

Les robots

Primaire et collège

Résumé

Que ce soit pour tester des connaissances mathématiques, des mécanismes physiques, des principes biologiques ou tout simplement pour se distraire, savants et artistes ont rivalisé au cours des siècles et sur tous les continents pour construire des machines imitant le vivant.

les robots

Agnès Guillot

Le premier samedi du monde, dit la Genèse, le Créateur façonna l'Homme. Depuis, ce dernier n'a eu de cesse que de jouer au Créateur...

Que ce soit pour tester des connaissances mathématiques, des mécanismes physiques, des principes biologiques ou tout simplement pour se distraire, savants et artistes ont rivalisé au cours des siècles et sur tous les continents pour construire des machines imitant le vivant.

Jusqu'au XX^e siècle, ces machines n'étaient « que » des AUTOMATES qui ne disposaient, pour se comporter, que de l'équivalent de nos organes moteurs. Ce type de machine se rencontre encore souvent dans nos usines actuelles : un automate peut peindre parfaitement une voiture, à condition que son concepteur ait très exactement prévu tous ses mouvements, compte tenu de la position de ladite voiture. Que celle-ci vienne à se déplacer... et l'automate persistera à peindre au même emplacement, car il n'a aucun moyen de se rendre compte que la voiture a bougé ! Un ROBOT, lui, pourra résoudre ce problème. Comme un automate, il a des organes moteurs, mais il possède *en plus* l'équivalent de nos organes sensoriels. Même très frustes, des capteurs de luminosité, de sons ou de chocs pourront le renseigner sur ce qui se passe dans son

environnement et il sera ainsi capable de modifier son comportement en fonction des événements perçus. Contrairement à l'automate-peintre, un robot-peintre muni d'une caméra pourra détecter le déplacement de la voiture et réajuster ses projections de peinture.

Depuis le début du XX^e siècle, les robots supplantent les automates tant ils ont des potentialités prometteuses.

Des automates aux premiers robots

Quelques automates célèbres : réalités et légendes

Dès l'Antiquité sont apparues des inventions mimant les créatures vivantes. Déjà, dans la mythologie, on rapporte que, quatorze siècles avant notre ère, Dédale – l'architecte crétois du labyrinthe où fut enfermé le monstre Minotaure – avait conçu des statues mobiles, animées par du mercure, qui pouvaient se mouvoir devant ce labyrinthe pour en garder l'entrée. À une date assez indéterminée, plus d'un siècle après J.-C., le mathématicien grec Héron d'Alexandrie avait réellement réalisé de petits théâtres sur la scène desquels évoluaient, grâce à des dispositifs hydrauliques et à vapeur, des personnages animaux et humains. Beaucoup plus tard,

vers 1200, l'ingénieur al-Jaziri fabriquait pour le sultan Nasir ad-Din Mahmud des horloges agrémentées d'automates mécaniques déjà très sophistiqués. Léonard de Vinci ne manqua pas d'ajouter à la longue liste de ses inventions – sans toutefois le réaliser – le premier ANDROÏDE qui pouvait coordonner les mouvements de ses bras, bouger la tête et ouvrir la mâchoire à l'aide d'un programme mécanique qui actionnait ses multiples articulations. Ce catalogue succinct des créatures artificielles conçues au fil des siècles serait incomplet si les automates du XVIII^e siècle n'y étaient évoqués, comme les automates musiciens et dessinateurs des horlogers suisses Jaquet-Droz, ou comme le fameux canard construit par le mécanicien et horloger français Jacques de Vaucanson, qui caquait, mangeait, digérait et même... restituait les produits de sa digestion par une voie « naturelle ».

Ces derniers savants ont principalement considéré leurs automates comme des machines destinées à mettre en œuvre et à expérimenter leurs connaissances. Mais la légende raconte que, par leur imitation du vivant, certaines créatures ont parfois débordé de leur cadre technique pour inspirer de forts sentiments d'affection – comme l'automate Francine du philosophe Descartes, qu'il aurait fait construire pour remplacer sa fille disparue – ou de crainte – comme l'androïde de bois qu'avait façonné le dominicain Albert le Grand et qui a été fracassé par Thomas d'Aquin, trop effrayé lorsqu'il l'a vu le saluer poliment...

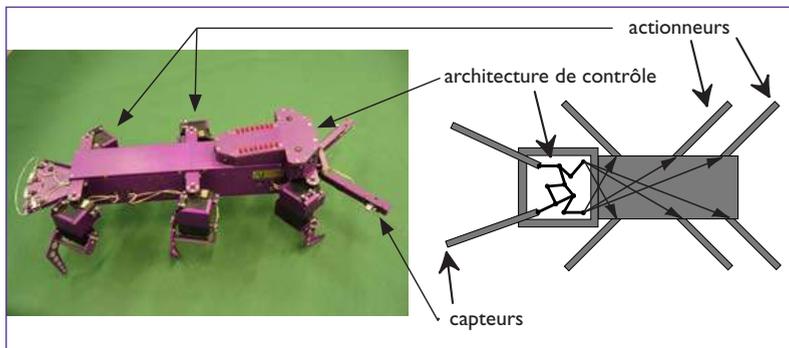
Des robots intelligents et des robots « bêtes »

Comme on l'a vu plus haut, les robots sont des systèmes artificiels à la morphologie très variable et dotés d'organes sensoriels

– les *capteurs* – et d'organes moteurs – les *actionneurs*. Comme chez un être vivant, un « système nerveux » connecte ces différents organes entre eux afin que ces machines puissent mettre en activité leurs actionneurs en fonction des informations transmises par leurs capteurs. Ce cerveau, appelé ARCHITECTURE DE CONTRÔLE, et qui permet au robot de réaliser différentes actions en réagissant à son environnement (voir page suivante), est en fait une carte électronique contenant les instructions d'un programme informatique qui déterminent les détails des connexions entre capteurs et actionneurs.

Le premier robot dont on ait eu connaissance est le « chien électrique » des ingénieurs américains John Hammond et Benjamin Miessner, construit en 1912. Quoique n'ayant pas une apparence canine, cette machine suivait comme un petit chien un homme marchant avec une lampe électrique à la main : ses capteurs de luminosité étaient reliés aux moteurs de ses roues de telle façon qu'elle se dirigeait vers la source lumineuse. Un journal de l'époque s'enthousiasma en lui prêtant une « intelligence presque surhumaine ». Ce qualificatif, quelque peu usurpé, traduisait l'étonnement des spectateurs devant une machine qui se comportait d'une manière « naturelle », radicalement différente des mouvements mécanisés des automates précédents.

