Encadré : qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?

Le terme « intelligence artificielle » (IA) est utilisé pour caractériser des algorithmes et des machines dotées de formes d' « intelligence ». Il désigne aussi le domaine de recherche qui étudie ces algorithmes, et qui a été créé dans les années 1950. Les machines étudiées en IA sont très diverses, tant sur le plan de leurs mécanismes, de leurs fonctionnalités et du but de leurs concepteurs.

Des exemples de tels algorithmes sont ceux qui permettent à des ordinateurs de battre les meilleurs joueurs du monde aux échecs ou d'aider des mathématiciens à trouver automatiquement la preuve de certains théorèmes. Ces algorithmes reposent sur la manipulation astucieuse de symboles, et le but de leurs concepteurs est de construire des machines efficaces capables de nous aider dans des tâches quotidiennes comme la recherche d'information sur internet ou la résolution de problèmes de logistique. Bien qu'ils soient très performants sur des tâches particulières, ces algorithmes fonctionnent de manière très différente du cerveau humain, et ne sont pas capables de s'adapter de manière autonome à des tâches nouvelles (c'est à dire sans l'aide d'un ingénieur qui les reprogrammerait).

D'autres travaux visent au contraire à construire des algorithmes qui modélisent les processus cognitifs et neuronaux humains, afin de contribuer à mieux les comprendre. Certains laboratoires modélisent par exemple les processus d'apprentissage et de développement des savoir-faire sensoriels et moteurs de l'enfant, ou l'acquisition du langage, souvent en les expérimentant sur des robots. Cependant, les mécanismes qui sont mis en œuvre ont encore des capacités cognitives et d'adaptation qui sont très éloignées de celles de jeunes enfants, et des défis fondamentaux de compréhension de la cognition restent à résoudre.

Enfin, on peut mentionner depuis quelques années l'importance croissante du « Big Data » (masses énormes de données) dans le développement de nouvelles formes d'intelligence artificielle. Des chercheurs ont, par exemple, fait visualiser des milliers d'images de chat à un programme qui s'est alors construit, seul, le « concept » de chat. La traduction automatique s'inscrit également dans ce champ : l'algorithme de traduction de Google, par exemple, apprend au fur et à mesure qu'il réalise des traductions.

Les objets informatiques : ordinateurs, robots, réseaux…

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'informatique est née lorsqu'on a pu concevoir des machines capables d'exécuter des algorithmes. Ces machines « universelles » sont appelées aujourd'hui des ordinateurs.

Qu'est-ce qu'un ordinateur ?

Un ordinateur est une machine capable de manipuler automatiquement des informations et de les mémoriser, et que l'on peut programmer. Les manipulations de l'information sont notamment des suites d'opérations arithmétiques et logiques. Bien que le mot « ordinateur » soit souvent associé à l'image de nos ordinateurs personnels, avec écran et clavier, les ordinateurs au sens large sont aujourd'hui présents dans de très nombreux objets quotidiens sous la forme de processeurs

« embarqués » dans ces objets[1] : téléphones, tablettes, montres électroniques, voitures, avions, feux de circulation, caméras, appareils photos, télévisions, appareils ménagers, jouets interactifs, appareils auditifs, thermostats…et tous les robots dont nous parlerons plus loin.

Des ordinateurs mécaniques aux microprocesseurs

Aujourd'hui, la plupart des ordinateurs sont des machines électroniques, cependant, les premiers ordinateurs ont d'abord été mécaniques. Précurseur, Charles Babbage a conceptualisé le premier ordinateur au début du 19ème siècle, sous la forme d'une machine composée d'un jeu complexe de rouages mécaniques (voir ci-avant, page 9). On fournissait à cette machine des instructions de calcul sous la forme de cartes perforées, selon un principe similaire à la programmation des machines à tisser. La machine de Babbage était en particulier capable de réaliser des boucles et des branchements conditionnels, c'est-à-dire de décider de la suite d'instructions à réaliser en fonction du résultat d'un calcul.

