

**Programme Interdisciplinaire**  
**Cognition et Traitement de l'Information**

— Appel à projets 2002 —

**Apprentissages Perceptifs et**  
**Contingences Sensori-motrices**

**Des compétences humaines aux performances artefactuelles**

**Programme Interdisciplinaire**  
**Cognition et Traitement de l'Information**

— Appel à projets 2002 —

**1**

**Fiche résumé**

(4 exemplaires)

**Titre du projet :**

**Apprentissages perceptifs et contingences sensori-motrices : des compétences humaines aux performances artefactuelles**

**Nature : PROJET**

**Durée du projet : 2 ans**

**Mots-clefs** (3 à 5 mots) :

**Couplage perception-action, apprentissage, substitution sensorielle, bases neurales, modélisation.**

**Responsable scientifique : SYLVAIN HANNETON**

Maître de Conférences, Université Paris 5 René Descartes (UFR STAPS)  
Laboratoire Neurophysique et Physiologie du Système Moteur, FRE 23 61  
45 rue des Saints Pères, 75270 Paris CEDEX 06  
sylvain.hanneton@staps.univ-paris5.fr

**Tel : 01 42 86 22 24 Fax : 01 49 27 90 62**

*(Département Sciences de la Vie, Section CNRS 26 et 2 et section CNU 74)*

**Discipline du responsable scientifique :**

Sciences cognitives

**Délégation du CNRS gestionnaire de l'opération : Délégation PARIS A**

27 rue Paul Bert - 94204 Ivry Cedex 04

## **Noms et coordonnées des équipes partenaires éventuelles :**

### **Laboratoire Neurophysique et Physiologie du Système Moteur**

CNRS FRE 2361 Université René Descartes Paris 5  
45, rue des Saints Pères 75270 PARIS CEDEX 6  
Tel : 01 42 86 22 24  
contact : S. Hanneton ([sylvain.hanneton@staps.univ-paris5.fr](mailto:sylvain.hanneton@staps.univ-paris5.fr))

### **Equipe Connaissance et Organisation des Systèmes Techniques (COSTECH)**

EA 2223 , Dept. Technologies et Sciences Humaines  
Université de Technologie de Compiègne, BP 60.319 60206 Compiègne France  
Tel : 03 44 23 43 68  
Contact : C. Lenay ([charles.lenay@utc.fr](mailto:charles.lenay@utc.fr))

### **Laboratoire de Psychologie Expérimentale**

Institut de Psychologie, Centre Universitaire de Boulogne,  
71, avenue Edouard Vaillant, 92774 Boulogne-Billancourt Cedex  
Tel: (33 1) 55 20 59 26 Fax: (33 1) 55 20 58 54  
Contact : J.K. O'Regan ([oregan@ext.jussieu.fr](mailto:oregan@ext.jussieu.fr))

### **Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action**

CNRS-Collège de France, UMR C9950  
11, place Marcelin-Berthelot 75005 Paris  
Tel. : 01.44.27.16.23 Fax. : 01.44.27.13.82  
Contact : J. Droulez ([jacques.droulez@college-de-france.fr](mailto:jacques.droulez@college-de-france.fr))

### **Equipe Reseaux Complexes et Systemes Cognitifs**

Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure,  
24 rue Lhomond, 75005 Paris  
Tel : 33 - 1 44 32 32 75 Fax : 33 - 1 44 32 34 33  
Contact : J.-P. Nadal ([nadal@lps.ens.fr](mailto:nadal@lps.ens.fr))

### **Laboratoire Systèmes Complexes**

LSC - Université d'Evry Val d'Essonne  
40 rue du Pelvoux 91020 Evry CEDEX  
Tel : 01 69 47 75 61  
Fax : 01 69 47 75 99  
Contact : V. Vigneron ([vigneron@univ-paris1.fr](mailto:vigneron@univ-paris1.fr))

### **Collaborateurs/Conseillers scientifiques associés à ce projet :**

**J.J. Clark** (Prof. Center for Intelligent Machines, McGill University, Montreal)

**M.M. Ramanantsoa** (MdC, Lab. « Cognition et Motricité », UFR STAPS, Univ. Paris 5)

**G.Stojanov** (Computer Science Department Electrical Engineering Faculty SS Cyril and Methodius University in Skopje)

**Boris Barbour** (Equipe Physiologie Cérébelleuse CNRS UMR 8544, ENS, 46 rue d'Ulm, 75005 Paris)

## **Disciplines couvertes par ces équipes partenaires :**

Neurophysiologie, Psychologie expérimentale, Psychophysique, Physique statistique, Robotique, Sciences Cognitives.

## **Résumé du projet** (1/2 page maximum) :

La perception est souvent conçue comme un **processus de traitement d'informations** par le système nerveux central, l'action ne représentant qu'une sortie éventuellement associée à ce processus. Ces dernières années se développe une nouvelle approche au problème de la perception dans laquelle on insiste sur le fait que la perception est toujours une **activité** de l'organisme située dans son cadre environnemental. Selon ce point de vue, la perception n'est pas générée par des automatismes neuronaux figés, mais est structurée par les **contingences sensori-motrices** d'interaction de l'organisme avec son environnement. Ces contingences guideraient nos capacités perceptives et pourraient également être à l'origine de l'organisation même de l'espace. Nous proposons donc d'associer des neurophysiologistes, psychologues, roboticiens, physiciens théoriciens dans le développement d'une étude théorique et expérimentale concernant le rôle des contingences sensorielles **et motrices** dans l'apprentissage perceptif.

L'objectif scientifique est d'aboutir à une meilleure compréhension et formulation théorique du rôle des informations motrices dans l'apprentissage perceptif en particulier dans le but de vérifier l'hypothèse que l'apprentissage perceptif est guidé par des lois de contingence sensori-motrices. Ce projet combine approches expérimentales (psychophysique, psychologie expérimentale, imagerie fonctionnelle, neurophysiologie) et modélisation. Ce projet a pour ambition de donner à cette nouvelle approche de l'apprentissage perceptif des bases théoriques solidement soutenues par un corpus de résultats expérimentaux.

Mais il faut souligner que les travaux proposés ont aussi pour ambition d'apporter une contribution importante à des domaines applicatifs actuellement stratégiques tels que la navigation en robotique, les algorithmes de classification et de reconnaissance de formes, l'utilisation de la réalité virtuelle et des simulateurs en vue de la formation à des situations à risque, la conduite de véhicule, les technologies d'assistances et la réadaptation fonctionnelle.

## 2- Description du projet scientifique

### 1. Situation actuelle du sujet proposé

#### *Contexte Scientifique*

La perception est souvent conçue comme un **processus de traitement d'informations** par le système nerveux central, l'action ne représentant qu'une sortie éventuellement associée à ce processus. Mais bien des travaux ont montré que les capacités perceptives

- se construisent au cours du développement de l'individu,
- présentent une plasticité certaine tout au long de la vie,
- se développent à la condition que l'individu puisse agir sur le monde et l'explorer activement.

Si le premier point ne souffre actuellement guère de discussion, il n'en est pas de même pour les deux suivants. Ces dernières années se développe une nouvelle approche au problème de la perception dans laquelle on insiste sur le fait que la perception est toujours une **activité** de l'organisme située dans son cadre environnemental. Selon ce point de vue, la perception n'est pas générée par des automatismes neuronaux figés, mais est structurée par les **contingences sensori-motrices** contraignant l'interaction de l'organisme avec son environnement (comme le suggérait le mathématicien Henri Poincaré). Les contingences sensori-motrices sont constituées par l'ensemble des lois qui régissent la manière dont les entrées sensorielles sont modifiées, dans une situation donnée, par des actions motrices de l'organisme. Ces contingences guideraient nos capacités perceptives, mais pourraient également être à l'origine de la notion même d'espace.

S'il est un travail démontrant l'extrême degré d'adaptation de nos capacités perceptives et l'importance de l'activité du sujet, c'est celui de Paul Bach y Rita qui mis en évidence la capacité de sujets adultes à apprendre un nouveau mode de perception en utilisant une prothèse visuo-tactile (le TVSS in Bach y Rita 1972). Ce travail a entre autre mis en évidence le fait que notre capacité à percevoir et individualiser des objets n'était pas restreinte à la mise en œuvre des modalités sensorielles spécifiquement développées depuis l'enfance (perception purement visuelles, auditives, tactiles etc...), mais qu'elle pouvait par l'apprentissage mobiliser des circuits neuronaux existants de façon à les impliquer dans la mise en place d'un couplage original entre sensations et actions du sujet. Il semble donc possible d'étudier les mécanismes de l'apprentissage perceptif sans pour autant en référer à une modalité sensorielle particulière.

#### *Adaptation et apprentissage perceptif*

Ces contingences sont susceptibles de changer sous l'influence de modifications de l'environnement (apesanteur ou microgravité par exemple) ou de l'altération des organes des sens (port de prismes, de prothèses, pathologies etc...). Chez l'adulte, l'adaptation aux modifications des relations entre sensations et actions oblige à un apprentissage mobilisateur de ressources attentionnelles. Mais cette mobilisation est temporaire car l'apprentissage conduit à l'**automatisation** des nouvelles contingences sensori-motrices à l'origine des processus perceptifs. Si les premiers jours sont difficiles, le nouveau porteur de lunettes oublie rapidement qu'il les porte, car son système nerveux s'est parfaitement adapté aux modifications de la relation entre sensations visuelles et mouvement des yeux (et du corps). Une structure clé dans ce processus d'automatisation est certainement le **cortex cérébelleux** (Imamizu et al. 2000, Parsons 2001, Rapoport et al. 2000).

#### *Lois de contingence sensorimotrices et notion d'espace*

Si l'on suppose ainsi que les sous-domaines de la perception (vision, audition, toucher...) sont constitués par un ensemble de lois de contingence sensori-motrices particulier, la notion même d'**espace** pourrait émerger de la structure globale de la perception. Ainsi, un observateur placé dans un environnement artificiel génèrerait inconsciemment une métrique et une notion d'espace à partir de ces règles (Stojanov 1999).

