Psikharpax, ou l'ambition d'être un rat

[Un article soumis à La Recherche]

Comment créer un robot capable de s'approprier son environnement ? Peut-être en mettant à profit les connaissances actuelles sur la structure des circuits nerveux impliqués dans la mémoire spatiale et le mécanisme de sélection des actions du rat. Démarrage d'un projet au carrefour de la biologie et de la robotique.

Agnès GUILLOT est docteur en Psychologie animale et en Biomathématiques et possède une habilitation en Psychophysiologie. Maître de conférences en Psychophysiologie à Paris X-Nanterre, elle poursuit ses recherches au sein de l'AnimatLab du Laboratoire d'informatique de Paris 6.
agnes.guillot@lip6.fr

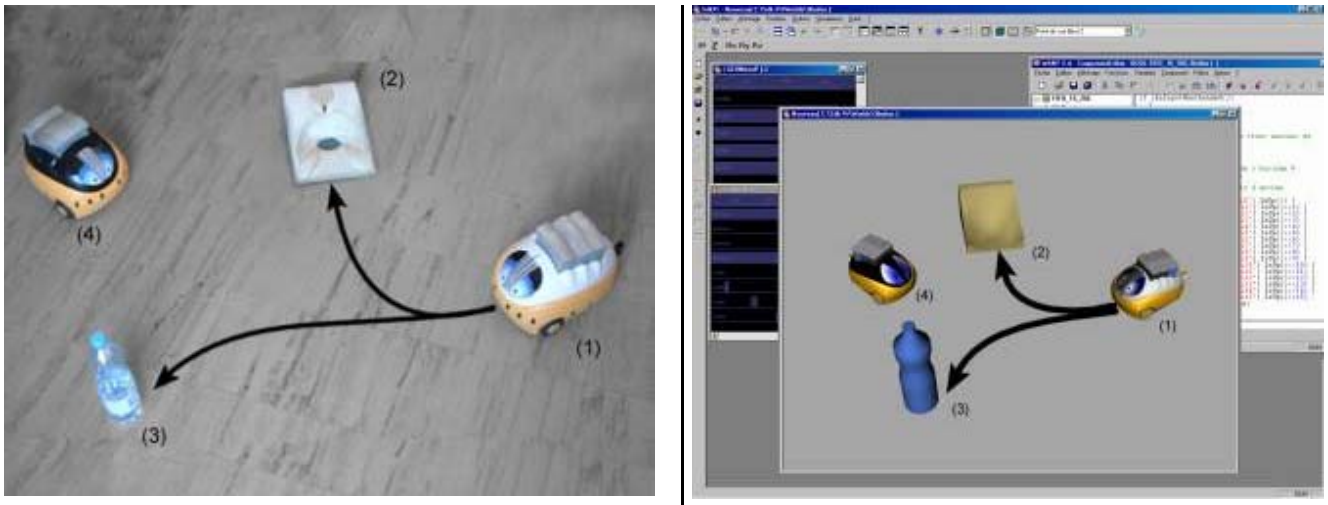
Jean-Arcady MEYER est ingénieur de formation, diplômé en Psychologie humaine et animale, et titulaire d'une thèse d'Etat en Biologie. Il est actuellement directeur de recherche au CNRS et dirige l'AnimatLab du Laboratoire d'informatique de Paris 6.
jean-arcady.meyer@lip6.fr

Juché sur le dos de Physignathos, la grenouille « aux joues enflées », Psikharpax « le voleur de miettes », n'en menait pas large. Le Roi des rats regrettait d'avoir choisi ce mode de déplacement au lieu de contourner la mare. Mais, affamé, il ne voulait pas rencontrer la belette carnassière avant d'atteindre son nid garni de noix. Soudain une mangouste surgit, Physignathos plongea, le Roi des rats se noya. Dans cet épisode d'une parodie de l'Iliade attribuée à Homère[(1)], Psikharpax avait utilisé sa carte mentale pour éviter les endroits dangereux et retrouver son nid. Il avait décidé de la priorité de ses buts, il avait choisi sa stratégie comportementale pour les satisfaire. Mais que n'avait-il intégré le fait qu'il ne savait pas nager ?

