

Perception et couplage sensori-moteur : expériences et discussion épistémologique.

Charles Lenay* - Olivier Gapenne* - Sylvain Hanneton* - John Stewart

*COSTECH, Département Technologie et Sciences de l'Homme,
Université de Technologie de Compiègne, BP 60.649, 60206 Compiègne, France.
charles.lenay@utc.fr).

RESUME. On présente ici des recherches expérimentales sur la perception humaine quand elle est médiatisée par des dispositifs de substitution sensorielle. Ces travaux démontrent le rôle constitutif de l'action et l'importance de l'organisation matérielle des capteurs et effecteurs dans le couplage de l'organisme avec son environnement. Ces résultats devraient permettre un dialogue entre psychophysiologie et robotique située. Quelques expériences sur la constitution d'un espace perceptif tridimensionnel (localisation de cibles), et sur la reconnaissance de formes bidimensionnelles (discrimination de caractères) sont présentées et discutées. Elles mettent en évidence l'importance du « corps propre » (l'ensemble des possibilités d'agir) pour l'établissement des invariants sensori-moteurs propres à activité perceptive.

ABSTRACT This paper presents experimental studies of human perception mediated by sensory substitution devices. The studies concern the localisation of targets in a three-dimensional perceptive space, and the recognition of two-dimensional characters. The « lived body » (body self image as a set of possible actions) is the basis for establishing the particular sensory-motor invariants which characterize each form of perception. The results show that action plays a decisive role in the constitution of perception, and demonstrate the importance of the material organisation of receptors and effectors in the coupling between an organism and its environment. These results should lead to a dialogue between psychophysiology and situated robotics.

MOTS-CLÉS : Espace ; Perception ; Phénoménologie ; Substitution Sensorielle ; Robotique Située.

KEY WORDS : Space ; Perception ; Phenomenology, Sensory Substitution ; Situated Robotics.

1. Introduction

Les questions de la localisation de cibles et de la reconnaissance de formes dans le cadre de la robotique située peuvent trouver un répondant et un mutuel enrichissement avec les études de l'activité perceptive humaine quand elles sont menées dans un cadre non représentationnaliste. En effet, la dynamique de la perception spatiale humaine peut être analysée à partir de la situation limite d'une perception prothétisée et contrôlée. On montre alors comment l'espace est constitué à travers une activité motrice de l'agent percevant. Ce faisant, on retrouve à la fois, les conceptions de la perception développées en philosophie par la phénoménologie, et certains aspects théoriques de la robotique située [Bro 99]. Notre objectif est de donner ici une présentation générale de quelques problématiques qui traversent ce champ de recherche et qui peuvent s'ouvrir à un tel dialogue.

Nous commencerons par présenter les techniques dites de "substitution sensorielle" qui offrent un paradigme expérimental original pour l'étude de l'activité perceptive, puis nous détaillerons et commenterons deux familles d'expériences. D'une part, la constitution d'un espace perceptif tridimensionnel permettant la

localisation de cibles, et d'autre part, l'étude dynamique de la reconnaissance de formes.

2. Systèmes de substitution sensorielle: présentation et résultats

Les systèmes dits de "substitution sensorielle" sont des prothèses qui ont été développées pour l'aide aux aveugles depuis la fin des années 60 [BAC 72, 94, KAC 95]. Ces dispositifs transforment les stimuli attachés à une modalité sensorielle (la vision) en des stimuli d'une autre modalité sensorielle (le toucher). Classiquement, (Tactile Vision Substitution Systems), une image visuelle captée par une caméra vidéo est convertie en une "image" tactile composée d'une surface de stimulateurs (en général une matrice de 20 / 20) placée dans le dos, sur le thorax ou sur le front [COL 73]¹. De tels dispositifs peuvent aussi être utilisés par des voyants ayant les yeux bandés. Leurs premières utilisations ont apporté deux résultats fondamentaux qui servent de point de départ à nos recherches.

i)- Tout d'abord, la présentation de formes à la caméra immobile ne permet qu'une discrimination très limitée des stimuli reçus, et ils restent perçus à la surface de la peau. Ainsi la simple substitution d'une entrée tactile à une entrée par le nerf optique ne donne pas, en tant que telle, accès à une perception spatiale.

ii)- Mais, si l'utilisateur dispose des moyens de manipuler la caméra (mouvement de droite à gauche, de bas en haut, zoom avant et arrière, focale), il développe des capacités de reconnaissance de forme spectaculaires. Il commence par apprendre comment les variations de ses sensations sont liées à ses actions : quand il déplace la caméra de gauche à droite, sur sa peau les stimuli se déplacent de droite à gauche; quand il zoom avant, les stimuli vont en s'écartant, etc. Après avoir appris à diriger la caméra vers une cible, il discrimine des lignes et des volumes, puis reconnaît des objets familiers de plus en plus complexe jusqu'à être capable de discriminer des visages.