Cette approche sensori-motrice de la perception a trouvé des précurseurs en psychologie (Gibson), en neurosciences (H. Maturana, D. McKay) et il est reconnu que les limites attentionnelles pourraient structurer la perception (Ballard et al. 1997, Z. Pylyshyn 2001). Mais ce point de vue **manque d'une structuration théorique solide**. Il existe cependant des situations expérimentales dont nous sommes convaincus qu'elle permettent d'enrichir les connaissances sur le domaine et de participer à l'élaboration d'un cadre théorique. Parmi celles-ci figurent la substitution sensorielle (Bach-y-Rita 1972) et la vision tridimensionnelle du mouvement. Les expériences conduites en substitution sensorielles ont montré que les sujets porteurs de prothèses sensorielles étaient capables de générer après apprentissage une perception de la distalité des objets à condition d'être libres de piloter le dispositif. L'apprentissage par exploration active conduit à une automatisation des processus perceptifs et à l'oubli du dispositif lui-même. Il a été

également démontré l'importance du caractère intentionnel de l'action dans l'interprétation d'une scène visuelle tridimensionnelle (Wexler et al. 2001).

La modélisation tient une place très importante dans l'élaboration des connaissances sur le contrôle adaptatif des mouvements. La physiologie du mouvement tisse des liens de plus en plus étroits avec l'automatique (Slotine et Lohmiller, 2001), la robotique (Kawato, 1999), et la théorie des systèmes dynamique (Thelen et al. 2001). Il existe par contre très peu de travaux théoriques sur l'intégration des informations motrices dans des modèles adaptatifs de la perception, exception faite des travaux concernant l'intégration des trajets en robotique mobile. Le développement de tels modèles est cependant stratégique et source de valorisation, car il est reconnu que les performances des **systèmes de reconnaissance et de classification automatique** actuels pourraient être grandement améliorées par la prise en compte des informations motrices..

Il nous faut donc souligner que cette étude théorique et expérimentale concernant le rôle des contingences sensorielles et motrices dans l'apprentissage perceptif a aussi pour ambition d'apporter une contribution importante à des domaines applicatifs actuellement stratégiques. Ces domaines ont été identifiés comme étant la navigation en robotique, les algorithmes de classification et de reconnaissance de formes, l'utilisation de la réalité virtuelle et des simulateurs en vue de la formation à des situations à risque, la conduite de véhicule, les technologies d'assistances et la réadaptation fonctionnelle.

#### ***Travaux et publications dans le domaine du demandeur et des associés : VOIR 2.4***

**Brevets pris dans le secteur :** Une enveloppe Soleau a été déposée et un dépôt de brevet est en cours dans le domaine de la perception assistée (S. Hanne-ton; C. Lenay, J. Stewart, O. Gapenne).

## **2. Description du projet**

### ***1) objectifs scientifiques***

Préambule : Ce projet fait suite à un pré-projet d'une durée de 6 mois financé dans le cadre du programme interdisciplinaire « Cognition et Traitement de l'Information » dont vous pourrez trouver le bilan en annexe. Le cadre scientifique du projet est le même que celui du pré-projet que nous avons soumis. Nous avons pris en compte les critiques formulées à cette occasion par le conseil scientifique ou justifié les orientations qui semblaient critiquables. Ainsi, les ambitions du projet sont quelques peu restreintes (l'axe 3 est exploratoire). Nous n'avons pas souhaité diminuer de façon importante le nombre d'équipes partenaires car la collaboration entre *tous* les membres du pré-projet s'est avérée très fructueuse. D'autre part, nous prendrons également soin de préciser la nature des collaborations entre les différents partenaires.

Nous proposons donc de développer trois axes principaux :

- Axe 1 : Genèse d'une perception de l'espace : dimensionnalité et invariants
- Axe 2 : Genèse de la notion d'objet et de lieu (individuation).
- Axe 3 : Mécanismes neuronaux impliqués dans l'apprentissage perceptif. Ce dernier axe est exploratoire et notre travail s'articulera autour de l'organisation d'un séminaire.

L'objectif scientifique est d'aboutir à une meilleure compréhension et formulation théorique du rôle des informations motrices dans l'apprentissage perceptif en particulier dans le but de vérifier l'hypothèse que l'apprentissage perceptif est guidé par les contingence sensori-motrices. La méthode de travail retenue est la suivante. Les modélisations, expériences et simulations proposées sont articulées autour d'une réflexion théorique commune déjà bien établie dans le cadre du pré-projet (voir le bilan en annexe).

### ***2) Cadre théorique d'une genèse d'une perception de l'espace***

(K. O'Regan, J. Droulez, G. Stojanov, JP Nadal, JJ Clark) Comme l'avait suggéré H. Poincaré on peut faire l'hypothèse que la nature perçue de l'espace n'est autre chose que l'ensemble des lois qui contraignent les déplacements possibles d'un organisme dans cet espace. Nous avons commencé à aborder ce problème par une approche algébrique (J. Droulez ; G. Stojanov) et une approche statistique (J.K. O'Regan, J-P. Nadal). Les premiers résultats suggèrent qu'un artefact qui ne connaît a priori rien sur son environnement, ni sur la manière dont ses capteurs et effecteurs sont couplés avec l'environnement, peut, en générant des actions au hasard et en étudiant les entrées sensoriels qui en résultent, déduire la dimensionnalité de l'espace dans lequel il est plongé. Nous souhaitons étendre ces premiers résultats et montrer comment l'étude de ces contingences sensori-motrices permettrait l'émergence de systèmes de coordonnées (ego- et allocentriques) et de la notion d'objet ou de lieu.

Questions posées :

- Peut-on utiliser la dimension intrinsèque propre à un ensemble de données extéroceptives comme un invariant de l'environnement ? Si oui, est-elle mesurable et fiable ? Si l'environnement est modifié à un instant donné et en supposant qu'on puisse mesurer au moyen de capteurs extéroceptifs cette modification, est-il possible de détecter cette modification par une variation de la dimension intrinsèque ?
- Est-ce que localement une séquence d'actions du robot influe sur la qualité de cette détection ?

### 3) Méthodologie

Le projet repose sur une synergie entre modélisation, expériences de psychologie expérimentale et simulations robotiques. Nous voulons répondre aux questions posées dans le cadre théorique exposé ci-dessus, par une série d'expériences de psychologie expérimentale, de simulations de robots virtuels et réels, l'ensemble étant complété par l'analyse théorique de cas simples. Sur le plan théorique, nous allons aborder les questions posées selon différents angles : statistique, géométrique, et en posant la question de l'implémentation neuronale.

#### ·Psychologie expérimentale

Notre cadre expérimental général est celui de l'apprentissage perceptif. Dans les expériences citées ci-dessus, les sujets sont dotés de moyens d'action sur un environnement dont il ne prennent connaissance qu'au travers des stimulations sensorielles (visuelles, tactiles, sonores) qu'ils reçoivent en retour. La réalisation de ces expériences sera facilitée par la poursuite du développement d'une plate-forme expérimentale permettant d'enregistrer les mouvements réalisés par les sujets (mais aussi éventuellement leur activité musculaire et électro-encéphalographique) grâce à des systèmes de capture des mouvements (Polhemus<sup>TM</sup> et MotionStar<sup>TM</sup>) et de produire des stimulations sensorielles multi-modales en réaction (en temps réel) aux actions produites. Ce projet est déjà bien avancé et nous a permis de réaliser dans le cadre du pré-projet une expérience impliquant la perception tactile d'objet tridimensionnels virtuels.

#### ·Simulations et robotique

Une plateforme de simulation sera développée, comportant : un robot simulé de type Khepera, avec des capteurs de nombre et de nature paramétrables, un environnement configurable, dans un premier temps limité à un espace 2D de figures géométriques. Il sera également de faire évoluer plusieurs robots ensemble. Cette plate-forme a été mise en route dans le cadre du Pré-Projet, et intègre déjà des capteurs infra-rouge. Des travaux précédents montrent que le comportement simulé est tout à fait comparable à celui d'un robot Khepera réel. Néanmoins un objectif futur est bien entendu de passer à une implémentation sur un robot réel de ce type. La plate-forme permettra l'enregistrement des données (comportement du robot, mesures fournies par les capteurs,...) pour une analyse théorique des expériences. Le travail effectué dans le cadre du Pré-Projet permet d'ores et déjà de programmer des expériences, mais la plate-forme continuera à être développée durant toute la durée du projet. En particulier elle sera adaptée aux besoins qui émergeront du travail de collaboration.

Dans le cadre de ce projet, le simulateur autorise l'implémentation de capteurs non métriques, et de natures très variées. Par exemple, on réalisera des simulations avec un environnement habité par des champs électromagnétiques. Le champ magnétique sera généré par les obstacles entre lesquels circulera le robot doté d'une charge électrique permettant de "sentir" cet environnement. Un tel dispositif permettra d'aborder les problèmes de perception de l'environnement de manière non conventionnelle, en se prémunissant contre les a priori mettant en jeu la perception visuelle. Notons que des animaux marins ont une perception des champs électriques.

### **AXE 1 : Genèse d'une perception de l'espace : dimensionnalité, invariants**

*Hypothèse générale* : Bien qu'il existent un grand nombre de définition de la dimension d'un ensemble, il n'existe aucune définition universelle. Nous distinguons deux aspects :

·un aspect purement algorithmique : si la tâche est de découvrir la dimensionnalité de l'espace perçu, quels sont les algorithmes susceptibles de permettre à un robot ou un système nerveux de réaliser cette tâche de manière efficace ? A titre d'exemple, l'algorithme de Grassberger-Procaccia (qui permet de calculer la dimension de corrélation) et l'algorithme de Hausdorff sont des procédures simples pour estimer cette dimension.

·Un aspect théorique plus fondamental : si la tâche est de construire une représentation de l'environnement, ou d'apprendre à réaliser une tâche qui demande a priori une interaction avec les propriétés géométriques de l'espace, est-ce que la dimensionnalité de l'espace va naturellement apparaître, et ceci de manière implicite ou explicite ? Un premier travail a été réalisé sur cet aspect dans le cadre du pré-projet (Philippon et al) et servira de point de départ.