Malgré cette erreur fatale, Psikharpax est paradoxalement un modèle pour la conception des « animats » - contraction d'animaux artificiels - les systèmes artificiels inspirés du vivant qui ont vocation à être autonomes et adaptatifs[(2,3)]. Car, à l'instar de tous les systèmes vivants, Psikharpax était polyvalent et pouvait gérer simultanément, et en temps réel, une multitude de fonctionnalités, parfois même conflictuelles. Or aucun système artificiel actuel n'est capable d'une telle performance. Pourtant, dès les années 50, des pionniers comme Grey Walter avaient suggéré que les ingénieurs pourraient avoir intérêt à s'inspirer de la biologie pour concevoir des systèmes artificiels, en insistant sur le fait que les animaux ont non seulement acquis une morphologie et un système nerveux leur permettant des actions variées - comme chercher de la nourriture, construire un refuge, éviter un prédateur, se reproduire - mais qu'ils utilisent aussi des processus adaptatifs leur permettant de modifier et d'accroître la diversité de ces actions en réponse à un environnement changeant - comme le développement, l'apprentissage ou l'évolution des espèces. Grey Walter avait démontré la justesse de ses vues en construisant des « tortues cybernétiques » capables d'apprendre par conditionnement, comme le chien de Pavlov, à associer un son à l'apparition d'une lumière (voir la "Galerie de l'évolution" dans ce numéro). Or, depuis le début des années 90, de nombreux chercheurs ont, eux aussi, pris le parti de copier la nature pour concevoir leurs systèmes artificiels. Dans l'espoir de contribuer à cet objectif, nous avons entrepris de mettre en chantier la synthèse d'un tel système dans notre laboratoire. Parce que, d'une part, il adopte certains des mécanismes biologiques inspirés de ceux du rat et parce que, d'autre part, il ne sait toujours pas nager, il a pris le nom de Psikharpax.

La synthèse de ce rat artificiel, qui a débuté officiellement en septembre 2001, capitalise sur

plusieurs années de recherches antérieures. Ce projet repose sur une collaboration étroite entre laboratoires de plusieurs disciplines - biologie, électronique, informatique, robotique - dans une perspective à la fois fondamentale et appliquée. Dans la mesure où l'ensemble des mécanismes physiologiques et comportementaux d'un rat sont encore très loin d'avoir été élucidés, il ne cherche pas à reproduire ces mécanismes à l'identique chez Psikharpax. Il aspire simplement à introduire dans son architecture de contrôle - l'équivalent d'un système nerveux reliant ses capteurs et ses effecteurs - les processus qui paraissent le mieux compris à ce jour et qui peuvent donner lieu à simulation informatique ou construction robotique. Lorsque le savoir courant en neurosciences ou en éthologie s'avère 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, sont utilisées. Ce projet contribue donc à l'avancement conjoint des neurosciences et de l'informatique. D'un côté, il permet de tester la cohérence et les limites des connaissances sur le rat réel et de générer des hypothèses nouvelles sur la fonction et l'organisation des structures nerveuses impliquées dans les comportements étudiés. De l'autre, il rend possible la mise au point de nouveaux algorithmes adaptatifs.



L'environnement matériel et logiciel de Psikharpax. L'image de gauche représente une situation réelle, dans laquell Psikharpax (1) est confronté au choix d'aller recharger ses batteries (2) ou d'aller collecter une ressource (3), tout e évitant un prédateur (4). L'image de droite est fournie par l'atelier de développement logiciel du robot Pekee®utilisé ic Cet outil permet de simuler complètement l'univers 3D dans lequel le robot évolue et de tester facilement les algorithme embarqués.

Le corps de Psikharpax est matérialisé par le robot Pekee (voir photo), mis au point par les ingénieurs de la start-up française Wany Robotics. 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 Robotics et du Laboratoire d'Informatique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), plusieurs développements sont conduits pour ajuster cette plate-forme aux spécificités de ce projet. En particulier, une caméra orientable et un système permettant la recharge de ses batteries dans une station amovible sont en cours d'élaboration. Ce projet capitalise aussi sur la carte électronique GVPP (Generic Visual Perception Processor) de la société Bureau d'Etudes Vision (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. Ses circuits électroniques cumulent actuellement 4 propriétés adaptatives des circuits neuronaux des systèmes visuels naturels : le traitement de l'information en temps réel, la détection des objets et événements par coïncidences temporelles, le suivi des objets

