
LA CONTRIBUTION DE L'APPROCHE ANIMAT AUX SCIENCES COGNITIVES

Agnès Guillot et Jean-Arcady Meyer

AnimatLab, LIP6, 8 rue du Capitaine Scott, 75015 Paris

<http://animatlab.lip6.fr>

{agnes.guillot ;jean-arcady.meyer}@lip6.fr

Résumé: Depuis une quinzaine d'années, la conception des systèmes artificiels a connu une révolution épistémologique. Elle a consisté à dépasser l'opposition classique entre les mondes organiques et inorganiques en cherchant à doter les machines des capacités d'adaptation et d'autonomie propres aux systèmes vivants. C'est l'objectif de l'approche animat, qui s'inspire de processus biologiques comme le développement, l'apprentissage ou l'évolution pour concevoir des animaux artificiels - simulés sur ordinateur ou instanciés en robots réels – capables d'exhiber des capacités adaptatives basiques dans un environnement complexe, dynamique et imprévisible. Ces capacités adaptatives basiques sont étudiées en tant que primitives possibles, et peut-être indispensables, de la cognition humaine. Après avoir évoqué quelques uns des premiers robots du 20^{ème} siècle, cet article rappelle comment l'approche animat s'est constituée, puis comment elle se situe actuellement par rapport à l'Intelligence Artificielle. Il présente ensuite les principales directions de recherche et réalisations de la discipline. Il en évoque aussi les principales limitations.

Introduction

Depuis une quinzaine d'années, la conception des systèmes artificiels a connu une révolution épistémologique qui a consisté à dépasser l'opposition classique entre les mondes organiques et inorganiques, et à envisager de doter les machines des capacités d'adaptation et d'autonomie propres aux systèmes vivants.

Dès l'Antiquité, des savants avaient pu réaliser des automates parfaitement adaptés à la réalisation d'une tâche donnée et, d'une certaine manière, on peut considérer que la plupart des robots industriels actuels en sont des descendants sophistiqués. Cependant aucune de ces machines n'est capable de modifier son comportement et de poursuivre sa mission en réponse à des changements imprévus. C'est le nouvel objectif assigné aux systèmes artificiels, qui devront être non seulement adaptés, mais encore adaptatifs. De tels systèmes appelés « animats » - animaux artificiels simulés ou robots réels - visent en effet à exhiber de façon autonome des capacités

adaptatives dans un environnement complexe, dynamique et imprévisible, en s'inspirant des processus biologiques comme le développement, l'apprentissage ou l'évolution. Par sa démarche synthétique consistant à réunir dans un système artificiel des mécanismes adaptatifs étudiés auparavant isolément chez les systèmes naturels, « l'approche animat » peut aider à la compréhension des processus liés à la cognition.

Après avoir évoqué les élaborations historiques - trop injustement oubliées - de quelques robots du début du 20^{ème} siècle, nous rappellerons comment l'approche animat s'est constituée et comment elle se situe par rapport à l'Intelligence Artificielle et à la robotique. Nous établirons ensuite un bilan des contributions de cette approche à l'étude des processus cognitifs.

Proto-robots, Intelligence Artificielle et approche animat

Les proto-robots

Au début du siècle dernier, des tentatives isolées d'ingénieurs avaient déjà visé à concevoir des machines capables de s'adapter à des perturbations extérieures en s'inspirant des travaux sur le comportement des animaux, tentatives dont on trouvera un historique dans Cordeschi (2002). Ainsi Hammond et Miessner se sont-ils inspirés des travaux de Loeb (1918) sur le phototropisme animal pour mettre au point un « chien électrique », muni de deux yeux en sélénium et de trois roues (Miessner, 1916). A la manière d'un papillon de nuit attiré par une lumière, ce robot suivait une lampe déplacée par ses concepteurs. Dans les machines de Russell (1913) et de Stephens (1929), de même, des circuits hydrauliques et électromécaniques ont été utilisés pour reproduire la « loi de l'effet » décrite par le psychologue Thorndike (1911) et ces machines ont ainsi appris à répondre à des stimuli répétés, ou à ne plus répondre à des stimuli de moins en moins appliqués. De même, le « robot rat » de Ross (1938) apprenait à éviter les impasses dans un labyrinthe en Y à l'aide d'un « disque de mémoire », sur les principes de la « machine psychique » d'un autre psychologue, Hull (1943), lequel intégrait aux conceptions courantes sur l'apprentissage par essais et erreurs des notions plus cognitives comme l'anticipation du but et la planification.

Il semblait dès lors possible que des machines contrôlent elles-mêmes leur comportement. D'ailleurs, en 1943, Rosenblueth, Wiener et Bigelow démontraient qu'un mécanisme général de boucle de rétroaction des effets sur les causes pouvait permettre à un système artificiel de « rechercher un but » et de modifier de façon autonome son comportement jusqu'à atteindre un état désiré (Rosenblueth et al., 1943). Ces travaux, joints à ceux de Shannon (1948) sur la théorie de l'information - théorie mathématique qui suppose que l'information véhiculée dans toutes données sensorielles ou mentales peut être traitée en symboles objectifs - annonçaient l'avènement de la cybernétique (Wiener, 1948), offrant enfin un support théorique et

mathématique à l'étude des capacités d'adaptation des machines. Rapidement, diverses réalisations ont été influencées par ces recherches, dont les plus remarquables ont été l'homéostat d'Ashby (1952) et les tortues cybernétiques de Walter (1950). L'homéostat était qualifié par son inventeur de « machine ultra-stable ». Il s'adaptait à des perturbations grâce à deux boucles de rétroaction, l'une externe - entre les capteurs sensoriels de la machine et le milieu - l'autre interne, maintenant ses « variables essentielles » dans une zone de viabilité. Quant aux tortues, elles constituaient de véritables robots mobiles adaptatifs : munis de capteurs photoélectriques, de processus de contrôle cybernétiques et d'une forme de mémoire sous forme de délais temporels dans leurs circuits centraux, ces robots à roues se dirigeaient librement dans leur environnement. Ils étaient attirés vers une lumière si elle était faible, la fuyaient si elle était intense, retournaient dans leur station de recharge. Grâce à des programmes d'apprentissage, ils savaient produire des comportements différents en réponse à deux stimuli différents. L'ordinateur toutefois n'y avait pas encore son rôle, les circuits « nerveux » des tortues étant électromécaniques et non électroniques.

L'Intelligence Artificielle

Les travaux de Turing (1936), concernant une machine universelle capable de résoudre des problèmes en manipulant des symboles, et ceux de McCulloch et Pitts (1943) sur des neurones artificiels traitant des règles de la logique, ont suggéré qu'il était possible qu'un ordinateur puisse simuler l'esprit humain. A partir des années 1950, l'avènement de l'Intelligence Artificielle a alors engagé les chercheurs dans l'élaboration de machines ayant pour objectif de modéliser la complexité de l'intelligence humaine. Newell et Simon (1972) ont renforcé cette démarche en soulignant, dans leur « métaphore computationnelle », l'analogie entre les éléments structurels d'un ordinateur et l'organisation du cerveau. Influencés par les partisans d'une cognition libérée de l'action - comme, par exemple, Koehler (1926) ou Tolman (1948) - et par les critiques proférées à l'encontre des behavioristes niant toute représentation interne (Watson, 1926), ils ont conçu ces systèmes comme des cerveaux isolés d'un corps, excluant les interactions sensorimotrices dans l'élaboration des connaissances. Divers programmes informatiques ont d'ailleurs suggéré que des machines pouvaient se passer d'organes sensoriels et moteurs pour simuler des capacités cognitives élaborées. Par exemple, des architectures à base de règles telles que GPS (Newell et Simon, 1963), ACT* (Anderson, 1983) ou Soar (Laird et al., 1987) étaient capables de résoudre des problèmes complexes. De même, des systèmes comme Dendral (Lindsay et al., 1980) ou Mycin (Buchanan et Shortliffe, 1984) se sont avérés experts dans le domaine de la chimie ou dans celui du diagnostic médical. Quant au robot virtuel SHRDLU de Winograd (1971), il avait la capacité de « dialoguer » avec l'expérimentateur pour lever des ambiguïtés sur l'objet qu'il devait déplacer dans un monde de blocs virtuels.

Cependant, en 1972, le philosophe Dreyfus critiqua vivement les limitations de ces systèmes, liées principalement au fait que leur concepteur doit leur inculquer *a priori* un très grand nombre de ses propres connaissances pour que ces systèmes fonctionnent efficacement (Dreyfus, 1972). En particulier, ce qui a été appelé le problème de l'ancrage des symboles (*symbol grounding problem* - Harnad, 1990) exprime le fait que le sens attribué aux symboles manipulés par le programme n'est pas intrinsèque au système et lui est donc imposé de façon ad hoc par le programmeur. De même, le problème du cadre (*frame problem* - McCarthy et Hayes, 1969) désigne la difficulté pour une machine de distinguer entre ce qui est important à appréhender dans l'environnement et ce qui ne l'est pas. Là encore, c'est le programmeur qui lui impose le choix des stimuli pertinents. Par cette attribution de connaissances déjà constituées, l'humain risque d'apporter des informations qui préjugent des solutions à découvrir. Il risque surtout de négliger de donner celles qui lui paraissent évidentes et qui peuvent se révéler absolument cruciales dans la résolution de problèmes de tous les jours. Ces connaissances implicites font partie de ce qu'on appelle le "sens commun". Elles concernent, par exemple, le fait de savoir qu'un objet ne tient pas tout seul en l'air, que les mères sont toujours plus âgées que leurs enfants, que pour manger il faut être réveillé, etc.

