

LES MODALITES TACTILES ET AUDITIVES POUR UNE REPRESENTATION SPATIALE NON-VISUELLE : UNE APPLICATION EN VOILE POUR LES MARINS NON-VOYANTS.

Mathieu Simonnet¹, Jean-Yves Guinard², Jacques Tisseau³

(1) (2) (3) LISyC EA3883 UBO-ENIB

Centre Européen de Réalité Virtuelle

BP 38 , F-29280 Plouzané, France

Tel : 02 98 05 89 89 ; fax : 02 98 05 89 79

E-mail : {mathieu.simonnet, Jean-yves.guinard}@univ-brest.fr ; tisseau@enib.fr

Résumé :

Nous cherchons à mettre au point une stratégie de repérage spatial pour les marins non voyants. Après le sens visuel, les informations issues des modalités haptique (tactilo-kinesthésique) et auditive sont les plus appropriées à la construction de représentations spatiales imagées. Nous utilisons le sens haptique à travers des cartes en relief représentant le parcours. La modalité auditive est exploitée par des bouées sonores qui balisent le parcours et une montre vocale pour mesurer les temps de parcours. Suite à une série d'expériences isolant ces différents outils, nous concluons que la carte en relief permet de stocker en mémoire à long terme une image tactile précise du parcours. Cependant le support papier ne permet pas une actualisation en cours d'action. Les bouées sonores remplissent cette fonction de façon limitée en offrant aux sujets des retours auditifs lors du passage de celles-ci. La vitesse constante du voilier permet aux marins non-voyants de réaliser un tour de référence et de relever des temps de parcours associés à des fractions de distances reportées sur la carte en relief. Les difficultés d'utilisation de ce système en cours d'action nous mènent à faire appel aux techniques de la réalité virtuelle pour tenter de transmettre des informations haptiques en cours de navigation. Cependant un grand nombre d'interrogations constitueront le support de cette thèse de doctorat en psychologie cognitive qui débute.

Mots-clefs : Perceptions auditives et haptiques, espaces physiques et virtuels, représentation euclidienne ; objet sémantique ; sensations intuitives ; cécité ; cartographies maritimes.

1. PREAMBULE

« La réalité spatiale à laquelle accède un organisme dépend fondamentalement de l'équipement sensoriel dont il est doté » [Paillard, 1973]. Les personnes non-voyantes disposent de représentations imagées non visuelles. Ainsi la représentation d'une horloge constitue une image haptique* élaborée par le souvenir de l'exploration manuelle récurrente du cadran horaire. De la même manière une image auditive peut être produite par les sons d'un « coucou » par exemple. Cependant, Les caractéristiques des représentations issues des différentes modalités sont-elles égales face à une tâche spatiale ? Dans quelles mesures les simulations acoustiques, de retour tactiles et de retour d'efforts, permettent-elles la reconstruction mentale d'un environnement virtuel sensible et tangible ?

La vision est plus adaptée à la perception de l'espace que le sens haptique [Hatwell, 1986] dans le sens où ce dernier se limite à l'espace péricorporel alors que la vision s'étend à un espace distant [Honoré et al., 2002]. Par ailleurs, la modalité haptique reste analytique là où la vue permet de recueillir une information globale [Gentaz, 2005]. Ainsi la reconnaissance d'une carte géographique est quasiment instantanée selon la modalité visuelle alors que l'exploration manuelle d'une carte en relief demande un temps significativement plus long. L'absence de cartes géographiques répondant aux caractéristiques de la modalité auditive suggère une faible efficacité de l'audition sur le plan spatial.

Notons que nous employons le mot haptique pour l'ensemble des sensations tactilo-kinesthésiques sans distinction fine des parts respectives du toucher et de la kinesthésie. Cependant un certain nombre de travaux [Faineteau, 2003] traitent le problème. Dans un souci de lisibilité nous utiliserons le mot haptique au sens large du terme.

Quels sont les processus mis en œuvre au cours du fonctionnement cognitif impliqué dans l'élaboration de

* Le terme « haptique » fut introduit par Revesz [1958] pour caractériser la perception mobilisant à la fois des informations cutanées et kinesthésique. Il est aussi utilisé pour caractériser le type de perception à l'œuvre dans l'exploration manuelle d'objets matériels.

repères spatiaux non visuels pendant une action de déplacement ? La mise en commun de travaux portant sur la construction de **représentations spatiales imagées** [Richard, 1990], les **cartes cognitives** [Rieser et al., 1990], les **comparaisons inter modales** [Streri, 2005] et l'utilisation de **cartes en relief** pour le repérage des individus non-voyants [Espinosa, 1998] convergent vers une expérimentation simple de complémentarité des modalités haptiques et auditives. L'accessibilité de la pratique de la voile pour les personnes non-voyantes nous a amenés à appliquer nos expériences à la pratique de la voile par ce public sur un parcours à la fois balisé sonore et représenté en relief.

Le domaine de la réalité virtuelle nourrit un espoir important à propos de l'apprentissage spatial des personnes aveugles ou amblyopes dans la vie quotidienne.

