

La perception de l'espace, identification d'une faculté sensorimotrice ?

D. Philipona² et J.K. O'Regan

davidp@csl.sony.fr, oregan@ext.jussieu.fr

I. Perception et système sensoriel

De l'observation de l'image rétinienne (Scheiner 1619), jusqu'aux théories classiques de la vision (Marr 1982), la sensation a longtemps été considérée comme le corrélat d'une projection du monde externe sur un système sensoriel passif. L'importance de l'action pour la perception est pourtant aujourd'hui reconnue aussi bien en neurobiologie, qu'en psychologie ou en intelligence artificielle (Hebb 1947 - Paillard 1971, 1991 - Berthoz 1997 - Jeannerod 2002 - O'Regan, Noë 2001 - Millner, Goodale 1996 - Brooks, Stein 1994).

Ceci nécessite une modification importante dans l'étude de la perception, tant dans l'approche expérimentale que théorique. En effet, les stimulus sont très généralement considérés par rapport à un système sensoriel *récepteur*, et non *agissant* ou *explorateur* ; or si l'action joue un rôle dans la perception, un stimulus n'est plus seulement important par les états du système sensoriel qu'il détermine, mais également par la manière dont il régit les modifications de ces états, en réponse aux ordres moteurs donnés par le sujet. Dans le cadre de la perception passive, le stimulus détermine les inputs sensoriels, dans le cadre de la perception active, il détermine une *loi sensorimotrice* reliant les inputs sensoriels du système nerveux à ses outputs moteurs

(O'Regan, Noë 2001). Cette évolution dans ce que l'on considère comme objet de la perception, une loi en lieu et place d'inputs sensoriels, modifie profondément le cadre explicatif de la sensation. Parce qu'une relation sensorimotrice possède des propriétés intrinsèques, i.e. indépendantes du code sensoriel et moteur (Philipona, O'Regan, Nadal 2004), ce cadre est exempt de certaines incohérences conceptuelles inhérentes au paradigme de la perception passive.

Ce dernier repose en effet tout entier sur l'idée que c'est la différence des circuits neuronaux impliqués qui est à la base des différences de sensation. A propos des expériences d'Adrian sur l'enregistrement des signaux véhiculés par le nerf optique (Adrian 1928), Barlow écrit ainsi: « *it was clear that the character of the sensation (touch, heat, or pain) depended upon the fiber carrying the message, not the nature of the message, since this consisted of trains of similar impulses in all fibers* » (Barlow 1972), notant que cela confirme la théorie de Müller sur l'énergie spécifique des nerfs. Et puisque les fibres nerveuses sont toutes similaires, les différences de sensation doivent donc être expliquées par des différences dans les aires corticales où ces fibres projettent. Mais pourquoi certaines aires produisent une sensation visuelle et d'autres une sensation auditive ?

Une attitude possible est d'opter pour un réductionnisme extrême : les différentes sensations *sont* les différents états du cortex et il n'y a rien à chercher au delà. Il semble pourtant difficile de nier sans plus d'arguments l'apparente différence de catégorie existant entre l'activité neuronale et le contenu phénoménal de notre conscience, et prétendre ainsi qu'il n'y a rien à expliquer. Une deuxième attitude, adoptée par un grand

nombre de neurobiologistes contemporains (on peut voir (Chalmers 1998) pour le détail des propositions envisagées), est que la différence de sensation est la *conséquence* de l'activation de neurones qui ne sont pas connectés de la même manière - architecture des connections et type des connections, qui n'exhibent pas les mêmes motifs d'activation et d'oscillation. On se retrouve alors face à ce que les philosophes nomment la brèche explicative : la différence de catégorie entre phénomènes physiques et qualité des percepts n'est pas niée, mais pourtant un lien causal d'une énigmatique nature est postulée entre les deux.