Nous proposons de tester la validité de cette approche statistique au regard des résultats des expériences de psychologie et des simulations robotiques.

### *Psychologie expérimentale*

#### **Expérience 1 : RECHERCHE D'UN INVARIANT SENSORI-MOTEUR LORS DE L'UTILISATION D'UNE PROTHESE PERMETTANT LA PERCEPTION TACTILE D'OBJETS VIRTUELS TRIDIMENSIONNELS.**

(Ch. Lenay, K. O'Regan, S. Hanneton, A. Roby-Brami) *Hypothèse*. L'évolution des mouvements au cours de l'apprentissage d'un nouveau mode de perception est le reflet des processus internes de recherche des invariants sensori-moteurs. Dans le cadre du pré-projet nous avons mené une expérience impliquant la perception et l'exploration de segments tactiles virtuels (voir annexe I). Nous avons analysé les trajectoires exploratoires produites par les sujets et mis en évidence un invariant stable : ces trajectoires coupent la forme (segment) avec une courbure nulle et une vitesse tangentielle maximale. La présence de cet invariant est le signe d'une anticipation correcte du sujet sur la forme qu'il explore. Le développement de la plate-forme expérimentale nous permet maintenant de rechercher l'invariant correspondant pour une prothèse permettant l'exploration d'un environnement virtuel tri-dimensionnel. Nous ferons l'hypothèse qu'un tel invariant existe et chercherons à établir un modèle permettant d'expliquer la présence de cet invariant.

*Méthodologie*. Nous proposons d'étendre les protocoles expérimentaux appliqués aux formes bidimensionnelles proposés dans le cadre du pré-projet au cas tridimensionnel. Les tâches proposées seront donc : a) une tâche de suivi de ligne dans laquelle le sujet doit effectuer des trajets les plus rapides possible d'un bout à l'autre d'une « tige virtuelle » sans perdre le contact avec celle-ci, b) une simple tâche de discrimination de forme dans laquelle le sujet devra déterminer si la forme présentée (dans plusieurs orientations et tailles possibles) est une sphère ou un cube.

#### **Expérience 2 : STRUCTURATION DES ESPACES D'ACTION**

(Ch. Lenay, J. Droulez, N. Bullot, V. Vigneron, F. Davesne, JP. Nadal) *Principe général de l'expérience*. Un agent disposant de 2 actions possibles (notées a et b dans la suite) peut se déplacer en tout point d'une grille de dimension n quelconque. Il suffit pour cela d'ajouter une variable cyclique supplémentaire d pouvant prendre toute valeur entière comprise entre 1 et 2n (la longueur du cycle est donc 2n). Cette variable indique l'orientation de l'agent dans la grille :

- si d est inférieur ou égal à n, l'agent est orienté dans le sens positif de l'axe (d) de la grille
- si d est supérieur à n, l'agent est orienté dans le sens négatif de l'axe d-n

On peut ainsi définir l'action a comme une translation élémentaire dans la direction actuelle (d) de l'agent, et l'action b comme un changement d'orientation, soit par exemple une incrémentation de d modulo  $2n+1$ . Une infinité d'autres solutions sont évidemment possibles pour autant que les 2 actions élémentaires ne commutent pas.

On suppose maintenant que l'agent reçoit une information sensorielle fonction de sa position sur la grille (et éventuellement, mais pas nécessairement sur son orientation). Dans une version minimale, on admet qu'à chaque position sur la grille est associée un état binaire (blanc ou noir) que l'agent peut voir lorsqu'il se trouve en ce point. Théoriquement, cette information est suffisante pour pouvoir extraire des observations recueillies au cours d'une séquence aléatoire d'actions l'existence de cycles d'actions de valeur nulle, c'est-à-dire ramenant l'agent dans son état initial. La question est de savoir si un sujet humain est effectivement capable d'une telle performance et quelle est la durée de la phase d'exploration nécessaire.

*Expérience*. Le sujet est informé qu'il peut se déplacer sur une grille de dimension 2 à l'aide de 2 boutons d'action dont il ne connaît pas la fonction exacte mais dont il sait que ce sont des combinaisons de 1 à 3 translations ou changements de direction. On le laisse explorer librement la grille en observant l'état noir ou blanc de la case correspondant à la position actuelle. A intervalles réguliers, une case apparaît en rouge. Le sujet a alors la consigne de quitter cette case ; lorsque le sujet s'est éloigné de quelques cases (3 par exemple), il reçoit comme nouvelle consigne (matérialisée par coloration de la case en vert) de revenir le plus rapidement possible vers la case rouge. On enregistre la séquence d'actions réalisées par le sujet et on compare sa longueur avec celle de la séquence inverse minimum.

*Variantes*. Plusieurs variantes peuvent être proposées à partir de cette expérience de base. On pourra notamment étudier dans quelle mesure les performances des sujets dépendent :

- des connaissances préalables données au sujet (sur la dimension de la grille ; sur le type de déplacement possible engendré par les actions élémentaires)
- de la dimension de la grille (2, 3 voire plus ?)
- de la nature et de la quantité d'informations reçues par le sujet après chaque action (visibilité de plusieurs cases autour de sa position, historique des cases visitées aux pas de temps précédents, historique des actions)

*Interprétation*. L'évolution des performances des sujets dans les différentes conditions au cours de l'exploration de la grille pourra être comparée à celle prédite par le modèle théorique dans lequel on recherche les séquences minimales d'action laissant invariants les états initiaux et finaux observés.

### **Expérience 3 : PERCEPTION DE L'ESPACE ET DISTALITE (PROTHESES SENSORIELLES « VISUO-SONORES »).**

(K. O'Regan, M. Auvray, S.Hanneton). Dans le cadre du pré-projet, nous avons mené une série d'expériences pour étudier les étapes d'établissement de la notion d'espace extérieur à l'observateur (« extériorisation d'une stimulation proximale ») dans le cas de l'utilisation d'un appareil de substitution sensoriel développé par P. Meijer (Eindhoven). Par balayage gauche-droite de fines « tranches » verticales d'une scène visuelle, on transforme celle-ci en une « scène auditive », dans laquelle les pixels en haut de chaque « tranche » sont représentés par des sons aigus, et les pixels en bas de la tranche sont représentés par des sons graves. Les résultats préliminaires ont été présentés au colloque « Workshop on multimodal interactions in perception. » (15-16 avril 2002, Institut Henri Poincaré). Dans le cadre du présent projet, nous compléterons ces résultats préliminaires par des expériences mieux contrôlés. Nous étudierons par la suite la possibilité d'utiliser des systèmes de codage de la scène qui incorporent la notion de vision périphérique. La vision périphérique est à notre avis capitale pour accéder à la notion d'espace. Une autre expérience (collaboration M. Auvray, C. Lenay, J.K. O'Regan) est en préparation pour étudier l'importance de la proprioception pour l'établissement de la notion d'extériorité ou de distalité et pour la genèse d'une sensation de spatialité.

#### *Simulations et robotique*

### **Expérience 4a : MESURE DE DIMENSION INTRINSEQUE**

(V.Vigneron, F ; Davesne, S. Hanneton, J. Droulez, JP Nadal, K O'Regan). Au cours d'une expérience, le robot doit apprendre à se déplacer vers un objectif fixé à l'avance dans l'environnement artificiel non modélisé, sans avoir recours à l'odométrie, mais en construisant une carte cognitive à partir de l'évolution de ses données-capteurs. La tâche de reconnaissance lui permet de savoir dans quelle région de cette carte il se trouve : il s'agit d'une localisation non métrique. L'apprentissage, ainsi que l'établissement de la carte cognitive sera inspiré des travaux de Gaussier (Gaussier, 1995).

Les expériences menées utilisent un robot mobile Khepera, possédant huit capteurs infra-rouge (Mondada,1994). Celui-ci a été choisi car on sait que ses capacités de reconnaissance de motifs simples (coin, mur, couloir, etc.) sont loin d'être parfaites, en utilisant des données statiques (Benreguiég, 1997). Nous ne souhaitons pas que le processus de reconnaissance utilise des catégories fixées a priori. Ainsi, nous ne construisons pas une relation fonctionnelle entre l'espace des données capteurs du robot et un ensemble de symboles.

Dans un premier temps, nous raisonnons en terme d'invariant perceptif : il s'agit de déterminer une fonction dont le changement de valeur est associé à un changement de catégorie, sans pour autant étiqueter celle-ci a priori. Il semble vraisemblable de penser qu'un nombre restreint de données capteurs sont réellement informatives dans l'opération de reconnaissance. Si cela est le cas, la dimension intrinsèque  $d$  du sous-espace est strictement inférieure au nombre de capteurs. Nous supposons que  $d$  n'est probablement pas une constante et qu'une modification de  $d$  au cours du temps peut être liée avec un changement de catégorie perceptive :  $d$  est un invariant perceptif et constitue notre première phase de catégorisation.

Une expérience préalable consistera à valider le calcul de dimension intrinsèque sur des courbes de Koch pour laquelle la dimension théorique est connue. Une autre expérience consistera à évaluer le nombre de données capteurs nécessaires pour évaluer avec une précision suffisante la dimension intrinsèque. Nous déterminons  $d$  en calculant la dimension fractale du sous-espace. Deux méthodes sont envisagées: l'une utilise la dimension de similarité et l'autre la dimension de corrélation.

