

LA SUBSTITUTION SENSORIELLE: LIMITES ET PERSPECTIVES

Charles Lenay, Olivier Gapenne, Sylvain Hanne-ton¹,

Catherine Marque et Christelle Genouëlle

29/08/2003

Université de Technologie de Compiègne

COSTECH - BIM

Groupe Suppléance Perceptive²

Paul Bach y Rita a écrit, il y a un quart de siècle en préface de «Brain Mechanisms in Sensory Substitution »

"This monograph thus risks becoming outdated in a very short time since the development of refined sensory substitution systems should allow many of the question raised here to be answered, and some of the conclusions may appear naive to future readers." (BACH Y RITA 1972)

Cette prédiction nous semble loin d'avoir été réalisée : en dépit de leur intérêt scientifique et social, de leur réelle efficacité et d'une certaine évolution technologique, les prothèses utilisant le principe de «substitution sensorielle » ne sont pratiquement pas employées par les personnes aveugles auxquelles elles étaient originellement destinés. Après un bref rappel sur le principe général de la substitution sensorielle, nous proposerons quelques hypothèses sur les raisons de cette situation. Puis nous pointerons des éléments propres à favoriser la conception et surtout l'appropriation de dispositifs futurs. A cette fin, nous avons centré nos analyses sur les travaux de Bach y Rita, particulièrement bien documentés, consacrés au TVSS (Tactile Vision Sensory Substitution) depuis les années 60. Ce choix a été motivé par le caractère exemplaire et extensif de ses recherches, comme entreprise à la fois technique et scientifique, visant la réhabilitation et l'insertion d'une population handicapée. Nous présentons également l'intérêt propre des systèmes de substitution utilisant des stimulations tactiles et la nécessaire coordination de la recherche fondamentale et technologique en ce domaine. De plus, outre leur utilité directe pour les handicapés, ces dispositifs ouvrent de vastes perspectives expérimentales et théoriques sur la cognition en général (plasticité cérébrale, perception, intentionnalité, etc...).

¹ Sylvain Hanne-ton est également membre du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action. Collège de France - CNRS, UMR C-9950.

² Le groupe adresse toute sa reconnaissance à Clotilde VanHoutte.

1. RAPPEL SUR LES DISPOSITIFS DE SUBSTITUTION SENSORIELLE

1.1. *Principe général de fonctionnement*

De façon générale, les systèmes dits de « substitution sensorielle » transforment des stimuli propres à une modalité sensorielle (par exemple la vision) en des stimuli d'une autre modalité sensorielle (par exemple le toucher). Un système de substitution sensorielle est décomposable en trois éléments distincts. Des capteurs permettent la conversion d'une forme d'énergie (photonique, sonore, mécanique ou autre) en signaux interprétables par un système (électronique) de couplage qui est responsable de l'activation coordonnée de stimulateurs. La stimulation s'adresse en général à des récepteurs cellulaires d'organes sensoriels et est ainsi consommatrice d'énergie électrique qui peut être convertie en énergie sonore (prothèses visuo-sonores par exemple) ou mécanique (prothèses visuo-tactiles). Les capteurs peuvent être « actifs », c'est à dire émettre et recevoir des signaux. C'est le cas par exemple pour des dispositifs pour lesquels la partie « capteur » utilise un principe de télémétrie (laser ou ultrason par exemple).

La substitution sensorielle proprement dite désigne la capacité qu'a le système nerveux central à se saisir de tels dispositifs pour constituer par l'apprentissage un nouveau « mode » de perception. Soulignons, et nous reviendrons sur ce point plus loin, que l'action joue un rôle essentiel dans ce processus. Autrement dit, la substitution sensorielle ne peut se construire et fonctionner que via le maintien d'une activité exploratoire des capteurs. Enfin, l'accès à la perception qu'offre les dispositifs de substitution sensorielle après la phase d'apprentissage peut être qualifié d' « implicite », c'est à dire ne faisant pas appel à un raisonnement conscient sur les sensations perçues via le système de stimulation.

1.2. *Panorama non exhaustif*

Si l'on considère l'indépendance relative des trois éléments constituant ces systèmes et la grande diversité des types de capteurs et de stimulateurs dont nous disposons à l'heure actuelle, il existe un très grand nombre de systèmes de substitution sensorielle existant ou potentiels. Ce chapitre ne peut donc donner lieu à un inventaire détaillé et comparatif des dispositifs prothétiques, notamment ceux impliquant la modalité tactile. Ces dispositifs sont techniquement très variés, leur développement répondant ou ayant répondu à des objectifs divers : l'aide aux handicapés, l'ergonomie des interfaces, les recherches fondamentales ou encore les performances artistiques et ludiques. Ce caractère pluridisciplinaire donne à la littérature relevant de cette problématique une allure très « dispersée » mais le lecteur pourra se référer à quelques ouvrages présentant certaines de ces techniques (BARFIELD & FURNESS, 1995 ; O.F.T.A., 1996 ; SAMPAIO, 1994 ; WARREN, & STRELOW, 1985).

Il nous a cependant semblé important de donner au lecteur un aperçu de l'état de l'art en la matière. Pour cela, nous proposons un tableau comportant des exemples de systèmes impliquant diverses modalités sensorielles. Certaines des technologies citées ne sont pas des systèmes de

substitution complets (ce sont seulement des éléments capteurs ou stimulateurs), mais sont susceptibles, à notre avis, de participer à l'évolution future de ces dispositifs. Précisons que ces systèmes bénéficient actuellement, dans le cadre de leur développement technologique, de la miniaturisation des capteurs et des stimulateurs. On trouve maintenant des caméras très performantes, de très petite taille et peu onéreuses sur le marché (notamment les caméras utilisant la technologie CMOS) et certaines équipes de recherche travaillent sur des prototypes de systèmes de stimulation tactile présentant une haute résolution sur une surface très petite (Exeter Fingertip Stimulator Array, CHANTER & SUMMER 1990). Nous reviendrons par la suite sur le rôle important de la miniaturisation dans l'appropriation de ces prothèses sensorielles.

