

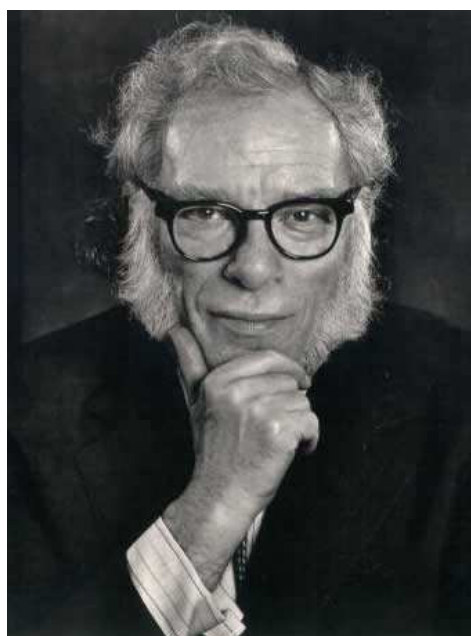


Café des Lumières

Médiathèque

Les trois lois de la robotique :

Isaac Asimov



Rencontre-débat proposée
par la MJC de Combs-la-Ville
avec Medhi Khamassi

Chercheur en robotique et neurosciences au CNRS

Samedi 2 avril 2011, 15h30
à la médiathèque

Isaac Asimov : biographie*

Sa vie

Айзек АЗИМОВ

Isaac Asimov est né le 2 janvier 1920 à Petrovichi, près de Smolensk, en Russie, date citée par lui-même dans sa biographie. Son père Judah Asimov, et sa mère Anna Rachel Berman, donnent naissance deux années plus tard à une petite soeur nommée Marcia. C'est dans cette période troublée d'après-guerre que la famille émigre aux Etats-Unis d'Amérique, mais le petit garçon devra attendre plus de cinq ans pour devenir citoyen américain.

Très tôt il aide ses parents en travaillant dans le *candy store* de son père, un bazar vendant magazines, sucreries, boissons, cigarettes... et qui marquera durablement le futur écrivain.

Après la naissance de son jeune frère Stanley, l'obligation de le surveiller décharge le jeune Isaac de ses devoirs de garçon de course. Il en profite pour se rendre régulièrement à la bibliothèque, et se plonger dans la lecture des multiples *pulps* vendus par son père, ces magazines bon marché qui publient de nombreuses nouvelles ou romans. C'est ainsi qu'il découvre la science-fiction populaire, participe activement au courrier des lecteurs, et écrit ses propres récits dès l'âge de onze ans, pour son seul plaisir d'écrire !

En 1937, Isaac Asimov rédige *Cosmic Corkscrew* (Le tire-bouchon cosmique), un récit basé sur un temps hélicoïdal, qu'il présente à John W. Campbell, jr, rédacteur en chef de *Astounding Science Fiction*. Mais celui-ci refuse le récit, aujourd'hui hélas perdu. Après plusieurs récits, l'écrivain en herbe parvient à vendre *Marooned off Vesta* (Au large de vesta) au magazine *Amazing* en 1939, premier récit d'une longue carrière. Finalement rien d'exceptionnel pour un enfant qui avait terminé l'école primaire à onze ans, la *high school* (le lycée) à quinze ans, et était *Bachelor of Arts* (licencié ès sciences) à l'âge de dix-neuf ans.



* Les textes et images jusqu'à la page 13 sont tirés de l'excellent site de Jean-Claude Monot : www.asimov.fr.



Le jeune homme rentre à la *Naval Air Experimental Station* de Philadelphie en 1942, autant pour participer à l'effort de guerre que pour avoir un emploi stable et pouvoir ainsi se marier la même année avec Gertrude Blugerman. Après ces trois années qu'il utilise cependant pour produire de nouveaux récits, il poursuit ses études et, contre toute attente, s'oriente sur la recherche chimique, devenant ainsi docteur ès science en 1948. Ce titre lui permet d'être professeur de chimie biologique à l'université de Boston, poste qu'il abandonnera en 1958 pour se consacrer exclusivement à sa carrière d'écrivain.

De Gertrude Blugerman, il a David le 20 août 1951 et Robyn Joan le 19 février 1955, mais ils se sépareront en 1970 pour ensuite divorcer. Il se remariera en 1973 avec la psychiatre Janet Opal Jeppson, et s'installera définitivement à New York aux abords de Central Park.