C'est ce type d'informations que Lenat et Guha (1990) ont tenté de faire apprendre par Cyc - le dernier grand projet d'architecture cognitive de l'Intelligence Artificielle dite « classique » - afin que ce système puisse communiquer en langage naturel avec les humains. Cyc devait construire son « sens commun » en organisant des connaissances de tous ordres, données sous forme de propositions par de nombreuses personnes de tous âges, conditions et situations sociales. Bien que relativement efficace dans l'inférence de connaissances - puisqu'il a été depuis reconverti pour la fouille de données sur Internet - ce projet n'a pu aboutir dans son objectif premier. L'explication la plus fréquemment évoquée concerne le fait que Cyc n'a pas pu expérimenter le monde avec ses senseurs et ses actionneurs, comme le réalisent tous les systèmes biologiques, humains ou non. Il n'a donc pas pu forger les informations spécifiques qui lui sont indispensables pour appréhender de façon efficace son environnement physique et social. Cette construction nécessaire rejoint la notion d'Umwelt (« monde propre ») de l'éthologue von Uexküll (1909), qui désigne la représentation du monde que se bâtit empiriquement chaque animal avec ses propres organes sensoriels et moteurs. Par définition, cette représentation sera différente entre espèces – car elles n'ont pas les mêmes équipements – et entre individus d'une même espèce – car ils ne vivent jamais exactement les mêmes expériences. De la même façon, un système artificiel doit se construire un Umwelt avec les équipements non biologiques dont il dispose.

L'approche animat

En 1986, par réaction contre ces limitations de l'IA classique, Brooks – doctorant chez McCarthy – a eu l'idée de concevoir l'architecture de contrôle d'un robot en

réintégrant l'action dans la construction des connaissances du système. Il a affirmé en effet qu'un système artificiel devait se concevoir comme un système entier, qui se *comporte* dans un environnement réel. Il a ainsi remplacé une approche descendante, dans laquelle le cerveau organise de façon centralisée la cohérence des comportements, par une approche ascendante, dans laquelle ce sont les comportements activés en parallèle et interagissant avec l'environnement qui font émerger leur propre cohérence (Brooks, 1986, 1991, 2002).

Une communauté de chercheurs s'est reconnue dans cette démarche, nommée depuis « approche animat », contraction d'« animal artificiel ». Cette approche a pour objectif de concevoir des systèmes artificiels simulés ou des robots réels inspirés des animaux, s'adaptant de façon autonome dans un environnement qui n'est pas toujours prévisible par l'homme (Meyer et Guillot, 1991; Meyer, 1996; Wilson, 1991). Elle s'attache ainsi à reproduire *d'abord* chez un animat les aptitudes que l'homme partage avec les animaux pour survivre - repérer et catégoriser les stimuli pertinents, s'orienter dans un environnement, enchaîner ses actions, etc. - car elles sont supposées être les primitives d'aptitudes plus complexes qui nous sont spécifiques, comme le raisonnement logique, le langage, voire la conscience. L'importance du vécu, de l'expérience et des boucles sensori-motrices dans le développement des capacités physiques, sociales ou cognitives avait été soulignée depuis longtemps par des psychologues ou philosophes (e.g. Piaget, 1926; Husserl, 1950; Vygotsky, 1978). De la même façon, un animat aura à acquérir empiriquement ses capacités adaptatives et, pour ce faire, sera « situé », c'est-à-dire qu'il appréhendera le monde par ses senseurs et ses actionneurs avec une intervention humaine minimale (Hendriks-Jansen, 1996; Clancey, 1997; Clark, 1997; Drogoul et Meyer, 1999). De plus, son architecture de contrôle devra être capable, si besoin est, de modifier sa propre organisation, par des processus inspirés de la biologie comme le développement, l'apprentissage ou l'évolution (Guillot et Meyer, 2000, 2001) (Figure 1).

Un demi-siècle plus tard, cette approche rejoint ainsi l'esprit des concepteurs des proto-robots adaptatifs évoqués plus haut. Elle a pris son essor grâce notamment au développement d'algorithmes d'apprentissage issus de l'école connexionniste (Rumelhart et McClelland, 1986) ou d'algorithmes évolutionnistes (Holland, 1975; Koza, 1992). En effet, au-delà des techniques d'apprentissage supervisé qui nécessitent des consignes précises sur ce qu'il faut faire ou ne pas faire pour acquérir ou organiser des connaissances, l'apprentissage *par renforcement* (Sutton et Barto, 1998) retient les comportements qui ont été suivis de ce que le système perçoit comme une « récompense », tandis que l'apprentissage *associatif* (Kohonen, 1984; Grossberg, 1998) associe des informations sensorielles et/ou motrices en fonction des objectifs propres du système. Quant aux méthodes évolutionnistes, elles ont élargi la notion d'apprentissage individuel à celle d'apprentissage collectif, dans lequel des organismes performants peuvent émerger par "sélection naturelle" de type darwinien au travers de nombreuses générations issues d'une population d'origine générée aléatoirement.

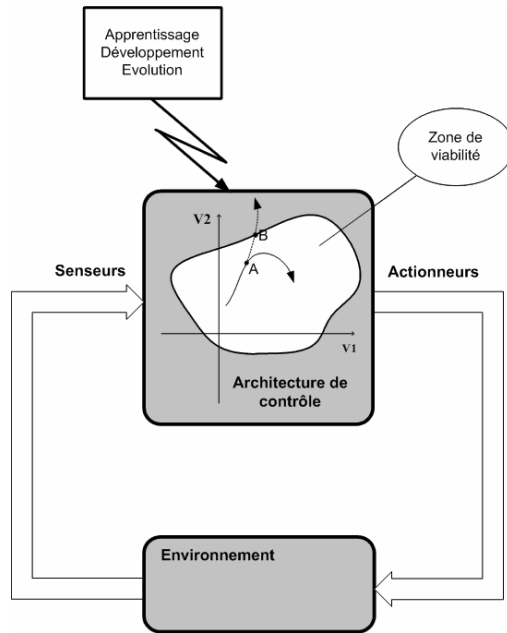


Figure 1. Organisation générale d'un animat. Un animat est "situé" dans un environnement réel ou simulé. Il a des senseurs qui le renseignent sur son état interne ou sur celui de l'environnement extérieur, des actionneurs qui lui permettent d'agir sur cet environnement, et une architecture de contrôle qui coordonne ses perceptions et ses actions. Le comportement d'un animat peut être qualifié d'adaptatif tant que son architecture de contrôle permet de maintenir ses variables essentielles (par exemple, V1 et V2) dans leur zone de viabilité. Ici, une action correctrice a été accomplie au point A, de façon à éviter de quitter la zone de viabilité au point B. L'architecture de contrôle d'un animat peut être modifiée par des processus adaptatifs d'apprentissage, développement et évolution.

Complémentarités de l'Intelligence Artificielle et de l'approche animat

Au départ, l'approche animat s'est ainsi développée en se singularisant délibérément de l'Intelligence Artificielle telle qu'elle avait été définie dans les années 1950 - et

nommée parfois la GOFAI : Good Old-Fashioned Artificial Intelligence. Elle insiste notamment sur des différences méthodologiques, comme par exemple la gestion de données sub-symboliques plutôt que symboliques - évitant ainsi le problème de l'ancrage des symboles - ou l'utilisation d'apprentissages non supervisés plutôt que supervisés par l'homme - donnant au système la possibilité de se forger lui-même ses propres informations - en évitant ainsi le problème du cadre, notamment.

Actuellement, ces différences sont moins tranchées, car les deux approches utilisent souvent les mêmes méthodes (Chrisley, 2000). En revanche, les objectifs restent différents. Celui de l'Intelligence Artificielle est toujours de modéliser des capacités cognitives complexes, mais isolées, comme par exemple le raisonnement, la compréhension du langage naturel, la découverte d'heuristiques, afin de soutenir et de parfaire les capacités cognitives d'un humain. L'objectif de l'approche animat reste de modéliser et d'intégrer des capacités adaptatives plus basiques, comme la perception active, la navigation, la sélection de l'action, car elles sont supposées être le préalable obligé de capacités cognitives plus complexes. Cette approche prétend ainsi être complémentaire de l'Intelligence Artificielle, en contribuant à la compréhension de la construction ontogénétique et phylogénétique de la cognition (Meyer, 1996).

Une autre complémentarité réside dans le type de robots à concevoir. Si de nombreux robots sont depuis longtemps employés dans diverses industries, et même à des applications plus récentes comme celui de la chirurgie (Matillon, 2002), la plupart de leurs architectures sont fondées sur des calculs d'optimisation des états qu'ils doivent exhiber ou concernent des systèmes qui peuvent être télécommandés par l'homme. Dans toutes ces situations, le concepteur a toujours une bonne connaissance a priori des événements auxquels les robots vont être confrontés. Lorsque ce n'est pas le cas, certains robots commencent à intégrer des capacités d'apprentissage non supervisé qui leur permettent de s'accommoder de modifications environnementales un peu moins prévisibles. Cependant, à cause de l'attribution toujours trop « humaine » de connaissances, ces robots ne parviennent pas encore à coloniser des domaines où ils doivent faire face à des situations que l'homme ne peut absolument pas prévoir. Il s'agit par exemple de la robotique exécutant des missions lointaines ou dangereuses, sur des planètes, au fond des océans ou à l'intérieur de centrales nucléaires et d'usines sinistrées. Il s'agit aussi de la robotique domestique, qui recouvre l'assistance de personnes - handicapées ou non - dans leur propre habitat. En effet, même dans cet environnement familier, le système doit faire face à de très nombreuses imprédictibilités. Il doit apprendre, par exemple, à se diriger dans un appartement dont les objets peuvent être souvent déplacés, à reconnaître les objets utiles, à s'accommoder des différences de luminosité ou de température, à éviter les endroits dangereux comme des escaliers, etc. Le robot se trouve alors face à des problèmes pour lesquels l'homme ne peut que lui donner des consignes déclaratives - *quoi faire* - et des moyens pour qu'il se constitue lui-même des règles procédurales - pour savoir *comment faire*. C'est la démarche même des chercheurs de l'approche animat. Les « moyens » qu'ils vont donner aux systèmes artificiels concernent des

équipements sensoriels, des équipements moteurs, des structures particulières d'architectures de contrôle qui peuvent déjà intégrer des mécanismes adaptatifs, ou des processus plus généraux – inspirés du développement, de l'apprentissage ou de l'évolution - permettant à ces structures de s'auto-améliorer au cours des expériences.