Quelques autres robots de ce type virent le jour dans les années qui suivirent mais, en 1956, l'avènement de l'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE changea radicalement les objectifs des roboticiens. Encouragés par l'invention de l'ordinateur, qui semblait présenter des similitudes avec le cerveau humain, ces chercheurs pensèrent pouvoir concevoir des machines dont l'intelligence



Un robot (ISIR-SIMA/UPMC)

d'années, elle a proposé de revenir à des objectifs plus modestes et incité les chercheurs à équiper *d'abord* leurs robots de ces comportements basiques réalisés par la plupart des animaux, dont l'homme,

avant d'espérer les pourvoir d'un intellect « humain ».

serait comparable à celle d'un être humain. Après de très intéressantes réalisations, comme des machines capables de résoudre des problèmes mathématiques complexes, de raisonner logiquement, de réaliser des expertises ou de jouer aux échecs, ils s'aperçurent qu'elles avaient de sérieuses limites. En intégrant les programmes informatiques réalisant ces prouesses à des robots, ces derniers étaient en effet incapables de résoudre des problèmes qui semblaient pourtant très simples – comme se mouvoir sur un terrain, éviter des obstacles, reconnaître un objet, s'orienter dans un environnement ou enchaîner leurs actions efficacement – et qui se révélaient indispensables pour qu'ils soient performants. Bref, tous les comportements qui paraissent si évidents à réaliser pour un humain, bien plus que de jouer aux échecs, avaient été omis du répertoire comportemental des robots. Pourtant, ces activités sont les *primitives* de toute intelligence : les stratégies les plus ingénieuses aux échecs s'avèrent impuissantes si le joueur ne sait pas auparavant reconnaître les cases noires et blanches de l'échiquier, détecter le fou parmi les pions ou le prendre et le placer au bon endroit.

C'est ainsi qu'une nouvelle approche de la robotique a vu le jour, nommée APPROCHE ANIMAT (*animat* étant la contraction d'« animal artificiel »). Née il y a une vingtaine

La recherche en robotique

La conception de robots peut être envisagée afin de remplacer les hommes dans les tâches répétitives, pénibles ou dangereuses. C'est le sens même du terme « robot », inventé en 1921 par l'écrivain Karel Čapek à partir du tchèque *robota*, signifiant « travail forcé ». Ce domaine est celui de la *recherche appliquée*, qui vise à rendre efficace une machine en vue d'une tâche bien précise.

La conception de robots peut aider également à comprendre le comportement des organismes vivants. C'est le domaine de la *recherche fondamentale* : il s'agit de déterminer quels processus amènent un système, naturel ou artificiel, à se comporter le plus efficacement possible et de façon autonome. Ces concepteurs iront parfois puiser leur inspiration auprès des biologistes et des spécialistes du comportement animal et humain. En retour, le comportement des robots pourra donner des pistes pour de nouvelles recherches dans ces différents domaines du vivant (voir l'encadré ci-contre). Recherches fondamentale et appliquée sont en étroite interaction, elles s'enrichissent l'une l'autre du fruit de leurs réalisations respectives.

Comment programmer le comportement d'un robot ?

Le principal travail des chercheurs consiste à trouver l'architecture de contrôle performante qui permettra au robot de réaliser les comportements souhaités. Pour ce faire, ils doivent trouver comment relier les capteurs aux actionneurs de façon à ce que les informations que le robot recevra de son environnement soient traduites par des mouvements adéquats.

Un exemple de ce travail est illustré page 449, par l'élaboration du « système nerveux » des différents « véhicules ». Il montre notamment que *des architectures extrêmement*

simples peuvent générer des comportements difficilement prévisibles, ce qui rend la tâche du chercheur particulièrement ardue : en effet, le « système nerveux » dont le robot sera équipé produira des comportements qui ne seront jamais exactement les mêmes – contrairement aux automates – et qui seront fonction de la nature des informations que le robot reçoit (lumière, son, choc, etc.), de la façon dont il va les recevoir (fortement, faiblement, etc.) et du moment précis auquel il va les recevoir. Même dans l'environnement le plus familier – et *a fortiori* dans un milieu inconnu –, ces renseignements, tels les changements de luminosité ou les bruits qui vont se produire,

Comment les robots peuvent apporter des solutions aux éthologues

- ◆ Dans une fourmilière, on remarque l'existence de « cimetières » : les fourmis récupèrent régulièrement les cadavres – gisant n'importe où dans la fourmilière – pour les rassembler en tas. Ce comportement semble complexe, car on pourrait supposer que les fourmis ont l'« intention » de faire des tas et qu'elles « se concertent » pour décider d'entasser les cadavres dans des endroits précis.
- ◆ Des roboticiens ont proposé une solution beaucoup plus simple, qui permet d'écartier toute hypothèse d'un comportement aussi « intelligent », peu en rapport avec les capacités du système nerveux d'une fourmi. Ils ont supposé que les fourmis pouvaient réaliser cet exploit sans avoir besoin d'une vision globale de la fourmilière, sans savoir ce qu'est un tas, et sans communiquer avec leurs congénères. Elles pourraient réaliser ce comportement en possédant les deux seules règles comportementales suivantes :
- ◆ En se déplaçant *au hasard* dans la fourmilière,
- ◆ Règle n° 1 : avoir d'autant plus tendance à *prendre un cadavre* qu'il y en a *peu* dans leur champ de vision ;
- ◆ Règle n° 2 : avoir d'autant plus tendance à *poser un cadavre* qu'il y en a *beaucoup* dans leur champ de vision.
- ◆ Par exemple, s'il y a moins de deux cadavres dans son très étroit champ de vision, une fourmi va prendre l'un des cadavres. Si elle en voit toujours aussi peu en continuant sa route, elle n'en prendra pas d'autre, mais n'aura pas tendance à poser celui qu'elle tient déjà. Elle ne le posera que lorsque plus de deux cadavres apparaîtront dans son champ de vision.
- ◆ Lorsque plusieurs robots, dotés chacun d'une vue très courte et de ces deux simples règles de comportement, sont placés dans un environnement où ont été répandus au hasard des centaines de petits objets, on constate, au bout de quelques heures, que des tas se sont formés.
- ◆ Par cette expérience, les roboticiens n'avaient pas l'intention de prouver aux spécialistes des fourmis que celles-ci possédaient forcément ces deux règles comportementales pour organiser des cimetières. Ils ont simplement permis de démontrer qu'il n'est pas nécessaire d'évoquer des opérations mentales très complexes pour que des animaux aient des comportements compliqués.
- ◆ Ils ont également mis en évidence la notion d'*intelligence collective*, qui implique que des individus ayant chacun des compétences très limitées peuvent être capables d'avoir *collectivement* des compétences élevées. On en démontre de très nombreux cas, notamment dans les sociétés d'insectes. La construction d'une ruche par les abeilles – qui n'ont chacune que des réflexes très simples et n'ont pas d'architectes – en est un exemple typique.

sont déjà impossibles à prévoir avec exactitude par un humain. Il faut donc que le chercheur trouve un moyen pour que le robot adopte un comportement pertinent sans qu'il ait à lui fournir toutes ces indications.

