



Psikharpax, le robot-rat intelligent - 07/03/2011

Carte blanche à : **Mehdi Khamassi**

Chercheur CNRS en Robotique et Neurosciences

- Découvrir son métier
- Lire sa biographie
- Sa dédicace



Psikharpax, le robot-rat intelligent

Parmi les différentes applications de la robotique, un apport auquel le grand public ne pense pas souvent et qui est pourtant très important, consiste à utiliser les robots pour nous aider à mieux comprendre le vivant. Le Projet Psikharpax va dans ce sens.

En effet, trouver des solutions permettant à un [robot](#) de bien percevoir son environnement, d'y agir correctement et de s'adapter lorsque cet environnement change, nous donne des clés pour comprendre les difficultés auxquelles sont confrontés les animaux dans leur milieu, et les mécanismes de perception et d'adaptation du comportement qui ont pu être sélectionnés au cours de l'[Évolution](#).



Psikharpax, le robot-rat, qui développe tout seul des capacités, par apprentissage. © CNRS Photothèque/ISIR /Rajau Benoît

Le Projet Psikharpax contribue à cette démarche. Il s'agit de mettre au point un robot-rat artificiel dont l'équipement sensoriel, le fonctionnement du « cerveau » informatique et les fonctionnalités sont inspirées le plus possible du rat. L'objectif principal est d'utiliser le [robot](#) comme une plateforme

de test d'hypothèses biologiques pour contribuer à la compréhension de ces mécanismes chez les Mammifères.

Dans ce dossier vous pourrez comprendre pourquoi le rat a été choisi comme modèle, découvrir le robot-rat et ses fonctionnalités, ses capacités, sa force d'apprentissage.

Parrainez un enfant.

Il sera nourri, soigné, scolarisé. 23 programmes de développement.

Annonces Google d'intérêt public

Psikharpax et la robotique biomimétique

Le Projet Psikharpax a pour but de s'approcher au plus du comportement et raisonnement du rat. L'objectif principal est d'utiliser le robot comme une plateforme de test d'hypothèses biologiques pour contribuer à la compréhension de ces mécanismes chez les Mammifères. Ici on va plus loin que la robotique bio-inspirée, on parle de « robotique biomimétique ».



La robotique biomimétique : reproduire au mieux le mécanisme d'un animal. © CNRS Photothèque/ISIR/Rajau Benoît

La bio-inspiration est une démarche déjà très répandue en [robotique](#), qui consiste à aller regarder comment la nature a résolu certains problèmes complexes (comme la façon dont certains animaux comme le lézard gecko parviennent à se suspendre et escalader n'importe quelle surface lisse ou rugueuse), et à s'en inspirer pour améliorer les capacités des [robots](#). **Le biomimétisme va plus loin que la bio-inspiration puisqu'il consiste à copier le plus fidèlement possible ce qu'on observe dans la nature**, pour ensuite tester la justesse de notre compréhension (lire l'ouvrage *La Bionique : quand la science imite la nature*, par Agnès Guillot et Jean-Arcady Meyer, Dunod 2008).

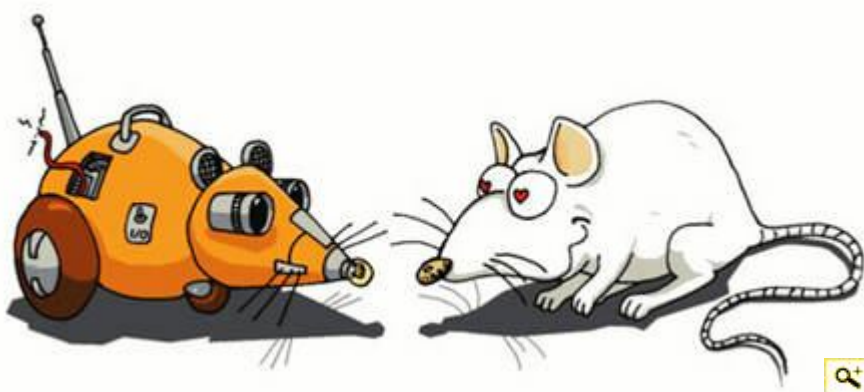
Cela n'empêche pas le robot-rat Psikharpax de contribuer également à la première démarche : la robotique bio-inspirée ; en s'inspirant des capacités d'adaptation du rat, on contribue aussi à mettre au point des robots qui pourront agir de façon autonome, apprendre de leurs propres erreurs, s'adapter aux changements de l'environnement. Ceci sera utile pour envoyer des robots résoudre des problèmes dans des milieux qui sont dangereux pour l'Homme, comme l'[exploration de l'espace](#), des [fonds marins](#), le déminage de zones touchées par la guerre, ou l'entretien de centrales nucléaires.

Mais en tout cas, l'objectif principal du projet Psikharpax est de reproduire sur le robot la plupart des mécanismes étudiés chez le rat, en particulier les mécanismes neurobiologiques (liés au fonctionnement de son cerveau), pour aider les biologistes à mieux les comprendre.

Projet Psikharpax : pourquoi le rat ?

Pourquoi prendre comme modèle le rat ? D'une part parce qu'on en sait encore trop peu sur le fonctionnement du cerveau de l'Homme. D'autre part, le rat présente l'intérêt d'avoir un cerveau dont l'organisation et le fonctionnement sont parmi les plus proches de celui des grands singes, comparé aux autres animaux.

En atteste le nombre de découvertes sur les mécanismes de son cerveau qui ont été plus tard retrouvées chez l'Homme, ainsi que les médicaments et les thérapies utilisées dans le cas de maladies neurodégénératives (comme la [maladie de Parkinson](#)), élaborés à partir de connaissances sur le cerveau du rat.



Psikharpax : reproduire au mieux le fonctionnement du rat. © Girard Benoît

Le rat comme modèle

Tout en ayant un cerveau moins grand et moins complexe que celui de l'Homme, le rat est un animal hautement adaptatif dont le comportement est suffisamment bien compris pour être testé en robotique. D'autre part, le rat est sans doute l'animal sur le cerveau duquel les chercheurs ont accumulé le plus grand nombre de mesures et de données expérimentales.

C'est donc un bon candidat pour une synthèse sur un [robot](#) et pour vérifier si ces mécanismes permettent bien au robot d'avoir la même autonomie comportementale que les rongeurs.

Psikharpax, un projet pluridisciplinaire

Le Projet Psikharpax requiert donc une démarche interdisciplinaire et même pluridisciplinaire, puisque les personnes qui participent au projet ont à la fois des compétences en informatique et en robotique, et des connaissances en

neurobiologie. Ce projet contribue ainsi au domaine des Sciences Cognitives, qui réunit l'ensemble des chercheurs de différentes disciplines visant à comprendre comment fonctionnent le cerveau et la pensée, chacun apportant sa propre méthode et ses concepts (neuroscience, intelligence artificielle, anthropologie, psychologie, linguistique, philosophie...).