De plus, cette capacité de reconnaissance de forme s'accompagne d'une **mise en extériorité** des percepts en des objets placés dans l'espace. Au départ l'utilisateur sent sur sa peau des stimulations qui se succèdent. Mais avec les progrès de l'apprentissage perceptif, il finit par oublier ces sensations de toucher pour percevoir des objets stables à distance, là bas devant lui. Ainsi, d'après les témoignages des utilisateurs, les irritations proximales que peut provoquer la plaque tactile sont clairement distinguées de la perception proprement dite. Cette localisation subjective des objets dans l'espace se produit rapidement (après 5 à 15 heures d'entraînement). L'aveugle découvre ainsi des concepts perceptifs nouveaux pour lui tels que la parallaxe, les ombres, l'interpositions des objets, etc. Certaines illusions visuelles classiques sont spontanément reproduites [BAC 82]. Une telle expérience peut être réalisée aussi bien par une personne handicapée que par une personne voyante ayant les yeux bandés.

La nécessité d'une action du sujet sur les capteurs sensoriels pour que se constitue une perception, rend inadéquate l'appellation de "systèmes de substitution sensorielle". En effet, ce que doit amener le dispositif technique ce n'est pas seulement un accès à de nouvelles données sensorielles, c'est aussi le pouvoir d'agir

¹ Pour un dispositif actuellement commercialisé, voir: UNITECH RESEARCH, INC., 582 Grand Canyon Drive, Madison, WI 53719. <http://www.execpc.com/~unitech>

sur le système récepteur. Il est donc préférable de nommer ces systèmes "dispositifs de couplage sensori-moteurs". Il en est d'ailleurs de même pour la vision naturelle. Elle nécessite à la fois un œil fonctionnel et l'activité des muscles oculaires qui déterminent des micro-saccades (de 10 à 20 millisecondes). En cas d'immobilisation parfaite de l'œil, il ne semble pas y avoir de vision possible. L'image qui était perçue s'évanouit en quelques seconde [DIC 73, STE 90].

Le rôle essentiel joué par l'action dans l'émergence progressive de représentations structurées montre que ce qui est perçu, reconnu, ne sont pas à proprement parler les invariants de la sensation, mais ce sont les invariants de cercles sensori-moteurs inséparables de l'activité du sujet [GIB 66, 86, VAR 79]. On abandonne ici la conception classique de la perception pour laquelle le système recevrait passivement en entrée une information puis effectuerait un calcul pour identifier des objets ou des événements, et produire des représentations dans un espace interne. Au contraire, c'est par son action que le sujet cherche et construit des règles de liaisons constantes entre variations d'action (mobilité des organes de perception) et variations de sensation (produites par ces actions), règles correspondant aux percepts et à leur spatialisation.

L'apprentissage perceptif impliqué par un tel dispositif met en évidence une étonnante plasticité du système nerveux central qui doit subir de vastes réorganisations fonctionnelles. L'entrée sensorielle tactile n'a rien à voir avec celle du système visuel, pas plus que le contrôle de la caméra par les mains n'a de relations avec les commandes des muscles oculaires. Pourtant le cerveau se révèle capable d'extraire des invariants sensori-moteurs pour organiser un monde perceptif dont les formes et événements croisent ceux qui nous sont donnés dans la perception visuelle. De plus, si pour un sujet entraîné, on déplace la plaque de stimulateurs tactiles du thorax vers le dos, et que l'on remplace la caméra qui était tenue dans les mains par une caméra miniaturisée attachée à une monture de lunette, l'adaptation est presque immédiate. En quelques secondes le sujet retrouve une perception distale devant lui.

Ces résultats spectaculaires suggèrent une méthode de recherche originale sur la perception : en dotant un sujet d'un dispositif de couplage sensori-moteur on se donne les moyens d'étudier empiriquement la genèse de nouvelles modalités perceptives.

Une telle étude oblige à conjoindre deux types d'approches. D'une part, du point de vue externe, on étudie les modes d'usage du dispositif et les capacités nouvelles qu'il donne au sujet (mesure du taux d'erreur ou de la vitesse de résolution de tâches définies). Et d'autre part, du point de vue interne, l'opportunité de vivre l'expérience de l'acquisition d'une nouvelle modalité perceptive chez l'adulte permet d'étudier phénoménologiquement la façon dont le monde lui apparaît.

3. Localisation spatiale

Notre premier objectif était de déterminer les conditions techniques minimales nécessaires pour que s'établisse le sentiment d'une extériorité de l'objet dans un espace perceptif où il pourrait être localisé. Pour cela nous avons développé un dispositif de substitution sensorielle simplifié à l'extrême, tel que l'on puisse rencontrer les limites de la possibilité de cette spatialisation [LEN 97a, 97b].

3.1. Dispositif

Nous avons choisi une simple cellule photoélectrique fixée sur un doigt de la main droite et connectée à un stimulateur tactile (un vibreur) tenu dans l'autre main². Le vibreur réagit en tout ou rien au dépassement d'un seuil d'activation de la cellule photoélectrique qui capte un faisceau de lumière incidente assez large (approximativement 20°). Il n'y a ainsi qu'un seul point de stimulation correspondant à un seul champ récepteur (contrairement au TVSS qui dispose de 400 points de stimulation correspondant à autant de champs récepteurs distincts de la surface sensible de la caméra).

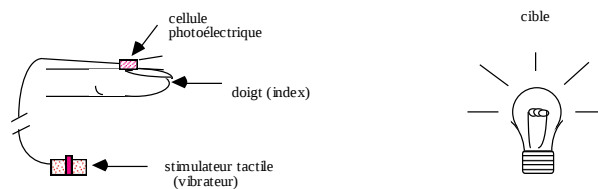


Figure 1.

Dans une première expérience, une cible lumineuse est placée à distance du sujet dans une pièce noire. Le sujet à les yeux bandés et peut librement mouvoir le bras et la main qui tient le récepteur.

3.2. Résultats

Après quelques minutes d'exploration, le sujet se révèle capable de localiser la cible, c'est-à-dire d'indiquer sa direction et sa distance approximative. Du point de vue du sujet, après avoir cherché pendant un certain temps l'activation du vibreur, il perçoit les premières stimulations tactiles localisées sur la peau. Mais très rapidement, alors qu'il maîtrise mieux la production de ces stimulations, il ressent la présence d'un objet placé au-delà de lui dans un espace où il se situe lui-même. La succession temporelle des sensations reçues semble renvoyer à différents "contacts" avec un unique objet distal. Il est à noter que le vibreur peut être déplacé vers une autre région de la peau sans que cesse cette perception. D'ailleurs le sujet oublie effectivement le lieu où se produisent les sensations (sauf s'il y porte une attention spéciale) pour appréhender un objet dans l'espace. Inversement, des stimuli artificiellement envoyés indépendamment des mouvements du doigt sur lequel est positionné la cellule photosensible ne sont pas associés à une perception distale, mais restent perçus proximalelement sur la peau.

On comprend bien que la localisation de la cible soit possible. Les conditions d'exploration déterminées par ce dispositif de couplage ultra simple sont suffisantes. Pour simplifier, ne prenons en considération que les mouvements dans un plan horizontal du bras tendu et de la main par rapport au bras (on oublie le coude, et les

² Développé en collaboration avec C. Marque et C. Vanhoutte au Génie Biomédical de l'Université de Technologie de Compiègne.

articulations multiples des doigts et de la main). La position du sujet est supposée fixe, le buste toujours tourné dans la même direction. On considère que la cible est une source ponctuelle S de coordonnées (0, L). Elle est face au sujet qui est situé en O. L'angle indiquant la direction du bras est $\alpha = (\text{Ox}, \text{OP})$; l'angle entre le bras et la main est $\beta = (\text{PO}, \text{PS})$. Le point P ($\cos \alpha, \sin \alpha$) représente le poignet du sujet. Si deux couples de valeurs (α, β) sont connus dans le référentiel du sujet, ils suffisent pour localiser la source de lumière S.

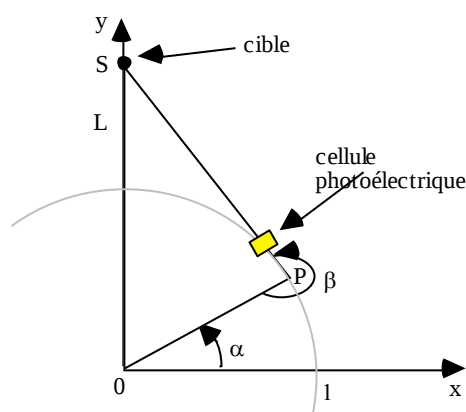


Figure 2. Le bras (avec l'avant bras) a une longueur 1. La distance de la cible L (OS) est alors atteinte par triangulation suivant la formule : $L = \sin \alpha - \cos \alpha \tan(\alpha + \beta)$; où $\alpha : [0, \pi/2]$ et $\beta :]3\pi/2 - \alpha, 2\pi[$

On observe cependant que deux "contacts" avec la cible ne sont pas suffisants pour donner au sujet l'expérience d'un objet distal. La perception exige une activité permanente, de petites oscillations de la main avec changements de la position du poignet de sorte à ce que la stimulation apparaisse et disparaisse sans cesse. Si les mouvements s'arrêtent, la spatialisation disparaît : la stimulation tactile est soit absente, soit présente, mais rien ne donne à penser l'extériorité et la distalité de sa source (il ne reste qu'une mémoire des actions passées qui s'évanouit rapidement). Par son extrême simplicité, notre dispositif de couplage sensori-moteur met donc en évidence une nécessité absolue de l'action pour que la perception soit possible. Cependant, si le sujet éloigne trop largement la main de la région où se trouve la cible, il se trouve perdu, incapable de retrouver rapidement le contact. On ne peut décider ici si cette dérive a pour origine une incertitude au niveau de la commande et de ses copies efférentes (la mémoire de ce que l'on a décidé de faire), une incertitude au niveau du mouvement qui a été effectivement exécuté (ignorance des diverses variables extérieures qui participent à la réalisation concrète de l'action), ou d'une incertitude au niveau des données proprioceptives de ce qui a été effectivement fait (précision et sensibilité des capteurs). Il reste que c'est dans cette finitude du savoir de ses actions, que le sujet doit activement constituer ses perceptions³.

³ Nous retrouvons, au cœur de l'activité perceptive spatiale, une "finitude rétentive" au sens développé par Bernard Stiegler à propos de la conscience du temps et de ses liens avec les supports techniques de la mémoire [STI 96].

3.3. Discussion

Le problème de la perception de la position spatiale d'un objet, qui sera pensé comme la source des sensations, est le problème de pouvoir penser la simultanéité de différentes choses dans un même temps. Or, le sujet n'a accès qu'à une succession temporelle de sensations. Il faut donc qu'il réalise une synthèse temporelle de ces sensations suivant une règle. Cette règle, comme Kant l'a montré, est celle de la réversibilité :

"Les choses sont *simultanées* quand dans l'intuition empirique la perception de l'une peut succéder à la perception de l'autre et *réciroquement*..."⁴

L'espace ne surgit que comme résultat de son exploration réversible, c'est-à-dire de la possibilité de retrouver de même sensations en faisant revenir son "regard" sur une "position" précédente (la maison devant moi est présente dans un même temps, même si mon regard ne me donne qu'un accès successif à ses différentes parties, parce que je peux revenir à volonté sur chacune d'entre elles). Dans notre expérience, une localisation spatiale stable n'est acquise que si le sujet dispose de la règle de variation dépendante des mouvements α et β permettant de déterminer la stimulation tactile. Une règle qui est en même temps une structure d'anticipation puisque la perception d'un objet revient à la capacité d'anticiper la sensation qui sera reçue étant donnée les actions effectuées.

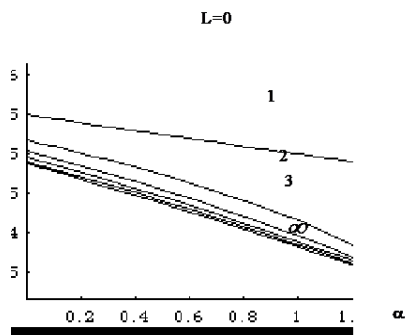


Figure 3. Courbe représentant l'angle β en fonction de l'angle α (exprimés en radians) pour les valeurs suivantes de $L = 0, 1, \dots, 7$. α varie de 0 à $\pi/2$.
 $\beta = 2\pi - \alpha + \text{Atan}((\sin \alpha - L)/\cos \alpha)$

La localisation correspond donc à la sélection d'une ligne particulière de covariation entre α et β parmi toutes celles qui sont possibles (l'ensemble infini et continu des localisations possibles, i.e. des règles de pointage). Elle s'établit rapidement, dès que la cible est "accrochée".

Un objet n'est donc spatialisé, c'est-à-dire perçu comme extérieur par le sujet, que si les successions temporelles de ses actions lui permettent de le retrouver ou de le perdre à volonté, c'est-à-dire s'il dispose d'une règle stable de la réversibilité des effets de ses actions en terme de sensations et de possibilités d'action. En effet, la

⁴ Kant, E. (1787) *Critique de la raison pure*, Les analogies de l'expérience, troisième analogie. Principe de la simultanéité.

réversibilité, c'est-à-dire la possibilité de réaliser des actions contraires dont les effets se compensent, signifie que la règle qui lie les actions à leurs effets est indépendante des actions particulières effectuées. Dans notre expérience, en dépit du faible accès aux actions passées qui n'autorise qu'une liberté de mouvement limitée, dès lors qu'une réversibilité est découverte dans un domaine d'action même restreint, l'expérience d'une extériorité d'un objet s'établit, et suffit à constituer une localisation approximative.

L'espace lui-même peut alors être conçu comme l'ensemble du groupe des transformations qui permettent de retrouver de mêmes successions de sensations à partir des mêmes successions d'actions. On retrouve là la conception de l'espace de la perception développée par Henri Poincaré [Poi 1905, 1907]. La perception n'est pas la construction d'une représentation sous forme d'image dans un espace mental interne au sujet connaissant qui reflèterait un supposé espace "externe" indépendant. Les percepts et un espace se constituent à partir des invariants sensori-moteurs d'un couplage qui implique autant le corps que le milieu dans lequel il agit. L'espace dans lequel les perceptions sont données, est en même temps l'espace **dans** lequel le sujet se déplace : la constitution de l'espace nécessite un déplacement du point de vue du sujet dans cet espace qu'il constitue. Le phénoménologue dira que le sujet **habite** le monde qu'il perçoit (et non pas qu'il se le représente).

4. Reconnaissance de formes

4.1. Le dispositif

Pour explorer la perception de formes (discrimination ou reconnaissance) nous avons là aussi développé un dispositif de couplage minimal, le "stylet tactile". Le stylet d'une tablette graphique pilote un curseur qui permet d'explorer des formes en noir sur fond blanc affichées sur l'écran de l'ordinateur (des lettres d'imprimerie majuscules). Le curseur correspond à un champ récepteur (3 x 3 pixel). Quand il croise au moins un pixel noir il déclenche l'activation d'un stimulateur tactile (vibration en tout ou rien d'un transducteur électromagnétique). Le sujet a les yeux bandés et le stimulateur tactile est installé sur la main libre (l'autre tenant le stylet). Ce dispositif de suppléance perceptive permet donc l'exploration, sur la tablette graphique, d'une image tactile virtuelle [HAN 99a, 99b].

Cependant, comme plus haut, le sujet n'accède qu'à une seule information à chaque instant. Dès lors, seuls les déplacements actifs du sujet sur l'image devraient lui permettre de reconnaître des formes. Notre pari est que cette activité sera suffisante pour établir un couplage sensori-moteur constitutif de percepts complexes. Par sa pauvreté même, le dispositif de couplage force une externalisation de l'activité de reconnaissance de formes. Les formes à reconnaître ne sont pas données d'un coup aux organes récepteurs de la perception, comme cela peut être le cas pour une forme projetée sur la rétine ou plaquée sur une surface de la peau (ce qui reporte le processus de reconnaissance à une activité essentiellement interne). Ici, il n'y a qu'une sensation à la fois, en tout ou rien. L'activité de reconnaissance est donc entièrement déployée dans le temps et l'espace d'une activité externe aisément observable et enregistrable.

4.2. Expériences et résultats

Les expériences sont réalisées par des sujets naïfs qui rencontrent le dispositif pour la première fois. Dans une première expérience de discrimination (reconnaître si la forme présentée est un S ou son reflet dans un miroir), les sujets ont un taux de bonnes réponses compris entre 90 et 100 %.

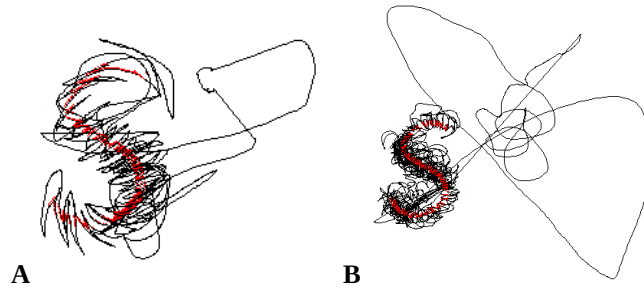


Figure 4.

Dans une seconde expérience de reconnaissance de caractère : une séquence de 10 lettres majuscules (“ITLPSVBORD”, traits larges de 3 pixels au plus) à reconnaître. Lors de chaque présentation de stimulus, l’essai est stoppé lorsque le sujet donne une réponse verbale, et aucun retour sur la valeur de la réponse ne lui est fourni. Là aussi les trajectoires de l’activité perceptive sont enregistrées.

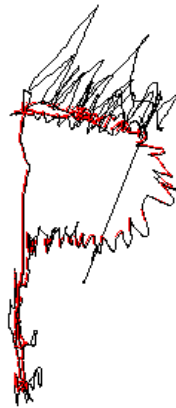


Figure 5.

Le taux de bonnes réponses est supérieur au hasard mais l’efficacité de la reconnaissance dépend fortement de la forme de la lettre explorée

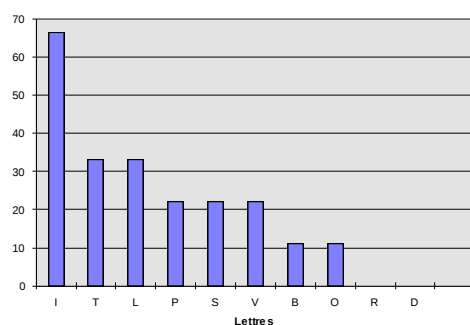


Figure 6. Pourcentage de sujets ayant donné la bonne réponse pour chaque lettre présentée (les sujets n'étant pas informés du sous-ensemble de lettres choisi, une réponse donnée au hasard n'a qu'une chance sur 26 d'être bonne).

- Dans une troisième expérience, nous avons étudié l'effet de l'entraînement et montré l'existence d'une très nette courbe d'apprentissage. Un groupe de cinq sujets devait reconnaître en une minute 50 fois un caractère majuscule (dans un répertoire de 10), et ceci durant trois sessions à une semaine d'intervalle. Les résultats montrent un très net effet d'apprentissage : 9 identifications correctes sur 50 durant la première session à comparer avec 25 sur 50 à la dernière session.

4.4. Analyse

Les stratégies d'exploration (la dynamique des gestes effectués) nous semblent très révélatrices sur ce processus de reconnaissance de formes. Pour cela, on peut détailler les trajectoires observées et dégager une forme de grammaire gestuelle isolant les différentes composantes de la dynamique exploratoire.

Mouvements de balayage - On peut tout d'abord isoler un geste de balayage. Le sujet commence par des mouvements exploratoires assez amples, mais dès qu'il rencontre un point de la forme, il converge aussitôt vers un « microbalayage » de fréquence relativement stable autour de la source de stimulation. L'expérience présentée dans la première partie, laisse à penser qu'il s'agit là essentiellement d'une opération de localisation : la position du point est constituée par une anticipation stable de la stimulation tactile en fonction des commandes des mouvements du stylet. Mais un tel type de geste n'est pas suffisant pour produire la reconnaissance de forme. Bien sûr, en admettant une mémoire illimitée et une proprioception précise, on pourrait envisager de réaliser un scanner de l'image, c'est-à-dire une "cartographie" donnant l'ensemble des positions relatives des différents points qui la composent. On calculerait ainsi une "image mentale" de la forme à percevoir. Mais ce serait repousser le problème de la reconnaissance proprement dite. On n'aurait fait que compliquer l'étape préliminaire de la réception de la forme reçue qu'il faudrait ensuite catégoriser.

De toute façon, on observe durant les expériences que l'inexactitude de l'information proprioceptive [WAN 92] ou la faiblesse de sa mémoire sont telles que

si les sujets perdent le “contact” avec un point de stimulation, ils se trouvent perdus, errant à la recherche de leur position de départ. On retrouve ici la finitude rétionnelle de l’action rencontrée plus haut. Le sujet ne semble avoir jamais accès à une position absolue (dans un repère x, y) du stylet sur la tablette. Il perçoit seulement, et avec une assez grande imprécision, la direction et l’ampleur de ses déplacements, mais en l’absence d’accès à un repère de référence, les erreurs sont si grandes et la mémoire si faible qu’il est impossible (en tout cas sans entraînement particulier) de réaliser une sommation des mouvements effectués pour retrouver la position du point de départ. La situation est semblable à celle de robots réels aux roues qui dérapent sur un sol inconnu et variable. C’est dans de telles conditions que la reconnaissance d’une forme réussit cependant à s’établir.

Suivi de contour - Il consiste en une combinaison du microbalayage, perpendiculaire au bord de la forme, avec un déplacement longitudinal, tangentiel, suivant des directions élémentaires (portions de droite ou de courbe, voir Figure 4).

Si le point où se trouve amorcé le mouvement de microbalayage est une partie d’un segment, il se trouve en fait que sa localisation spatiale échoue partiellement à se constituer. En effet, la localisation d’un point n’est complète que s’il peut être réversiblement exploré suivant toutes les dimensions de l’activité (ici les deux dimensions du plan). Or, suivant l’axe du segment, quand par hasard il est suivi, les variations d’action ne déterminent pas de changements de sensation, et d’ailleurs tous les mouvements effectués suivant des directions qui croisent le trait à différents niveaux révèlent l’échec à spatialiser une cible ponctuelle. Du fait de la limitation extrême du champ perceptif, il est impossible d’effectuer un suivi exact du segment, suivi qui aurait probablement permis de le spatialiser en position et grandeur par l’ampleur d’un mouvement permettant de le dépasser à chaque extrémité.

La stratégie adoptée est donc une composition de deux gestes élémentaires, d’une part une oscillation perpendiculaire qui dans une dynamique rapide permet de vérifier la position du trait vis-à-vis de cette direction, et d’autre part, un mouvement tangentiel qui dans une dynamique plus lente, tente de saisir réversiblement l’ensemble du segment. Ce déplacement général réalise une anticipation de second ordre qui parie sur la stabilité d’une fréquence temporelle de sensations.

Cette exploration est corrigée progressivement suivant les surprises du contour. Quand le bord est perdu, le stylet ralentit, revient en arrière, tente une nouvelle direction, et dès que le microbalayage redonne une stimulation régulière, reprend son chemin dans une même direction jusqu’au prochain détournement. Chacune de ces directions tangentielles est la confirmation ou la déception d’une anticipation sur les stimulations attendues via le microbalayage. Nous proposons de caractériser cette étape comme celle d’une reconnaissance de “traits” composant la forme. Mais, si cette stratégie permet de reconnaître des segments droits ou courbes, ce n’est pas encore la reconnaissance de formes plus complexes, comme des lettres. On pourrait là aussi imaginer que l’enchaînement de ces “traits” permet de construire une “image mentale”. On aurait déjà avancé en retraduisant une image comme ensemble de positions de points en une image comme combinaison de traits (l’étape classique d’extraction de contour aurait été externalisée), mais il faudrait encore reconnaître et catégoriser cette image.

En fait, l’imprécision du savoir de l’action et de la mémoire de ses changements ne permet pas une telle stratégie. Le sujet n’a pas accès à une métrique de l’espace exploré qui permettrait de composer mentalement ces traits, mais au mieux une simple topologie (cf. confusion entre le “D” et le “O”, entre le “U” et le “V”).

Geste d'écriture - La reconnaissance proprement dite ne semble atteinte qu'au moment où le sujet est capable de combiner au geste de microbalayage, celui d'une séquence dynamique de traits reproduisant le tracé. Dès lors le stylet parcourt en oscillant et sans perdre les bords l'ensemble de la forme (voir Figure 4 B). La reconnaissance d'un caractère serait ainsi la vérification que le geste, qui dans d'autres conditions correspondrait à la production de cette forme, permet effectivement d'anticiper correctement les sensations reçues. Non seulement, la lecture serait la reconnaissance du geste de l'écriture [PLO 94, 97], mais elle est ici la réalisation spatiale du geste d'écriture du caractère lui-même.

Dans cette expérience limite, la perception n'est plus la réception (puis la représentation) d'une forme mais sa construction active, et ceci non seulement sur le plan cognitif, mais de façon quasiment concrète par son écriture gestuelle. Le parcours actif est à la fois **reconnaissance** et **constitution** de la forme (puisque'il faut à chaque fois produire les sensations correspondant à ses diverses parties. Comme dans une perspective phénoménologique, la perception est la réussite (ou non) du remplissement d'une visée active.

La perception n'est pas la catégorisation (suivant un mode associationniste) d'une forme passivement reçue. L'anticipation précède la situation qui la confirmera ou non, mais ce n'est pas là non plus un simple mode sélectif où une hypothèse serait conservée ou non suivant les sensations reçues. En effet, cette anticipation ne définit pas une attente passive, mais elle se réalise activement et très concrètement dans une série de mouvements qui déterminent les sensations reçues. Il est d'ailleurs frappant à l'examen du film des trajectoires, de pouvoir lire sans ambiguïté dans les directions des mouvements exploratoires, les intentions suivies par leurs auteurs et les formes qu'ils croient reconnaître. La forme perçue correspond à la tentative réussie de détermination de séquences de sensations par des séquences d'actions, i.e. le remplissement d'une anticipation. Ceci explique d'ailleurs les «erreurs» fréquentes de construction partielle (par exemple entre P, R et B).

5. Conclusion

Si l'action est constitutive de la perception et si les actions possibles sont définies par les pouvoirs du "corps propre" du sujet, alors il est clair que prothèses modifient ce corps propre en transformant le système des actions et sensations possibles. En contraignant les liaisons entre actions et sensations, elles définissent les règles accessibles pour la synthèse perceptive. Dans la mesure où la perception de la localisation spatiale d'une cible correspond à la constitution d'un invariant sensori-moteur, c'est-à-dire si elle implique autant la réception de sensations que la production d'actions, alors on pourra aussi bien enrichir la perception (en précision, vitesse, ou complexité) par la multiplication des effecteurs (nombre et rapidité des diverses articulations matérielles) que par l'augmentation des capteurs (largeur du spectre, nombre et dispositions des senseurs, etc.)⁵. Comme en robotique située, l'organisation matérielle des articulations entre capteurs et effecteurs joue un rôle essentiel dans la détermination du comportement et la résolution de tâches. Si l'on

⁵ C'est ce que nous avons pu montrer dans une série d'expériences réalisées avec M.-M. Ramantsoa de l'Université de Paris V qui sera prochainement publiée.

met de côté la question de la conscience elle-même pour s'en tenir aux conditions fonctionnelles de la perception et de l'action, les éléments dégagés dans le cas de la perception humaine prothétisée devront certainement trouver un répondant dans la perception artificielle de robot matériels (modulo les différences qualitatives et surtout quantitatives dans les capacités proprioceptives et mémorielles). Dès lors, les études expérimentales menées sur l'homme peuvent suggérer de nouveaux modes de calcul et d'organisation matérielle pour la robotique, et inversement, les simulations robotiques permettront de valider certains aspects des hypothèses explicatives de la perception (en montrant leur effectivité) ou pourront même suggérer de nouvelles recherches psychologiques.

Bibliographie

- [BAC 72] Bach Y Rita P., *Brain mechanisms in sensory substitution*. New York : Academic Press, 1972.
- [BAC 82] Bach-y-Rita P., Sensory substitution in rehabilitation. In *Rehabilitation of the Neurological Patient*, L. Illis, M. Sedgwick & H. Granville (eds.); Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1982, p. 361-383.
- [BAC 94] Bach y Rita P., Sensory substitution, volume transmission and rehabilitation: emerging concepts. In L. S. Illis (Ed.), *Neurological Rehabilitation*, (2nd ed., pp. 457-468). Oxford: Blackwell.
- [BRO 99] Brooks R., *Cambrian Intelligence. The Early History of the New AI*, MIT Press, 1999.
- [COL 73] Collins C.C., Bach y Rita P., Transmission of Pictorial Information Through the Skin, *Advan. Biologic. Med. Phys*, 1973, 14, p. 285-315.
- [DIC 73] Ditchburn R.W., *Eye-movements and visual perception*. Oxford: Clarendon Press, 1973.
- [GIB 66] Gibson J.J., *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin, 1966.
- [GIB 86] Gibson J.J., *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale, Nj: Erlbaum, 1986.
- [Han 99a] Hanneton S., Lenay C., Gapenne O., Vermandel S., C. Marque C., Dynamique de la reconnaissance de caractères via une interface haptique, in Kayser D., Nguyen Xuan A., et Holley A. (Eds.) Actes du colloque de l'ARCo 98, Saint-Denis, p. 343-347.
- [Han 99b] Hanneton S., Gapenne O., Genouel C., Lenay C., Marque C., Dynamics of Shape Recognition Through a Minimal Visuo-Tactile Sensory Substitution Interface, Third Int. Conf. On Cognitive and Neural Systems, Mai 1999, Boston, p. 26-29,
- [KAC 95] Kaczmarek K.A., Bach y Rita P., Tactile Displays, in *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, BARFIELD (W.) and FURNESS III (T.A.) (Eds.), New York : Oxford, 1995, p. 349-414.
- [LEN 97a] Lenay C., Mouvement et perception : médiation technique et constitution de la spatialisation in *Le mouvement. Des boucles sensori-motrices aux représentations cognitives et langagières*, actes de la Sixième école d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive, 1997, p. 69-80.

- [LEN 97b] Lenay C., Cannu S., Villon P., Technology and Perception : the Contribution of Sensory Substitution Systems, *Second International Conference on Cognitive Technology*, Aizu, Japan, Los Alamitos: IEEE, 1997, p. 44-53.
- [MER 45] Merleau-Ponty M., *Phénoménologie de la perception*, Gallimard, Paris, 1945.
- [PLO 94] Ploux S., An example of perception and action coupling :handwriting recognition. in C. Faure, P. Keuss, G. Lorette, A. Vinter (eds). *Advances in handwriting and drawing. A multidisciplinary approach*. Europa, 1994.
- [PLO 97] Ploux S., Une étude pour un modèle morphogénétique de la structuration cognitive : la construction des fonctions de saisie et d'imitation in *Le mouvement. Des boucles sensori-motrices aux représentations cognitives et langagières*, actes de la Sixième école d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive, 1997.
- [POIN 1905] Poincaré H., *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905.
- [POIN 1907] Poincaré H., *La Science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1907.
- [STE 90] Steinman R.M., Levinson J.Z., The role of eye movement in the detection of contrast and spatial detail, in *Eye movement and their role in visual and cognitive processes*, E. Kowler (Ed.), Elsevier, 1990.
- [STI 96] Stiegler B., *La technique et le temps*, Galilée, Paris, 1996.
- [VAR 79] Varela F., *Principles of Biological Autonomy*, New York: Elsevier, 1979.
- [WAN 92] Wann J.P., Ibrahim S.F., Does limb proprioception drift ? *Experimental Brain Research*, 1991, p. 162-166.