Type	Capteurs	Stimulateurs	Références
ETA ³	5 capteurs ultrasons	Stéréophonie	Sonic Pathfinder™ (Heyes, 1984)
ETA	2 capteurs ultrasons	Monophonie	UltraSonic Torch™ (Kay, 1965)
ETA/SSS ⁴	3 capteurs ultrasons	Stéréophonie	Sonic Glasses™ (Kay, 1974)
ETA/SSS	3 capteurs ultrasons	Stéréophonie	TriSensor (Kaspa™) distribué par SonicVison ^{LTD}
ETA/SSS	1 capteur ultrasonore	Tactile (EM)	Mowat Sensor (Pulse Data Int. Ltd)
SSS	Camera video	Stéréophonie	The Voice™ (Meijer, 1992)
SSS	Caméra vidéo	Tactiles (EM)	TVSS (20x20 tacteurs, Bach y Rita 1963)
SSS	Caméra CCD	Tactile (ET)	VideoTact™ (1996) Unitech Research Inc.
SSS	Sonore (micro)	Tactile (EM)	Tactile Sound Transducer (Clark Synthesis)
SSS	Tactile (JC)	Tactile (EM)	EVTS (Orbitec, jusqu'à 20 stimulateurs)
	?	Tactiles (PE)	Exeter Fingertip Stimulator Array, Chanter & Summer, 1998 (10x10 sur 1cm ²)
	?	Tactile (EM)	Tactile Feeling Display, Shinoda et coll., 1998
	?	Tactile (AMF)	Actuateurs à mémoire de forme (Grant et Hayward, 1997)
		Tactile (AP)	Stimulation utilisant de l'air sous pression (Shinoda et coll., non encore publié)
	Caméra CMOS	?	Technologie peu onéreuse permettant une grande miniaturisation des capteurs.
	Implant oculaire	?	Stimulation des cellules ganglionnaires rétiniennes Wyatt et Rizzo, 1996
	Implant cortical	?	Schmidt et coll., 1996

³ Pour « electronic travel aid », système d'aide électronique à la locomotion.

⁴ Pour «Système de Substitution Sensorielle », certains dispositifs d'aide à la locomotion peuvent être également considérés comme des systèmes de substitution sensorielle.

Tableau 1 Liste non exhaustive de différents systèmes de substitution sensorielle. Ce tableau comporte également des dispositifs techniques (capteurs ou stimulateurs) susceptibles d'être utilisés dans ce contexte. Abréviations : (EM) électromagnétique, (ET) électrotactile, (AMF) alliage à mémoire de forme, (PE) piezo-électrique, (AP) air sous pression, (JC) jauge de contrainte.

1.3. Les résultats obtenus avec le TVSS

Le TVSS (« tactile vision substitution system ») permet de convertir une image captée par une caméra vidéo en une « image tactile ». Dans la version standard, l'image tactile est produite par une matrice de 400 tacleurs (20 lignes et 20 colonnes de solénoïdes de un millimètre de diamètre). La matrice est placée soit dans le dos (première version), soit sur le thorax, soit sur le front (Collins & Bach y Rita, 1973). Le TVSS a été l'objet de nombreuses améliorations techniques (miniaturisation, définition de l'image, passage à la stimulation électrique, etc..) et donne encore lieu à une commercialisation sous le label VideoTactTM (Unitech Research Inc.). Enfin, il a été récemment adapté en vue de son utilisation par de jeunes bébés (recherches en cours d'E. Sampaio).

Equipés du TVSS, les sujets (personnes voyantes ou aveugles) sont capable dès les premiers essais de détecter des cibles simples et de s'orienter vers elles. Ils sont également rapidement capables de discriminer des lignes orientées verticalement ou horizontalement, et d'indiquer le sens du mouvement de cibles mobiles. La reconnaissance de formes géométriques simples nécessite un apprentissage plus important (une cinquantaine d'essais pour obtenir un taux de reconnaissance de 100%). L'apprentissage requis est plus important encore lorsqu'il s'agit d'identifier des objets usuels placés dans différentes orientations. Cette dernière tâche demande une dizaine d'heure de pratique pour obtenir des latences de reconnaissance de cinq secondes. Une observation absolument essentielle est que 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 ne fait que sentir sur sa peau des stimulations qui se succèdent. Mais en s'astreignant à un apprentissage perceptif, il finit par oublier ces sensations du toucher pour percevoir des objets stables à distance, « là bas devant lui ». De nombreuses observations expérimentales soutiennent l'existence d'une mise en extériorité. Par exemple, une expansion brusque de l'image tactile provoquée par une manipulation du zoom de la caméra à l'insu du sujet, provoque chez celui-ci un comportement d'évitement caractéristique (levée des bras et recul du corps en arrière⁵, BACH-Y-RITA, 1972, page 98). D'après les témoignages des utilisateurs, les irritations que peut provoquer le contact avec la peau de la plaque tactile sont clairement distinguées de la perception proprement dite. La personne aveugle découvre ainsi des

⁵ Alors qu'en l'occurrence, la matrice de tacleurs est placée dans le dos du sujet.

concepts perceptifs nouveau pour lui tels que la parallaxe, les ombres, l'interpositions des objets. Certaines illusions visuelles classiques sont spontanément reproduites (BACH Y RITA 1982, GUARNIERO 1977). La vocation d'insertion du TVSS a également été mise à l'épreuve par une personne aveugle qui devait opérer un certain nombre de tâches sur une chaîne de montage automatique de diodes (pour plus de détail voir Sampaio, 1994).