Les premiers ordinateurs électro-mécaniques sont apparus pendant la seconde guerre mondiale. Ils étaient utilisés pour les calculs balistiques des missiles. Ces ordinateurs utilisaient l'électricité pour activer et désactiver des relais mécaniques afin de réaliser des calculs. Les ordinateurs entièrement électroniques sont apparus peu après, basés sur l'utilisation de lampes à vide : citons le Colossus en Grande-Bretagne qui servit à décoder les messages secrets échangés par l'armée Allemande (voir ci-avant, page 11, à propos d'Alan Turing). Les lampes à vide furent ensuite remplacés par les transistors, dont la petite taille, la faible consommation d'énergie et la robustesse permirent leur accumulation sur des « circuits intégrés ». La miniaturisation constante des circuits intégrés a donné naissance aux microprocesseurs dès la fin des années 1950.

Lampe à vide de 1947

transistor PNP de 1953

Microprocesseur Intel© 4040 de 1974. Contient 3 000 transistors.

Microprocesseur Intel© Core i7 de 2014. Contient 2,6 milliards de transistors.

Aujourd'hui des laboratoires de recherche imaginent des alternatives aux circuits électroniques pour les ordinateurs de demain. En particulier, ils étudient comment utiliser des propriétés de la matière afin d'accélérer certains types de calculs (comme les états quantiques dans le cas des « ordinateurs quantiques »), ou comment utiliser certaines molécules complexes (comme l'ADN dans le cas du « DNA computing »).

---

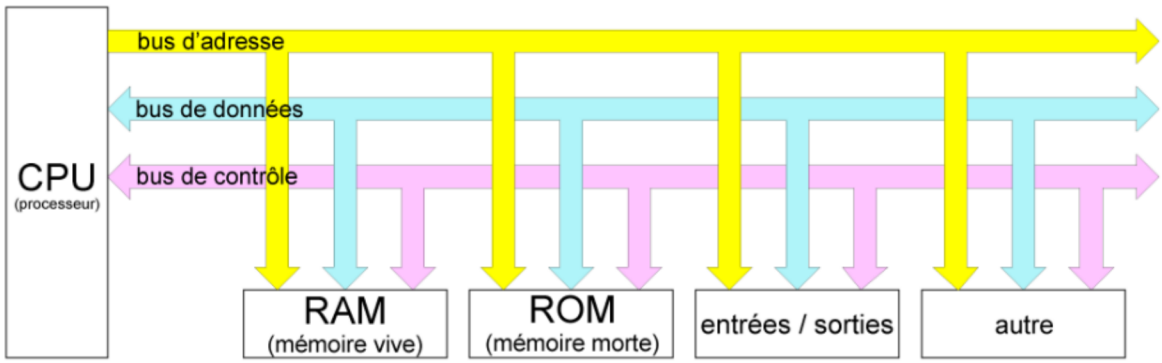
[1] Il y a environ 10 fois plus d'ordinateurs « embarqués » que d'ordinateurs « classiques » (avec écran, clavier…) dans le monde.

Les composants des ordinateurs

La plupart des ordinateurs actuels reposent sur quatre entités : l'unité de contrôle, l'unité arithmétique et logique (ALU), la mémoire, et les dispositifs d'entrée-sortie. Ces entités, souvent constituées elles-mêmes de plusieurs composants, sont interconnectées via des conducteurs électriques (pistes en cuivre, câbles) que l'on appelle de façon générique des « bus ». Ces bus transmettent des informations suivant un codage précis, le « protocole de communication ».

L'unité de contrôle est le chef d'orchestre qui dirige l'ensemble des autres entités : elle lit et décode les instructions et les données de la mémoire, les transforme en signaux qui vont activer d'autres entités (par exemple envoyer à l'ALU un calcul à effectuer, récupérer le résultat et le ranger à un emplacement particulier dans la mémoire).