Ainsi, plutôt que de se focaliser sur l'intelligence de l'homme et sur la production de systèmes artificiels qui exhibent telle ou telle capacité cognitive élaborée en utilisant des connaissances fournies par un humain, l'approche animat s'intéresse à des capacités adaptatives simples, mais qui servent peut-être de fondations indispensables à la production de capacités plus développées. En particulier, l'approche animat cherche à intégrer ces capacités adaptatives simples dans des systèmes fonctionnels, entiers et situés, capables d'élaborer de façon autonome les connaissances sur leur environnement qui sont utiles pour y « survivre » ou pour y assurer leur mission, en dépit des surprises et dangers que cet environnement réserve. Pour ce faire, elle puise abondamment dans les connaissances que les biologistes ont acquis sur des systèmes qui ont fait la preuve de leurs capacités adaptatives exceptionnelles, les animaux naturels.

Un état de l'art des travaux récents dans ce domaine va être exposé ci-dessous, selon une logique qui découle directement de la figure 1 précédente. Ainsi, on évoquera d'abord des recherches qui s'inspirent de la nature pour équiper les animats de senseurs performants, puis des recherches équivalentes portant sur des actionneurs, avant de s'intéresser à ce qui relie les senseurs aux actionneurs, c'est-à-dire aux architectures de contrôle. Ces dernières peuvent avoir été entièrement câblées par un concepteur humain, ou avoir été laissées libres de se modifier plus ou moins par apprentissage, développement ou évolution. Qu'il soit clair cependant que cet état de l'art doit être apprécié en fonction de deux clés d'interprétation. La première consiste à reconnaître que la production d'un animal artificiel complet, présentant toutes les capacités adaptatives du modèle naturel dont il s'inspire, est encore un objectif parfaitement utopique et que, si certains travaux visent explicitement à s'en rapprocher - comme ceux qui portent sur le projet Psikharpax évoqué plus loin - d'autres ne constituent que des étapes intermédiaires dans cette direction. On évoquera donc ci-dessous aussi bien des entités complètes, exhibant plusieurs comportements plus ou moins intégrés, que des systèmes ne présentant que des capacités sensorielles, motrices ou comportementales isolées. La deuxième clé consiste à reconnaître que les connaissances des biologistes - qui ont généralement été acquises au cours de recherches conduites dans une perspective analytique et réductionniste traditionnelle - ne sont pas toujours adaptées à l'esprit synthétique et holistique qui caractérise l'approche animat. En conséquence, le degré de réalisme biologique des diverses réalisations évoquées ci-dessous sera très variable même s'il a clairement vocation à être un jour le plus élevé possible.

Des équipements sensoriels biomimétiques...

De nombreuses équipes dans le monde dotent leurs robots de certains des organes sensoriels parfaitement adaptés que la nature a mis au point au cours de 3 milliards et demi d'années d'évolution depuis les origines de la vie. Ainsi, au sein du Laboratoire Mouvement et Perception du CNRS à Marseille, le département Biorobotique a construit plusieurs robots équipés de systèmes visuels artificiels, tous dérivés de celui de la mouche, dont l'œil à facettes et le cerveau permettent à cet insecte d'évoluer avec agilité dans les environnements les plus complexes et dans les trois dimensions de l'espace (Franceschini et al, 1992). Un robot à roues, équipé d'un œil à facettes "reconstitué", est capable d'éviter et de contourner les obstacles à vitesse relativement élevée (50 cm/s). Le principe de sa navigation repose sur la mesure du *flux visuel*, c'est-à-dire sur la vitesse de défilement de l'image des obstacles sur la rétine, vitesse qui dépend de la distance des obstacles. L'œil de ce robot reprend le principe de fonctionnement d'un "neurone détecteur de mouvement", élucidé au laboratoire chez la mouche au moyen de microélectrodes et de microscopes spéciaux, puis transposé en électronique. De même un robot aérien, capable de s'orienter autour d'un axe vertical, fait appel au système de microbalayage rétinien de la mouche pour détecter les objets contrastés et les fixer du regard. Ce principe a été découvert au laboratoire grâce à des enregistrements "en vol" des neurones visuels. En pilotant ses deux hélices de manière différentielle, le micro-robot - il ne pèse que 100 grammes – peut ajuster son lacet en fonction de ses entrées visuelles pour garder son œil toujours braqué sur l'objet. Si l'objet vu est stationnaire, cela conduit à une stabilisation du robot dans son environnement. Si, au contraire, l'objet vient à se déplacer, le robot le suit du regard, et ce en dépit des perturbations qu'on peut lui imposer, telles qu'un vent de travers ou un choc sur son fuselage. Enfin, un mini-drone de type hélicoptère, dont le rotor n'a que 35 cm de diamètre, a été conçu et construit pour étudier dans quelle mesure sa perception du mouvement peut lui servir aussi à réaliser des tâches de haut niveau telles qu'un suivi de terrain ou un atterrissage automatique. L'aéronef est capable de s'auto-sustenter en agissant sur la poussée de son rotor et d'avancer en agissant sur son tangage. Monté à l'extrémité d'un support tournant qui bride ses degrés de liberté, il a déjà permis de faire des démonstrations en vol d'intérieur, avec suivi de terrain et atterrissage automatiques (Viollet et Franceschini, 2001).

D'autres recherches sur les animaux se sont inspirées de la fourmi du désert, laquelle est capable de se déplacer de façon plus ou moins aléatoire à la recherche de nourriture sur une centaine de mètres, puis de rejoindre son nid en ligne droite. En l'absence d'amers saillants qui l'aideraient à s'orienter dans son environnement, elle détermine son orientation par rapport au soleil grâce à des neurones sensibles à la polarisation de la lumière. Aussi le robot Sahabot, conçu à l'Université de Zürich, utilise-t-il des circuits électroniques reposant sur le même principe et s'avère capable, lui aussi, de revenir directement à son point de départ après une longue escapade dans le désert (Lambrinos et al., 1997).

On a également tenté récemment quelques expériences dans lesquelles des organes sensoriels *vivants* ont été greffés sur des animats. C'est le cas, par exemple, des robots mis au point à l'Université de Tokyo, qui ont été équipés d'antennes prélevées sur le Bombyx du mûrier. Grâce à ses organes sensoriels, le papillon mâle détecte à longue distance quelques molécules de phéromones sécrétées par la femelle et peut ainsi la rejoindre. De la même façon, ces robots sont susceptibles de suivre une trace olfactive avec succès et peuvent se diriger dans des environnements complexes où des senseurs artificiels auraient été impuissants, du moins dans l'état actuel de la technologie (Kuwana et al., 1999).

... des équipements moteurs...

Les équipements moteurs des animats relèvent encore en grande partie de l'ingénierie humaine. Cependant, des modèles de pattes d'insectes ou de muscles artificiels commencent à remplacer les roues, lorsque celles-ci sont peu efficaces. Ils permettent en particulier à un insecte artificiel de trouver des solutions pour franchir aisément des sols accidentés ou des obstacles conséquents (Cruse et al., 1998). Un robot nageur conçu au MIT a même été pourvu de vrais muscles de grenouille, qui puisent leur énergie dans la solution de glucose dans laquelle il évolue. Sous l'effet d'impulsions électriques périodiques, ces actionneurs lui permettent de se déplacer à la surface du liquide à une vitesse de 6 cm par seconde (Dennis, 2000).

Brachiator, le robot de l'Université de Nagoya au Japon, copie le mode de déplacement de branche en branche caractéristique du gibbon. Ce robot apprend à coordonner ses mouvements de façon à se balancer, à lâcher d'une main le barreau d'une échelle horizontale et à attraper de l'autre main un barreau situé un peu plus loin. La tâche est rendue particulièrement difficile par le fait que les barreaux ne sont pas tous disposés à la même distance et que le robot doit donc utiliser son système visuel pour apprécier la distance à parcourir et le balancement à effectuer (Saito et al., 1994).

Cependant, les recherches les plus actuelles visent à satisfaire les besoins croissants tant civils que militaires en matière de mini ou micro-drones et portent sur de nombreuses variétés de robots autonomes à ailes battantes. L'objectif est de produire des robots de très faibles tailles, capables de surveiller leur environnement sans être eux-mêmes facilement repérables et susceptibles à l'occasion de planer en dépensant le minimum d'énergie. Pour exploiter la physique du vol des insectes, les ailes de ces robots sont déformables et animées de mouvements appropriés, de sorte qu'elles génèrent des tourbillons d'air qui assurent la sustentation. Dans cette perspective, une industrie de micro-ingénierie nouvelle se met en place, portant notamment sur la recherche de matériaux composites adéquats, sur la mise au point de muscles artificiels et sur la production de sources d'énergie à haut rendement.

Ainsi, le projet Entomopter du Georgia Institute of Technology vise à produire un robot de 50 grammes capable à la fois de voler dans l'atmosphère de Mars et de

marcher sur le sol, tout en portant une charge de 10 grammes (Michelson et al., 1997). De même, à l'Université de Berkeley, un insecte artificiel de 25 mm d'envergure est en cours de réalisation, et s'inspire de l'aérodynamique de la drosophile (Fearing et al., 2000).

... et des architectures de contrôle

Il existe de très nombreuses manières possibles de connecter les senseurs d'un animat à ses actionneurs. Un grand nombre d'entre elles seront évoquées ici, en reprenant un scénario pédagogique conçu par Mel (1995). Les solutions les plus simples mettent en œuvre des connexions directes telles que celles évoquées sur la Figure 2.