La façon dont un robot se comporte n'est donc pas toujours parfaitement prévisible à

long terme – même si elle est parfaitement explicable – car ce qu'il effectue à un moment donné dépend des informations environnementales qu'il reçoit à chaque instant et qui changent constamment, selon la position qu'il occupe à chacun de ces instants.

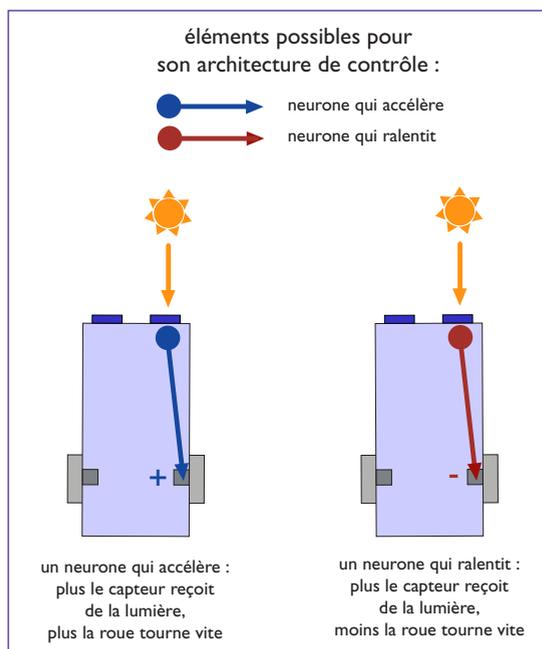
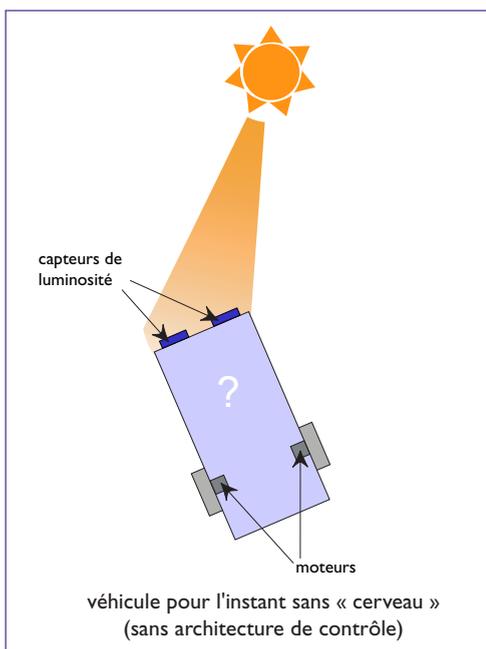


Les véhicules de Valentino Braitenberg (1991)

Ces véhicules sont munis de deux capteurs réagissant à l'intensité d'une lumière et de deux actionneurs, des moteurs reliés à deux roues. Supposons qu'ils se meuvent à une vitesse constante, qui peut être augmentée ou diminuée. Pour construire le cerveau de ces robots, le chercheur dispose de « neurones qui accélèrent » et de « neurones qui ralentissent ». Ces NEURONES artificiels envoient des impulsions électriques aux moteurs en fonction des informations qu'ils reçoivent des capteurs. Si l'un des capteurs est relié par un « neurone qui accélère » à l'une des roues, cette roue tournera à une vitesse proportionnelle à l'intensité de la lumière reçue par le capteur. Si, maintenant, ce capteur est relié à la roue par un « neurone qui ralentit », cette roue ralentira d'autant plus fortement que le capteur aura reçu une forte intensité lumineuse. Supposons que le chercheur souhaite que son véhicule se dirige vers la lumière. Quels neurones doit-il choisir ? Comment doit-il les connecter ?

Si notre chercheur choisit deux « neurones qui accélèrent » en reliant le capteur à la roue *qui se trouve du même côté que ce capteur*, le véhicule A, initialement face à la lumière, se dirigera effectivement vers elle : les deux capteurs recevront la même stimulation et feront tourner les roues à la même vitesse. Mais si le véhicule est légèrement de biais, le capteur le plus proche de la lumière sera plus fortement stimulé que l'autre et fera tourner la roue qui lui est associée plus vite que l'autre roue : le véhicule entamera alors un virage qui l'éloignera de la lumière...

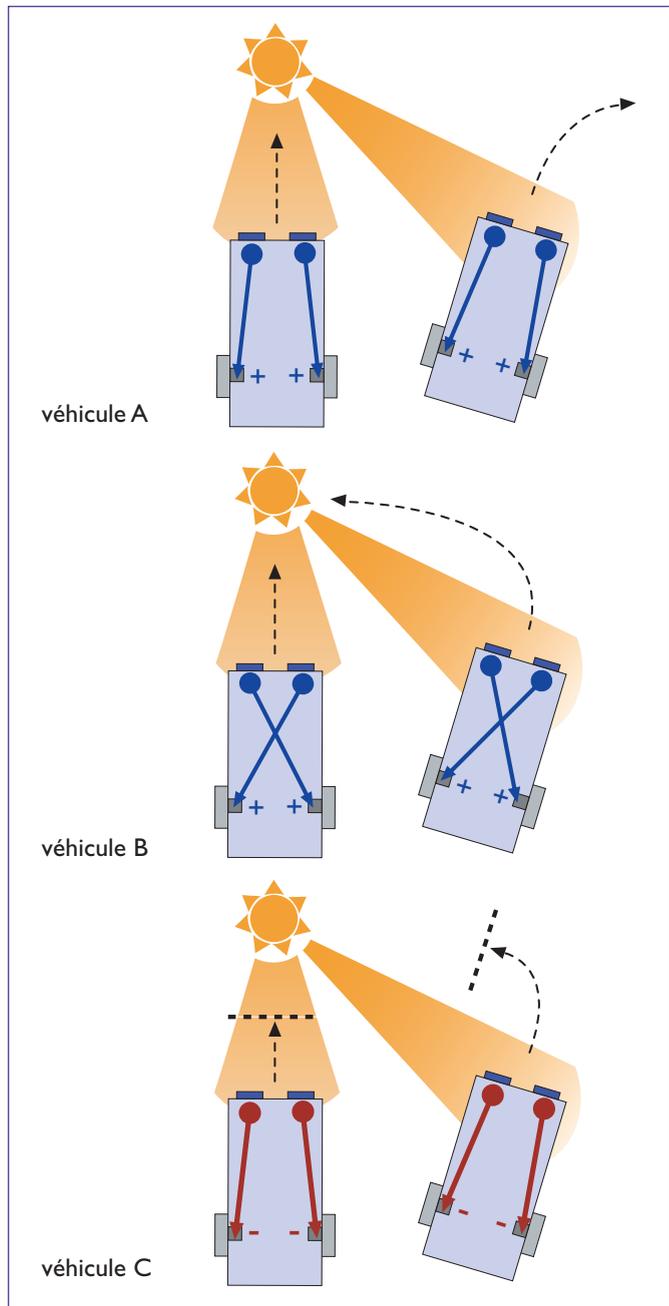
Une même architecture de contrôle peut donc produire des comportements variés qui dépendent de la position du robot dans l'environnement.



