



HAL
open science

Des ordinateurs aux robots : les machines en informatique

Pierre-Yves Oudeyer

► **To cite this version:**

| Pierre-Yves Oudeyer. Des ordinateurs aux robots : les machines en informatique. 2016. hal-01404432

HAL Id: hal-01404432

<https://inria.hal.science/hal-01404432>

Submitted on 28 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Des ordinateurs aux robots : les machines en informatique¹

Pierre-Yves Oudeyer

Qu'est-ce-qu'un ordinateur ?

Un ordinateur est une machine physique capable de manipuler automatiquement et de mémoriser des informations (en particulier réaliser des suites d'opérations arithmétiques et logiques), et que l'on peut programmer. Bien que le mot « ordinateur » soit souvent associé à l'image de nos ordinateurs personnels, avec écran et clavier, les ordinateurs sont aujourd'hui présents dans de très nombreux objets quotidiens sous la forme de processeurs « embarqués » dans ces objets : 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 bas.

Des ordinateurs mécaniques aux microprocesseurs

Aujourd'hui la plupart des ordinateurs sont des machines électroniques (c'est à dire des machines dans lesquelles le traitement et la mémorisation des informations se fait uniquement par le biais de l'activation électrique de circuits). Cependant, les premiers ordinateurs ont d'abord été mécaniques. Charles Babbage conceptualisa en particulier le premier ordinateur au début du 19^{ème} siècle, sous la forme d'une machine composée d'un jeu de rouages mécaniques complexes et à laquelle il était possible de fournir des instructions de calculs générales sous la forme de cartes perforées (selon un principe similaire à la programmation des machines à tisser). Cette machine était en particulier capable de réaliser des boucles et des branchements conditionnels (c'est-à-dire de décider quelle suite d'instructions réaliser en fonction du résultat d'un calcul).

Plus tard, pendant la seconde guerre mondiale, les premiers ordinateurs électromécaniques sont apparus, utilisés en particulier pour faire des calculs balistiques pour les missiles. Ceux-ci utilisaient l'électricité pour activer et désactiver des relais mécaniques afin de réaliser des calculs. Assez rapidement, des ordinateurs entièrement électroniques apparurent, basés sur l'utilisation de tubes à vide, comme le Colossus en Grande-Bretagne qui servit à décoder les messages secrets échangés par l'armée Allemande. Les tubes à vide furent ensuite remplacés dans les années 1950 par les transistors, dont la miniaturisation, la faible consommation d'énergie et la robustesse permirent leur accumulation sur ces circuits intégrés de très petite taille, ce qui donna naissance aux microprocesseurs à la fin des années 1950.

Aujourd'hui des laboratoires de recherche imaginent des alternatives aux circuits électroniques pour faire réaliser à des machines des opérations de calculs et de manipulation d'informations. En particulier, ils étudient comment utiliser certaines propriétés de la matière comme les états quantiques afin d'accélérer certains types de

¹ Ce texte est sous licence Creative Commons CC-BY. Il a été également publié dans l'ouvrage « 1, 2, 3 Codez » coordonné par la Fondation Main à la Pâte (<http://www.fondation-lamap.org/node/34547>), aux éditions Le Pommier.

calculs (avec des « ordinateurs quantiques »), ou comment utiliser certaines molécules complexes comme l'ADN (en anglais on parle de « DNA computing »).

Les composants des ordinateurs

La plupart des ordinateurs existants aujourd'hui ont quatre grands types de composants : l'unité logique d'arithmétique (ALU), l'unité de contrôle, la mémoire, et des dispositifs d'entrées-sorties. Ces parties sont interconnectées avec des câbles que l'on appelle des « bus », et qui transmettent des informations suivant un codage que l'on appelle un « protocole de communication ».