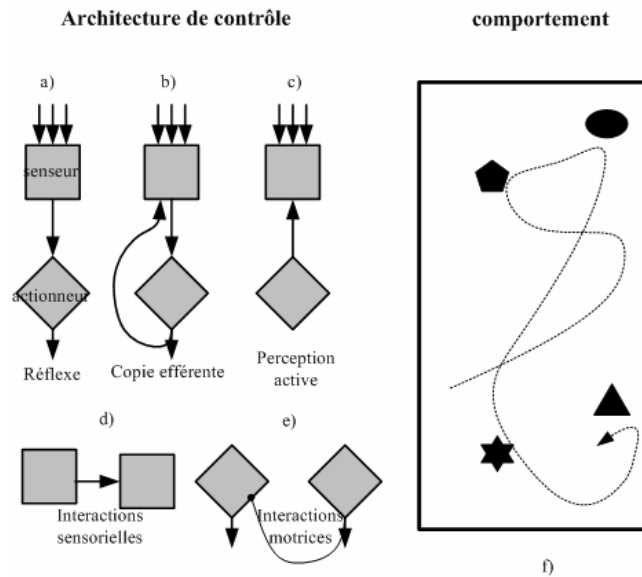


Figure 2. a) les senseurs d'un animat peuvent être directement reliés à ses actionneurs et implanter ainsi un simple réflexe. b) une information sur les actions exercées par l'animat sur son environnement peut être envoyée aux senseurs, permettant ainsi de distinguer quels changements dans l'environnement sont dus aux actions de l'animat ou à des causes extérieures. c) des actions motrices peuvent être exercées sur les senseurs pour rechercher des informations spécifiques dans l'environnement. d) un senseur peut préparer un autre senseur à la détection d'informations spécifiques. e) un actionneur peut inhiber un autre actionneur, de façon à éviter des actions contradictoires. f) par le simple jeu de réflexes appropriés, un animat peut se déplacer dans son environnement et éviter les obstacles fixes ou mobiles qu'il y rencontre.

Naturellement, la mise en œuvre pratique de telles connexions peut dépendre de modèles biomimétiques beaucoup plus sophistiqués que cette figure ne le laisse supposer, comme dans le cas de la mise en place de mécanismes de copie efférente par exemple (McCloskey, 1981).

Des relations entre senseurs et actionneurs plus élaborées peuvent être mises en œuvre dans le contexte d'un système motivationnel (Figures 3 et 4).

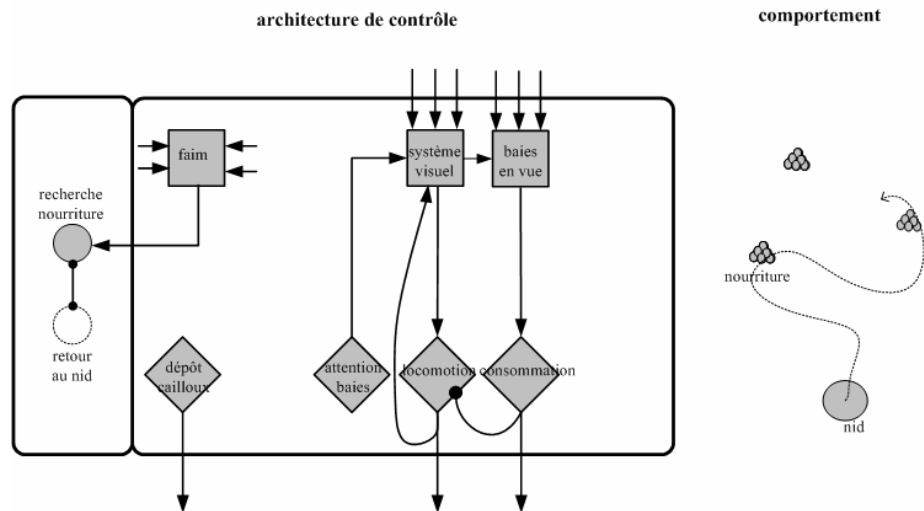


Figure 3. Lorsqu'un senseur interne indique à l'animal qu'il a faim et qu'il est temps de partir à la recherche de nourriture dans l'environnement, son système visuel recherche activement les baies dont cet animal se nourrit tandis que son système moteur lui permet de marquer son chemin en y déposant des cailloux. Dans le même temps, un mécanisme de copie efférente lui permet de distinguer quels mouvements d'objets sur sa rétine sont liés à ses mouvements propres plutôt qu'aux déplacements des objets eux-mêmes. Enfin, lorsque l'animal rencontre par chance des baies comestibles, il inhibe ses mouvements de déplacement et consomme la nourriture sur place.

Des systèmes motivationnels plus ou moins complexes ont été implantés dans de nombreux animaux et leur assurent des comportements réalistes et variés. C'est, par exemple, le cas de la blatte de Beer (1990) ou des poissons de Terzopoulos et Grzeszczuk (1994), qui survivent dans des mondes simulés qu'ils doivent explorer tout en évitant les obstacles qui s'y trouvent, environnements au sein desquels ils doivent rechercher, attraper et consommer leur nourriture.

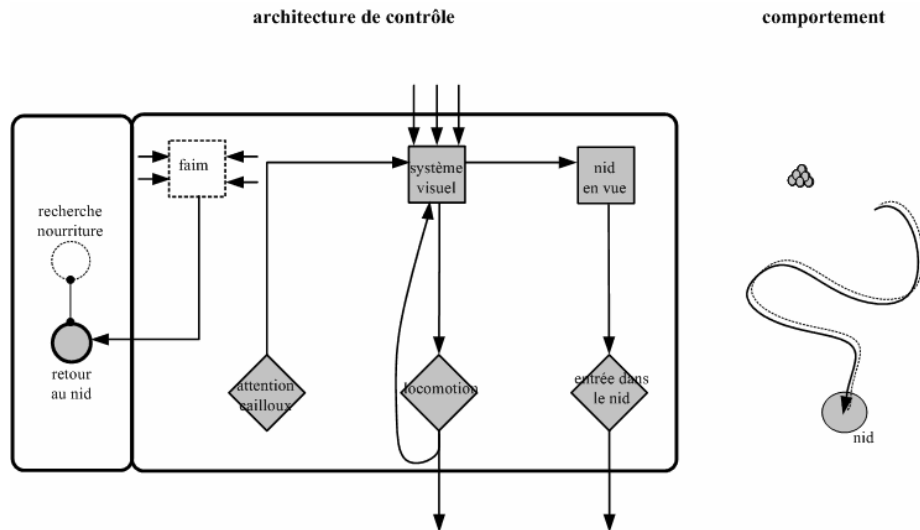


Figure 4. Lorsque l'animat est rassasié, sa motivation bascule de la recherche de nourriture vers le retour au nid. Il recherche alors activement les cailloux qui lui permettent de parcourir en sens inverse le chemin qu'il a suivi précédemment. Lorsqu'il détecte la proximité du nid, il s'y réfugie.

C'est aussi le cas d'un robot réel conçu à l'AnimatLab et dont le système de sélection de l'action est inspiré des connaissances courantes sur la structure et la fonction des ganglions de la base chez le rat (Girard et al., 2002). Ce robot est capable de survivre dans son environnement parce qu'il rejoint aux bons moments des zones où il trouve de la « nourriture » et des zones où il transforme cette nourriture en « énergie ».

Cependant, ces animats ne font que réagir instantanément aux stimuli internes ou externes auxquels ils sont sensibles. Il est clair que des capacités d'adaptation supplémentaires considérables sont offertes à des animats dotés d'une mémoire, qui sont alors capables de sélectionner l'action à accomplir à tout moment, non seulement en fonction des informations courantes, mais aussi en fonction d'informations passées. Dans cette perspective, la possibilité de gérer une mémoire spatiale offre aux animats un avantage adaptatif considérable, comme illustré sur les Figures 5, 6 et 7.

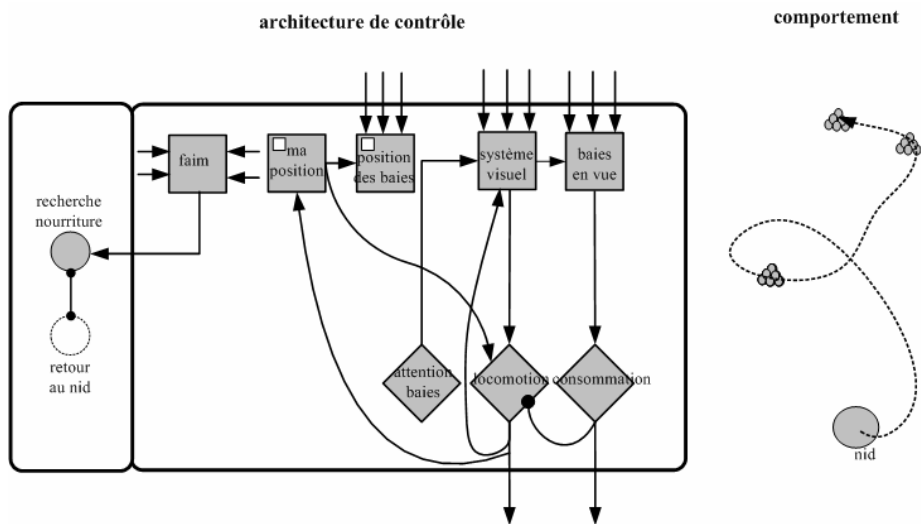


Figure 5. Lorsque l'animal a faim et part à la recherche de nourriture, il mémorise ses positions successives et les endroits où il trouve des baies.

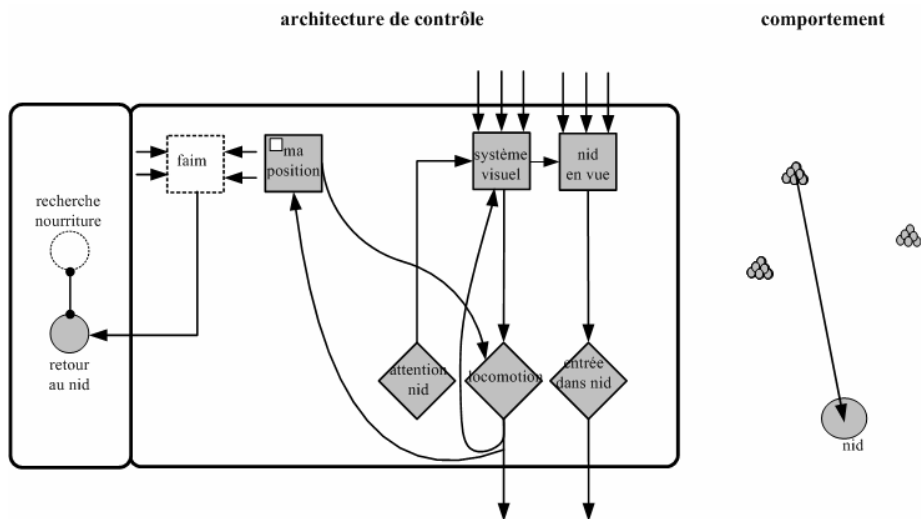


Figure 6. Lorsque l'animal est rassasié, il utilise sa mémoire spatiale pour revenir au nid en ligne droite.