Cependant, passé le moment initial d'admiration et d'étonnement qui accompagne la première rencontre avec ces résultats, il est légitime de se demander pourquoi ces techniques, développées dès les années 1960, et expérimentalement éprouvées dès les années 1970, n'ont pas envahi le quotidien des aveugles et malvoyants. C'est, paradoxalement, à partir d'une analyse possible de cet échec relatif que nous nous proposons de présenter les aspects les plus intéressants de ces prothèses. Une première façon d'aborder cette question est de discuter le terme même de « *substitution sensorielle* » qui fonde l'ambiguïté, voire l'illusion, relative à la vocation de ces techniques.

2. LA SUBSTITUTION SENSORIELLE : UNE DOUBLE ILLUSION

2.1. Ce n'est pas une substitution sensorielle

On comprend la valeur, en terme de communication, de l'emploi des termes de « substitution sensorielle » pour désigner les dispositifs mis au point par Paul Bach y Rita : le dispositif fait voir aux aveugles. Est-ce l'accomplissement technique d'un miracle divin? Cette expression peut paraître cependant maladroite. Elle laisse entendre que l'essence de l'innovation consiste seulement en un changement d'entrée sensorielle, en la mise au point d'un nouveau canal d'acquisition d'information sur le monde de la lumière. Ainsi, le dispositif ne ferait que substituer à l'entrée visuelle classique par les yeux une entrée hybride constituée d'une caméra et d'une matrice de stimulateurs tactiles. Si l'on devait s'en tenir à une telle perspective, le travail de Bach y Rita, sans être négligeable, n'aurait qu'une importance limitée. Qu'est-ce que quelques points de stimulation tactile en face de l'entrée visuelle classique ? Si l'on voulait simplement créer des entrées artificielles, n'y aurait-il pas un avantage patent à utiliser des matrices d'électrodes directement implantées sur la rétine (WYATT et RIZZO, 1996) ou dans le système nerveux central (BRINDLEY 1973, DOBELLE et MLADEJOVSKY 1974, DOBELLE et al. 1976, SCHMIDT et al., 1996) ? Il serait alors possible de se passer de ce lourd détour par la sensibilité tactile et de multiplier la quantité d'information délivrée. Les recherches sur la substitution visuo-tactile ne seraient qu'une étape intermédiaire, un peu désuète, sur un chemin conduisant à des technologies plus sophistiquées.

Mais la réelle innovation de Bach y Rita n'est pas là. Au contraire, sa découverte essentielle est qu'une substitution strictement sensorielle est sans intérêt. Le dispositif qu'il a mis au point a même précisément pour immense mérite d'avoir montré cela expérimentalement. Si l'on présente directement au sujet aveugle des formes statiques sur la matrice tactile (la caméra est immobile, posée sur une table) celui-ci ne ressentira que quelques chatouillements ou irritations. Il ne sera

capable que de distinctions très vagues. En aucun cas, il n'y aura de reconnaissance ou de localisation d'objets externes et distaux :

« Le processus d'apprentissage perceptif d'identification de ces formes avec le TVSS est particulièrement instructif. La performance de tous les sujets ne dépassait pas le niveau du hasard, même après 60 essais, si : (1) les sujets ne pouvaient pas manipuler la caméra, et (2) si aucune correction n'était apportée à leur réponse .» (Sampaio, 1994 : 9)

Cependant, si la personne handicapée dispose des moyens de manipuler la caméra (mouvement de droite à gauche, de bas en haut, zoom avant et arrière, focale, et diaphragme), elle développe rapidement des capacités de reconnaissance de forme spectaculaires. Elle commence par apprendre comment les variations de ses sensations sont liées à ses actions. Quand elle déplace la caméra de gauche à droite, elle sent sur sa peau les stimuli se déplacer de même. Quand elle utilise le zoom, les stimuli se « dilatent » ou se « contractent ». Après avoir appris à diriger la caméra vers une cible, elle discrimine des lignes et des volumes, puis reconnaît des objets familiers de plus en plus complexe jusqu'à être capable de discriminer des visages.

Le travail de Bach y Rita est donc important, non seulement en tant qu'innovation technique utile, mais aussi en tant qu'il produit des outils expérimentaux originaux pour explorer les mécanismes fondamentaux de la perception. Ils permettent de suivre précisément la constitution d'une nouvelle modalité sensorielle chez l'adulte. Parce qu'ils permettent d'en observer et reproduire la genèse, ils donnent en particulier la possibilité de conduire des études expérimentales concernant la question de l'intentionnalité, c'est-à-dire ici la conscience de quelque chose comme en extériorité (l' « apparaître » d'un phénomène dans un champ perceptif spatial),

Du point de vue neurophysiologique, la substitution sensorielle permet d'envisager le développement de travaux concernant l'étude de l'extraordinaire plasticité cérébrale que semble impliquer l'emploi de ces prothèses perceptives. 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'organiser un monde perceptif dont les formes et événements croisent ceux qui nous sont donnés dans la perception visuelle. De plus, si on déplace la plaque de stimulateurs tactiles du thorax d'un sujet entraîné 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. Cette restructuration fonctionnelle du cerveau pose alors des problèmes fascinants de conceptualisation et de modélisation où doivent se comprendre simultanément les mécanismes de remaniement du réseau et ceux de son fonctionnement.