Ces deux attitudes, qui caractérisent ce que nous nommerons l'explication passive de la sensation, sont la suite naturelle de l'idée que la sensation dépend des inputs sensoriels, et non d'une loi sensorimotrice. En effet, comme les données sensorielles encodées en suites de potentiels d'action ont visiblement perdu la trace de leur origine sensorielle, il semble impossible d'imaginer autre chose que le scénario précédemment exposé : via son organisation physique, le réseau neuronal oriente ces données vers le décodeur adapté au capteur qui a émis l'information, et les sensations sont *générées* par le fonctionnement de ces décodeurs spécifiques (soit qu'elles sont leur activation elle-même, soit qu'elles en sont le produit). Cette vision des choses, qui encore une fois n'est inévitable que si l'on considère la sensation par rapport à un système sensoriel uniquement récepteur, n'est pourtant pas problématique que sur le plan philosophique.

Elle repose, en premier lieu, sur certaines suppositions physiologiques qui sont discutables. En effet, pour que l'identité, la composition ou le mode de fonctionnement de certaines aires corticales détermine la qualité de la sensation, il faut que ces particularités soient déterminées indépendamment des messages sensoriels, puisque

dans le cas contraire on reconnaît que le contenu de l'information sensorielle joue un rôle dans la perception et l'explication passive est au mieux incomplète. Ensuite, fonder la différence de nature des sensations sur la différence des aires neuronales qui les génèrent suppose une organisation très segmentée du traitement sensoriel, et affirme le caractère nécessaire et suffisant de l'activité de chacune de ces aires pour générer les sensations correspondantes. Enfin, baser la sensation sur certaines parties du système nerveux suppose que le rôle fonctionnel de ces parties est très stables, puisqu'il semble raisonnable d'affirmer que nos sensations - visuelles, auditives, etc - restent de la même nature sur la majeure partie de notre vie.

Or les résultats expérimentaux sur toutes ces questions sont contradictoires, et s'il existe des arguments historiques en faveur de cette conception du système nerveux, il en existe également de nombreux contre. Ainsi, l'indépendance du développement de la structure neuronale est en contradiction avec des expériences réalisées sur des furets, dans lesquelles les informations provenant de leur rétine gauche alimentent leur aire corticale auditive droite, qui montrent que dans ce cas le cortex se développe en fonction de la nature physique des stimuli plutôt que de la prédestination génétique (Sharma, Angelucci, Sur 2000 – Swindale 2000), et que le stimulus visuel est alors perçu comme tel via le cortex normalement auditif (von Melschner, Pallas, Sur 2000). Elle pose également problème vis-à-vis de résultats classiques plus anciens sur le développement du cortex visuel des chatons, qui démontrent que ce développement n'est pas entièrement pré-programmé (Hirsch, Spinelli 1970 – Blakemore, Cooper 1970 – Schlaer 1971 - Blakemore, Mitchell 1973) : il dépend de l'information visuelle à laquelle les chatons ont eu accès. La segmentation du traitement sensoriel est en contradiction avec son caractère multimodal (Shams, Kamitani, Shimojo 2000 -

Meredith, Nemitz, Stein 1987 - Macaluso, Frith, Driver 2000), et avec des expériences indiquant certaines capacités d'intégration visuelles sans le cortex visuel (pas de nécessité) (Braddick, et al. 1994) sans parler de l'absurdité de la perception d'une aire seule, détachée du cerveau (pas de suffisance). La coexistence des hypothèses de stabilité structurelle du système nerveux *et* de sensations produites par des aires bien déterminées est quant à elle en contradiction avec des expériences dites de substitution sensorielle (Bach-y-Rita, et al. 1969 – Epstein, et al. 1986), dont nous rappelons ici le contenu.

Ces expériences consistent à restituer, via une modalité différente, l'information qu'un système sensoriel déficient ne fournit plus au système nerveux central : pour des aveugles, par exemple, en stimulant tactilement le thorax des sujets à partir de l'image capturée par une caméra fixée sur leur tête. Ces expériences ont montré que rapidement, le couplage sensorimoteur est réinterprété de manière productive, avec la modalité d'accès (tactile) qui devient transparente pour laisser place à une perception dans la modalité du stimulus physique (visuel), dont les percepts ne sont plus proximaux mais projetés à l'extérieur du corps comme dans le cas de la vision. L'adaptation est particulièrement rapide dans le cas de la restitution, par influx électriques sur la langue, des informations du système vestibulaire dont les personnes atteintes d'oscillopsie ne dispose plus (Bach-y-Rita 2002).