Souffrant d'insuffisances rénales et de problèmes cardiaques —il subit un triple pontage coronarien en 1983—, Isaac continue à écrire jusqu'à sa mort, le 6 avril 1992.

Il fut incinéré, et ses cendres dispersées.

« Je n'ai aucun regret [...] à l'idée de ne pas être là pour voir se mettre en place les futurs possibles. Car comme Hari Seldon, je peux contempler mon oeuvre tout autour de moi et cela me console. Je sais que j'ai étudié, imaginé et dépeint par écrit bien des avenir éventuels, alors c'est un peu comme si je les avais personnellement connus. »

Epilogue de « Moi, Asimov »
Isaac Asimov, Editions Denoël, 1996

Son oeuvre

Si Asimov parle aussi bien de littérature que d'histoire en passant par la vulgarisation scientifique, avec parfois des ouvrages aussi inattendus que *Le guide Asimov de Shakespeare* et *Le guide Asimov de la Bible*, il est surtout réputé en France pour ses oeuvres de science-fiction. En particulier deux monuments commencés dès les années quarante.

La trilogie Fondation, prolongée dans les années quatre-vingts, figure toujours parmi les best-sellers de la SF. Dans ce cycle de nouvelles ensuite regroupées en trois romans, il décrit l'essor, le déclin puis le renouveau d'un empire galactique dont les dimensions se mesurent en années-lumière. Ce cycle est centré sur une science imaginaire, la *psycho-histoire*, capable d'éclairer l'avenir à la lumière du passé.



Autre élément essentiel, la série des Robots, ensemble d'histoires sur les rapports souvent conflictuels entre l'homme et la machine, qui n'est plus le monstre en révolte contre son créateur, comme dans la SF traditionnelle. Asimov démontre également son goût des énigmes policières en inventant un robot-Sherlock Holmes pour Les cavernes d'acier (1954) et Face aux feux du soleil (1957).

L'*Oxford English Dictionary* lui accorde ainsi la paternité de trois mots : psycho-histoire, robotique et positronique.

Vers la fin de sa vie, celui que l'on surnomme *the good doctor*, entreprend de donner une cohérence à son oeuvre avec des romans-charnières reliant ses personnages et ses histoires. Il crée son propre magazine, *Isaac Asimov's science fiction magazine* (*IASF*), dans lequel il donne leur chance à de nouveaux talents qui ne devaient pas tarder à s'affirmer.

Bibliographie indicative

Les livres disponibles à la médiathèque sont indiqués en rouge

Livres de fiction

De nombreux ouvrages, recueils aussi bien que romans, parfois se suffisant à eux-mêmes, parfois intégrés dans des cycles, mais portant tous la griffe du *bon docteur*.

Romans et recueils hors cycle

De nombreux romans et recueils, à lire au gré des envies et sans ordre nécessaire, certains personnages récurrents donnant une cohésion à l'ensemble de ces ouvrages. Vous trouverez certaines nouvelles sur les veufs noirs ou bien les robots, qui sont également repris dans les recueils éponymes.

Asimov parallèle

Recueil de nouvelles, 1950 à 1955

Au prix du papyrus

Recueil de nouvelles, 1953 à 1982

Azazel

Recueil de nouvelles, 1982 à 1988

Azazel II : Légende

Recueil de nouvelles, 1987 à 1992

Cher Jupiter

Recueil de nouvelles, 1957 à 1973

Chrono-minets

Recueil de nouvelles, 1941 à 1964

Dangereuse Callisto

Recueil de nouvelles, 1940 à 1950

Destination cerveau

Roman, 1987

Espace vital

Recueil de nouvelles, 1953 à 1972

Flûte, flûte et flûtes

Recueil de nouvelles, 1950 à 1957

<u>Histoires mystérieuses</u>	Recueil de nouvelles, 1939 à 1967
<u>Jusqu'à la quatrième génération</u>	Recueil de nouvelles, 1953 à 1967
<u>L'amour, vous connaissez ?</u>	Recueil de nouvelles, 1951 à 1961
<u>L'avenir commence demain</u>	Recueil de nouvelles, 1956 à 1959
<u>L'homme bicentenaire</u>	Recueil de nouvelles, 1966 à 1976
<u>L'invité du ciel</u>	Roman, 1983
<u>La fin de l'Eternité</u>	Roman, 1955
<u>La mère des mondes</u>	Recueil de nouvelles, 1945 à 1949
<u>La pierre parlante</u>	Recueil de nouvelles, 1941 à 1980
<u>La voie martienne</u>	Recueil de nouvelles, 1952 à 1954
<u>Le voyage fantastique</u>	Roman, 1966
<u>Les dieux eux-mêmes</u>	Roman, 1972
<u>Les vents du changement</u>	Recueil de nouvelles, 1977 à 1982
<u>Mais le docteur est d'or</u>	Recueil de nouvelles, 1986 à 1995
<u>Mortelle est la nuit</u>	Recueil de nouvelles, 2004
<u>Noël sur Ganymède</u>	Recueil de nouvelles, 1940 à 1950
<u>Némésis</u>	Roman, 1989
<u>Prélude à l'Eternité</u>	Recueil de nouvelles, 1941 à 1977
<u>Le livre d'or de la SF</u>	
<u>Quand les ténèbres viendront</u>	Recueil de nouvelles, 1941 à 1951
<u>Une bouffée de mort</u>	Roman, 1958

Le cycle des Veufs Noirs

Un ensemble de succulentes énigmes, des plus anodines aux plus complexes, analysées et résolues par un groupe d'amis lors de repas mensuels. « Le genre d'histoires qui plaisait à Asimov : des histoires cérébrales ». Une soixantaine de nouvelles regroupées en cinq recueils, chaque histoire pouvant être lue indépendamment des autres au gré des envies.

<u>Le club des Veufs noirs</u>	Recueil de nouvelles, 1972 à 1974
<u>Retour au club des Veufs noirs</u>	Recueil de nouvelles, 1974 à 1976
<u>Casse-tête au club des Veufs Noirs</u>	Recueil de nouvelles, 1976 à 1980
<u>A table avec les Veufs noirs</u>	Recueil de nouvelles, 1980 à 1984
<u>Puzzles au club des Veufs Noirs</u>	Recueil de nouvelles, 1985 à 1990

Le cycle de David Starr, justicier de l'espace

Un cycle qui nous replonge avec plaisir dans la SF des années cinquante, avec un jeune homme, orphelin, véritable héros qui lutte sans faille contre les méchants pirates et les envahisseurs extraterrestres, avec réflexions et énigmes dignes des Veufs Noirs !

Chaque roman présente l'historique du jeune David Starr en quelques lignes, et même si certains ouvrages font parfois références aux précédents, ils peuvent tous être lus dans un ordre quelconque.

<u>Les poisons de Mars</u>	Roman, 1952
<u>Les pirates des astéroïdes</u>	Roman, 1953
<u>Les océans de Vénus</u>	Roman, 1954
<u>La fournaise de Mercure</u>	Roman, 1956
<u>Les lunes de Jupiter</u>	Roman, 1957
<u>Les anneaux de Saturne</u>	Roman, 1958
L'intégrale des ouvrages précédents : le cycle de David Starr	
<u>David Starr, justicier de l'espace</u>	

Le cycle des robots et l'Empire

Ce cycle se décompose en trois parties ; chacune peut être lu indépendamment des autres, formant trois imaginaires (les robots et la Terre, les robots et les mondes spaciens, puis l'Empire) qui vont peu à peu former une image globale du futur.

Les robots et la Terre.

Selon moi, les nouvelles sur les robots peuvent être lues dans un ordre quelconque, car elles ne dépendent pas, ou très peu, les unes des autres.

<u>Les robots</u>	Recueil de nouvelles, 1940 à 1950
<u>Un défilé de robots</u>	Recueil de nouvelles, 1942 à 1958
<u>Le robot qui rêvait</u>	Recueil de nouvelles, 1951 à 1982

Un recueil regroupant les deux premiers ouvrages :

Le livre des robots

Les robots et les mondes spaciens.

Sans être nécessaire, je recommande une lecture ordonnée de ces quatre romans, afin de goûter pleinement l'évolution des personnages et des actions, qui tissent l'histoire du futur.

<u>Les cavernes d'acier</u>	Roman, 1953
<u>Face aux feux du soleil</u>	Roman, 1956
<u>Les robots de l'aube</u>	Roman, 1983
<u>Les robots et l'Empire</u>	Roman, 1985

L'Empire.

