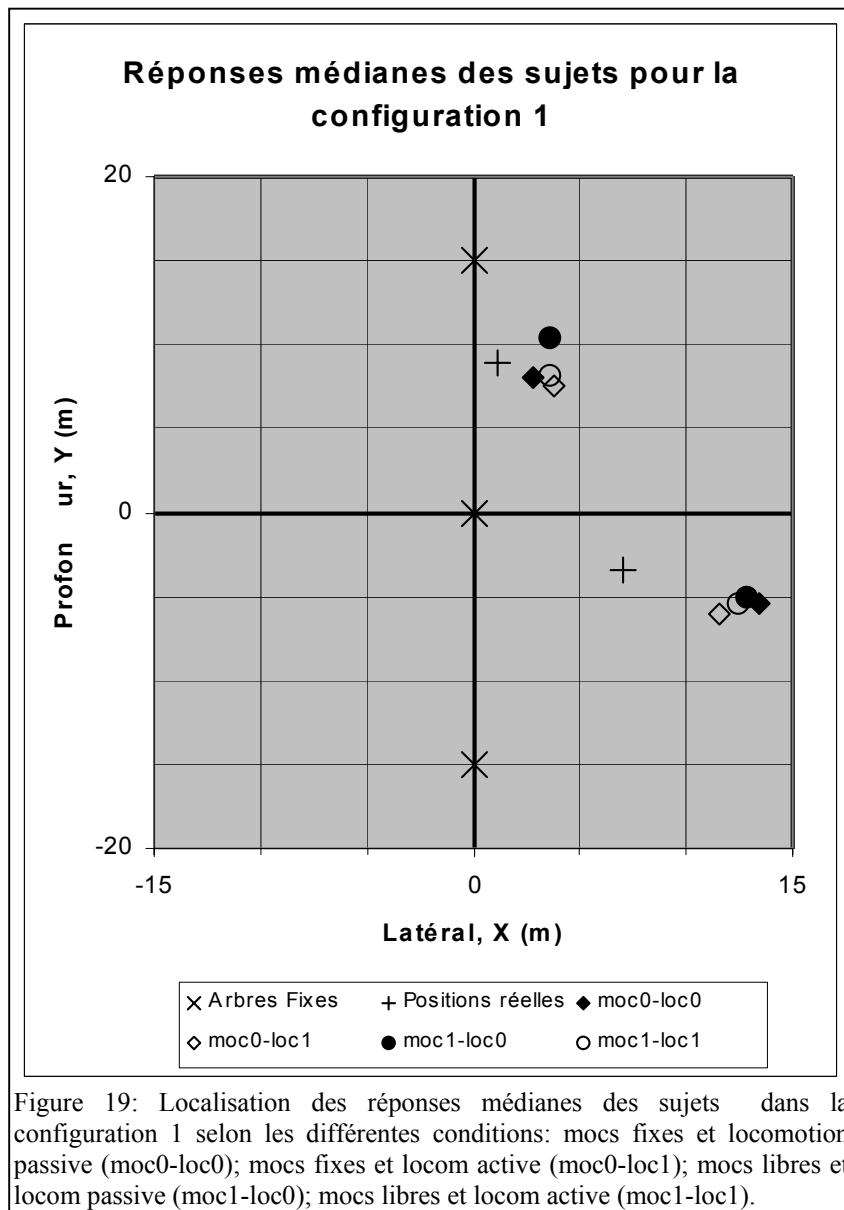
### *Localisation en latéral*

A ce niveau, aucun effet significatif n'a pu être

relevé. Il semble qu'aucune des deux variables indépendantes n'ait de réelle influence sur les capacités des sujets à localiser les arbres.

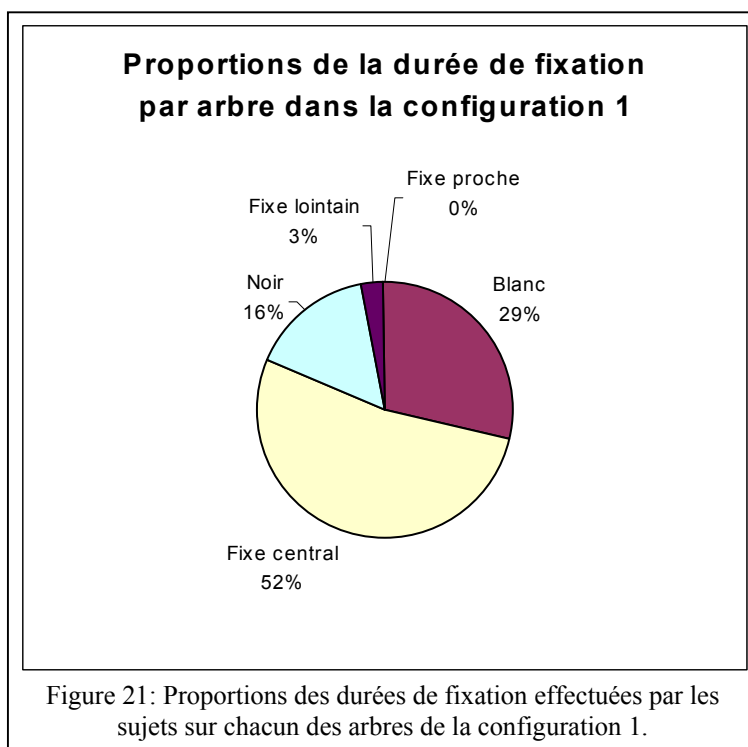
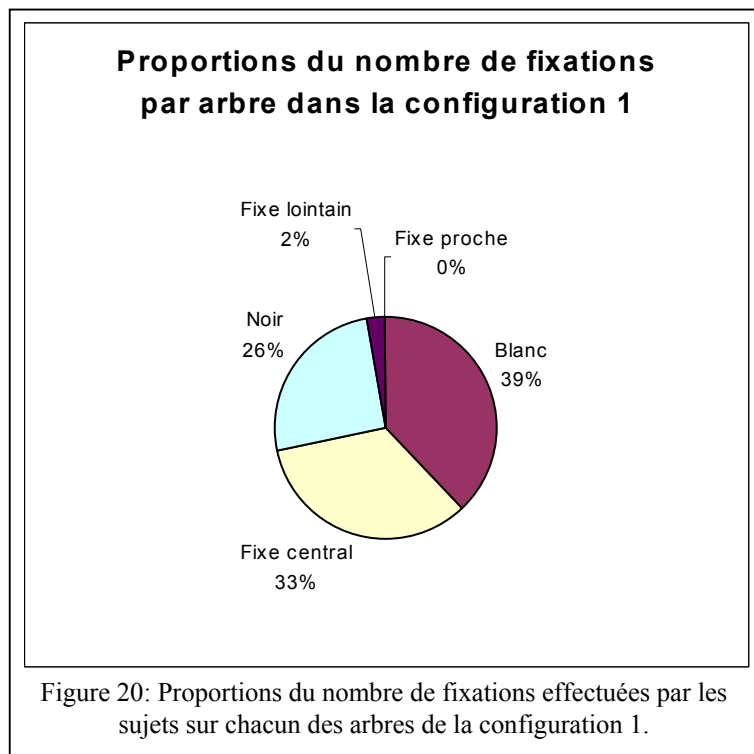
### *Localisation en profondeur*

Dans ce cas de figure, deux éléments sont significatifs: tout d'abord, l'interaction entre les deux variables indépendantes, locomotion et mouvements oculaires ( $F_{(1,12)} = 5.969$ ;  $p = .020$ ). Les participants font en effet des erreurs plus petites dans la condition avec mouvements oculaires et locomotion passive que dans toutes les autres. Ensuite, l'interaction triple entre les deux VI et le score au paper-folding est également à relever ( $F_{(1,12)} = 8.245$ ;  $p = .008$ ).