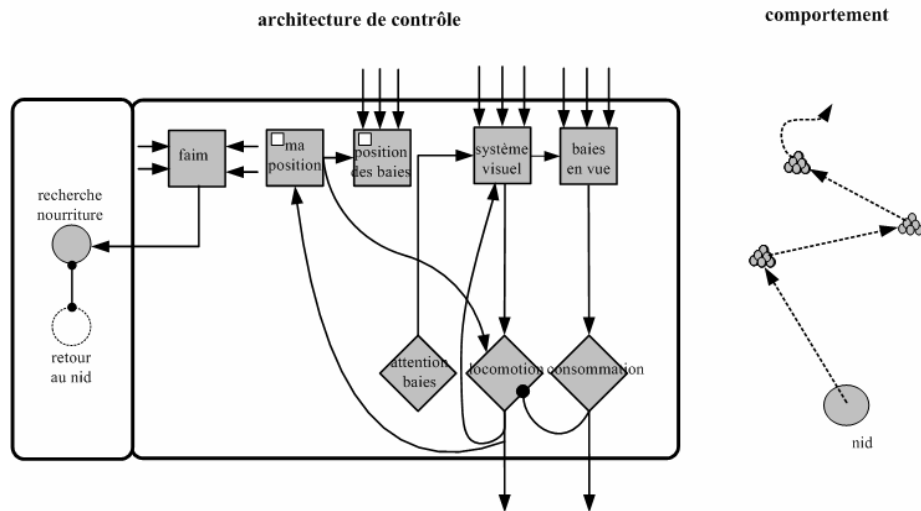


Figure 7. Lorsque l'animat repart à la recherche de nourriture, il peut utiliser sa mémoire spatiale pour rejoindre directement les différents lieux où il a trouvé à se nourrir dans le passé.

De nombreux travaux ont visé à équiper les animats de la capacité de naviguer dans leur environnement et notamment de celle d'en apprendre une « carte cognitive ». On trouvera une revue des principales approches correspondantes dans Trullier et al. (1997). Les animats en question peuvent explorer un environnement inconnu, y repérer les amers saillants qui s'y trouvent, et associer ces amers aux lieux d'où ils sont perçus. Ainsi, telle configuration d'amers sera caractéristique de tel lieu et servira à le reconnaître, tandis que telle autre configuration caractérisera tel autre lieu. Se déplaçant de lieu en lieu, l'animat peut alors enregistrer dans sa carte, non seulement ses positions successives, mais encore celles d'objets utiles à la satisfaction de ses motivations. Divers robots utilisant des modèles de navigation inspirés des connaissances courantes sur la structure et la fonction des régions hippocampiques et para-hippocampiques chez le rat sont décrits dans Arleo (2000), Trullier et Meyer (2000), Banquet et al. (2002), Filliat et Meyer (2002).

Naturellement, il existe bien d'autres formes de mémoire que la mémoire spatiale et ces autres formes peuvent servir de support à d'autres capacités cognitives que la navigation. Beer (1996), Biro et Ziemke (1998) ou Slocum et al. (2000) ont, par exemple, fait évoluer des réseaux de neurones récurrents capables de contrôler des comportements « minimalement cognitifs » chez des animats confrontés à divers tâches visuelles. Ces animats se sont ainsi avérés capables de poursuivre un objet, même s'ils le perdent momentanément de vue, de discriminer la forme d'objets en

mouvement, d'estimer si leur propre encombrement leur permet ou non de passer par une ouverture donnée, de faire la différence entre les parties de leur propre corps et d'autres objets au sein de l'environnement. Pour ce faire, l'évolution a dû notamment inventer des mécanismes de mémoire à court terme, de vision active, et d'attention sélective.

Au-delà de leur capacité à réagir à des stimuli actuels ou passés, il est probable que des capacités adaptatives supplémentaires seront offertes à des animats capables de tenir également compte des conséquences futures de leurs actions, c'est-à-dire à des animats doués de capacités de planification. Comme décrit par Craik (1943), planifier revient à « faire des expériences dans sa tête » - une capacité dont on peut penser qu'elle a été inventée par la nature parce qu'elle permet notamment d'éviter de faire dans le monde réel des expériences dont les conséquences fâcheuses ont été anticipées. Une telle capacité est illustrée sur les Figures 8 et 9.

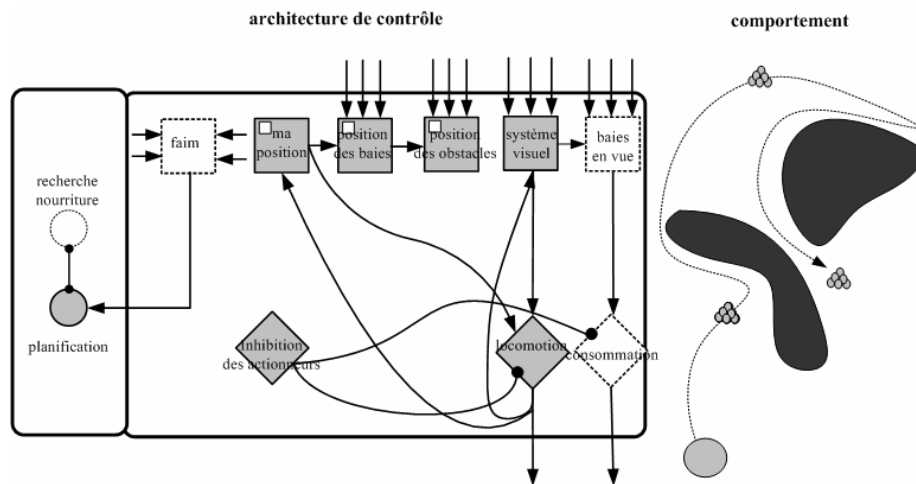


Figure 8. Pour éviter de faire des expériences dangereuses dans le monde réel, l'animat peut inhiber ses actionneurs et faire les expériences en question « dans sa tête ». Il lui est ainsi possible de positionner dans sa carte cognitive à la fois des sources de nourriture et des zones dangereuses.

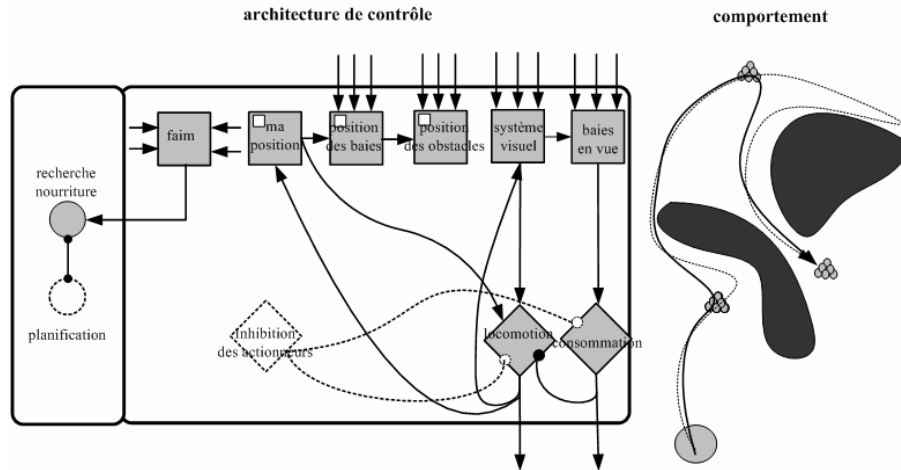


Figure 9. Pour partir à la recherche de sa nourriture, l'animat supprime l'inhibition de ses actionneurs et se sert de sa carte cognitive pour optimiser sa trajectoire. Il peut ainsi rejoindre directement les sources de nourriture, tout en évitant de passer par les zones dangereuses de l'environnement.

Des animats tenant compte à la fois du présent, du passé et du futur pour sélectionner à tout moment leur action courante ont été qualifiés de « motivationnellement autonomes » par McFarland et Bösser (1993). On en trouvera des exemples dans Donnart et Meyer (1996a, 1996b, 1996c) qui décrivent un animat capable d'explorer son environnement, d'en élaborer une carte cognitive et de planifier des trajectoires évitant obstacles ou dangers. Frezza-Buet (1999), Fleuret et Brunet (2000) ou Peterson (2002) ont, de même, conçu des animats capables de planifier des tâches dans un contexte autre que celui de la navigation.

Psikharpax, le rat artificiel actuellement en construction à l'AnimatLab (Guillot et Meyer, 2002), sera le représentant le plus élaboré de cette catégorie d'animats (Figures 10 et 11). Ce robot, dont certains ancêtres ont déjà été évoqués dans ce texte, sera en effet capable de « survivre » dans l'environnement d'un laboratoire parce qu'il l'explorera en permanence et en établira une carte cognitive. Grâce à cette carte, il connaîtra à tout moment sa position, ainsi que celle d'objets dispensateurs de récompenses ou de punitions dans le passé. L'usage conjoint de cette carte et de ses capacités de planification lui permettront de décider de quitter le point A sur la figure 11, pour aller "se nourrir" au point D, lorsque ses réserves énergétiques ne seront pas trop basses. En revanche, en situation de détresse énergétique, il se déplacera plutôt en direction du point C, plus proche et où il peut espérer trouver une autre source de "nourriture", mais au risque de passer près des

ascenseurs et des imprimantes et d'y faire de fâcheuses rencontres. De plus, s'il se déplace de A vers D et aperçoit en chemin une nouvelle source de "nourriture" au point G, il saisira la chance de se nourrir de façon opportuniste en ce point s'il n'y a pas d'humain potentiellement menaçant auprès du distributeur de boisson, tout en enregistrant cette nouvelle source sur sa carte. Enfin, s'il part de A vers B pour y chercher de la "boisson", et si le couloir qu'il traverse est obstrué entre les points E et F, Psikharpax pourra se servir de sa carte pour planifier un détour passant par les points H, I et J et rejoindre néanmoins le point B. Comme précédemment évoqué, de tels comportements seront contrôlés par des réseaux neuronaux inspirés de la structure et de la fonction de diverses structures nerveuses dans le cerveau du rat -- hippocampe, ganglions de la base, cortex préfrontal et cortex frontal notamment.