2. INTRODUCTION THEORIQUE

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'espace relatif au sujet. « La géométrie du corps et ses possibilités motrices conduisent à distinguer clairement deux limites séparant trois parties de l'espace : l'espace du corps proprement dit, délimité par le revêtement cutané, l'espace proche [péricorporel], dont la limite est donnée par les points que l'organisme peut atteindre sans activité locomotrice, et l'espace lointain [extracorporel], hors d'atteinte sans activité locomotrice » [Honoré *et al.*, 2002]. L'espace du corps est principalement identifié à travers la modalité proprioceptive. L'espace péricorporel fait ensuite intervenir la vision et le toucher de façon prégnante. Finalement l'espace lointain est principalement appréhendé à travers les informations visuelles et auditives.

Par ailleurs, lors de nos déplacements, « la stabilité perceptive de l'environnement spatial, alors que les organes sont sans cesse déplacés, ou réciproquement l'assurance que c'est une partie de l'environnement qui se déplace, n'est obtenue qu'à deux conditions : être informé sur ses propres modifications de position d'une part ; référer sa position initiale comme sa position finale par rapport à des invariants spatiaux présents dans l'environnement d'autre part » [Paillard, 1973]. L'activité visuelle apparaît primordiale pour l'activité de déplacements. En effet, le défilement visuel du paysage et la localisation des lieux où nous sommes impliquent constamment l'usage de nos yeux.

La question de la façon dont le sens haptique et l'audition peuvent offrir des informations pertinentes pour l'élaboration d'une représentation spatiale efficace nécessite un approfondissement théorique de la définition de l'image spatiale.

2.1. LA CONSTRUCTION DE L'IMAGE SPATIALE

Selon Piaget et Inhelder [1977], la possibilité de se représenter un espace mathématisé ou euclidien est l'aboutissement du processus du développement cognitif de l'être humain. Jusqu'à dix-huit mois, l'enfant ne dispose que d'un espace d'action topologique, où ne sont induites que des relations entre les objets mais sans évaluation des distances. Cet espace est structuré par un invariant, l'objet permanent. L'évolution cognitive amène un espace représentatif. Ce dernier est projectif ; ainsi il offre au sujet la possibilité de considérer des objets absents de ses champs visuels, tactiles et auditifs. Ces opérations mentales qui sont pour Piaget et Inhelder [1966] des actions intériorisées vont aboutir à la construction de nouveaux invariants tels que la conservation des longueurs, des distances, des volumes, etc. Finalement lorsque le sujet est capable d'utiliser le système métrique pour mesurer ces invariants, l'élaboration de l'espace euclidien est réalisée.

Thorndyke et Hayes-Roth [1978], Byrne, [1979] et Pailhous [1970] cités par Richard [1990] différencient la nature du codage en propositions verbales et des codes imagés « dans la mesure où ceux-ci conservent des propriétés spatiales difficilement explicables par un codage propositionnel ». Par ailleurs, Anderson [1983] s'appuie sur l'expérience de Santa [1977] pour montrer qu'« un codage graphique conserve les propriétés spatiales tandis qu'un codage verbal ne les conserve pas ». Autrement dit, l'activité cognitive de repérage spatial est facilitée par des représentations imagées. Pour Paivio [1971] les représentations mentales imagées dérivent des perceptions et leur sont strictement analogiques. Ce psychologue montre comment les stimuli les plus concrets comme les dessins sont les plus précis d'un point de vue mathématique et les mieux retenus. Santa [1977] met d'ailleurs l'accent sur l'isomorphisme entre les propriétés de la perception et celles de l'imagerie mentale.

La conception piagétienne de l'élaboration de la représentation spatiale attribue l'existence des objets permanents à la coordination entre les modalités visuelle et haptique dès la construction de l'espace d'action. Des travaux plus récents établissent que la perception spatiale n'est plus la réception [puis la représentation] d'une forme mais sa construction active [Hanneton et al., 1998]. Autrement dit il est nécessaire d'anticiper pour percevoir.

2.2. LA REPRÉSENTATION SPATIALE EN COURS D'ACTION OU « ENACTION SPATIALE »

G. Declerck [2005] considère que la perception consiste dans la connaissance et la maîtrise active des lois de contingence sensori-motrices, c'est-à-dire de règles de liaison entre les actions motrices et les changements sensoriels que ces actions produisent. Le marin non-voyant ne peut pas contourner une bouée sonore s'il n'anticipe pas les sensations constitutives des couples perception action liés aux manœuvres de la barre et des voiles d'une part et à la position sur le parcours d'autre part.

