

Les déterminants moteurs De l'intégration multisensorielle

Jacques PAILLARD*

*CNRS-NBM, Marseille, France

INTRODUCTION

L'impact des déficiences sensorielles sur les activités humaines est multiforme, En mieux comprendre les mécanismes est important pour une meilleure identification des handicaps qui en résultent et pour la recherche des moyens d'y remédier, Ainsi, les observations cliniques et expérimentales semblent montrer que la suppression complète d'un canal sensoriel est ordinairement plus facilement compensée par les sensibilités restantes que les handicaps pouvant résulter de certaines discordances qui affectent la coopération fonctionnelle de modalités sensorielles différentes, De fait, et dans toutes nos activités, des plus simples aux plus complexes, les coopérations intermodalitaires sont de règle. Considérons par exemple un geste banal de saisie d'un objet usuel comme un verre, un stylo, un livre reposant sur la table par exemple. Ce geste suppose, sans aucun doute, l'intervention d'une multitude de signaux d'origine plurimodalitaire : ceux nécessaires à l'identification visuelle de l'objet à saisir, à sa localisation, à son orientation, à sa forme, à sa taille, à l'évaluation anticipée de son poids, mais aussi les signaux d'origine proprioceptive diverse (articulaire, musculaire, tendineuse, vestibulaire) qui informent les systèmes de commande motrice sur la position actuelle de notre corps, sur sa posture, sur la localisation initiale de la main, sur l'orientation du regard et la position des yeux dans la tête, etc. On peut encore évoquer les informations tactiles qui vont intervenir d'abord pour conformer la prise manuelle aux caractéristiques de l'objet, puis pour sécuriser la saisie par ajustement de la pression des doigts... Que dire enfin de la pluralité des informations contextuelles qui contribuent au cadrage spatial et temporel de la tâche et à ses motivations ? Mais arrêtons ici l'inventaire qui, en tout état de cause, ne pourrait raisonnablement prétendre à l'exhaustivité. Plus important, sans doute, est de s'interroger sur l'hétérogénéité de ces signaux d'origine multiple, sur l'incommensurabilité des paramètres qu'ils codent, sur la

dispersion temporelle de leur temps d'acheminement, sur leur ambiguïté, sur leur redondance, sur leur éventuelle incompatibilité, sur leur bruitage à des degrés divers. Ce qui amène inévitablement à se poser la question de savoir comment les messages nerveux issus d'un flot continu de signaux aussi disparates quant à leurs origines et leurs significations sont-ils traités, sélectionnés, additionnés, combinés, pour répondre aux impératifs de cohérence d'un univers perceptif qui nous apparaît unifié et dans lequel nous dirigeons nos activités avec une surprenante efficacité ?

Un problème d'une telle ampleur déborde certainement tout à la fois le cadre de cette courte présentation mais aussi, pour une large part, les possibilités actuelles de réponse de la neurobiologie. On peut à ce sujet relire avec profit le livre de Sherrington (1906) sur les fonctions intégratives du système nerveux et le chapitre que nous avons consacré à ses fonctions d'organisation dans le dernier *Traité de Psychologie* dirigé par Jean Piaget (Paillard, 1987).

Les ambitions de cette présentation resteront donc modestes et se borneront à l'étude des problèmes soulevés par le rôle organisateur de l'action dans les processus d'intégration intermodalitaire.

Poser le problème du rôle de l'action dans l'ordonnance du monde sensible n'est certes pas une innovation. Ce thème a toujours tenu une place importante dans la réflexion épistémique et nourri plusieurs siècles de débats philosophiques. L'historique de ces débats ne sera pas envisagé ici (mais on peut se reporter pour son actualisation récente à Scheerer, 1984 ; Viviani & Stucchi, 1990 ; Proust, 1997a ; Berthoz, 1997). Cette thématique sera abordée à la lumière des progrès récents de la neurobiologie et de l'éclairage nouveau qu'ils peuvent apporter pour notre intelligibilité des processus d'auto-organisation des activités du système nerveux.

Quatre problèmes retiendront principalement notre attention : celui des opérations d'*extraction d'invariance*, celui de la *cohérence du monde perçu*, celui des opérations de *calibration* et celui des expériences de *substitution sensorielle* en mettant principalement l'accent sur le rôle que les activités motrices autogénérées sont susceptibles d'y jouer.

1. L'EXTRACTION D'INVARIANCE

La conception d'un système nerveux comme *machine à réagir* aux stimulations de son environnement est longtemps restée dominante avec l'incontestable succès des théories réflexologiques qui en dérivèrent.

Son fonctionnement comme *machine à prévoir* est plus récente et semble s'imposer dans les recherches contemporaines (voir Paillard, 1990 ; Berthoz, 1997).

Il est banal de rappeler que la dynamique des interactions entre le corps mobile et son environnement ne fluctue pas de manière purement aléatoire. Elle révèle la présence de redondances, de périodicités, de stationnarités, autrement dit de caractéristiques invariantes détectables et prévisibles. Or, l'une des propriétés du système nerveux, aujourd'hui reconnue comme basale, concerne sa capacité à extraire du flux continu des stimulations changeantes qui bombardent ses capteurs sensoriels, ce qui, dans ce flux, reste stable, régulier ou covariant, au cours du temps. Inscrites dans ses mémoires génétiques et / ou expérientielles, ce sont ces invariants spatio-temporels qui permettent à un système biologique de se construire une représentation interne de l'univers sensoriel prévisible où il devra diriger efficacement ses activités pour survivre.

La véritable nature de ces processus d'extraction d'invariance est longtemps restée mystérieuse. Les progrès de nos connaissances des mécanismes synaptiques et les nouvelles conceptions modulaires de l'organisation cérébrale nous permettent aujourd'hui d'entrevoir ses supports nerveux possibles. La conception d'un traitement des messages nerveux non sériel et linéaire mais parallèle et distribué dans les structures centrales est désormais bien admise. Elle implique, notamment dans les secteurs associatifs du cortex cérébral, la convergence sur les mêmes neurones de signaux d'origine multiple et généralement plurimodulaire. On considère également que les populations de neurones corticaux sont regroupées dans des architectures de colonnes verticales juxtaposées qui, on le sait aujourd'hui, constituent les unités modulaires de l'organisation fonctionnelle du système nerveux. Chaque unité modulaire comprend des structures d'entrées (afférentes), des neurones de sorties (efférentes), et des structures d'association interne. Leur description est aujourd'hui bien avancée (voir la revue récente de Mountcastle, 1997).

Les couches réceptrices de chacune de ces colonnes agissent, par la nature des assortiments synaptiques des neurones qui les composent, comme des filtres sélecteurs. Parmi les milliers de messages afférents que chacun de ces neurones reçoit, seuls ceux qui se présentent dans une certaine configuration spatio-temporelle seront capables de l'activer. Ces caractéristiques de configuration vont définir le rôle fonctionnel spécifique assigné à cette colonne particulière dans la chaîne de traitement central où elle est insérée.

Les mécanismes qui assurent la construction de ces caractéristiques de filtrage commencent à être connus. Ils reposent sur les processus de modulation des

