

La robotique

Par Jean-Paul LAUMOND

Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS), Toulouse

En s'appuyant sur les progrès réalisés en matière de mécatronique et de calcul, la robotique met au point des fonctions sensorimotrices toujours plus évoluées qui dotent les machines d'une capacité d'adaptation à leur environnement toujours plus grande.

Jusqu'à présent, le système de production industriel s'organisait autour de la machine ; la machine était calibrée en fonction de son environnement et ne tolérait que peu de variations de celui-ci. Aujourd'hui, elle s'intègre plus facilement dans un environnement existant.

Plus élaborée, elle nécessite plus d'expertise pour sa programmation, avec pour conséquence la suppression d'emplois peu qualifiés, pénibles et répétitifs, au profit d'emplois de maintenance et de supervision.

Le robot est une machine, et en tant que telle, et comme il en a toujours été, il participe à la transformation des savoir-faire et à la disparition de certains d'entre eux.

La robotique constitue une discipline scientifique à part entière, dont les enjeux interrogent le mode d'organisation de nos sociétés. Elle doit être pensée comme telle et son développement doit être résolument soutenu par une recherche publique de qualité, qui en aborde toutes les dimensions aussi bien scientifiques et techniques, qu'économiques et sociologiques.

Qu'en est-il vraiment des robots ?

Au-delà des délires transhumanistes, des postures néo-luddites et des impostures laissant penser que des robots pourraient être dotés d'empathie (des délires, des postures ou des impostures qui sont nourris par l'attitude ambiguë de certains professionnels des nouvelles technologies et que les médias relayent largement), il apparaît important de « démythiser le robot »⁽¹⁾ en précisant la nature des évolutions technologiques qui le caractérisent, pour pouvoir comprendre la place qu'il occupe aujourd'hui dans notre société, et celle qui lui sera réservée à l'avenir.

Le robot s'inscrit dans l'histoire des machines : c'est une machine qui bouge et dont les mouvements sont contrôlés par un ordinateur. Il se distingue tout à la fois de l'automate, dont les mouvements sont mécaniquement déterminés, et de l'ordinateur, qui manipule des informations, mais ne bouge pas.

Le développement conjoint de l'électronique et du traitement numérique du signal ont rendu possible l'élaboration de boucles sensorimotrices permettant aux machines d'adapter leurs mouvements en fonction du contexte : le robot intègre ainsi une forme d'homéostasie, qui trouve son origine dans la cybernétique des années 1950 et dans sa concrétisation au cours des années 1960, avec l'apparition des premiers robots industriels. C'est à partir de cette capacité (plus ou moins évoluée) d'adaptation du mouvement que se définit le champ d'action de la machine.

Le robot bouge pour agir. Il est confronté à la physique du monde réel : un robot manipulateur doit pouvoir saisir un objet fragile sans le casser ou un récipient sans en renverser le contenu ; un robot « bipède », quant à lui, doit garder son équilibre en se déplaçant.

Manipulation et déplacement sont les deux composantes de l'action du robot.

C'est d'abord la maîtrise du mouvement des robots manipulateurs qui a permis le développement de la robotique industrielle.

C'est ensuite la maîtrise des déplacements de robots mobiles à roues qui a permis, dès les années 1970, d'envisager les grands programmes d'exploration planétaire.

Aujourd'hui, c'est la maîtrise conjointe de ces deux fonctions motrices qui permet l'émergence de nouvelles machines capables tout à la fois de se déplacer et de manipuler des objets.

Les champs d'application de la robotique s'élargissent. La machine n'est plus condamnée à se mouvoir en site propre, comme c'est actuellement le cas pour les robots de soudure dans l'industrie automobile ou les chariots filoguidés dans les entrepôts de logistique.

L'espace dans lequel le robot industriel évolue rencontre

(1) Expression utilisée par Gilbert Simondon dans ses entretiens sur la mécatronique en 1968 (*Revue de synthèse*, tome 130, 6^{ème} série, n°1, 2009, pp. 103-132).

celui de l'homme, et l'interaction physique entre l'homme et la machine ouvre de nouvelles possibilités. Les exosquelettes et les robots d'assistance sont télé-opérés physiquement : par leur capacité à répondre aux mouvements de l'homme, ils permettent de l'assister dans le transport et la manipulation de charges lourdes.

