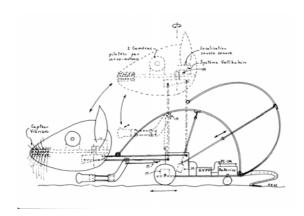
## Le projet Psikharpax: objectifs et réalisations

# Jean-Arcady Meyer AnimatLab/LIP6



### I. Objectifs

Le projet Psikharpax [16][17][24][27] regroupe plusieurs laboratoires universitaires -- le LPPA du Collège de France (Paris), le LIRMM (Montpellier), le Center for Neuromimetic Systems du Swiss Federal Institute of Technology (Lausanne), l'Adaptive Behaviour Research Group (Sheffield University) et l'AnimatLab du Lip6 (Paris) -- et deux sociétés privées -- BEV et Wany. Il vise à produire un rat artificiel, dont la morphologie et le contrôle seront largement inspirés du rat naturel, afin de lui permettre d'exhiber des capacités d'autonomie et d'adaptation originales par rapport à celles des robots actuels. Sans intervention humaine, ce rat sera capable de "survivre" dans un environnement plus ou moins inconnu et menaçant, parce qu'il saura décider quoi faire à tout moment et parce qu'il saura apprendre quels comportements sont adaptés à la satisfaction de quels buts.

Les objectifs poursuivis sont à la fois fondamentaux et appliqués. D'une part, dans le but de tester la cohérence et la complétude de nos connaissances sur le fonctionnement du système nerveux du rat et sur les mécanismes qui concourent à ses capacités adaptatives, ce projet vise à intégrer les mécanismes en question dans un robot pouvant être confronté aux mêmes situations que celles que peut rencontrer un rat réel en laboratoire ou dans la nature. D'autre part, la mise au point d'un robot adaptatif, capable d'autonomie dans le choix de ses buts et de ses actions, présente un intérêt applicatif évident en regard de toutes les situations où un agent artificiel doit assurer sa « survie » ou accomplir sa mission sans l'aide de l'homme et dans un milieu plus ou moins imprévisible.

Alors que les tenants de l'Intelligence Artificielle traditionnelle ont assez largement échoué à produire des systèmes aussi intelligents que l'homme, alors que les robots autonomes produits par les ingénieurs en vue d'accomplir une tâche donnée s'accommodent fort mal de circonstances imprévues, le robot Psikharpax servira à démontrer l'étendue des comportements adaptatifs qu'il est possible de copier de la nature. Ainsi, plutôt que de chercher à reproduire des processus cognitifs complexes isolés, que l'homme seul peut exhiber (raisonner, jouer aux échecs, parler, calculer...), le projet Psikharpax vise à copier et à intégrer les capacités adaptatives basiques que l'homme partage avec les animaux (se déplacer, éviter des obstacles, s'orienter, enchaîner des actions,...) parce qu'elles constituent les primitives de la cognition humaine et parce qu'elles sont peut-être indispensables à sa compréhension. De même, alors que les roboticiens qualifient d'"autonomes" des artefacts capables d'accomplir un très petit nombre de tâches (généralement une seule) conçues au service de l'homme et s'exécutant dans un environnement généralement très soigneusement contrôlé, le rat Psikharpax "vivra sa vie" dans

l'environnement normal et changeant d'un laboratoire, au seul service de lui-même, c'est-à-dire au gré de ses nombreuses motivations (comme se nourrir, boire, se reposer ou échapper à ses prédateurs) et de ses émotions (comme la peur, l'agressivité, la satisfaction ou le dégoût).