**Expérience 4b :** On se propose de tester sur le robot simulé les résultats théoriques obtenus dans le cadre du pré-projet, mentionnés plus haut : construction d'une représentation interne des contingences sensori-motrices par une approche statistique. En effet, les limitations de l'architecture PerAc (Gaussier, 1997) tiennent essentiellement en trois faits:

- la spécification des caractéristiques des amers visuels doit être compatible avec l'environnement réel du robot
- le robot doit continuellement percevoir l'ensemble des amers distinctifs de l'environnement
- les vecteurs d'amers visuels doivent être associables d'une manière univoque à une région de l'environnement (il ne faut pas que deux parties d'un même environnement soient trop ressemblantes)

Nous souhaitons adapter l'architecture PerAc (pour Perception/Action) spécifiée par (Gaussier,1995) à un robot possédant des capteurs plus frustrés qu'une caméra. Les limitations exposées ci-dessus imposent que le système de localisation mis en œuvre dans ce cas doit rester local et n'est pas applicable sur l'environnement entier. Les raisons à cela sont: la portée limitée des capteurs, leur faible nombre et leur imprécision. Dans le cas favorable, on peut envisager que le nombre de catégories soit plus important et que l'information locale permette une localisation correcte. Les expérimentations envisagées sur le simulateur sont les suivantes :

- Catégorisation de référence : la catégorisation s'effectue en utilisant uniquement les données à un instant  $t$  donné, grâce à un algorithme d'apprentissage,
- Première phase de catégorisation : la catégorisation s'effectuera à partir de la dimension intrinsèque  $d$  dont les limites (vis-à-vis du bruit, du nombre d'échantillons, de la dimension brute des données, etc...) auront été évaluées dans la première série d'expérience
- Deuxième phase de catégorisation : On suppose que le robot possède un nombre discret de possibilités d'action, un alphabet d'actions A,B,C,... L'expérience va consister à générer des séquences d'actions à partir de cet alphabet. On regarde l'influence de ces séquences sur les capacités discriminantes de l'invariant dimensionnel proposé au cours des expériences précédentes.

**Expérience 4c :** On se propose de remplacer les mesures métriques par des mesures de champs électro-magnétiques. Le but de cette expérience est de tester la robustesse de l'invariant perceptif à la notion de distance. L'expérience consiste à partir du simulateur Khepera à remplacer les capteurs infrarouges par des capteurs de champs magnétiques. Les sources de champ magnétiques sont les obstacles du robot. Les mêmes simulations de l'expérience 1 et 2 seront répétées avec ces nouveaux capteurs.

#### **AXE 2 : Genèse d'une notion d'objet et de lieu (individuation)**

*Hypothèse générale :* Nous proposons donc que l'espace perceptif soit structuré par les contingences issues de la confrontation des propriétés de l'environnement et de celles de l'organisme qui l'explore. De cette confrontation naissent des invariants structurant les couplages sensori-moteurs. Un objet exploré par un ou plusieurs organes des sens est alors une réalisation particulière d'un couplage respectant ces invariances. Les caractéristiques de cette réalisation peuvent servir de base, par l'expression d'une intentionnalité motrice, à l'attribution à cet objet

- d'une individualité propre (exp. 4b)
- d'une localisation (exp. 6)
- d'une appartenance à une catégorie (exp. 4a & exp. 5)

Une catégorie perceptive est alors le résultat d'un processus dynamique formé à partir d'un ensemble d'hypothèses d'évolution possible de la perception dans les instants futurs (traduisant l'intentionnalité). Du point de vue de la modélisation, il reste nécessaire d'établir la façon dont s'établit l'attribution des propriétés citées ci-dessus à un objet. On peut par exemple proposer que l'individuation soit basée sur la décorrélation d'information et repose sur le principe d'inhibition mutuelle entre des unités sensorielles différentes. Elle inclut l'utilisation d'actions permettant de guider le choix de l'hypothèse la plus valide en maximisant la décorrélation.

Nous proposons donc d'étudier la structuration des processus d'attribution de propriétés aux objets, dans des contextes expérimentaux différents, mais en utilisant une fois de plus un formalisme commun. L'accent sera mis sur la nécessité de produire des modèles pouvant être confrontés aux résultats expérimentaux.

#### *Psychologie expérimentale et imagerie*

#### **Expérience 5 : PERCEPTION TRIDIMENSIONNELLE ET INTENTIONNALITE MOTRICE**

(M. Wexler, J. Droulez, A.L. Paradis) *Hypothèse.* Dans notre approche, nous situons la vision dans une boucle sensori-motrice. Des résultats récents (Wexler et al., 2001) montrent qu'à stimulation rétinienne égale, la scène 3D est interprétée d'une manière différente si le mouvement dans l'image est généré activement ou passivement par un observateur. L'attribution de certaines propriétés aux objets peut elle-même être sous la dépendance directe des stratégies d'actions développées par le sujet (Ballard et al. 1997, Pylyshyn 2001). Dans cette partie du projet, nous souhaitons étudier par imagerie fonctionnelle les corrélats neuronaux de l'attribution dynamique, liée à l'action, des propriétés sensorielles et non-sensorielles des objets.

*Hypothèse.* Nous étudierons deux indices de profondeur : le parallaxe de mouvement et la perspective présents simultanément dans un stimulus conflictuel du type "fenêtre d'Ames". Le sujet effectuera un entraînement préalable dans un dispositif de réalité virtuelle qui permet de générer la parallaxe activement ou passivement. Une expérience préliminaire montre qu'à la fin d'un entraînement, les sujets peuvent choisir volontairement entre les indices, même en restant immobiles. Le changement – qui nécessite un effort conscient, et donne lieu à une réorganisation perceptive – entraîne-t-il un changement observable dans l'activation cérébrale ? Le traitement des informations 3D, est-il organisé d'une manière modulaire par indice ?

*Méthodologie.* La tâche du sujet est d'indiquer l'orientation 3D de la surface perçue. Nous pourrions contrôler d'une manière objective que le sujet effectue le changement subjectif demandé. La possibilité de choisir volontairement l'indice de profondeur employé fournit un paradigme très 'propre' pour tester la modularité de la vision 3D. Une

comparaison peut s'effectuer entre deux conditions qui sont identiques en stimulus et tâche. La seule différence entre les conditions sera précisément la variable d'intérêt, c'est-à-dire l'indice 3D employé.

#### **Expérience 6 : ATTRIBUTION D'UN STATUT D'IDENTIFICATION PAR L'ACTION**

(J. Droulez, N. Bullot, S. Hanneton, C. Lenay) *Hypothèse*. Dans un tâche d'exploration d'une scène tri-dimensionnelle non familière, l'identification des lieux ou des objets ne peut pas toujours se faire sur la base des seuls indices sensoriels. C'est notamment le cas lorsque les objets d'intérêt sont tous de forme et d'apparence similaires. Le sujet doit alors attribuer un statut d'identification ("marqueur") à ces objets sur la seule base des actions effectuées. Cette attribution dynamique de propriétés non sensorielles peut être nécessaire pour la planification des actions ultérieures ; par exemple, un marqueur indiquant si un objet-cible a ou non été déjà vu est nécessaire pour que le sujet ne revienne plusieurs fois sur le même objet.

*Méthodologie*. Pour permettre l'étude en IRM fonctionnelle des circuits neuronaux impliqués dans l'attribution de ces marqueurs, nous utiliserons un protocole inspiré des jeux vidéo dans lequel le sujet doit explorer un environnement 3D à la recherche d'objets-cibles tous identiques. Le signal IRM enregistré pendant l'exploration active sera contrasté avec celui obtenu lors des mêmes déplacements effectués de façon passive par le même sujet dans le même environnement. Nous nous intéresserons en particulier à l'existence éventuelle de circuits communs avec ceux mis en évidence lors de la sélection volontaire d'indices sensoriels.

#### **Expérience 7. Dynamique de la perception de formes simples**

(C. Lenay, O. Gapenne, S. Hanneton, A Roby-Brami, K. O'Regan) *Hypothèse*. Si les contingences sensorimotrices dépendent autant du répertoire d'actions accessibles au sujet que du répertoire des sensations qui l'affectent, la modification contrôlée d'une médiation technique définissant ces répertoires devra conduire à des modifications observables de l'activité perceptive, en particulier lors de la reconnaissance de formes simples. On travaille en partant de la situation de référence où l'entrée sensorielle est limitée à chaque instant à un bit d'information en tout ou rien. L'activité perceptive (pour la reconnaissance de formes noires sur fond blanc dans un espace bidimensionnel) se trouve alors déployée dans l'espace et le temps d'une trajectoire observable (ref Lenay, Hanneton, Gapenne, Nitiphan). On peut alors dégager les stratégies perceptives qui structurent les anticipations des sujets sur les sensations qu'ils devraient recevoir en fonction de leurs actions. On complique alors progressivement le parallélisme des capteurs (le nombre, la disposition et la taille des champs récepteurs commandant les stimulations sensorielles), et l'on étudie comment les trajectoires sont modifiées. On fait l'hypothèse que, via un apprentissage mesurable, les stratégies perceptives commandant des nouvelles trajectoires intègrent de nouvelles structures d'anticipation sur les sensations et permettant d'accéder à la perception de formes plus complexes. Un tel dispositif expérimental permet ainsi d'instruire les questions de l'adaptation à de nouvelles lois de contingence sensori-motrices et les processus d'acquisition des invariants liés à des formes particulières.

*Méthodologie*. Nous proposons d'utiliser la plate-forme d'expérimentation développée dans le cadre du pré-projet qui permet de proposer aux sujets des tâches de discrimination ou de reconnaissance de formes tactiles tridimensionnelles (virtuelles). Il est possible par exemple de demander aux sujets de déterminer s'ils sont en présence d'une sphère ou d'un cube (ceux-ci étant présentés dans différentes orientations avec différentes tailles). Notre intention est de tenter de retrouver pour un espace d'exploration tridimensionnel l'équivalent de l'invariant observé dans un espace d'exploration bidimensionnel et de confronter l'approche théorique développée dans ce projet aux données comportementales (via l'enregistrement des mouvements d'exploration des sujets). Nous souhaiterions en particulier aboutir à un modèle descriptif des mécanismes d'apprentissage perceptif accompagnant la réalisation de cette tâche utilisant le formalisme et les algorithmes proposés par les membres du projet.

#### *Simulation et robotique*

#### **Expérience 8 : COMPARAISON DE DEUX MODES PERCEPTIFS**

(K. O'Regan, J. Droulez, G. Stojanov, JP Nadal, JJ Clark). Un robot simulé de type Khepera est placé dans un environnement habité par deux sources d'information (un champ électrostatique et un champ électromagnétique). Le champ magnétique est généré par les obstacles entre lesquels circule le robot. Le robot possède une charge électrique permettant de "sentir" cet environnement. Ce dispositif permet d'aborder les problèmes de perception de l'environnement de manière non conventionnelle, en se prémunissant contre les a priori mettant en jeu la perception visuelle. Notons que des animaux marins ont une perception des champs électriques. Comme dans la série d'expériences précédentes, on recalculera les dimensions obtenues et vérifiera que les 2 modes perceptifs sont équivalents du point de vue des dimensions.

#### **AXE 3 : Neurosciences : séminaire exploratoire**

Dans la première demande, un volet comportait une modélisation associée à des expériences sur le cervelet (B. Barbour, JP. Nadal, V. Hakim, N. Brunel). Ce volet est maintenant entièrement financé dans le cadre d'un contrat européen, ce qui bien entendu ne supprime pas les échanges entre les participants de ce projet et ceux du projet européen. Dans le cadre du présent projet nous initions une série de séminaires centrés sur le thème du projet. L'objectif que nous nous fixons est d'étudier la possibilité d'établir des collaborations avec des neurophysiologistes centrées sur la thématique de ce projet. Une question qui nous semble importante est d'examiner la validité de la transposition des approches théoriques proposées au cadre expérimental de la neurophysiologie.

Le tableau suivant résume les participations des différents partenaires aux travaux proposés :

<b>EQUIPE</b>	<b>LNPSM</b>	<b>LPPA</b>	<b>LPS</b>	<b>COSTECH</b>	<b>LPE</b>	<b>LSC</b>
Cadre théorique et modèles	X	X	X	X	X	X
Expérience 1	R			X	X	
Expérience 2		R	X	X		X
Expérience 3	X				R	
Expérience 4	X	X	R		X	R
Expérience 5		R		X		
Expérience 6	X	R		X		
Expérience 7	X			R	X	
Expérience 8		X	R		X	X
Séminaire (Axe 3)	X	X	X	X	X	X

#### 4) calendrier

Septembre 2002 / Septembre 2003 : Finalisation des outils méthodologiques. Premières publications sur les modèles et les expériences conduites dans le cadre du pré-projet. Expériences .

Septembre 2003 / Septembre 2004 : Expériences **2-b-2** et **3-a**. Expériences avec robots **1-b-1** et **1-b-2**. premières publications sur les modèles. Premières analyses en imagerie fonctionnelle.

### 3. Conséquences attendues (valorisation)

Il s'agit d'abord d'un projet de recherche fondamentale dont les conséquences attendues sont des publications dans les revues internationales et la participation à des conférences. Mais les travaux proposés sont directement **porteurs de retombées applicatives majeures** en ce qui concerne :

- La navigation en robotique,
- Les algorithmes de classification et de reconnaissance de formes,
- L'utilisation de la réalité virtuelle et des simulateurs en vue de la formation à des situations à risque,
- La conduite de véhicule,
- Les technologies d'assistances et la réadaptation fonctionnelle.

Des dépôts de brevet sont en cours sur plusieurs systèmes de substitution sensorielle (une enveloppe Soleau déposée).

### 4. Publications dans le domaine du demandeur et des associés

**Barbour B.** (2001). An evaluation of synapse independence. *J. Neurosci.* 20:7969-7984.

**Barbour B, Isope P.** (2000) Combining loose cell-attached stimulation and recording. *J Neurosci Methods.* 103:199-208.

**Brunel N. and Nadal J.-P.** Mutual information, Fisher information and population coding. *Neural Computation*, Vol. 10 issue 7 (October 1, 1998) pp. 1731-1757.

**Brunel, N. and Hakim V.** (1999) Fast global oscillations in networks of integrate-and-fire neurons with low firing rates. *Neural Computation*, 11, 1621-1627.

**Biryukova E.V., Roby-Brami A., Frolov A.A., Mokhtari M.** (2000). Kinematics of human arm reconstructed from spatial tracking system recordings. *J. Biomech.* 33:985-995.

**Casado M, Dieudonne S, Ascher P** (2000) Presynaptic N-methyl-D-aspartate receptors at the parallel fiber-Purkinje cell synapse. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 97:11593-7.

**Clark BA, Barbour B.** (1997) Currents evoked in Bergmann glial cells by parallel fibre stimulation in rat cerebellar slices. *J Physiol.* 502:335-50.

- Clark, J.J. and O'Regan, J.K.** (2000) A Temporal-difference learning model for perceptual stability in color vision. 2000 International Conference on Pattern Recognition, Barcelona, Spain, September 2000.
- Clark, J.J.** (1998). Spatial attention and saccadic camera motion. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 1998.
- Clark, J.J.** (1998). Spatial attention and the maintenance of representations of a robot's environment", Proceedings of the 1998 Workshop on Perception for Mobile Agents, Santa Barbara, June 1998.
- F. Davesne** (2002) Étude de l'émergence de facultés d'apprentissage fiables et prédictibles d'actions réflexes, à partir de modèles paramétriques soumis à des contraintes internes – Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne.
- F. Davesne & C. Barret** (1999). Reactive Navigation of a Mobile Robot Using a Hierarchical Set of Learning Agents. IROS'99, Kyongju, Corée, 1999.
- Dieudonne S.** (1998) Submillisecond kinetics and low efficacy of parallel fibre-Golgi cell synaptic currents in the rat cerebellum. *J Physiol.* 510:845-66.
- Dieudonne S, Dumoulin A.** (2000) Serotonin-driven long-range inhibitory connections in the cerebellar cortex. *J Neurosci.* 20:1837-48.
- Hanneton S.** (1998) Le contrôle de la dynamique des mouvement : application à l'étude d'une tâche de poursuite visuo-manuelle. Thèse de Doctorat spécialité Biomathématiques de l'Université Paris 6.
- Hanneton S., Berthoz A., Droulez J., Slotine, J.J.** (1997) Does the brain use sliding variables for the control of movements?. *Biol. Cybern.*, 77, 381-393.
- Herschkwitz D. and Nadal J.-P.** (1999). Unsupervised and supervised learning: the mutual information between parameters and observations. *Phys. Rev. E*, Volume 59, issue 3 (March 1), pp. 3344-3360.
- Lenay C., Cannu S., Villon P.** (1997) Technology and Perception : the Contribution of Sensory Substitution Systems, *Second International Conference on Cognitive Technology*, Aizu, Japan, Los Alamitos: IEEE p. 44-53.
- Lenay C., Gapenne O., Hanneton S.** (2000) Les prothèses sensorielles basées sur le toucher. Processus et problèmes d'utilisation. Paru dans " Toucher pour connaître, psychologie cognitive de la perception tactile manuelle ", Yvette Hatwell, Arlette Streri et Edouard Gentaz pp 287-306.
- Lenay C., Gapenne O., Hanneton S. et Stewart J.** (1999) Perception et couplage sensorimoteur : expériences et discussion épistémologique. In A. Drogoul et J.A. Meyer Eds, " Intelligence Artificielle Située " (IAS'99). Hermès Paris, p. 71-86.
- Lenay C., Hanneton S. and Gapenne O.** (2000) Virtual Space and Perception Substitution. *IIS-IFSR-IEEE 4th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2000)*, Orlando Florida (USA). Volume III, Virtual engineering and emergent computing pp 674-677.
- Myin, E. & O'Regan, J.K.** "Perceptual consciousness, access to modality and skill theories." submitted to *J. Consciousness Studies*.
- Noë, A. & O'Regan, J. K.** (in press) On the brain-basis of visual consciousness: A sensorimotor account. In A. Noë and E. Thompson (eds.) *Vision and Mind: Selected Readings in the Philosophy of Perception* (MIT).
- O'Regan, J.K. & A. Noë** (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioural and Brain Sciences*, 24(5), en presse.
- O'Regan, J.K. & A. Noë** (2001). What it is like to see: A sensorimotor theory of visual experience. *Synthèse*, in press.
- O'Regan, J.K., R.A. Rensink, R.A. & J.J. Clark** (1999). Blindness to scene changes caused by "mudsplashes". *Nature*, 398, 34.
- Panerai F, Cornilleau-Pérès V, and Droulez J** (2001) Contribution of extra-retinal signals to the scaling of object distance during self-motion. *Perception & Psychophysics* (soumis).
- Panerai, F; Hanneton, S; Droulez, J; Cornilleau-Pérès, V** (1999). A 6-dof device to measure head movements in active vision experiments: geometric modeling and metric accuracy. *Journal of Neuroscience Methods* 2 :97-106
- Paradis A.L., Cornilleau-Pérès V., Droulez J., Van de Moortele, Lobel E., Berthoz A., Le Bihan D., Poline J.B.** (2000). Visual perception of motion and 3D structure from motion: an fMRI study. *Cerebral Cortex* 10:772-783.
- Peh CH, Panerai F, Droulez J, Cornilleau-Peres V, and Cheong LF** (2001) Absolute distance perception during in-depth head movement: calibrating optic flow with extra-retinal information. *Vision Research*, (soumis).
- Plessis-Delorme E., Didi N., Mokhtari M., Roby-Brami A.** (1998). An evaluation of two types of user control interface for the MANUS arm robot . In: *Avances in Perception-action coupling. EWEP'5*. B.Brill, A. Ledebt, G. Dietrich, A. Roby-Brami ed, éditions EDK 156-161.
- Roby-Brami A Bennis N, Mokhtari M, Baraduc P.** (2000). Hand orientation for grasping depends on the direction of the reaching movement. *Brain Research*, 869:121-9.
- Stojanov, G.** (1999). Embodiment as Metaphor: Metaphorizing-in the Environment. In C. Nehaniv (ed.) *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 1562, Springer-Verlag.
- Stojanov, G., Trajkovski, G.** (1996) Spatial Representations for Mobile Robots. Proc. 1st Congress of Mathematicians and Computer Scientists of Macedonia, Ohrid, Macedonia, 1998.
- Trajkovski, G., Stojanov, G.** (1998) Algebraic Formalization of Environment Representations. HunABC98, Budapest, Hungary.

- Vigieron et C. Barret** (1999) Approximation techniques for neuromimetic calculus. *Int. Journal of Neural Systems*, 1, 171-181, Elsevier.
- Vigieron et L. Aubry** (2001) Asymptotic results in Blind Source Separation methods, accepted in *Neural Networks*, Elsevier.
- Wexler, M. & F. Klam** (2001). Movement prediction and movement production. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 27(1), 48-64.
- Wexler, M., S.M. Kosslyn & A. Berthoz** (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- Wexler, M., F. Panerai, I. Lamouret & J. Droulez** (2001). Self-motion and the perception of stationary objects. *Nature*, 409, 85-88

**Programme Interdisciplinaire**  
**Cognition et Traitement de l'Information**

— Appel à propositions 2002 —

**3**

**Renseignements administratifs**

(4 exemplaires)

**Nom du responsable scientifique : Sylvain HANNETON**

Etablissement dont relève le responsable scientifique : Université Paris 5/CNRS

Laboratoire : Laboratoire de Neurophysique et Physiologie du Système Moteur CNRS FRE 2361

Directeur du laboratoire (nom, prénom et signature) : **Zytnicki Daniel**

Adresse complète : **CNRS FRE 2361** UFR Biomédicale des Saints Pères, Université René Descartes Paris 5  
45 rue des Saints Pères. 75270 Paris CEDEX 06

Téléphone : 01 42 86 21 38

Télécopie : 01 49 27 90 62

Adresse électronique : [daniel.zytnicki@biomedicale.univ-paris5.fr](mailto:daniel.zytnicki@biomedicale.univ-paris5.fr)

**Délégation du CNRS gestionnaire de l'opération : Délégation Paris A**

Adresse complète : 27 rue Paul Bert - 94204 Ivry Cedex 04

Téléphone : 01 49 60 40 40

Télécopie : 01 45 15 01 66

Adresse électronique :

Signature du représentant de la Délégation gestionnaire :

### Composition de l'équipe du responsable

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps (en mois)
Brunel	Nicolas	CR2	Physique Théorique	CNRS	12
Hanneton	Sylvain	MdC	STAPS/Sci. Cogn.	Univ. Paris 5	18
Roby-Brami	Agnès	CR1	Neurosciences	INSERM	6

### Composition des autres équipes participant au programme de recherche

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps
O'Regan	J. Kevin	DR 1	Psychol : vision	CNRS	12
Lorenzi	Christian	MdC	Psychol : audition	Univ. Paris 5	2
Bompas	Aline	doctorante	Psychol/Biologie	EHESS	12
Auvray	Malika	doctorante	Psychol./Philos.	EHESS	12

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps
Nadal	Jean-Pierre	DR2	Physique	CNRS/ENS	11
Hakim	Vincent	DR1	Physique	CNRS/ENS	7

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps
Gapenne	Olivier	MdC	Psychologie	UTC	6
Lenay	Charles	MdC	Sciences Cognitives	UTC	12
Stewart	John	CR1	Sciences Cognitives	CNRS	6

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps
Droulez	Jacques	DR2	Psychophysique	LPPA, CNRS	6
Wexler	Mark	CR1	Psychophysique	LPPA, CNRS	18
Paradis	Anne-Lise	CR2	Psychophysique	LPPA, CNRS	18
Bullot	Nicolas	doctorant	Psychophysique	LPPA, CNRS	12

Nom	Prénom	Grade	Discipline	Institution de rattachement	Temps
Vigneron	Vincent	MdC	INFORMATIQUE	Univ d'Evry, LSC	24
Davesne	Frédéric	Doctorant	INFORMATIQUE	Univ d'Evry, LSC	24
Barret	Claude	Professeur	ELECTRONIQUE	Univ d'Evry, LSC	6
Rybarczyk	Yves	Doctorant	ERGONOMIE-PSYC HOLOGIE	Univ. d'Evry, LSC	24

# Programme Interdisciplinaire

## Cognition et Traitement de l'Information

— Appel à propositions 2002 —

4

### Estimation financière

(4 exemplaires)

#### Titre du projet :

**Apprentissages perceptifs et contingences sensori-motrices : des compétences humaines aux performances artefactuelles**

**Nom du responsable scientifique : Sylvain HANNETON**

#### Demande financière :

- frais de laboratoire.....165 kF
- prestations de service (1) (par ex : temps de calcul, imagerie, location d'appareillage.....).....225 kF<sup>1</sup>
- frais de mission.....105 kF
- frais de gestion.....70 kF

**Equipement (HT) (2).....270 kF<sup>2</sup>**

**Montant total de l'aide demandée (HT) .....835 kF**

#### Autres financements du projet

- demandés.....
- obtenus.....

(1) prestations de service : indiquer l'objet et le nom du prestataire.

(2) équipement : indiquer en note la nature de l'équipement et justifier son acquisition.

---

<sup>1</sup> Les prestations de service demandées correspondent à de l'imagerie (80kF) et de la prestation de service en électronique et informatique (145 kF) pour la robotique et le développement de prototypes.

<sup>2</sup> L'équipement demandé concerne l'achat de deux robots Kephra (40kF), de systèmes d'acquisition de données pour l'électrophysiologie (20 kF), de dispositifs destinés aux expériences conduites en situation de réalité virtuelle (60 kF) et la participation à l'achat d'un dispositif de capture des mouvements 3D (MotionStar, 40kF). Le reste concerne essentiellement l'achat de stations de calcul informatiques.

## ANNEXE I

### Bilan du Pré-projet

Le bilan du travail mené lors de ce pré-projet est très positif pour tous les membres du réseau de collaboration constitué à cette occasion. Nous avons pu lors des 6 mois écoulés, nous réunir, préparer et organiser un colloque, conduire en commun une réflexion théorique, obtenir des résultats expérimentaux et également développer des outils méthodologiques originaux. Cette annexe présente un résumé du travail effectué.

#### Réunions de travail et séminaires

Nous avons organisé plusieurs journées de travail en commun dont les objectifs étaient

- De présenter les thématiques et objectifs de chaque équipe,
- De mettre en place un savoir commun,
- De travailler sur cette proposition de projet,
- De préparer divers séminaires et en particulier un colloque spécialisé sur la thématique

Ce travail commun de réflexion nous a permis de mettre en place des collaborations qui s'avèreront sans doute durables et surtout d'orienter notre projet afin qu'il réponde aux critiques formulées par les experts. Nous avons été aidés en cela par les séminaires organisés par les membres du projet.

Nous avons en particulier organisé dans le cadre du pré-projet un colloque le 11 mars 2002 à l'Institut Henri Poincaré (dans le cadre du semestre « Neurosciences and Computation ») intitulé « *sensory-motor coherence in artificial and natural systems* ». Le programme de ce colloque était le suivant :

- Alexandre Pouget (Rochester University). « Model of spatial representation and hemineglect ».
- Chris Miall (Oxford University). « Coordination and the cerebellum. A time sensitive system ».
- Jeanny Héroult (CNRS, Grenoble). « The McCulloch Effect : a neural network model based on source separation ».
- Yves Trotter (CNRS, Toulouse). « Neural processing of 3D space localization in primate areas V1 and V2 »
- Jean-Louis Vercher (CNRS, Marseille). « Spatial disorientation in aeronautics : combined effects of visual frames and galvanic vestibular stimulation to the perception of vertical ».
- Pierre Andry et Philippe Gaussier. « From sensory-motor coordination to imitation : an autonomous robot perspective »

L'objectif de cette journée était d'inviter plusieurs intervenants dont les thématiques étaient clairement liées au projet, et de confronter notre approche théorique à leur travaux. Par exemple, les exposés d'Alexandre Pouget, de Jean-Louis Vercher et d'Yves Trotter faisaient mention du rôle des référentiel spatiaux dans les processus perceptifs. Or ces exposés nous ont permis de constater que cette approche (différente de la notre), qui suppose que les percepts sont décrits ou « représentés » par rapport à un référentiel particulier ou « convertis » d'un référentiel à un autre (somesthésique vers visuel par exemple), était difficilement conciliable avec de nombreux résultats expérimentaux. D'autre part, les exposés de Jeanny Héroult, d'Alexandre Pouget, de Pierre Andry et Philippe Gaussier, plus théoriques, présentaient en commun la question de la modélisation des mécanismes impliqués dans les transformations sensori-motrices et leur apprentissage (que ces mécanismes soient neuronaux, ou destinés à un robot). Les auteurs ont présenté l'application d'outils théoriques (analyse en composantes indépendantes, radial basis functions, ou algorithmes d'apprentissage non supervisés) à des situations « concrètes » (données neurophysiologiques, expériences de psychophysique, tâche robotisée). Or ces outils théoriques sont justement parmi ceux dont on pense qu'ils pourraient clairement intervenir dans les modèles issus de notre réflexion. L'exposé de Chris Miall, outre qu'il avait pour thème principal la question de l'apprentissage de tâches sensori-motrices, portait sur le rôle du cervelet (et les modèles associés) dans la coordination des mouvements. Or cette structure, qui reçoit un énorme flux d'informations sensorielles et motrices, nous semble présenter une architecture adaptée à la mise en cohérence des informations sensorielles et motrice, non seulement dans le but de coordonner les mouvements, mais également de construire les équivalents internes des contingences sensori-motrices dont nous pensons qu'elles jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de la perception.

Mais il faut ajouter à ce séminaire les journées suivantes clairement liées à la problématique proposée, organisées par des membres de notre pré-projet :

- Colloque organisé par JP Nadal et K O'Regan dans le cadre de l'atelier Géométrie et cognition : « [La genèse de la perception et de la notion d'espace chez le robot et l'homme](#) ». Ce colloque s'est tenu le 18 octobre 2002 à l'École Normale Supérieure avec pour intervenants : K. O'Regan (LPE, Paris), S. Hanneton (LNPSM, Paris), H. Segond (Strasbourg), A. Bompas (LPE, Paris), C. Lenay (Costech, Compiègne), G. Stojanov (Univ. Skopje), D. Philipona (École Polytechnique), M. Auvray (LPE, Paris), J. Clark (CIM, McGill), W.