Présentation du projet Psikharpax

Psikharpax vient du nom du roi des rats, tiré d'une parodie de *L'Iliade* (épopée attribuée à Homère). D'où vient le financement de ce projet ? Quelle en est l'équipe ? Voici quelques précisions.



Présentation du projet Psikharpax. © CNRS Photothèque/ISIR/Rajau Benoît

Naissance et financement du projet

Le projet visant à la conception du robot Psikharpax a été initié par **Jean-Arcady Meyer**, directeur de recherches CNRS. C'est lui qui dirige actuellement ce projet au sein de l'[Institut des systèmes intelligents et de robotique](#) (ISIR), sur le campus de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris.

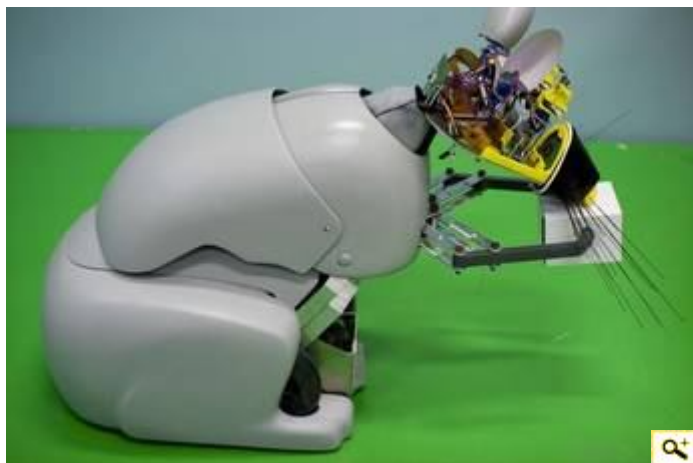
Le projet a d'abord été financé par le programme Robea du CNRS, puis par l'IST Cognitive Systems Unit de la commission européenne grâce au projet [ICEA](#) (*Integrating Cognition, Emotion and Autonomy*). À cette occasion, dix équipes de recherche de différents pays européens ont travaillé ensemble pendant quatre ans pour aboutir au robot Psikharpax et aux connaissances théoriques sur les mécanismes cérébraux qu'il a actuellement.

Équipe du projet

Mehdi Khamassi, auteur de ce dossier, a été nommé très récemment **chercheur CNRS dans l'équipe de l'ISIR concernée par Psikharpax** (équipe Systèmes intégrés, mobiles et autonomes). Il avait également déjà participé à ce projet dans le cadre de sa thèse (soutenue en 2007). La particularité de l'ISIR est de fournir un environnement de recherche particulièrement riche, comprenant de la mécanique, de l'électronique, de la robotique, du traitement du signal et de

l'intelligence artificielle. C'est pourquoi, dans cette équipe, divers chercheurs ont pu contribuer d'une part à la conception et la construction du prototype Psikharpax et, d'autre part, au développement de modèles computationnels neuromimétiques pour la perception multimodale (vision, toucher, audition), pour la navigation spatiale autonome et pour l'apprentissage.

On peut citer les **permanents** : Ryad Benosman, Bruno Gas, Benoît Girard, Christophe Grand, Agnès Guillot, Mehdi Khamassi, Jean-Arcady Meyer ; les **postDoc et doctorants** : Mathieu Bernard, Ken Caluwaerts, Laurent Dollé, Loïc Lachèze, Louis-Emmanuel Martinet, Steve N'Guyen, Denis Sheynikhovich ; et les **industriel** : Brain Vision System.



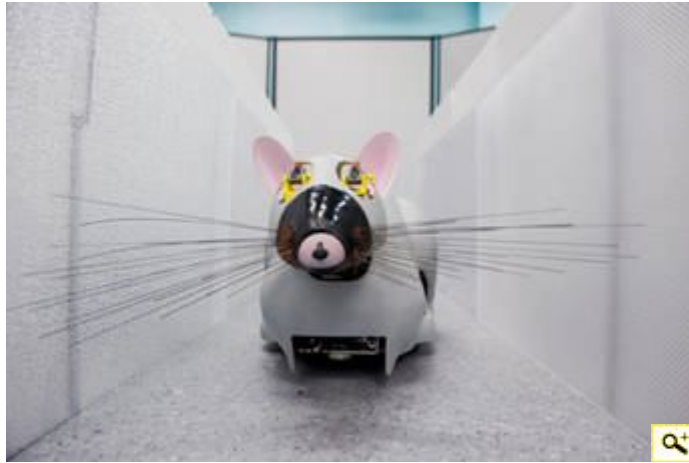
Pour monter le projet Psikharpax, il a fallu une équipe nombreuse et spécialisée. © CNRS Photothèque/ISIR/Rajau Benoît

Les Psikharpax réalisés

Deux versions de Psikharpax existent actuellement, toutes deux conçues par Christophe Grand à l'ISIR. L'une a des capacités de redressement et de préhension. Cela permet au [robot](#) de se relever pour percevoir des indices environnementaux lointains, et d'utiliser ses pinces pour pouvoir attraper des objets. L'autre version est utilisée notamment pour étudier tous les comportements de navigation spatiale, dans lesquels il n'y a pas besoin de manipuler des objets mais de se déplacer d'un point à un autre dans l'espace.

Système sensoriel et perception du robot Psikharpax

Le robot Psikharpax est doté de nombreux systèmes sensoriels qui lui permettent de percevoir ce qui l'entoure et de se construire une représentation interne de son environnement : vision binoculaire, audition, vibrisses (ce qu'on appelle communément les moustaches), odométrie (une estimation de ses propres déplacements), système inertiel (qui lui permet de connaître la position de son corps dans l'espace et de savoir lorsqu'il perd l'équilibre).



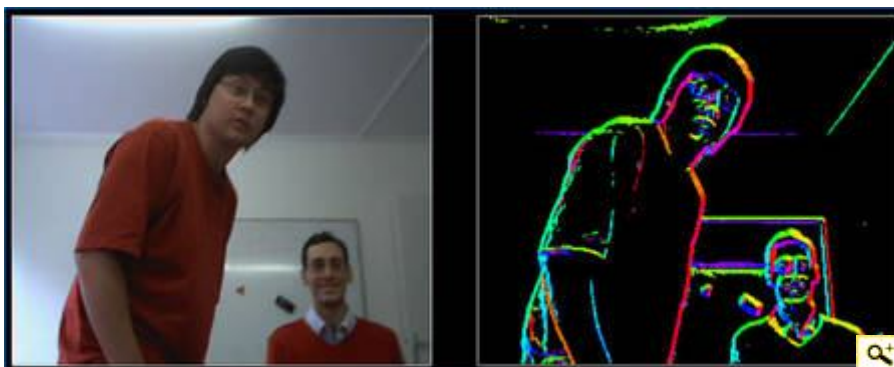
Psikharpax possède de nombreux systèmes sensoriels pour appréhender son environnement. © ISIR/N'Guyen Steve

Certains de ces senseurs, **comme les vibrisses, sont encore rares chez un [robot](#)**, et sont donc intéressants à étudier pour en analyser le potentiel complémentaire aux capteurs courants en robotique.

On voit ici comment le robot-rat utilise ses vibrisses pour naviguer. © Mehdi Khamassi/YouTube

Le problème de la fusion d'informations multisensorielles

Par ailleurs, l'utilisation de capteurs relevant de modalités sensorielles différentes ([vision](#), audition, toucher) pose un défi qui est commun à la biologie et à la [robotique](#) : le problème de la fusion d'informations multisensorielles. Comment fait-on pour comparer, mettre en commun, combiner des informations mesurées dans des espaces totalement différents ? Comment donner plus d'importance aux unes ou aux autres, par exemple lorsque le toucher donne des informations qui ne correspondent pas à ce qui a été vu ?



Système de vision du robot : détection bio-inspirée de mouvements, de couleurs et de contours. © Steve N'Guyen *et al.*, 2008/Brain Vision Systems

Le principe biomimétique qui suppose une similitude des traitements qui sont effectués par les différents senseurs est novateur. Il a été concrétisé par un mécanisme mis au point par la société [Brain Vision systems](#) et fonctionne sur une carte électronique à l'intérieur du robot. Il applique le même type de transformation spatiotemporelle aux informations mesurées par les [capteurs](#) visuels (caméras), auditifs, et tactiles (vibrisses). Au fond, dans tous les cas il s'agit de distinguer les objets, de distinguer les sons, de mettre l'accent sur les contrastes entre couleurs, entre surfaces, entre fréquences, et de mesurer la dynamique temporelle des signaux perçus.



Système de vision du robot : détection bio-inspirée de mouvements, de couleurs et de contours. © Steve N'Guyen *et al.*, 2008/CNRS Photothèque/ISIR/Rajau Benoît

L'audition de Psikharpax

La [perception auditive](#) du robot est réalisée par deux capteurs (micros) situés dans les « oreilles » du robot, avec chacun un pavillon permettant de réverbérer correctement le son. Le fait d'avoir deux capteurs auditifs, permettant une écoute binaurale comme chez le rat, est d'un grand intérêt puisqu'elle permet au robot de localiser finement d'où provient le son qu'il entend. En effet, la localisation de sources sonores repose principalement sur l'estimation des différences de temps de propagation entre la source et les deux capteurs auditifs placés à des positions différentes sur la tête du robot. Cela permet au robot de mesurer les différences d'intensité (*Interaural Intensity Difference*, IID) et de phase (*Interaural Phase Difference*, IPD) captées par ses deux oreilles et ainsi d'en déduire le plus

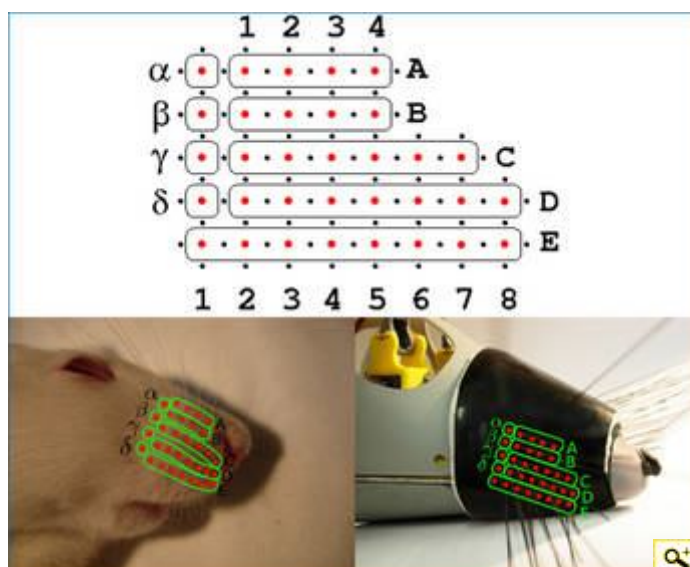
précisément possible d'où provient le son.



Audition : localisation du son, réflexe vestibulo-auditif, phonotaxie. © Mathieu Bernard *et al.*, 2010/ISIR /Bernard Mathieu

Appréhension de l'environnement : les vibrisses

Les vibrisses ou moustaches du robot sont organisées, de chaque côté de la tête, selon une matrice identique à celle du rat. Il y a au total 33 vibrisses de chaque côté, des courtes et des plus longues qui permettent, soit de reconnaître les détails des objets que le robot touche de près, soit de détecter des obstacles latéraux perçus par le robot pendant ses déplacements.



Les vibrisses du robot Psikharpax sont organisées comme celles du rat et permettent la reconnaissance de textures, la reconnaissance de formes, et le suivi de murs. © N'Guyen *et al.*, 2009 ; 2010/ISIR/N'Guyen Steve

Pendant le déplacement, les vibrisses permettent d'appréhender et d'éviter les obstacles, de longer les murs sans se cogner lorsque les couloirs/galeries sont étroit(e)s, de reconnaître les textures des murs et des objets, et ainsi de mieux se localiser. Par exemple, comme chez le rat, le [robot](#) mémorise que les murs du couloir qui mène à sa « réserve de nourriture » sont rugueux, tandis que les murs du couloir qui mène vers une « zone de danger » sont lisses. Toucher l'un de ces murs avec ses vibrisses peut aider le robot à reconnaître dans quel couloir il se situe, et ainsi adapter son comportement pour retrouver de la nourriture tout en évitant les dangers.

Cependant, en plus de traiter correctement chaque modalité sensorielle, savoir comment intégrer les informations issues de tous ces traitements est, comme on l'a évoqué plus haut, un problème non encore totalement résolu. Là encore, l'inspiration d'une partie du [cerveau](#) du rat regroupant ce que l'on appelle le colliculus supérieur et les ganglions de la base a pu contribuer à faire avancer les connaissances dans ce domaine. En effet il est avéré que ces noyaux sous-corticaux, contenant des centaines de milliers de neurones, fusionnent l'information de différentes modalités sensorielles et leur donnent à chacune un ordre de priorité pour déterminer lesquelles vont le plus influencer le comportement. Leur modélisation pourrait donc, par exemple, aider le robot à décider dans quelle direction il doit orienter sa tête pour focaliser son attention, soit vers le son perçu, soit vers l'objet vu, tout en évitant la paroi lisse de la zone de danger.

Robotique : le problème de la sélection de l'action

Une fois que le cerveau artificiel du robot dispose d'un certain nombre d'informations sensorielles décrivant ce qui entoure le robot, une question importante est de savoir quelle action celui-ci va décider d'effectuer pour satisfaire ses besoins et ses motivations.

Le robot peut sélectionner une action grâce aux ganglions de la base. © Benoît Girard/AnimatLab/YouTube

La sélection d'une action par les ganglions de la base

Nous avons déjà mentionné le fait que chez le rat, un ensemble de noyaux sous-corticaux (appelés les ganglions de la base) était important pour décider dans quel sens orienter sa tête, et ainsi focaliser son attention vers des zones de l'espace d'où parviennent des sons ou des images.

Il s'avère que les ganglions de la base sont bien plus importants que pour les simples mouvements de la tête. Les neurobiologistes pensent que c'est un centre important dans le [cerveau](#) pour résoudre le problème de la sélection de l'action. Quelle action effectuer à chaque instant ? Quelles actions sont compatibles et lesquelles sont contradictoires ? Puis-je avancer tout en tournant ma tête et en me grattant le museau ?

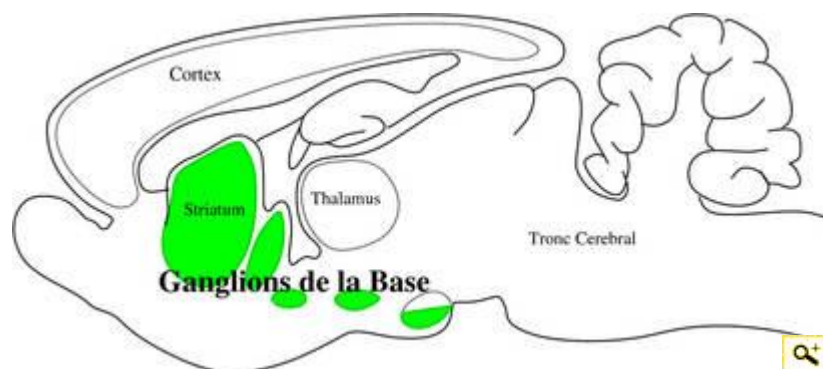
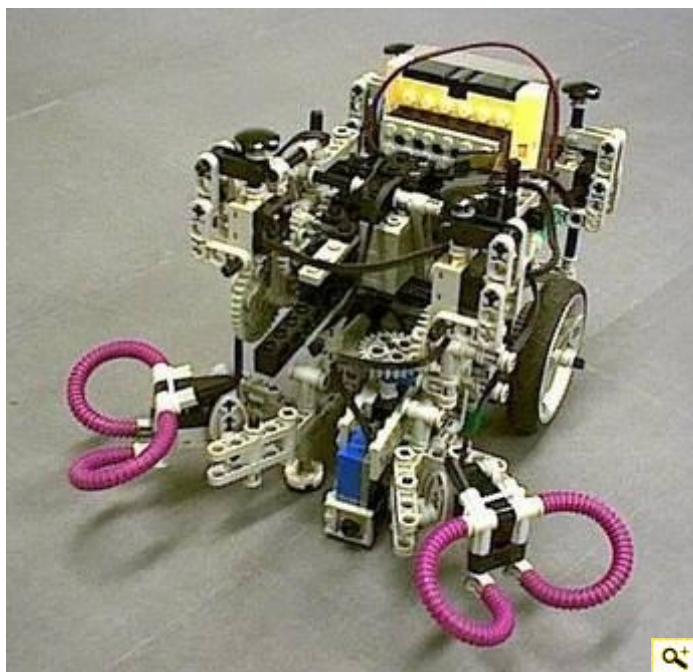


Schéma du cerveau du rat montrant l'emplacement des noyaux sous-corticaux appelés les ganglions de la base, qui sont importants pour la sélection de l'action. © Redgrave, Guerney, Prescott ABRG/ISIR/Girard Benoît

On sait que dans le cerveau du rat, les ganglions de la base reçoivent une convergence d'informations provenant de différentes parties du [cerveau](#), et que la sortie des ganglions de la base effectue une inhibition sur le système moteur. Cela permet de bloquer en permanence la plupart des actions, et de désinhiber (activer) certaines actions spécifiques en fonction des besoins.

Une des illustrations de cette fonction provient de l'observation des troubles d'initiation et de séquençage du comportement chez les gens atteints de la [maladie de Parkinson](#) ou de la maladie de Huntington. Or dans ces maladies, on sait que les circuits nerveux des ganglions de la base dégèrent.



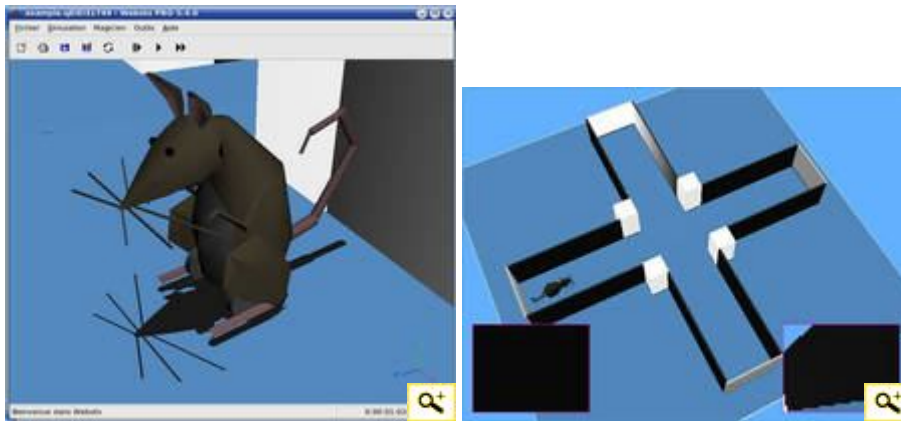
Robot utilisé pour les tests préliminaires du modèle de sélection de l'action inspiré des ganglions de la base qui fut ensuite intégré au robot Psikharpax. © AnimatLab LIP6/Girard Benoît/Cuzin Vincent/Guillot Agnès

Étude de la simulation des ganglions de la base sur les robots

Dans le cadre du Projet Psikharpax, un grand nombre de travaux ont été effectués pour tester la capacité d'un modèle mimant le fonctionnement des ganglions de la base à bien guider les actions du robot.

Ces travaux ont d'abord été effectués sous la forme de simulations informatiques, puis ont été appliquées sur le robot.

Pendant sa thèse, [Benoît Girard](#) a montré qu'en comparaison avec un simple système ingénieur de sélection de l'action qui choisirait à chaque fois l'action la plus fortement activée et inhiberait toutes les autres, le modèle de Psikharpax inspiré des ganglions de la base avait des propriétés de persistance de l'action qui permettait une économie d'énergie (Girard *et al.*, 2003). **Cela s'illustre par ce qu'on appelle le paradoxe de l'âne de Buridan.** La légende veut que cet âne soit mort de faim à force d'hésiter entre son picotin d'avoine et son seau d'eau. En effet, si l'on a un peu plus faim que soif et que l'on commence à manger, cela fait diminuer la faim par rapport à la soif. Alors on se retrouve à avoir plus soif que faim et on décide d'aller boire, même si l'on a encore faim. Cela produit des alternances perpétuelles entre deux ressources situées à des lieux différents, ce qui fait gaspiller de l'énergie à cause de tous ces déplacements. À l'inverse, les ganglions de la base permettent une persistance dans l'action en cours avant de passer à autre chose, ce qui fait économiser des déplacements et donc de l'énergie.



Simulation du système de sélection de l'action, inspiré des ganglions de la base, par un avatar de Psikharpax.

L'expérience du labyrinthe en croix reproduit des tâches de laboratoire effectuées par des rats qui doivent apprendre à choisir les bonnes actions pour obtenir de la récompense (de la nourriture ou de la boisson) cachée au bout de certains bras du labyrinthe. © ISIR/Khamassi Mehdi/Rolland Manuel/Guillot Agnès

Robotique : la problématique de l'apprentissage

Une des thématiques de recherche sur lesquelles se sont concentrés de nombreux travaux effectués à l'ISIR dans le cadre du projet Psikharpax est la problématique de l'apprentissage.



Comment se développe l'apprentissage chez les animaux ? Peut-on le reproduire sur des robots ? © komrod

Comment font les animaux pour apprendre à agir d'une certaine manière dans certains environnements, et d'une autre dans d'autres circonstances ? Comment apprennent-ils que certaines actions produisent des effets particuliers (par exemple agrandir un petit trou déjà présent dans le sol peut permettre de trouver des insectes) ? Comment s'adaptent-ils lorsque les changements de l'environnement (comme l'épuisement d'une ressource en nourriture) changent les effets des actions habituellement effectuées (il n'est plus utile de creuser ici, mieux vaut chercher ailleurs) ?

L'apprentissage par le mécanisme d'erreur de prédiction

Les neurobiologistes ont découvert que les processus nerveux régissant cet apprentissage se basaient sur un mécanisme d'erreur de prédiction. C'est-à-dire

que l'animal apprend à effectuer une action lorsque celle-ci donne des résultats mieux que prévus (erreur de prédiction positive) ; par exemple, l'animal appuie sur un levier et se rend compte que cela fait tomber de la nourriture dans son réservoir. Après un certain temps d'apprentissage, lorsque la réalisation d'une action donne exactement le même résultat que ce qu'on s'attend à obtenir (erreur de prédiction nulle), c'est qu'il n'y a plus besoin d'apprendre. Enfin, lorsque l'environnement change, une action dont on pense qu'elle va produire un certain résultat peut tout à coup ne plus avoir d'effet (par exemple appuyer sur le levier ne procure plus de nourriture). Il y a alors une erreur de prédiction négative qui permet de désapprendre cette action, ou d'apprendre à ne plus l'effectuer dans ce contexte.

Les travaux de psychologie du conditionnement animal ont montré que ces apprentissages s'accompagnaient de phénomènes d'anticipation de la récompense, comme dans l'expérience du [chien de Pavlov](#) qui, après apprentissage, anticipe l'arrivée de la nourriture dès qu'il entend la cloche sonner (stimulus conditionné permettant de prédire l'arrivée de récompense). Les apports de la neurophysiologie moderne ont été de pouvoir mesurer l'activité unitaire de neurones dopaminergiques dans le cerveau (neurones qui sécrètent un neuromédiateur appelé dopamine au niveau de leurs connexions avec d'autres neurones) et de montrer que l'activité de ces neurones suivait l'équation mathématique de l'erreur de prédiction (Schultz *et al.*, 1997). Or on sait justement que le système dopaminergique est intimement lié aux ganglions de la base, que ce système est dégénéré dans la maladie de Parkinson, et que les patients parkinsoniens ont des difficultés à apprendre de leurs erreurs (Frank *et al.*, 2007).

L'apprentissage du robot-rat. © Khamassi, Guillot, Lachèze, Girard/Animatlab

Le mécanisme d'erreur de prédiction pour Psikharpax

Une partie des travaux à laquelle Mehdi Khamassi a particulièrement contribué dans le cadre du Projet Psikharpax, a consisté à doter la partie ganglions de la base du « cerveau artificiel » du robot de mécanismes d'apprentissage basés sur l'erreur de prédiction. Dans ce travail, il a été appliqué notamment ces mécanismes dans une expérience du labyrinthe en croix (voir paragraphe précédent) pour savoir s'ils permettaient au robot de

montrer la même dynamique d'apprentissage que les rats de laboratoire. Or, comme souvent dans ce type de démarche, cela ne fonctionne pas du premier coup.

C'est là tout l'intérêt de la validation d'un modèle, c'est-à-dire de la confrontation des résultats simulés avec les données biologiques. Les chercheurs ont dû apporter des modifications à l'algorithme d'apprentissage du robot, qui impliquaient notamment qu'une sous-partie des ganglions de la base appelée le striatum ventral devait montrer des activités d'anticipation de la récompense. Ils sont ensuite retournés discuter avec leurs collaborateurs expérimentalistes neurobiologistes pour leur demander si ces modifications du modèle leur permettaient de mieux expliquer certaines de leurs mesures d'activités dans le cerveau. Ceci s'est avéré fructueux et a permis d'identifier certaines activités du striatum ventral chez le rat, comme des anticipations de la récompense mises en place au cours de l'apprentissage suivant un algorithme d'erreur de prédiction (Khamassi *et al.*, 2005, 2008).

Localisation et cartographie de l'espace : le défi de Psikharpax

Un dernier ensemble de travaux qui ont été effectués dans le cadre du projet Psikharpax ont concerné la localisation spatiale, et l'utilisation des informations cartographiques par le robot pour pouvoir naviguer de façon optimale et adaptative vers un but.



Le robot, à l'image du rat, doit pouvoir se localiser dans l'espace et atteindre un but. © Quest for Cheese

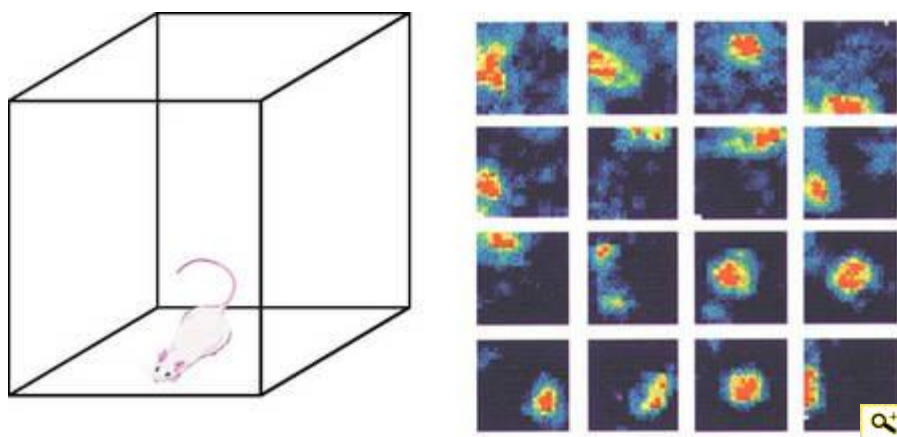
Une carte cognitive de l'environnement dans notre cerveau

Ces travaux se sont fondés sur l'hypothèse formulée par les neurobiologistes depuis les années 1970 qu'une partie du [cerveau](#) appelée l'hippocampe contribuait à l'élaboration d'une « carte cognitive » de l'environnement (John [O'Keefe](#) and Nadel, 1978). En effet, on savait déjà que les animaux sont capables de retrouver directement un lieu qu'ils ont déjà visité, ou de prendre des raccourcis pour revenir à leur nid, même si ça les oblige à passer par des chemins qu'ils n'ont jamais empruntés.

Cela suggère qu'ils ont une représentation mentale de leur environnement contenant des informations topologiques (la configuration entre les lieux, comme

un plan de métro) et des informations métriques (la distance entre les lieux). Les travaux de John O'Keefe au Royaume-Uni ont permis d'identifier les bases neurales de cette carte cognitive en montrant l'existence de cellules de lieu dans l'hippocampe chez le rat.

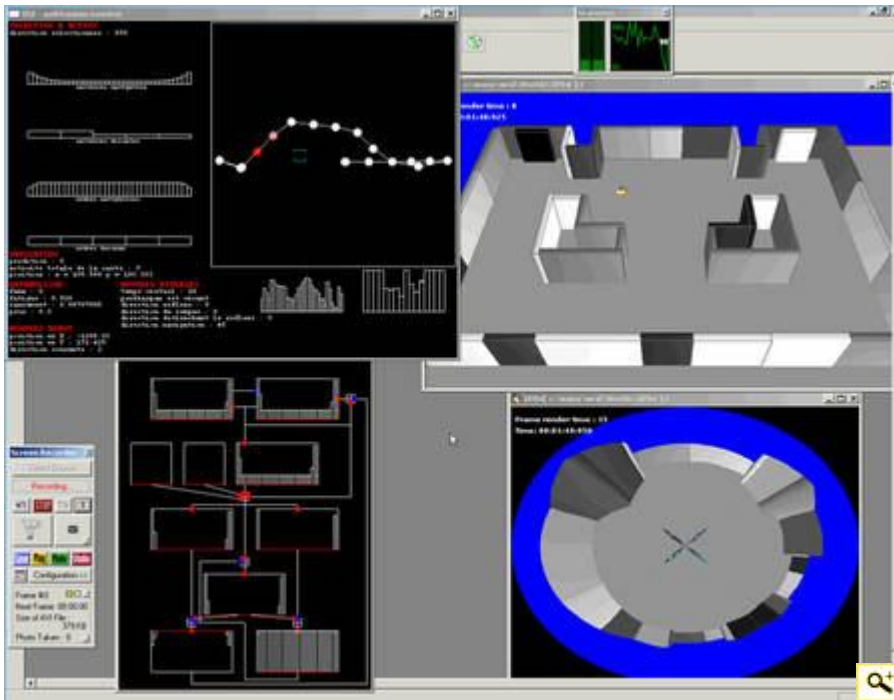
Les cellules de lieu



Chaque carré montre l'activité électrophysiologique (nombre de potentiels d'action) mesurée dans un neurone de lieu de l'hippocampe. Les zones bleues sont les endroits où le neurone a eu une faible activité (il n'a pas ou peu émis de potentiels d'action). Les zones jaunes, peu d'activité. Les zones rouges sont les endroits où le neurone a émis beaucoup de potentiels d'action, donc correspondant au « lieu préféré » du neurone. Enregistrements neurophysiologiques de neurones appelés les « cellules de lieu » dans l'hippocampe du rat pendant l'exploration d'un environnement cubique. Adapté de Min W. Jung, Sidney I. Wiener & Bruce L. McNaughton (1994). © CNRS/Wiener Sidney

Les cellules de lieu sont des neurones dont l'activité se manifeste quand le rat se trouve à une position spécifique de l'espace. Chaque neurone représente une position différente, et la conjonction couvre l'ensemble des positions possibles dans une arène, un labyrinthe ou une pièce. **C'est comme si le rat avait en permanence un GPS qui lui permette de se localiser dans l'espace.** Mais bien sûr, cette information n'est pas parfaite. Différents travaux ont été effectués en laboratoire pour tromper le rat sur sa position, en changeant par exemple la position d'un objet, ou en actionnant un tapis roulant sur lequel marche le rat. On observe dans ces cas-là que l'activité des cellules de lieu ne répond plus aux mêmes positions, comme si le rat ne savait plus où il se trouve.

Ceci suggère au passage que l'altération de cette partie du cerveau contribue aux phénomènes de désorientation que l'on peut parfois ressentir. D'autres neurones existants aussi dans le cerveau du rat et reliés au même système hippocampique vont répondre non pas à la position dans l'espace, mais à l'orientation (nord, sud, est, ouest) ou à la distance parcourue dans une certaine direction. Les premières sont appelées les cellules de direction de la tête, les deuxièmes les cellules de grille.



Simulations du robot construisant une carte mentale de l'environnement pendant l'exploration. Loïc Lachèze, Benoît Girard, Agnès Guillot. © ISIR/Lachèze Loïc

Une partie des travaux effectués sur le robot rat Psikharpax a consisté à reproduire informatiquement un modèle de l'hippocampe pour permettre au robot de se localiser dans l'espace. On laisse ensuite le [robot](#) explorer aléatoirement son environnement et se construire progressivement une carte cognitive. Il y mémorise notamment où sont localisées les ressources et où il y a des dangers, où il y a des obstacles, d'où proviennent certains sons qu'il a entendu, et quels endroits peuvent être reconnus par la différence de rugosité des murs.

Vidéo de simulations du robot construisant une carte mentale de l'environnement pendant l'exploration. Loïc Lachèze, Benoît Girard, Agnès Guillot. © ISIR/Lachèze Loïc

Navigation de façon autonome dans l'espace : perception et décision

Une fois que le robot peut percevoir le monde (sens visuel, tactile, auditif), qu'il peut décider comment agir et apprendre à agir dans un environnement spécifique, une fois qu'il peut se localiser et construire une carte de son environnement, le dernier travail a consisté à intégrer toutes ces fonctions cognitives sur le robot pour lui permettre de naviguer de manière autonome dans l'espace. En quelque sorte, cela a consisté à connecter et faire communiquer les différentes parties de son cerveau artificiel.

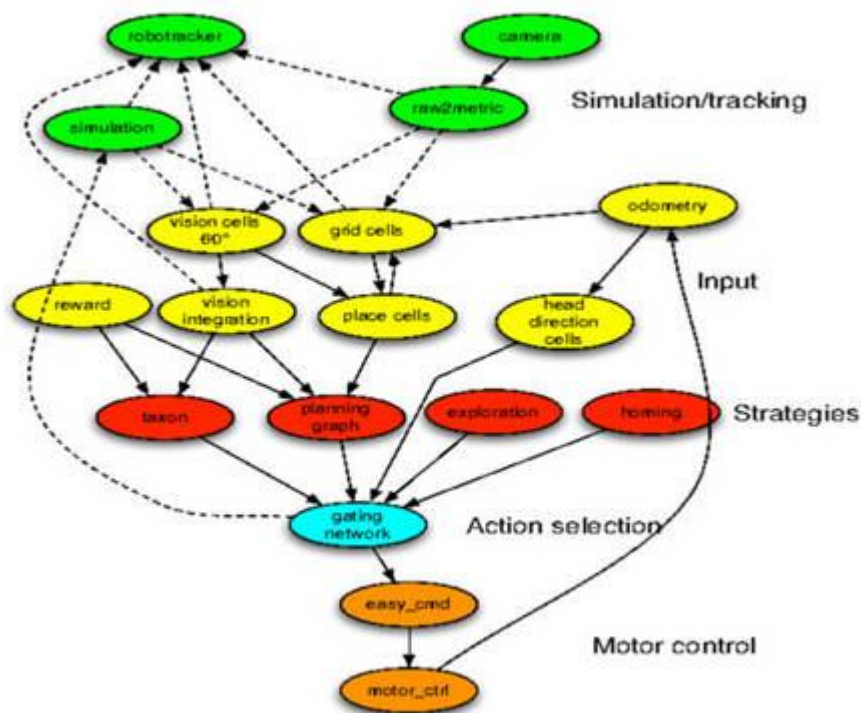


Schéma général des différents modules du « cerveau artificiel » du robot Psikharpax et de leurs interconnexions.
© ISIR/Caluwaerts Ken

La perception de l'environnement

La figure ci-dessus donne une idée de la complexité du schéma d'organisation du « cerveau artificiel » programmé sur le robot Psikharpax : certaines zones ou bouts de programmes correspondant aux modules de traitement de l'information (en jaune sur la figure), directement reliées aux capteurs du robot (caméra, vibrisses, capteurs auditifs, ..), vont contribuer à la perception du robot : quels sont les objets que le robot peut voir ? Est-ce qu'il entend un son et est-il capable de reconnaître de quel type de son il s'agit ? Est-ce que le robot est situé dans une zone ouverte et donc dangereuse ou bien est-il caché contre un mur qu'il peut ressentir avec ses vibrisses ?

Une sous-partie de ces zones ou modules de perception (toujours en jaune sur la figure) constitue la représentation élaborée du monde qu'est la carte de l'environnement (comme décrit dans le chapitre précédent). **Des neurones artificiels vont intégrer toutes les informations perçues par le robot pour en déduire une estimation du lieu** dans lequel le robot se situe par rapport au reste de la carte mentale (cellules de lieu ou *place cells* en anglais sur la figure), et une estimation de l'orientation du robot par rapport à la carte (cellules de direction de la tête, ou *head direction cells* en anglais).



Exemple d'environnement où le robot Psikharpax rejoint un but avec ou sans carte cognitive. Le point bleu indique la position du but que le robot a appris à rejoindre. Les taches vertes et rouges correspondent aux probabilités que le robot a d'utiliser des stratégies de navigation différentes pour le rejoindre (rouge : en utilisant sa carte cognitive ; vert : en visualisant directement le but). © Ken Caluwaerts, Mehdi Khamassi, Steve N'Guyen, Laurent Dollé, Christophe Grand, Agnès Guillot, 2010/ISIR/Caluwaerts Kenrobot Psikharpax

Toutes ces informations permettent au [robot](#) d'analyser la situation dans laquelle il se trouve, et quel est l'état de l'environnement autour de lui : tout est calme, ou bien il y a des « prédateurs », ou encore il y a de la « nourriture » présente. **À partir de ces informations, une partie du cerveau artificiel du robot va pouvoir prendre des décisions sur le comportement à mettre en œuvre** : est-ce qu'il doit fuir ? Est-ce qu'il peut rester au repos ? Est-ce qu'il doit explorer le lieu ? Est-ce qu'il doit s'approcher d'un objet nouveau qu'il perçoit et qui ne figure pas dans sa représentation du lieu ? Est-ce qu'il a besoin de consommer de la nourriture s'il en perçoit ?

Vidéo de l'expérience avec le robot Psikharpax : les différentes stratégies de navigation. © Ken Caluwaerts, Mehdi Khamassi, Steve N'Guyen, Laurent Dollé, Christophe Grand, Agnès Guillot, 2010/ISIR/Caluwaerts Kenrobot Psikharpax/YouTube

Comment le cerveau artificiel gère-t-il la prise de décision ?

Comme dans le cerveau biologique, de façon commune à tous les Mammifères, ces prises de décision vont dépendre de différents modules du [cerveau artificiel du robot](#). En effet, on sait que chez l'animal comme chez l'humain d'ailleurs, certaines de nos décisions relèvent du réflexe (lorsqu'un objet est propulsé rapidement dans notre direction, on s'écarte brutalement et « sans réfléchir » pour l'éviter). D'autres décisions plus réfléchies et donc plus lentes à mettre en

œuvre, dépendantes de motivations diverses, vont être basées sur une estimation des conséquences possibles de l'action avant de l'effectuer.

C'est exactement de cette manière qu'est organisé le [cerveau artificiel](#) du robot. Nous allons voir comment son cerveau gère la coordination et la compétition entre deux systèmes de décision, dans le cas de la navigation spatiale (voir encadré). Mais avant cela, on peut voir sur le schéma du cerveau du robot qu'une fois que chaque module rouge a pris une décision, un petit système centralisé va sélectionner un seul comportement à effectuer et va transmettre ce choix sous la forme d'ordres moteurs qui vont actionner les moteurs du robot, l'équivalent des muscles du rat. Comme nous l'avons vu précédemment, ce système de sélection de l'action est inspiré d'une partie du cerveau qui existe chez le rat, mais aussi dans notre cerveau : un ensemble de petits noyaux sous-corticaux appelé les ganglions de la base.

Conception de modèles computationnels pour l'apprentissage de :

La stratégie Taxon (entrées : cellules sensorielles), inspirée des boucles cortex/ganglions de la base/thalamus (Khamassi et al., 2006)

La stratégie de Lieu (entrées : carte cognitive), inspirée des réseaux de colonnes corticales dans le cortex préfrontal (Martinet et al., 2008, 2010)

Comment choisir la meilleure stratégie ?
(Problème en neurobiologie : e.g., Rich et Shapiro, 2009)

Le robot Psikharpax intègre un **nouveau modèle de sélection entre stratégies de navigation** fondé sur des hypothèses récentes en neurobiologie (Dollé, Sheynikhovich et al., 2009; Dollé et al., 2010) :

- Systèmes de mémoires parallèles sous-tendant les apprentissages simultanés d'experts taxon et de lieu) (favorisent la **coopération** entre experts)
- Un réseau apprend à choisir l'expert le plus efficace: comparaison de direction de mouvements proposés par chaque expert, considérant les indices spatiaux disponibles (favorisent la **compétition** entre experts)

La coopération de stratégies différentes peut accélérer l'apprentissage d'une tâche, la compétition entre stratégies peut empêcher des stratégies sous-optimales d'être exécutées. La compréhension des interactions entre stratégies peut aussi fournir une bonne base pour la conception de **robots capables de faire face à une gamme plus large de tâches comportementales.**

Comment le robot peut gérer la coordination et la compétition entre deux systèmes de décision ? © DR

Les différentes stratégies de navigation

En ce qui concerne les comportements de navigation, les neurobiologistes ont identifiés différentes « stratégies » comportementales qui reposent sur différents types d'information et qui engagent différentes parties de notre cerveau.

Une stratégie dite « de lieu » consiste à rechercher dans la carte cognitive le meilleur chemin pour éviter un danger (ou atteindre une récompense précédemment mémorisée) avant son l'exécution. Une autre stratégie dite « taxon » n'utilise pas la carte cognitive et consiste à atteindre une récompense en utilisant les indices visuels perçus.

L'existence de plusieurs stratégies permet aux animaux d'utiliser la plus adaptée à chaque environnement. Cela permet aussi une économie d'énergie dans les environnements familiers en abandonnant progressivement la stratégie de lieu qui demande beaucoup de calculs à la stratégie taxon, qui permet des comportements plus automatiques et habituels. Ce genre de phénomène existe aussi chez l'Homme. Lorsque l'on se rend à son nouveau lieu de travail dans une nouvelle ville, on regarde une carte et on reste très attentif aux indices de l'environnement en faisant le trajet. Petit-à-petit, à force d'effectuer le même parcours, l'environnement nous devient plus familier et on peut se déplacer de façon quasi-automatique, tout en rêvant à autre chose, en laissant notre corps nous porter. Un des travers de ce phénomène apparaît lorsqu'on doit aller en un autre lieu qui nécessite qu'on emprunte une partie du chemin habituel, et qu'on se retrouve

avec stupeur devant notre lieu de travail à force d'avoir rêvé en marchant.

Quoiqu'il en soit, ce système à stratégies multiples permet aux rats comme à l'ensemble des Mammifères de naviguer de façon très efficace dans leur environnement. Nous avons donc cherché à reproduire les mécanismes cérébraux sous-jacents, et étudié quelle devait être la façon de les coordonner pour permettre au robot de bien naviguer dans son environnement. C'est à nouveau un domaine où la robotique peut apporter une contribution aux neurosciences. En effet, les neurobiologistes peuvent identifier certains mécanismes dans différentes parties du cerveau. Mais en l'état actuel des technologies, il leur est pour l'instant très difficile d'identifier les mécanismes d'interaction entre différentes parties du cerveau. Le fait de modéliser informatiquement ces différentes parties sur un robot et de devoir les coordonner pour permettre une navigation efficace nous permet de formuler des hypothèses sur la manière dont ces mécanismes pourraient être coordonnés dans le cerveau du rat. **Ce qui crée une nouvelle piste d'échanges entre neurobiologistes et roboticiens...**

Conclusion du Projet Psikharpax et travaux futurs

Le Projet Psikharpax a abouti à la conception d'un robot-rat artificiel servant de test à de multiples hypothèses biologiques.



Camille Salaün, iCub et Mehdi Khamassi entourent le robot rat Psikharpax. © Photo : Nicolas Fauverte (DR)/ISIR /Fauverte Nicolas

Les connaissances apportées par le projet Psikharpax

Il permet de mieux comprendre comment le cerveau du rat, et plus généralement des Mammifères, traite les informations perçues sur le monde pour choisir les actions à effectuer, apprendre, naviguer.

Certains des travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont déjà permis de raffiner certaines hypothèses neurobiologistes en transférant de la robotique aux neurosciences les solutions qui ont été trouvées pour permettre au robot de résoudre une tâche donnée.

Dans ce cadre, et parmi celles de l'ensemble de l'équipe, les recherches de

l'auteur de ce dossier contribueront à spécifier, comme on le suppose en neurobiologie, que des modes d'apprentissage différents sont impliqués dans les différentes structures décisionnelles : comment apprend-on à mémoriser un stimulus qui permet d'obtenir une récompense, à convertir son comportement nouveau en comportement habituel, à changer de mode d'apprentissage si besoin est, etc.

Vidéo de l'apprentissage de iCub. © M. Khamassi, S. Lallée, P. Enel, E. Procyk, P.-F Dominey

Le futur : iCub

Il se trouve que ces problèmes ne sont pas spécifiques à Psikharpax, car à l'ISIR se trouve son compagnon, le robot iCub, qui pourrait aussi bénéficier des mêmes mécanismes pour apprendre à se comporter de façon adaptative.

L'auteur a aussi contribué à l'apprentissage de ce robot-enfant dans le cadre d'un post-doctorat à Lyon, une collaboration avec l'équipe Mouvement de l'ISIR est naturellement en chantier...

Sur le même sujet

Glossaire

Compteur intelligent
Rat de laboratoire
Robot

Avertissement : nous vous rappelons que l'impression de l'article affiché à l'écran n'est destinée qu'à un usage strictement personnel.

© Futura-Sciences - Tous droits réservés.