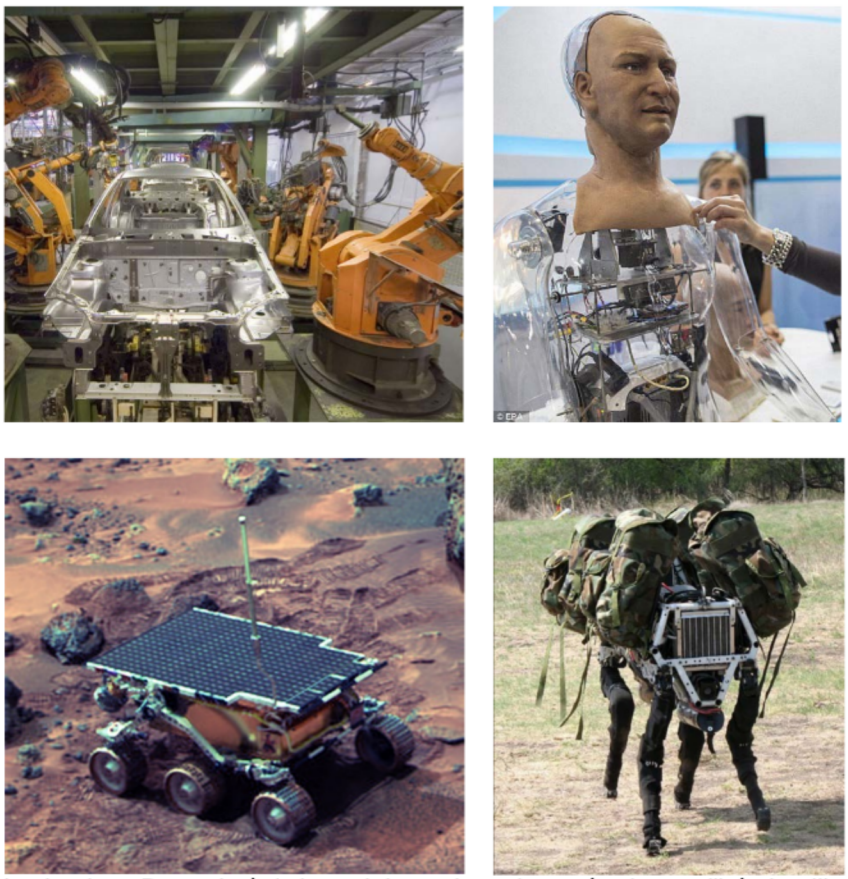
On appelle souvent « CPU » (Central Processing Unit en anglais) l'ensemble composé de l'unité de contrôle, de l'ALU, et de cellules mémoire spéciales, les « registres », utilisées pour mémoriser l'emplacement en mémoire de la prochaine instruction.



La mémoire d'un ordinateur peut être vue comme un ensemble de cases dans lesquelles on peut stocker et écrire des nombres (encodés selon le codage binaire : un circuit élémentaire allumé code la valeur « 1 », et un circuit élémentaire éteint code la valeur « 0 »). Chaque case a une adresse qui permet aux autres composants de la localiser.
Les ordinateurs sont souvent associés à des dispositifs d'entrée-sortie, les « périphériques », qui leur permettent d'échanger des informations avec l'extérieur. Au-delà des claviers, souris, disques durs, écrans, haut-parleurs ou imprimantes, les périphériques de la plupart des ordinateurs embarqués dans notre quotidien sont des capteurs (par exemple de lumière, de mouvement, de chaleur, de signal GPS, ...), des actionneurs (par exemple des moteurs, des valves, des radiateurs, ...), et surtout d'autres ordinateurs, situés à l'intérieur du même objet, ou à l'extérieur. Par exemple, un ordinateur personnel ou un téléphone contiennent plusieurs ordinateurs dédiés au traitement du son ou de l'image et qui communiquent les uns avec les autres, ainsi qu'avec les autres ordinateurs, externes, connectés au réseau internet.