Ces romans sur l'Empire se déroulent en des époques et des lieux suffisamment différents pour être lus dans un ordre quelconque.

<u>Les courants de l'espace</u>	Roman, 1952
<u>Tyrann</u>	Roman, 1951

Cailloux dans le ciel Roman, 1950
L'intégrale des 10 ouvrages précédents : le cycle des robots (et de l'Empire) en 2 recueils :
Prélude à Trantor
La gloire de Trantor

Le cycle de la Fondation

Prélude à Fondation Roman, 1988
L'aube de Fondation Roman, 1993
Fondation Recueil de nouvelles, 1942 à 1951
Fondation et Empire Recueil de nouvelles, 1945
Seconde Fondation Recueil de nouvelles, 1948 à 1949
Fondation foudroyée Roman, 1982
Terre et Fondation Roman, 1986

L'intégrale des ouvrages précédents : Le cycle de Fondation

Le déclin de Trantor

Vers un nouvel Empire

L'intégrale des cinq principaux romans, de *Fondation* à *Terre et Fondation*, traduction *révisée, complétée et harmonisée*

Fondation, le cycle

Fondation foudroyé, le cycle

Documentaires

Avant d'être écrivain de science-fiction, Isaac Asimov est un scientifique, et à ce titre, il a produit de nombreux ouvrages de vulgarisation scientifique ou d'autres plus inattendus, mais très peu ont été traduits en français.

En lisant ces oeuvres, il faut garder à l'esprit les connaissances scientifique de l'époque : elles peuvent avoir évolué, mais serviront de solide base à celui ou celle qui veut poursuivre...

Comprendre le langage des sciences Sciences, 1959
Le corps, tome 1 Sciences, 1965
Le cerveau, tome 2 Sciences, 1965
Trous noirs Sciences, 1977
Civilisations extraterrestres Sciences, 1979
Les moissons de l'intelligence, tome 1 Essais, 1983

<u>Homo obsoletus, tome 2</u>	Essais, 1983
<u>Myriades</u>	Sciences, 1984
<u>X comme inconnu</u>	Sciences, 1984
<u>Guide de la comète de Halley</u>	Sciences, 1985
<u>Le monstre subatomique</u>	Sciences, 1985
<u>L'univers de la science</u>	Sciences, 1986
<u>Ces soleils qui explosent : les secrets des supernovae</u>	Sciences, 1987
<u>Frontières : les plus récentes découvertes de la science sur l'homme, la terre et l'univers</u>	Sciences 1990
<u>La marche des millénaires</u>	Sciences, 1991
<u>Les robots, initiation à la science-fiction</u>	Essais, 1991

Dans la collection Père Castor de Flammarion, voici une série de 32 ouvrages de vulgarisation, adaptés aux jeunes...

01. <u>Les comètes ont-elles tué les dinosaures ?</u>	Sciences, 1989
02. <u>Uranus, la planète couchée</u>	Sciences, 1989
03. <u>Fusées, satellites et sondes spatiales</u>	Sciences, 1989
04. <u>Mars, notre mystérieuse voisine</u>	Sciences, 1989
05. <u>Pulsars, quasars et trous noirs</u>	Sciences, 1989
06. <u>Notre système solaire</u>	Sciences, 1989
07. <u>La Lune</u>	Sciences, 1989
08. <u>Les astéroïdes</u>	Sciences, 1989
09. <u>La Terre, notre base de départ</u>	Sciences, 1990
10. <u>Y a-t-il de la vie sur les autres planètes ?</u>	Sciences, 1990
11. <u>Comment est né l'univers ?</u>	Sciences, 1990
12. <u>Mercurure, la planète rapide</u>	Sciences, 1990
13. <u>Le Soleil</u>	Sciences, 1990
14. <u>Notre voie lactée et les autres galaxies</u>	Sciences, 1990
15. <u>Saturne et sa parure d'anneaux</u>	Sciences, 1990
16. <u>Guide pour observer le ciel</u>	Sciences, 1990
17. <u>Les objets volants non identifiés</u>	Sciences, 1991
18. <u>Les astronomes d'autrefois</u>	Sciences, 1991
19. <u>Vie et mort des étoiles</u>	Sciences, 1991
20. <u>Jupiter, la géante tachetée</u>	Sciences, 1991
21. <u>La colonisation des planètes et des étoiles</u>	Sciences, 1991
22. <u>La pollution de l'espace</u>	Sciences, 1991
23. <u>Science-fiction et faits de science</u>	Sciences, 1991

