Psikharpax
Vers la synthèse d'un rat artificiel

Jean-Arcady Meyer[1]

***Résumé*— Le projet Psikharpax vise à implanter dans un robot certains des mécanismes adaptatifs et des structures nerveuses connus pour être impliqués dans la navigation et la sélection de l'action chez le rat réel. Ce robot sera capable de construire une carte cognitive de son environnement et d'enchaîner ses actions de façon adéquate, tout en économisant son énergie. Un système de vision biomimétique lui permettra de repérer et catégoriser en ligne les divers objets utiles à sa survie.**

***Mots clés*—Autonomie, Vision, Navigation, Sélection de l'action, Apprentissage**

I. Introduction

Le projet Psikharpax réunit trois équipes académiques françaises - l'AnimatLab du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), le Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA) du Collège de France, et le Laboratoire d'Informatique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) - ainsi que deux équipes étrangères - le Laboratory of Computational Neurocience de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et l'Adaptive Behaviour Research Group de l'Université de Sheffield. Il concerne également deux partenaires industriels, les sociétés Wany et BEV.

Ce projet, qui repose sur une collaboration étroite entre neurophysiologistes, informaticiens, roboticiens et industriels, vise à la synthèse d'un "rat" artificiel implémentant des mécanismes adaptatifs mis en évidence sur le rat réel, mécanismes qui permettent à cet animal de survivre dans un environnement inconnu et changeant. L'intégration cohérente de ces mécanismes sera démontrée sur une plate-forme robotique adaptée à ce projet.

II. Objectif scientifique poursuivi

Les objectifs poursuivis sont à la fois fondamentaux et appliqués. D'un côté, 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 "animat" - c'est-à-dire un système artificiel pouvant être confronté aux mêmes situations que celles que peut rencontrer un rat réel en laboratoire [5][8][10]. D'un autre côté, 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. De nombreuses autres applications sont naturellement envisageables dans les domaines émergents de la robotique domestique et de la robotique de compagnie.

Plus spécifiquement, le robot Psikharpax[2] sera capable:

- d'utiliser ses réflexes de base pour se déplacer dans son environnement et éviter les obstacles qui s'y trouvent ;
- d'utiliser des stratégies efficaces d'exploration de l'environnement et de détection des amers rencontrés ;
- de fusionner les informations visuelles acquises sur ces amers avec les informations proprioceptives concomitantes, afin de pondérer leurs influences respectives en fonction du contexte et d'élaborer une "carte cognitive" de son environnement ;
- d'utiliser cette carte pour se positionner lui-même et pour localiser les endroits où des récompenses ou des punitions ont été reçues ;

[1] Jean-Arcady Meyer (jean-arcady.meyer@lip6.fr) est Directeur de Recherches au CNRS. Il dirige l'AnimatLab du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6).

[2] Les capacités adaptatives du véritable Psikharpax - le voleur de miettes - étaient limitées, bien qu'il fut le roi des rats dans la Batrachomyomachie, une parodie de l'Iliade (faussement) attribuée à Homère.

- d'utiliser un système motivationnel pour sélectionner le but courant à satisfaire ;
- de choisir la stratégie de navigation la plus adaptée pour rejoindre un lieu où le but courant peut être satisfait, selon que ce but est directement visible ou qu'il est mémorisé dans la carte cognitive ;
- de contrôler son bilan énergétique, notamment par une alternance de périodes d'activité et repos.

III. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Cette recherche vise à exploiter les acquis et les points forts de la biologie et de l'ingénierie, tout en contribuant à préciser les difficultés ou lacunes de ces deux disciplines. En dépit de la littérature remarquable, en qualité et en quantité, qu'elles produisent, il est clair en effet que la première n'a pas encore élucidé tous les mécanismes physiologiques et comportementaux assurant la survie d'un rat et il est tout aussi clair que la seconde n'est pas encore capable de produire des robots aussi adaptatifs que cet animal.