La sensation visuelle semble ainsi pouvoir émerger d'une stimulation tactile (Bach-y-Rita, et al. 1969), auditive (Meijer 1992), ou électrique (Bach-y-Rita, et al. 1998), au même titre que de la stimulation rétinienne naturelle, à partir du moment où le sujet est confronté à un mode d'interaction avec son environnement, une loi sensorimotrice, structurellement "similaire" à celle du système visuel naturel. Or la rapidité d'adaptation

des sujets, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle émerge ce qui semble être une sensation, rend peu plausible la redirection ad hoc des inputs sensoriels provenant de la région de peau stimulée vers l'entrée du cortex visuel, ainsi que la redirection des commandes motrices destinées à commander l'orientation des yeux vers le système musculaire contrôlant l'orientation de la tête à laquelle est fixée la caméra. Cela serait pourtant nécessaire s'il fallait réactiver les mêmes parties données du système nerveux.

L'explication passive est, ensuite, restreinte à certaines formes particulière de perception seulement. Par exemple, elle ne peut pas donner de sens à certaines sensations dont le caractère exploratoire est inévitable. La sensation donnée par l'élasticité d'un matériau, par exemple, n'a de sens que dans un cadre exploratoire où l'action motrice, la force exercée sur l'objet, intervient : il est vain de chercher l'activation du système tactile qui produira cette sensation. A l'activation de modules purement sensoriels, on se voit donc contraint d'ajouter, pour conserver le paradigme passif, l'activation par exemple de modules sensorimoteurs haptiques. Plus généralement, la perception tactile n'a de sens que via l'interprétation globale d'un ensemble de données collectées activement, du fait de la relative pauvreté des informations sensorielles passives instantanées. Et la vision elle-même, responsable entre tous les sens d'avoir engendrée l'idée d'une perception uniquement réceptive, est avant tout active : la stimulation passive de la rétine - i.e. l'image rétinienne - ne détermine pas la perception visuelle indépendamment de l'exploration du stimulus. Cela apparaît clairement dans les études sur la cécité au changement (O'Regan, Rensink, Clark 1999), sur le traitement non parallèle de la totalité du champ visuel (Haines 1991) et sur l'interprétation différente d'un même stimulus selon qu'on est engagé dans un mouvement ou que l'on est passif (Boxtel,

Wexler, Droulez 2003). Enfin, il semble difficile de définir la perception indépendamment de la notion d'attention : on ne perçoit (dans le sens d'une perception consciente) que ce sur quoi notre attention est concentrée. Ceci s'accommode mal avec la perception passive, qui est dans le principe une perception automatique, mécanique, inévitable.

Enfin, comprendre en détail les mécanismes neuronaux impliqués dans la stimulation passive ne signifierait pas avoir compris la perception : il faudrait également comprendre les percepts non seulement d'un point de vue « objectif », mais plus essentiellement en des termes qui aient un sens pour le système nerveux central, c'est-à-dire en termes sensorimoteurs. Il faudrait envisager de baser la perception sur la reconnaissance de propriétés de la loi sensorimotrice plutôt que sur un code sensoriel implicite. Trouver une manière d'exprimer la différence intrinsèque qui existe entre une relation sensorimotrice basée sur un stimulus visuel et une relation basée sur un stimulus auditif, fournirait un cadre permettant d'espérer pouvoir expliquer pourquoi la première induit un certain développement cortical et la seconde un autre, pourquoi la première induit une certaine sensation et la seconde une autre. Dans ce cadre, l'étude du fonctionnement du système sensoriel, et des aires corticales primaires, constitue la description du code sensoriel. Mais il y a loin de code au sens du message, du dictionnaire au langage.

