

Innovation technologique-Liliane Bettencourt

M. Jean-Paul LAUMOND,
directeur de recherche au CNRS,
professeur invité sur chaire annuelle

ROBOTIQUE : LES FONDATIONS D'UNE DISCIPLINE

La robotique traite du rapport que peut entretenir avec le monde réel une machine qui bouge et dont les mouvements sont commandés par un ordinateur. Ainsi le robot se distingue-t-il à la fois de l'automate, dont les mouvements sont mécaniquement déterminés, et de l'ordinateur, qui manipule des informations mais ne bouge pas.

Quel degré d'autonomie peut-on attendre de telles machines ? La question a fait l'objet des cours. Elle n'épuise pas toute la robotique, mais elle en rend compte pour une grande partie. Quelques séminaires et deux colloques ont apporté des éclairages complémentaires.

50 ans d'histoire

La robotique a 50 ans. Plus exactement, elle a 51 ans. Si le mot robot apparaît tôt au siècle dernier et nourrit, depuis, l'imaginaire collectif, on s'accorde à dater la naissance de la robotique de l'introduction, en 1961, du premier robot industriel sur les chaînes de montage de General Motors. Il s'agit du robot Unimate issu d'un brevet déposé par George Devol et industrialisé par Joseph Engelberger, reconnu comme le père fondateur de la robotique.

En France, à la même époque, Jean Vertut étudie au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) la possibilité de commander à distance un bras manipulateur chargé d'explorer les zones irradiées des centrales nucléaires. Ce bras n'est pas autonome ; son contrôle est néanmoins déporté : les commandes de l'opérateur sont transmises au robot, non plus par l'intermédiaire de quelques pantographes mécaniques, mais par l'intermédiaire d'une « armoire de commande » effectuant des traitements numériques capables de transformer les mouvements de l'opérateur en consignes à appliquer sur les moteurs du bras manipulateur. Nous sommes dans les débuts de la télé-opération, dont les plus beaux succès déboucheront sur la robotique médicale et sur la possibilité offerte aujourd'hui au chirurgien d'améliorer la précision de son geste : plus d'un million de patients ont aujourd'hui été opérés avec un robot.

La recherche en robotique a donc été dominée, à l'origine, par la conception de machines à commande numérique et par l'établissement des premiers liens entre machines et ordinateurs, entre mécanique et informatique. Ses débuts ont été rapidement accompagnés par les progrès technologiques en matière de calcul (miniaturisation et augmentation de la puissance des processeurs).

La robotique manufacturière est aujourd'hui bien implantée ; elle a considérablement renouvelé l'organisation des moyens de production. Son succès tient au caractère répétitif des tâches que les robots industriels accomplissent (souder, peindre, trier, transporter, etc.) dans des environnements bien structurés pour lesquels l'aléa se réduit le plus souvent à la panne de moteur, ou est traité par un arrêt d'urgence. Nul besoin de capacités évoluées d'adaptation dans ces environnements.

La question de l'autonomie d'une machine commandée par un ordinateur ne se pose comme telle qu'à la fin des années soixante.

C'est avec le robot mobile Shakey du Stanford Research Institut (SRI) que sont jetées les premières bases d'une recherche sur les robots autonomes. L'ambition affichée est de doter une machine de capacités de raisonnement sur ses actions. Le robot doit percevoir son état et l'état du monde qui l'entoure (on l'équipe donc de capteurs), il doit agir (on l'équipe donc d'actionneurs lui permettant de se déplacer). L'ordinateur « n'a plus qu'à » décider automatiquement des actions à effectuer pour remplir une mission donnée et à contrôler leur bon déroulement. Il faut noter que les chercheurs du SRI n'ont aucune application en tête. La robotique est considérée à l'époque comme un possible champ d'application des théories développées en intelligence artificielle. Elle tient plus du rêve que de la volonté de répondre aux problèmes bien posés de la robotique manufacturière.

En France, le rêve va être relayé à la fin des années soixante-dix par Georges Giralt au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) à Toulouse. Il y crée le groupe Robotique et intelligence artificielle (RIA) et y conçoit en 1977 le robot mobile Hilare, que l'on peut voir maintenant au musée des Arts et Métiers. Il lance en parallèle le programme « Automatisation et robotique avancée » (ARA) qui sera coordonné par Philippe Coiffet. Le programme réunit industriels de la production et chercheurs autour d'une même question : comment doter les robots de plus de flexibilité et faciliter leur programmation ? Ce faisant, le lien est établi entre un nouveau projet de recherche ambitieux centré sur l'étude de la machine autonome et la robotique manufacturière, qui avait déjà plus de vingt ans.