L'unité de contrôle est le chef d'orchestre qui contrôle l'ensemble des autres composants : elle lit et décode les instructions et les données de la mémoire, les transforme en signaux qui vont activer d'autres composants (par exemple envoyer à l'unité logique arithmétique 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'unité arithmétique et logique, et de cellule mémoire spéciales appelées « registres » et utilisées pour mémoriser quel est 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. Par exemple, des instructions peuvent demander à l'unité de contrôle de « mettre le nombre 345 dans la case numéro 256 » ou d'« additionner le nombre contenu dans la case 1356 et le nombre contenu dans la case 9595 ». Le programmeur qui conçoit les instructions données à l'ordinateur peut choisir d'utiliser ces nombres pour représenter et manipuler des informations qui ne sont pas des nombres : par exemple des lettres, des mots, des phrases, des formes, des couleurs, des sons, etc.

Les ordinateurs sont souvent associés à des dispositifs d'entrée-sortie qui leurs permettent d'échanger des informations avec l'extérieur. Ces dispositifs sont appelés « périphériques ». 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 position GPS, ...), des actionneurs (par exemple des moteurs, des valves, des radiateurs, ...), et surtout d'autres ordinateurs qui peuvent être à l'intérieur du même objet (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), ou à l'extérieur (les autres ordinateurs connectés au réseau internet).

Les robots

Parmi les objets qui embarquent des ordinateurs, les « robots » ont aujourd'hui 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. Ils ont une importance économique grandissante, et d'aucuns prédisent qu'ils seront au XXI^e siècle ce que la voiture fut au XX^e siècle. En outre, ils n'ont pas seulement pénétré le monde industriel, ils ont aussi pénétré notre culture et certains d'entre eux participent au renouvellement de la vision que nous avons de nous-même.

D'un point de vue technique, un robot est une machine dotée de capteurs qui lui permettent de percevoir son environnement (par exemple capteur de contacts, de distances, de couleurs, de force, ...), de moteurs l'autorisant à bouger et à agir sur cet environnement, et d'un système électronique ou informatique qui contrôle, au moins en partie, ce qu'effectue le robot en fonction de ce qu'il perçoit. Une caractéristique fondamentale des robots est en particulier cette rétroaction entre la perception et l'action : ce que fait le robot ne dépend pas entièrement de ses instructions, mais aussi des propriétés physiques de son environnement perçues avec ses capteurs. Ainsi, selon cette définition, les automates (tels que ceux de Jacques de Vaucanson ou de Pierre et Henri-Louis Jaquet-Droz au XVIII^e siècle) ne sont pas des robots car leurs mouvements ne dépendent pas de ce qui se passe autour du robot (leurs propriétés et leurs enchaînements sont entièrement pré-déterminés par le programme et il n'y a pas de capteurs).

En pratique, cette définition recouvre une très vaste diversité de machines. Par exemple, les bras articulés et programmables dans les usines automobiles, les voitures (mode d'assistance à la conduite) et les avions qui sont aujourd'hui largement automatisés, les aspirateurs qui font le ménage tout seul, certains robots ludiques et objets électroniques des magasins de jouets, ou les robots bio-mimétiques à la forme de singes ou de 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 de fond. Les mécanismes de fonctionnement interne diffèrent beaucoup d'un robot à l'autre. Deux axes importants qui les distinguent sont l'autonomie et les capacités d'adaptation et d'apprentissage.

L'autonomie : il existe des robots qui agissent sans besoin qu'un humain ne 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 chaîne 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 : il y a des robots dont le comportement est figé au départ et une fois pour toute 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 construire une carte de leur environnement et de la réutiliser plus tard afin de pouvoir y naviguer efficacement. D'autres sont capables d'apprendre à reconnaître des objets dans des images, des actions réalisées par des humains, ou à marcher tout seuls en expérimentant eux-mêmes différentes stratégies, les évaluant à chaque test et explorant des variations des meilleures. Ces mécanismes d'adaptation sont réalisés grâce à 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.

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 pré-programmés au départ. 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, en particulier de l'humain.