II. Esquisse de la formalisation mathématique

Nous posons, comme description de notre problématique, le système suivant : un ensemble d'inputs sensoriels, un ensemble d'outputs moteurs, un ensemble de configuration de l'environnement, une fonction qui attribue un input sensoriel à chaque couple (output moteur, configuration de l'environnement). Cette formulation est à la fois

très simple, naïve, est d'une certaine manière la plus générale qu'on puisse imaginer : si l'on n'utilisait aucune hypothèse supplémentaire sur la nature des inputs sensoriels, ou celles des outputs moteurs, on pourrait en particulier très bien considérer qu'il s'agit de suites d'états indexés par le temps. En d'autres termes, on pourrait entre autre considérer des lois sensorimotrices mettant en relation des espaces fonctionnels (les commandes motrices étant alors des trajectoires temporelles dans l'espace des commandes instantanées, et de même pour les inputs sensoriels) non triviaux, c'est-à-dire de dimension infinie. Mais ce cas pêche en fait par excès de généralité, ne semblant pas donner suffisamment d'appuis pour déduire quoi que ce soit, et il semble naturel de se rajouter, au moins dans un premier temps, quelques hypothèses plus radicales dont on pourra suivre les conséquences. Dans le cas le plus simple, présenté dans la suite, on supposera ainsi que les outputs moteurs, les inputs sensoriels et les états de l'environnement, sont caractérisables de manière régulière par un nombre fini de paramètres réels et que la loi sensorimotrice est alors une application différentiable entre trois variétés. Bien qu'on puisse imaginer que certains des résultats obtenus dans ce cas donnent des indications intéressantes sur ce qui peut se passer dans le cas général, il est bien clair que les démonstrations données ne sont valides que dans ce cas fini et que cela représente une simplification structurelle, essentiellement vis-à-vis des hypothèses de régularité et de non ambiguïté de la loi sensorimotrice. Cependant il faut noter que, même pour le cas dynamique, la physique du système s'écrit dans l'immense majorité (la totalité ?) des cas comme une relation instantanée entre certaines grandeurs et un nombre fini de leurs dérivées, ce qui donne espoir que les idées exposées ici puissent être en partie transposées directement.

Concrètement : soient S les inputs sensoriels et M les outputs moteurs (ce sont les seules choses auxquelles l'algorithme a accès), P les configurations du "corps" contrôlé par l'algorithme et E les configurations de l'environnement. Nous supposons que le corps est contrôlé, via une certaine fonction f , par l'output moteur M (dans un cadre neurobiologique, on pourrait par exemple imaginer qu'il s'agit d'un vecteur de R^m dont la $i^{\text{ème}}$ coordonnée serait l'activité du $i^{\text{ème}}$ neurone moteur, ou tout autre grandeur(s) caractéristique(s) de son état) :

Nous supposons également que les inputs sensoriels S (dans un cadre neurobiologique, par exemple un vecteur de R^s décrivant les activités des neurones sensoriels), sont déterminées par une certaine fonction g de la configuration du corps et de la configuration de l'environnement :

Nous notons et appelons cette fonction qui relie les inputs sensoriels aux outputs moteurs et à la configuration de l'environnement "*loi sensorimotrice fonctionnelle*". Nous formulons par ailleurs une hypothèse de régularité sur les ensembles S, M, P, E , ensembles de tous les S, M, P, E : M, E et S sont (au moins dans certains voisinages) des variétés et que f est sur ces voisinages une application infiniment différentiable vis à vis de la structure de ces variétés.

Partant de la loi sensorimotrice, il faut trouver une structure à lui associer, dont les propriétés puissent traduire ce que l'on entendait vaguement par propriétés de la loi

sensorimotrice. L'une des structures les plus élémentaires (à définir) pour laquelle on dispose de résultats très riches est la structure de groupe. Et il y a effectivement un groupe que l'on peut naturellement associer à la fonction sensorimotrice, c'est le groupe constitué par les transformations univoques de l'ensemble des couples (output moteur, configuration de l'environnement) qui laissent la loi sensorimotrice invariante. Il est assez simple de montrer que ce groupe est strictement indépendant du code sensoriel, que sa structure est conservée par changement de code moteur, et qu'en fait il est assez riche pour identifier la loi sensorimotrice, au code sensorimoteur près, ce qui implique que tout invariant peut être dérivé de ce groupe. En d'autres termes, à un isomorphisme près, les propriétés de la loi sensorimotrice fonctionnelle indépendantes du code sensorimoteur sont précisément les propriétés de ce groupe.