Plus spécifiquement, le robot Psikharpax devra être capable:

- 1) d'explorer son environnement en vue d'en élaborer une "carte cognitive";
- 2) d'utiliser cette carte pour se positionner lui-même et pour localiser les endroits où des récompenses ou des punitions ont été reçues ;
- 3) d'apprendre quels comportements et quels objets dans l'environnement engendrent quelles émotions et satisfont quelles motivations;
- 4) d'utiliser son système motivationnel pour sélectionner le but courant à satisfaire, comme d'aller se nourrir lorsqu'il a faim ou d'aller boire lorsqu'il a soif;
- 5) de modifier son comportement courant en fonction de ses émotions, notamment sous l'effet de la peur engendrée par la confrontation avec un danger quelconque;
- 6) de contrôler son bilan énergétique, notamment par une alternance de périodes d'activité et repos;

Pour ce faire, Psikharpax sera équipé de senseurs visuels (avec 6 "muscles" pour chaque œil, Figure 2), tactiles (50 vibrisses de part et d'autre du museau) et auditifs (2 cochlées électroniques), d'un système (accélérations vestibulaire linéaires angulaires) et de propriocepteurs (odométrie). Bien qu'utilisant des roues pour se déplacer, il pourra se servir de ses 2 pattes antérieures pour saisir des objets. Enfin, il pourra se redresser pour inspecter son environnement à plus grande distance.



Figure 2. L'un des yeux de Psikharpax.

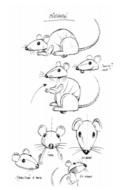


Figure 3. Esquisses de maquette.

Quant à son système nerveux, il sera largement inspiré de celui du rat naturel, notamment de l'anatomie et de la physiologie de structures nerveuses comme l'hippocampe, les ganglions de la base et le cortex pré-frontal.

Par ailleurs, un habillage de la maquette finale sera spécialement conçu en vue de la production d'un robot attractif destiné à des démonstrations grand-public (Figure 3).

#### II. Situation générale du projet

Plusieurs conférences (par exemple Simulation of Adaptive Behavior 2002 à Edimburgh, UK ou Bioengineered and Bioinspired Systems 2003, Maspalomas, Espagne) ou ouvrages de synthèse récents (par exemple, Bar-Cohen, Y. and Breazeal, C. 2003. Biologically Inspired Intelligent Robots, SPIE

Press) ont été dévolus à la modélisation de mécanismes adaptatifs inspirés de la biologie. Bien que ces conférences aient fait état de nombreux progrès dans la conception et la mise au point de senseurs ou d'effecteurs artificiels inspirés de ceux des animaux, il est clair qu'il y a encore peu de travaux portant sur les architectures de contrôle et que, lorsque de tels travaux existent, ils sont essentiellement centrés sur les systèmes nerveux des invertébrés. Peu de groupes dans le monde travaillent sur des systèmes de contrôle, des comportements et des capacités adaptatives copiant ceux des mammifères. De plus, les travaux correspondants sont généralement consacrés à des comportements particuliers (par exemple, la locomotion chez le chien ou l'alimentation chez la souris), à l'exception de 4 projets qui ont quelque parenté avec le projet Psikharpax. En particulier, les projets Skinnerbot (Saksida et Touretzky) et Cyber Rodent (Doya) visent à implanter dans un robot des mécanismes d'apprentissage étudiés chez le rat. Le projet IST européen AMouse est, lui, essentiellement centré sur la fusion de senseurs et privilégie l'étude des vibrisses chez un rongeur artificiel. Quant au projet de robot-rat de l'Université de Waseda (Aoki), il vise à étudier les interactions comportementales entre ce robot et un rat réel. Néanmoins, le projet Psikharpax est le premier qui envisage tous ces aspects à la fois, en intégrant plusieurs senseurs, plusieurs variétés d'apprentissage, et plusieurs mécanismes de contrôle; en gérant des motivations, des émotions et des capacités de planification; en exhibant des comportements aussi nombreux, différents et éventuellement incompatibles que le repos, l'exploration, la recherche de nourriture ou de boisson, ou l'évitement de prédateurs.

Le projet Psikharpax - qui est clairement à l'interface de nombreuses disciplines: informatique, robotique, neurosciences, éthologie et sciences cognitives notamment - bénéficie de plusieurs financements. Ainsi, il a été subventionné en 2002 et 2003 par le programme interdisciplinaire ROBEA du CNRS. Il bénéficie également d'une subvention LIP6, en tant que projet interne au laboratoire. Il a, enfin, été retenu et subventionné en 2003, en tant que pré-projet par l'ACI Neurosciences Intégratives et Computationnelles du MJER.