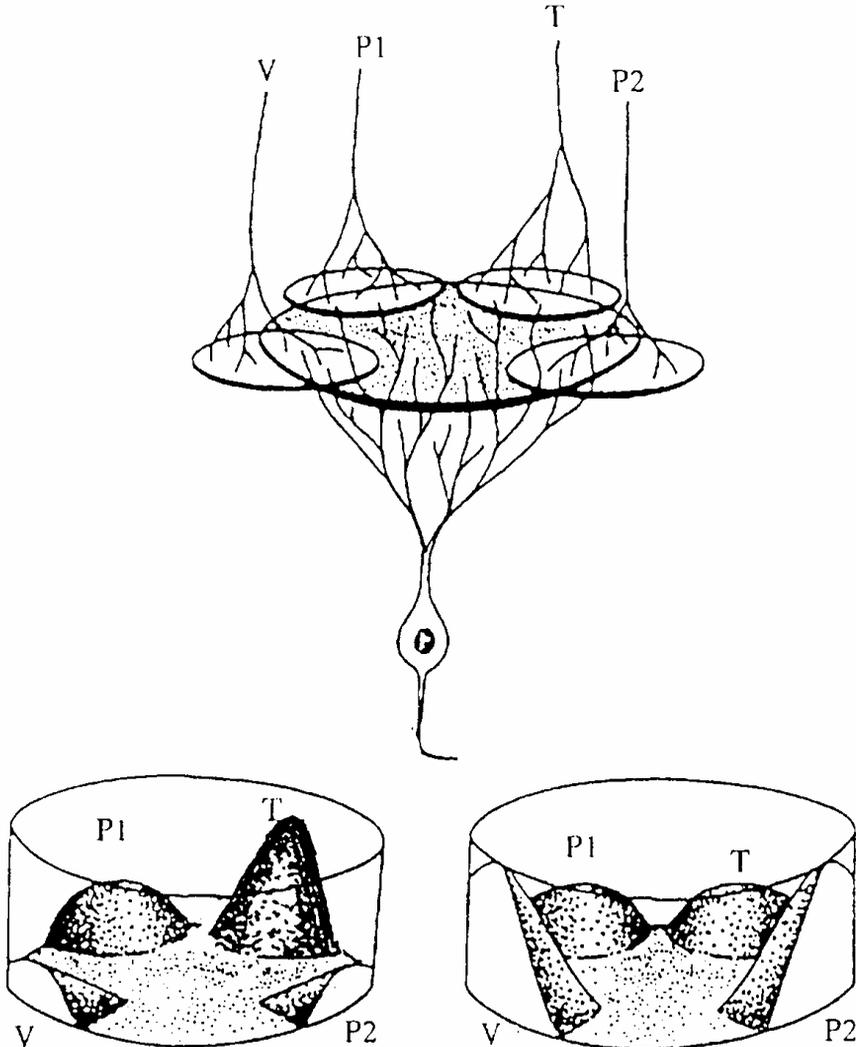
capacités de transmission synaptique. On estime à 10000 en moyenne le nombre de contacts synaptiques que reçoit un neurone dans ces structures. Comme l'ont montré Les techniques de réception des activités unitaires, ces messages proviennent, en général, de plusieurs sources modales.

A l'aide des mêmes techniques de réception intracellulaire, on a pu montrer que les synapses qui se retrouvent fréquemment coactivées à l'intérieur d'une certaine fenêtre temporelle (de l'ordre de 40 ms) traduisent la cooccurrence régulière de certains événements sensoriels d'origine généralement plurimodale. Or les synapses régulièrement et simultanément coactivées voient leur pouvoir de transmission progressivement augmenté, alors qu'il est diminué chez celles qui ne sont pas activées en phase. La fréquence de cooccurrence de cette configuration d'activités présynaptiques tend donc à renforcer la capacité du neurone récepteur de la colonne à répondre sélectivement à cette configuration (voir figure 1).

De ce fait, la colonne considérée est appelée à fonctionner comme un filtre de configuration capable de reconnaître, dans le flot des stimulations mouvantes qui bombardent les capteurs sensoriels, celles qui sont les plus régulièrement associées. Nous avons précisé là ce qui peut être défini comme un processus de détection de covariance et donc d'extraction d'invariance dont les caractéristiques extraites se trouvent matériellement inscrites dans une configuration de synapses sélectivement stabilisée. Un tel mécanisme peut parfaitement rendre compte du fait que la cooccurrence d'informations visuelles, tactiles et proprioceptives associées à un mouvement de manipulation d'un certain objet, par exemple, puisse donner lieu à un enregistrement stabilisé dans la circuiterie neurale et susceptible, ensuite, d'intervenir soit dans la reconnaissance perceptive de cet objet, soit encore dans la conformation des programmes moteurs de saisie manuelle de cet objet (voir Jeannerod *et al.*, 1995).

Sur un plan plus général, la question se pose de savoir si de tels mécanismes peuvent également rendre compte de la sélection et de la mise en mémoire des informations contextuelles qui, au même titre que les informations locales, contribuent à la spécification de nos expériences perceptives ? L'importance de la notion de contexte dans l'intégration de l'expérience perceptive doit être soulignée. Songeons par exemple au rôle que joue la stabilisation de notre environnement visuel comme élément de la cohésion de nos perceptions et, de la même manière, celui de la prise en compte des contextes posturaux comme condition de l'efficacité de nos actions. Mais nous pouvons également évoquer les contextes affectifs qui colorent notre vision du monde, orientent nos intérêts et influencent nos décisions

Figure 1. *Modulation des pouvoirs de transmission synaptique. Illustration schématique de la convergence de quatre fibres d'origine modalaire différente (visuelle V: tactile T, proprioceptive P1 et P2) convergeant sur les membranes du même neurone récepteur. La force de la connexion est représentée sur les graphiques tridimensionnels du bas comme suit : l'efficacité synaptique est représentée sur l'axe vertical et le site de connexion par la représentation de l'arbre dendritique sur une section horizontale. A gauche, la synchronisation des activations synaptiques des divers sites. A droite, la synchronisation répétée des afférences visuelles V et proprioceptives P2 entraîne le renforcement des pouvoirs de transmission des synapses correspondantes alors que les autres connexions (P1, T), non sollicitées en phase, se trouvent affaiblies (modifié d'après Mark, 1974).*



comme les contextes culturels qui influencent nos opinions et modèlent nos conduites socialisées. Ainsi, toutes ces variétés d'influences contextuelles contribuent à construire les références normatives et les systèmes de valeurs qui sélectionnent, ordonnent et canalisent le traitement intégratif des signaux d'origine multiple qui irriguent le système nerveux.

L'intégration contextuelle est aujourd'hui reconnue comme une capacité fondamentale des circuits corticaux. Elle reposerait sur des procédures de codage de nature probabiliste spécifiant non plus la caractéristique de réponse d'un neurone isolé mais les caractéristiques moyennes d'une population de neurones collectivement activés. On s'intéresse de plus en plus aux processus de synchronisation qui permettent la prise en compte simultanée, dans des aires corticales anatomiquement séparées, des codes de population qui traduisent la spécificité des traitements locaux propres à chacune des régions activées. On trouvera dans une revue très récente de Phillips & Singer (1997) les données neurobiologiques les plus récentes concernant l'organisation de ces champs contextuels, leur synchronisation dans les activités électriques corticales et leur rôle dans les processus d'apprentissage et dans la modulation des opérations cognitives.

Le problème du rôle de l'action propre du sujet dans l'extraction des invariants perceptifs, catégoriels et contextuels évoqués ci-dessus reste néanmoins posé. Nous allons revenir plus précisément dans ce qui suit sur le rôle privilégié que semble jouer la motricité du sujet dans la construction d'une cohérence spatiale unificatrice des champs perceptifs pluri-modalitaires, puis dans la réduction de leurs discordances éventuelles par des processus de recalibration, enfin, et à propos des prothèses de substitution sensorielle, sur le rôle des activités exploratoires du sujet dans les opérations de reconnaissance de forme.

2. LA COHÉRENCE DU MONDE SENSIBLE

L'origine du crédit que nous accordons, dans notre expérience sensible, au statut d'objectivité de la réalité physique qui nous entoure a constitué un thème de réflexion récurrent dans l'histoire des idées philosophiques. Cette réalité ne nous est, bien entendu, accessible qu'au travers des informations que collectent nos appareils sensoriels spécialisés. Or, chaque modalité possède, en propre, des sous-systèmes de saisie des qualités élémentaires de l'objet (sa luminosité, sa

couleur, sa taille, sa forme dans la modalité visuelle par exemple). Elle est ainsi à même de fournir de cette réalité une description particulière et spécifique au canal sensoriel utilisé. En effet, la synchronisation temporelle de la décharge des neurones qui répondent sélectivement aux différentes propriétés de l'objet permet d'envisager que les mécanismes d'extraction d'invariance mentionnés ci-dessus puissent, à l'intérieur de la modalité, réaliser l'unité perceptive locale d'un objet visuel par exemple.

On est alors amené à s'interroger sur ce que cette unité **intramodalitaire** doit à la composante exploratoire et motrice de la perception. On rejoint ici Condillac (1754) qui, en suggérant de dissocier le voir et le regarder, introduisit ainsi pour la première fois l'idée d'une distinction entre information passivement reçue et activement saisie. La question des supports nerveux de cette distinction reste apparemment encore largement ouverte et nous nous proposons d'y revenir plus loin à propos des prothèses de substitution sensorielle. Mais revenons tout d'abord au problème de la cohérence perceptive **intermodalitaire**. On doit admettre que l'acquisition d'une intégration **intramodalitaire** assurant, par exemple, la perception unifiée d'un objet visuellement identifiable puisse, pour autant, ne pas suffire à garantir qu'une autre description du même objet dans une modalité différente, par exemple tactile, puisse être congruente de la première. La possibilité de transférer des caractéristiques spatiales extraites par une modalité sensorielle à une autre modalité a, depuis la fameuse question de Molène posée à Locke sur l'aveugle né qui recouvrerait la vue, très tôt constitue la matière d'un débat philosophique encore largement ouvert de nos jours (Proust, 1997b).