Notons $Sym(X)$ l'ensemble des applications inversibles de l'ensemble X dans lui-même, et considérons le groupe suivant :

Proposition : *La structure de groupe de est invariante par changement de code sensorimoteur, et toute grandeur extraite de qui est invariante par changement de code peut s'exprimer comme une fonction de cette structure. En ce sens, elle retient tout ce qui est indépendant du code.*

Il s'agit d'un résultat intéressant, mais on se demande ce qu'il peut nous apporter : premièrement, est un groupe a priori très complexe, deuxièmement ses éléments sont les transformations d'un espace $M \times E$ dont nous n'avons pas accès au second facteur, et troisièmement ces transformations sont précisément invisibles par définition

puisque'elles laissent la loi sensorimotrice invariante !

Nous n'avons pas la place ici de développer l'approche mathématique, et nous allons donc tenter d'en donner l'intuition et la ligne directrice par l'exemple suivant. Imaginons que les inputs sensoriels de notre algorithme soient constitués par, mettons, deux images filtrées de manière à ne faire apparaître que certains objets, et que ses outputs moteurs lui permette de bouger les deux caméras qui lui procurent ces images. Si ce contrôle est fonctionnel (au sens où la position instantanée des caméras est *fonction* des ordres moteurs instantanés), le résultat précédent nous indique que la *seule* chose qui ne dépende pas du codage dans cette loi sensorimotrice, c'est le groupe des transformations des ordres moteurs et de la configuration des objets laissant invariant la loi sensorimotrice. Or l'action de ce groupe sur une certaine configuration (M,E) peut être vu comme une modification active de la configuration (passer de (M,E) à $g(M,E)$) qui laisse invariants les inputs sensoriels correspondants, et globalement les éléments de peuvent donc être vus comme des transformations actives de $M \times E$. Dans le cas simplifié où les outputs moteurs sont en relation univoque avec la position des caméras, on peut identifier ces transformations à des transformations de $P \times E$, et nous sommes naturellement intéressé par les suites de ces transformations qui induisent des modifications continues des couples (P,E) : les mouvements. Si les champs visuels des caméras se recoupent, alors du fait de la stéréoscopie il n'y a pas de mouvement possible des objets seuls ou des caméras seules qui laisse les deux images totalement invariante, et les mouvements précédents sont alors *les mouvements rigides* du système {caméras, objets}. La propriété de connexité sous-jacente à la définition que nous avons donné des mouvements assure la continuité du groupe dont ils sont l'action,

au sens où il n'existe pas d'éléments "isolés" : autour de chacun, il en existe d'autres arbitrairement proches. Si cette structure est bien régulière, les éléments peuvent être indexés de manière différentiable par des paramètres réels, et dans le cas des mouvements rigides on sait bien que c'est le cas et qu'il suffit par ailleurs d'un nombre fini de paramètres. Enfin, ces éléments agissent indépendamment sur les caméras et sur les objets : pour un mouvement rigide g agissant sur le système {caméras, objets}, la configuration de l'environnement n'influence pas la position finale des caméras, et réciproquement.

En fait, de cet exemple il est possible de montrer que seules trois conditions abstraites, différentiabilité, connexité et action diagonale sur $M \times E$, sont suffisantes pour élaborer un algorithme capable d'extraire tout seul et avec une grande généralité, i.e. que ce soit le groupe euclidien ou non, la structure du sous-groupe de des transformations de l'environnement associées aux mouvements du système {corps, environnement} qui laissent les inputs sensoriels invariants. Il est donc possible d'accéder, en se basant uniquement sur l'expérimentation de la loi sensorimotrice, au sous-groupe de constitué par les transformations précédentes qui agissent indépendamment sur les configurations du corps et de l'environnement, et dont l'action sur une configuration particulière est toujours accessible par un mouvement. L'un des éléments techniques qui rend cela possible est que ce sous-groupe est un groupe de Lie, pour l'étude desquels on dispose d'outils classiques puissants. Les groupes de Lie sont en effet d'une certaine manière linéarisables, au sens où il existe une manière canonique de leur associer un espace vectoriel sur lequel les propriétés de la composition (plus précisément de la commutation) dans le groupe sont traduites par une application bilinéaire

antisymétrique, le *crochet de Lie* (voir, par exemple, Masson 2001); le très général problème de l'étude des propriétés des mouvements se transforme ainsi en un problème d'algèbre linéaire.