Au delà des différences techniques entre robots, on trouve également des différences de finalité : 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 pour mieux les comprendre.*

Travailler et explorer. Parmi les robots qui sont en service dans le monde, la plupart sont industriels (il y a aujourd'hui environ 9 millions de robots industriels dans le monde). Très tôt, les entreprises se sont intéressées à ces machines pour plusieurs 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 typiquement capables de réaliser des travaux à la chaîne bien plus rapidement et efficacement que les humains.

Le premier robot de ce type est apparu en 1961. Il s'appelait *Unimate* et était installé dans une usine automobile de General Motors. C'était un bras articulé destiné à manipuler et à déplacer 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 les 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 détecter les risques d'accidents et d'alerter sur les risques de navires poubelles.

Les robots sont enfin cruciaux pour l'exploration des endroits où l'homme ne peut pas aller, au premier rang desquels on trouve l'espace et les planètes du Système solaire. C'est en 1966 que le premier robot mobile arrive sur la Lune, embarqué dans la sonde *Surveyor*. Suivront le robot soviétique *Lunokhod*, puis toute la série des robots *Mariner* (américains). En 1997, un robot atterrit sur la planète Mars : *Sojourner* 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 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 sous la surface, font la preuve que des fleuves d'eau ont 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. Après avoir pénétré les usines, le fond des mers et les planètes lointaines, ils arrivent maintenant dans nos maisons, dans les magasins, sur nos lieux de travail, dans les hôpitaux. Au delà des robots assistants aux travaux ménagers, des robots apparaissent pour accompagner 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. Les robots d'assistance chirurgicale sont quotidiennement utilisés dans nombre d'hôpitaux depuis une quinzaine d'années. Plus récemment, d'autres robots, beaucoup plus petits, ont commencé à pousser la porte des blocs opératoires: des chercheurs mettent au point des capsules endoscopiques robotisées et miniaturisées capable d'explorer conduits intestinaux, artères ou veines pour aider le chirurgien dans son diagnostic. Apparaissent aussi depuis quelques années des prothèses de mains ou de bras entiers qui permettent à des personnes qui ont perdu le bras d'utiliser un bras robotique pour le remplacer.

Modéliser le vivant et la cognition

Les robots sont aussi utilisés par les chercheurs comme outils pour penser et modéliser le vivant. En particulier, ils commencent à être utilisés dans les laboratoires universitaires qui essaient de comprendre comment les êtres vivants s'adaptent et se comportent si efficacement dans leur environnement naturel. En effet, ce comportement est le résultat de la dynamique complexe des interactions entre un cerveau, un corps physique et un environnement. Et cette dynamique se redéfinit en permanence car le cerveau est modifié à chaque nouvelle interaction.

Or, nous disposons de très peu d'outils scientifiques pour comprendre les dynamiques des systèmes complexes, dans lesquelles de nombreux composants s'influencent les uns les autres. Les systèmes complexes ne se retrouvent d'ailleurs pas seulement dans le fonctionnement des êtres vivants, ils sont partout dans la nature : météorologie, systèmes planétaires, formation des cristaux, apparition des dunes dans les déserts...

De même que les ordinateurs sont au centre de l'étude et de la simulation des systèmes météorologiques, les robots sont ainsi devenus essentiels pour développer notre compréhension des phénomènes comportementaux et cognitifs. En effet, ils permettent d'implémenter des modèles qui prennent en compte au moins une partie de la complexité de l'interaction cerveau-corps-environnement, et il est possible de les mettre à profit pour faire des expérimentations à volonté, comme par exemple « éteindre » une partie de leur cerveau artificiel pour voir ce que cela modifie en terme de comportement. Dans le cadre de ces projets, les interactions avec les neurosciences, la biologie, la psychologie ou encore l'éthologie jouent un rôle central. Ainsi, certains laboratoires étudient par exemple les mécanismes de contrôle moteur et de perception visuelle qui permettent à aux singes ou aux humains de se mouvoir avec quatre ou deux jambes, les mécanismes grâce auxquels les animaux parviennent à se repérer dans l'espace, ou encore les mécanismes de l'apprentissage et e l'évolution de la parole et du langage chez l'humain.