#### III. Recherches en cours

Depuis son lancement, plusieurs séries de recherches ont porté sur la mise au point d'algorithmes de vision artificielle "biologiquement plausibles". Le LIRMM a, en particulier, appliqué la stéréovision couleur dynamique aux actions réflexes et à la détermination de cartes en robotique mobile. Ces travaux ont permis d'investiguer et de comparer plusieurs approches en vision artificielle, notamment de développer plusieurs systèmes utilisant des réseaux neuronaux probabilistes pour la mise en correspondance d'indices visuels (cartes de distances) et pour la segmentation d'images couleurs (reconnaissance d'amers) [8]. Leur intégration sur une carte de prototypage rapide (circuits EPLD) [17] et leur test sur un robot mobile du LIRMM devraient être réalisés en 2003-2004.

D'autres travaux concernant la vision sont évoqués sur la figure 4 ci-dessous. Ils ont porté sur l'incidence des données visuelles sur le sens de l'orientation de Psikharpax. Ainsi, un modèle de fonctionnement du postsubiculum et des cellules de direction de la tête, inspiré par des expériences conduites au sein du LPPA sur des rats réels, est en cours de mise au point. Avec ce modèle, la dérive naturelle des informations vestibulaires renseignant le robot sur ses changements d'orientation sera combattue grâce à des informations visuelles éventuellement plus fiables [9][20]. Cette fiabilité pourra, en particulier, être estimée grâce à un autre travail en cours qui utilise le flux optique pour déterminer si un objet est proche ou lointain. Dans le premier cas, cet indicateur de direction est peu fiable, alors qu'il l'est dans le second [21]. D'autres recherches actuelles ont vocation, elles aussi, à permettre de recalibrer le sens de la direction du robot, à partir des directions dans lesquelles un certain nombre d'amers sont détectés en tout point de l'environnement [3][13]. Enfin, un travail complémentaire contribuera à la reconnaissance des objets de l'environnement, puisqu'il vise à permettre à un robot qui se déplace au voisinage d'un objet donné d'en reconstituer la forme tri-dimensionnelle [19].

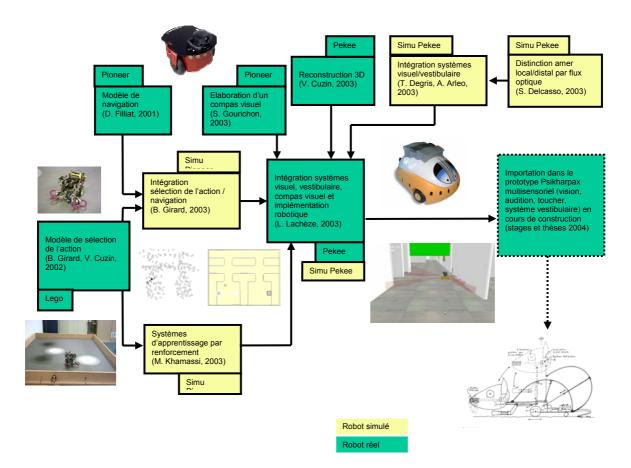


Figure 4. Les recherches sur Psikharpax ont été conduites aussi bien en simulation que sur divers robots (Pioneer, Lego, Pekee). Elles sont destinées à converger lors de l'implémentation sur la maquette finale en cours de construction.

Par ailleurs, un modèle permettant à un robot Pioneer d'explorer un environnement de laboratoire inconnu, de s'y localiser et de planifier une trajectoire vers un but a été mis au point [9][22] (Figure 5). Dans un premier stade, ce modèle, qui relève davantage de la robotique classique [1][5] que de la biologie, nous a servi à tester des architectures plus complexes combinant navigation et sélection de l'action.

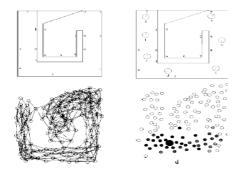


Figure 5. A gauche: un exemple de carte cognitive (haut) construite par un robot explorant un environnement inconnu (bas). A droite: la carte cognitive peut servir au robot pour se localiser parce que la distribution de l'activité des cellules de lieux qu'elle contient change à mesure que le robot passe d'un lieu a à un lieu b, puis à un lieu c, etc (haut). Ainsi, lorsque le robot est au lieu d, une bulle d'activité dans la carte est centrée sur la cellule de lieu correspondante et s'étend aux cellules voisines (bas).