- | | |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| 24. <u>Pluton : une planète double ?</u> | Sciences, 1991 |
| 25. <u>Comètes et météores</u> | Sciences, 1991 |
| 26. <u>Les mythes du ciel</u> | Sciences, 1991 |
| 27. <u>Neptune, la plus petite des géantes</u> | Sciences, 1991 |
| 28. <u>Les vols spatiaux habités</u> | Sciences, 1991 |
| 29. <u>La course à l'espace : de la rivalité à la coopération</u> | Sciences, 1992 |
| 30. <u>Etre astronome aujourd'hui</u> | Sciences, 1992 |
| 31. <u>L'avenir de la conquête spatiale</u> | Sciences, 1992 |
| 32. <u>Vénus derrière ses voiles</u> | Sciences, 1992 |
| 33. <u>L'invité du ciel</u> | Sciences 1993 |

Les robots

Les Trois Lois de la Robotique

C'est dans ce contexte d'un XX^{ème} siècle en plein changement qu'arrive un nouvel écrivain qui laissera sa marque par des récits courts, écrits avec précision et clarté, et des dénouements qui ont souvent des allures de mise en garde.

Les robots d'Asimov

Dans sa jeunesse, Isaac lisait beaucoup de nouvelles, romans, livres de toutes sortes, dont des récits sur les robots. Et lorsqu'il décida d'écrire sa première nouvelle sur les robots, le 10 juin 1939 (cf. préface de Prélude à Trantor), il choisit d'ignorer les implications philosophiques des robots destructeurs, mais simplement de les considérer pour ce qu'ils sont : des outils. Et donc d'y intégrer ce qui est intégré à chaque outils que nous utilisons : une sécurité afin que l'outils ne nous blesse pas.

C'est ainsi que la nouvelle Robbie (*Strange flayfellow*) fut éditée en 1940 : un robot-nounou conçu pour s'occuper d'un enfant, et ne lui faire absolument aucun mal. La Première Loi était nommée.

L'année suivante, la nouvelle Raison (*Reason*) fut éditée : un robot utilise la logique pour expliquer sa vénération envers une machine ; deux hommes tentent de le faire obéir, en vain. La Deuxième Loi était nommée.

Il semble que ce soit à la lecture de cette nouvelle que John W. Campbell formalisa les Trois Lois que Isaac Asimov devait présenter explicitement dans le troisième récit Cycle fermé (*Runaround*). Asimov affirma que l'éditeur avait inventé les Lois, mais ce dernier rétorqua —à juste titre— qu'elles étaient implicitement contenues dans les récits (cf. préface de Prélude à l'éternité). S'agissant de robot, Asimov trouva tout naturel d'utiliser le néologisme « robotique » pour nommer la nouvelle science qui consistait à concevoir et étudier les robots.

Clares et concises, mentionnées par de nombreux écrivains et de multiples chercheurs à travers le monde, les Trois Lois de la Robotique étaient nées !

Les Trois Lois de la Robotique

Première Loi

Un robot ne peut blesser un être humain ni, par son inaction, permettre qu'un humain soit blessé.

Deuxième Loi

Un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la Première Loi.

Troisième Loi

Un robot doit protéger sa propre existence aussi longtemps qu'une telle protection n'est pas en contradiction avec la Première et/ou la Deuxième Loi.

Manuel de la robotique
58^e édition (2058 ap. JC)

Les questions

Les conséquences de ces Lois n'étaient pas minces, et Isaac Asimov ainsi que de nombreux écrivains, se sont attelés à décortiquer les questions posées. En effet, il subsistait dans ces règles apparemment inflexibles juste assez d'ambiguïtés pour produire les nombreuses nouvelles et romans de l'écrivain.

Qu'est-ce qu'un humain ? Comment le robot le définit-il ?

Et que faites-vous des critères physiques, des extraterrestres... ?

Tous les humains sont-ils aptes à donner des ordres à un robot ?

Avez-vous pensé aux criminels, aux enfants...

Jusqu'où un robot peut-il considérer qu'un humain est en danger ?