On notera que les conceptions piagétienne du développement supposaient explicitement l'existence initiale, chez le jeune enfant, de tableaux perceptifs séparés résultant du fonctionnement de schèmes sensorimoteurs élémentaires attachés à chacune des modalités sensorielles. Il posait clairement le problème de la nécessité d'une coordination de ces schèmes pour construire un espace physique unifié et stable où nous pouvons efficacement diriger nos actions (nous aurons à revenir ultérieurement sur ce point et sur les solutions proposées). Mais, au-delà du problème de la construction d'un espace unifié, comme l'a bien souligné Elisabeth Pacher (1997) dans un travail récent (en revenant ainsi au problème de la permanence de l'objet des théories piagétienne), c'est la question de savoir « comment le sujet percevant peut acquérir une représentation des objets qu'il perçoit comme extérieur à lui, autrement dit d'avoir l'expérience d'une réalité objective indépendante de celle de son corps » qui se trouve essentiellement posée.

Il a été proposé que l'objectivité de cette expérience dériverait principalement d'une fonction d'évaluation de la cohérence du champ perceptif. Encore faut-il pouvoir définir une telle fonction et ses critères d'évaluation. Fondamentalement, une telle opération suppose l'existence d'une capacité du système à détecter les incohérences éventuelles entre l'information locale fournie par des modalités sensorielles différentes. En conséquence, la notion de cohérence perceptive pourrait ici reposer sur le présupposé suivant : s'il existe une réalité physique objective indépendante du sujet percevant, un objet perceptivement identifiable par ce sujet ne peut, à un instant donné, occuper qu'une seule et unique position dans un espace physique unifié et stable. Le problème posé deviendrait alors celui de savoir comment les informations issues des divers canaux sensoriels plurimodaux pourraient être coordonnées et mises en coïncidence, afin qu'une action puisse être efficacement dirigée dans cet espace physique objectif où les objets stables n'occupent, à chaque instant qu'une seule et unique position. Autrement dit, ces objets ne pourraient, en même temps, occuper deux positions différentes dans notre espace d'action. Ils prendraient de ce fait un statut amodal d'existence « objective » propre dans un espace extérieur à celui de notre corps. Comme le dira autrement Joëlle Proust (1997b) ce sont ces « classes d'équivalences qui soudent entre elles les composantes sensorielles élémentaires et constituent la base des constructions objectives indépendantes du sujet ».

Ainsi formulée, cette hypothèse nous donne l'occasion de rappeler un travail ancien que nous avons consacré à l'étude des déterminants moteurs de l'organisation de l'espace (Paillard, 1971) et qui nous paraît apporter un support à cette manière de voir, en proposant, de surcroît, une interprétation possible en termes de mécanismes impliqués. Nous y prenions comme point de départ « le principe d'un traitement des informations spatiales étroitement soumis aux exigences d'une activité motrice qui organise le champ sensoriel des signaux susceptibles de la guider, de l'orienter, de la spécifier ». Nous disposons depuis de données neurophysiologiques abondantes concernant le rôle des structures colliculaires (Stein & Meredith, 1993) dans l'intégration sensorimotrice plurimodale de ce nous avons appelé à l'époque les *espaces de capture* oculaire, manuelle, orale et auditive. Ces dispositifs sensorimoteurs de capture nutritionnelle et informationnelle constituent les sites d'interaction privilégiée où s'organisent, dès les stades initiaux de son développement, les relations d'un organisme et de son environnement. Ils constituent, de fait, de véritables dispositifs d'ancrage de l'organisme sur les réalités de son environnement physique. Ces considérations nous avaient amené à suggérer une distinction fonctionnelle entre

activités de transport orienté de l'organe de saisie vers ses sites d'ancrage et activités palpatoires et assimilatrices de l'objet saisi. Des premières dériverait une spécification de la localité des sites d'appel dans l'espace de capture considéré, alors que les secondes contribueraient à spécifier la forme et les propriétés des objets.

Deux conséquences en découlent, (1) La nécessité de concevoir un processus de coordination des différents espaces sensorimoteurs de capture automatique. L'hypothèse avancée ici est que cette coordination serait, en fait, imposée au fonctionnement de chacun de ces dispositifs pris séparément par la communauté et l'unicité de leurs sites d'ancrage dans l'ordre spatial de l'espace physique où ils s'inscrivent. (2) La reconnaissance d'un rôle spécifique aux activités palpatoires des mêmes organes de capture, dans l'identification de l'ordre spatial intrafigural qui définit la forme des objets et l'invariance de leurs propriétés dans la modalité considérée.

Nous serions donc amené aujourd'hui à suggérer que les classes d'équilocalité, considérées comme fondatrices de l'unité perceptive des objets et de leur statut d'objectivité pourraient simplement résulter de la stabilité physique des sites d'ancrage vers lesquels tous dispositifs de capture d'informations sensorielles se trouvent automatiquement attirés par des mécanismes réflexes innés. Les classiques réactions d'alerte décrites par Pavlov sous le nom de réflexes d'orientation traduisent la présence chez les vertébrés de programmes innés au service de la recherche et de la capture optimale des informations sensorielles par les organes spécialisés qui les collectent. Le transport orienté de ces organes vers leur cible résulte de mécanismes assimilables à ceux d'un servomécanisme réducteur d'écart dont la circuiterie est aujourd'hui bien identifiée. L'orientation automatique de la tête porteuse des yeux, des oreilles, du nez et de l'orifice buccal en direction des sources de stimulation fournit une base motrice commune pour la localisation et la capture de cibles définies dans des modalités sensorielles différentes sur une base proprioceptive. L'organe de préhension manuelle échappe a priori à cette règle, mais nous verrons plus loin comment les caractéristiques des processus de calibration permettent de résoudre le problème. Une fois transportés sur le site, les organes capteurs y sont stabilisés par des mécanismes d'ancrage spécialisés (*grasping* foveal, manuel, labial) auxquels s'ajoutent des mécanismes d'exploration et de palpation des objets captifs en vue de leur identification perceptive.

Ainsi conduite cette analyse nous amenait alors aux conclusions suivantes : « Nous pensons, en fin de compte, que le proprioceptif musculaire pourrait constituer l'élément commun de calibration spatiale des différents champs d'afférences

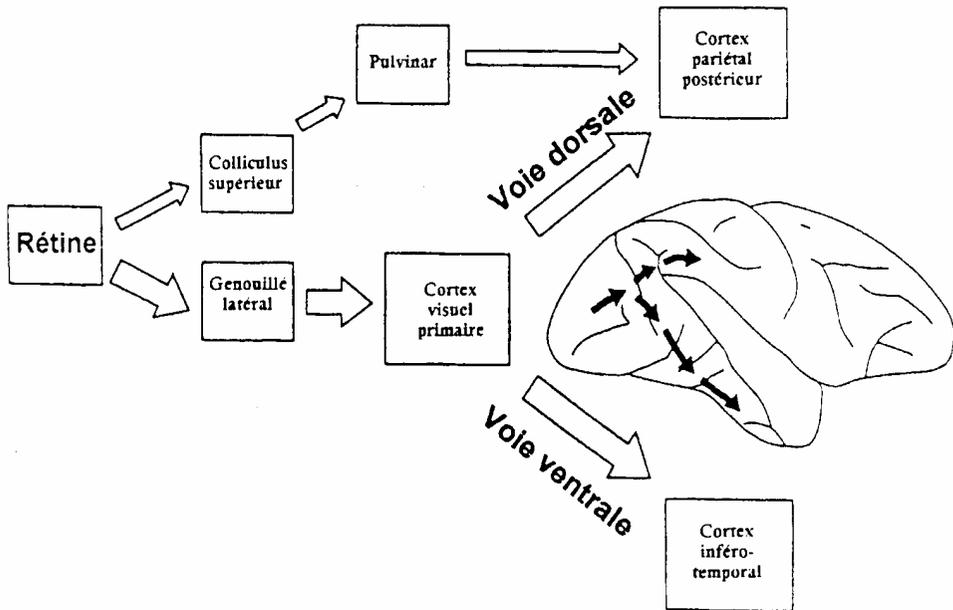
extéroceptives (visuel, auditif et tactile) et le facteur de leur unification. Le rôle des mouvements de la tête (et des informations proprioceptives qui en découlent) pour la coordination des espaces visuels et auditifs paraît fondé. Le rôle de ces mêmes mouvements dans la recalibration de la position des membres au cours des décorrélations de l'espace visuo-moteur peut donner un support à l'hypothèse d'une intégration des espaces tactiles et visuels par le canal du référentiel postural général » (Paillard, 1974, p. 45).