Figure 6. A gauche: un environnement présentant deux séries de ressources (A et B) indispensables à la "survie" d'un robot. A droite : le robot Lego équipé de senseurs visuels (A) et de détecteurs de contact (B).

Concernant l'aptitude de Psikharpax a gérer ses besoins et motivations, un modèle de sélection de l'action, inspiré de l'anatomie et de la physiologie des ganglions de la base chez le rat et proposé par l'ABRG de Sheffield, a été utilisé pour permettre à un robot Lego, construit pour la circonstance, de "survivre" dans un environnement où deux séries de ressources indispensables à cette survie -- comme de la nourriture et de la boisson -- pouvaient être "consommées" [2][12] (Figure 6).

Dans la mesure où ce robot n'utilisait aucune carte pour se localiser lui-même ou pour localiser sa nourriture, dans la mesure où il ne pouvait donc capitaliser que sur la chance pour trouver à temps la ressource appropriée, un travail complémentaire à été dédié à la connexion en simulation des deux modèles de navigation et de sélection de l'action qui viennent d'être évoqués [11][23]. Ainsi, un robot simulé peut "survivre" dans l'environnement de la figure 7, au sein duquel il doit trouver et exploiter des sources de récompenses, tout en évitant des sources de punitions. Pour ce faire, il élabore une carte cognitive de son environnement à mesure qu'il l'explore et il se sert de cette carte pour se localiser et pour mémoriser les emplacements des récompenses et des punitions. A tout moment, il décide de l'action appropriée à effectuer pour assurer sa survie, qu'il s'agisse d'un déplacement pour vérifier qu'il est bien situé à l'endroit où il croit être, d'un déplacement pour éviter un obstacle ou une source de danger, ou d'une série de mouvements permettant de consommer une nourriture donnée.

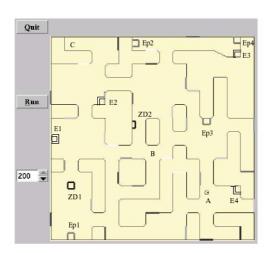


Figure 7. Un environnement complexe dans lequel deux séries de sources de récompenses  $(E_i \ et \ Ep_i)$  et une série de sources de punitions  $(ZD_i)$  sont présentes.

Un autre travail a porté sur la mise au point d'un modèle de planification biomimétique basé sur les colonnes corticales [26], travail destiné à préciser les interactions hippocampe-ganglions de la base-cortex préfrontal. A terme, il servira à l'élaboration d'un modèle biomimétique complet de ces interactions, à partir notamment d'une nouvelle version du modèle de navigation qui capitalisera sur les collaborations AnimatLab/LPPA/CNS\_Lausane. Il est également prévu de comparer les résultats ainsi obtenus aux approches plus traditionnelles développées au sein du LIRMM, tant en matière de navigation [7][14] que de sélection de l'action. Ce dernier travail été effectué dans le cadre d'une collaboration LIRMM/Wany et a porté sur l'extension des Zones Virtuelles Déformables aux réflexes comportementaux d'un robot mobile afin de doter ce dernier de réflexes généraux d'action apparaissant au gré d'un état interne « émotionnel » (faim, soif, danger, etc).

Enfin, dans le but de doter Psikharpax d'autres facultés d'apprentissage que celle de construire sa carte cognitive, diverses recherches ont porté sur la mise en œuvre de mécanismes d'apprentissage par