Les figures 1,2 et 3 présentent les résultats obtenus par notre algorithme : confronté à une loi sensorimotrice inconnue, l'algorithme va identifier la structure de groupe des transformations du système {corps, environnement} qui laissent ses inputs invariants et en déduire la géométrie de l'espace dans lequel son corps est immergé.

Partant d'une situation dans laquelle il ne sait que donner des ordres moteurs dont les conséquences sur la configuration du corps auquel il est relié lui sont inconnus (Figure 1), l'algorithme va observer les inputs sensoriels résultant du mouvement de l'environnement, puis du mouvement de son propre corps. Réalisant que certains des inputs sensoriels obtenus dans ces deux situations distinctes sont identiques, il isole les ordres moteurs produisant ces inputs sensoriels (Figure 2), ce qui lui permet d'identifier un nombre fini de générateurs du groupe des invariants. Il lui est alors possible d'estimer le crochet de Lie qui traduit les propriétés de commutations des éléments du groupe, dont la décomposition lui permet de distinguer entre générateurs des translations et générateurs des rotations pures, ainsi que la normalisation de tous ces générateurs à une unique unité de mesure (Figure 3). La seule étude de la loi sensorimotrice qu'il expérimente lui donne donc, au moins implicitement, les moyens de déterminer les caractéristiques géométriques l'espace dans lequel son corps se trouve. Le détail du cadre mathématique et des simulations peut être trouvé dans Philipona, O'Regan, Nadal 2003a et Philipona, et al. 2003b.

Figure 1. L'organisme virtuel utilisé pour les simulations. Des commandes motrices quelconques produisent des modifications complexes et arbitraires du corps, impliquant des mouvements de la tête, des changements dans les directions de fixation des yeux, des changements d'ouverture des paupières et du diaphragme.

Figure 2. Les effets des commandes motrices correspondant à une base génératrice extraite par l'algorithme. Elles révèlent le contrôle de la tête d'une manière rigide. Sans le crochet de Lie pour traduire la commutativité, ces mouvements impliquent une composition arbitraire entre translations et rotations, et l'incommensurabilité de ces différentes transformations.

Figure 3. Les effets des commandes motrices extraites après décomposition du crochet de Lie : base orthogonale de translations (images supérieures), base d'un sous-groupe de rotations pures (images inférieures). Outre la distinction translations/rotations, le crochet de Lie permet de normaliser l'amplitude de toutes les commandes vis à vis des transformations géométriques de la tête.

III. Conclusion

La naïveté de notre modèle quant à son réalisme physique donne cependant l'espoir d'une formulation précise de la problématique de la perception dans un cadre sensorimoteur, qui permette de répondre à la question centrale soulevée en introduction : qu'existe-t-il dans la loi sensorimotrice qui permette de placer la nature physique du stimulus au cœur de la perception, plutôt que se baser sur l'identité des aires neuronales traitant l'information ? qu'existe-t-il, précisément, dans une loi sensorimotrice au code arbitraire, qui permette la réorganisation du cortex auditif en cortex visuel, ou la perception visuelle à partir des capteurs d'une autre modalité sensorielle ?

Comme premier élément de réponse, nous avons montré dans le cadre exposé comment il était possible, à partir de l'expérimentation d'une loi sensorimotrice impliquant des codes sensoriels et moteurs inconnus, d'extraire un ensemble de propriétés de cette loi qui sont indépendantes de ces codes et reflètent donc des propriétés objectives ou externes, dans le sens où les organismes ayant des inputs sensoriels aussi informatifs

les uns que les autres mais dans des codes différents vont aboutir aux mêmes propriétés. Comme démonstration pratique, nous avons présenté les résultats d'une simulation dans laquelle un algorithme détermine, à partir de l'expérimentation d'une loi sensorimotrice de type visuel, le groupe des symétries de l'espace dans lequel est immergé son système sensoriel et les objets constitutifs de son environnement. Ceci lui permet alors d'identifier une différence intrinsèque entre (dans le cas d'un espace euclidien) les notions de translation et de rotation.