Sur le plan fonctionnel, ces prothèses semblent porteuses d'une mise en question de la conception classique de la perception et de la cognition comme fondées sur le traitement parallèle d'une information passivement reçue. Dans ce cadre, le système cognitif ne serait qu'un système de

calcul qui en entrée recevrait de l'information qu'il traiterait pour identifier des objets, des événements, et produire des représentations avec lesquelles pourrait être conduit un raisonnement qui, le cas échéant, aboutirait à une action adaptée. On sait que cette conception de la cognition est développée sur le modèle de l'ordinateur, qui en droit, devrait pouvoir se **substituer** à tout autre système cognitif. En même temps on considère généralement que le système cognitif est plongé dans un monde qui contient de l'information, un monde qui, dans le fond, n'est que de l'information. Cette conception trouve sa concrétisation technique dans les systèmes dits de «réalité virtuelle» dont l'horizon est de **substituer** entièrement à la réalité un système qui délivre aux entrées sensorielles des informations calculées d'après un «environnement» virtuel qui intègre les effets des actions du sujet (LUCIANI, 1996). Ainsi, la conception actuelle de la cognition comme traitement de l'information trouve dans le développement technique moderne deux types de réalisations concrètes qui lui servent à la fois d'analogie directrice et d'horizon théorique: du côté du sujet, l'ordinateur comme système de calcul et de décision, du côté de l'objet, la réalité virtuelle comme système de calcul de l'information accessible à ce sujet. Or, dans l'emploi des dispositifs de Bach y Rita, cognition et perception ne peuvent plus être conçues comme le traitement d'une information simplement reçue de l'extérieur. Une telle critique a pu être conduite depuis longtemps à partir de diverses considérations philosophiques ou de psychologie expérimentale. Mais ici, la preuve empirique est directe. Il n'y a pas de perception sans action.

Cette affirmation trouve une illustration particulièrement claire dans une expérience que nous avons menée avec un dispositif de substitution simplifié à l'extrême : une unique cellule photoélectrique fixée sur un doigt de la main droite est connectée à un stimulateur tactile (un simple vibreur) tenu dans l'autre main (LENAY 1996). Le vibreur réagit en tout ou rien au dépassement d'un seuil d'activation de la cellule photoélectrique (le champ récepteur assez large correspond à un cône de 20° d'angle visuel). 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). Or, après quelques minutes d'exploration, un sujet qui a les yeux bandés et qui peut librement mouvoir le bras et la main qui tient le récepteur, réussit à localiser une cible lumineuse, c'est-à-dire à indiquer sa direction et sa distance approximative. Alors qu'il maîtrise mieux la production active de ses stimulations tactiles, il ressent la présence d'un objet placé au-delà de lui dans l'espace. 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 semble oublier le lieu où se produisent les sensations (sauf s'il y porte une attention spéciale) au profit de l'appréhension spatiale de l'objet. 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 proximale sur la peau. Si les mouvements cessent, la perception d'une spatialisation disparaît. En cas d'immobilité, la stimulation tactile est soit absente, soit présente, mais rien ne donne à penser une extériorité et une distalité de sa

source. La perception exige une activité permanente consistant à osciller la main tout en changeant la position du poignet de sorte à ce que la stimulation apparaisse et disparaisse sans cesse.

De même, pour enrichir et préciser ce champ empirique, nous avons lancé un programme de recherches alliant le développement technologique de dispositifs prothétiques simples et la mise en œuvre de protocoles expérimentaux concernant à la fois l'activité de reconnaissance de formes bi-dimensionnelles et son apprentissage. Nos résultats préliminaires (Hanneton et al, 1998) montrent clairement qu'une reconnaissance de forme est possible même lorsque le couplage est minimal. Evidemment, et c'est là l'un des intérêts de cette approche, la reconnaissance prend du temps et impose une activité exploratoire dont l'étude de la dynamique révèle des stratégies identifiables.

Le rôle essentiel joué par l'action dans l'émergence progressive de représentations structurées semble montrer que ce qui est perçu, reconnu, n'est pas issu des invariants de la sensation, mais des invariants des cercles sensori-moteurs inséparables de l'activité du sujet. C'est par son action que le sujet cherche et construit des règles de liaisons constantes entre action et sensation. La localisation spatiale, comme la reconnaissance de forme, correspondent à des synthèses temporelles des sensations successives suivant une règle liant action et sensation⁶. Cette conception est d'ailleurs largement partagée dans les recherches contemporaines sur le couplage perception/action prothétisé ou non (GIBSON 1966, 1986 ; PAILLARD, 1971; BERTHOZ, 1991, 1997 ; TURVEY & CARELLO, 1995) et sa genèse (LEPECQ et al., 1995).

Si la perception n'est possible que si le sujet peut maîtriser activement le mécanisme d'acquisition de sensations, il faut reconnaître que le dispositif de Bach y Rita ne réalise pas une substitution simplement sensorielle, mais une substitution **sensori-motrice**. La richesse de la perception dépend autant des qualités de l'action, (mobilité, rapidité, zoom, etc.) que des qualités de la sensation (sensibilité, largeur du spectre, nombre de senseurs, etc.). C'est ce que montre à l'évidence l'étonnante capacité de reconnaissance des visages à partir de dispositifs qui ne donnent en entrée sensorielle que quelques 400 points distincts. Le visage reconnu émerge comme un invariant de haut niveau des changements de sensation associés à son exploration active.