## Les stratégies d'exploration oculaire

La figure 20 nous révèle une grande proportion de fixations sur l'arbre blanc. L'arbre fixe central et l'arbre noir suivent de près alors que les deux arbres fixes les plus périphériques sont à peine pris en compte.



Au niveau de la durée de fixation (Figure 21), l'arbre central est le plus observé avec une marge confortable. Les deux arbres mobiles suivent mais c'est le blanc qui est observé le plus longtemps des deux. Encore une fois, les arbres périphériques ne ressortent pas du tout.

### *Différences de stratégies d'exploration oculaire*

Pour cette configuration d'arbres, l'enregistrement 5 sur le sujet n°4 semble différer des enregistrements 4 et 6 (voir les détails en annexe D). En effet, le nombre de mocs effectués est beaucoup plus élevé que dans les autres (24 contre 10 et 8). De plus le sujet a observé l'arbre blanc beaucoup plus longtemps (6.8sec contre 4.1 et 1.3sec) et un plus grand nombre de fois (11 contre 4 et 1). Par contre l'arbre central a été fixé nettement moins longtemps (3.7sec contre 9.4 et 9.2sec). Le participant a également été le seul à porter attention à l'arbre fixe lointain en l'observant 1 fois pendant 1.2s. S'il n'a pas été le seul à faire des patterns de mocs, ce sujet en a fait plus (3 sur 17 saccades).

Au niveau des différences de performance, ce sujet à dans cette séquence été le plus mauvais de l'échantillon au niveau des erreurs latérales (X), ainsi qu'au niveau des erreurs sur l'arbre noir (au total et en X). Par contre il a été le meilleur au niveau des erreurs en profondeur (Y).

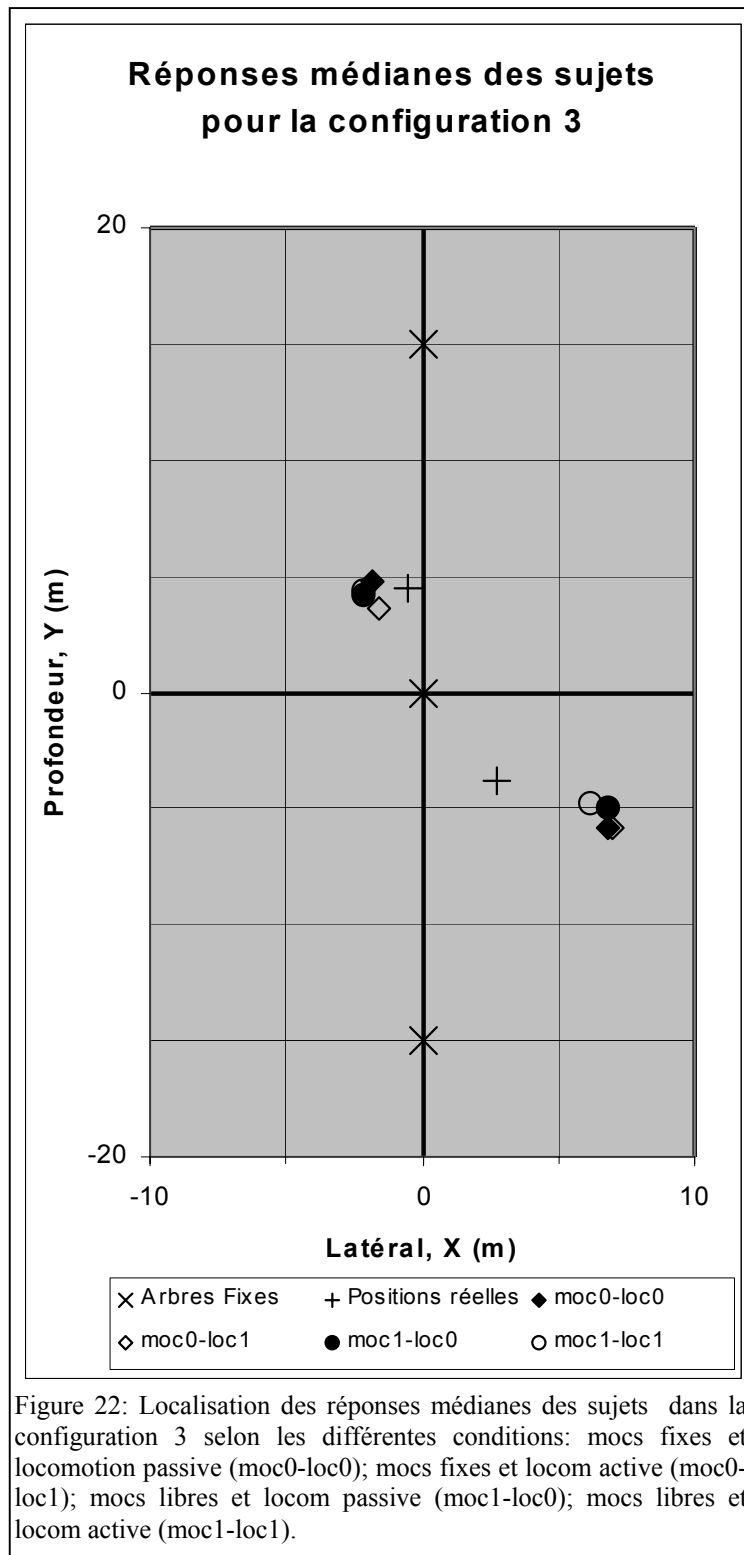
On retiendra donc que pour cette configuration, observer préférentiellement l'arbre blanc nuit aux performances de localisation latérales de l'ensemble, mais améliore la localisation en profondeur.

### La configuration 3

La figure 22 nous montre pour cette configuration qu'encore une fois les estimations des participants sont groupées mais surévaluées au niveau latéral. Remarquons que pour l'arbre blanc plus précisément, et comme pour la configuration 1, les estimations sont spécialement surévaluées sur X.

#### *Localisation en latéral*

L'interaction entre les deux VI, mouvements oculaires et locomotion est significative aussi bien en général ( $F_{(1; 12)} = 4.335$ ;  $p = .044$ ), que pour l'arbre blanc en particulier ( $F_{(1; 12)} = 9.407$ ;  $p = .011$ ). La différence observée pour l'arbre blanc semble influencer la mise en commun (moyenne) des résultats des deux arbres. Nous observons en fait que lorsque la locomotion est active, les sujets sont meilleurs pour replacer latéralement l'arbre blanc s'ils ont la possibilité de bouger les yeux librement que s'ils ne le peuvent pas.



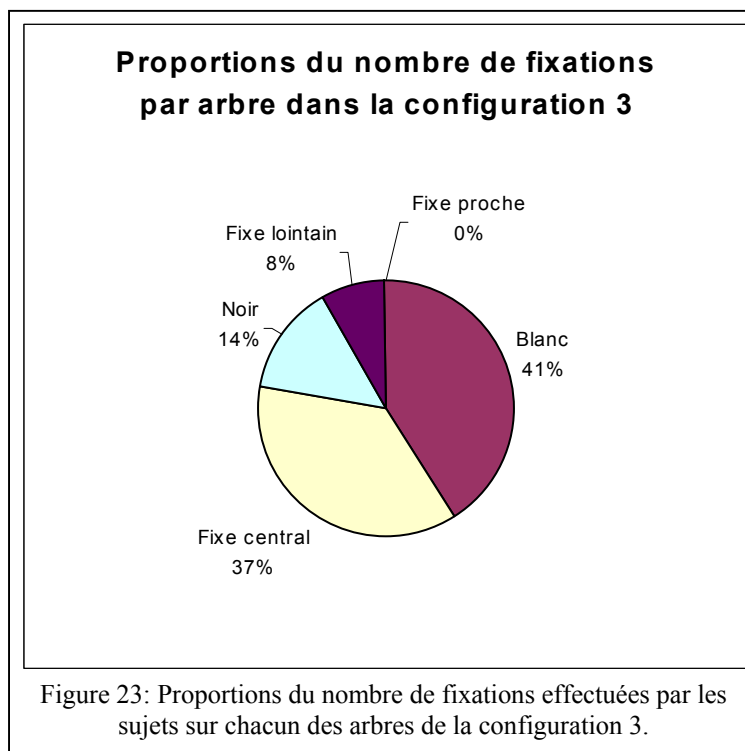
Lorsque la locomotion est passive, les résultats ne diffèrent pas.

L'interaction triple entre les deux VI et le score au paper folding se révèle, elle aussi, significative. Comme précédemment, ceci se remarque de manière générale ( $F_{(1; 12)} = 4.186$ ;  $p=0.48$ ), mais surtout en observant l'arbre blanc uniquement ( $F_{(1; 12)} = 9.191$ ;  $p = .011$ ).

### *Localisation en profondeur*

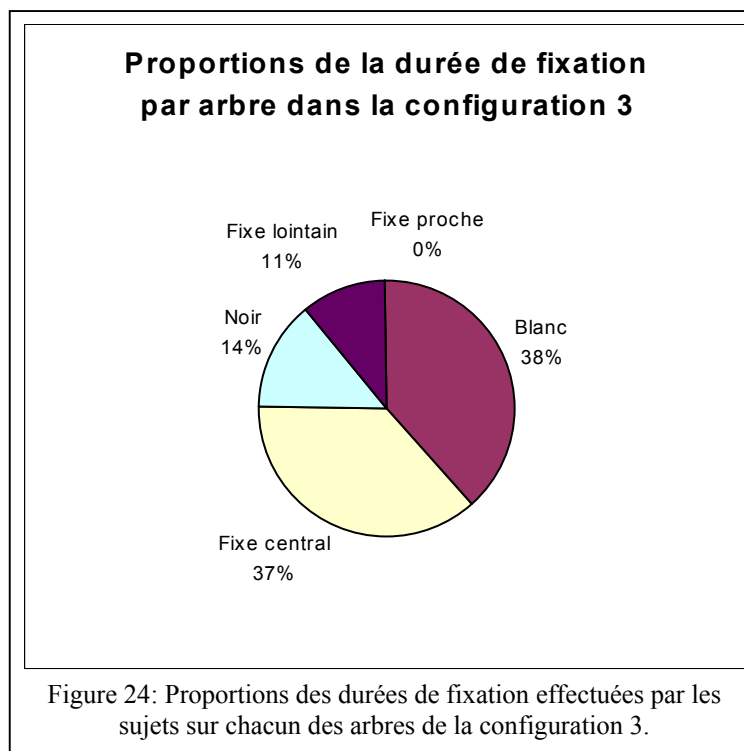
L'interaction entre les deux VI est significative en général ( $F_{(1; 12)} = 4.335$ ;  $p = .044$ ), ainsi que pour l'arbre blanc seulement ( $F_{(1; 12)} = 9.407$ ;  $p = .011$ ). Lorsque la locomotion est passive, les erreurs de localisation sont plus grandes quand le sujet a le droit d'utiliser des mouvements oculaires que quand il ne l'a pas. Une locomotion active ne crée pas de grande différences au niveau de la seconde variable.

### *Les stratégies d'exploration oculaire*



La figure 23 met tout a fait en valeur la grande proportion de fixations sur l'arbre blanc ainsi que sur l'arbre central. Comme d'habitude, l'arbre noir attire un peu l'attention alors que les arbres périphériques beaucoup moins.

On retrouve à peu de choses près les mêmes proportions au niveau de la durée de fixation des différents arbres (Figure 24). C'est bien l'arbre blanc qui attire le plus l'attention, suivi de près par l'arbre central.



### *Différences de stratégies d'exploration oculaire*

L'enregistrement n°7 semble présenter des différences (voir annexe D), puisque le sujet 3 a fait un plus petit nombre de mocs (13 contre 18 et 19) et a regardé moins souvent l'arbre du centre (2 contre 7 et 9) et pendant moins longtemps (1.6sec contre 6.5 et 6.5sec). Il a, par contre, beaucoup regardé l'arbre fixe lointain (3 fois pour un total de 4.1 sec).

Les effets au niveau des résultats de localisation sont faibles mais perceptibles. Ce sujet est le meilleur pour localiser l'arbre noir (lointain). Par contre, c'est lui qui fait le plus d'erreur latérale et qui en fait le moins en profondeur (sur l'arbre noir toujours).

On notera donc que dans cette configuration, c'est le sujet qui a le moins bougé les yeux et qui a le plus regardé l'arbre du fond qui a pu replacer l'arbre mobile lointain (noir) le plus précisément.



## La configuration 5

Comme on peut le voir sur la figure 25, les estimations des participants sont encore une fois groupées et surévaluées au niveau de la distance latérale aux arbres fixes. Cette fois cependant c'est pour l'arbre noir que les surestimations sont les plus importantes.

### *Localisation en latéral*

L'ANCOVA à mesures répétées révèle qu'aucune des deux variables indépendantes ne produit de différence significative de performance selon ses différentes modalités. Que ce soit au niveau des effets principaux, des interactions ou des effets simples, en regroupant ou en différenciant les arbres blanc et noir, aucun résultat n'est significatif à un seuil  $\alpha < .05$ .

### *Localisation en profondeur*

Comme pour la dimension latérale, rien n'est en aucun cas significatif. Les variables indépendantes ne montrent pas d'influence suffisamment grande

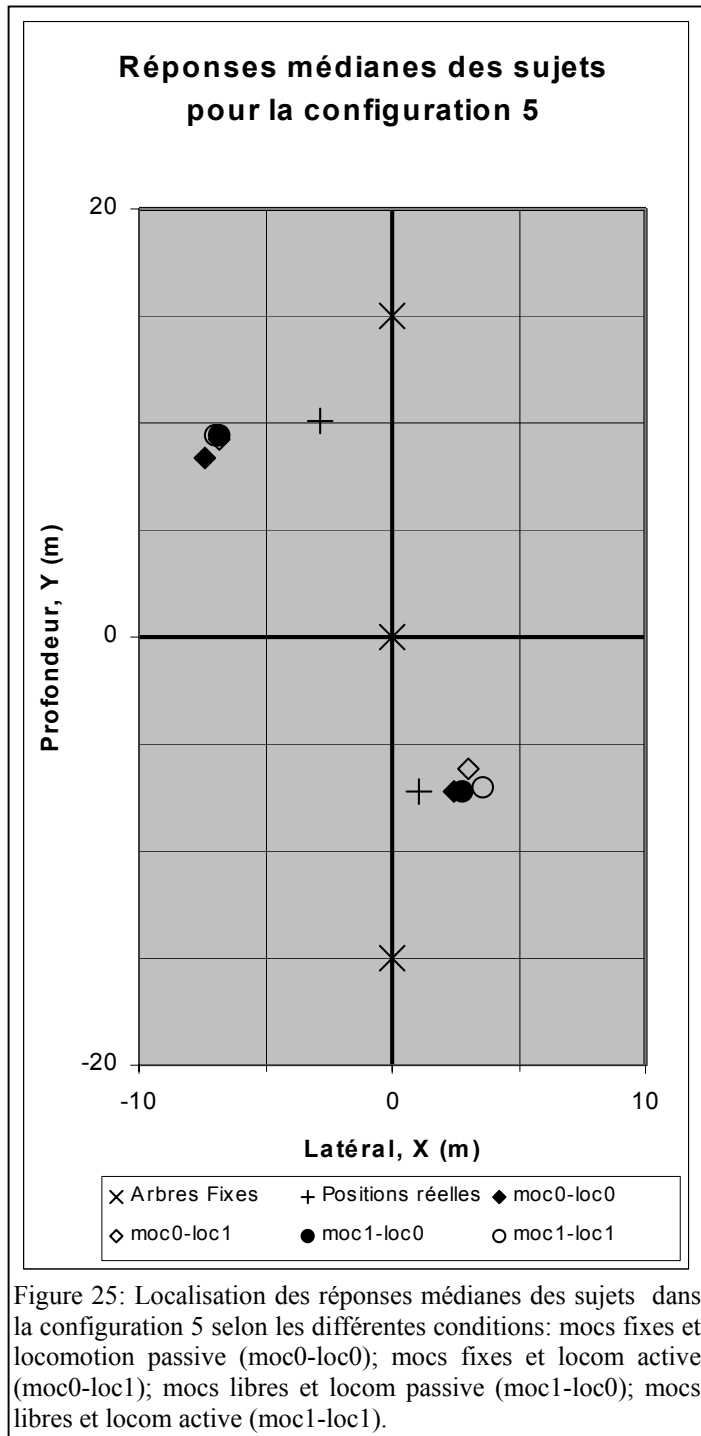
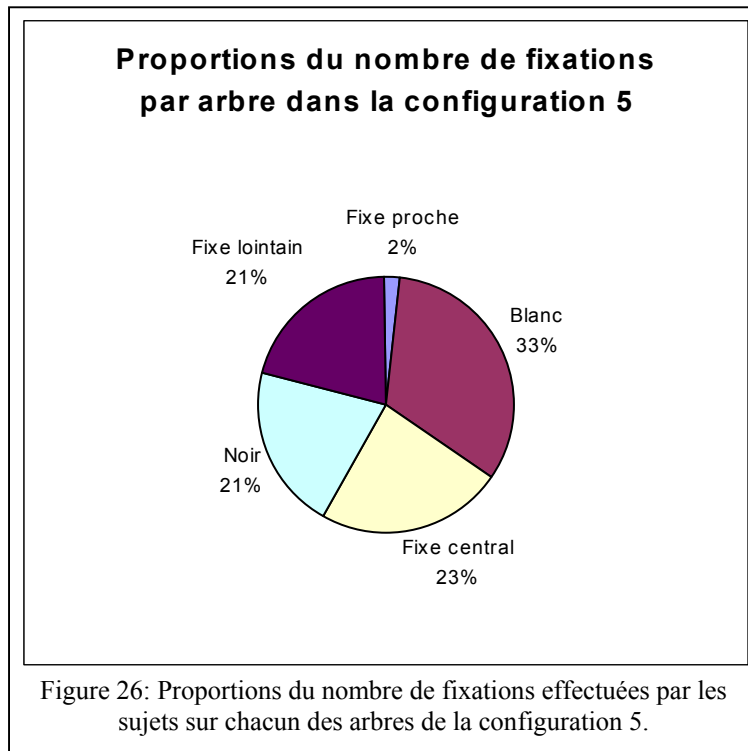


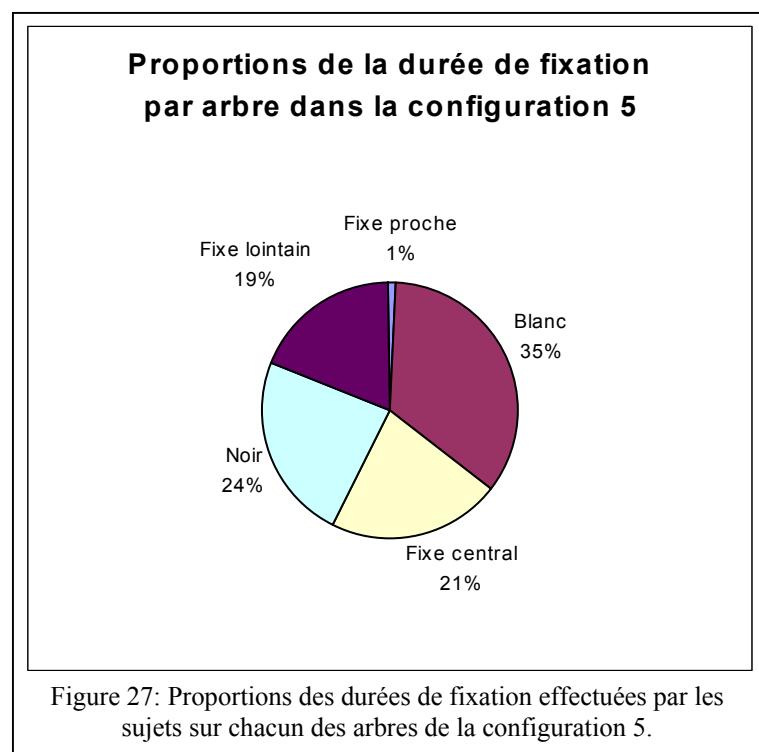
Figure 25: Localisation des réponses médianes des sujets dans la configuration 5 selon les différentes conditions: mocs fixes et locomotion passive (moc0-loc0); mocs fixes et locom active (moc0-loc1); mocs libres et locom passive (moc1-loc0); mocs libres et locom active (moc1-loc1).

## Les stratégies d'exploration oculaire



Comme on peut le voir sur la figure 26, les proportions de fixations sur les différents arbres sont relativement équivalentes. A l'exception de l'arbre fixe proche, quasiment laissé pour compte, les autres arbres sont observés autant de fois les uns que les autres, avec une légère préférence tout de même pour l'arbre blanc.

Les durées de fixations, en figure 27, montrent la même chose que le nombre de fixations. L'arbre fixe proche est peu observé alors que les autres le sont tous de manière équivalente, avec encore une fois une préférence pour l'arbre blanc.



### *Différences de stratégies d'exploration oculaire*

Dans cette configuration d'arbres, l'enregistrement 13 du sujet 4 comporte le plus grand nombre de mocs (21 contre 8, 7 et 16), qui a peu observé l'arbre central (2 fois et pendant 1.7sec) et qui a répété 2 patterns pendant 11 mocs (toujours entre l'arbre mobile blanc et l'arbre fixe lointain).

Les résultats de localisation de ce sujet dans cette séquence sont les plus mauvais au niveau de l'erreur en latéral et de l'erreur en profondeur sur l'arbre noir ainsi que de l'erreur en latéral sur l'arbre blanc. Dans la configuration 5, peu observer l'arbre central semble donc préjudiciable de manière générale quant aux performances de localisation.

## DISCUSSION

Rappelons brièvement les résultats obtenus à un niveau général :

- Ni la liberté de mouvements oculaires, ni le déplacement actif ou passif n'ont d'influence significative sur les performances de localisation en X comme en Y.
- Les mouvements oculaires observés semblent difficiles à regrouper en catégories de stratégies d'exploration. On peut cependant trouver des indices intéressants :
  - Observer un arbre améliore la localisation d'autres mais peut nuire à la localisation de l'arbre fixé.
  - Les arbres mobiles et l'arbre central sont les plus fixés par les sujets.
  - Répéter des patterns d'exploration dans les saccades oculaires ne semble, curieusement, pas porter à bénéfice.

D'une manière plus générale, il a été vérifié que si les localisations sont plutôt précises en profondeur (Y), elles sont nettement plus mauvaises (et surestimées) au niveau latéral (X). De plus l'arbre noir (lointain) est replacé avec beaucoup plus de précision que l'arbre blanc (proche); cependant, ceci est surtout dû à une flagrante augmentation de l'erreur latérale sur l'arbre blanc. Des différences entre les configurations ont également été mises en évidence.

Les résultats obtenus ne confirment aucunement nos hypothèses théoriques. En effet, nos deux variables indépendantes n'ont aucun effet et les mouvements oculaires enregistrés ne sont pas catégorisables. Nos résultats expérimentaux semblent donc contredire l'importance du couplage visuo-perceptif (Berthoz, 1997; Warren, 1995b), et de l'exploration oculaire (Deubel et al., 1988; Peruch et al., 1995; Yarbus, 1967) dans des tâches de localisation et de perception de distances relatives.

Cependant, l'analyse faite séparément pour les quatre configurations d'arbres a pu permettre de mettre en évidence quelques effets en concordance avec les apports théoriques formulés précédemment. Nous allons donc discuter de ces observations configuration par configuration. Nous poursuivrons en traitant de la mise en commun des observations pour les configurations particulière, pour arriver à des conclusions plus générales.

## ***Discussion des différentes configurations***

### La configuration 0

L'effet principal de la variable de locomotion a montré des erreurs latérales plus grandes lorsque le sujet marche que lorsqu'il est poussé; l'interaction entre les deux VI a souligné que c'est le cas surtout lorsque le sujet a une liberté oculaire. Les sujets font donc de plus grandes erreurs latérales (X) lorsqu'il sont dans la situation la plus naturelle (locomotion active et mocs libres) que dans les autres. Cet effet est principalement visible sur l'arbre noir et seulement dans l'axe latéral.

Au vu de la position de l'arbre noir dans cette configuration, on peut remarquer qu'il se situe en zone d'OA pendant toute la stimulation. Cet indice étant complètement non-informatif (Cutting et al., 2000), le placement de cet arbre a dû être difficile dans toutes les conditions. Le seul moyen de placer l'arbre noir dans une zone informative (IM ou OD), aurait été de fixer l'arbre lointain (chose que les sujets n'ont jamais faite lorsqu'ils le pouvaient).

Une explication peut être donnée en remarquant que le nombre de mocs fait par les sujets lorsqu'ils sont déplacés passivement est nettement plus grand que pour lors d'un déplacement actif. Il est donc possible que pendant un déplacement actif, les sujets soient plus "figés" au niveau de leurs mocs que lors d'un déplacement passif (pendant lequel les participants sont assis et observent simplement le paysage à loisir). On peut imaginer que se déplacer activement (et dans cette situation, à côté d'un chariot rempli de câbles), requiert de l'attention qui ne peut plus être investie dans l'exploration spatiale. Tout ceci entraînant une exploration de l'espace moins active, donc moins informative et donc moins efficace. Malgré tout, cela n'explique pas pourquoi la condition avec locomotion active, sans mocs obtient des résultats plus satisfaisants...

### La configuration 1

Aucun effet n'est à relever au niveau de l'erreur latérale de localisation. Par contre, les sujets obtiennent de meilleures performances en profondeur s'ils sont en locomotion passive et qu'ils ont le droit d'effectuer des mocs que dans les autres conditions. On pourrait donc dire qu'être assis améliore l'exploration de l'espace si cette exploration est possible librement. En reprenant ce qui a été dit pour la configuration 0, se déplacer passivement permet peut-être une observation plus attentive de la scène visuelle. La condition d'exploration libre permet alors de tirer pleinement parti de cette possibilité d'observation soutenue.

Au niveau des mouvements oculaires observés, cette configuration est particulière car les arbres fixes proches et lointains ont été quasiment complètement ignorés par les sujets. La position de l'arbre blanc, complètement en périphérie, n'y est peut être pas pour rien. Cet arbre est si loin en latéral que les deux arbres délaissés ne constituaient peut être pas des repères suffisamment informatifs pour sa localisation.

On peut d'ailleurs relever la même chose au niveau de l'enregistrement n°5: ce sujet est le seul à observer l'arbre du fond et il est également le plus mauvais pour replacer les arbres au niveau latéral. Ce sujet avait également fixé l'arbre mobile blanc plus régulièrement et plus longtemps, chose tout à fait inutile car il plaçait ainsi tous les autres arbres dans une zone d'OA, non-informative. On comprend donc ses plus grandes erreurs.

### La configuration 3

Au niveau des performances de localisation, on observe ici, au niveau latéral, que si le sujet se déplace activement et qu'il est libre de ses mocs, alors ses erreurs sont plus petites que dans les autres conditions (en général et sur l'arbre blanc en particulier). Au niveau de la profondeur par contre, les erreurs sont plus grandes si le sujet est en déplacement passif et en exploration active que dans les autres conditions (aussi en général et sur l'arbre blanc). On remarque également que l'arbre blanc est en règle générale le plus observé par les participants.

Les résultats observés semblent donc en contradiction les uns avec les autres et entre les différentes configurations. L'influence de nos VI, en particulier de la locomotion, est peut être différente sur l'axe latéral et l'axe de profondeur. Les dimensions X et Y ne sont en effet certainement pas d'importance comparable. La dimension latérale peut en effet être estimée très rapidement, au niveau de la rétine déjà. Par contre la profondeur nécessite la mise en œuvre d'indices particuliers présentés au début de ce travail. De plus, la profondeur est d'une grande importance pour la détection du heading (Vishton & Cutting, 1995). Nous reviendrons plus précisément sur ce point dans la discussion générale.

### La configuration 5

Aucun résultat de localisation n'est significatif dans cette configuration. Par contre, au niveau du nombre de fixations par arbre, on peut remarquer des proportions relativement semblables à celles de la configuration 0, à cela près que c'est cette fois l'arbre fixe proche qui n'est que très peu observé, mais les quatre autres arbres sont tous fixés un nombre relativement équivalent de fois.

Du point de vue de l'observateur, les arbres mobiles et l'arbre central étaient très proches les uns des autres au niveau latéral sur la rétine. De l'occlusion a dû se produire et les arbres sont passés par des zones informatives (IM ou OD). L'information a certainement été suffisamment disponible en toute circonstance pour que la localisation se fasse précisément quelque soit la condition expérimentale (les résultats pour cette configuration sont d'ailleurs parmi les meilleurs). Ce fait est illustré par l'enregistrement 13. En effet, le sujet a dans ce cas peu regardé l'arbre central et a eu les moins bons résultats de localisation de l'échantillon.

## ***Discussion générale***

Maintenant que les effets observés dans les différentes configurations ont été discutés en détail, il est possible de revenir à un niveau plus théorique pour tenter d'expliquer les résultats obtenus.

### **L'importance des jugements de profondeur.**

Les différences de résultats de localisation observés entre l'axe latéral et l'axe en profondeur sont visibles dans toutes les analyses. L'évaluation latérale (X) semble même être toujours surestimée alors que la distance en profondeur (Y) a plutôt tendance à être sous-estimée (mais moins nettement). Deux arguments peuvent expliquer cette différence : un argument théorique et un argument méthodologique. De plus, la notion de latéral et de profondeur peut être discutées dans ce paradigme expérimental.

### ***L'argument théorique***

Vishton & Cutting (1995) ont montré l'importance de la connaissance de la profondeur des objets dans des tâches de wayfinding. L'utilisation optimale des indices de parallaxe de mouvement différentielle (DMP), et des indices d'IM, d'OD ainsi que le DDLO, passe par une bonne représentation de la distance des objets par rapport à l'observateur. On peut donc penser que cette dimension de localisation est effectuée de manière plus précise par les sujets car elle est très importante pour déterminer la direction de déplacement. La localisation latérale d'un objet dépend en effet de la direction de regard de l'observateur et change continuellement (par un simple mouvement de la tête ou des yeux). Elle doit donc être retrouvée incessamment et ce grâce à la DMP et aux indices qui en découlent, qui nécessitent des informations de profondeur. La connaissance de la profondeur d'un objet peut donc être considérée comme prioritaire sur la connaissance de la position latérale. Les capacités de localisation en profondeur peuvent donc être beaucoup plus aiguisées et précises chez tout utilisateur, ce qui expliquerait les résultats obtenus.

Les résultats observés dans la configuration 3 pourraient bien aller dans le sens de cet argument en montrant que l'interaction entre le type de déplacement et la liberté de mocs a une influence différente sur la localisation en X et sur celle en Y. Cette dernière observation reste néanmoins à confirmer plus précisément.



### *L'argument méthodologique*

Les arbres vers lesquels les observateurs se déplacent sont toujours organisés de la même façon: trois arbres fixes disposés en ligne et deux arbres mobiles situés dans les intervalles à des positions différentes pour chaque configuration. Le fait est que les trois arbres fixes servent de référents pour la localisation et le positionnement des deux arbres mobiles. Les arbres fixes sont situés sur une ligne dirigée en profondeur (sur l'axe Y). L'observateur dispose donc de plus de références en profondeur qu'en latéral lorsqu'il observe les arbres et lorsqu'il doit donner sa réponse. Ceci pourrait expliquer les grandes différences observées entre la localisation en profondeur et latérale. En effet, les erreurs sont toujours plus grandes au niveau latéral qu'en niveau de la profondeur. La surestimation latérale semble même proportionnelle à la distance de l'arbre mobile aux arbres fixes.

On pourrait également utiliser cet argument pour expliquer le fait que d'une manière générale les sujets regardent très peu les arbres fixes proches et lointains. En effet, si l'arbre fixe central peut constituer une référence pour les deux arbres mobiles, Les deux arbres fixes périphériques ne peuvent servir de repère que pour un arbre mobile à chaque fois. L'arbre central est donc plus pertinent de ce point de vue. On peut trouver des justifications dans les résultats pour la configuration 1, dans laquelle on a vu que les arbres fixes périphériques n'étaient pas de bons repères pour la dimension latérale. Dans la configuration 3 on a également remarqué qu'observer l'arbre du fond améliorerait la localisation de l'arbre noir en général.

D'autre part, nous avons considéré la profondeur et la latéralité sur un axe orthonormé centré sur l'arbre fixe central dont l'axe Y était donné par l'alignement des arbres fixes. Cette représentation est exocentrée. Par contre, le jugement latéral et en profondeur du sujet pourrait être égocentré. Un argument en faveur de l'égocentrisme est même déductible de Vishton et Cutting (1995): la carte de profondeurs nécessaire selon ces auteurs à l'utilisation des indices d'IM, OD et DDLO, est égocentrée (ou, si elle est stockée de manière exocentrée, elle doit être transformée en représentation égocentrée pour être utilisable). Or, le fait que le sujet se déplace sur une ligne parallèle mais à l'écart de l'alignement des arbres fixes, fait que les deux représentations, ego et exocentrée, ne sont pas équivalentes. Reprendre les données brutes de localisation et les analyser en tenant compte de ce changement d'axes pourrait être plus adéquat pour parler de jugement en profondeur et en latéral du point de vue de l'observateur.

## Les mouvements oculaires

Les patterns des mouvements oculaires (mocs) enregistrés par le NAC et analysés image par image étaient très peu cohérents : plusieurs reflets pour le même œil apparaissaient régulièrement, il arrivait également que le reflet disparaisse quand ce n'était pas le magnétoscope lui-même qui s'arrêtait. D'une manière générale les fixations des sujets se situaient dans le ciel ou sur le gazon et pas sur les différents arbres (d'ailleurs difficiles à distinguer). Elles étaient très instables et fluctuantes, et vu l'espacement réduit des arbres pour l'observateur, il était difficile de décider si l'observateur avait déplacé son regard ou non.

La récolte des données au niveau des mouvements oculaires a donc été très laborieuse et les données utilisées par la suite constituent la meilleure approximation, à notre sens et compte tenu des circonstances, des mocs réels des sujets. Après avoir éclairci différents points techniques pouvant expliquer les problèmes de mesure, nous verrons ce que les mocs effectivement récoltés peuvent tout de même nous apprendre sur les stratégies d'exploration oculaires.

Au niveau technique, il semble bien que le NAC ne soit pas conçu pour enregistrer des mocs lors d'un déplacement actif du sujet. Encore moins si le déplacement se fait passivement sur un chariot ballottant allégrement au gré des imperfections du terrain. Malgré les diverses sangles, l'appareil bouge facilement et un tout petit mouvement du casque peut produire beaucoup de changements au niveau de l'enregistrement. Le fait d'avoir fait passer l'expérience en extérieur nous a donc été préjudiciable. D'une part à cause du terrain plat mais néanmoins imparfait, d'autre part à cause du soleil créant des reflets supplémentaires sur les yeux des sujets.

Le magnétoscope a également posé des problèmes ; un grand nombre de séquences ont vu leur enregistrement s'arrêter après quelques secondes. Elles n'ont simplement pas pu être utilisées par la suite. Ce fait a réduit considérablement la quantité de données disponibles (13 séquences utilisables sur 40), données par ailleurs peu fiables.

Malgré ces différents problèmes, des séquences étaient tout de même de qualité suffisante pour permettre une bonne estimation de l'arbre fixé par le sujet à chaque instant. Les résultats permettent de mettre en évidence quelques éléments en accord avec l'utilisation de DMP ainsi que de l'IM et de l'OD:

1. Les arbres mobiles et l'arbre central sont les plus fixés par les observateurs. Fixer les arbres les plus regroupés au centre permet d'utiliser pleinement la DMP et les indices d'IM et d'OD. En effet, ainsi des objets se déplacent devant et derrière le point de fixation, dans des sens opposés et à des vitesses différentes. Les arbres périphériques (le fixe proche et celui du fond), n'auraient pas donné autant d'informations sur ce même indice puisque tous les autres arbres auraient alors été situés derrière ou devant le point de fixation. On remarque que cela a encore plus d'impact pour les configurations dans lesquelles les arbres étaient regroupés vers le centre (n° 0 et 5), les erreurs de localisation y étaient en effet nettement plus faibles. Le cas présenté pour la configuration 5 ajoute également des arguments puisque le sujet a peu fixé l'arbre central et qu'il a été le plus mauvais sur les deux arbres mobiles.
2. Les corrélations significatives et les cas présentés nous révèlent aussi que se focaliser sur un arbre n'est pas forcément bénéfique à la localisation précise de celui-ci. Par contre, il semble que cela améliore l'estimation de la position (en X ou en Y) des autres arbres. On retrouve donc l'idée de DMP (et d'IM et d'OD), fixer un arbre lorsqu'on se déplace donne plus d'information sur la position des autres objets de l'environnement que sur l'objet observé en lui-même.
3. On retrouve aussi une influence de la durée de la séquence (12 sec) sur la localisation des arbres. Mais curieusement celle-ci va dans le sens d'une augmentation des erreurs avec une présentation plus longue. Cet effet est plutôt difficile à expliquer mais on peut penser que l'estimation de localisation se fait très rapidement. Ce surtout pour la profondeur des objets puisque cet indice semble être nécessaire à d'autres tâches cruciales comme le wayfinding (Vishton & Cutting, 1995). On pourrait donc penser qu'une relativement bonne estimation se fait rapidement et qu'ensuite l'observation forcée et soutenue (pas réellement naturelle) ne fait qu'ajouter des imprécisions. Néanmoins les corrélations observées ne sont ni très nombreuses, ni très fortes. Les différences au niveau de la durée de la séquence atteignent tout de même les 3.78s pour le plus grand écart, signalons que pour une durée sensée être maintenue constante (à 12s) on atteint les 16s ont été atteints dans un cas.

4. Étonnant également, les patterns répétés de mocs ont un effet néfaste sur la localisation. On aurait pu en effet s'attendre à une amélioration dans le sens que faire des aller-retour entre les arbres au long du déplacement pourrait permettre d'évaluer les changements dans les distances rétinienne entre-eux. Il semble que ce ne soit pas le cas. Par contre, on peut retrouver l'idée de la DMP car faire des aller-retour entre les arbres et observer les distances et les angles entre-eux n'est pas la même chose que d'observer le mouvement des autres arbres que ceux fixés. La première stratégie utilise en fait une succession d'images fixes et compare la déformation des angles et des distances directes entre les arbres fixés. Il s'agit d'une stratégie plus active et consciente nécessitant un plus grand nombre de saccades. La seconde, basée sur la DMP observe les vecteurs de déplacement des objets au cours du temps. Cette dernière semble être utilisée constamment par le système perceptif. Si ces deux stratégies ne sont pas exclusives, les participants ont certainement recouru à l'une plus qu'à l'autre et il semble que la première, lorsqu'elle est mise à l'œuvre, donne de moins bons résultats. Le fait que la première stratégie (utilisant plus activement les mocs) soit moins efficace explique peut être également l'absence d'effet de la variable indépendante d'utilisation des mouvements oculaires. Regarder toujours au même endroit est déjà une bonne stratégie, elle n'est aucunement préjudiciable pour une bonne localisation.

Il semble néanmoins bon de faire remarquer qu'en règle générale, les corrélations observées ne lient que quelques indices entre-eux et ne sont jamais présentes fortement sur toutes les dimensions. Les observations discutées jusque-là sont donc à prendre avec précautions et, malgré leur significativité, à considérer plus comme des tendances que des conclusions formelles. Il est en effet quasiment impossible (surtout compte tenu du nombre d'enregistrements par condition) de catégoriser des stratégies d'exploration visuelle. Il semble même en fait que ce soit plus la disposition des objets dans la scène visuelle qui dicte la façon d'explorer l'espace selon de la tâche à accomplir plutôt qu'une stratégie interne qui s'accommoderait (au sens Piagétien) à une disposition particulière d'objets à localiser. Cette observation particulière demande cependant encore des confirmations expérimentales avant d'être réellement défendable.

## Les configurations

Les différences entre les configurations 1 et 3 présentant de fortes erreurs et les configurations 0 et 5 peuvent, on l'a vu, s'expliquer par de plus grandes erreurs latérales, surtout sur l'arbre blanc, dans ces deux configurations. En observant les configurations d'un peu plus près, on peut voir que :

- Les configurations 1 et 3 sont celles pour lesquelles l'arbre blanc est le plus éloigné de l'axe des arbres fixes (respectivement 7 et 2.77m contre  $-2.06$  et  $1.02$ m pour les configurations 0 et 5). Ceci peut donc influencer leur bonne localisation comme nous l'avons montré précédemment.
- La configuration 3 est celle pour laquelle l'arbre blanc est le plus proche de l'arbre central. Sa vitesse de déplacement latérale, au cours de la séquence est donc la plus faible. L'évaluation de sa distance à l'arbre fixe central à l'aide de la DMP et des divers indices peut donc être plus difficile pour l'observateur.
- Enfin, l'arbre blanc de la configuration 1 est plus à l'écart des arbres centraux que ne l'est le sujet. S'il continuait sa route, l'observateur passerait entre l'arbre blanc et les autres. Connaissant les bonnes capacités de wayfinding des êtres humains (Cutting et al., 2000; Cutting et al., 1992; Cutting et al., 1999; Cutting et al., 1997; Li, 2000; Vishton & Cutting, 1995), ce fait ne doit pas avoir échappé au sujets de l'expérience. Comme la configuration 1 est la seule présentant ce cas de figure, il est difficile de pouvoir donner de réelles explications quant à l'influence de ce point précis. Cependant on peut penser que, puisqu'il est de l'autre côté de son trajet, le sujet peut être poussé à estimer l'arbre blanc comme plus à l'écart qu'il ne l'est réellement. De plus, dans cette configuration, l'arbre blanc ne passait jamais devant un autre arbre (pas d'occlusion) et se déplaçait donc toujours de la même manière sur la rétine de l'observateur (toujours en OA) (Cutting, 1996; Cutting et al., 1997), ce qui pourrait également expliquer les erreurs importantes.

## La locomotion

Les résultats pour la variable de locomotion active ou passive dans la configuration 0, mais également dans la configuration 1, sont meilleurs lorsque le sujet est déplacé passivement (surtout s'il est libre de ses mocs). Le fait d'explorer librement l'espace visuel en n'ayant pas à se préoccuper de son déplacement serait donc la condition la plus favorable à une bonne localisation des objets dans l'environnement. Cette suggestion n'entre pas en opposition avec les observations de Peruch et al. (1995). En effet ces auteurs ont plus mesuré un niveau de mémorisation du chemin qu'une localisation en direct. De plus les sujets étaient passifs, au niveau moteur, dans toutes les conditions.

Les sujets en locomotion active devaient en effet marcher à côté du chariot en s'y tenant. Ils devaient régler leur vitesse en fonction et se concentrer sur les arbres en faisant abstraction du chemin qu'ils suivaient. Il est possible qu'une partie des ressources attentionnelles des sujet ait été mise en œuvre pour contrôler la vitesse de marche et pour ne pas toucher le chariot (les sujets portant le NAC pouvaient même être gênés par les câbles reliant le casque au chariot). Tous ces éléments perturbaient certainement pas le sujet lorsqu'il était assis et transporté passivement. L'exploration oculaire libre a certainement pu profiter pleinement aux sujets lorsqu'ils étaient passifs, comme l'ont montré les configurations 0 et 1.

## **Conclusion**

L'expérience présentée dans ce travail est certainement critiquable au niveau de la qualité des données de mouvements oculaires utilisées pour les résultats. Néanmoins, les effets des diverses conditions expérimentales sur les performances de localisation spatiale ne sont pas, au niveau théorique, en contradiction avec les observations faites sur les mouvements oculaires des sujets.

La position relative des arbres en elle-même semble influencer beaucoup la possibilité de les localiser avec précision, cela se remarque au niveau des différentes configurations et des deux arbres mobiles. L'utilisation des indices de parallaxe de mouvement différentielle, d'IM et d'OD n'est certainement pas étrangère à ces résultats. Que ce soit au niveau des performances de localisation simplement ou en fonction des mouvements oculaires effectués, la DMP et les divers indices qui en découlent semblent constamment être une explication sous-jacente aux bonnes ou mauvaises performances dans les différentes conditions et configurations. La différence entre jugements en profondeur et en latéral entre également en ligne de compte pour une interprétation en terme d'indices d'IM et d'OD (Vishton & Cutting, 1995).

Malgré tout, les problèmes techniques liés à la passation de l'expérience ont rendu les résultats peu fiables et surtout peu clairs. Retenter l'expérience avec un matériel plus adéquat et une meilleure préparation serait donc une option envisageable pour confirmer les tendances observées ici. Au niveau théorique cependant, le paradigme utilisé en lui-même pourrait être revu car un doute subsiste au niveau des erreurs de localisation latérales et en profondeur. L'absence de repères latéraux ainsi que la représentation exocentrée dans la récolte des données pourraient expliquer, au moins en partie, certaines différences observées. De même, l'influence de la passivité du déplacement peut être à revoir, ou en tout cas à investiguer plus profondément au niveau théorique.

Le mouvement de l'observateur a bien une grande importance pour une bonne représentation de son environnement. Le déplacement du regard en lui-même (les mouvements oculaires) est d'ailleurs moins important que le déplacement du participant. Les indices apportés par le déplacement du sujet (DMP etc.) semblent plus informatifs que ceux qu'apporte le déplacement de son regard (mocs). Ce qui nous mène à penser que les indices perceptifs liés au déplacement sont aussi importants pour la localisation spatiale que pour le wayfinding.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ardissone, J. (2001, 20.9.02). *e.m.c.2*, [page web]. Available: <http://e.m.c.2.free.fr/1-oeil.gif>.
- Becker, W. (1991). Saccades. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye Movements* (The Macmillan press ed., Vol. 8, pp. 95-137). London: The Macmillan Press.
- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1993). Perceiving heading with different retinal regions and types of optic flow. *Perception & Psychophysics*, 53(3), 325-337.
- Cutting, J. E. (1996). Wayfinding from multiple sources of local information in retinal flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 22, 1299-1313.
- Cutting, J. E., Alliprandini, P. M. Z., & Wang, R. F. (2000). Seeking one's heading through eye movements. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7(3), 490-498.
- Cutting, J. E., Springer, K., Barren, P. A., & Johnson, S. H. (1992). Wayfinding on foot from information in retinal, not optical, flow. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(1), 41-72.
- Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving Layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds.), *Perception of space and motion* (2nd Edition ed., pp. 71-110). San Diego: Academic Press.
- Cutting, J. E., Vishton, P. M., & Braren, P. A. (1995). How we avoid collisions with stationary and moving objects. *Psychological Review*, 102, 627-651.
- Cutting, J. E., Wang, R. F., Flückiger, M., & Baumberger, B. (1999). Human heading judgments and object-based motion information. *Vision Research*, 39, 1079-1105.
- Cutting, J.-E., Vishton, P.-M., Flückiger, M., Baumberger, B., & Gerndt, J.-D. (1997). Heading and path information from retinal flow in naturalistic environments. *Perception-and-Psychophysics*, 59(3), 426-441.
- Deubel, H., Findlay, J., Jacobs, A. M., & Brogan, D. (1988). Saccadic eye movements to targets defined by structure differences. In G. Luer, U. Lass, & J. Shallo-Hoffmann



- (Eds.), *Eye movement research : physiological and psychological aspects*. (pp. 107-145). Toronto: C. J. Hogrefe.
- Gibson, J. J. (1950). *Perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gregory, R. L. (2000). *L'oeil et le cerveau* (Mattheeuws-Hambrouck, M. Thinès, G., Trans.). (5e ed.). Paris: DeBoeck & Larcier.
- Held, R., & Hein, A. (1963). Movements produced stimulations in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative Physiological Psychology*, 56, 872-876.
- Helmholtz, H. V. (1991). La perception de la profondeur. In M. Flückiger & K. Klaue (Eds.), *La perception de l'environnement* (pp. 37-54). Lausanne: Delachaux et Niestlé.
- Hildreth, E. C., & Royden, C. S. (1998). Computing observer motion from optical flow. In T. Watanabe (Ed.), *High-level motion processing: computational, neurobiological, and psychological perspectives* (pp. 269-293). Cambridge: MIT Press.
- Kowler, E. (1990). The role of visual and cognitive processes in the control of eye movement. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes* (Elsevier ed., Vol. 4, pp. 1-70). Amsterdam: Elsevier.
- Lee, D. N., & Lishman, R. (1977). Visual control of locomotion. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18(3), 224-230.
- Li, L., Warren, W. H. (2000). Perception of heading during rotation : sufficiency of dense motion parallax and reference objects. *Vision Research*, 40, 3873-3894.
- Peruch, P., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, 7(1), 1-20.
- Rock, I. (2001). *La Perception* (D. Mestre, Trans.). Paris: DeBoeck.
- Royden, C. S. (1994). Analyses of misperceived observer motion during simulated eye rotations. *Vision research*, 34(3215-3222).
- Royden, C. S., Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1994). Estimating heading during eye movements. *Vision Research*, 34(23), 3197-3214.

- Sandini, G., Panerai, F., & Miles, F. A. (2001). The role of inertial and visual mechanisms in the stabilisation of gaze in natural and artificial systems. In J. M. Zanker & J. Zeil (Eds.), *Motion Vision: Computational, Neural, and Ecological Constraints*. Berlin: Springer.
- Sekuler, R., & Blake, R. (1990). *Perception*. (2nd ed.). New-York: McGraw-Hill.
- Shaw, R. E., Turvey, M. T., & Mace, W. M. (1981). Ecological psychology: The consequences of a commitment to realism. In W. Weimer & D. Palermo (Eds.), *Cognition and the symbolic processes: II* (pp. 159-226). Hillsdale: Erlbaum.
- Timberlake, G. T., Wyman, D., Skavenski, A. A., & Steinman, R. M. (1972). The oculomotor error signal in the fovea. *Vision research*, *12*, 1059-1064.
- Vishton, P. M., & Cutting, J. E. (1995). Wayfinding, displacements and mental maps: Velocity fields are not typically used to determine one's aimpoint. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(5), 978-995.
- Vurpillot, E. (1991). L'exploration oculaire. In M. Flückiger & K. Klaue (Eds.), *La perception de l'environnement* (pp. 161-177). Lausanne: Delachaux et Niestré.
- Warren, J. H. (1998). The state of flow. In T. Watanabe (Ed.), *High-level motion processing: computational, neurobiological, and psychological perspectives* (pp. 315-358). Cambridge: MIT Press.
- Warren, W. H., Sanders, J. A. (1995a). Perceiving heading in the presence of moving objects. *Perception*, *24*, 315-331.
- Warren, W. H., Jr. (1995b). Self-motion: Visual perception and visual control. In E. W. & R. S. (Eds.), *Perception of space and motion* (pp. 263-312). San Diego: Academic Press.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. New York: Plenum Press.