Cette primauté de l'action dans la construction d'une représentation pertinente de l'espace a conduit Varela [1986] à concevoir la représentation comme une construction nouvelle, une « énaction », c'est-à-dire une représentation émergeant à la fois de l'ensemble des stimuli en présence et de la condition de l'organisme issue de la totalité des expériences antérieures et structurée par l'action. Ces ensembles forment des cartes neuronales. Ces représentations ne sont plus des mises à jour des structures existantes mais de constructions ad hoc adaptées au problème à résoudre. Varela [1986] utilise les travaux de Hebb [1958]. Selon la « règle de Hebb », l'apprentissage est basé sur les modifications du cerveau émanant du degré d'activité corrélée entre les neurones : « si deux neurones s'activent au même moment, leur lien est renforcé ; autrement il est diminué. Ainsi, la configuration du système devient inséparable de l'histoire de ses transformations et du type de tâche qui lui est impartie ». Ainsi, l'activation des neurones auditifs issus de la même carte neuronale spatiale corrélée à des neurones tactiles et temporels est constamment réactualisée au cours de l'action. Lors d'une activité de repérage spatial d'un sujet non-voyant sur un parcours sonore maritime, l'expérience passée peut apporter l'élément « temps de parcours » pendant que les stimuli inhérents à l'action, indices sonores issus des bouées et intensité des sensations de vitesse par exemple forment un tout capable de modifier la carte neuronale initialement activée et sa signification. Ces cartes ne sont pas figées. Outre apporter au sujet la possibilité de construire un environnement à partir de repères issus de différentes modalités, elles sollicitent systématiquement l'expérience antérieure. Ainsi chaque activité du système modifie la dernière énaction spatiale.

Paillard [1984] explique à travers un article antérieur à l'œuvre de Varela [1986] comment les activités sensorimotrices et cognitives se complètent dans l'objectif d'une « représentation globale unifiée et cohérente de l'environnement spatial qui émerge soit directement de la manipulation motrice de notre monde sensible, soit indirectement des traitements qui opèrent sur les représentations internes ». Ici, la représentation du déplacement est dépendante de l'action en cours.

Mais par quel processus une image mentale élaborée a priori, c'est-à-dire issue des expériences antérieures de chaque individu, peut-elle être utilisée pour anticiper la sensation et ainsi optimiser l'« énaction spatiale » qui en découle ?

2.3. LES CARTES COGNITIVES

Rieser *et al.* [1990] montrent qu'« une corrélation apprise entre les actions locomotrices et les changements progressifs des relations de distance et de direction entre les objets et soi-même permet de « naviguer », c'est-à-dire de trouver son chemin dans l'espace ». Les sens proprioceptifs tactiles et auditifs permettent également de construire une route, soit une séquence spatiotemporelle de segments droits et de tournants menant d'un point à un autre. Cependant une « route » consiste exclusivement en la répétition d'un enchaînement locomoteur appris et ne permet en aucun cas la création de nouveaux trajets tels que des raccourcis ou des détours supplémentaires. Ce processus automatisé ne laisse que peu de place à la compréhension et l'initiative.

A l'inverse la constitution de « cartes cognitives » est une « sorte de représentation aérienne euclidienne qui rend possible les inférences spatiales et donc les raccourcis et les nouveaux chemins » [Hatwell 2004].

Pour améliorer la précision des déplacements des marins non-voyants sur un parcours de voile sonore, nous proposons la mise au point d'outils permettant la construction d'une carte cognitive du parcours en fonction du vent. Cette ambition implique l'étude des caractéristiques des modalités spatiales non visuelles : l'audition et le sens haptique.

2.4. LA MODALITÉ SPATIALE AUDITIVE DANS LES DEUX DIMENSIONS

La localisation a lieu en cours d'action. Elle consiste en l'évaluation de la direction de provenance du son et de la distance à laquelle se trouve sa source.

La direction de provenance d'un son est appelée azimut dans le plan horizontal et élévation dans le plan vertical. Les marins non-voyants définissent l'azimut des bouées suivant le cadran horaire pour se repérer sur le parcours sonore. Si le son est localisé à midi, le voilier se dirige vers la source sonore ; si le son est à trois heures, sa source se trouve à quarante cinq degrés de l'axe du déplacement du voilier. « Une onde sonore venant de côté arrivera d'abord à l'oreille proche de la source et ensuite à l'autre oreille. La différence de temps d'arrivée entre les deux oreilles est variable en fonction de l'azimut » [Mac Arthur, 1994]. La perception d'un son renseigne donc à elle seule le sujet sur la direction dans laquelle est émis le son.

L'organe auditif présente-t-il des prédispositions pour l'appréhension de la distance de la source sonore ?

A priori un auditeur humain ne juge pas avec précision la distance d'une source sonore, à l'exception de cas rares où la source est très familière. Mac Arthur [1994] dénombre trois indices paraissant contribuer au jugement de la distance : « L'intensité, le rapport du signal direct au signal réverbéré et la modification du spectre due à l'absorption prédominante des fréquences élevées ». L'intensité décroît avec le carré de la distance de la source. Même si le caractère exponentiel de cet indice aide l'organisme, les variations physiques de l'environnement tel que l'élément « vent » sont susceptibles de limiter la précision quant à la

détermination de la distance et de l'orientation réelles entre la source sonore et le sujet la percevant.

Cependant d'après une étude de Morrongiello *et al.* [1995] l'écart entre la position finale du sujet aveugle et la position de la cible est très inférieur en présence d'un indice sonore. Ce résultat montre que la modalité auditive est en mesure d'apporter des *feed-back* précis sur des événements bruyants. Le son participe donc au contournement d'une bouée sonore. Cependant, la représentation spatiale construite à partir de l'indice auditif reste floue et ne permet pas la construction proactive de l'action.