2.2. Ce n'est pas une substitution sensorielle

S'il fallait s'en tenir à l'idée de substitution, « système de substitution **sensori-motrice** », ou de « substitution **perceptive** », seraient mieux que substitution sensorielle. Mais nous souhaiterions maintenant montrer que la deuxième maladresse de la terminologie « substitution sensorielle », est que ce n'est pas une substitution. L'avertissement est venu des handicapés eux-mêmes qui se sont déclarés déçus et déprimés alors qu'ils commençaient à découvrir cet accès particulier à des objets situés à distance dans l'espace. Bien sûr, de tels dispositifs permettent effectivement à des aveugles de réaliser des tâches particulières qui, sinon, leur auraient été impossibles. Mais tel n'est pas le désir fondamental de l'aveugle qui se prête à une telle expérience. Son épanouissement personnel peut fort

⁶ Il reste néanmoins à proposer une définition et/ou modélisation satisfaisante de la notion d'invariant perceptivo-moteur.

bien ce faire en dehors de ces tâches pour lequel la vision serait indispensable. Ce que cherche l'aveugle qui accepte de se plier à l'apprentissage du dispositif de couplage, c'est d'avantage la connaissance de ce dont les voyants lui parlent tant : les merveilles du monde visible. Ce qu'il espère, c'est la jouissance de cette dimension d'existence qui lui est inconnue.

Or, ce n'est pas ce que donne ces dispositifs. Il y a de fait, de nombreuses différences entre le couplage artificiel et notre couplage visuel: il n'y a pas de couleur, peu de points, une caméra dont les mouvements sont difficiles et limités, ce qui donne une grande lenteur à la reconnaissance de la situation. Ce couplage sensori-moteur ressemble bien par certains aspects à celui de notre vision, mais l'expérience qu'il permet est toute différente, comme peuvent d'ailleurs bien le comprendre les voyants qui se prêtent à son apprentissage. Le dispositif de Bach y Rita ne réalise pas une *substitution* sensorielle, mais une *addition*, l'ouverture d'un nouvel espace de couplage de l'homme avec le monde. Les dispositifs de substitution sensorielle bouleversent les modes de définition classiques des diverses modalités sensorielles.

Il serait vain de croire avoir soulagé l'aveugle dès lors qu'on lui donne accès à de nouvelles informations. Ce qui est toujours en jeu, c'est l'insertion de la personne dans un monde de significations partagées, fonctions d'une histoire personnelle dont la cohérence globale ne doit pas être brutalement perturbée. Or, ce qui manque le plus cruellement dans cette modalité perceptive, c'est ce que Bach y Rita (1997) appelle les qualia, c'est-à-dire les qualités, les valeurs des choses perçues. On montre à un aveugle de naissance l'image de sa femme, on montre à des étudiants aveugles des photos de femmes dénudées, dans tous les cas la déception est totale, la perception n'est porteuse d'aucune émotion. Mais c'est le contraire qui aurait été étonnant. Le sens ou la signification émotionnelle ne sont pas déjà là, dans le monde, seulement à saisir, comme une information à capter. Là encore, par l'échec de sa première ambition, le dispositif de Bach y Rita donne une preuve empirique cruciale: un sujet isolé ne peut attribuer, dans le présent d'un mode de perception nouveau, une signification existentielle aux objets et événements qu'il perçoit. Faut-il alors poser qu'il manque quelque chose d'essentiel dans ces dispositifs ? Incapables de donner une « matière » à la perception (couleur, valeur), ils mettraient en évidence ce qui distingue la perception naturelle d'une simple capacité de discrimination et de catégorisation. La similitude de ce constat avec les observations rapportées sur l'absence d'émotion et de signification ressenties par les personnes aveugles de naissance recouvrant la vue est d'ailleurs frappante et laisse penser que ce n'est pas le principe de la substitution sensorielle proprement dit qui est la cause de l'impossibilité d'accéder aux qualia (GREGORY 1990).

Il est remarquable que toutes les observations rapportées dans la littérature ne font état que de l'emploi individuel des dispositifs. L'utilisateur se trouvant entouré de voyants, mais isolé dans son mode perceptif particulier. Or, on peut faire l'hypothèse que les valeurs perceptives soient liées à l'existence d'une histoire et d'une mémoire collective, mémoire qui doit pouvoir émerger du jeu des interactions de plusieurs sujets dans un même milieu. Ce sont là des expériences à tenter. En tout cas, il nous semble que le terme de « suppléance perceptive » serait plus approprié que celui de

substitution. Il laisse entendre que ces dispositifs ne comblent jamais exactement un déficit, mais qu'ils introduisent plutôt à des modalités perceptives à chaque fois originales.

Les dispositifs techniques de couplage sensori-moteurs donnent ainsi accès à une recherche expérimentale concernant le formidable problème, classiquement réservé à la philosophie et à la psychologie, de l'origine et de la nature de la valeur attachée aux choses. Une liaison inférentielle entre une forme perçue et une sensation de plaisir ou de peine dans une autre modalité sensorielle ne semble pas immédiatement suffisante pour donner une valeur émotionnelle à cette forme.

3. DEFINIR LES CONDITIONS DE L'APPROPRIATION

3.1. Contraintes ergonomiques

Les propriétés ergonomiques au sens large, jouent un grand rôle concernant l'acceptation de ces dispositifs. Les qualités requises sont en grande partie dictées par les principes, exposés précédemment, qui conditionnent la réussite de la « substitution sensorielle ». Ainsi, étant donnée l'importance du rôle joué par l'action dans la pratique de ces nouveaux modes de perception, toute prothèse entravant les mouvements exploratoires des sujets est contre-indiquée. Cette contrainte participe également à la nécessité de développer des systèmes autonomes et légers. Les systèmes de stimulations tactiles utilisant des transducteurs électromagnétiques ne remplissent pas actuellement ces conditions. Même s'ils sont très efficaces et simples à mettre en œuvre, leur développement a jusqu'à présent abouti à des systèmes de stimulations lourds et gourmands en énergie, imposant pour être autonomes le port de batteries elles-mêmes pesantes. Evidemment, les difficultés à produire un dispositif léger et autonome s'accroissent avec la résolution de la stimulation tactile. D'autre part, pour qu'il joue à part entière son rôle de prothèse, le système idéal doit pouvoir se « mettre » et s'enlever aisément, comme la paire de lunettes du voyant. Mais, la question de la robustesse du dispositif est elle aussi importante. On ne peut raisonnablement proposer un système fragile ou sujet aux pannes dans l'espoir qu'il prenne quelque importance dans la vie de tous les jours d'une personne déjà en prise avec l'angoisse d'une inadaptation partielle à son environnement .

La prise en compte des critères esthétiques doit résoudre une apparente contradiction : se faire oublier du porteur et des autres acteurs, mais pouvoir « faire signe » lorsque les circonstances l'imposent. La prothèse sensorielle doit être suffisamment discrète de façon à ce que celle-ci ne renforce pas le handicap et que son porteur ne soit pas considéré par les autres comme un « monstre technologique ». La miniaturisation n'est pas la seule réponse que l'on puisse apporter à ce problème. En effet, il est possible de s'inspirer de la forme d'objets usuels présents sur les lieux d'utilisation du dispositif. Par exemple, une prothèse destinée à donner l'accès aux informations graphiques sur un poste de travail informatique aurait tout avantage à pouvoir mimer la forme d'une souris. Cependant, même si cela semble contredire le principe précédent, l'apparence de la prothèse doit pouvoir jouer un rôle symbolique. La couleur systématiquement blanche de la canne de l'aveugle à l'avantage de signaler la fragilité de cette personne lors de ses trajets. Enfin, un critère qui nous semble bon de signaler, même s'il n'est pas de nature ergonomique, est le coût du dispositif. En ce

qui concerne les systèmes analogues au TVSS, le dispositif de stimulation tactile, objet d'une technologie souvent avancée et produit en peu d'exemplaires, est proposé à des coûts quasiment prohibitifs (45000 \$ à ce jour pour le système de stimulation électrotactile à 768 tacleurs VidéoTact de la société Unitech).

3.2. Adaptation à des attentes bien réelles

L'appropriation d'un dispositif de substitution sensorielle nous semble conditionnée par le fait qu'il doit répondre à une attente réelle des populations concernées. Nous avons identifié deux préoccupations principales. La première demande concerne une population de non ou mal voyants utilisant les ressources informatiques pour étudier, travailler ou plus simplement communiquer. La mise en oeuvre de la synthèse vocale, d'un clavier braille et de systèmes de reconnaissance optique de caractères permettait jusqu'alors de répondre au moins partiellement à cette attente dans le cadre des systèmes d'exploitations (Dos, Unix) codant l'information sous forme de caractères ascii. Mais le développement rapide et inexorable des systèmes d'exploitations proposant un accès essentiellement graphique aux fonctionnalités des ordinateurs décourage actuellement cette population qui a pourtant jusqu'alors fait un énorme effort d'adaptation. Dans la mesure où la transformation d'informations graphiques ou iconiques en stimulations tactiles ne présente pas de difficulté technologique majeure, l'application des techniques de substitution sensorielle à ce cadre pratique devrait se faire assez aisément (voir par exemple le site internet de la société Unitech : <http://www.execpc.com/~unitech/winhapt.html>).

La seconde attente concerne une population bien plus large. Certes, la canne blanche fournit une précieuse aide à la locomotion et à l'évitement d'obstacle. Elle ne donne cependant pas accès à une perception distale (c'est à dire sans contact) et globale de la scène. Un mode de perception distal, dont l'idéal serait qu'il soit couplé à la canne, sans s'y substituer, permettrait de faciliter l'anticipation des déplacements en donnant par exemple la possibilité d'extraire de l'environnement les silhouettes fixes ou en mouvement des obstacles à éviter. D'autres applications potentielles, comme l'accès à la lecture et écriture en « noir » (visé par l'Optacon), nous apparaissent comme présentant un caractère moins crucial et concurrencées par des systèmes ayant déjà prouvé leur efficacité (comme le Braille). Soulignons qu'il n'est pas interdit de rêver à un système répondant aux deux attentes principales précédemment décrites capable de permettre conjointement une lecture des informations graphiques fournies par un ordinateur et la perception distale de la structure d'une scène. Ce système idéal aurait l'immense avantage d'autoriser une continuité perceptive dans la vie quotidienne de la personne handicapée visuelle, et n'en serait que mieux accepté.

3.3. Importance du mode et des protocoles d'apprentissage

Même si les observations relatées par Paul Bach Y Rita et coll. laissent penser que l'adaptation au TVSS est assez rapide, il ne faut pas espérer construire une prothèse ne nécessitant pas un long apprentissage. L'Optacon est ainsi livré avec un manuel d'apprentissage didactique organisant la prise en main du dispositif en une série d'étapes successives. Ce manuel associe

instructions en braille et tracé de figures « en noir ». Si la qualité didactique de la procédure d'apprentissage est un facteur d'appropriation essentiel (et en soi un objet de recherche), il nous semble également nécessaire de prendre en compte les conditions mêmes dans lesquelles cet apprentissage est conduit. Il est en effet possible que l'insuccès des systèmes de substitution sensorielle ait en partie pour origine la relation qui s'établit, dans le cadre du laboratoire, entre l'expérimentateur qui « teste » la capacité du sujet non voyant à « voir » les objets qui lui sont présentés. Il nous apparaît comme important de garder à l'esprit dans la conception d'un protocole d'apprentissage le fait que la prothèse sensorielle ne donne pas accès à une vision « dégradée » mais à un mode de perception nouveau qui doit être partagé par l'instructeur et l'élève. La pratique du système doit résulter d'un vécu partagé et ce n'est que dans ce cadre que l'on peut penser que l'apprentissage puisse également contribuer à l'attribution de qualia aux percepts.

Enfin, il nous semble également vain et orgueilleux de penser que les voyants puissent connaître a priori la meilleure façon d'apprendre à se servir d'une prothèse sensorielle. En ce sens, l'immersion du système dans un environnement adapté peut permettre non seulement le recueil de l'expérience et des conseils des personnes auxquelles le système est destiné, mais également l'émergence de modes d'utilisation ou d'appropriation non prévus par les concepteurs.

3.4. Efficacité « en soi » de la substitution sensorielle

Au regard des conditions d'appropriation déjà discutées, c'est peut-être paradoxalement le point qui prête le moins à discussion. La « substitution sensorielle » semble bien être un principe très général, prenant directement sa source dans les capacités adaptatives du système nerveux central et en ce sens relativement indépendant des modalités sensorielles mobilisées. Il est donc légitime de se poser des questions sur l'incapacité de la communauté scientifique à se mobiliser sur un projet passionnant et utile (aussi bien du point de vue fondamental que technologique) mais vient perturber les limites entre champs disciplinaires.

4. TOUCHER ET SUBSTITUTION SENSORIELLE

Tout d'abord, notons l'intérêt de l'utilisation d'une entrée sensorielle tactile dans une démarche de suppléance perceptive, plutôt que sonore comme dans d'autres dispositifs existants (Sonic Guide, The Voice). Les avantages du toucher nous semblent de trois ordres. Les stimulateurs tactiles peuvent d'abord être facilement dissimulés. La personne dotée du dispositif est alors la seule à accéder à la stimulation. De plus, si les stimulations tactiles sont données dans des régions de la peau rarement mobilisées (la poitrine, le dos de la main,...) elles ne viennent pas interférer avec les autres modalités perceptives, nécessairement très utilisées par les handicapés sensoriels. Enfin, la stimulation des récepteurs cellulaires participant au sens du toucher permet de conduire au système nerveux central de l'information en parallèle. Ce parallélisme du sens du toucher a été un temps objet de discussion (voir par exemple BACH YRITA, 1972, page 15). Mais les expériences conduites entre autre avec le TVSS ont montrées que ce parallélisme pouvait être exploité, et que les systèmes de substitution sensorielle avaient, via le couplage

perception-action, la capacité de donner accès à des résolutions perceptives supérieures à la résolution matérielle des matrices de stimulateurs. Cette propriété, que possèdent les systèmes perceptifs « naturels », est nommée « hyperacuité ». En comparaison, il est plus compliqué d'utiliser, dans le cadre d'une stimulation sonore, les propriétés de parallélisme de l'oreille interne. En effet, la conversion d'image en événement sonore nécessite la conception d'un élément de couplage capable de recoder dans deux ondes sonores (si la stéréophonie est utilisée) les propriétés spatio-temporelle d'une image (MEIJER 1992). En revanche, il est théoriquement possible de reproduire directement sur la surface de la peau la topographie d'une image visuelle.

Il faut cependant noter que, même si ces trois propriétés montrent que la stimulation tactile est sans doute la meilleure solution pour la substitution sensorielle, certains obstacles technologiques restent à franchir pour que cette solution s'impose. En effet, les deux techniques de stimulation les plus classiquement utilisées montrent des défauts certains et presque rédhibitoires. Les systèmes de stimulation électromagnétiques sont lourds et consommateurs d'énergie. Les systèmes électrotactiles produisent des stimulations ressenties souvent comme des « picotements désagréables » sur la peau et nécessitent l'emploi d'un gel conducteur. Risquons-nous dans ce domaine à faire preuve du même optimisme que Paul Bach y Rita ! En effet, des travaux récents laissent à penser que ces obstacles seront bientôt surmontés. Bach y Rita et coll. travaillent actuellement sur un système de stimulation électrotactile intrabuccal permettant notamment d'éviter l'emploi d'un gel conducteur. D'autre part, de nouvelles alternatives technologiques laissent présager de gros progrès impliquant l'emploi de transducteurs piézoélectriques (CHANTER & SUMMER, 1998) ou d'alliages à mémoire de formes (GRANT & HAYWARD 1997). Mais soulignons que le développement et l'optimisation de stimulateurs efficaces et à bon rendement énergétique ne pourra se faire que par la prise en compte des caractéristiques physiologiques des récepteurs sensoriels impliqués dans le toucher. Ainsi les systèmes électromagnétiques, réglés sur une fréquence de 250 à 300 Hz environ, stimulent de façon diffuse principalement des récepteurs sensoriels possédant des champs récepteurs épidermiques très larges. Il y aurait un grand avantage à tirer partie de la grande variété de sensibilité des différents types cellulaires impliqués dans le toucher pour enrichir les capacités de transduction de ces interfaces tactiles (voir SHINODA et coll., 1998).