Le résultat est donc une perception à la fois incarnée, puisqu'elle dépend de l'expérience sensorimotrice et s'exprime dans le code sensorimoteur spécifique de l'organisme, mais basée sur des propriétés de la loi sensorimotrice qui ne dépendent pas de ce code. Ceci est à mettre en parallèle avec les expériences de substitution sensorielle, où les sujets sont confrontés à une relation entre des stimuli tactiles et des actions motrices, artificiellement construite à partir de la loi sensorimotrice reliant habituellement les stimuli visuels et les actions motrices des yeux et de la tête. Les codes sont inconnus, mais certaines propriétés de la liaison semblent permettre au cerveau de réinterpréter la stimulation tactile pour l'extérioriser (c'est-à-dire la projeter dans un cadre spatial dépassant les frontières du corps) et retrouver ainsi une perception plus proche du visuel que du toucher: le déplacement en ligne droite d'un objet a une traduction sensorielle précise dans cette expérience, mais les propriétés de ce déplacement sont indépendantes du code et reflètent les propriétés de l'espace.

Le travail présenté soulève de nombreuses questions: en quoi la compréhension de l'espace, en tant que structure particulière de transformation des inputs sensoriels lors du mouvement, permet-elle de fonder des notions perceptives plus élaborées, telles que

la notion d'objet ? Jusqu'où peut-on aller sans aucune information sur le code sensoriel ? La luminance est accessible par la même approche, mais qu'en est-il des couleurs : existe-t-il un moyen structurel d'identifier le bleu, le rouge, etc ? Existe-t-il une méthode pour comprendre les sous-groupes de qui n'agissent pas de manière diagonale ? Comment faut-il interpréter la différence fondamentale qui résulte dans cette approche entre mouvements contrôlés et mouvements réflexes ? La formulation dynamique fait-elle intervenir de nouveaux invariants ou est-ce juste une complication du contrôle moteur ?

Principalement, et en rapport avec cette dernière question, on peut s'interroger sur la notion de symétrie qui sous-tend toute cette approche. Car si, au moins pour la vision et l'audition, elle existe semble exister physiquement, c'est-à-dire si l'on est véritablement capable de faire bouger *tout* l'environnement, il est clair que cette dernière situation n'est jamais expérimentée par aucun organisme (d'où la nécessité de s'accorder un traitement des inputs visuels qui éliminait le contexte visuel ou d'imaginer une expérience réalisée dans une très grande pièce éclairée uniformément) : les objets bougent, les sources auditives bougent, mais il existe toujours une scène qui ne bouge pas (beaucoup plus gênante par les réflexions induites que par le fond visuel qu'elle représente), brisant cette symétrie en fixant un repère inévitable. Pourtant *elle est là en permanence*, d'une certaine manière (au moins tactile), et montrer qu'on peut la trouver lorsque l'on n'expérimente qu'une symétrie partielle serait un grand pas pour le réalisme et la validation de la théorie sensorimotrice, et sans doute pour la compréhension de la perception.

IV. Références

Adrian, Edgar. 1928. *At the Basis of Sensation*. Londres, Christopher.

Bach-y Rita, Paul. 2002. *Late post-acute neurologic rehabilitation: neuroscience, engineering and*