Les robots

Parmi les objets qui embarquent des ordinateurs, les « robots » ont une importance scientifique, sociétale et économique grandissante. Les robots sont partout : dans les usines et dans les champs, au fond des mers et dans l'espace, dans les jardins et les salons. En outre, ils ont pénétré notre culture et certains d'entre eux participent au renouvellement de la vision que nous avons de nous-même.



Quelques exemples de robots. De gauche à droite et de bas en haut : bras mécaniques utilisés dans l'industrie automobile ; robot humanoïde dédié à la reconnaissance et à la reproduction des émotions ; robot explorateur sur Mars et robot militaire destiné à transporter des charges lourdes sur des terrains accidentés.

D'un point de vue technique, un robot est une machine dotée de capteurs (de contact, de distance, de couleur, de force, ..) qui lui permettent de percevoir son environnement, de moteurs l'autorisant à bouger et à agir sur cet environnement, et d'un système qui contrôle ce qu'effectue le robot en fonction de ce qu'il perçoit. Une caractéristique fondamentale des robots, qui les distingue des automates, est cette rétroaction entre perception et action. Les automates (tels que ceux de Jacques de Vaucanson ou de Pierre et Henri-Louis Jaquet-Droz au XVIIIe siècle) ne sont pas des robots car leurs mouvements ne dépendent pas de ce qui se passe autour d'eux : ils n'ont pas de capteurs et leurs enchainements sont entièrement prédéterminés par le programme.

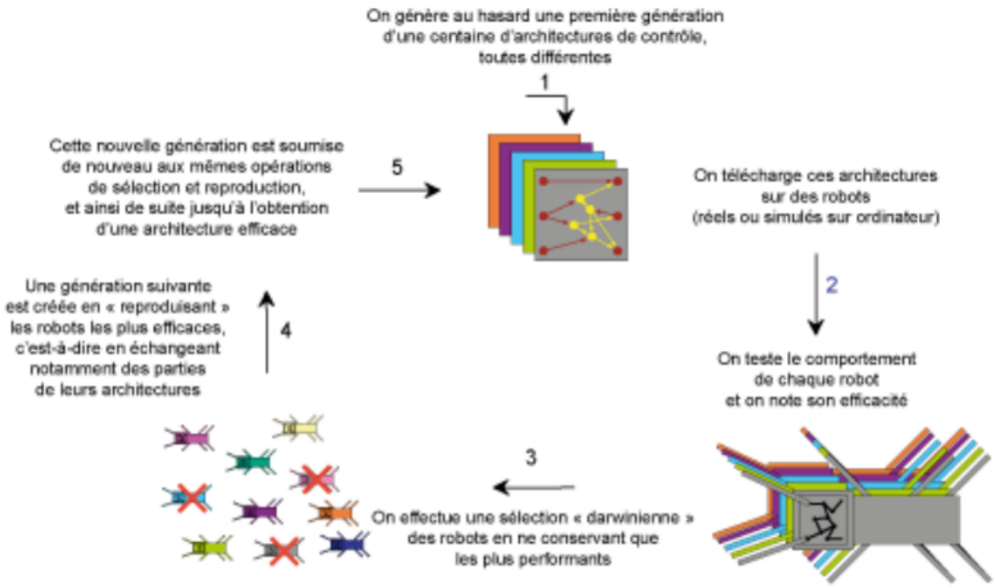
En pratique, cette définition d'un robot recouvre une très vaste diversité de machines : les bras articulés programmables des usines automobiles, les voitures (en mode d'assistance à la conduite) et les avions qui sont aujourd'hui largement automatisés, les aspirateurs qui font le ménage tout seuls, certains objets électroniques des magasins de jouets, ou les robots biomimétiques en forme d'animaux (singes, poissons..) que l'on rencontre parfois dans les laboratoires de recherche.

Cette diversité n'est pas seulement une diversité de formes, c'est aussi une diversité d'usages, qui sous-tendent une diversité de logiques de fonctionnement. Ainsi, les robots se spécialisent selon deux axes majeurs : l'autonomie et les capacités d'adaptation et/ou d'apprentissage.