dans l'image et l'anticipation de leurs mouvements, ainsi que l'apprentissage des propriétés visuelles des objets et des personnes. Elle est utilisée pour éviter des obstacles fixes ou mobiles et pour installer 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. Ce 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. Ces caractéristiques de l'environnement ne sont pas prédéfinies par un humain pour qui elles font sens - un extincteur, une armoire, etc. - mais sont détectées de façon autonome par le robot sous l'effet d'un processus d'auto-catégorisation du flux permanent de ses perceptions sensorielles et de ses contrôles moteurs. Ainsi, un lieu peut être « reconnu » si la même signature sensori-motrice y est détectée, en dépit du manque de précision dans le fonctionnement des capteurs et des effecteurs du robot. Ce lieu peut alors être inclus dans sa carte cognitive, cette représentation mentale de l'espace qui rend compte d'expériences d'orientation chez un rat, et notamment de sa capacité à effectuer un détour pour rejoindre un but donné .

Pour fonctionner le plus longtemps possible sans intervention humaine, Psikharpax doit en effet être capable d'explorer son environnement et d'en construire une carte cognitive. Il doit aussi être capable d'enchaîner ses actions de façon adéquate, tout en économisant son énergie. Les mécanismes déterminant sa navigation* et la sélection de ses actions sont représentés sous la forme de réseaux de neurones. Ceux-ci imitent la structure du système nerveux en simulant la connexion de plusieurs neurones dits '"formels", pour effectuer des calculs à partir des signaux qu'ils reçoivent en entrée (voir l'article de Dario Floreano dans ce numéro). Ces neurones ont des modes d'activation et de transmission des signaux très simplifiés par rapport à ceux des neurones biologiques, mais néanmoins susceptibles d'être modifiés par apprentissage. L'organisation des réseaux est inspirée des travaux de neurophysiologistes du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA) du Collège de France[(4)] et de l'Université de Sheffield[(5)]. La plupart des mécanismes de navigation et de sélection de l'action qui les mettent en oeuvre ont déjà été testés en simulation, notamment par l'Ecole Polytechnique de Lausanne[(6)] et l'Université de Pittsburgh[(7)]. Ils ont aussi été mis à l'épreuve sur des robots réels à l'Université de Sheffield[(8)] et à l'AnimatLab[(9)], où des robots Pioneer, Khepera et Lego Mindstorms les expérimentent déjà .

Le système de navigation de Psikharpax repose sur des réseaux de neurones inspirés de l'hippocampe et de structures nerveuses voisines dans le cerveau des rats. 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 et 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. Chez le rat, en effet, certains neurones de l'hippocampe, appelés "cellules de lieu", sont activés de façon sélective selon la position de l'animal dans son environnement[(I)]. A chaque cellule de lieu correspond généralement un champ d'activité circonscrit, de sorte que l'organisation spatiale de l'ensemble de environnement est représentée par la population de ces cellules. La représentation de l'orientation du rat est, elle, générée par d'autres neurones appelés "cellules d'orientation", situés dans de nombreuses structures ayant toutes des connexions importantes avec l'hippocampe. Ces cellules d'orientation s'activent sélectivement lorsque la tête du rat est orientée dans une direction particulière de l'environnement. Des solutions de cette nature seront mises en oeuvre 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.

Pour construire sa carte cognitive et mettre à jour la représentation de son orientation, l'animat

utilise des informations qui lui sont fournies par ses capteurs visuels. Ces informations, dites allothétiques, le renseignent sur l'état du monde extérieur, en l'occurrence les amers qu'il rencontre. Il utilise également des informations qui le renseignent sur son propre état interne (informations idiothétiques). Celles-ci lui sont fournies par ses capteurs odométriques* : sachant, par exemple, combien de tours sont effectués par chaque roue en un temps donné, l'animat peut en déduire les distances qu'il parcourt et les rotations qu'il effectue (figure 1). Cependant les informations allothétiques génèrent facilement des problèmes d'ambiguïté perceptive, deux lieux différents pouvant paraître semblables parce que le système de vision artificielle 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. En effet, visualiser les alentours peut permettre de corriger des erreurs de déplacement. Réciproquement, savoir qu'un lieu a été atteint à la suite de tel déplacement à partir de tel autre lieu permet de le différencier d'un autre emplacement visuellement très semblable. Comme démontré chez le rat naturel, ces deux catégories d'informations peuvent se compléter efficacement pour servir à l'élaboration d'une représentation mentale de l'environnement, utilisable sitôt que le rat artificiel a commencé son exploration. Cette représentation peut être remise à jour en temps réel, ce qui évite de garder en mémoire des informations devenues obsolètes.

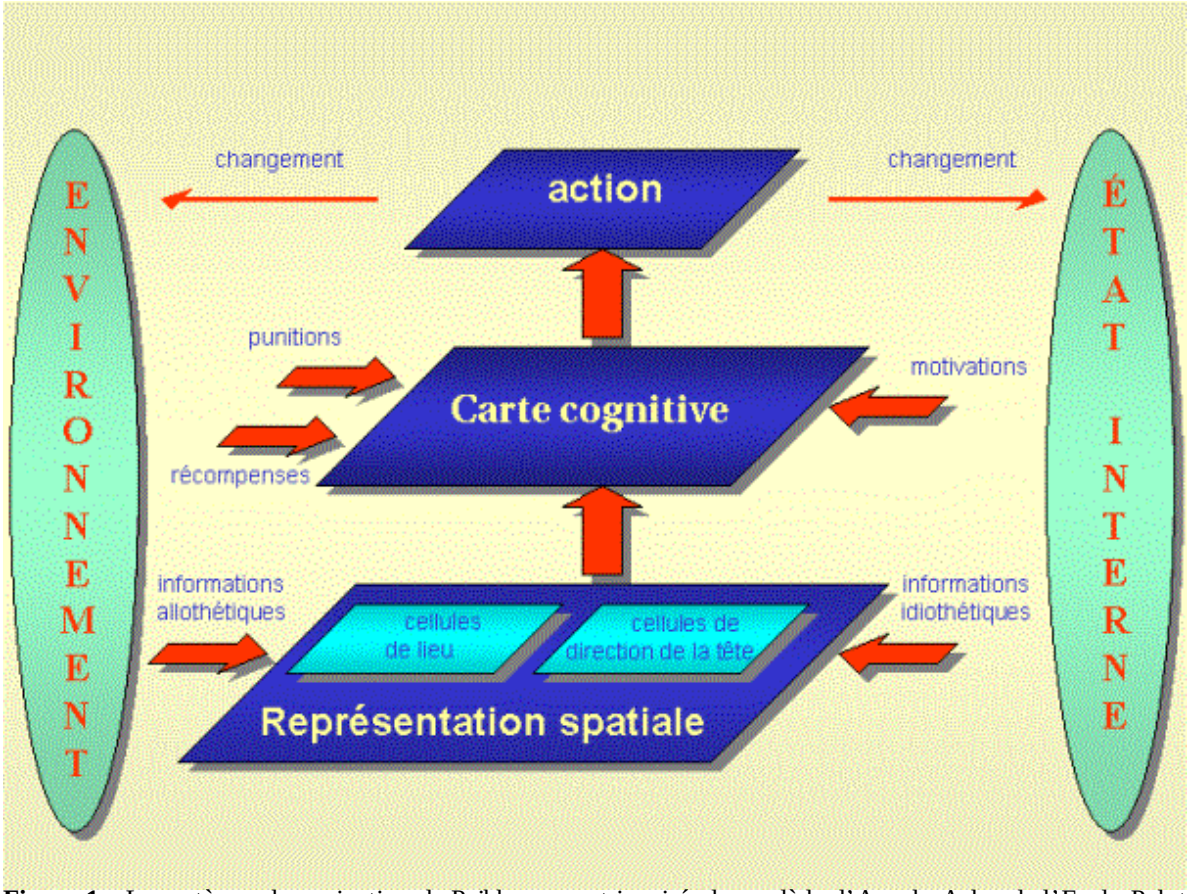


Figure 1 : Le système de navigation de Psikharpax est inspiré du modèle d'Angelo Arleo de l'Ecole Polytechnique de Lausanne. Les informations idiothétiques (odomètres, gyromètres), qui renseignent l'animat sur son orientation et ses déplacements, sont éventuellement corrigées par les informations allothétiques (caméra) concomitantes. La carte de navigation proprement dite est issue de la fusion des deux types d'informations. Les données concernant la position de l'animat sont combinées aux informations sur les récompenses ou punitions qu'il reçoit de l'environnement, ainsi qu'aux signaux internes le renseignant sur son niveau d'énergie, sa température interne, etc. Il apprend ainsi dans quelle direction il convient de se déplacer à partir de tout lieu mémorisé dans sa carte pour rejoindre un but donné.

Le système de sélection de l'action de Psikharpax (figure 2) est inspiré d'hypothèses récentes sur certaines structures nerveuses du rat, les ganglions de la base* et les noyaux ventro-latéral et

ré ticulaire du thalamus*, où sont mis en oeuvre les mé canismes de dé cision permettant de dé cider efficacement quoi faire au bon moment. Contrairement à toutes les hypothè ses issues des é tudes d'ingé nierie ou l'é thologie, celles-ci proposent que l'acte choisi est celui qui aura é té le moins inhibé , et non celui qui aura reç u le plus de signaux excitateurs. Diffé rents circuits des ganglions de la base assureraient deux fonctions, l'une de dé sinhibition d'un acte donné et l'autre de modulation de cette dé sinhibition. Certains noyaux du thalamus favoriseraient, si besoin est, la persistance de l'acte choisi. Les neurophysiologistes s'interrogent encore sur le type de mouvements que ces mé canismes sont ré ellement susceptibles de contrôler ; chez Psikharpax, les é quivalents de ces noyaux seront utilisé s pour gé rer la succession de comportements non é lé mentaires comme « se diriger vers une borne de recharge », « se diriger vers un refuge », ou « é viter un obstacle mobile ». La mise en oeuvre de telles hypothè ses devrait permettre d'é viter à la fois des transitions trop abruptes et des oscillations intempestives d'un acte à l'autre, principaux dé fauts des modè les existants.

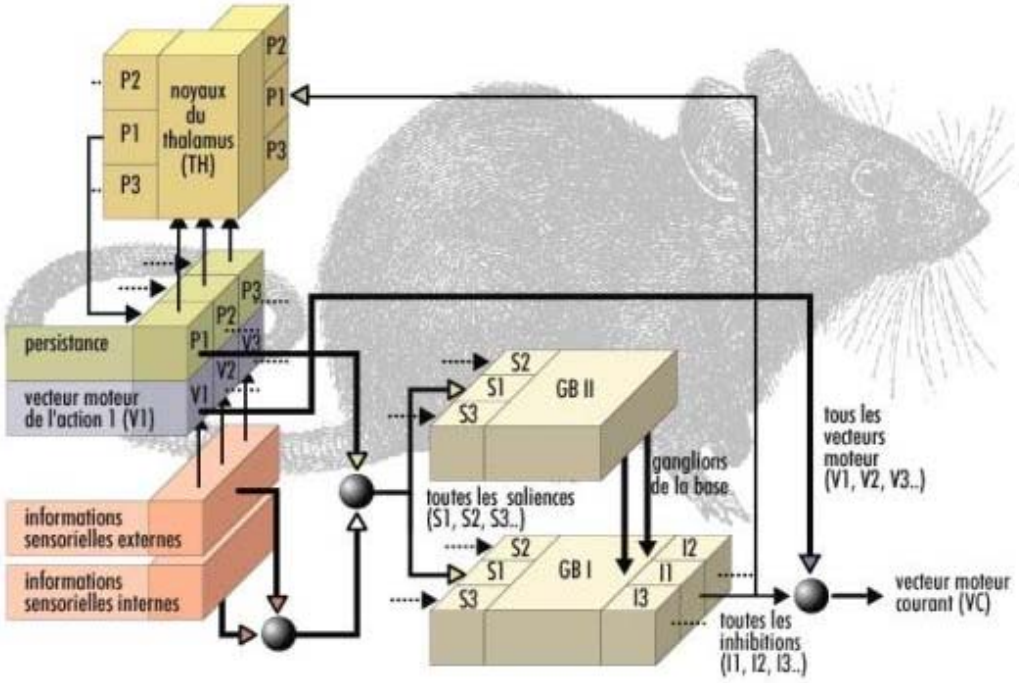


Figure 2 : Dans ce sché ma trè s simplifié du modè le computationnel de sé lection de l'action inspiré de celui de Kevin Gurney, Tom Prescott et Peter Redgrave de l'Université de Sheffield, chaque action potentielle est ré gie par un vecteur moteur (V1, V2, V3, ...) qui dé termine, par exemple, la position et la vitesse des roues ou la position de la camé ra. Chaque vecteur transite par un canal sé paré dans les « ganglions de la base » (GB 1 et GB 2) et les « noyaux du thalamus » (TH). Pour chaque acte, une valeur appelé e « salience » (S1, S2, S3,...) est calculé e à tout moment, en fonction des informations sensorielles externes (luminosité , contact, etc.) et internes (charge, tempé rature, etc.) concerné es. Toutes les saliences sont comparé es au sein des ganglions de la base, qui vont dé terminer à la fois la sé lection d'un acte et le contrôle de cette sé lection. Les circuits de GB I calculent les valeurs des inhibitions (I1, I2, I3,...) associé es à chacun des canaux, en comparant les saliences correspondantes. Les circuits de GB II contrôlent cette sé lection (en particulier par des signaux inhibiteurs et excitateurs venant de tous les canaux) et modulent le contraste entre les saliences. Les circuits de TH calculent la valeur d'une « persistance » (P1, P2, P3, ...) pour chaque vecteur moteur, ce qui renforce é ventuellement la salience du comportement choisi et lui permet de ne pas ê tre remplacé trop rapidement par un autre. Le vecteur moteur courant (VC), qui dé termine le comportement du robot, est celui qui est le moins inhibé par les signaux de sortie de GB I.

Au terme de ce projet, lorsque ses capacités de navigation et de sélection de l'action seront combinées, on espère que 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 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. C'est la combinaison de l'ensemble de ces processus, jusqu'à ce jour étudiés séparément, qui fera du descendant du Roi des rats un animat plus autonome, polyvalent et adaptatif que les tortues de Grey Walter. S'écoulera-t-il encore cinquante années avant que Psikharpax passe avec succès le test de Turing* des rats ?

Notes en marge :

***amer** : ce terme de marine est utilisé en robotique autonome pour désigner un objet fixe et très visible servant de point de repère dans l'environnement.

***Le concept de **navigation** correspond à la faculté d'un animal ou d'un robot à se mouvoir seul et avec discernement dans son environnement

***noyau** : terme général utilisé pour décrire une masse de neurones bien délimitée, généralement en profondeur dans le cerveau.

* **ganglions de la base** : ensemble de noyaux situés en profondeur dans le cerveau antérieur.

*Les **odomètres (**du grec "hodos", signifiant "route") mesurent une distance parcourue, en comptant les tours de roues effectués par le robot.

***test de Turing** : Le principe de ce test consiste à poser les mêmes questions à un homme et à une machine. Si, à la seule lecture de leurs réponses sur un écran d'ordinateur, un observateur ne peut pas distinguer qui, humain ou machine, les a formulées, on pourra conclure que la machine est intelligente. A ce jour, aucun programme d'ordinateur n'a satisfait le test de Turing.

Références :

(1) "La Batrachomyomachie d'Homère", texte grec établi par Yann Migoubert et traduit par Philippe Brunet, Allia, 1998.

(2) J.A. Meyer, *Robotics and autonomous systems, 22,* 3, 1997.

(3) A. Guillot et J.A. Meyer, *Journal of Cognitive Systems Research, 2,* 157, 2001.

(4) M.B. Zugaro *et al., Experimental Brain Research. 133,* 198, 2000.

(5) K. Gurney *et al., Biological Cybernetics, 84,* 401, 2001.

(6) A. Arleo. "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, 2000.

(7) G.S. Berns et T.J. Sejnowski, *Journal of Cognitive Neuroscience, 10*, 108, 1998.

(8) F. Montes Gonzalez *et al.*, in "*From animals to animats 6 : proceedings of the sixth international conference on simulation of adaptive behaviour*", Cambridge MA, MIT press, 2000.

(8) O. Trullier *et al., Progress in Neurobiology, 51,* 483, 1997.

I) La Recherche a publié :

Bruno Poucet, "Le chef d'orchestre de la mé moire spatiale", juillet-août 2001.

Pour en savoir plus :

P. Menzel et F. D'Aluisio. *Robo sapiens : une espèce en voie d'apparition*. Editions Autrement, 2001.

Simulation of adaptive behavior : from animals to animats (Actes des conférences sur l'approche animat), The MIT Press, 1991 à 2000.

Site du robot Pekee: http://www.wany.fr/

Site de la carte GVPP : http://gvpp.org/