Bien entendu, la question du partage de l'espace entre l'homme et la machine lors d'actions simultanées est dominée par la question de la sécurité. Celle-ci nécessite l'apparition de nouvelles normes ⁽²⁾. Aujourd'hui, le partage de l'espace n'est possible qu'à la condition que les moteurs de la machine ne dépassent pas une certaine puissance. La maîtrise en termes de sécurité des mouvements réalisés par une machine puissante constitue un enjeu des recherches actuelles en robotique. Ses applications futures en dépendent.

Placée dans le contexte de l'industrie du futur, la robotique ouvre des perspectives nouvelles. Le robot d'assistance physique (appelé *cobot*, dans le milieu industriel) permet d'ores et déjà (nous l'avons vu, avec les exosquelettes) de prendre en charge une partie de l'énergie nécessaire à la réalisation d'une tâche. Il assiste l'opérateur sans le remplacer et réduit pour celui-ci les risques de troubles musculo-squelettiques.

Dans les deux composantes que sont le déplacement et la manipulation, la maîtrise du mouvement par la machine permet à celle-ci de faire preuve d'une plus grande adaptabilité : son intégration dans la chaîne de production est facilitée par une programmation de plus en plus évoluée.

En robotique industrielle, il s'agit de définir très précisément la trajectoire que l'organe terminal du robot doit suivre pour souder, peindre ou assembler des composants.

Programmer un robot, cela consiste à transformer la trajectoire dans l'espace physique de son organe terminal exprimée en un ensemble d'ordres donnés aux différents moteurs qui constituent la chaîne de transmission du mouvement.

La programmation peut s'effectuer par apprentissage : un opérateur bouge l'organe terminal du robot suivant la tâche à réaliser : les effets du mouvement sur les différents degrés de liberté du robot sont enregistrés afin d'être transformés en commandes adressées aux moteurs ; le mouvement peut dès lors être répété automatiquement à l'infini.

Les progrès réalisés en matière de traitement numérique de l'information permettent aujourd'hui une programmation d'un niveau d'abstraction plus poussé. La transformation qui permet de passer de la tâche exprimée dans l'espace physique en consignes à appliquer aux moteurs est elle-même automatisée : elle est réalisée au moyen de l'exécution d'algorithmes de calcul permettant la résolution des équations qui établissent le lien entre l'espace physique de la tâche et l'espace de commande du robot. La programmation par apprentissage se trouve ainsi remplacée par une programmation numérique de plus haut niveau d'abstraction.

La programmation est dès lors beaucoup plus simple, mais elle nécessite aussi plus d'expertise. En effet, l'action de l'opérateur sur le robot n'est plus physique ; elle s'opère à distance, à partir d'un poste de programmation, et requiert une qualification spécifique.

Ce niveau de programmation est plus abstrait. Il autorise en particulier le traitement automatique de données provenant de capteurs permettant d'avoir une parfaite estimation de l'état du système, autorisant de ce fait une plus grande adaptation aux aléas de l'environnement. Du point de vue de l'emploi, il a pour conséquence d'accroître le niveau de qualification nécessaire à la programmation des robots.

La capacité d'adaptation de la machine augmentant, son champ d'action s'élargit, et ce d'autant plus que la fonction de déplacement se trouve couplée à la fonction de manipulation. Le robot n'est plus un robot à poste fixe. Il peut se déplacer. Jusqu'alors, le système de production s'organisait autour de la machine : la machine était calibrée dans son environnement et ne tolérait que peu de variations de celui-ci. Aujourd'hui, elle s'intègre plus facilement à un environnement existant. Elle a la capacité de remplacer l'opérateur dans la réalisation de tâches répétitives (comme l'assemblage de composants électroniques), sans qu'il soit besoin de réorganiser la chaîne d'assemblage elle-même.

Ce qui est valable pour l'industrie manufacturière des biens de grande consommation, l'est aussi pour la production industrielle de composants de grande taille : ainsi, Airbus étudie aujourd'hui la possibilité d'automatiser les opérations de rivetage sur le fuselage de ses avions.

Les conséquences de l'automatisation en matière d'emploi sont sujettes à controverses. Les études montrent une « extrême dispersion des analyses prospectives » ⁽³⁾. Elles vont de la modélisation d'un cercle vertueux de l'automatisation (ainsi, l'Allemagne arrive à maintenir un taux d'emploi industriel plus élevé qu'en France, alors même que son taux de robotisation est cinq fois plus élevé) à sa contestation radicale prévoyant la disparition de dizaines de millions d'emplois au cours des trente prochaines années.