Parce que les connaissances correspondantes ne le permettent pas, ce projet ne vise donc pas à simuler le détail des mécanismes physiologiques qui permettent au rat naturel d'exhiber l'ensemble des comportements listés précédemment. Il vise simplement à introduire dans l'architecture de contrôle de Psikharpax ceux, parmi ces mécanismes, qui paraissent le mieux compris à ce jour et peuvent donner lieu à simulation informatique ou implémentation robotique. Lorsque le savoir courant en neurosciences ou en éthologie s'avérera insuffisant pour produire un animat cohérent, intégré et fonctionnel, des solutions complémentaires relevant de l'ingénierie - notamment de l'intelligence artificielle et de la robotique - seront utilisées. La cohérence, l'intégration et la fonctionnalité du résultat seront évaluées sur un robot réel, susceptible d'être confronté à des situations expérimentales semblables à celles dans lesquelles un rat est classiquement testé en laboratoire - telles que champs larges ou labyrinthes. Réciproquement, les capacités ainsi exhibées par ce rat artificiel pourront être comparées à celles que des robots de conception plus traditionnelle - c'est-à-dire des robots non explicitement inspirés par la biologie - sont capables d'exhiber. On peut ainsi espérer que la biologie, l'électronique, l'informatique et la robotique se compléteront utilement dans un tel projet - tout progrès conceptuel ou technique dans un domaine pouvant générer des hypothèses ou des expériences dans un autre. En d'autres termes, on peut espérer que ce projet fournira des suggestions utiles, aussi bien sur des mécanismes et des fonctionnalités que les biologistes n'ont pas encore investigués, que sur des directions dans lesquelles les ingénieurs pourraient étendre des algorithmes et des problématiques déjà existants.

Au plan pratique, ce projet exploite des connaissances, des logiciels et des outils déjà largement développés ou acquis au sein des équipes partenaires. En particulier, il capitalise sur les connaissances des neurophysiologistes sur le rôle de l'hippocampe, des ganglions de la base et du cortex préfrontal dans la navigation et la sélection de l'action chez le rat. De même, il bénéficie de la mise au point ou de l'exploitation par les informaticiens de deux modèles susceptibles de contrôler ces mêmes fonctions chez un robot autonome. Enfin, il met en œuvre une carte de traitement de données visuelles et une plate-forme robotique mises au point et développées par les électroniciens et roboticiens de notre consortium. En revanche, il est clair qu'à ce jour ces connaissances, ces logiciels et ces outils, qui ont été développés ou acquis indépendamment les uns des autres, ne permettent pas de produire le système intégré et les fonctionnalités faisant l'objet de la présente proposition. Celle-ci vise donc à compléter les lacunes correspondantes et son succès pourra être précisément évalué par l'aptitude du rat artificiel ainsi synthétisé à exhiber ou non les différentes capacités listées plus haut.

IV. DETAILS DU PROJET

Pour fonctionner le plus longtemps possible sans intervention humaine, Psikharpax doit être capable d'explorer son environnement, d'en construire une carte cognitive[3] [11] et d'enchaîner ses actions de façon adéquate, tout en économisant son énergie. Son architecture de contrôle est inspirée des structures nerveuses impliquées dans les fonctions de navigation et de sélection de l'action chez le rat. Un système de vision active lui permet de catégoriser en ligne les divers objets qu'il rencontre en leur attribuant une valence particulière, caractéristique soit d'un amer servant à repérer un lieu – un buisson, une pierre - soit d'un but à satisfaire - comme sa station de recharge.

La plateforme robotique choisie pour ce projet est un robot Pekee conçu par la société Wany SA qui fait partie de notre consortium. Ce robot a déjà un équipement étendu de capteurs – télémètres, odomètres, caméra, capteurs de lumière, détecteurs de chocs, gyromètres, capteurs de charge et de température - d'actionneurs - deux roues motrices latérales et une roue libre à l'arrière - et de réflexes de base – comme le déplacement ou l'évitement d'obstacles fixes. Au sein de Wany et du LIRMM, plusieurs développements sont conduits pour ajuster cette plate-forme aux spécificités de ce projet [12]. En particulier, une caméra panoramique et un système permettant la recharge de ses batteries dans une station amovible sont en cours d'élaboration.

[3] Une carte cognitive est une métaphore employée en 1948 par E.C. Tolman, psychologue américain, pour désigner une représentation mentale de l'espace qui rend compte d'expériences d'orientation chez le rat et notamment de sa capacité à effectuer des détours pour rejoindre un but donné.

Ce projet capitalise aussi sur la carte électronique GVPP (Generic Visual Perception Processor) de la société BEV. Cette carte - dont l'organisation et les fonctionnalités sont inspirées du système visuel des mammifères - soumet des images à des traitements parallèles de bas niveau en temps réel, à la fois dans le domaine spatial et temporel. Elle est utilisée pour éviter des obstacles fixes ou mobiles et pour implémenter le système de vision active grâce auquel Psikharpax cherche à retrouver des amers connus dans un lieu qu'il reconnaît mal ou à enrichir d'amers nouveaux un lieu qu'il reconnaît bien.