Pour obtenir, à l'aide de « neurones qui accélèrent », un véhicule qui se dirigera *toujours* vers la lumière, il faut donc relier chaque capteur à la roue qui lui est opposée, comme avec le véhicule B. Le même résultat pourra être obtenu par le véhicule C avec un cerveau complètement différent, composé de deux « neurones qui ralentissent » reliant chaque capteur à la roue placée de son côté. Cependant, le véhicule B accélérera vers la lumière jusqu'à la heurter, alors que le véhicule C se dirigera de plus en plus lentement vers elle et s'arrêtera à distance respectueuse.

Des architectures de contrôle très différentes peuvent donc réaliser des comportements similaires.

Lorsque plusieurs de ces véhicules A, B et C circulent dans un même environnement, il est très difficile de prévoir leurs comportements respectifs. En effet, ceux-ci ne dépendent pas seulement de la structure du cerveau des robots, mais aussi de la position de ces derniers dans l'environnement : certains se mettront à tourner indéfiniment autour de la source lumineuse car leur distance à la lumière entraînera une vitesse constante de leurs roues, d'autres s'en approcheront jusqu'à ce que la lumière soit occultée par un autre véhicule et stopperont donc alors...



À ces difficultés s'ajoute la question de toutes les connaissances que le roboticien devrait programmer pour que le robot puisse adopter le comportement le plus simple, celles qui nous semblent tellement évidentes que nous aurions de la peine à en dresser le catalogue complet... L'exemple

présenté page suivante montre que nous utilisons inconsciemment de nombreux savoirs pour réaliser nos activités les plus courantes. Nous les avons acquis au cours de notre développement, *par expérience* : le bébé qui fait chuter des dizaines de fois un objet de sa poussette apprend notamment la



Les savoirs dont nous avons besoin pour réaliser le comportement « boire »

- Boire est lié à quelque chose de liquide
- Il faut savoir reconnaître un liquide et un solide
- Le liquide à boire doit être contenu dans quelque chose de solide
- Le liquide ne flotte pas dans l'air
- Les liquides diffèrent par leurs propriétés d'odeur, de viscosité, de goût, de couleur, etc.
- Le verre doit être approché lentement de la bouche, sinon le liquide peut s'échapper
- On reconnaît que le verre est bien dirigé vers la bouche grâce aux sensations expérimentées par notre corps (bras, main, visage)
- La bouche doit s'ouvrir au contact du verre
- Le niveau du liquide reste horizontal quand le verre se penche
- Il ne faut pas boire immédiatement un liquide trop chaud
- Il faut poser le verre sur quelque chose de solide car il ne tient pas en l'air, etc.

loi de la gravité ; en transvasant de l'eau dans différents contenants, il apprend les propriétés physiques des liquides, etc. Nous les avons également acquis au cours de l'évolution des espèces, qui a modelé lentement notre morphologie et les capacités de notre système nerveux. Cela n'est d'ailleurs pas l'apanage de l'homme. Tous les animaux ont acquis par les mêmes principes la capacité de forger empiriquement les savoirs dont ils ont besoin pour leur vie quotidienne.

Les robots sont, au départ, des machines *sans aucune expérience*. Plutôt que de s'acharner à leur fournir toutes les informations dont ils auront besoin – avec les difficultés évoquées ci-dessus –, les chercheurs de l'approche animat ont eu l'idée de s'inspirer de structures et de mécanismes qui ont déjà fait leurs preuves dans la nature. Ainsi, pour tenter de se comporter le plus efficacement possible, les robots profiteront de ce que l'évolution a façonné au cours des 3,5 milliards d'années de vie sur Terre.

Des robots biomimétiques

Certains chercheurs équipent leurs machines de capteurs copiés sur des organes sensoriels animaux. Ainsi, dans un laboratoire

marseillais, un petit robot à roues est capable, grâce à un œil à facettes reconstitué d'après celui de la mouche, d'éviter et de contourner les obstacles à une vitesse relativement élevée. Dans notre laboratoire, Psikharpax, un robot-rat est doté de systèmes visuel, auditif et PROPRIOCEPTIF copiés sur ceux du rat, un animal très étudié par les biologistes. Il est également équipé de vibrisses – des moustaches qui lui permettent de distinguer différentes textures, de suivre un mur et de reconnaître la forme des objets.

D'autres conçoivent des actionneurs



sur le modèle des pattes d'insectes pour remplacer les roues lorsque celles-ci sont moins performantes, c'est-à-dire lorsque

leurs machines doivent franchir des sols accidentés ou des obstacles conséquents. Des muscles artificiels sont également expérimentés, mais la structure biologique correspondante reste encore, et de loin, la plus performante en termes d'endurance et de souplesse...

Quant aux architectures de contrôle, certaines reproduisent les circuits nerveux que les neurobiologistes ont patiemment décryptés. Le robot-rat précédent peut ainsi enchaîner ses actions efficacement grâce à une architecture copiant les circuits de structures cérébrales présentes chez les vertébrés. Il peut aussi, avec les mêmes inspirations, s'orienter dans un lieu inconnu par des apprentissages que l'on va évoquer dans le paragraphe suivant.