L'autonomie : il existe des robots qui agissent sans qu'un humain les guide, et d'autres dont le comportement est, soit influencé par un humain, soit presque totalement contrôlé par un humain. Par exemple, dans une usine, les robots qui travaillent à la chaine et répètent toujours le même geste le font souvent de manière autonome. En revanche, les robots utilisés dans les centrales nucléaires

(pour opérer dans les zones à forte radiation) sont typiquement téléguidés par un humain qui leur dit où aller et quoi faire après chaque action.

L'adaptation et l'apprentissage : le comportement de certains robots est figé au départ et une fois pour toutes par le programmeur, alors que d'autres robots sont capables d'acquérir de nouveaux comportements et de nouvelles connaissances par leurs expériences : leur comportement évolue en fonction de l'histoire de leurs interactions avec l'environnement. Ainsi, certains robots sont capables d'apprendre à reconnaître des objets dans des images ou encore d'apprendre à marcher en expérimentant et évaluant eux-mêmes différentes stratégies. Ces mécanismes d'adaptation sont permis par des « algorithmes d'apprentissage », qui reposent sur la détection automatique de régularités dans des flux de données captées par le robot, et sur des méthodes d' « optimisation » permettant de raffiner de manière progressive et itérative les paramètres des solutions à un problème.



Exemple de processus itératif permettant à des « générations » de robot d'apprendre à réaliser une tâche par eux-mêmes (par exemple, se déplacer).

Grâce à ces algorithmes d'apprentissage, certains robots sont capables d'inventer des solutions et des comportements non prédits par leur concepteur, et même de sélectionner pour eux-mêmes des objectifs qui ne sont pas préprogrammés. Il est par exemple possible de programmer un robot en lui donnant des instructions lui demandant de rechercher des situations nouvelles afin d'augmenter ses connaissances sur le monde qui l'entoure. Ainsi, certains algorithmes permettent de doter ces machines de formes d'apprentissage et de créativité. Néanmoins, les capacités et les performances de ces algorithmes sont aujourd'hui, et encore pour très longtemps probablement, très faibles en comparaison des capacités d'adaptation et de raisonnement de nombreux animaux, et en particulier de l'humain.

Comme nous l'avons vu, ces différentes logiques de fonctionnement répondent à différents besoins : il existe en effet une grande variété de raisons, et donc de fonctions, pour lesquelles les robots sont construits et utilisés. On peut en particulier considérer trois familles de fonctions : travailler et explorer, assister l'humain, modéliser les mécanismes cognitifs et comportementaux du vivant.

Travailler et explorer. La plupart des robots en service dans le monde sont industriels (on en compte aujourd'hui environ 9 millions). Très tôt, les entreprises se sont intéressées à ces machines pour deux raisons :

- D'abord, les robots peuvent être utilisés pour remplacer les travailleurs humains dans les tâches répétitives, pénibles et nécessitant de faibles compétences, comme les montages, la peinture ou les soudures de pièces ;
- En outre, ces machines sont capables de réaliser des travaux à la chaine bien plus rapidement et efficacement que les humains.

Le premier robot industriel, Unimate, est apparu en 1961 : installé dans une usine automobile de General Motors, ce bras articulé manipulait de lourdes pièces de fonderie. Dans les années 1970, l'usage des robots dans l'industrie a pris son envol. Aujourd'hui, les robots ont pénétré toutes les branches de l'industrie et ne sont plus restreints au seul secteur de l'automobile. Par exemple, dans l'agriculture et l'agro-alimentaire, les robots vont dans les champs cueillir fruits et légumes, certains coupent, pressent et mettent en bouteille ; d'autres trient et mettent en cartons ; d'autres encore groupent en palettes. Dans certains aéroports, des flottes de robots s'occupent de transporter les bagages et de les charger dans les soutes.