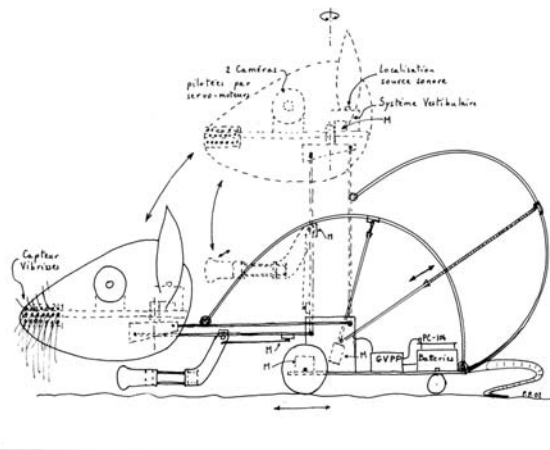


Figure 10. Le rat Psikharpax sera équipé d'un système sensori-moteur complexe : 2 matrices de 8x8 vibrisses, 2 yeux, 2 oreilles, 2 systèmes vestibulaires - qui le renseigneront sur ses accélérations linéaires et angulaires - ainsi que de senseurs spécialisés l'informant de la longueur et de la direction de ses déplacements. Il pourra se déplacer grâce à 2 roues motrices, bouger sa tête et attraper des objets avec ses pattes avant. Il pourra aussi se redresser pour voir plus loin.

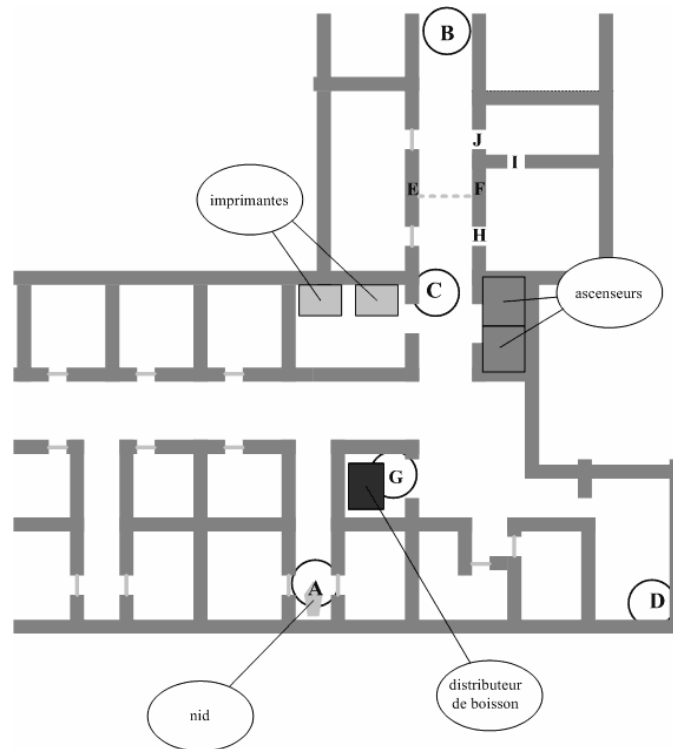


Figure 11. Après avoir exploré son environnement, Psikharpax aura enregistré dans sa carte cognitive que certains lieux sont dispensateurs de récompenses – de la "boisson" a par exemple été trouvée au point B et de la "nourriture" aux points C et D – alors que d'autres sont sources de dangers potentiels - comme les voisinages des ascenseurs, des imprimantes ou du distributeur de boisson.

Il est très probable que d'autres capacités adaptatives seront offertes à des animaux capables de ressentir des émotions, même si les opinions divergent sur la nature de ces émotions, sur les mécanismes qui les expriment et sur leur fonction (Plutchik, 1991 ; Ekman et Davidson, 1994 ; Damasio, 1995 ; Frijda, 1995 ; LeDoux, 1998). Quoiqu'il en soit, si de nombreux chercheurs visent à équiper les animaux de systèmes émotionnels (Gadanhó et Hallam, 2001 ; Gadanhó et Custodio, 2002 ; Cos et Hayes, 2002), la réalisation la plus accomplie à ce jour est Kismet, la tête animée du MIT (Breazeal, 2002). En effet, en vue de satisfaire au postulat selon lequel seules des interactions humanoïdes avec le monde peuvent produire une intelligence humanoïde, cette tête d'apparence humaine est équipée de deux yeux, deux oreilles

et d'un gyroscope. Son cou peut bouger selon trois axes, et ses yeux peuvent se mouvoir de droite à gauche et de haut en bas. Elle peut aussi afficher diverses expressions faciales grâce à plusieurs moteurs lui permettant d'ouvrir ou fermer sa mâchoire, de modifier les contours de ses lèvres, de relever ou abaisser ses sourcils, de bouger ses oreilles. Kismet est, en particulier, doté d'un système de vision active lui permettant d'effectuer des saccades oculaires vers les objets qui attirent son attention, soit parce qu'ils bougent, soit parce qu'ils présentent une couleur vive, soit parce qu'ils ont la couleur de la peau. Kismet peut également entendre et est, en particulier, sensible à la prosodie de la voie humaine.

Ce robot peut, à son tour, émettre divers phonèmes et prononcer quelques mots en anglais. Kismet de plus, présente trois pulsions de base : l'une qui le pousse à rechercher des interactions sociales, l'autre qui le pousse à rechercher des stimulations particulières - comme par exemple « jouer » avec des objets colorés - et la troisième qui le pousse à « dormir » - un état qui ramène les pulsions courantes à leur niveau de base. Kismet, enfin, peut « ressentir » diverses émotions de sorte que, à tout moment, son état émotionnel peut être représenté par un point dans un espace à trois dimensions -- la « valence », l'« éveil » et la « disposition ». La valence est une mesure du bien-être du robot, l'éveil est une mesure de son degré d'abattement ou d'excitation, la disposition est une mesure de sa réactivité à des stimuli nouveaux. Un certain nombre d'émotions de base - la colère, le dégoût, la peur, la joie, la tristesse, la surprise - et des états caractéristiques d'éveil - l'ennui, l'intérêt et le calme - correspondent à des zones particulières de cet espace. Par exemple, la peur correspond à un état à valence négative, à excitation élevée et à une disposition négative vis à vis de la nouveauté. De même, la tristesse correspond à un état à valence négative et à fort abattement. De même encore, la surprise correspond à un état à forte excitation et à valence neutre. Dans ces conditions, l'état émotionnel de Kismet change à tout moment en se déplaçant dans cet espace, en fonction de la dynamique interne de l'architecture de contrôle du robot, ainsi que de la dynamique de l'environnement. Par exemple, Kismet peut catégoriser l'état émotionnel d'un interlocuteur humain en fonction de la prosodie du signal sonore qu'il émet et émettre lui même un signal sonore en réponse, signal dont la prosodie reflètera son propre état émotionnel courant. De même, si Kismet « éprouve » à un moment de l'ennui, il va activement rechercher dans l'environnement des objets de couleur vive et, s'il en aperçoit un à la périphérie de son champ visuel, il va effectuer une saccade pour focaliser son attention sur cet objet. Son degré d'ennui va baisser, alors que son niveau d'intérêt et son sentiment de joie vont augmenter. De même encore, lorsque Kismet « ressent » le besoin d'interactions sociales, il recherche préférentiellement des objets ayant la couleur de la peau, comme le visage ou la main d'un humain. Dans cet état, il peut « ressentir » de la crainte ou de la colère en réponse, par exemple, à des déplacements rapides d'objets près de son visage. Il manifesterà alors ces émotions par ses expressions faciales et ses vocalisations.

Alors que Kismet ne « ressent » aucune émotion véritable, il est intéressant de noter à propos de cette réalisation que les humains qui interagissent avec lui semblent

rapidement oublier cette évidence et sont prêts à attribuer au robot une « vie intérieure » propre. Ce sentiment est renforcé par des mécanismes interactifs ad hoc, qui forcent par exemple Kismet à « parler » à son tour, à ménager des pauses dans son « discours » et à interrompre des silences qui deviennent pesants à la longue. On trouvera dans Brooks (2002) une réflexion sur le statut des émotions, réelles ou simulées, chez les animats actuels et futurs.

De nombreuses autres recherches portent sur la genèse de capacités cognitives plus élaborées et notamment sur les processus de communication entre animats. Werner et Dyer (1992) ont, par exemple, étudié comment un protocole de communication basé sur l'échange de signaux discrets pouvait évoluer au sein d'une population d'animats qui doivent trouver un partenaire pour se reproduire et comment différents dialectes peuvent apparaître dans un environnement hétérogène. Saunders et Pollack (1996) ont étendu cette approche à l'échange de signaux continus, au sein d'une population d'individus devant communiquer sur la présence de nourriture en tel ou tel endroit de leur environnement. Steels, pour sa part, a étudié au moyen de divers « jeux de langage » comment un groupe d'animats, dont chacun développe sa propre ontologie via ses propres interactions avec l'environnement, peut néanmoins élaborer un vocabulaire et une syntaxe communs pour communiquer sur cet environnement (Steels, 1996, 2001, 2002). On trouvera, de même, dans Oudeyer (2002) une approche expérimentale des origines de la compositionnalité et du codage phonémique dans le langage humain.