Dans les cas précédents, les robots ont bénéficié en quelque sorte d'inventions « clés en main », c'est-à-dire déjà adaptées par la nature pour les besoins de tel organisme, vivant dans tel environnement. Mais les robots ont leurs propres besoins. Il est donc nécessaire qu'ils soient équipés non seulement des structures, mais aussi des *moyens* qui ont permis aux organismes d'acquérir ces structures adaptées à leur mode de vie. Ces moyens sont notamment *l'apprentissage individuel et l'évolution des espèces*.

Des robots qui apprennent...

Pour comprendre comment un robot peut « apprendre » ou évoluer, il faut s'immiscer à l'intérieur de son « cerveau ». Contrairement à ce que suggère cette métaphore, le cerveau d'un robot ne contient ni neurone, ni ganglion, ni hémisphère, ni circonvolution, juste une liste d'instructions transcrites en langage informatique. Ce programme va lire les informations reçues par les capteurs. Il va ensuite soumettre ces données à une

série de calculs plus ou moins complexes, dont les résultats seront convertis en signaux électriques. Ceux-ci seront enfin envoyés aux actionneurs afin qu'ils exécutent telle action.

Voici un exemple très simple, calculé en unités arbitraires sur le véhicule A de la figure page 449. Son cerveau est constitué de deux neurones virtuels, en réalité représentés chacun par cette relation : $\text{Signal}_{\text{actionneur}} = 10 * \text{Signal}_{\text{capteur}}$. Elle signifie que chaque « neurone qui accélère » va envoyer à l'actionneur auquel il est connecté un signal égal à 10 fois celui qu'il aura reçu du capteur auquel il est connecté. Si chaque capteur de luminosité du véhicule A reçoit une luminosité d'intensité 0,4, chaque moteur recevra donc un signal électrique de valeur 4, qui fera par exemple tourner chaque roue à la vitesse 4. Dans les mêmes conditions de luminosité, un autre véhicule de type A pourra se déplacer plus vite si le PARAMÈTRE des équations de ses neurones ne vaut plus 10 mais 20, ou moins vite s'il vaut 5.

Imaginons maintenant qu'un véhicule doive fuir très vite devant un véhicule rouge menaçant, mais qu'il doive se déplacer lentement – pour économiser son énergie – lorsque ce « prédateur » est absent. Le plus efficace serait alors pour lui d'*apprendre* à modifier son paramètre de vitesse en fonction des informations que vont recevoir ses capteurs : s'il perçoit un véhicule rouge dans son champ de vision, il appliquera à ces données une équation comportant un paramètre élevé et ses roues tourneront plus vite ; s'il perçoit autre chose, il appliquera une équation comportant un paramètre plus faible et ses roues tourneront plus lentement.

C'est sur ce principe général de *modification des paramètres* des connexions entre capteurs et actionneurs que les robots vont pouvoir apprendre à réaliser des

comportements performants, en ajustant l'intensité des impulsions électriques que recevront leurs actionneurs en fonction des informations reçues par leurs capteurs.

Il existe de nombreuses « méthodes d'apprentissage » pour robots, inspirées d'ailleurs de celles des animaux. Certaines sont fondées sur des associations : si, par exemple, des sensations ou des actions similaires concernent des objets différents, alors le robot pourra apprendre à les classer dans une même catégorie. D'autres méthodes sont fondées sur le principe qu'une expérience réussie par un robot le « récompense » et qu'une expérience ratée le « punit ». La carotte et le bâton serviront ici à des ajustements successifs dans l'organisation de son architecture de contrôle : le robot renforcera ou diminuera notamment la force des paramètres de ses connexions selon les succès ou les échecs rencontrés dans la tâche à accomplir.

C'est par ces méthodes qu'un robot mobile muni d'une pince peut apprendre, par exemple, à distinguer deux objets cylindriques. L'un des objets est petit et léger, l'autre est volumineux et lourd. Le roboticien désire que le robot transporte les petits objets dans un endroit précis d'une pièce parsemée des deux catégories de cylindres. Le robot va pouvoir apprendre à associer les objets à la longueur des déplacements nécessaires pour en faire le tour. Grâce à des calculs statistiques inclus dans son programme d'apprentissage, il va classer tous les petits objets dans la catégorie « court déplacement » et tous les volumineux dans la catégorie « long déplacement ».

On notera que le roboticien a permis au robot de construire une représentation de ces objets qui lui est propre. Nous ne les aurions certainement pas distingués par des longueurs

de déplacement, mais par des aspects visuels. La représentation des objets – et du monde en général – élaborée par un humain, un animal ou un robot est en effet complètement tributaire de son équipement sensori-moteur, des actions qu'il compte réaliser et de ses expériences passées. Cette représentation du monde sera donc *personnelle*. C'est pourquoi il est si important de fournir aux robots les moyens de constituer leur *propre représentation du monde*, pour qu'ils puissent se comporter de la manière la plus pertinente possible.

Le type d'apprentissage qui vient d'être décrit ne comporte ni punition ni récompense : ce n'est en effet ni bien ni mal que le robot différencie des petits et des gros cylindres. En revanche, il y en a dans le type d'apprentissage que le robot utilise pour savoir quand il doit actionner sa pince pour soulever un objet. En effet, chaque fois qu'il subira un échec en tentant de soulever un objet « long déplacement », il sera en quelque sorte « puni », ce qui signifie que son programme d'apprentissage lui indiquera qu'il faut *diminuer* la force des connexions qui lui permettent d'enchaîner les comportements « long déplacement » et « actionner pince ». En revanche, chaque fois qu'il rencontrera un succès en soulevant un petit objet, il sera « récompensé », ce qui signifie que son programme d'apprentissage lui indiquera qu'il faut *augmenter* la force des connexions qui lui permettent d'enchaîner les comportements « court déplacement » et « actionner pince ».

Très récemment, un troisième type d'apprentissage est à l'œuvre : l'apprentissage par imitation. En catégorisant des gestes pratiqués par un humain, des robots sont capables d'apprendre à les reproduire de façon autonome, ce qui leur permet

d'acquérir plus rapidement une suite de gestes complexes. C'est ainsi qu'un robot suisse a pu confectionner une omelette garnie, en apprenant successivement à battre des œufs, à couper du jambon et à râper du fromage ! Reste à lui apprendre à la faire cuire habilement dans une poêle... Notons que certains de ces robots imitateurs font partie de programmes thérapeutiques pour autistes, car leur comportement très prévisible semble encourager l'interactivité de ces enfants.