Gerstner (EPFL, Lausanne), P. Bessière (Grenoble), P. Gaussier (Cergy), A. Pouget (Rochester, USA), J. Droulez (Coll. France, Paris), E. Myin (VUB, Bruxelles).

- Journée scientifique ARCo (18 Janvier 2002, UFR Sciences humaines cliniques, Paris 10<sup>e</sup>), « **Expériences perceptives : constitution, évolution et adaptation** ». intervenants : Olivier Gapenne (Compiègne), Yvette Hatwell (Grenoble), Maryse Siksou (Paris 7), Kevin O'Regan (LPE CNRS, Paris 5).
- Colloque organisé par J.K.O'Regan, J.J. Clark, A. Bompas & J-P. Nadal financé par Projet Cognitique: « Workshop on multimodal interactions in perception. » (15-16 avril 2002, Institut Henri Poincaré) intervenants : M. Auvray (LPE, Paris ), A. Bicchi (Pisa) ; M. Ernst (Max Planck, Tübingen), V. Hayward (CIM, McGill) ; A. Kheddar (Evry), A. Lecuyer (CEA, Fontenay-aux Roses), L. Lemaire (Strasbourg), R. Manzotti (Genoa), P. Meijer (Phillips, Eindhoven).

Ces nombreuses journées d'échange scientifique témoignent de la dynamique de communication des membres du projet et des liens créés.

### Développement des outils méthodologiques

Nous avons initié le développement de deux outils essentiels dans le cadre de ce projet. Le premier outil est un logiciel, **simulateur de robots** (voir Annexe II) évoluant dans un monde bidimensionnel. Ces robots présentent des caractéristiques proches des robots Khepera<sup>TM</sup> et dont les capteurs et actionneurs sont configurables par l'utilisateur. Ce simulateur est pour nous essentiel car il permet de questionner l'applicabilité des algorithmes issus de nos approches théoriques. Il faut noter que le financement du pré-projet nous a permis d'acquérir un robot Khepera qui est destiné au test des algorithmes en environnement réel. Le second outil mis à la disposition de notre réseau est une **plate-forme** autorisant la mise en place d'expériences de Psychologie Expérimentale dans le cadre de l'étude des apprentissages perceptifs. Cette plate-forme articulée autour d'un ordinateur suffisamment puissant, est dotée de systèmes d'acquisitions de signaux (EMG, EEG, capture de mouvement 6D Polhemus<sup>TM</sup> et MotionStar<sup>TM</sup>) et de systèmes de production de stimulations sonores, tactiles et visuelles. Les développements logiciels associés permettent ainsi de présenter en temps réel au sujet d'expérience des stimulations sensorielles dans une ou plusieurs modalités sensorielles fonctions des mouvements qu'il produit (et éventuellement de son activité musculaire ou électroencéphalographique). Un des grands avantages que présente cette plate-forme est de permettre l'enregistrement des signaux d'entrée et de sortie pour leur analyse. La première utilisation de ce système a été la mise en place d'expériences impliquant la perception tactiles d'objets tridimensionnels virtuels. Un développement logiciel important a été réalisé dans le cadre de la mise en place de ces deux outils qui sont à la disposition de tous les membres du projet.

### Partage et développement des modèles théoriques

Les travaux théoriques développés dans le cadre du pré-projet concernent la question de la découverte de la dimensionnalité de l'espace par un artefact qui le parcourt et sa capacité à en déduire des stratégies d'exploration de cet espace. Ces travaux ont pris la forme de deux textes de travail. Le premier s'intitule « la perception de l'espace » (D. Philipona, J.K. O'Regan, J.P. Nadal ; présenté au colloque « Invariants dans les systèmes complexes » Amiens, le 17 mai 2002 ; article en cours de préparation) et le second « structuration des espaces d'état et d'action » (J. Droulez). Ces deux approches tentent de répondre à la même question avec des approches théoriques légèrement différentes. La première étude utilise une approche algébrique dans laquelle l'état de l'environnement, les positions du robot, les ordres moteurs et les sensations appartiennent à des espaces vectoriels normés complets. L'algorithme utilisé sera mis à l'épreuve dans une application concrète à base de robot Khepera (en collaboration avec V. Vigneron).

Dans la seconde étude, ces mêmes grandeurs appartiennent à des espaces discrets (l'artefact porte des capteurs binaires et effectue des déplacements élémentaires). Ces deux approches complémentaires ont permis une unification des concepts et notations et ont permis d'obtenir des résultats tout à fait intéressants dont voici quelques exemples. Dans la première étude, lorsque l'on considère le cas où les espaces cités ci-dessus sont continus et de dimension finie, l'observation des changements des sensations résultant de petites variations des commandes motrices permet de déduire la dimension locale des espaces considérés. La seconde étude a permis de montrer qu'un artefact peut construire une « représentation interne » équivalente (isomorphe à l'espace dans lequel il se déplace) de son état à partir de l'observation de l'état de ses capteurs et de la succession des commandes motrices qu'il génère. En utilisant comme loi de composition interne à l'espace A des actions élémentaires la concaténation d'actions, on peut montrer qu'il existe une relation d'équivalence dans A. Deux actions élémentaires sont équivalentes si, à partir du même état initial elles conduisent l'artefact dans le même état final. On peut alors montrer que l'ensemble des classes d'équivalence ainsi défini est un groupe. En utilisant le principe de réversibilité des actions, on peut alors proposer un algorithme permettant à l'artefact de reconstruire, grâce à la génération de séquence d'actions au départ aléatoires une représentation interne de l'environnement (lui permettant de s'y déplacer). Cet algorithme a été simulé avec succès sur des cas simples. Nous proposons dans le cadre du présent projet de passer à une phase expérimentale où nous testerons

l'application de ces principes théoriques à la simulation et l'expérimentation en robotique et à l'analyse du comportement de sujets humains effectuant les mêmes tâches (ou très proches) que les robots ou artefacts.

### **Les premiers résultats expérimentaux**

Dans le cadre du pré-projet, une expérience de psychologie expérimentale impliquant la perception de segments tactiles virtuels a donné ses premiers résultats (Charles Lenay, Nitiphan Sribunruangrit, S. Hanne-ton). Le but de cette expérience était à la fois de déterminer les caractéristiques du couplage sensori-moteur utilisé par les sujets pour percevoir la forme à l'aide du dispositif et l'influence des paramètres de taille et de résolution de la prothèse utilisée. Le dispositif implique l'utilisation d'une tablette graphique et d'un stimulateur tactile composé de deux matrices Braille accolées (l'ensemble constituant une matrice de 16 picots). L'état des picots est déterminé par l'état d'une matrice de champs récepteurs (sorte de rétine virtuelle) que le sujet déplace sur la tablette. La tâche demandée au sujet était d'effectuer des aller-retour les plus rapides possibles d'un bout à l'autre d'un segment horizontal. Nous avons fait varier la taille et la résolution du champ récepteur. Cette expérience a d'abord permis de quantifier les apports respectifs du parallélisme et de la résolution de la « rétine tactile » aux performances des sujets. Mais les données fournies par cette expérience nous ont permis également de confirmer la stabilité d'un invariant associé à ce type de tâche : la matrice de champs récepteurs déplacé par les sujets traverse le segment lorsque sa vitesse tangentielle est maximale et sa courbure minimale. Nous pensons que cet invariant est le reflet d'une optimisation du couplage entre le système de perception (artificiel) employé et les propriétés intrinsèques des organes et circuits neuronaux impliqués dans la sensori-motricité liée à cette tâche. Notre objectif est de rechercher les critères de cette optimisation (en relation avec les travaux théoriques cités ci-dessus) et de proposer un modèle

Une seconde expérience en cours implique la perception de l'orientation de segments virtuels perçus par le même type de système prothétique. Cependant la méthodologie de cette expérience (Sylvain Hanne-ton, Charles Lenay, Dounia Kachour-Taleb) utilise un système de capture de mouvements tridimensionnel qui permet l'enregistrement des mouvements du sujet dans un volume plus grand. Il est demandé au sujet d'explorer la surface d'une table sur laquelle repose un cylindre plein virtuel disposé selon différentes orientations (cylindre de 10 cm de long et 2 de large). Lorsque le capteur que tient le sujet entre à l'intérieur du cylindre, ce sujet reçoit une stimulation tactile générée par un moteur-vibreur. Il est ensuite demandé au sujet de reproduire l'orientation de ce cylindre en traçant une ligne sur la table. Pour cela, il est demandé aux sujets de tracer une ligne de même orientation que l'orientation perçue, soit dans la zone de la table où se situe le cylindre, soit dans une zone éloignée après un déplacement passif de la main. L'objectif de cette expérience est de déterminer la sensibilité (ou la robustesse) de l'estimation et de la mémorisation des caractéristiques propres de l'objet à des variations des informations proprioceptives ou motrices. Autrement dit, les sujets sont-ils capables de conserver la mémoire des caractéristiques d'un objet perçu dans une zone de leur espace proximal s'ils doivent reproduire ces caractéristiques dans une autre zone ? L'intérêt de cette expérience est également de fournir un grand nombre de données sur les stratégies exploratoires développées par les sujets lorsqu'ils apprennent à utiliser la prothèse sensorielle simple qui leur est proposée. Cette expérience nous a également permis de mettre en place un dispositif nous autorisant dès à présent à étendre notre approche à la perception d'objets tactiles virtuels tridimensionnels et de rechercher les invariants équivalents de ceux découverts dans un cadre bi-dimensionnel.