C'est dans les années quatre-vingt que sont créées les premières sociétés savantes et fédérations professionnelles dédiées à la robotique : 1984 pour la société Robotics and Automation (IEEE), 1986 pour la fondation International Foundation on Robotics Research (IFRR) et 1987 pour la fédération International Federation of Robotics (IFR). Dans la même période, en 1982, lors du sommet de Versailles, les pays industrialisés se dotent d'un programme international, International Advanced Robotics Programme (IARP), dédié à la coopération scientifique dans le domaine de la robotique.

Tout s'accélère à partir des années quatre-vingt-dix.

En 1993, la société Honda dévoile les résultats de sept années de recherche conduites dans le plus grand secret : P1, un robot anthropomorphe, fait ses tout premiers pas. La même année, dans le cadre du projet Rotex conduit par Gerd Hirzinger au DLR en Allemagne, un robot manipulateur embarqué à bord d'une navette spatiale saisit un objet flottant dans l'espace et assemble des pièces mécaniques

entre elles. Le 4 juillet 1997, le robot Sojourner de la NASA commence sa déambulation sur la planète Mars ; il sera suivi des robots Spirit et Opportunity en 2004 pour des missions qui se poursuivent encore aujourd'hui. Le 11 mai 1999, la société Sony met sur le marché le premier robot-jouet, un petit chien capable de se déplacer, de percevoir son environnement et de reconnaître des commandes vocales. Le 7 septembre 2001, le professeur Jacques Marescaux conduit la première opération de téléchirurgie sur une patiente hospitalisée à Strasbourg avec l'aide d'une équipe chirurgicale située à New York. En 2002, la société iRobot, créée par Rodney Brooks du MIT à Boston, met sur le marché Roomba, le premier robot-aspirateur : il est aujourd'hui vendu à plusieurs millions d'exemplaires. En 2005, une équipe de l'université de Stanford conduite par Sebastian Thrun remporte le Grand Challenge Darpa : son véhicule est le premier à parcourir en moins de 7 heures plus de 200 kilomètres dans le désert des Mojaves en totale autonomie. La même année, à l'exposition d'Aichi au Japon, la société Toyota présente un orchestre de jazz composé de robots humanoïdes jouant de divers instruments à vent. Le 25 mars 2009, le robot quadrupède Bigdog de la société Boston Dynamics fondée par Marc Raibert du MIT est testé en Afghanistan. Au printemps dernier, dans l'équipe de François Pierrot au Laboratoire d'informatique robotique micro-électronique de Montpellier (LIRMM), le robot parallèle R4 parvient à atteindre 100 G d'accélération. Près de 2000 petits robots humanoïdes Nao ont été produits à ce jour par la société Aldebaran.

Quel savoir se construit autour d'un tel foisonnement ? Les cours ont tenté de répondre (en partie) à la question.

Deux écoles

La robotique trouve ses sources dans la mécanique. Elle a participé à l'émergence de champs disciplinaires tels que l'automatique et le traitement du signal. Elle emprunte à l'informatique, elle nourrit l'algorithmique. Il faudra attendre près de vingt ans, après l'apparition d'Unimate, pour voir émerger les premières tentatives de théorisation d'un domaine qui se cherche. Deux grandes écoles de pensée vont ranimer de vieux débats issus des sciences de l'homme pour les appliquer à l'étude des machines autonomes, et structurer la recherche en robotique.

Les tenants de ce qu'on peut appeler avec recul une « phénoménologie robotique » prônent la primauté du modèle et introduisent la boucle « perception-décision-action » : le robot estime son état et l'état du monde qui l'entoure par l'intermédiaire de capteurs, il en établit des modèles, raisonne à partir de ces modèles et décide des actions à effectuer pour remplir la mission qui lui est assignée. Cette école n'a jamais été vraiment théorisée. Elle se structure autour de thèmes tels que :

- la conception et la commande des systèmes mécaniques (un aperçu en est donné avec le séminaire du 23 janvier) ;
- la vision et, plus généralement, la perception artificielles (abordées lors du cours du 30 janvier et du séminaire du 27 février sur le sens du toucher) ;
- la manipulation d'objets (thème qui a fait l'objet des cours et séminaire du 27 février) ;
- l'algorithmique de la planification et du contrôle d'actions (six séances y ont été consacrées lors des cours et séminaires des 30 janvier, 20 février et 5 mars) ;
- l'architecture des systèmes (le thème a été abordé lors du cours du 30 janvier et lors du séminaire du 12 mars).

C'est cette école qui a conduit les grands programmes de robotique manufacturière, de robotique médicale ou de robotique d'exploration planétaire.

Elle s'oppose à une école comportementaliste amenée par Rodney Brooks qui prône, dans les années quatre-vingt au MIT, une conception de l'autonomie fondée sur l'absence de modèles du monde : l'intelligence de la machine doit émerger d'une hiérarchie de comportements sensori-moteurs gérée par des mécanismes excitateurs et inhibiteurs. Cette école de pensée donne naissance à une robotique dite « bio-inspirée ». Elle est beaucoup moins en prise avec l'industrie que la précédente. Le robot est surtout considéré comme un support expérimental de théories issues des sciences du vivant. C'est de cette école que naissent d'étranges créatures artificielles, comme les salamandres amphibiennes d'Auke Ijspeert à l'EPFL, développées en collaboration avec Jean-Marie Cabelguen, neurophysiologiste à l'INSERM. De l'observation du vivant naissent également des approches formelles très astucieuses, telle l'approche développée par Nicolas Franceschini qui permet à un drone d'atterrir en douceur selon des principes mis en évidence par l'étude du vol des insectes (Séminaire du 13 février 2012).

Les cours ont surtout rendu compte de la première école. Néanmoins plusieurs séminaires associés ont traité de la seconde.

D'ailleurs cette séparation en deux écoles vacille aujourd'hui. En témoignent, dès 2004, deux projets européens : l'un, Cogniron, conduit par Raja Chatila du LAAS-CNRS, est issu de la première école ; l'autre, Neurobotics, est conduit par Paolo Dario de la Scuola Superiore Sant'Anna à Pise, un chantre de la robotique bio-inspirée. Les deux projets partagent des thématiques communes dans leur volonté de comprendre ou de s'inspirer de l'homme. Aujourd'hui, le septième programme-cadre de la Commission européenne en matière de technologies de l'information et de la communication inclut explicitement un sous-programme « Cognitive Systems and Robotics ». La tendance est une tendance de fond. On le voit avec la société Honda qui crée en 2003 au Japon, aux États-Unis et en Allemagne, des centres de recherches pluridisciplinaires combinant neurosciences et robotique. On le voit en Italie, avec la création en 2005 à Gênes de l'Istituto Italiano di Tecnologia, un institut du même type. On le voit, en France, avec la création en 2007 de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique sur le campus de Jussieu. On le voit enfin au travers des 1600 pages de la première encyclopédie de robotique publiée il y a seulement quatre ans¹. Les séances du 6 février et du 12 mars ont témoigné du rapprochement des deux écoles et de l'émergence de nouveaux champs tels que la neurorobotique et le calcul morphologique.

Le fil conducteur des cours a été la notion d'action, sous la perspective des trois espaces, inspirés de la distinction introduite par H. Poincaré : espace physique, espace moteur et espace sensoriel, la géométrie étant le lien fondamental reliant ces trois espaces. De là prennent corps les notions fondamentales de déplacement et de manipulation (qu'est-ce qu'un mouvement ?), de systèmes redondants (comment procéder à la sélection de l'action ?), d'algorithmique de la planification de mouvement et des modèles de complexité associés, ou d'action « incorporée » (néologisme introduit lors du cours 6 février), une notion qui permet d'illustrer des recherches récentes à la frontière des neurosciences et de la robotique.

1. O. Khatib et B. Siciliano (dir.), *Springer Handbook of Robotics*, Springer Verlag, 2008.

Programme des cours et séminaires

19 janvier : *Leçon inaugurale : « La robotique : une récurrence d'Héphaïstos »*

La leçon a introduit la robotique sous l'angle de la tension entre sciences et technologies en se référant à un mythe classique.

23 janvier : *50 ans de recherche en robotique*

[Cours] Robotique : champs scientifiques et diffusions technologiques.

[Séminaire] Les robots parallèles rapides, François Pierrot, directeur de recherche, CNRS.

Le cours a précisé les champs scientifiques et technologiques de la robotique tels qu'ils émergent depuis 50 ans et a posé la question de leur unité. Le séminaire de F. Pierrot a décrit une très belle réussite dans le domaine de la robotique manufacturière.

30 janvier : *40 ans de recherche en robotique autonome*

[Cours] Percevoir, décider, agir : l'organisation des calculs.

[Séminaire] L'action délibérée : planification et apprentissage en robotique, Malik Ghallab, directeur de recherche, CNRS.

Le cours a introduit la boucle fondamentale « perception-décision-action » et a posé le problème de la place et de la nature du raisonnement symbolique. Le séminaire de M. Ghallab a explicité l'étroite relation entre robotique et intelligence artificielle.

6 février : *Vers une théorie de l'action anthropomorphe*

[Cours] Les espaces de l'action : systèmes redondants et algèbre linéaire.

[Séminaire] Simplicité et complexité : des concepts communs au cerveau et aux robots ? Alain Berthoz, professeur honoraire au Collège de France.

Le cours a introduit les bases mathématiques de la commande des systèmes redondants et leurs applications à la robotique humanoïde. Le séminaire d'A. Berthoz a illustré l'actuelle synergie issue des travaux de recherche en robotique et neurosciences.

13 février : *Rouler, voler*

[Cours] Robotique mobile et non holonomie : de la complexité de garer sa voiture.

[Séminaire] Des insectes aux robots aériens, Nicolas Franceschini, directeur de recherche Emérite, CNRS.

Le cours a introduit les éléments de géométrie différentielle pour le contrôle des systèmes non holonomes et leurs applications en robotique mobile. Le séminaire de N. Franceschini a porté sur les approches bio-inspirées du vol à ailes battantes et les techniques d'asservissement visuel.

20 février : *Mouvement, calcul et déterminisme*

[Cours] La planification de mouvement : approches déterministes.

[Séminaire] La planification de mouvement : approches probabilistes, Jean-Claude Latombe, professeur, université de Stanford.

Le cours a introduit la question de la décidabilité en planification de mouvement et montre les limites de la notion algorithmique de complétude. Le séminaire de J.-C. Latombe a introduit la notion de complétude probabiliste, développé les algorithmes associés et illustré leur performance.

27 février : *Géométries de la manipulation*

[Cours] Planification de tâches de manipulation.

[Séminaire] Les bases physiques du sens du toucher, Vincent Hayward, professeur, université Pierre et Marie Curie.

Le cours a porté sur une formulation géométrique du problème de la planification de tâches de manipulation. Le séminaire de V. Hayward a introduit les théories du sens du toucher.

5 mars : Les dérivées du mouvement

[Cours] Deux problèmes mathématiques ouverts en robotique mobile.

[Séminaire] Des robots avec les hommes, Oussama Khatib, professeur, université de Stanford.

Le cours a porté sur deux défis mathématiques bien formulés en lien avec la commande des systèmes non holonomes. Partant de la théorie de la commande des systèmes mécaniques articulés, le séminaire d'O. Khatib a étendu le formalisme à la relation homme-robot.

12 mars : Le corps et sa structure

[Cours] Locomotion humaine et humanoïde : fondements calculatoires.

[Séminaire] Comment le corps façonne la manière de raisonner ? Rolf Pfeifer, professeur, université de Zürich.

Basé sur des principes de commande optimale inverse, le cours a montré comment il est possible d'identifier les lois qui préparent à l'élaboration des trajectoires locomotrices humaines et de les appliquer en robotique humanoïde. Le séminaire de R. Pfeifer a exploré les liens entre forme du corps et intelligence à travers des modèles de calcul morphologique.

[19 Mars] Robotique et innovation : deux cas d'étude

[Cours] La valeur du mouvement en prototypage virtuel.

[Séminaire] Stratégies de développement en robotique humanoïde, Bruno Maisonnier, président directeur général, Aldebaran Robotics.

Le cours a présenté les travaux de recherche à l'origine de la création de l'entreprise Kineo qui diffuse des logiciels de planification automatique de mouvements, en particulier dans l'industrie automobile. Le séminaire de B. Maisonnier a porté sur les stratégies de recherche et développement en robotique humanoïde en lien avec les perspectives de marchés grand public.

2 avril : Robotique humanoïde : la leçon de choses

Ce cours a revêtu un caractère exceptionnel : il a mobilisé 8 doctorants, techniciens et chercheurs de l'équipe Gepetto du LAAS-CNRS pour des démonstrations du robot humanoïde HRP2 ; l'objectif était d'illustrer différentes notions et fonctions introduites dans les cours précédents, tels que l'espace des configurations d'un système mécanique, la vision stéréoscopique, la locomotion bipède et le concept d'action incorporée.

COLLOQUE : ROBOTIQUE ET SANTÉ

2 mai 2012 : Quel degré d'autonomie peut-on attendre des robots dans l'élaboration de leurs actions ? La question a structuré l'ensemble des cours et séminaires de la chaire. Il reste que la question de l'autonomie n'épuise pas, à elle seule, toutes les facettes d'une technologie qui transforme de jour en jour notre rapport à la machine. Il fallait en rendre compte. C'était l'objet du colloque « Robotique et santé », ouvert par un remarquable exposé du professeur Jean Dubousset, membre de l'Académie nationale de médecine, définissant les bases d'un nouvel humanisme médical permettant à l'ingénieur de contribuer à la relation de confiance réciproque entre clinicien et patient.

De la robotique chirurgicale mini-invasive à la chirurgie endoluminale, et au-delà de la chirurgie, des robots implantables à l'assistance à domicile, des neuroprothèses aux comanipulateurs, le colloque a présenté la diversité des apports de la robotique en matière de santé, et a permis de souligner l'excellence de la recherche française dans le domaine.

COLLOQUE DE CLÔTURE : *ROBOTICS, SCIENCE AND TECHNOLOGY*

En regard de la leçon inaugurale, le colloque s'est tenu les 12 et 13 juin. Il a tendu à démontrer comment l'innovation en robotique repose une forme originale de recherche fondamentale sur « la machine autonome » tout en étant guidée par le pragmatisme des développements technologiques. Il a été organisé autour de neuf interventions d'une heure par des grandes figures internationales de la robotique, ayant une expérience en matière d'innovation (création d'entreprises, conduite de grands programmes) ou à l'origine de nouvelles théories :

- Sir Mike Brady (Université d'Oxford, Royaume Uni) ;
- Rod Brooks (Massachusetts Institute of Technology, États Unis) ;
- Paolo Dario (Scuola Superiore Sant'Anna, Pise, Italie) ;
- Gerd Hirzinger (Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Allemagne) ;
- Hirochika Inoue (Japan Society for the Promotion of Science, Japon) ;
- Mitsu Kawato (Advanced Telecommunications Research Institute, Japon) ;
- Matt Mason (Carnegie Mellon University, États Unis) ;
- Yoshi Nakamura (Université de Tokyo, Japon) ;
- Russ Taylor (Université John Hopkins, États Unis).

MÉDIAS

La chaire a donné à la robotique une très grande visibilité médiatique qui a permis de rectifier un certain nombre d'idées reçues sur le domaine, et de montrer comment cette jeune discipline est porteuse de savoir, au-delà des spectaculaires applications qu'attend le public :

Presse écrite : *Le Monde*, *Libération*, *Les Échos*, *Le Figaro*, *Le Point*,...

Presse numérique : *Interstices*,...

Radio : France Inter, France Info, France Culture

TV : La 5 (Bibliothèque Médicis)

PUBLICATIONS

Kanoun O., Laumond J.P., Yoshida E., « Planning foot placements for a humanoid robot: a problem of inverse kinematics », *International Journal of Robotics Research*, 30(4), 2011.

Dalibard S., Laumond J.P., « Linear dimensionality reduction in random motion planning », *International Journal of Robotics Research*, 30(12), 2011.

Murrieta-Cid R., Ruiz U., Marroquin J.L., Laumond J.P., Hutchinson S., « Tracking an Omnidirectional Evader with a Differential Drive Robot », *Autonomous Robots*, 31(4), 2011.

Hak S., Mansard N., Stasse O., Laumond J.P., « Reverse Control for Humanoid Robot Task Recognition », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 42(6), 2012.

Sreenivasa M., Souères P., Laumond J.P., « Walking to Grasp: Modeling of Human Movements as Invariants and an Application to Humanoid Robotics », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 42(4), 2012.