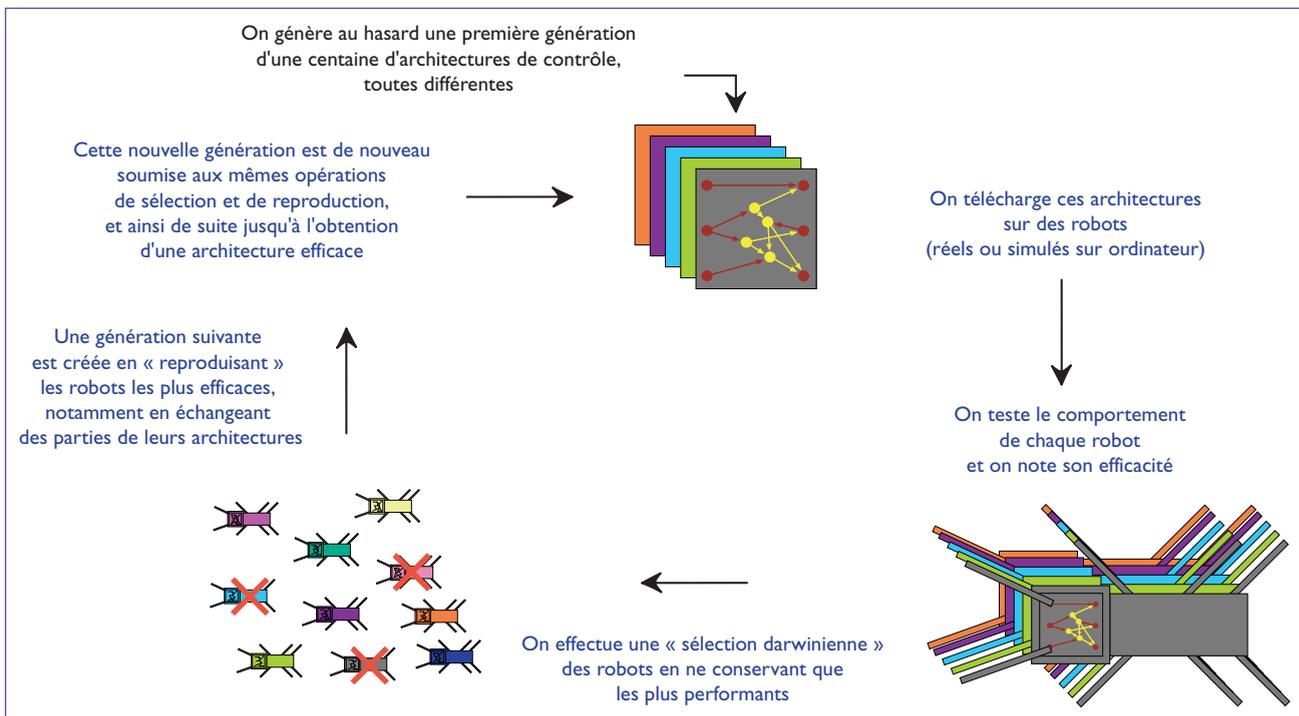
... et des robots qui évoluent

Quoique très performantes, ces méthodes d'apprentissage laissent aux robots une marge de manœuvre relativement limitée : ils se bornent à adapter par leurs propres expériences des architectures de contrôle dont les instructions et les équations ont été entièrement pensées par des hommes.

Les *méthodes évolutionnistes* leur apportent un peu plus d'indépendance,

car elles consistent à découvrir, parmi des milliers de cerveaux générés complètement au hasard, celui qui accordera au robot le plus d'efficacité dans sa tâche. Ce processus s'inspire, certes en le simplifiant considérablement, du mécanisme de sélection naturelle de la théorie de Darwin, selon lequel les individus les mieux adaptés à leur milieu ont été conservés dans l'évolution des espèces, les autres ayant été éliminés (voir le schéma ci-dessous).

C'est ainsi qu'une population de quelques centaines d'architectures de contrôle, élaborées aléatoirement, va représenter la première génération d'« ancêtres » du futur cerveau du robot efficace. Toutes les architectures ainsi générées seront alors testées dans la tâche que le robot doit accomplir. Une *sélection* « darwinienne » des architectures sera déterminée par une note d'évaluation attribuée par le chercheur : les architectures ayant reçu les plus mauvaises notes seront éliminées,



celles qui auront reçu les meilleures notes auront la permission de « se reproduire » avec d'autres bonnes architectures – avec aussi une pincée de moins performantes. (L'ajout de ces cerveaux de faible efficacité s'avère en effet indispensable pour ne pas rendre les animats trop spécialisés, ce qui – comme dans l'évolution naturelle – les conduirait à ne pas pouvoir survivre dans un environnement toujours changeant.) Cette *reproduction* consistera à croiser ces architectures deux à deux, c'est-à-dire à échanger au hasard certaines de leurs structures, et à modifier, également au hasard, des détails de leur organisation. Ces opérations ont des équivalents biologiques, appelés *crossing-over* pour les premiers – qui sont des échanges de gènes entre chromosomes – et *mutations* pour les seconds – qui sont des modifications à l'intérieur des gènes. Les nouvelles architectures issues de la reproduction constitueront la deuxième génération, qui sera à nouveau testée dans les mêmes conditions que la précédente. Le même processus de sélection-reproduction sera ensuite appliqué à cette génération, puis aux suivantes. Au bout de quelques centaines ou milliers de générations – le nombre est très variable selon les tâches à accomplir –, on obtiendra une architecture de contrôle qui permettra à un robot de mettre en œuvre un comportement extrêmement performant. C'est notamment par cette méthode que notre robot Sect (que l'on voit page 446) s'est forgé lui-même les connexions reliant ses six pattes, qui lui permettent de se déplacer efficacement, à la manière des insectes. Là où un chercheur avait mis deux ans pour concevoir une architecture de contrôle de ce type et ajuster les paramètres de toutes les équations, l'évolution artificielle réalisée par l'ordinateur a mis seulement deux jours !

Des robots roboticiens ?