- clinical programs*. Discours pour le prix Coulter.
- Bach-y Rita, Paul et al. 1969. *Vision substitution by tactile image projection*. Nature, 221:963-964
- Bach-y Rita, Paul et al. 1998. *Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue*. Journal of Rehabilitation Research Development, 35:427-430.
- Barlow, Horace. 1972. *Single units and sensation: A neuron doctrine for perceptual psychology ?* Perception, 1(1):371-394.
- Berthoz, Alain. 1997. *Le sens du mouvement*. Paris, Odile Jacob.
- Blakemore, Colin et Nigel Cooper. 1970. *Development of the brain depends on the visual environment*. Nature, 228:471-478.
- Blakemore, Collin et Donald Mitchell. 1973. *Environmental modification of the visual cortex and the neural basis of learning and memory*. Nature, 24:467-468.
- Braddick, Oliver et al. 1994. *Possible blindsight in infants lacking one cerebral hemisphere*. Nature, 360:461-463.
- Brooks, Rodney et Lynn Stein. 1994. *Building brains for bodies*. Autonomous Robots, 1(1):7-25.
- Chalmers, David. 1998. *On the search for the neural correlate of consciousness*. Toward a Science of Consciousness II.
- Epstein, William et al. 1986. *Is anything out there ? : A study of distal attribution in response to vibrotactile stimulation*. Perception, 15:275-284.
- Haines, Richard. 1991. *A breakdown in simultaneous information processing*. Presbyopia research: from molecular biology to visual adaptation. 12:171-175
- Hebb, Donald Olding. 1947. *The organization of behavior: A neuropsychological approach*. Wiley.
- Hirsch, Helmut et D. Spinelli. 1970. *Visual experience modifies distribution of horizontally and vertically oriented receptive fields in cats*. Science, 168:869-871.
- Jeannerod, Marc. 2002. *Le cerveau Intime*. Paris, Odile Jacob.
- Macaluso, Emiliano , C. Frith, et Jon Driver. 2000. *Modulation of human visual cortex by crossmodal spatial attention*. Science, 289:1206-1208.
- Marr, David. 1982. *Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information*. San Francisco, W. H. Freeman.
- Masson, Thierry. 2001. *Géométrie différentielle, groupes et algèbres de Lie, fibrés et connexions*. Orsay, LPT.
- Meijer, Peter. 1992. *An experimental system for auditory image representations*. IEEE Transactions on

Biomedical Engineering, 39(2):112-121

Meredith, Alex, J. Nemitz, et Barry Stein. 1987. *Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. temporal factors*. Journal of Neuroscience, 10:3215-3229.

Millner, David et Melvyn Goodale. 1996. *The Visual Brain in Action*. Oxford University Press.

Olver, Peter, Guillermo Sapiro, et Allen Tannenbaum. 1993. *Differential invariant signatures and flows in computer vision: a symmetry group approach*. Technical report, University of Minnesota et MIT.

O'Regan, Kevin et Alva Noë. 2001. *A sensorimotor account of vision and visual consciousness*. Behavioral and Brain Sciences, 24(5): 939-1011.

O'Regan, Kevin, Ronald Rensink, et James Clark. 1999. *Blindness to scene changes caused by "mudsplashes"*. Nature, 34:398.

Paillard, Jacques. 1971. Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale. *Cahiers de Psychologie* 14:261-316.

Paillard, Jacques. 1991. Motor and representational framing of space. In: *Brain and space*, ed. J. Paillard. Oxford University Press.

Philipona, David, Kevin O'Regan et Jean-Pierre Nadal. 2003. *Is there something out there ? Inferring space from sensorimotor dependencies*. Neural Computation, 15(9):2029-2049.

Philipona, David et al. 2004. *Perception of the structure of the physical world using unknown sensors and effectors*. Advances in Neural Information Processing Systems, 17, 2004.

Scheiner, Christoph. 1619. *Oculus, hoc est: fundamentum opticum*.

Shlaer, Robert. 1971. *Shift in binocular disparity causes compensatory change in the cortical structure of kittens*. Science, 173:638-641.

Shams, Ladan, Yukiyasu Kamitani, et Shinsuke Shimojo. 2000. *What you see is what you hear*. Nature, 408:788.

Sharma, Jitendra, Alessandra Angelucci et Mriganka Sur. 2000. *Induction of visual orientation modules in auditory cortex*. Nature, 404:841-847.

Swindale, Nicholas. 2000. *Lightning is always seen, thunder always heard*. Current Biology, 10:569-571.

van Boxtel, Jeroen, Mark Wexler et Jacques Droulez. 2003. *Perception of plane orientation from self-generated and passively observed optic flow*. Journal of Vision, 3(5):318-332.

von Melschner, Laurie, Sarah Pallas et Mriganka Sur. 2000. *Visual behaviour mediated by retinal*

projections directed to the auditory pathway. Nature, 404:871-876.