On peut se tordre la cheville rien qu'en marchant, et la souffrance peut bien sûr être émotionnelle...

En effet, comment apprécier le niveau d'importance à donner aux Trois Lois dans un contexte donné ? C'est en 1948 que Jack Williamson présente le roman « Les Humanoïdes », dans lequel des robots appliquent le principe des Trois Lois à l'extrême. Ils protègent les hommes du moindre danger en leur interdisant peu à peu toute initiative pouvant se révéler dangereuse, au point de les cantonner à une vie végétative dénuée de tout intérêt.

Peu à peu, les récits développent ce concept d'un robot dirigé par des règles inflexibles : les robots sont construits autour d'un cerveau spongieux en alliage platine-iridium. Cet alliage permet de traiter les multiples flux positroniques, c'est-à-dire constitués de positrons —ou positons—, ces particules similaires aux électrons mais chargées positivement. C'est donc souvent sous le nom de robots positroniques que les créatures artificielles d'Isaac Asimov sont connues, depuis leurs débuts dans les années 40 jusqu'aux années 90.

Le contexte

Les premières nouvelles font souvent la part belle aux robots. Ainsi, le personnage de la célèbre robopsychologue Susan Calvin dit-elle des robots que « leur souche est plus nette et meilleure que la nôtre ».

Il faut remettre ces mots dans le contexte de l'époque : certes, Asimov est très pessimiste quant à l'avenir de l'Homme et quant à sa droiture, mais le monde sort à peine des horreurs de la Seconde Guerre Mondiale et les prémices de la Guerre Froide apparaissent déjà. Comment ne pas avoir de doute sur la nature humaine ? Et considérer que des êtres tels que les robots, plus forts, plus rapides, guidés par des Lois indéfectibles dont le but est de préserver l'Homme, sont finalement des créatures plus respectables que nous ?

Après les années soixante, les récits sur les êtres artificiels se font plus rares, mais ceux produits montrent une certaine évolution du robot. Ce dernier acquiert de la réflexion, surpassant son état initial de calculateur ambulancier. Ainsi en est-il pour l'artiste de Poésie légère, ou bien des personnages de Ségrégationniste... Et si l'écrivain voit parfois le futur sous un jour plus agréable pour l'Humanité, sous la conduite de R. Daneel Olivaw, il garde aussi son pessimisme d'antan, comme le montre la superbe nouvelle Vision d'un robot, écrite en 1990.

La « Zéroième Loi »

Durant cette période, le lecteur voit ainsi défiler de nombreux robots, passant de la simple nounou muette, au robot explorateur spatial, télépathe, procureur, messie, enquêteur. Pour arriver à un robot perfectionné à l'apparence extérieure parfaitement humaine, un robot humaniforme, qui s'est lui-même assigné la lourde tâche de protéger, non pas seulement un ou deux humains, mais l'humanité dans son ensemble.

Ainsi près de cinquante ans après le premier robot d'Isaac Asimov, celui-ci laisse ses créatures proposer une « Zéroième Loi », les Trois Lois initiales étant modifiées pour donner priorité à celle-ci :

Zéroième Loi

Un robot ne peut blesser l'humanité ou, par son inaction, permettre que l'humanité soit blessée.

Loi citée par R. Giskard Reventlov et R. Daneel Olivaw dans « Les robots et l'Empire »
Isaac Asimov, J'ai lu, 1985

Les créatures de l'écrivain évoluent tout au long de sa carrière : le robot est devenu plus intelligent dans le sens où il n'applique pas les Lois brutalement. Il réfléchit aux implications de ses choix, aux possibilités qui débordent du cadre sacro-saint des Lois implantées dans sa carcasse métallique.

Et il déborde également dans notre monde réel. Récits et réel se croisent de plus en plus : il suffit de regarder autour de nous pour nous en persuader.

Les applications de la robotique

*Psikharpax, le robot-rat intelligent**

Un article de Mhedi Khamassi, Chercheur CNRS en Robotique et Neurosciences.

1. Psikharpax, le robot-rat intelligent
2. Psikharpax et la robotique biomimétique
3. Projet Psikharpax : pourquoi le rat ?
4. Présentation du projet Psikharpax
5. Système sensoriel et perception du robot Psikharpax
6. Robotique : le problème de la sélection de l'action
7. Robotique : la problématique de l'apprentissage
8. Localisation et cartographie de l'espace : le défi de Psikharpax
9. Navigation de façon autonome dans l'espace : perception et décision
10. Conclusion du Projet Psikharpax et travaux futurs



1- 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.

* Retrouvez cet article et les vidéos qui l'accompagnent sur le site futurasciences.com : http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/robotique-1/d/psikharpax-le-robot-rat-qui-developpe-tout-seul-des-capacites-par-apprentissage_1141/c3/221/p1/

2- 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 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).



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

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.

3- 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.

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...).

4- Présentation du projet Psikharpax

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

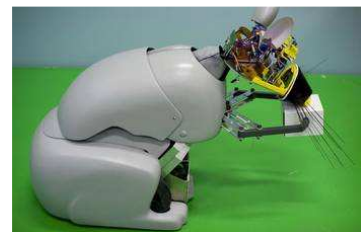
Naissance et financement du projet

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



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

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 **industriels** : Brain Vision System.

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.

5- Système sensoriel et perception du Psikharpax

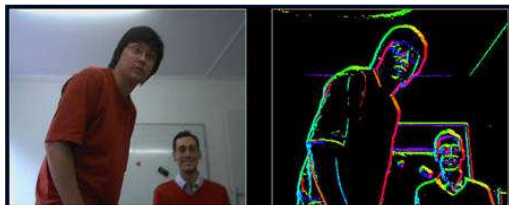


Psikharpax possède de nombreux systèmes sensoriels pour appréhender son environnement. © ISIR/N'Guyen Steve

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).

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.

Le problème de la fusion d'informations multisensorielles



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

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/CNRS Photothèque/ISIR/Rajau Benoît

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.

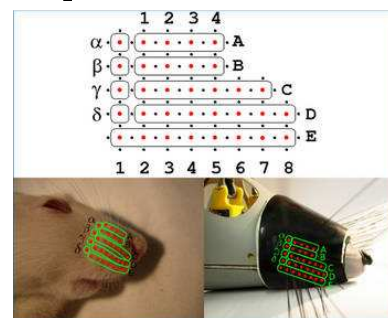
L'audition de Psikharpax

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.

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.

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.



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

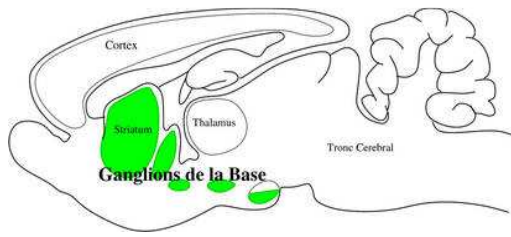


Schéma du cerveau du rat montrant l'emplacement des noyaux sous-corticaux appelés les ganglions de la base, qui sont importants pour la sélection de l'action. © Redgrave, Guerney, Prescott ABRG/ISIR/Girard Benoît

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.

6- 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.

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.

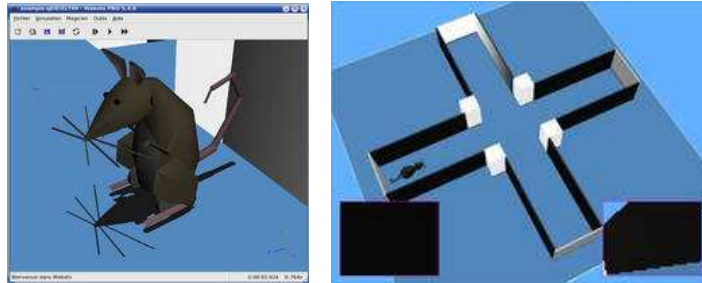
Il s'avère que les ganglions de la base sont bien plus importants que pour les simples mouvements de la tête. Les neurobiologistes pensent que c'est un centre important dans le cerveau pour résoudre le problème de la sélection de l'action. Quelle action effectuer à chaque instant ? Quelles actions sont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

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 dégénèrent.

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.



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

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.

7- 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 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).

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).

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

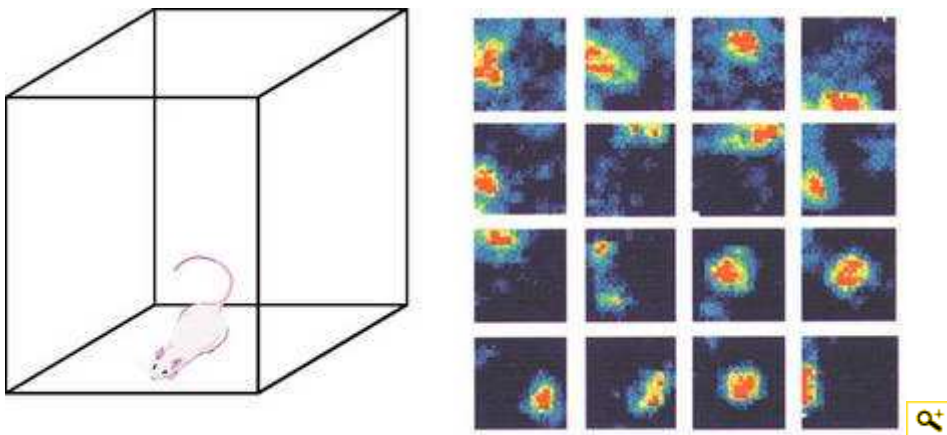
Un dernier ensemble de travaux qui ont été effectués dans le cadre du projet Psikharpax ont concerné la localisation spatiale, et l'utilisation des informations cartographiques par le robot pour pouvoir naviguer de façon optimale et adaptative vers un but.

Une carte cognitive de l'environnement dans notre cerveau

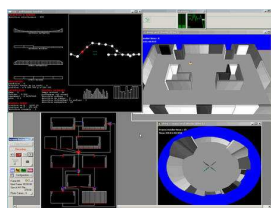
Ces travaux se sont fondés sur l'hypothèse formulée par les neurobiologistes depuis les années 1970 qu'une partie du cerveau appelée l'hippocampe contribuait à l'élaboration d'une « carte cognitive » de l'environnement (John O'Keefe and Nadel, 1978). En effet, on savait déjà que les animaux sont capables 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



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

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.

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.

9- Navigation de manière 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.

La perception de l'environnement

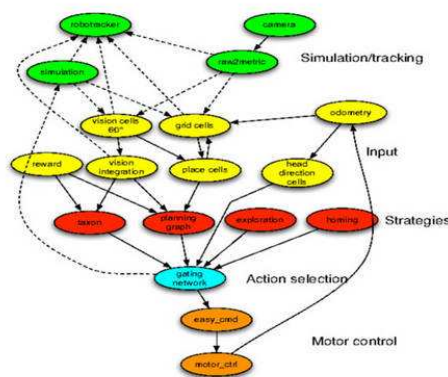


Schéma général des différents modules du « cerveau artificiel » du robot Psikharpax et de leurs interconnexions.

© ISIR/Caluwaerts Ken

La figure ci-contre 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 Psikharpx 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 Psikharpx

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 ?

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.

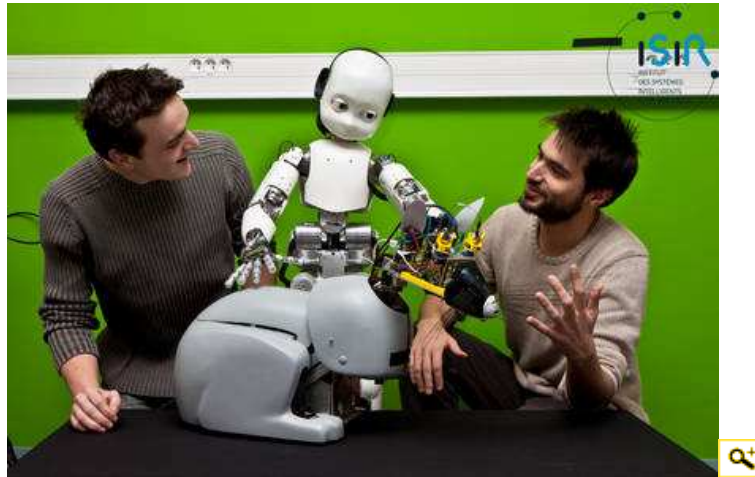
Une stratégie dite « de lieu » consiste à rechercher dans la carte cognitive le meilleur chemin pour éviter un danger (ou atteindre une récompense précédemment mémorisée) avant son l'exécution. Une autre stratégie dite « taxon » n'utilise pas la carte cognitive et consiste à atteindre une récompense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

10- 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.

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...