Les robots ont désormais les moyens de modifier leur cerveau pour réaliser une tâche. Mais leur morphologie est encore conçue par le roboticien. Plus pour longtemps... car des équipes américaines ont entrepris de découvrir par ces mêmes méthodes évolutives, non seulement l'architecture de contrôle d'un robot, mais aussi la forme de son enveloppe corporelle ! En effet, un organisme vivant s'adapte aux tâches diverses qu'il doit accomplir car *son anatomie évolue en même temps que son système nerveux*. La plupart des robots actuels n'ont très probablement qu'une efficacité limitée puisque leur architecture de contrôle peut être contrainte par un corps qui n'a pas été conçu *exactement* pour le travail demandé. Même si l'entreprise s'avère plus difficile que prévu initialement, les robots sont donc en passe de devenir leurs propres roboticiens en cherchant à concevoir par évolution leur structure en même temps que les connexions entre leurs capteurs et actionneurs. Les chercheurs humains se borneront alors à appliquer des « pressions de sélection » au cours de cette évolution artificielle, en donnant des notes d'évaluation favorables aux robots qui réalisent les objectifs désirés.

Les tendances de la robotique du futur

Des robots reconfigurables

L'expérimentation précédente n'a donné lieu à ce jour qu'à une « chose » très fruste ayant trouvé elle-même une forme et un cerveau qui lui permettent de ramper. Les mêmes chercheurs américains ont également conçu par cette méthode évolutionniste un robot qui peut retrouver un comportement adapté en ayant perdu quelques-unes de ses pièces.

Lorsque l'un de ses bras est cassé, une étoile de mer robotique cherche « dans sa tête » le meilleur moyen de se déplacer correctement avec ce handicap, puis applique ensuite avec succès la solution trouvée. On peut envisager dans le futur des robots qui auraient appris eux-mêmes non seulement à élaborer leur forme, mais aussi à la *modifier* en fonction des milieux rencontrés. Ils pourraient alors être successivement reptiliens pour pénétrer dans des endroits étroits, insectoïdes pour marcher rapidement sur des éboulis et simiesques pour se déplacer dans les arbres.

Des nanorobots

L'une des avancées robotiques les plus spectaculaires se situe dans l'infiniment petit. Déjà, des microvéhicules qui « tournent sur une *dime* et se garent sur un *nickel* » (deux petites pièces de monnaie américaines) ont pu être équipés d'une caméra, d'un microphone, d'une liaison radio, de senseurs chimiques, de capteurs de température, de batteries et de microprocesseurs embarqués. Ils sont destinés à déminer des terrains ou à détecter des armes chimiques et biologiques. Ils pourraient également coopérer, comme les insectes sociaux, pour construire ou réparer des installations spatiales. Dans la même optique, des nanohélicoptères australiens, de 250 microns de diamètre, vont dans un avenir très proche se déplacer à l'intérieur de nos artères pour atteindre une zone à opérer. Plus tard, d'autres pourraient se glisser dans nos cellules pour y apporter des médicaments spécifiques, combattre des virus ou réparer des gènes.

Des robots hybrides

Une tendance plus inquiétante de la recherche consiste à équiper les robots d'organes

vivants pour tenter de les rendre encore plus adaptatifs. Ces créatures hybrides sont appelées *biobots*. Ce sont par exemple des robots équipés d'antennes du papillon bombyx du mûrier, et ainsi capables d'utiliser ces organes détecteurs d'odeurs pour se diriger dans un environnement où un système visuel ne serait d'aucune aide, ou des robots nageurs munis de vrais muscles de grenouille, ou d'autres encore dont l'architecture de contrôle serait remplacée par un vrai cerveau de lamproie. Ces biobots vont sans doute constituer une avancée dans la compréhension des mécanismes biologiques, en montrant comment un robot – dont on connaît parfaitement la structure, contrairement à celle d'un animal – se comporte lorsqu'il est muni de tels équipements vivants. Ils peuvent aussi être riches d'applications futures, car ils peuvent aider à comprendre comment l'artificiel peut être connecté au naturel en vue, par exemple, d'élaborer des prothèses « intelligentes », c'est-à-dire capables d'apprendre comment se comporter une fois greffées à leur porteur humain. Toutefois, ils ne doivent pas affranchir les chercheurs des mêmes questions éthiques que soulève toute manipulation du vivant.

Des robots incontrôlés ?

Si ces créatures deviennent aussi autonomes que des organismes vivants, pourraient-elles un jour échapper à notre contrôle et vivre leur vie propre ? Pour l'instant, la question ne se pose pas. Les robots actuels les plus autonomes n'arrivent pas à se hisser au niveau de l'autonomie de la plus simple des bactéries. Il leur manque, entre autres multiples aptitudes, d'avoir résolu le problème crucial de l'autonomie énergétique,

c'est-à-dire d'être capables de transformer des ressources pour pouvoir fonctionner sans qu'un humain doive les recharger – ce que la vie a réalisé avant même d'avoir élaboré des organismes à comportement complexe. L'un des pionniers pourrait cependant être Ecobot, le robot anglais capable de digérer des mouches mortes et de les transformer en énergie électrique pour continuer à se déplacer. Bientôt, il sera doté d'un dispositif qui lui permettra d'attraper ces insectes au vol. Mais de telles ressources sont quelque peu hasardeuses pour un robot devant explorer Mars ou, plus simplement, vivre dans un appartement !

En revanche, l'avenir démontrera sans doute que c'est l'homme qui contrôlera de plus en plus les robots du futur. Par l'intermédiaire d'un bonnet d'électrodes enregistrantes (appelé « neuroprothèse ») qui capte et traduit l'activité électrique de ses neurones, il peut déjà donner l'ordre « par la pensée » - donc à distance - à un robot humanoïde de marcher ou à une chaise roulante de se déplacer ou de s'arrêter. Ces toutes récentes recherches dites d'« interface cerveau-machine » sont évidemment un espoir pour les handicapés moteurs, mais également une source d'investigation extraordinaire du cerveau humain.

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

Un ordinateur est-il un robot ou un automate ?

Ni l'un ni l'autre... Un ordinateur n'a physiquement ni capteurs ni actionneurs. Ce serait plutôt l'équivalent de l'architecture de contrôle. Dans le cas d'un automate, l'ordinateur mettra en œuvre un programme qui calculera l'intensité des impulsions à envoyer aux actionneurs. Dans le cas d'un robot, il mettra en œuvre un programme qui calculera l'intensité des impulsions à envoyer aux actionneurs, en fonction des données fournies par les capteurs.