renforcement. En particulier, certaines hypothèses sur les rôles possibles de la dopamine dans les ganglions de la base ont été testées en simulation et comparées à des données expérimentales obtenues au LPPA [14][25]. Ces recherches ont vocation à permettre au rat Psikharpax d'apprendre quels objets dans l'environnement sont sources de récompense ou de punitions et quelles séquences d'actions sont susceptibles de conduire aux endroits où telle ou telle motivation peut être satisfaite. Ainsi, dans le labyrinthe en croix de la figure 8, un robot simulé doit apprendre à rejoindre le centre du labyrinthe afin qu'une lumière s'allume au-dessus de l'une des quatre extrémités de ce labyrinthe. Ce signal lui indique où aller pour obtenir une récompense, l'emplacement correspondant changeant au hasard au cours d'essais successifs. Selon l'architecture d'apprentissage utilisée, les résultats obtenus à ce jour montrent que le robot peut n'apprendre quoi faire pour accéder à la ressource qu'au voisinage immédiat de cette dernière, ou qu'il peut avoir appris à la rejoindre lorsque, par chance, il est arrivé au centre du labyrinthe. Après qu'il ait donc appris à exploiter l'information lumineuse indiquant l'emplacement de la ressource lors d'un essai donné, il reste à lui faire apprendre comment rejoindre directement le centre du labyrinthe pour déclencher l'essai suivant.

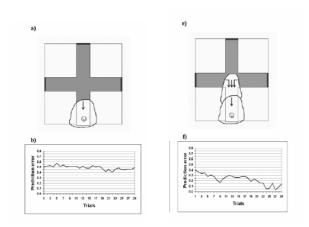


Figure 8. Mise en oeuvre d'un processus d'apprentissage par renforcement reposant sur une architecture actor-critic dans laquelle deux modules critic différents ont été testés. Le premier module n'apprend l'action correcte à exercer qu'au voisinage du but (a), ce qui a peu d'incidence sur l'évolution du signal d'erreur au cours d'essais successifs (b). Le deuxième module apprend également à faire l'action correcte au centre du dispositif expérimental (e), tandis que l'erreur de prédiction correspondante diminue clairement au cours des essais successifs (f).

Ainsi, à ce jour, les 4 premières fonctionnalités évoquées plus haut ont été testées dans plusieurs modèles de simulation et implémentées sur divers robots. Leur intégration et leur portage sur un robot Pekee, conçu et commercialisé par WANY.S.A., sont en cours et devraient être achevés en 2004. La prise en compte des fonctionnalités 5 et 6 fera l'objet des recherches futures et devrait se concrétiser à l'horizon 2006.

#### IV. Publications sur le sujet

- Articles dans des revues internationales
- [1] Filliat D. and Meyer, J.-A. (2003). Map-based navigation in mobile robots I. A review of localization strategies. *Journal of Cognitive Systems Research*. 4, 4, 243-282.
- [2] Girard, B., Cuzin, V., Guillot, A., Gurney, K. and Prescott, T. (2003). A basal ganglia inspired model of action selection evaluated in a robotic survival task. *Journal of Integrative Neuroscience*. 2(22), 179-200.
- [3] Gourichon, S., Meyer, J.-A. and Pirim, P. (2002). Using colored snapshots for short-range guidance in mobile robots. *International Journal of Robotics and Automation:* Special Issue on Biologically Inspired Robotics. 17,4, 154-162.
- [4] Guillot, A. and Meyer, J.-A. (2001). The Animat Contribution to Cognitive Systems Research. In *Journal of Cognitive Systems Research*. 2(2), 157-165.

- [5] Guillot, A. and Meyer, J.A. (2003). La contribution de l'approche animat aux sciences cognitives. *Cahiers Romans de Sciences Cognitives*. 1 (1), 1-26.
- [6] Meyer, J.-A. and Filliat D. (2003). Map-based navigation in mobile robots II. A review of map-learning and path-planning strategies. *Journal of Cognitive Systems Research*. 4, 4, 283-317.
- [7] Zapata, R., Lépinay, P. (2003). DVZ-based Collision Avoidance Control of Non-holonomic Mobile Manipulators . Soumis à *JESA*.
- [8] Zapata, R., Lépinay, P., and Ocampo, D. (2003). Co-design of Fast Biologically-plausible Vision-based Systems for Controlling the Reactive Behaviors of Mobile Robots. Soumis à *JRS*.