Discussion

L'objectif à court terme de l'approche animat est de mettre au point des organisations et des principes de fonctionnement permettant à des animaux artificiels ou des robots réels de résoudre des problèmes d'adaptation particuliers, dans des environnements particuliers. Il apparaît, au sortir de cette revue, que cet objectif a été atteint : à l'instar des animaux réels (Roitblat et Meyer, 1995), les animats qui ont été décrits ici peuvent se mouvoir dans leur environnement, éviter des obstacles, assouvir leurs motivations. Ils peuvent décider quoi faire, non seulement en fonction des informations présentes, mais aussi en fonction d'informations passées ou futures. Ils peuvent interagir entre eux ou avec des humains. Ils peuvent communiquer pour résoudre collectivement des problèmes difficiles. Ils peuvent évoluer, se développer et apprendre.

L'objectif à moyen terme de l'approche animat est de réussir à généraliser le savoir correspondant en vue de comprendre quelles organisations et quels principes de fonctionnement permettent à un animat de résoudre quel type de problème dans quel type d'environnement. Cet objectif, malheureusement, est encore largement hors de portée par manque d'études comparatives. Il y a, notamment, très peu d'exemples d'études dans lesquelles une même architecture de contrôle a été utilisée pour

résoudre des problèmes différents, ou dans lesquelles un même problème a été traité par des architectures différentes (Meyer et Guillot, 1994; Meyer, 1995; Guillot et Meyer, 2000). Dans cette perspective, l'approche informatique préconisée par Humphrys et O'Leary (2002), qui vise à répartir sur le réseau Internet l'architecture de contrôle d'un super-animat, à la conception duquel de très nombreux internautes pourraient collaborer, constitue probablement une avancée importante. On peut également espérer que des approches plus fondamentales, comme celles qui sont conduites sur les systèmes dynamiques (Beer, 1995; Kelso, 1995; Guillot, 1999; Guillot et Daucé, 2003) ou sur la notion d'émergence (Johnson, 2001), permettront d'immerger les résultats empiriques acquis à ce jour dans une perspective unifiante.

A long terme, l'objectif de l'approche animat est de contribuer à la compréhension de la cognition humaine. Selon la logique ascendante évoquée plus haut, il s'agit de rechercher en quoi les capacités cognitives les plus élaborées que l'homme ne partage pas avec les animaux découlent et s'expliquent à partir des capacités adaptatives basiques qu'il partage avec eux. Des progrès substantiels ont déjà été faits dans cette direction puisque de nombreux animats décrits ici utilisent bien plus que de simples réflexes pour s'adapter et survivre dans leur environnement. Cependant des progrès supplémentaires seront à attendre sitôt que davantage d'études seront consacrées à l'intégration des capacités adaptatives en question. A cause de limitations techniques évidentes, tel animat peut être très performant dans une tâche de navigation donnée, mais s'avérer incapable de communiquer avec un congénère, tandis que tel autre animat, parfaitement capable d'engager un tel échange, ne sait pas bouger. A l'évidence, un grand pas, à la fois technique et conceptuel, sera franchi en direction de formes plus élaborées de cognition lorsque les capacités de Psikharpx et de Kismet, par exemple, seront combinées. A ce propos aussi, la suggestion de Humphrys et O'Leary (2002) précédemment citée pourrait s'avérer utile. Il se pourrait enfin que d'autres progrès soient accomplis lorsque, plutôt que de privilégier les interactions des animats avec leur environnement physique, davantage de recherches porteront sur les déterminants sociaux de la cognition. En particulier, il apparaît que les théories de Byrne et Whiten (Byrne et Whiten, 1988; Whiten et Byrne, 1997) sur l'émergence d'une intelligence machiavélique et du concept de soi pourront rapidement être testées en simulation (Picault, 1998), et ce d'autant que plusieurs travaux mettant en œuvre des communautés d'animats capables de tricher et de bluffer ont déjà été réalisés (de Bourcier et Wheeler, 1994; McFarland, 1994; Wheeler et de Bourcier, 1995; Birk, 1996; Noble, 1999).

Conclusion

Si l'idée de s'inspirer des animaux pour élaborer des systèmes adaptatifs artificiels n'est pas nouvelle, elle ne s'est vraiment développée qu'à partir de 1990, lorsque la première conférence sur les animats a été organisée à Paris (Meyer et Wilson, 1991).

En moins de 15 ans, les recherches correspondantes ont produit des systèmes capables de s'adapter et de survivre dans leur environnement grâce à la mise en œuvre de diverses capacités cognitives. A terme, on peut espérer qu'elles contribueront à une meilleure connaissance de la cognition humaine, à condition que les approches correspondantes, au lieu d'être conduites en ordre dispersé, soient désormais mieux coordonnées et intégrées.

Références

- Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Harvard University Press.
- Arleo, A. (2000). *Spatial Learning and Navigation in Neuro-Mimetic Systems. Modeling the Rat Hippocampus*. Ph.D. thesis, Department of Computer Science, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, Switzerland.
- Ashby, W. R. (1952). *Design for a brain: the origin of adaptive behavior*. Chapman and Hall.
- Banquet, J., Gaussier, Quoy, M. Revel, A. and Burnod, Y. (2002). Cortico-Hippocampal maps and Navigation Strategies in Robots and Rodents. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Beer, R.D. (1990). *Intelligence as Adaptive Behavior: an Experiment in Computational Neuroethology*. Academic Press.
- Beer, R.D. (1995). A dynamical systems perspective on agent-environment interaction. *Artificial Intelligence*, 72, 173-215.
- Beer, R.D. (1996). Toward the Evolution of Dynamical Neural Networks for Minimally Cognitive Behavior. In Maes et al.(Eds). *From animals to animats 4. Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Birk, A. (1996). Learning to Survive. In Klingspor (Ed.). *Proceedings of the 5th European Workshop on Learning Robots*. Bari, Italy.
- Biro, Z. & Ziemke, T. (1998). Evolution of visually-guided approach behaviour in recurrent artificial neural network robot controllers. In Pfeifer et al. (Eds.). *From Animals to Animats 5. Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Breazeal, C.L. (2002). *Designing Sociable Robots*. The MIT Press.
- Brooks, R.A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2, 14-23.
- Brooks, R.A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*. 47, 139-159.

- Brooks, R. A. (2002). *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*. Pantheon Books.
- Buchanan, B.G., & Shortliffe, E.H. (1984). *Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*. Addison-Wesley.
- Byrne, R.W. & Whiten, A. (Eds.) (1988). *Machiavellian Intelligence: Social expertise and the evolution of intellect in monkeys, apes and humans*. Clarendon Press.
- Chrisley, R. (2000) (Ed.). *Artificial Intelligence: Critical Concepts*. Routledge.
- Clancey, W.J. (1997). *Situated Cognition: On human knowledge and computer representations*. Cambridge University Press.
- Clark, A. (1997). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. The MIT Press.
- Cordeschi, R. (2002). *The discovery of the artificial*. Kluwer.
- Cos, I. & Hayes, G. (2002). Behaviour Control Using a Functional and Emotional Model. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Craik, K. (1943). *The Nature of Explanation*. Cambridge University Press.
- Cruse, H., Kindermann, Th., Schumm, M., Dean, J., Schmitz, J. (1998). Walknet - a biologically inspired network to control six-legged walking. *Neural Networks*. 11, 1435- 1447
- Damasio, A.R. (1995). *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*. Odile Jacob.
- de Bourcier, P. & Wheeler, M. (1994). Signalling and Territorial aggression: an investigation by means of synthetic behavioural ecology. In Cliff et al. (Eds). *From animals to animats3. Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Dennis, R. (2000). An Actin-Myosin Machine. In Rudolph, Nowak & Ward (Eds.). *Workshop on Biological Motors (DARPA)*. Arlington, VA.
- Donnart, J.-Y & Meyer, J.-A. (1996a). Spatial exploration, map learning, and self-positioning with MonaLysa. In Maes et al.(Eds). *From animals to animats 4. Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Donnart, J.-Y. & Meyer, J.-A. (1996b). Learning Reactive and Planning Rules in a Motivationally Autonomous Animat. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*. 26(3), 381-395.
- Donnart, J.-Y. & Meyer, J.-A. (1996c). Hierarchical-map building and self-positioning with MonaLysa. *Adaptive Behavior*. 5(1), 29-74.

- Dreyfus, H. (1972). *What computers can't do: a critique of artificial reason*. The MIT Press.
- Drogoul, A., & Meyer, J.A. (Eds). (1999) *Intelligence artificielle située*. Hermès.
- Ekman, P. & Davidson, R. (Eds.) (1994). *The Nature of Emotion*. Oxford University Press.
- Fearing, R.S., Chiang, K.H., Dickinson, M.H., Pick, D.L., Sitti, M., Yan, J. (2000). Wing transmission for a micromechanical flying insect. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco.
- Filliat, D. & Meyer, J.-A. (2002). Global localization and topological map learning for robot navigation. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Fleuret, F. & Brunet, E. (2000). DEA : An architecture for Goal Planning and Classification. *Neural Computation*. 12, 1987-2008.
- Franceschini, N., Pichon, J.-M., & Blanes, C. (1992). From insect vision to robot vision. *Philosophical Transaction of the Royal Society. B*. vol. 337, pp. 283-294.
- Frezza-Buet, H. (1999). *Un modèle de cortex pour le comportement motivé d'un agent neuromimétique autonome*. Thèse de l'Université Henri Poincaré – Nancy 1.
- Frijda, N.H. (1995). Emotions in Robots. In Roitblat, H. et Meyer, J.-A. (Eds.) *Comparative Approaches to Cognitive Science*. The MIT Press.
- Gadano, S.C. & Custodio, L. (2002). Asynchronous Learning by Emotions and Cognition. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Gadano, S.C. & Hallam, J. (2001). Robot learning driven by emotions. *Adaptive Behavior*. 9,1, 42-63.
- Girard, B., Cuzin, V., Guillot, A., Gurney, K., & Prescott, T. (2002). Comparing a bio-inspired robot action selection mechanism with winner-takes-all. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Grossberg, S. (Ed.) (1998). *Neural Networks and Natural Intelligence*. The MIT Press.
- Guillot, A. (1999). Pour une approche dynamique des animats. In Drogoul, A. & Meyer, J.A. (Eds). *Intelligence artificielle située*. Hermès.
- Guillot, A. & Daucé, E. (Eds) (2003): *Traité de Sciences Cognitives: Approche dynamique de la cognition artificielle*. Hermès.

- Guillot, A., & Meyer, J.A. (2000). From SAB94 to SAB2000: What's new, animat? In Meyer, Berthoz, Floreano, Roitblat and Wilson (Eds.), *From Animals to Animats 6. Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Guillot, A., & Meyer, J.A. (2001). The Animat Contribution to Cognitive Systems Research. *Journal of Cognitive Systems Research*, 2, 57-165.
- Guillot, A. & Meyer, J.-A. (2002). Psikharpax, l'ambition d'être un rat. *La Recherche. Numéro spécial: Les nouveaux robots*. 350, 64-67.
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D.*, 42: 335-346.
- Hendriks-Jansen, H. (1996). *Catching ourselves in the act. Situated activity, interactive emergence, evolution and human thought*. The MIT Press
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press.
- Hull, C.L. (1943). *The principles of behavior*. Appleton-Century.
- Humphrys, M. & O'Leary, C. (2002). Constructing complex minds through multiple authors. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Husserl, E. (1950) *Idées directrices pour une phénoménologie*. Gallimard.
- Johnson, S. (2001). *Emergence. The connected lives of ants, brains, cities, and software*. Scribner.
- Kelso, J.A. (1995). *Dynamic patterns. The Self-Organization of Brain and Behavior*. The MIT Press.
- Koehler, W. (1926). *Gestalt Psychology*. Appleton.
- Kohonen, T.O. (1984). *Self-organization and associative memory*. Springer Verlag.
- Koza, J. (1992). *Genetic Programming: On the programming of computers by means of natural selection*. The MIT Press.
- Kuwana, Y., Nagasawa, S., Shimoyama, I., et Kanzaki, R. (1999). Synthesis of the pheromone-oriented behavior of silkworm moths by a mobile robot with moth antennae as pheromone sensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 14, 2, 195-202.
- Laird, J. E., Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1987). Soar: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, 33, 1-64.
- Lambrinos, D., Maris, M., Kobayashi, H., Labhart, T., Pfeifer, R. & Wehner, R. (1997). An Autonomous Agent Navigating with a Polarized Light Compass. *Adaptive Behavior*. 6, 1, 131-161.
- LeDoux, J.E. (1998). *The Emotional Brain*. Phoenix.

- Lenat, D. & Guha, R.V. (1990). *Building large knowledge-based systems: representation and inference in the Cyc project*. Addison-Wesley.
- Lindsay, R. K., Buchanan, B.G., Feigenbaum, E.A., & Lederberg, J. (1980). *Application of Artificial Intelligence for Chemistry: The DENDRAL Project*. McGraw-Hill.
- Loeb, J. (1918). *Forced movements, tropisms, and animal conduct*. J.B. Lippincott Company.
- Matillon, Y. (2002). La chirurgie assistée par ordinateur. Rapport de l'Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé. Paris.
- McCarthy, J. et Hayes, P.J. (1969). Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. In B. Meltzer & D. Michie (Eds.). *Machine Intelligence 4*. Edinburgh University Press.
- McCloskey, D.I. (1981). Corollary discharges: Motor commands and perception. In Brooks (Ed.). *Handbook of physiology – the nervous system. II. Motor control*. American Physiological Soc.
- McCulloch, W.S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of mathematics and Biophysics*, 5, 115-133.
- McFarland, D. (1994). Towards Robot Cooperation. In Cliff et al. (Eds). *From animals to animats3. Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- McFarland, D. & Bösser, T. (1993). *Intelligent Behavior in Animals and Robots*. The MIT Press.
- Mel, B.W. (1995). Animal Behavior in Four Components. In Roitblat & Meyer (Eds.). *Comparative Approaches to Cognitive Science*. The MIT Press.
- Meyer, J.A. (1995). The Animat Approach to Cognitive Science. In Roitblat, H. et Meyer, J.-A. (Eds.) *Comparative Approaches to Cognitive Science*. The MIT Press.
- Meyer, J.-A. (1996). Pour une approche complémentaire de l'IA traditionnelle: le manifeste animat. *In Cognito*. 6, 1-4.
- Meyer, J.A. & Guillot, A. (1991) Simulation of adaptive behavior in animats : review and prospect In Meyer, J.A., & Wilson, S.W. (Eds), *From animals to animats. Proceedings of the First International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Meyer, J.-A. & Guillot, A. (1994). From SAB90 to SAB94: Four Years of Animat Research. In Cliff et al. (Eds). *From animals to animats3. Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.

- Meyer, J.A. & Wilson, S.W. (Eds.) (1991). *From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Michelson, R., Helmick, D., Reece, S., & Amarena, C. (1997). A Reciprocating Chemical Muscle (RCM) for Micro Air Vehicle "Entomopter" Flight. *Proceedings of the Association for Unmanned Vehicle Systems*. Arlington.
- Miessner, B.F. (1916). *Radiodynamics: The Wireless Control of Torpedoes and Other Mechanisms*. Van Nostrand.
- Newell, A., & Simon, H. (1963) GPS: A Program that Simulates Human Thought. In Feigenbaum, E.A. & Foldman, J. (Eds.) *Computers and Thought*. McGraw-Hill.
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Prentice Hall.
- Noble, J. (1999). Cooperation, Conflict and the Evolution of Communication. *Adaptive Behavior*. 7, 3/4, 349-370.
- Oudeyer, P.Y. (2002). Phonemic Coding Might result From Sensory-Motor Coupling Dynamics. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Peterson, R.C. (2002). A context-based architecture for general problem solving. In Hallam et al. (Eds). *From Animals to Animats 7. Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Piaget, J. (1926). *La représentation du monde chez l'enfant*. Alcan.
- Picault S. (1998). A Multi-Agent Simulation of Primate Social Concepts. In Prade (Ed.). *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'98)*. John Wiley and Sons Ltd.
- Plutchik, R. (1991). *The Emotions*. University Press of America.
- Roitblat, H. et Meyer, J.-A. (Eds.) *Comparative Approaches to Cognitive Science*. The MIT Press.
- Rosenblueth, A., Wiener, N., Bigelow, J. (1943). Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science*. 10: 18:24.
- Ross, T. (1938). The synthesis of Intelligence. Its implication. *Psychological Review*. 45: 185-189.
- Rumelhart, D.E. & McClelland, J. (1986). *Parallel Distributed Processing*. The MIT Press.
- Russell, S.B. (1913). A practical device to simulate the working of nervous discharges. *Journal of Animal Behavior*, 3, 15-35.

- Saito, F., Fukuda, T., Arai, F., et Kosuge, K. (1994). Heuristic Generation of Driving Input and Control of Brachiation Robot . *JSME International Journal*, 37, 1. p.147
- Saunders, G.M. & Pollack, J.B. (1996). The Evolution of Communication Schemes Over Continuous Channels. In Maes et al.(Eds). *From animals to animats 4. Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 and 623-656.
- Slocum, A.C., Downey, D.C. & Beer, R.D. (2000). Further Experiments in the Evolution of Minimally Cognitive Behavior: From Perceiving Affordances to Selective Attention. In Meyer et al. (Eds). *From Animals to Animats 6. Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Steels, L. (1996). Emergent Adaptive Lexicons. In Maes et al.(Eds). *From animals to animats 4. Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Steels, L (2001). Language Games for Autonomous Robots. *IEEE Intelligent systems*. 10, 17-22.
- Steels, L. (2002). Computer simulations of the origins of case grammar. In *Proceedings of the Fourth Evolution of Language Conference, Harvard*.
- Stephens, J.M. (1929). A mechanical explanation of the law of effect. *American Journal of Psychology*, 41, 422-431.
- Sutton, R.S. et Barto, A.G. (1998) *Reinforcement learning: An introduction*. The MIT Press.
- Terzopoulos, D., Tu X., & Grzeszczuk, R. (1994). Artificial Fishes with Autonomous Locomotion, Perception, Behavior and Learning in a Simulated Physical World. In Brooks & Maes (Eds.). *Artificial Life IV*. The MIT Press.
- Thorndike, E.L. (1911). *Animal Intelligence*. Macmillan.
- Tolman, E.C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55, 189-208.
- Trullier, O. & Meyer, J.-A. (2000). Animat Navigation Using a Cognitive Graph. *Biological Cybernetics*. 83(3), 271-285.
- Trullier, O., Wiener, S., Berthoz, A., & Meyer, J.-A. (1997).Biologically-based artificial navigation systems: Review and prospects. *Progress in Neurobiology*. 51, 483-544.
- Turing, A. (1936). On Computable Numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2, 230-265.

- Viollet, S., Franceschini, N. (2001). Aerial minirobot that stabilizes and tracks with a bio-inspired visual scanning sensor. In Webb, B. & Consi, T. (Eds). *Biorobotics*. The MIT Press.
- von Uexküll, J. (1909). *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Springer-Verlag.
- Vygotsky, L.S. (1978). *Mind in Society*. Harvard University Press.
- Walter, W. G. (1950). An imitation of life. *Scientific American*, 42-45.
- Watson, J.B. (1926). *Behaviorism*. People's Institute Publishing Company.
- Werner, G.W. & Dyer, M.G. (1992). Evolution of Communication in Artificial Organisms. In Langton, Taylor, Farmer, Rasmussen (Eds.). *Artificial life II*. Addison-Wesley.
- Wheeler, M. & de Bourcier, P. (1995). How Not to Murder Your Neighbor: Using Synthetic Behavioral Ecology to Study Aggressive Signaling. *Adaptive Behavior*. 3, 3, 273-309.
- Whiten, A. & Byrne, R.W. (Eds.) (1997). *Machiavellian Intelligence II: Extensions and Evaluations*. Cambridge University Press.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Control and communication in the animal and the machine*. The MIT Press.
- Wilson, S.W. (1991). The animat path to AI. In Meyer, J.A., & Wilson, S.W. (Eds), *From animals to animats. Proceedings of the First International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*. The MIT Press.
- Winograd, T. (1972). *Understanding Natural Language*. Academic Press.