Les considérations précédentes nous conduisaient donc à considérer l'existence de deux espaces perceptivo-moteurs fonctionnellement distincts, à savoir un *espace des lieux* et un *espace des formes*. Les activités de transport du corps et de ses segments mobiles seraient à l'origine de la construction du premier alors que les activités exploratrices et palpatoires des dispositifs de capture contribueraient à celle du second.

L'idée d'une telle distinction rejoignait à l'époque certains travaux initialisés par les recherches de Ingle (1967) sur le poisson et de Schneider (1969) sur le hamster. Ces auteurs établissaient chez ces espèces la justification de l'existence d'un double système visuel assurant respectivement *les fonctions de localisation* des objets dans l'espace extérieur et celles *d'identification* de leurs propriétés catégorielles. Ces deux fonctions reposent, chez le hamster, sur un traitement différencié des informations visuelles, d'une part dans le colliculus s'agissant des réactions orientées du corps dans l'espace et, d'autre part, dans le cortex pour l'identification perceptive des objets. Une telle distinction allait connaître par la suite un développement spectaculaire avec son extension au singe et à l'homme et la reconnaissance chez les primates du rôle des aires associatives pariétales postérieures dans l'organisation de l'espace visuo-moteur où se trouvent localisés les événements et objets visuellement perçus et celui du lobe temporal inférieur où s'élabore par ailleurs leur reconnaissance perceptive catégorielle. La dissociation du « Where ? » et du « What ? » dans l'étude de la perception visuelle (Ungerleider & Mishkin, 1982) a depuis reçu maintes confirmations dans les données expérimentales et cliniques (Jeannerod & Rossetti, 1993).

Mais citons encore à ce propos une expérience personnelle. En écho des phénomènes dits de « blind sight » décrits chez des sujets hémianopsiques (Weiskrantz, 1989) qui se montrent capables de pointer correctement des cibles présentées dans la partie aveugle de leur champ visuel, nous avons nous-mêmes décrit un équivalent du même phénomène dans le domaine tactile (Paillard *et al.*, 1983). Il s'agissait d'une patiente affectée d'une désafférentation centrale de son avant-bras droit, donc insensible aux stimulations tactiles, thermiques ou

Figure 2. Double distribution des voies virtuelles chez les primates dans le cortex pariétal postérieur où, en association avec les informations d'origine colliculaire, elles participent à la localisation des objets perçus dans l'espace des lieux et dans le cortex inféro-temporal où elles contribuent à l'identification des objets d'après leur forme et leurs propriétés intrinsèques. (d'après Goodale & Milner, 1992).



douloureuses portée sur ce membre, sa motricité étant par ailleurs intacte, Or cette patiente se montrait capable, sans le secours de la vision, et à sa grande surprise, de pointer correctement avec sa main gauche l'endroit de son bras droit stimulé tactilement par l'expérimentateur alors qu'elle n'éprouvait aucune sensation identifiable résultant de cette stimulation. Interrogée sur la nature des informations dont elle pouvait disposer pour déclencher et guider son pointage dans de telles conditions, elle se montra très perplexe et embarrassée pour verbaliser le contenu d'une expérience inhabituelle et très étrange et, en fait, inexprimable. Elle devait finalement se résoudre à dire: « Je sais seulement qu'il y a un endroit où vous êtes allé et moi j'y vais aussi... ». Nous avons interprété ces commentaires comme témoignant, chez cette patiente, d'une expérience étrange de localisation

dépourvue d'un contenu identifiable en termes modalitaires. La patiente avait par contre l'impression d'avoir senti sa main automatiquement dirigée vers une cible qu'elle n'avait pas perçue. L'événement, par ailleurs daté et spatialement codé, semblait directement relever d'un traitement automatique à un niveau sensorimoteur où, comme il a été démontré dans le cas du « blind sight », les programmes moteurs de projection du segment pointeur peuvent être mobilisés sans l'intervention d'un contrôle conscient. Une telle observation conforte assurément l'hypothèse philosophique du rôle que pourrait jouer une dimension spatiale commune aux diverses modalités sensorielles dans la cohérence de l'expérience perceptive intermodalaire,

Nous retiendrons donc ici que l'un des principes de base sur lequel repose la nécessaire conformité entre nos représentations perceptives et la réalité physique. Ou nous dirigeons nos activités concerne la localisation, en un seul lieu et au même instant, des objets du monde physique que nous identifions. Construire puis préserver cette cohérence implique donc des opérations de calibration et de recalibration dont il nous faut maintenant examiner la nature.

3. LA CALIBRATION DES ESPACES SENSORIELS

L'opération par laquelle le sujet percevant modifie la réception d'un ou plusieurs types d'informations sensorielles pour atténuer la distorsion de l'information spatiale objective qu'ils transmettent porte le nom de « *calibration* ». Ces opérations sont constamment mises en oeuvre au cours de la croissance d'un organisme dont les dimensions corporelles et le poids changent. Elles ont, en particulier, pour fonction d'opérer l'alignement des diverses cartes rétiniennes, auditive, tactile, afin d'assurer la coexistence locale et la cooccurrence temporelle des informations portées par chacune d'elles.

Pour opérer efficacement, ce processus doit donc préserver à la fois l'équilocalité de ces composantes élémentaires à un moment donné et l'unicité de l'événement objectivement perçu. Il est important de préciser que cette fonction calibrante peut soit s'exercer sur la base des discordances explicitement perçues, consciemment évaluées et corrigées à un niveau purement cognitif, soit aussi opérer au niveau implicite des adaptations sensorimotrices automatiques. L'expérience motrice active qui semble impérativement requise au niveau sensorimoteur serait moins directement impliquée dans les corrections du niveau cognitif. Ce sont essentiellement les premières qui retiendront ici notre attention en ce qu'elles nous

offrent un terrain de prédilection pour l'étude du rôle de l'action. Mentionnons aussi, dès maintenant, que la représentation amodale d'un espace unifié, qui semble exister à un certain niveau d'abstraction cognitive, serait par contre absente au niveau sensorimoteur où un emboîtement hiérarchique d'espaces locaux a pu être mis en évidence (Hay & Brouchon, 1972 ; Paillard, 1991 ; Rossetti, 1997).

L'étude de ces adaptations du niveau sensorimoteur a principalement utilisé les décorrélations expérimentales entre champs sensoriels distincts. Deux approches complémentaires sont à considérer : (1) celle qui révèle l'intervention recalibrante de l'action auto-générée dans la construction ontogénétique des coordinations visuo-motrices et dans les recorrélations consécutives aux distorsions intersensorielles expérimentalement provoquées chez l'adulte (déviation prismatique du champ visuel ou perturbation du champ proprioceptif par vibration des tendons) ; (2) celle qui, en dehors de toute intervention de l'action, montre comment des conflits spatiaux entre signaux visuels et auditifs étudiés dans des situations expérimentales de ventriloquie, par exemple, conduisent à analyser les marges de tolérance permettant aux fonctions de cohérence de maintenir l'unité de l'expérience perceptive au niveau cognitif. Nous n'envisagerons ici que la première de ces approches, renvoyant pour la seconde aux travaux de l'école de Bruxelles (Radeau & Bertelson, 1977 ; Radeau, 1997).

Nous passerons très rapidement sur les expériences princeps, maintenant classiques, de Held & Hein (1963) sur les chatons (voir revue dans Paillard, 1980), et qui ont ouvert la voie à la prise en considération de l'expérience active dans la construction des interactions sensorimotrices. Nous insisterons par contre sur l'extension donnée par Held à ces premières observations dans le domaine de la recalibration des coordinations visuo-motrices après déviation prismatique du champ visuel chez l'homme (Held & Hein, 1958). Le rôle recalibrant de la vision du mouvement actif y fut effectivement montré dans des conditions où les mouvements du bras étaient observés sur un fond visuel homogène durant la période dite d'exposition. Ces données furent plus tard contestées par Howard (1971) montrant qu'il suffisait de donner au sujet la vision de son erreur terminale (procédure dite du « terminal feed-back ») pour obtenir une recalibration significative et ceci indépendamment du caractère passif ou actif des mouvements de pointage.