#### Actes de conférences

- [9] Degris, T., Brunel, N., Sigaud, O. and Arleo, A. (In Press). Rapid response of head direction cells to reorienting visual cues: A computational model. In De Schutter (Ed). *Proceedings of the Annual Computational Neuroscience Meeting*. Elsevier.
- [10] Filliat, D. and Meyer, J.-A. (2002). Global localization and topological map learning for robot navigation. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior.* pp 131-140. The MIT Press.
- [11] Girard, B., Filliat, D., J-A., Meyer, A., Berthoz and Guillot, A. (In Press). An Integration of two Control Architectures of Action Selection and Navigation inspired by Neural Circuits in the Vertebrates: the Basal Ganglia. Proceedings of the 8th Neural Computation and Psychology Workshop. *Progress in Neural Processing*. World Scientific
- [12] Girard, B., Cuzin, V., Guillot, A., Gurney, K., and Prescott, T. (2002). Comparing a bioinspired robot action selection mechanism with winner-takes-all. In Hallam et al. (Eds). From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. The MIT Press.
- [13] Gourichon, S., Meyer, J.-A., Ieng, S.H., Smadja, L. and Benosman, R. (In Press). Estimating ego-motion using a panoramic sensor: Comparison between a bio-inspired and a camera-calibrated method. In Holstein and Labrosse (Eds). *AISB Symposium on Biologically-Inspired Machine Vision, Theory and Application*. pp 91-101. AISB Pub.
- [14] Khamassi, M., Girard, B., Berthoz, A. and Guillot, A. (In Press). Comparing three Critic Models of Reinforcement Learning in the Basal Ganglia Connected to a Detailed Actor in a S-R Task. *Proceedings of the 8th Intelligent Autonomous Systems Conference*. IOS Press.
- [15] Lanzoni, C. Sánchez, A., and Zapata, R. (In Press). Sensor-based motion planning for car-like mobile robots in unknown environments. *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.*
- [16] Meyer, J.A. (2002). Psikharpax. Vers la synthèse d'un rat artificiel. In Ghallab (Ed). *Actes des Journées du Programme Interdisciplinaire ROBEA*. pp 29-32. Publication LAAS.
- [17] Meyer, J.A., Guillot, A., Pirim, P. and Berthoz, A. (Sous presse). Psikharpax: An autonomous and adaptive artificial rat. In *Proceedings ISR2004*, Paris.
- [18] Torres L., Lépinay P., Zapata R., Droulez J., and Creuze V. (2000). Codesign of a vision-based collision avoidance autonomous system. *Proceedings of the XIIIth Symposium on Integrated Circuits and Systems Design*.

- Rapports techniques, thèses, articles de vulgarisation, etc.
- [19] Cuzin, V. (2003). Utilisation de la continuité temporelle pour la modélisation 3D automatique et sans connaissance a priori de scènes statiques par analyse de séquences vidéo. Rapport LIP6 de présoutenance de thèse.
- [20] Degris, T. (2002). RATSIM: Un modèle neuromimétique des cellules de direction de la tête du rat. *Rapport du DEA IARFA*, *Paris 6*.
- [21] Delcasso, S. (2003). Intégration du flux optique au fonctionnement des cellules de directions de la tête en vue de la mise au point d'un système de navigation autonome. *Rapport du DEA Sciences Cognitives, Paris Sud.*
- [22] Filliat, D. (2001). Cartographie et estimation globale de la position pour un robot mobile autonome. *Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. Spécialité Informatique*.
- [23] Girard, B. (2003). Intégration de la navigation et de la sélection de l'action dans une architecture de contrôle inspirée des ganglions de la base. *Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. Spécialité Informatique*.
- [24] Guillot, A. and Meyer, J.-A. (2002). Psikharpax, l'ambition d'être un rat. *La Recherche*. *Numéro spécial: Les nouveaux robots*. 350, 64-67
- [25] Khamassi, M. (2003). Un modèle d'apprentissage par renforcement dans une architecture de contrôle de la sélection de l'action chez le rat artificiel Psikharpax. *Rapport du DEA Sciences Cognitives, Paris 6*.
- [26] Kuzucuoglu, E. (2003). Implémentation logicielle d'un modèle de sélection de l'action basé sur les colonnes corticales. Rapport de stage de l'Institut d'Informatique d'Entreprise du Conservatoire National des Arts et Métiers.
- [27] Meyer, J.-A. and Guillot, A. (2002). Vers une robotique animale. *Pour la Science*. 300, 168-171.