Une série d'expériences est également en cours (M. Auvray, S. Hanne-ton, J.K. O'Regan, C. Lenay) pour étudier les étapes d'établissement de la notion d'espace extérieur à l'observateur (« extériorisation d'une stimulation proximale ») dans le cas de l'utilisation d'un appareil de substitution sensoriel développé par P. Meijer (Eindhoven). Par balayage gauche-droite de fines « tranches » verticales d'une scène visuelle, on transforme celle-ci en une « scène auditive », dans laquelle les pixels en haut de chaque « tranche » sont représentés par des sons aigus, et les pixels en bas de la tranche sont représentés par des sons graves. Les résultats préliminaires ont été présentés au colloque « Workshop on multimodal interactions in perception. » (15-16 avril 2002, Institut Henri Poincaré). On montre chez un observateur qui utilise cet appareil avec les yeux bandés, et qui accède à son environnement uniquement à l'aide des sons produit par l'appareil, qu'il est effectivement possible de faire apparaître une « distalité » et ensuite la notion d'espace au bout de 5 à 10 heures d'entraînement. Nous étudions également la capacité de reconnaître des formes simples. Dans le cadre du présent projet, nous compléterons ces résultats préliminaires par des expériences mieux contrôlées. Nous étudierons par la suite la possibilité d'utiliser des systèmes de codage de la scène qui incorporent la notion de vision périphérique. La vision périphérique est à notre avis capitale pour accéder à la notion d'espace. Une autre expérience (collaboration M. Auvray, C. Lenay, J.K. O'Regan) est en préparation pour étudier l'importance de la proprioception pour l'établissement de la notion d'extériorité ou de distalité et pour la genèse d'une sensation de spatialité.

### **Les financements obtenus par les différentes équipes en lien avec le projet**

La thématique centrale de ce pré-projet a bénéficié de nombreux autres financements obtenus dans le cadre d'autres appels d'offres. Ainsi par exemple, le développement de la plate-forme expérimentale au LNPSM (FRE 2361) est soutenu par la Fondation EDF, et le département STIC du CNRS (soutien « jeune équipe » 2001). Le soutien de l'action Cognitive à l'équipe COSTECH de l'UTC permet le financement du développement d'outils logiciels directement utilisable dans le cadre des expériences de perception prothésisée de ce projet. Le travail théorique proposé dans le pré-projet concernant le rôle du cervelet a reçu un financement spécifique dans le cadre d'un contrat européen (B. Barbour, J.P. Nadal). Même si le budget dont nous avons bénéficié pour ce pré-projet était faible au regard de ces autres soutiens, celui-ci a joué un rôle essentiel, celui de fédérer les différents participants et d'unifier les approches.

### **Conclusion**

Nous espérons que ce bilan succinct du pré-projet vous a convaincu de l'importance du travail et des progrès accomplis par les différents partenaires au cours des six mois écoulés. Les deux principales critiques formulées par le Conseil scientifique concernaient d'une part la durée du projet proposé (jugé trop ambitieux pour une durée de 2 ans) et un certain flou sur la nature de la collaboration entre les partenaires. Ce projet était certes ambitieux, mais nous avons montré qu'il nous était possible en 6 mois, de développer la méthodologie dont nous avions besoin (le simulateur et la plate-forme expérimentale) et d'obtenir les premiers résultats expérimentaux. Sur le plan théorique, les échanges et collaboration entre les différents partenaires ont été très fréquents et fructueux, puisqu'ils nous ont permis de confronter les différentes approches théoriques et de mener en commun les premières expériences. Nous voudrions également souligner qu'il n'est pas apparu de dissociation entre le travail des expérimentalistes et des théoriciens puisque les discussions des modèles et des protocoles expérimentaux ont été menées en commun. Le bénéfice apporté à tous par la collaboration fédérée par ce pré-projet nous a convaincu de vous proposer le présent projet. Si le nombre d'équipe impliqué reste élevé, c'est qu'il nous apparaît difficile de scinder ce partenariat qui fonctionne très bien actuellement.

## Annexe II : Outils méthodologiques de simulation Et d'expérimentation

### Le simulateur de robots

L'objectif du simulateur est de fournir une base logicielle à une série d'expériences.

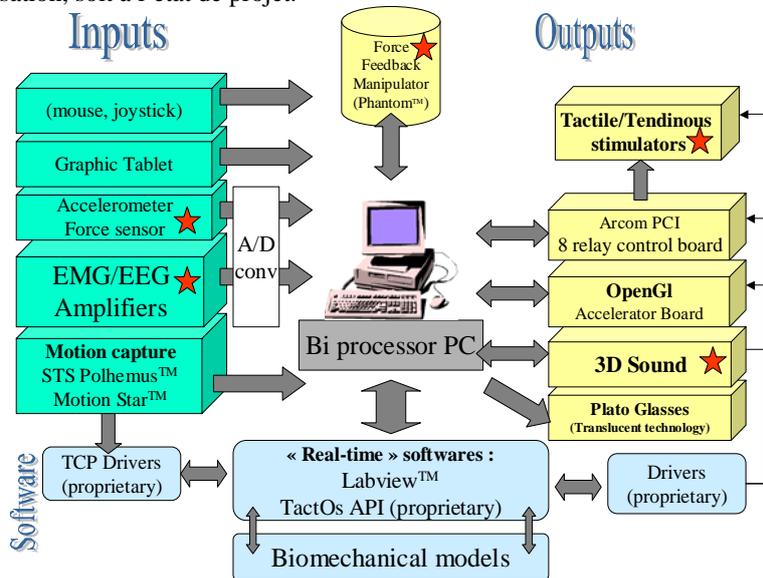
Les fonctionnalités

Les quatre fonctionnalités générales du simulateur sont les suivantes :

- créer un environnement simple de type ``appartement''. Pour cela, un éditeur d'environnement est associé au simulateur. Cet éditeur permet de modéliser un environnement à partir des primitives que sont les lignes brisées et les cercles.
- spécifier les paramètres généraux du robot. Les composants disponibles (type du modèle physique, type des capteurs, type du contrôleur perception/action) sont spécifiés dans l'implémentation. L'utilisateur peut les sélectionner au travers d'un éditeur pour ``créer" un robot.
- simuler le comportement d'un robot mobile dans son environnement.
- reconstituer une simulation précédemment enregistrée.
- En plus d'une restitution fidèle du comportement réel d'un robot mobile Khepera, le simulateur permet de se détacher de contraintes réelles. Il devient possible de munir le robot de capteurs idéaux (mesures non bruitées, portée non limitée,...), mais aussi de faire les mesures aussi souvent que nécessaire. Ainsi, si la portée des capteurs est grande par rapport à la taille de l'environnement (portée des capteurs d'un Khepera réel est de l'ordre du décimètre), et que les capteurs sont nombreux, on peut reproduire des conditions quasi-identiques à celles qui seraient obtenues avec un télémètre laser.

### Une plate-forme expérimentale pour l'étude de l'apprentissage perceptif

Le schéma ci-dessous détaille les fonctions et aspects techniques liés au projet de développement de la plate-forme expérimentale. Il s'agit ici de la présentation de l'objectif (la réalisation « idéale »). Les blocs portant une étoile sont soit en cours de réalisation, soit à l'état de projet.



**Figure 1. Projet de développement d'une plate-forme d'étude de la dynamique de l'apprentissage sensori-moteur. Les modules portant une étoile sont incomplètement réalisés ou en projet**

### Annexe III : bibliographie associée au « contexte scientifique »

- Arno P., De Volder AG, Vanlierde A, Wanet-Defalque MC, Strel E, Robert A, Sanabria-Bohorquez S, Veraart C.** (2001). Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision. *NeuroImage* 13(4) :632-645 (2001).
- Bach-y-Rita, P.** (1972). Brain mechanisms in sensory substitution. New York Academic Press.
- Ballard, D H; Hayhoe, M M; Pook, P K; Rao, R P** (1997). Deictic codes for the embodiment of cognition. *Behavioral and Brain Sciences* 20(4) :723-742; discussion 743-767 .
- Imamizu, H; Miyauchi, S; Tamada, T; Sasaki, Y; Takino, R; Pütz, B; Yoshioka, T; Kawato, M** (2000). Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403-6766(13) :192-195.
- Kawato, M.** (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6) :718-727.
- Kleim, J A; Vij, K; Ballard, D H; Greenough, W T.** (1997). Learning-dependent synaptic modifications in the cerebellar cortex of the adult rat persist for at least four weeks. *Journal of Neuroscience*, 17(2) :717-721
- O'Regan J.K. & Noë KA.** (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences* 24(5).
- O'Regan, J.K., Rensink, R.A. & J.J. Clark** (1999). Blindness to scene changes caused by “mudsplashes”. *Nature*, 398, 34.
- Parsons LM.** (2001). Exploring the functional neuroanatomy of music performance, perception, and comprehension. *Ann N Y Acad Sci* 930:211-31.
- Pylyshyn, Z W** (2001). Visual indexes, preconceptual objects, and situated vision. *Cognition* 80(1-2) :127-158
- Rao, R P; Ballard, D H.** Dynamic model of visual recognition predicts neural response properties in the visual cortex. *Neural Computation* 9(4) : 721-763.
- Rapoport M, van Reekum R, Mayberg H.** (2000).The role of the cerebellum in cognition and behavior: a selective review. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci.* 12:193-8.
- Scholz, J P; Schönner, G** (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research* 126(3) :289-306.
- Slotine JJE and Lohmiller W** (2001). Modularity, evolution, and the binding problem: a view from stability theory. *Neural Networks* 14(2) : 137-145.
- Stojanov, G.** (1999). Embodiment as Metaphor: Metaphorizing-in the Environment in C. Nehaniv (ed.) *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 1562, Springer-Verlag.
- Thelen, E; Schönner, G; Scheier, C; Smith, L B** (2001). The dynamics of embodiment: a field theory of infant perseverative reaching. *Behavioral and Brain Sciences* 24(1) :1-34; discussion 34-86
- Vaina LM, Solomon J, Chowdhury S, Sinha P, Belliveau JW.** (2001).Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A* 98:11656-11661
- Wexler, M., F. Panerai, I. Lamouret & J. Droulez** (2001). Self-motion and the perception of stationary objects. *Nature*, 409, 85-88.