Les robots ne sont pas seulement utiles dans l'industrie pour les tâches simples et répétitives, ils sont aussi utilisés pour travailler dans des environnements dangereux pour l'homme. L'industrie nucléaire est un exemple typique. Qu'ils soient autonomes ou partiellement téléguidés, les robots des centrales nucléaires peuvent déambuler dans les enceintes confinées et radioactives, ils peuvent manipuler les substances dangereuses et s'occuper de la maintenance des autres machines. Un autre exemple est l'industrie pétrolière : les robots sous-marins sont par exemple utilisés pour contrôler l'état de la coque des navires afin de prévenir les accidents et d'identifier les « navires poubelles ».
Les robots sont enfin cruciaux pour l'exploration des endroits où l'homme ne peut pas aller, au premier rang desquels l'espace et les corps du Système solaire. C'est en 1966 que le premier robot mobile arrive sur la Lune, embarqué dans la sonde Surveyor. Suivront le soviétique Lunokhod, puis toute la série des américains Mariner. En 1997, un robot atterrit sur la planète Mars : Sojourner, qui est propulsé par l'énergie qu'il capte grâce à ses panneaux solaires ; il envoie à la Terre des milliers de clichés et provoque un engouement du grand public. Sojourner navigue en partie de manière autonome car, étant donné la distance avec la Terre, il est très difficile de le téléguider en temps réel. En 2004, une nouvelle mission robotisée concentre l'attention du monde entier : Spirit et Opportunity, équipés de spectromètres et d'un bras qui leur permet de creuser la surface, apportent la preuve que de l'eau a coulé sur Mars.

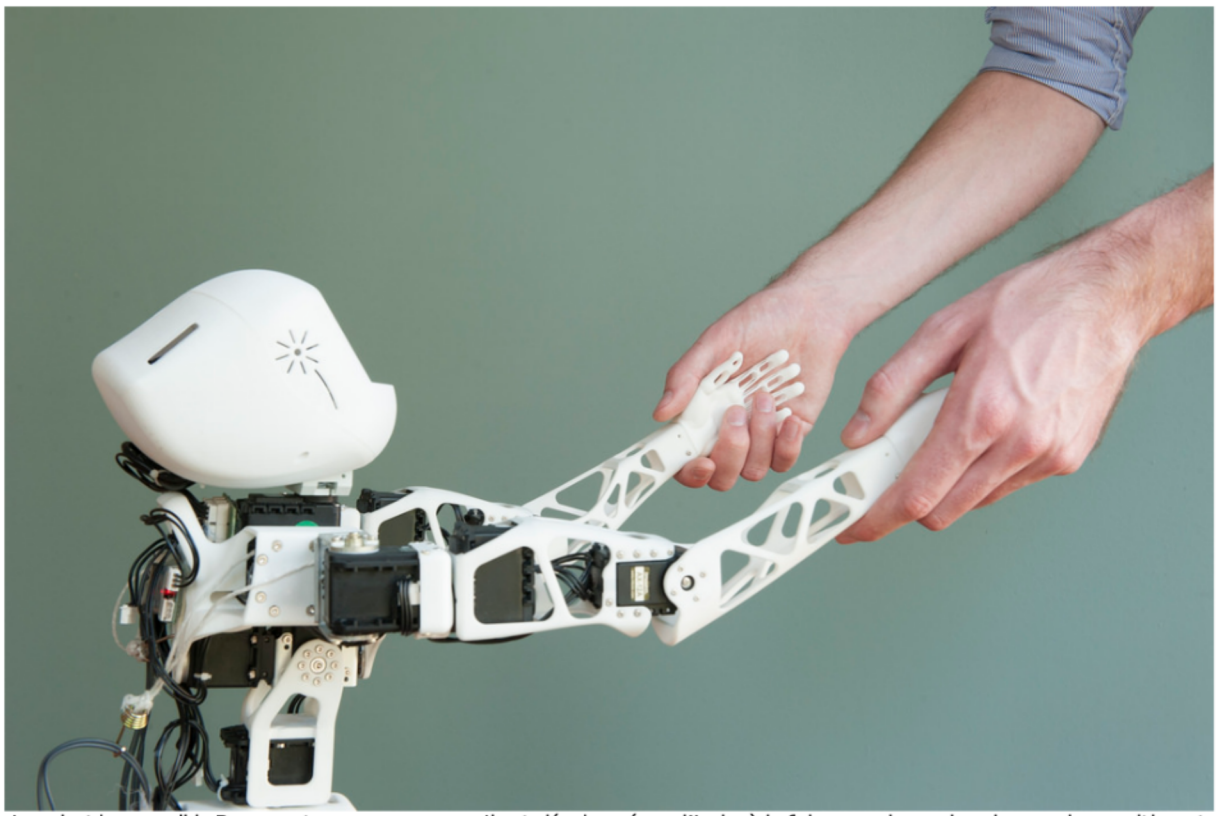
Assister l'humain dans son quotidien. Si le XXe siècle a vu l'avènement des robots travailleurs et explorateurs, à l'aube du XXIe siècle, une autre grande famille de robots prend son essor : les robots d'assistance à la personne. Dans nos maisons, les robots d'assistance aux travaux ménagers se démocratisent. On retrouve aussi des assistants robotisés dans les magasins ou sur nos lieux de travail. L'activité médicale est particulièrement transformée par la robotique : si les robots d'assistance chirurgicale sont quotidiennement utilisés depuis une quinzaine d'années, on voit émerger aujourd'hui de nouveaux usages. Ainsi, des robots accompagnent les personnes qui ont des difficultés physiques ou cognitives, par exemple pour les aider à se lever et s'asseoir, pour les stimuler cognitivement quand ils ont des problèmes de mémoire, ou pour jouer le rôle de facilitateur des contacts avec la famille ou l'entourage médical. Demain, des chercheurs introduiront d'autres robots, beaucoup plus petits, dans les blocs opératoires : ce sont des capsules endoscopiques miniaturisées capables d'explorer conduits intestinaux, artères ou veines pour aider le chirurgien dans son diagnostic. Apparaissent aussi depuis quelques années des prothèses robotisées de mains ou de bras entiers destinées aux amputés.