2.5. LA MODALITE SPATIALE HAPTIQUE DANS LES DEUX DIMENSIONS

La reconnaissance d'objet implique la référence à une représentation imagée. La modalité haptique consiste en l'utilisation active du toucher pour obtenir des informations de configuration spatiale et de texture sur les objets.

Biederman [1987] explique que la prise d'informations spatiales visuelles repose en premier lieu sur l'identification d'arêtes spatialement arrangées, nommées *géons*. « Le processus de reconnaissance de pattern consiste alors en partie à extraire les arêtes, à partir de leur disposition spatiale, combiner ces géons en un objet et comparer cet objet aux représentations en mémoire correspondant » expliquent les psychologues cognitivistes structuralistes Klatzky et Lederman [2000]. Nous sommes alors en mesure de supposer qu'un processus similaire régit la prise d'information spatiale haptique. Pourtant, Pick et Pick [1966] montrent que la discrimination haptique des formes est nettement moins performante que la discrimination visuelle, même s'il y a une similitude des modes de traitement de la forme dans les deux modalités.

Des travaux plus récents [Hatwell et al., 1990] montrent que le toucher est moins sensible aux lois Gestaltistes d'organisation de la configuration spatiale que la vision. Ainsi la perception haptique détecte moins les arêtes au profit des textures. Selon la même idée, une autre étude [Klatzky et Lederman 1997] montre des difficultés de la modalité haptique à appréhender les propriétés spatiales des objets. Ces résultats limitent l'intérêt d'utiliser une carte en relief pour se repérer dans l'espace et nécessitent l'élaboration d'une stratégie faisant également intervenir des repères issus de modalités différentes ou d'une activité cognitive spécifique à l'appréhension de l'espace lointain sans le sens visuel.

La représentation spatiale paraît difficilement constructible grâce à des cartes en relief exclusivement. Cependant les configurations spatiales de celles-ci sont susceptibles de participer à l'élaboration de représentations existantes en mémoire à long terme.

Au regard de ces caractéristiques des représentations spatiales haptiques, nous devons étudier les bénéfices et les limites de l'utilisation d'une carte en relief pour l'élaboration des représentations spatiales des sujets non-voyants. En effet le processus haptique ne semble pas encoder les mêmes informations spatiales que le processus visuel ?

L'inconvénient principal du traitement spatial haptique par rapport au traitement visuel de l'espace apparaît dans son caractère séquentiel. En effet, si la vision appréhende les indices spatiaux simultanément et permet le positionnement relatif des différentes entités, la modalité haptique nécessite de toucher successivement les différentes entités. Cependant les petits objets peuvent être appréciés dans leur globalité de façon simultanée. Ballesteros *et al.* [1998] montrent l'effet facilitateur de l'usage des deux index à la fois pour explorer les plans dans deux dimensions de façon plus globale. De plus, des repères de symétrie peuvent apparaître lors de cette exploration bimanuelle. Or la logique de l'activité *match-racing* nécessite justement de se positionner sur un parcours essentiellement symétrique par rapport à l'axe du vent. Ainsi la carte en relief en tant que référentiel tactile abstrait fournit une représentation spatiale imagée intéressante. Par ailleurs, Heller [2000] constate qu'« une exploration adaptée permet aux individus d'accéder à une perception haptique précise. [...] Même une forte illusion peut disparaître quand les stimuli sont assez petits pour être englobés par la main ». Les représentations spatiales haptiques conservent donc les distances et les orientations. Ainsi le traitement spatial haptique est susceptible de pallier au caractère relativement peu précis des signaux sonores en construisant un espace euclidien appréciable dans sa globalité et de façon permanente. Les travaux et recherches concernant la représentation spatiale s'accordent sur la possibilité de parcourir une image mentale de la même manière qu'un espace physique. L'étendue maritime du parcours de régate sonore peut-être découvert tactilement. Les sujets aveugles déclarent utiliser une représentation spatiale haptique grâce à la carte tactile. Finalement une carte en relief apprise permet la construction d'une représentation spatiale imagée et euclidienne en mémoire à long terme.

L'intérêt de la carte tactile est important car les sujets non-voyants depuis la naissance ou accidentellement peuvent utiliser les mêmes modalités pour la construction de représentation spatiale abstraite d'une part et parce que cet outil est propice à l'élaboration d'une carte cognitive de l'espace d'autre part. Mais quelles sont les connaissances présentes dans la littérature au sujet des cartes tactiles utilisées par les sujets non-voyants ?

2.6. UTILISATION DE CARTES EN RELIEF ET STRATEGIE D'EXPLORATION TACTILE.

« Sur le plan cognitif, la première difficulté, pour les aveugles de naissance qui n'ont pas d'espace projectif, est de comprendre que le plan de la feuille représente leur espace tridimensionnel [ou bidimensionnel] » [Hatwell, 2000]. Notons que les sujets pratiquants la voile sont sensibilisés socialement à la cartographie maritime.

Une étude de cas réalisée au moyen du suivi de deux à cinq ans d'une enfant aveugle de naissance a conclu que « la capacité de lire une carte tactile est précoce (dès l'âge de quatre ans) et ne nécessite pas d'apprentissage » [Landau, 1986]. Cependant ce travail est contesté par Millar [1994] qui montre que ni les voyants, ni les aveugles ne savent lire une carte de manière innée. « Elle exige un apprentissage afin que

l'enfant comprenne que les mouvements de ses mains qui explorent la carte l'informent sur les mouvements réels à faire dans l'environnement » [Millar, 1994]. En effet, « le changement d'échelle qu'implique le passage de l'espace de préhension à l'espace de locomotion fait appel à des activités cognitives parfois différentes de celles à l'œuvre dans les petits espaces » [Hatwell, 2003]. Autrement dit la réduction de l'échelle à la taille de la main ne suffit pas rendre la construction d'une représentation mentale efficace possible. Nous nous interrogeons sur les processus permettant de relier ces deux espaces de références euclidiens.

Plus récemment, Espinosa et Ochaita [1998] ont observé un meilleur apprentissage d'un parcours nouveau dans une ville lorsque celui-ci est fait à l'aide d'une carte plutôt qu'à partir d'une exploration réelle. Cette dernière étude renforce nos espoirs de mise au point d'un système carte utilisable en temps réel.

L'intérêt que nous portons aux cartes tactiles doit cependant être nuancé par certaines limites propres à ce sens, et notamment les illusions haptiques.

2.7. LIMITES DU SENS HAPTIQUE

Les résultats des expériences sur les illusions haptiques montrent l'importance de la stratégie d'exploration pour l'estimation des distances et des orientations.

D'après Wong [1977], plus l'exploration manuelle d'une longueur est lente, plus la longueur est surestimée. Ce facteur temporel nécessite d'être pris en compte lors de l'utilisation de carte tactile pour élaborer la représentation d'un espace. Notons que la plupart des études s'accordent à dire qu'une exploration haptique relativement rapide est plus efficace qu'une exploration lente. L'influence de la « *vitesse d'exploration* » n'est donc pas négligeable.

Suite à des expériences sur les « *effet de détours* » [Lederman *et al.* 1985], les résultats révèlent une surestimation des distances euclidiennes qui augmente à mesure que la longueur des détours s'accroît. Bien que les conditions précises d'apparition de l'« *effet de détours* » varient en fonction des expériences des différents auteurs, il apparaît une difficulté importante des personnes non-voyantes, et particulièrement des aveugles de naissance, à estimer précisément une distance sinueuse parcourue haptiquement.

La perception haptique des orientations est soumise à l'« *effet de l'oblique* ». Cette illusion consiste en une meilleure perception des verticales et des horizontales que des obliques [Appelle, 1972]. Notons qu'une étude récente [Gentaz, 2005] explicite cet effet par l'utilisation par les sujets d'un cadre de référence gravitaire subjectif. Autrement dit les représentations liées à cette illusion comportent des références issues de repères allocentrés (la pesanteur) et égocentrique (la verticale relative au corps de l'individu).

La mise en évidence de ces illusions haptiques témoigne des limites de la précision spatiale de cette modalité. L'utilisation d'une carte tactile comme support pour les repères spatiaux des aveugles implique une certaine prudence. Pourtant, à travers des expériences avec le système « Optacon/TVSS » (Tactile Vision Substitution System, [Bach y Rita, 1972]) qui transforme les ondes lumineuses en vibrations, Milétic [1994] avance que ce n'est pas parce que le toucher ne fournit pas suffisamment d'informations sur l'environnement que les aveugles manquent de capacités cognitives spatiales, mais parce que l'activité tactile n'est pas toujours orientée vers les informations pertinentes.

Ce constat rend légitime l'interrogation de cette étude sur la nature des informations permettant aux aveugles d'utiliser leurs compétences spatiales au moyen de cartes en relief notamment.

3. EXPERIMENTATION

3.1. LES SUJETS

Un groupe de six marins non-voyants et voyants les yeux bandés ont accepté de participer à une batterie d'expériences destinée à valider une carte en relief et un repère de temps à vitesse constante pour améliorer d'une part la représentation spatiale en cours d'action et après l'action [Simonnet, 2004].

3.2. LE PROTOCOLE

Partant du constat qu'un voilier se déplace à vitesse constante dans des conditions météorologiques stables, nous avons mis en adéquation une fraction de distance schématisée sur une carte en relief [cf. fig 1] avec une fraction de temps mesuré à l'aide d'une montre vocale.

L'expérience finale de cette étude propose aux sujets de réaliser à la voile un trajet défini à l'avance sur un parcours sonore après avoir réalisé un « tour de référence ». Les sujets représentent ensuite la trajectoire qu'ils pensent avoir réalisée sur du papier relief. Cette tâche est expérimentée par chaque sujet dans quatre conditions différentes : les sujets ne disposent que des repères des bouées sonores (= condition 1, C1), puis ils disposent également de la carte en relief (cf. fig. 1) (=C2). Lors de la troisième phase de l'expérience (=C3) les sujets se repèrent à l'aide des bouées sonores et d'une montre vocale. Finalement ils disposent des outils bouées sonores, cartes en relief et montre vocale simultanément (=C4).

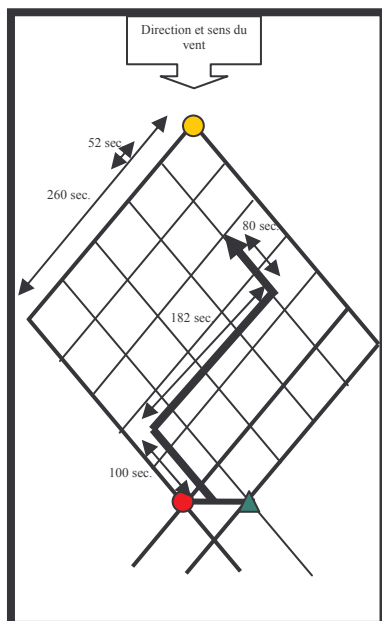


Figure 1 :

Schéma illustrant la carte en relief, le fractionnement temporel de la montre et les bouées sonores

3.3. LES RESULTATS

Les résultats, recueillis à l'aide d'un G.P.S. (Global Positioning System) pour la réalisation du parcours et sur papier pour la représentation graphique. Nous comparons les écarts entre la trajectoire demandée et la trajectoire réalisée d'une part, et la trajectoire réalisée et la trajectoire représentée d'autre part.

Nous assistons à des réalisations de meilleures trajectoires en présence de l'outil montre vocale. A l'inverse la précision des représentations est supérieure en présence de la carte en relief. La complémentarité des deux outils améliore encore les prestations des sujets.

3.4. INTERPRETATION

Ces résultats témoignent de la capacité des marins privés de la vue à stocker en mémoire à long terme la représentation imagée carte tactile. De plus ils utilisent les informations de la montre vocale après avoir référencé le parcours, c'est-à-dire mesuré les temps totaux pour les diviser en unités. Cependant les bouées sonores restent indispensables pour l'utilisation des outils carte et montre dans le sens où elles fournissent un retour en cours d'action.

La carte en relief fournit un support pour une représentation précise a priori ou a posteriori. Cependant cet outil n'est pas utilisable pendant le déplacement à cause de l'important délai que nécessitent les opérations cognitives de positionnement sur le parcours en relief abstrait. A l'inverse les informations de temps renseignent pendant l'action mais sont difficilement utilisables d'un parcours à l'autre.

Finalement, l'utilisation de la carte en relief confère aux sujets privés de la vue une représentation abstraite précise mais trop lente à être utilisée en cours d'action, alors que la modalité auditive est peu précise mais efficace en cours d'action.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus traduisent la capacité des marins non-voyants à construire des cartes cognitives d'un espace maritime sonorisé et ventée. Le processus cognitif en vigueur utilise la carte en relief comme support abstrait stable dans le temps. Cette représentation est favorable à l'interprétation par les sujets des valeurs euclidiennes constamment actualisées annoncées par la montre. Seuls les retours auditifs des bouées un lien entre le monde physique et l'abstraction mentale du parcours. Les sons des bouées offrent aux sujets un pouvoir d'agir de façon tangible [Lenay, 2004], c'est-à-dire le pouvoir de se déplacer de manière contrôlée sur le parcours. Les bouées sonores répondent également à une récente théorie de la mémoire spatiale [Mac Namara] selon laquelle « un repère intrinsèque à la collection est utilisé pour apprendre la position d'un ensemble d'objets dans un nouvel environnement. » Ici les bouées sonores constituent des repères intrinsèques à la collection « parcours ». Ainsi, les sujets construisent des couples perceptions actions propices à l'anticipation des sensations de déplacement. Cette anticipation permet l'actualisation de cette représentation imagée finalement globale.

Malgré de réels progrès par rapport à la situation de référence, nous restons nuancé sur l'efficacité du système des bouées sonores, de la carte en relief et de la montre vocale pour la représentation spatiale des non-voyants en cours de navigation. En effet, le poids des opérations cognitives demandées aux sujets et la précision toute relative qui en résulte nous amènent à nous questionner sur la mise en œuvre d'une stratégie plus efficace.

Les positionnements théoriques de Paillard, Honoré et Hatwell précédemment cités convergent vers des limites des sens auditif et haptique pour la construction d'un espace distant euclidien. Nos résultats, bien qu'en accord avec les travaux de ces auteurs, laissent imaginer une stratégie de repérage spatiale fondée sur le pouvoir d'interagir avec des informations auditives et haptiques pertinentes. Autrement dit nous cherchons à obtenir des informations précises et actualisées en cours d'action. A notre sens, les informations haptiques doivent donc être actualisée en cours de navigation afin de fournir leur précision en temps réel. Pourrions-nous à l'aide des outils de la réalité virtuelle immerger le sujet navigateur dans un monde haptique en mouvement ?

5. PERSPECTIVES EN REALITE VIRTUELLE

« Les techniques de la réalité virtuelle sont fondées sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion « pseudo-naturelle » de l'utilisateur dans cet environnement ». [Fuchs, 2003]. *Ce monde virtuel* évoque pour nous un substitut numérique de la carte en papier correspondant toujours à une représentation symbolique [ou abstraite] bidimensionnelle [ou tridimensionnelle] projectives, de taille réduite, d'un espace réel » [Hatwell, 2000]. Les *interfaces comportementales* offrent à l'utilisateur le moyen d'interagir physiquement avec le monde virtuel. Les interfaces haptiques peuvent *immerger* les sujets aveugles « dans » la carte virtuelle. Nous parlerons d'immersion à condition que les sujets fassent abstraction de l'outil ou se l'approprié comme le « prolongement de leur corps » [Vigarello, 1998]. Nous imaginons ainsi un marin non-voyant découvrant virtuellement la rade de Brest en glissant dans le courant avant de sentir la texture rugueuse des rochers de la presqu'île de Quelern...

La difficulté de cette ambition réside notamment dans l'interfaçage avec les utilisateurs. La problématique de la perception de l'espace lointain en temps réel pour les individus privés de la vue implique de transformer en tangible ce qui ne l'est pas. Dans le domaine de la recherche en Design industriel [Guénand, 2005], cette approche nécessite de rechercher le lien entre le symbolique et le tangible par :

- « L'identification des expériences qui font sens pour l'utilisateur », c'est-à-dire définir quels symboles haptiques traduisent le plus intuitivement tel ou tel objet physique en item cartographique.

- « La traduction de ces valeurs subjectives en données techniques », soit l'utilisation des cartes maritimes vectorielles et l'ajout d'items symboliques haptiques et/ou auditifs.

- « La contribution de la réalité virtuelle en conception de produit et en évaluation des interactions produit/utilisateur en situation d'usage ». Cette étape correspond à la mise en situation du système [interface haptique, logiciel de lecture de carte vectorielle, sujets non-voyants].

Cette logique expérimentale respecte l'énaction spatiale et le concept de la cognition située. Ainsi, « beaucoup de chercheurs en sont venus à considérer qu'on ne pouvait pas comprendre la cognition si on l'abstrayait de l'organisme inséré dans une situation particulière avec une configuration particulière, c'est-à-dire dans des conditions écologiquement situées » [Varela,1998]. L'image selon laquelle nous construisons notre espace extérieur au fur et à mesure de nos déplacements répond aux différents auteurs précédemment cités ainsi qu'à nos propres convictions. Aussi nous souhaitons comparer les processus d'élaboration des cartes cognitives de la mer d'Iroise lors de déplacements contrôlés réalisés *In situ* et *In virtuo*.

6. CONCLUSION

Pourtant certaines questions se posent quand à l'efficacité de ce futur système de réalité virtuelle pour cartes maritimes numériques tactiles. Comment explorer globalement une carte avec une interface transmettant exclusivement des sensations issues d'une modalité analytique ? Pourrions-nous imaginer de réduire la carte virtuelle à la taille de la main ? Doit-on plutôt se fier à l'intérêt que porte Ballesteros [1998] à l'exploration bi manuelle ? Combien de sensations de textures différentes un utilisateur peut-il discriminer avec un gant producteur de vibrations type Data Glove 14 Ultra (SDT) ? Faut-il plus choisir un bras à retour d'efforts type PHANTOM (Sensible Technologies) ? Dans quelles mesures est-il intéressant de créer un champ attracteur ?

Autant de questions auxquelles seules les expériences *in virtuo* et *in situ* avec le public concerné pourront répondre.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Appelle, S. 1972. Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: The "oblique effect" in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78, 266-278.
- Ballesteros, S., Millar S. & Reales, J. [1998]. Haptic discrimination of bilateral symmetry in 2-dimensional and 3-dimensional unfamiliar displays, *Perception & Psychophysics*, 59, 37-50.
- Byrne, R. N. 1979. Memory for Urban Geography, *Journal of experimental Psychology*, 31, 147-156.
- Davidson, P.W. 1972. Haptic judgement of curvatures by blinds and sighted humans, *Journal of Experimental Psychology*, 93, 43-55.
- Declerck, G. 2005. La perception du tangible comme obstruction: approches expérimentales minimalistes. Actes du colloque « Le virtuel et le tangible : ce qui résiste ». Université Technologique de Compiègne.
- Espinosa, M. A., & Ochaita, E. 1998. Using tactile maps to improve the practical spatial knowledge of adulte who are blind, *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 92, 339-345.
- Faineteau, H., Gentaz, E., & Viviani, P. 2003. *The kinaesthetic perception of euclidean distance*. Experimental Brain Research.
- Fuchs Ph., Arnaldi B., Tisseau J. 2003 . *La réalité virtuelle et ses applications*, dans Le traité de la réalité virtuelle, 2ème édition, volume 1, chapitre 1, pages 3-52, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Gentaz, E. 2005. Explorer pour percevoir l'espace avec la main. In Bullier, J., & Thinus-Blanc C., Eds. *Agir dans l'espace*. Paris : CNRS.
- Guénand, A., 2005. Sémantique de l'interaction en design industriel. Actes du colloque « Le virtuel et le tangible : ce qui résiste ». Université Technologique de Compiègne.
- Hanneton, S., Lenay, C., Gapenne, O., Vermandel, S. & Marque, C., 1998. Dynamique de la reconnaissance de caractères via une interface haptique, In Kayser D., Nguyen Xuan A., & Holley A. Eds., Actes du colloque de l'ARCo 98, Saint Denis, p. 343-347.*
- Hatwell, Y. 1986. *Toucher l'espace*. Lille : Presse Universitaire de Lille. Hatwell, Y. 1986. *Toucher l'espace*. Lille : Presse Universitaire de Lille.
- Hatwell, Y. 1986. *Toucher l'espace*. Lille : Presse Universitaire de Lille.
- Heller, M. A. 2000. Les illusions perceptives haptiques. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour Connaître* p.172. Paris : PUF.
- Honoré, J., Richard, C., & Mars, F. 2002. Perception de l'image du corps et action, In Coello Y. & Honoré J. Eds., *Percevoir s'orienter et agir dans l'espace, approche pluridisciplinaire des relations perception-action* [p.140], Marseille : Solal.
- Klatzky, R., & Lederman, S.J. 2000. L'identification haptique des objets significatifs. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz, *Toucher pour connaître*. Paris : PUF.
- Klatzky, R., & Lederman, S. J. 1997. Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and performance*, 23, 1680-1707.
- Landau, B. 1986. Early map use as an unlearned ability, *Cognition*, 22, 201-223.
- Lederman, S. J., Klatzky, P., & Barber, R. L. 1985. Spatial an movement based heuristics for encoding pattern information through touch, *Journal of experimental psychology : General*, 114, 33-49.
- Lederman, S.J., Klatzky, R.L., Collins, A., & Wardell, J. 1987. Exploring environment by hand or foot : time-based heuristic for encoding distance in movement space. *Journal of experimental psychology : Memory and language*, 16, 606-614.
- Lenay, C. 2005. Design of a tactil prothesis for blind users with a virtual reality system, Actes du colloque « Le virtuel et le tangible : ce qui résiste ». Université Technologique de Compiègne.
- Mac Arthur, S. 1994. Audition : physiologie, perception et cognition. In Richelle, M. Requin, & J. Robert. M. *Traité de psychologie expérimentale* p.311. Paris : PUF.
- Mc Namara, T.P., .. How are the locations of objects in the environment represented memory ? In: Spatial Cognition III, pp. 174-191.- Springer-Verlag, 2003.
- Mifflin.
- Miletic, G. 1994. Vibrotactile perception : perspective taking by children who are visually impaired, *Journal of visual impairment and blindness*, 88, 550-563.
- Millar, S. 1994. *Understanding and representing space. Theory and evidence from*
- Morrongiello, B.A., Timney, B., Humphrey, C.K., Anderson, S., & Skory, C. 1995. Spatial knowledge by sight and blind children. *Journal of experimental child psychology*, 59, 211-233.
- Pailhous, J., 1970, *La représentation de l'espace urbain*. Paris : PUF.
- Paillard, J. 1984. L'encodage sensori-moteur et cognitif de l'expérience spatiale. In J. Paillard [Ed.], *La lecture sensori-motrice et cognitive de l'expérience spatiale. Directions et distances* (pp.217-225). Paris : Collections comportements CNRS.
- Paillard, J. 1973. *Psychophysiologie du comportement*. Paris : PUF.
- Piaget, J. et Inhelder, B. 1977. *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris : PUF. 3^{ème} éd.
- Piaget, J. et Inhelder, B. 1966. *L'image mentale chez l'enfant*. Paris : PUF.

Pick, A. D., & Pick, H. L. 1966. A developmental study of tactual discrimination in blind and sight children and adults. *Psychonomic science*, 6, 367-368.

Pont, S., Kappers A., & Koenderink J. 1998. Anisotropy in haptic curvature and shape perception, *Perception*, 27, 573- 589.

Revesz, G. 1958. *The human hand, a psychological study*. London : Routledge and Kegan Paul.

Richard, J.-F. 1990. *Les activités mentales, Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : Armand Colin.

Richard, J.-F. 1990. *Les activités mentales, Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : Armand Colin.

Rieser, J., Ashmead, C. R. T., Taylor, C.R., & Youngquist, T.A. 1990. Visual perception and the guidance of locomotion without vision to previously seen targets. *Perception*, 19, 675-689.

Simonnet, M. * Simonnet, M. 2004. La construction d'une représentation spatiale non visuelle, Mémoire de D.E.A. S.T.A.P.S. Brest : U.B.O.

Simonnet, M. 2002. Voile et Cécité, les repères utilisés par un sujet non-voyant tardif pour barrer un voilier au près. Mémoire de Maîtrise S.T.A.P.S. Brest : Université de Bretagne Occidentale

Strepi, A., 2005. L'intermodalité, In Delorme, A., & Fluckinger, M. Eds., *Perception et Réalité : une introduction à la psychologie de perceptions*, p.197-221 De Boeck : Paris.

studies with blind and sighted children, Oxford, Clarendon Press.

Varela, F. J. 1986. *Invitation aux sciences cognitives*. Paris : Points sciences.

Varela, J. 1998. Entretien avec Francisco J. Varela par Hervé Kempf. *La Recherche*, No.308 Avril 1998, p.109-112.

Vigarello, G. 1998. *Une histoire culturelle du sport, techniques d'hier et d'aujourd'hui*, Paris, Robert Laffont et E.P.S., 1988, 207 p.

Wong, T. S. 1977. Dynamic properties of radial and tangential movements as determinant of the haptic horizontal-vertical illusion with an L figure. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 3, 151-164.