Les travaux de notre groupe (Paillard *et al.*, 1981) ont contribué à expliquer cette discordance entre les travaux de ces deux équipes. Ils ont montré que la recalibration de l'espace visuo-moteur, obtenue après déplacement prismatique du

champ visuel par la simple observation des mouvements de va-et-vient du bras pendant une certaine période d'exposition, pouvait, en fait, relever de deux stratégies différentes. Ces stratégies dérivent de la mise en jeu de deux types de canaux visuels aujourd'hui bien identifiés : les canaux dynamiques impliqués dans la détection des mouvements continus, et les canaux statiques intervenant dans la détection des positions successives. Le premier type domine en vision périphérique et n'effectue une recalibration que lorsqu'il est sollicité par la vision de mouvements actifs mais reste inefficace en présence des mouvements passifs. Il reste, par contre, totalement inefficace avec des mouvements passifs. Quant au second type, qui domine en vision centrale, il réalise une recalibration efficace quel que soit le mode actif ou passif de mobilisation des mouvements. Ces deux canaux, dont nous avons pu dissocier expérimentalement les mises en jeu respectives, peuvent aussi, s'ils sont coactivés, agir synergiquement et additionner leurs effets dans le processus de recoordination des espaces proprioceptifs et visuels. Les performances individuelles des sujets diffèrent dans leurs capacités adaptatrices suivant la stratégie qu'ils utilisent et la prévalence donnée à l'un ou l'autre de ces canaux ou éventuellement à la combinaison synergique des deux.

Le contexte joue ici un rôle essentiel. La structuration du champ visuel est nécessaire à la sollicitation préférentielle du système positionnel et au choix des référentiels allocentriques dans l'organisation des activités visuo-motrices. Elle sollicite l'évaluation des positions relatives de la main et de la cible et par conséquent la détection d'un signal d'erreur susceptible d'être pris en compte à des niveaux divers, y compris cognitif. La procédure du « terminal feed-back » introduite dans les expériences de Howard plaçait les sujets dans un tel contexte. Par contre, la présence d'un fond visuel homogène donne une prévalence au rôle du canal de mouvement et contraint le système au choix des référentiels égocentriques pour organiser les mouvements visuellement orientés dans l'espace. Il est intéressant de noter que seule la recalibration dans le référentiel égocentrique reste strictement dépendante d'une vision des mouvements actifs en conformité avec les résultats originaux de Held & Hein (op. cit.) qui utilisaient précisément une situation expérimentale favorable à leur intervention prédominante.

Une dernière remarque pourtant : l'efficacité recalibrante d'une stratégie cognitive est parfaitement démontrée. Elle repose non plus sur une prise d'information visuelle relative au mouvement du segment pointeur dans le champ visuel déplacé mais sur la simple connaissance de l'erreur de pointage qui peut être fournie au sujet, soit directement par la vision de la position finale de sa main par rapport à la

cible, soit même indirectement, par un signal d'erreur fourni au sujet à l'aide d'un code symbolique. Ce type de recalibration de l'espace visuo-moteur d'origine cognitive n'est pas dépendant de la nature active ou passive du mouvement pointeur.

Ces données apportent, nous semble-t-il, une clarification décisive sur les conditions dans lesquelles la motricité active peut intervenir dans la calibration spatiale de **l'espace des lieux**. Ces conditions sont probablement prédominantes, au cours du développement, pour la construction initiale d'une cohérence perceptive associée à l'intégration intermodalitaire, laquelle peut aussi relever au départ, comme nous l'avons vu, de l'ancrage des réactions de capture sur les réalités physiques. Ces opérations de recalibration pourront progressivement être relayées, et principalement dans le cerveau humain, par les instruments cognitifs et les critères de cohérence qui coordonnent leurs activités.

La recherche d'un support nerveux à ces fonctions de cohérence est maintenant entrée dans le champ d'investigation des neurosciences (Droulez & Darlot, 1989 ; Singer, 1990 ; Berthoz, 1997, Phillips & Singer, 1997). Le concept de fonctions de « binding » (de couplage, d'association, de mises en relation, de « liage » proposent certains) y est d'introduction récente. L'étude de ces fonctions repose opérationnellement, pour une part sur les mesures de coefficients de corrélations existant entre diverses parties du cerveau simultanément activées, et pour une autre part d'importance croissante, sur les données des nouvelles techniques de neuro-imagerie qui semblent offrir les perspectives les plus prometteuses. Certains faits expérimentaux avaient suggéré notamment que le couplage perceptif entre des éléments de l'objet perçu, séparément analysés dans différentes aires cérébrales éloignées les unes des autres puisse résulter d'une synchronisation temporelle des activités régionales impliquées dans l'activité en cours (Singer, 1990). Nous avons mentionné plus haut l'extension récemment donnée à cette hypothèse d'une synchronisation d'activités nerveuses distribuées dans des aires anatomiquement séparées comme base des fonctions de « binding » qui, en assurant l'intégration des divers champs sensoriels contextuels et intramodalitaires, contribuerait à l'élaboration de l'unité de l'expérience perceptive (Phillips & Singer, 1997).

Mais pour revenir au thème de cette présentation, une dernière question demeure encore : qu'en est-il du rôle de l'action dans l'extraction des invariants dans **l'espace des formes ?**

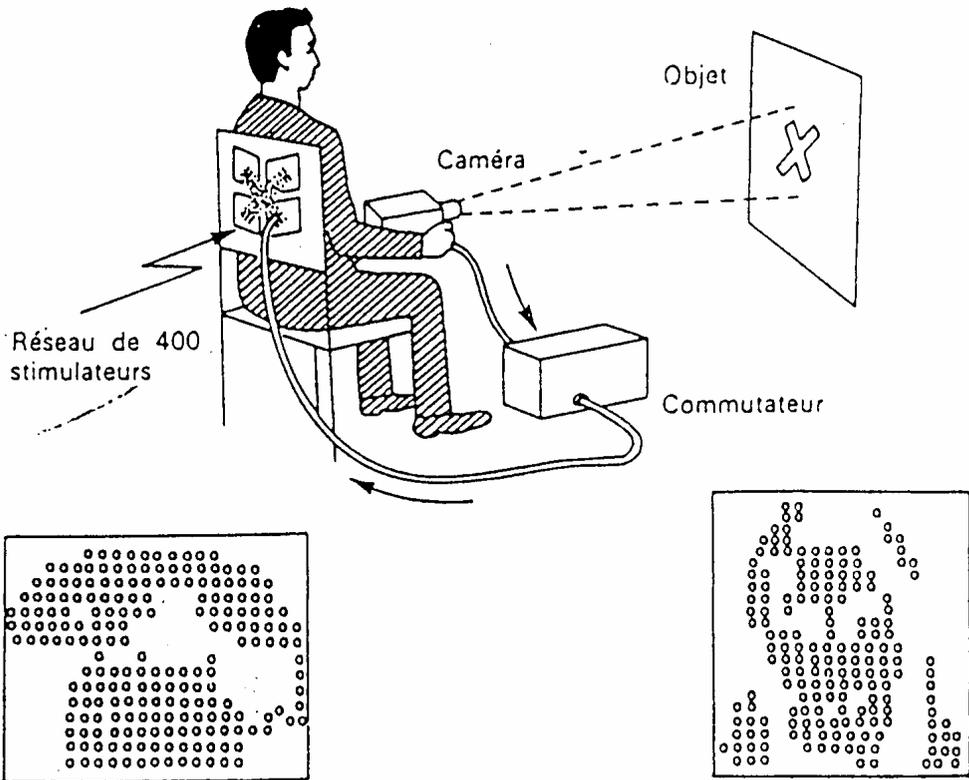
4. LES SUBSTITUTIONS SENSORIELLES

On évoquera, à ce sujet, l'étonnant succès de certaines techniques de substitution proposées voici près de 30 ans par Bach-y-Rita (*White et al.*, 1970). Ces techniques utilisent des prothèses vibro-tactiles qui, appliquées aux aveugles nés, semblent leur permettre d'éprouver des sensations qualifiées de « quasi-visuelles ». Rappelons, en effet, que ces prothèses utilisent des matrices de vibro-tacteurs qui, appliquées sur la peau du dos ou de l'abdomen des sujets, traduisent l'image pointilliste de figures ou d'objets captés par une vidéo-caméra (figure 3).

L'idée d'un tel dispositif apparaissait au départ totalement aberrante, compte tenu du pouvoir séparateur relativement faible des régions cutanées utilisées. De fait, lorsque la caméra est fixe ou manipulée par l'expérimentateur, le sujet déclare, dès l'abord, ressentir des sensations tactiles vibrantes assez incohérentes. Mais dès que l'on donne au sujet la possibilité de manoeuvrer lui-même la caméra et d'opérer une véritable palpation active de l'objet cible, alors émerge de cette activité exploratrice une certaine ordonnance de ses impressions sensibles pour aboutir progressivement, et de façon surprenante, à la construction d'une représentation « quasi-visuelle » de la forme de la figure ou de l'objet exploré. Le sujet entraîné devient alors capable d'identifier des visages et des objets familiers. La manipulation additionnelle d'un zoom apporte, en outre, au sujet la capacité à situer les objets à distance de son corps dans l'espace extérieur, introduisant ainsi la troisième dimension dans son expérience sensible (*Collins & Bach-y-Rita*, 1973). Ces résultats très surprenants ont au départ été accueillis avec beaucoup de scepticisme par la communauté scientifique qui s'accorde pourtant aujourd'hui à en reconnaître la validité et la reproductivité. Toutefois, certaines difficultés rencontrées dans l'utilisation pratique de ces prothèses ont malheureusement contribué à en limiter la portée. En dépit de cet échec relatif (et peut-être encore provisoire compte tenu de l'évolution rapide des techniques informatiques), l'intérêt théorique d'une telle observation est aujourd'hui universellement reconnu. Ces données continuent, en tout cas, de nourrir certains débats philosophiques récurrents dont l'actualité ne se dément pas (voir en particulier *Proust*, 1997a).

On doit donc admettre qu'un aveugle né semble capable d'utiliser ses informations tactiles pour distinguer et différencier, à distance, des objets de formes différentes. Une fois entraînés à utiliser ce type de prothèse, ces sujets décrivent leur expérience perceptive dans des termes similaires à ceux qu'emploient les voyants.

Figure 3. Dispositif de prothèse vibro-tactile pour aveugle. Une matrice de 400 tacteurs est appliquée sur la peau du sujet aveugle. L'image recueillie par la vidéo-caméra est transformée en une image « pointilliste » au niveau de la peau en modulant l'intensité de la vibration de chacun des vibreurs en fonction de la luminosité des points correspondant de l'image visuelle. Les deux figures du bas illustrent le type d'image tactile appliquée à la peau (téléphone à gauche et visage humain à droite). Lorsqu'on donne au sujet la possibilité de palper l'image grâce au mouvement d'exploration qu'il imprime lui-même à la caméra, il acquiert progressivement la capacité à extraire de ses stimulations tactiles certaines caractéristiques invariantes de la forme de l'objet en permettant l'identification correcte. Si le sujet peut en outre manipuler le zoom de la vidéo-caméra, il situera également cet objet identifié à une certaine distance de son corps (d'après Collins & Saunders, 1970).



Le fait tout à fait remarquable est que les sensations tactiles semblent, en fait, devenir porteuses d'une information d'origine « quasi-visuelle » dans ce sens qu'elles résultent indirectement d'une stimulation d'origine lumineuse. Le sujet y a accès par l'intermédiaire d'une caméra exploratrice qu'il manipule lui-même et qu'il oriente activement comme les sujets voyants orientent leurs yeux pour explorer leur environnement visuel. On est donc amené à penser que ce type de « vision tactile » semble capable d'extraire, au moyen de la caméra palpatrice, des propriétés spatiales invariantes de l'objet similaires à celles qui sont extraites au moyen de la composante motrice exploratoire de la vision normale. Dès lors, peut-on aller jusqu'à considérer que, quel que soit le canal sensoriel (et plus précisément la modalité sensorielle) initialement utilisé pour les émettre, tous messages nerveux devenus porteurs d'informations spatiales (forme, taille, localisation) collectées par un dispositif sensorimoteur de capture « quasi-visuelle » seraient alors distribués aux structures centrales de traitement dans un format particulier qui suffirait à conférer à leur interprétation perceptive finale une spécificité de description de type modalitaire ? Autrement dit, les diverses modalités sensorielles portent-elles intrinsèquement (c'est-à-dire hors de toute association intermodale) une information commune, par exemple de type spatial ?

En fait, s'il est peut-être justifié de parler d'un codage tactile des informations spatiales, ce serait dans un sens particulier qu'il importe de préciser. Que signifie en effet la notion de « signe local » lorsqu'on parle d'une stimulation tactile ? Il nous paraîtrait important de distinguer ici ce qui est localisation de l'expérience tactile engendrée par cette stimulation dans la représentation figurale que nous avons constituée de notre corps dans l'espace des formes identifiables et ce qui est localisation de cette stimulation tactile dans un espace des lieux qui en permettrait la désignation par un mouvement de pointage par exemple. La distinction entre le corps identifiable dans sa forme et le corps localisé dans l'espace des lieux prend ici tout son sens (Paillard, 1980). Une telle distinction nous permet aussi sans doute de mieux comprendre la dissociation expérimentelle, souvent mentionnée par les phénoménologues (Buytendijk, 1957) qui nous fait distinguer entre l'acte de « se toucher » et la sensation d'« être touché ». Se toucher soi-même relève d'une action dont la sanction tactile est interprétée comme localisée dans l'espace d'un corps situé dans un espace des lieux. Etre touché produit une sensation localisable dans l'espace d'une image du corps représenté dans sa morphologie comme forme identifiable et reconnue.

Nous pensons donc que l'activité palpatoire génératrice des informations finalement spatialement codée dans les voies tactiles nous paraît avoir un statut fondamentalement différent de celui qui, au niveau de l'expérience perceptive, confère à la sensation tactile une dimension spatiale née de l'intégration des informations modalitaires spécifiques et des réafférences proprioceptives engendrées par les activités motrices de localisation dans l'espace des lieux.

L'activité palpatoire serait donc essentiellement pourvoyeuse des transformations du flux des informations tactiles utiles au processus d'extraction d'invariance. Cette activité se trouverait, en quelque sorte, asservie à la dynamique de ce processus d'extraction qui en guiderait la progression et l'orientation. En tout état de cause, l'efficacité de son rôle devrait donc tenir beaucoup moins à l'intervention des réafférences proprioceptives nées de sa propre exécution, qu'à celui des réafférences tactiles qu'elle génère. La question restant alors posée de savoir si ces réafférences limiteraient leur utilité à l'alimentation du processus initial d'extraction d'invariance et de stabilisation de son engrammation modalitaire et/ou si elles s'avéraient aussi ultérieurement requises dans l'opération de reconnaissance d'une forme déjà codée dans une configuration synaptique centrale (Norton & Stark, 1970).

Si tel est bien le cas, quel crédit peut-on dès lors accorder à la signature modalitaire prétendue visuelle de l'expérience sensible que rapportent les aveugles nés équipés d'une prothèse vibro-tactile ? On peut s'interroger sur la nature verbale de la description de l'expérience sensible qu'ils éprouvent et en particulier de l'expérience d'une troisième dimension. Il n'est pas du tout exclu que les activités palpatoires associées à la collecte des informations captées par la caméra et qualifiées de « quasi-visuelles » puissent suffire à donner à cette expérience tactile construite sur une activité palpatoire non directement tactilo-motrice, une tonalité perceptive tellement différente de celle normalement associée aux intégrations habituelles propres à cette modalité, que le sujet serait alors amené à donner de l'expérience qu'il éprouve de ces morphologies bi- ou tridimensionnelles auxquelles il a nouvellement accès une description en termes proches de ceux qu'il entend utiliser par les voyants sans que l'on puisse, pour autant, prétendre être en présence, chez eux, d'une signature modalitaire différente.

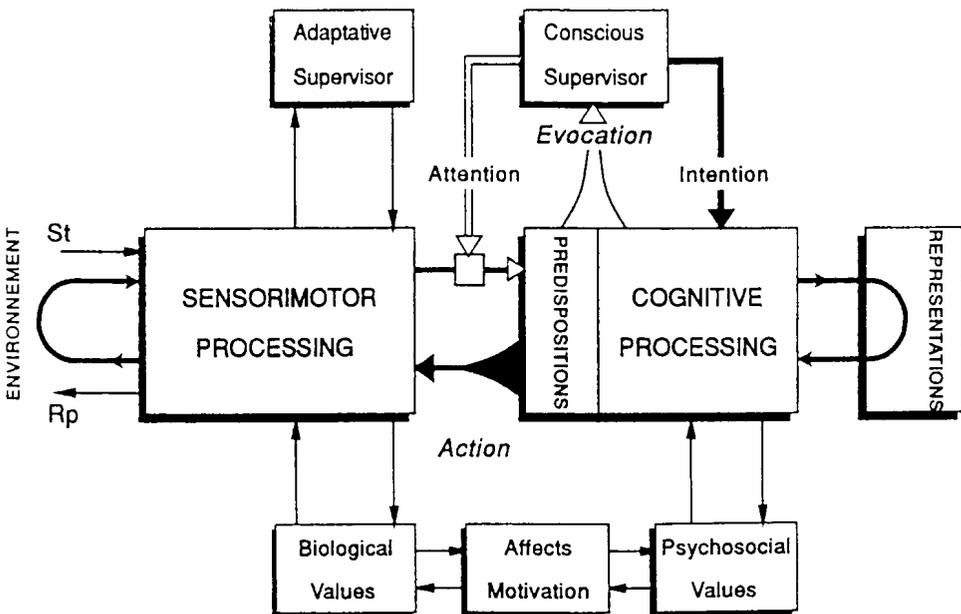
Nous pensons finalement que toutes ces données nous autorisent à conclure que le rôle de la motricité active dans les opérations d'extraction d'invariance perceptive est fondamentalement différent de celui que nous révèlent les expériences de recalibration visuo-motrice mentionnées précédemment.

Une distinction s'impose donc entre Les opérations d'extraction d'invariance associées aux activités palpatoires des dispositifs sensorimoteurs de capture sensorielle dans l'espace des formes, et les opérations de calibration et de recalibration de l'ordre spatial et de préservation de la cohérence des expériences perceptives pluri-modalitaires qui sont associées à une motricité active dirigée dans l'espace des lieux.

Mais si le rôle organisateur de l'action dans ces deux domaines fonctionnels nous semblent donc devoir être envisagé comme ayant un statut différent, il ne saurait pour autant y être considéré comme exclusif. D'autres stratégies supplétives directement utilisables dans ces deux domaines par les capacités adaptatives du cerveau cognitif de l'homme existent. Nous restons de ce point de vue attachés à la conception d'un double niveau sensorimoteur et cognitif du traitement des informations par le système nerveux (figure 4 ; Paillard, 1985).

Les dispositifs sensorimoteurs apparaissent ici comme une interface privilégiée entre les capteurs périphériques et les structures cognitives où s'élabore l'univers de la pensée symbolique. On ne s'étonnera pas de retrouver dans les fonctionnements de ces dernières des modes opératoires directement hérités de la logique des actions dirigées dans le monde physique (Berthoz, 1997). Les activités motrices, nous l'avons vu, jouent certainement un rôle primordial dans l'ordonnance du monde sensible et le maintien de sa cohérence mais elles contribuent aussi à la construction des représentations internes de l'environnement. Ces dernières vont, en retour, permettre l'engagement de nouveaux types d'interactions mais avec un environnement virtuel et cette fois purement « simulé » dans la dynamique des traitements centraux. De par son existence même, cet environnement virtuel permet l'anticipation des conséquences sensorielles des actions que l'on projette d'y diriger. Les instances décisionnelles intervenant dans le choix des stratégies d'action se trouvent ainsi délivrées des contraintes spatio-temporelles imposées aux dialogues sensorimoteurs directs qu'entretient l'organisme avec la réalité du monde physique. Dans quelles mesures ces dialogues internes peuvent-ils finalement totalement s'affranchir des contraintes des fonctionnements sensorimoteurs pour construire leur système de règles propre ? Vont-ils jusqu'à acquérir la capacité à élaborer des stratégies autonomes d'intervention au service du maintien de la cohérence de l'organisation perceptivo-motrice ? La question reste encore largement ouverte aux explorations futures dans ce champ de recherches en pleine expansion.

Figure 4. Deux niveaux de traitement des informations sensorielles. Le niveau des traitements sensorimoteurs entretient des dialogues sensorimoteurs directs avec l'environnement. Il peut répondre aux stimulations du milieu extérieur mais il peut aussi interroger cet environnement et recueillir ses réponses. Il opère sur un répertoire moteur génétiquement inscrit ou à partir de prédispositions secondairement acquises. Il dispose d'un superviseur adaptatif capable de modifier dans une certaine marge, les capacités réactionnelles de son répertoire de base pour s'adapter automatiquement aux contraintes nouvelles de son environnement. Le compartiment cognitif introduit des possibilités nouvelles. Les informations issues des traitements sensorimoteurs contribuent, à son niveau, à la construction progressive dans les mémoires du système d'une représentation virtuelle de l'environnement. Dès lors, un nouveau système de contrôle conscient émerge. Il instaure des dialogues d'un type nouveau avec la représentation interne d'un univers virtuel prévisible quant aux conséquences des actions qui y seront dirigées. Ces dialogues, désormais affranchis des contraintes de la réalité physique, vont permettre, par anticipation des conséquences de leur exécution réelle, un choix raisonné des projets d'action à entreprendre. Par les processus attentionnels, ce niveau sélectionnera les informations qu'il jugera utiles à la réalisation de ses objectifs et mobilisera intentionnellement les instruments moteurs jugés les plus aptes à les atteindre efficacement. Ces activités internes auto-organisatrices et auto-adaptatives vont se trouver orientées et guidées dans leur motivation comme dans leur achèvement par les systèmes de valeurs biologiques et sociales qui ordonnent et finalisent tous nos comportements (modifié d'après Paillard, 1985).



CONCLUSION

Nous ne saurions conclure cette présentation, initialement programmée comme une introduction à la session d'un colloque sur le handicap consacrée à l'étude des déficiences sensorielles, sans tenter d'en dégager les enseignements dont les rééducateurs pourraient éventuellement tirer profit. L'exercice, nous le savons, est toujours difficile. La modestie reste de règle et, en aucun cas, nous ne nous sentons autorisé à énoncer des prescriptions. En nous risquant simplement à indiquer quelques pistes explorables, nous pourrions retenir les points suivants.

1. Considérant le rôle organisateur, calibreur de l'action et plus spécifiquement le rôle de l'action intentionnelle, auto-générée, il nous paraîtrait déjà opportun de tenter de distinguer les opérations rééducatives portant sur l'espace des formes de celles intéressant les localisations dans l'espace des lieux. Réaliser des mouvements de pointage de cibles visuelles tactiles ou sonores, diriger ses activités dans un espace orienté, c'est opérer dans l'espace des lieux. Engendrer des formes motrices impliquant le corps dans son ensemble, comme dans la danse, ou un segment privilégié du corps, comme dans l'écriture, c'est opérer dans l'espace des formes. Le choix du contexte visuel prend ici de l'importance. En effet, l'activité propre du sujet nous semble devoir être pleinement efficace dans les situations rééducatives où se trouve favorisée la mise en jeu des référentiels égocentriques qui privilégient l'intervention calibreuse des informations proprioceptives réafférentes nées des mouvements actifs. Ces réafférences interviennent prioritairement pour les recalibrations intermodalitaires dans l'espace des lieux. Elles sont optimalement prises en compte dans les situations où la vision des segments corporels actifs est permise en l'absence d'un contexte visuel structuré (sur fond visuel homogène ou dans l'obscurité avec marquage lumineux du segment actif). Par contre, on peut attendre de la présence d'un champ visuel structuré une certaine prévalence donnée à la prise en compte par le système du référentiel exo-centrique (autrement nommé allo-centrique). Ce dernier tend à privilégier l'intervention des fonctions de cohérence du niveau cognitif et les opérations d'extraction d'invariance dans l'espace des formes. Ces situations pourraient minimiser le rôle réorganisant des mouvements actifs au profit sans doute des stratégies cognitives et des mécanismes de stabilisation synaptique sélective qui sont à la base des processus d'extraction d'invariance.

2. Tenant compte précisément des processus nerveux supposés être impliqués dans la stabilisation de nouveaux circuits, une attention particulière pourrait être

portée à l'arrangement de situations d'intervention qui préservent, au cours de la répétition des exercices compensateurs, la disponibilité, sous forme de configurations stables, des informations spécifiques ou contextuelles jugées utiles au processus rééducatif. L'organisation temporelle de ces configurations pourrait même devenir cruciale pour l'efficacité de l'exercice.

3. L'existence reconnue d'une certaine variété de typologies réactionnelles devrait être plus systématiquement prise en compte dans les pratiques rééducatives. Certains sujets sont plus visuels que proprioceptifs. Ils tendraient à mieux tirer parti des stratégies cognitives. D'autres plus proprioceptifs adopteront préférentiellement des stratégies adaptatives du niveau sensori-moteur. Ces deux stratégies sont parfois incompatibles et peuvent s'inhiber réciproquement. Mais certains sujets apparaissent aussi capables de tirer profit de ces deux stratégies utilisées en parallèle avec addition de leurs effets positifs. La recherche d'outils d'identification de ces typologies pourrait contribuer à mieux orienter le choix de pratiques rééducatives individuelles.

4. Enfin, et sur un plan plus général, la notion de systèmes distribués qui domine les conceptions actuelles de l'organisation nerveuse dérive de l'existence aujourd'hui démontrée de canaux de traitement de l'information parallèles et redondants susceptibles de contribuer, en combinaisons variées, à des productions perceptives ou comportementales de même nature. Cette redondance de circuits disponibles pour atteindre la même finalité offre une variété de solutions possibles aux thérapeutiques supplétives. Ce point, que les neurophysiologistes sont aujourd'hui à même de documenter au plan des structures et des mécanismes mis en jeu, a depuis longtemps préoccupé les psychologues et se retrouve formulé dans le concept de vicariance introduit par la psychologie différentielle (Reuchlin, 1978). Rechercher les conditions d'ouverture du champ des possibilités vicariantes doit, bien entendu, continuer de rester un objectif majeur des pratiques rééducatives.

Références

- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Buytendijk, F.J.J. (1957). *Attitudes et mouvements*. Paris: Desclée de Brouwer.
- Collins, C.C. & Saunders, F.A. (1970). Tactile television electro-cutaneous perception of pictorial images. In D. Reynolds & A. Sjöberg (Eds.), *Neuroelectric Research* (chap. 6 ; pp. 55-64). Kingsport, TE : Kingsport Press.
- Collins, C.C. & Bach-y-Rita, P. (1973). Transmission of pictorial information through the skin. *Advances in Biological and Medical Physics*. 14, 285-315.
- Condillac, E.B. de (1754). *Traité des Sensations*. Paris : De Buré l'aîné.
- Droulez, J. & Darlot, C. (1989). The geometric and dynamic implications of the coherence constraints in three dimensional sensorimotor coordinates. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII* (pp. 495-526). Hillsdale, NJ : Laurence Erlbaum Ass.
- Goodale, M.A. & Milner, A.D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*. 15(1), 20-25.
- Hay, L. & Brouchon, M. (1972). Analyse de la réorganisation des coordinations visuomotrices chez l'homme. *Année Psychologique*, 72, 25-38.
- Held, R. & Hein, R. (1958). Adaptation to disarranged hand-eye coordination contingent upon reafferent information. *Perceptual and Motor Skills*, 8, 87-90.
- Held, R. & Hein, R. (1963). Movement produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of comparative and Physiological Physiology*, 56, 872-876.
- Howard, I.P. (1971). Perceptual learning and adaptation. *British Medical Bulletin*, 27, 248-252.
- Ingle, D. (1967). Two visual mechanisms underlying behavior of fish. *Psychologische Forschung*, 31, 44-51.
- Jeannerod, M. & Rossetti, Y. (1993). Visuomotor coordination as a dissociable visual function : experimental and clinical evidence. *Ballières's Clinical Neurology*, 2(2), 439-460.
- Jeannerod, M., Arbib, M.A., Rizzolatti, G. & Sakata, H. (1995). Grasping objects : the cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends in Neuroscience*, 18, 314-320.
- Mark, R. (1974). *Memory and Nerve Cell Connections*. Oxford : Clarendon Press.
- Mishkin, M. & Ungerleider, L.G. (1982). Contribution of striate inputs to the visuo-spatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys. *Behavioral Brain Research*, 6, 57-77.

- Mountcastle, V.B. (1997). The columnar organization of the neocortex. *Brain*, 120, 701-722.
- Norton, D. & Stark, L. (1970). Scanpaths in saccadic eye movements when viewing and recognizing patterns. *Vision Research*, 11, 929-942.
- Pacherie, E. (1997). Du problème de Molyneux au problème de Bach-y-Rita. In Proust, J. (Ed.), *Perception et intermodalité : approches actuelles de la question de Molyneux* (pp. 255-293). Paris : PUF.
- Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de Psychologie*, 14, 261-316.
- Paillard, J. (1974). Le traitement des informations spatiales. In *Symposium de l'APSLF, (Bruxelles), « De l'espace corporel à l'espace écologique »* (pp. 7-54). Paris: PUF.
- Paillard, J. (1980). Le corps situé et le corps identifié. Une approche psychophysologique de la notion de schéma corporel. *Revue Médicale de la Suisse Romande*, 100, 129-141.
- Paillard, J. (1985). Les niveaux sensorimoteur et cognitif du contrôle de l'action. In M. Laurent & P. Therme (Eds.), *Recherches en Activités Physiques et Sportives* (pp. 147-163). Université Aix-Marseille II : Publication du Centre de Recherches de l'UEREPS.
- Paillard, J. (1987). Système nerveux et fonction d'organisation. In J. Piaget, P. Mounoud J.P. Bronckart (Eds.), *Psychologie, Encyclopédie de la Pléiade* (pp. 1378-1441). Paris: Gallimard.
- Paillard, J. (1990). Réactif et Prédicatif: deux modes de gestion de la motricité. In V. Nougier & J.-P. Blanche (Eds.), *Pratiques sportives et modélisation du geste* (pp. 13-56). Grenoble : Edition Grenoble Sc.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In J. Paillard (Ed.), *Brain and Space* (chap. 10, pp. 163-182). Oxford: Oxford University Press.
- Paillard, J., Jordan, P. & Brouchon, M. (1981). Visual motion cues in prismatic adaptation : evidence of two separate and adaptive processes. *Acta Psychologica*, 48, 253-270.
- Paillard, J., Michel, F. Stelmach, G. (1983). Localization without content : a tactile analogue of « blind sight ». *Archives of Neurology*, 40, 548-551.
- Phillips, W.A. & Singer, W. (1997). In search of a common foundation for cortical computation. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(4), 657-722.
- Proust, J. (1997a). *Perception et intermodalité : approches actuelles de la question de Molyneux*. Paris: PUF.
- Proust, J. (1997b). L'espace, le sens et l'objectivité. In J. Proust (Ed.), *Perception et intermodalité : approches actuelles de la question de Molyneux* (pp. 125-158). Paris : PUF.

- Radeau, M. (1997). Du ventriloque à l'embryon : une réponse à Molyneux. In J. Proust (Ed.), *Perception et intermodalité : approches actuelles de la question de Molyneux* (pp. 223-252). Paris: PUF.
- Radeau, M. & Bertelson, P. (1977). Adaptation to auditory-visual discordance and ventriloquism. *Perception and Psychophysics*, 22, 137-146.
- Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences interindividuelles. *Journal de Psychologie*, 2, 133-145.
- Rossetti, Y. (1997). Des modalités sensorielles aux représentations spatiales en Action : représentations multiples d'un espace unique. In J. Proust (Ed.), *Perception et intermodalité : approches actuelles de la question de Molyneux* (pp. 125-158). Paris: PUF.
- Scheerer, E. (1984). Motor theories of cognitive structure : a historical review. In W. Prinz & A. Sanders (Eds.), *Cognition and motor processes* (pp. 77-97). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schneider, G.E. (1969). Two visual systems. *Science*, 163, 895-902.
- Sherrington, C.S. (1906). *The integrative action of the nervous system*. London : Constable.
- Singer, W. (1990). Search for coherence : a basic principle of cortical self-organization. *Concept in Neuroscience*, 1, 1-26.
- Stein, B. & Meredith, M.A. (1993). *The Merging of the senses*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Ungerleider, I.G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & D.J. W. Mansfield (Eds), *Analysis of visual behavior*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Viviani, P. & Stucchi, N. (1990). Motor-perceptual interactions : the evolution of an idea. In M. Piatelli-Palmarini (Ed.), *Cognition science in Europe : issues and trends* (pp. 11-39). Golem.
- Weiskrantz, L. (1989). Blindsight. In F. Boller & J. Grafman (Eds.). *Handbook of neuropsychology* (Vol. 2, pp. 375-385). Amsterdam : Elsevier.
- 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.