Prothèse robotisée. ©BeBionic

Modéliser le vivant et la cognition

Les robots sont devenus essentiels comme outils pour penser et modéliser les systèmes complexes dans le domaine du vivant. En particulier, les robots sont aujourd'hui utilisés dans des laboratoires de recherche pour comprendre comment les êtres vivants s'adaptent à leur environnement naturel, en termes de comportement et de déploiement de capacités cognitives. En effet, ce comportement est le résultat de la dynamique des interactions entre un cerveau, un corps physique et un environnement, dynamique qui se redéfinit en permanence car le cerveau est modifié à chaque nouvelle interaction. Les robots embarquent à la fois un « cerveau » (des programmes qui permettent de traiter l'information acquise par le robot, selon des règles précises), des « organes sensoriels » (les senseurs) et des « systèmes moteurs » (les actuateurs). De cette manière, les robots peuvent, comme les êtres vivants, modifier et être modifiés par l'environnement physique dans lequel ils agissent. Leur « cerveau » aussi en est modifié, car le robot acquiert de nouvelles connaissances qu'il peut réutiliser dans ses interactions successives.

Les chercheurs peuvent étudier la complexité de l'interaction cerveau-corps-environnement, grâce à des expérimentations possibles sur des robots et impossibles sur des êtres vivants – comme par exemple « éteindre » une partie de leur cerveau artificiel pour voir comment le comportement est modifié ou altérer des parties du corps. Certains laboratoires étudient ainsi le contrôle moteur, la perception visuelle, le repérage dans l'espace, ou encore les mécanismes de l'apprentissage et de l'évolution de la parole et du langage chez l'humain. Dans le cadre de ces projets, les interactions avec les neurosciences, la biologie, la psychologie ou encore l'éthologie jouent un rôle central.



Le robot humanoïde Poppy est « open source ». Il est développé par l'Inria à la fois pour des recherches sur la cognition et pour des projets éducatifs. Plus de détails sur : https://www.poppy-project.org