5. CONCLUSION

Tant que l'on maintient une conception de la perception en terme d'acquisition d'information, on maintient la prétention à adopter un point de vue absolu pour lequel il y a des relations hiérarchiques suivant le principe qu'il serait toujours mieux d'avoir accès à plus d'information. C'est seulement dans un tel cadre que les handicaps perceptifs peuvent être pensés de façon dévalorisante. Mais, les « systèmes de substitution sensorielle » doivent plutôt être compris comme des dispositifs de suppléance qui permettent de nouveaux modes de couplage avec le milieu. Il ne font pas disparaître une différence, mais ouvrent de nouvelles différences possibles et sur des applications qui ne sont pas exclusivement destinées aux personnes handicapées (applications artistiques, ludique,

réalité augmentée, développement de systèmes portables et intuitifs de détection thermique et de radioactivité etc...). En dépit des apparences c'est la première conception qui est porteuse d'exclusion puisqu'elle fait du handicap un problème de différence quantitative. Au contraire, le respect pour le monde du handicap passe par une meilleure connaissance de la différence qualitative des perceptions possibles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bach y Rita, P. (1972). Brain mechanisms in sensory substitution. New York : Academic Press.

Bach y Rita, P. (1987). Brain plasticity as a basis of sensory substitution. *Journal of Neurological Rehabilitation*, 2, 67-71.

Bach y Rita, P. (1997). Substitution sensorielle et qualia. In J. Proust (Ed.), *Perception et intermodalité. Approches actuelles de la questions de Molyneux* (pp. 81-100). Paris : PUF.

Barfield, W. & Furness, T.A. (1995). *Virtual environments and advanced interface design*. Oxford : Oxford University Press.

Berthoz, A. (1991). Reference frames for the perception and control of movement. In J. Paillard (Ed.), *Brain and space* (pp.81-111). Oxford : Oxford University Press.

Brindley, G.S. (1973). Sensory effects of electrical stimulation of the visual and paraviscual cortex. *The Journal of Physiology*, 196, 479-493.

Chanter, C. & Summers, I. (1998). The Exeter fingertip stimulator array for virtual touch : a preliminary investigation (<http://newton.ex.ac.uk/medphys/index.html>)

Collins, C.C. & Bach y Rita, P. (1973). Transmission of pictorial information through the skin. *Advances in Biological Medecine and physiology*, 14, 285-315.

Dobelle, W.H. & Mladejovsky, M.G. (1974). Artificial vision for the blind : electrical stimulation of visual cortex offers hope for a functional prosthesis. *Science*, 183, 440-444.

Dobelle, W.H., Mladejovsky M.G., Evans, J.R., Roberts, T.S. & Girvin, J.P. (1976). « Braille » reading by a blind volunteer by visual cortex stimulation. *Nature*, 259, 111-112.

Epstein, W., Hughes, B., Schneider, S. & Bach y Rita, P. (1986). Is there anything out there? : a study of distal attribution in response to vibrotactile stimulation. *Perception*, 15, 275-284.

Grant, D., Hayward, V. (1997). Variable Structure Control of Shape Memory Alloy Actuators. *IEEE Systems and Control Magazine* 17(3), 80--88.

Gregory, R.L (1990). Recovery from blindness. In *Eye and brain : the psychology of seeing* (quatrième édition), Oxford University Press. Chapitre 11, 191-200

Hanneton S., Lenay C., Gapenne O., Vermandel S., et Marque C., (1998) Dynamique de la reconnaissance de caractères via une interface Haptique», *VIIe Colloque de L'Association pour la Recherche Cognitive ARC'98*, Kayser D., Nguyen-Xuan A., & Holley A. (Eds.), Université Paris 8, Paris 13, ARC, 1998, pp. 343-347.

Hatwell, Y. (1986). *Toucher l'espace*. Lille : Presses Universitaire de Lille.

Kaczmarek, K.A. & Bach y Rita, P. (1995). Tactile displays. In W. Barfield & T.A. Furness, (Eds.), *Virtual environments and advanced interface design* (pp. 349-414). Oxford : Oxford University Press.

Lenay, C. et al. (1996) Technology and Perception : the Contribution of Sensory Substitution Systems. In *Second International Conference on Cognitive Technology, Aizu, Japan, Los Alamitos: IEEE, 1997*, pp. 44-53.

Luciani, A. (1996). Ordinateur, geste réel et matière simulée. In M. Borillo & A. Sauvageot (Eds.), *Les cinq sens de la création* (pp. 79-89). Seyssel : Editions Champ Vallon.

Meijer P.L.B. (1992). An Experimental System for Auditory Image Representations. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 39 (2), 112-121.

O.F.T.A. (1996). *Nouvelles interfaces homme-machine*. Série Arago, Vol.18. Paris : OFTA Editeur.

Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de Psychologie*, 14, 261-316.

Sampaio, E. (1994). Les substitutions sensorielles adaptées aux déficits visuels importants. In A.B. Safran & A. Assimacopoulos (Eds), *Le déficit visuel. Des fondements neurophysiologiques à la pratique de la réadaptation* (pp.). Paris : Masson.

Schmidt, E.M., Bak, M.J., Hambrecht, F.T., Kufka, C.V., O'Rourke, D.K. & Vallabhanath, P. (1996). Feasibility of a visual prosthesis for the blind based on intracortical microstimulation of the visual cortex. *Brain* 119, 507-522.

Shinoda, H., Asamura N., and Tomori, N. (1998). Tactile Feeling Display Based on Selective Stimulation to Skin Mechanoreceptors. *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol.1, pp. 680-686.

Spillman, L. & Wooten, B.R. (1984). *Sensory experience, adaptation and perception*. Londres : Lawrence Erlbaum.

Warren, D.H. & Strelow, E. R. (1985). *Electronic spatial sensing for the blind*. Doordrecht : Martinus Nijhoff Publishers.

White, B.W., Saunders, F.A., Scadden, L., Bach y Rita, P. & Collins, C.C. (1970). Seeing with the skin, *Perception and Psychophysics*, 7, 23-27.

Wyatt, J.L. & Rizzo, J.F (1996). Ocular implant for the blind. *IEEE Spectrum*, 33, 47-53.