Le système de navigation de Psikharpax repose sur des réseaux de neurones inspirés de l'hippocampe[4] et de structures nerveuses fonctionnellement proches dans le cerveau du rat [1]. A la différence d'un robot dont le comportement serait purement réactif, un animat réellement autonome doit en effet être capable d'élaborer une représentation interne de son environnement afin de connaître sa propre position, ainsi que celle d'endroits associés à des « récompenses » - comme sa station de recharge qui lui fournit de l'énergie- ou associés à des « punitions » - comme un obstacle qu'il convient de ne pas heurter.
En robotique classique, de telles représentations de l'environnement sont souvent de nature métrique et exprimées dans un repère cartésien sous la forme, par exemple, d'une « grille d'occupation ». Dans sa version la plus simple, la granularité de cette grille est prédéfinie et il est très difficile de la changer dynamiquement pour gérer des environnements changeants.
Une alternative efficace a été inventée par la nature [1][9]. Chez le rat, en effet, des « cellules de lieu » de l'hippocampe répondent sélectivement quand l'animal occupe différentes positions dans son environnement. A chaque cellule de lieu correspond généralement un champ d'activité circonscrit, de sorte que l'organisation spatiale de l'environnement dans son ensemble peut être représentée par une population de telles cellules. La représentation de l'orientation propre est sous-tendue par des mécanismes similaires, mettant en œuvre des « cellules de direction de la tête » qui s'activent sélectivement lorsque la tête du rat est orientée dans une direction particulière de l'environnement [13]. Des solutions de cette nature sont mises en œuvre chez Psikharpax afin d'en exploiter les potentialités, notamment pour permettre au robot d'élaborer une représentation spatiale de l'environnement à granularité flexible et adaptative [1][3][11].
Pour construire une telle carte cognitive et mettre à jour la représentation de son orientation, l'animat utilise des informations allothétiques - fournies par ses capteurs visuels et le renseignant sur les amers perçus - et des informations idiothétiques - fournies par ses capteurs odométriques et le renseignant sur les distances qu'il parcourt et les rotations qu'il effectue. Cependant les informations allothétiques génèrent facilement des problèmes d'ambiguïté perceptive - deux lieux différents pouvant paraître semblables parce qu'une caméra ne les différencie pas. De même, les informations idiothétiques sont soumises à des erreurs cumulatives au fil des déplacements. Une solution à ces inconvénients est de fusionner l'ensemble de ces informations puisque, comme démontré chez le rat naturel, elles peuvent se compléter efficacement pour servir à l'élaboration d'une représentation mentale de son environnement, utilisable sitôt que le rat artificiel a commencé son exploration.

Le système de sélection de l'action de Psikharpax est inspiré d'hypothèses récentes sur les ganglions de la base et les noyaux ventro-latéral et réticulaire du thalamus[5] chez le rat, structures nerveuses qui implémenteraient des mécanismes de décision permettant de décider efficacement « quoi faire au bon moment ». Les neurophysiologistes s'interrogent encore sur le type de mouvements que ces mécanismes sont réellement susceptibles de contrôler. Chez Psikharpax, ils sont utilisés pour gérer la succession de comportements non élémentaires, l'équivalent de « s'alimenter », « se reposer » ou « fuir un prédateur » chez un rat.
Ce système repose sur une hypothèse contraire à toutes celles proposées par l'ingénierie ou l'éthologie : parmi tous les actes en compétition, l'acte choisi est celui qui est le moins inhibé, et non celui qui reçoit le plus de signaux excitateurs. Différents circuits des ganglions de la base assureraient deux fonctions, l'une de « désinhibition » d'un acte donné et l'autre de modulation de cette désinhibition. Les noyaux du thalamus favoriseraient, si besoin est, la persistance de l'acte choisi. La mise en œuvre de telles hypothèses conduit à éviter à la fois des transitions trop abruptes et des oscillations intempestives d'un acte à l'autre, principaux défauts de modèles déjà existants.
Dans le modèle informatique, chaque acte potentiel est traité dans les « ganglions de la base » par un canal séparé. En entrée, les actes sont traduits dans une même unité de mesure, appelée « salience », qui est calculée à tout moment en fonction des informations sensorielles externes et internes concernées. Toutes les saliences sont comparées au sein des ganglions et des inhibitions sont calculées en sortie pour chacun des actes en compétition. Celui qui est effectué à tout moment est celui qui est le moins inhibé. Une valeur de persistance est calculée par les « noyaux du thalamus », prolongeant éventuellement la durée de l'acte choisi [4][7].

Lorsque ses capacités de navigation et de sélection de l'action seront combinées, Psikharpax pourra choisir, en fonction de ses besoins internes et des opportunités de l'environnement, entre aller vers des bornes de recharge de différentes natures, rejoindre un refuge, explorer son environnement, repérer et éviter les obstacles statiques et dynamiques, au lieu d'alterner ces comportements de façon aléatoire. Il pourra se servir des

[4] L'hippocampe est une zone du cortex cérébral repliée sur elle-même, ce qui lui donne la forme de l'animal marin du même nom. Il se trouve dans une région de l'encéphale appelée « télencéphale ».

[5] Les ganglions de la base comprennent notamment des structures nerveuses nommées striatum, globus pallidus et noyau sous-thalamique, qui sont situées au niveau du télencéphale. Le thalamus se situe dans une autre région appelée « diencéphale ».

informations qu'il aura mémorisées dans sa carte cognitive, comme les lieux où les bornes et le refuge peuvent se trouver ou comme les lieux où des dangers ont été expérimentés dans le passé. De plus, un apprentissage en temps réel lui permettra d'ajuster les paramètres de son architecture de contrôle en tenant compte des conséquences attendues de ses actions, notamment en terme d'économie énergétique. Ainsi Psikharpax sera capable d'éviter de passer par une zone dangereuse de son environnement lorsque ses réserves énergétiques lui permettront d'accomplir le détour correspondant, mais il choisira au contraire de traverser cette zone lorsque ses risques d'inanition seront plus élevés que ceux de devenir la « proie » d'un prédateur. Il pourra également décider d'intercaler une période de repos entre deux séquences d'activité, une capacité dont les roboticiens ne pensent généralement pas à doter leurs machines.

V. ETAT D'AVANCEMENT DU PROJET

La plupart des mécanismes qui vont être ainsi incorporés à Psikharpax ne sont pas purement spéculatifs. Ils ont déjà été testés en simulation - notamment par l'Ecole Polytechnique de Lausanne - et sur des robots réels du type Pioneer, Pekee et Lego Mindstorms - à l'Université de Sheffield, au LIRMM et à l'AnimatLab.

Par ailleurs, ce projet a déjà donné lieu à diverses publications: [2][3][4][6].

REFERENCES

[1] Arleo, A. (2000). Spatial learning and navigation in neuro-mimetic systems, modeling the rat hippocampus. *Thèse de Doctorat de L'Ecole Polytechnique de Lausanne*, ISBN 3-89825-247-7, Verlag-dissertation, Germany.

[2] Filliat, D. and Meyer, J.A. (Soumis à publication). Map-based navigation in mobile robots. I. A review of localization strategies.

[3] 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*. The MIT Press.

[4] Girard, B., Cuzin, V., Guillot, A., Gurney, K., and Prescott, T. (2002). Comparing a bio-inspired 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.

[5] Guillot, A. and Meyer, J.-A (2001). The Animat Contribution to Cognitive Systems Research. In *Journal of Cognitive Systems Research*. 2(2), 157-165.

[6] Gourichon, S., Meyer, J.-A. and Pirim, P. (Sous presse). Using colored snapshots for short-range guidance in mobile robots *International Journal of Robotics and Automation : Special issue on Biologically Inspired Robotics*.

[7] Gurney, K., Prescott, T. and Redgrave, P. (2001). A computational model of action selection in the basal ganglia. *Biological Cybernetics, 84*, 401-423.

[8] Hallam et al. (Eds). (2002). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.

[9] Meyer, J.A. and Filliat, D. (Soumis à publication). Map-based navigation in mobile robots. II. A review of map-learning and path-planning strategies.

[10] Meyer et al. (Eds). (2000). *From Animals to Animats 6. Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.

[11] Trullier, O., Wiener, S., Berthoz, A. and Meyer, J.A. (1997). Biologically-based artificial navigation systems: Review and prospects. *Progress in Neurobiology, 51*, 483-544.

[12] Zapata, R., Lépinay, P., Torres, L., Droulez, J. and Creuze, V. (2000). Integration of biologically-plausible vision systems for controlling autonomous robots. *Reconfigurable Technology*. Boston, USA, November 5-8.

[13] Zugaro, M., Tabuchi, E., and Wiener, S. (2000). Influence of conflicting visual, inertial and substratal cues on head direction cells. *Experimental Brain Research. 133*, 198-208.