Il est difficile de trancher entre ces deux visions extrêmes. L'emploi industriel diminue et va continuer à diminuer tout en faisant appel à des niveaux de qualification toujours plus élevés ; en contrepartie, le nombre des emplois dans le secteur des services augmente, suivant un principe de vases communicants. Il reste qu'il est difficile de parier sur l'atteinte d'un équilibre, dans la mesure où l'automatisation issue non pas directement de la robotique, mais des technologies de l'information et de la communication, a elle aussi un impact sur ce secteur.

Un robot est une machine : en tant que tel et comme il en a toujours été, il participe à la transformation de sa-

(2) Voir la récente norme ISO/TS 15066 :

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:15066:ed-1:v1:en>

(3) « Automatisation, emploi et travail », Les synthèses de La Fabrique de l'industrie, décembre 2015 : <http://www.la-fabrique.fr/wp-content/uploads/2016/01/S1-Automatisation-emploi-et-travail.pdf>

voir-faire et à la disparition de certains d'entre eux. De manière générale, le robot contribue à la relation qu'entretient l'homme avec le monde réel. Si la finalité de cette relation échappe à la machine, elle ne doit pas nous échapper et doit être pensée comme un élément de notre culture. Il est fondamental de comprendre que la robotique ne se résume pas à de simples développements techniques issus des « nouvelles technologies » ayant pour finalité d'améliorer des systèmes de production ou de créer artificiellement de nouveaux besoins. Elle constitue une discipline scientifique à part entière, dont les enjeux interrogent le mode d'organisation de nos sociétés.

Elle doit être résolument soutenue par une recherche publique qui doit en aborder toutes les dimensions (scientifiques, techniques, économiques et sociologiques) ; elle ne doit en aucun cas être laissée aux seules initiatives de quelques grands groupes industriels. En ce sens, la France a su, dès l'origine, promouvoir une recherche fondamentale publique en matière de robotique, tout en menant de front des programmes de recherche appliquée en partenariat avec l'industrie.

Un atout pour la France, sa recherche en robotique

La robotique industrielle naît au début des années 1960, avec l'intégration du premier manipulateur programmable dans les chaînes de montage de General Motors.

À la même époque, en France, le Commissariat à l'énergie atomique étudie la possibilité de commander à distance un bras manipulateur chargé d'explorer des zones irradiées de centrales nucléaires et d'y réaliser des interventions.

Dans le courant des années 1970, la Régie nationale des usines Renault (RNUR) s'engage, avec le soutien de l'État et la participation de laboratoires de recherche publique, dans la conception et la fabrication de robots au sein de sa branche machines-outils. Sa filiale ACMA produit une centaine de robots en 1980 et le nombre des robots de la RNUR passe de 31 à 220 en l'espace de cinq ans, de 1977 à 1982 ⁽⁴⁾.

Dans le même temps, le CNRS, s'appuyant sur cette dynamique, lance le programme Automatique et robotique avancées (ARA) basé sur un partenariat public-privé et doté de plusieurs millions de francs. Ce programme donne une impulsion déterminante qui sera à l'origine de la structuration de la recherche fondamentale en robotique, et ce, alors même que la fin des années 1980 voit les industriels français se désengager de la production de robots (ainsi, ACMA sera vendu au fabricant italien COMAU).

Dans les années 1990, un groupement réunissant le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA) et l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) développent un robot d'exploration planétaire en collaboration avec le Centre national d'études spatiales (CNES).

Seize ans après le programme ARA, est créé (toujours à l'initiative du CNRS) le programme ROBEA auquel participent 250 équipes de recherche regroupées dans une centaine de laboratoires.

L'année 2007 est marquée par la création du groupement de recherche en robotique, le GDR Robotique ⁽⁵⁾, qui regroupe aujourd'hui plus de 1 300 chercheurs.

En 2012, Robotex ⁽⁶⁾, un réseau national de plateformes expérimentales de robotique, financé dans le cadre des Investissements d'avenir, regroupe 15 laboratoires autour de cinq thématiques allant de la robotique industrielle à la robotique humanoïde, en passant par la robotique terrestre et aérienne, la robotique médicale et la microrobotique.

Les équipes du CNRS et d'INRIA développent une recherche généraliste en partenariat avec des universités et de grandes écoles. La recherche en robotique est également organisée par domaine par les Arts et Métiers (robotique industrielle), le CEA (robotique d'intervention et exosquelettes), l'IFREMER (robotique marine et sous-marine), l'IFSTTAR (véhicules automatisés et transports), l'INSERM (robotique médicale), l'IRSTEA (robotique agricole) et l'ONERA (robotique aérienne).

La France se trouve dans une situation paradoxale : absente d'une production de robots industriels dominée principalement par le Japon, l'Allemagne et la Suède et par ailleurs faiblement équipée (5 fois moins que l'Allemagne), elle mène une recherche fondamentale de qualité couvrant de larges spectres applicatifs. Lors du dernier congrès de robotique organisé par la société IEEE (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens) à Stockholm, en mai dernier, il apparaît que la France occupe la troisième place par le nombre de ses articles (ex æquo avec l'Italie et le Japon, et derrière les États-Unis et l'Allemagne).

Un deuxième paradoxe de notre pays tient à la difficulté de pérenniser sur le territoire les succès de nos partenariats public-privé.

Ainsi, nous avons vu comment Renault a abandonné la fabrication de robots industriels, alors même que la firme avait contribué à la naissance des réseaux de recherche en robotique. Les raisons de cet abandon sont en grande partie d'ordre technologique : Renault avait fait le pari de rester sur le créneau des actionneurs hydrauliques à commande analogique, faciles à programmer par apprentissage, alors que les moteurs électriques (à l'époque plus coûteux) autorisaient une commande numérique certes plus complexe (car nécessitant le recours à des langages de programmation), mais qui allait s'avérer *in fine* la clé du succès des grands constructeurs de robots industriels.

Plus près de nous dans le temps, l'exemple d'Aldebaran Robotics (racheté par la société japonaise Softbank

(4) CORIAT (B.), « La robotique à la Régie Renault », Revue d'économie industrielle, n°24, 1983.

(5) <http://www.gdr-robotique.org/>

(6) <http://equipex-robotex.fr/>



Photo © Ludovic/REA

Présentation des robots et produits interactifs de Cap Robotique.

« Le succès des robots NAO et Pepper démontre la qualité du savoir-faire français en matière d'intégration robotique. »

en 2012) est également emblématique de ce paradoxe. Même si l'on peut s'interroger sur l'évolution du marché de la robotique personnelle (en 2015, celui-ci représentait 11 % du marché de la robotique), le succès des robots NAO et Pepper démontre la qualité du savoir-faire français en matière d'intégration robotique.

Conçu par Aldebaran, le robot humanoïde ROMEO est une plateforme nationale de recherche fédérant une quinzaine de partenaires (laboratoires académiques et PME) autour de thématiques diversifiées incluant la conception mécanique, la mécatronique, la commande, la programmation, la vision artificielle, la perception multisensorielle, les communications verbale et non verbale, la planification de mouvements et l'intelligence artificielle. Si ROMEO est très loin de concurrencer le robot ATLAS (de Boston Dynamics) en termes de performances physiques, il constitue néanmoins une plateforme de recherche unique de par son ambition d'intégrer les différentes composantes d'un robot humanoïde complet qui soit capable d'actions et de communication, en interaction avec l'homme.

À défaut pour la France d'être présente sur le marché de la robotique industrielle, cette capacité d'intégration est un atout de sa recherche en robotique, un atout qui fait le succès de plusieurs PME françaises des domaines de

la logistique, des transports, de la robotique médicale et paramédicale et de la robotique agricole (avec des spécialités, telles que les drones, la robotique parallèle ou la robotique à câbles).

Quand on sait que le coût d'une cellule robotisée installée sur une ligne de production est dans une très large mesure déterminé par le coût de l'intégration du robot et non par le coût du robot lui-même, la recherche française est à même, dans le contexte de l'industrie du futur, d'y occuper une place de choix grâce à sa capacité à maîtriser les systèmes robotiques dans leur totalité, comme en témoigne sa participation active aux projets européens Euroc ⁽⁷⁾, Factory-in-a-Day ⁽⁸⁾ ou Comanoid ⁽⁹⁾. Ce dernier projet est à l'origine d'un accord de partenariat (signé au printemps 2016) entre Airbus Group, le CNRS et l'institut japonais AIST en vue de réalisation d'une étude des potentialités de la robotique humanoïde dans l'industrie aéronautique.

7) <http://www.euroc-project.eu/>

(8) http://cordis.europa.eu/project/rcn/109377_en.html

(9) <http://www.ambafrance-jp.org/Lancement-du-projet-H2020-COMANOID>