Ou les deux... On peut cependant simuler un automate ou un robot entièrement sur ordinateur : à l'aide d'un programme informatique, on définira un environnement virtuel, dans lequel évoluera un automate virtuel avec des actionneurs virtuels, ou un robot virtuel avec des capteurs et des actionneurs virtuels, comme des personnages de jeu vidéo. De multiples expériences de simulation peuvent être ainsi menées, ce qui peut être très efficace, notamment pour appliquer des méthodes évolutionnistes qui seraient trop longues à réaliser sur des systèmes réels. Mais elles ne remplaceront jamais les expériences en milieu réel. En effet, ce que l'on simule sur ordinateur est toujours trop simplifié et les détails omis peuvent cruellement manquer à un vrai robot pour qu'il se comporte efficacement.

Existe-t-il un comité de « robo-éthique » ?

Des chartes sur les travaux en robotique sont effectivement en préparation ou déjà en vigueur dans les pays où la construction de robots est exponentielle – comme la Corée du Sud ou le Japon –, mais globalement, les recherches restent sous la seule responsabilité des chercheurs. En France cependant, ces travaux sont contrôlés par le même comité d'éthique que celui qui surveille la recherche sur le vivant. Au niveau européen, un atelier de robo-éthique est mis en place depuis quelques années pour proposer des mesures spécifiques aux divers gouvernements.

Bibliographie

Robots. Des machines intelligentes et vivantes ? R. AYLETT, Solar, 2004.

Véhicules : expériences en psychologie synthétique, Valentino BRAITENBERG, Presses polytechniques romandes, 1991.

« La bionique », Agnès GUILLOT, *Graines de Sciences 7*, p. 93-118, Le Pommier, 2005.

Des robots doués de vie ?, Agnès GUILLOT et Jean-Arcady MEYER « Les Petites Pommes du savoir », Le Pommier, 2004.

La bionique. Quand la science imite la Nature, Agnès GUILLOT et Jean-Arcady MEYER, « UniverSciences », Dunod, 2008.

Robots : Genèse d'un peuple artificiel, D. ICHBIAH, Minerva, 2005.

Les robots, une histoire de la robotique, Chantal LEGUAY, éditions IMHO et Chantal Leguay, 2005.

Le robot, ami ou ennemi ?, Rodolphe GELIN, « Les Petites Pommes du savoir », n°90, Le Pommier, 2006.

Robo sapiens : une espèce en voie d'apparition, Peter MENZEL et Faith D'ALUISIO, Autrement, 2001.

Le Jaillissement de l'esprit : ordinateurs et apprentissage, Seymour PAPERT, Flammarion, 1981.

La Vie artificielle : où la biologie rencontre l'informatique, Jean-Philippe RENNARD, Vuibert Informatique, 2002.

Sur la Toile

<http://isir.fr/> est le site de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) de l'Université Pierre et Marie Curie où l'équipe AnimatLab a été transférée depuis janvier 2007 (équipe SIMA de l'ISIR). Sur l'ancien site AnimatLab (<http://animatlab.lip6.fr>), on trouve des liens vers d'autres laboratoires français et étrangers de robotique bioinspirée

(rubrique Liens laboratoires), ainsi que des liens sur de multiples recherches sur les animats (rubrique Liens recherches sur les animats).

On pourra aussi (rubrique Publications) y télécharger des articles présentant l'approche animat en termes accessibles, par exemple :

« Psikharpax, ou l'ambition d'être un rat », A. GUILLOT et J.-A. MEYER, *La Recherche*, n° 350, 2002, p. 64-67.

« Vers une robotique animale », J.-A. MEYER et A. GUILLOT, *Pour la science*, n° 300, numéro spécial, 2002, p. 168-171.

Préface, A. GUILLOT et J.-A. MEYER, in *Robo sapiens : une espèce en voie d'apparition*, Peter MENZEL et Faith D'ALUISIO, Autrement, 2001.

« La robotique évolutionniste », J.-A. MEYER et A. GUILLOT, *Pour la science*, n° 284, 2001, p. 70-77.

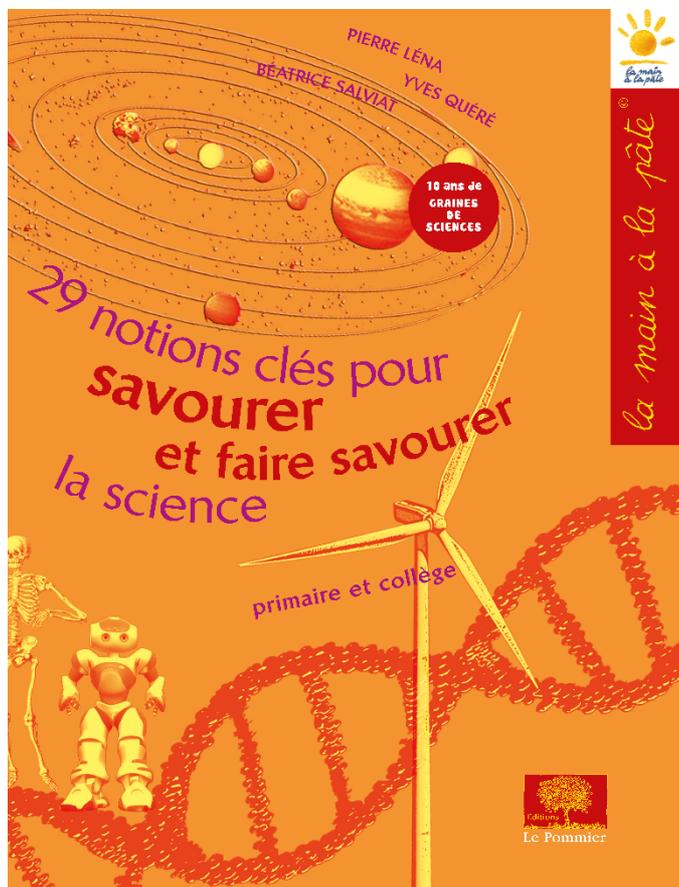
Ces derniers articles sont également téléchargeables sur le nouveau site ISIR.

Sur le site suivant <http://www.ifi.unizh.ch/~pfeifer/mitbook/examples.html> : on trouve notamment des animations des véhicules de Braitenberg.

<http://www.karlsims.com/evolved-virtual-creatures.html> : sur cette page se trouve une animation de créatures qui ont trouvé leur morphologie et leur architecture de contrôle par évolution artificielle.

<http://www.papert.org/> (site en anglais) : dans les années 1960, Seymour Papert (voir Bibliographie) a initié un programme d'éducation des enfants par l'informatique et la robotique aux États-Unis et qui est tout à fait conforme à celui de *La main à la pâte*, prônant le fait « d'apprendre aux enfants à être scientifiques » plutôt que « d'apprendre les sciences aux enfants ».

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE