

Robotique : les grands défis à venir

PAR PIERRE-YVES OUDEYER ¹

Voilà plus de 60 ans que le premier robot industriel, construit par Unimate, a été installé dans une usine de General Motors, ouvrant la voie à un essor croissant de la robotique, destinée dans un premier temps à remplacer l'homme dans ses tâches de production considérées comme « ingrates ». Pour autant, les robots peuplent notre imaginaire culturel depuis près d'un siècle, que l'on pense aux créatures artificielles à la Frankenstein et à toutes les œuvres de science-fiction les mettant en scène (de la pièce de Karel Capek de 1920, RUR, Rossum's Universal Robots, qui a introduit le terme, au cycle d'Asimov, en passant par les romans de Philip K. Dick et les nombreux films produits sur le sujet depuis les années 1960). Et c'est peut-être cet imaginaire qui structure le plus le regard que porte la société sur la place et les perspectives de la robotique aujourd'hui. Est-ce à dire que les robots vont supplanter les humains dans de plus en plus de domaines de leur vie quotidienne et de leur vie professionnelle ? Et si tel est le cas, est-ce un bien ou non pour la société ?

Comme le montre Pierre-Yves Oudeyer dans cet article, la robotique couvre effectivement un très grand nombre de domaines aujourd'hui (assistance à la personne, loisirs, éducation, transports, médecine, exploration, industrie, etc.) et porte de nombreuses promesses en termes d'amélioration du quotidien, qu'il soit personnel ou professionnel. Pour autant, de nombreux défis restent à surmonter, d'une part au plan technique dans la plupart des domaines concernés, d'autre part s'agissant de l'acceptation par la société des nouvelles fonctionnalités offertes par la robotique. Enfin, de la fiction à la réa-

1. Directeur de recherche à l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) ; site Internet <http://www.pyoudeyer.com>. Cet article s'appuie sur un texte présenté à la conférence « Où vont les robots ? Quelques défis de la robotique personnelle », Paris : Cité des sciences et de l'industrie, 6 novembre 2009, condensé et mis à jour par la rédaction de *Futuribles* et l'auteur (NDLR).

lité, il demeure un grand fossé, que les développements qui suivent permettent de mesurer, en gardant bien à l'esprit, comme y insiste Pierre-Yves Oudeyer, que l'homme reste au cœur de cette aventure en ce sens qu'il contrôle à la fois les avancées techniques en la matière, et le choix des applications à en tirer. S.D. ■

Les robots sont partout : dans les usines et dans les champs, au fond des lmers 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. Cette révolution annoncée, dont l'impact sur la science, l'industrie et la société sera potentiellement très grand, va cependant de pair avec un certain nombre de grands défis à résoudre, tant technologiques que sociétaux. Il est donc fondamental que chacun en soit informé et participe à la réflexion sur les enjeux sociétaux qui s'y rapportent. Ce besoin est d'autant plus aigu que la robotique est un domaine très diffus dont les progrès sont continus et progressifs, le plus souvent sans singularités ou évolutions soudaines qui permettraient d'attirer l'attention de la société sur ce qui va néanmoins à long terme profondément la modifier. C'est pourquoi cet article vise à faire le point sur l'état des technologies (par opposition à l'imaginaire que l'on peut s'en faire au travers du cinéma et de la littérature), et sur leurs perspectives et leurs impacts potentiels.

Les défis de la robotique personnelle et domestique

De nombreuses études prédisent que les robots auront dans les décennies à venir une présence cruciale dans notre quotidien, et à la maison en particulier. Alors que la robotique classique et industrielle s'articulait autour des trois D, « *dull, dirty, dumb* », caractérisant les travaux stupides, ennuyeux et sales pour lesquels les robots devaient remplacer les hommes, une nouvelle robotique se développe autour des trois E, « *education, entertainment, everyday* », dans laquelle les robots sont présents pour nous accompagner au quotidien pour nous rendre service, nous stimuler et nous amuser. C'est pourquoi on parle de robotique d'assistance et de robotique personnelle.

Dans ce contexte, c'est une zoologie variée qui arrive et sur laquelle travaillent de nombreux chercheurs, mais pour laquelle des défis très importants restent à résoudre. D'abord, ce sont des robots en accord avec l'imaginaire populaire, qui nous aident dans les tâches domestiques (robots aspirateurs, robots tondeuses, robots de téléprésence...). Une autre famille de robots est aussi en plein essor : les robots éducatifs, ludiques et d'accompagnement social. De forme parfois « animaloïde », leur objectif est d'enrichir la vie sociale, émotionnelle, intellectuelle, et parfois même esthétique des humains avec lesquels ils interagissent. Une troisième tendance va à rebours de l'imaginaire que nous pouvons avoir des robots : plutôt que l'arrivée de robots

anthropomorphes bipèdes dans nos maisons, les objets du quotidien et les maisons elles-mêmes sont en train de se transformer en robots. Des écrans se voient dotés d'un cou robotisé et d'une caméra en guise d'yeux ; des caméras-projecteurs articulées et fixées au plafond détectent quand quelqu'un s'assoit à une table et d'un clac de doigt projettent devant lui un écran tactile avec lequel il peut interagir ; des chaises roulantes automatisées sont capables d'anticiper les intentions de l'humain et d'éviter toutes seules des obstacles imprévus, etc.

Nous n'approfondirons pas ici cet aspect, la robotique d'assistance à la personne faisant l'objet de plus amples développements dans ce numéro ².

Les défis de la robotisation des transports et de la mobilité au quotidien

Bientôt nos voitures seront des robots. Déjà, à l'instar des avions contrôlés par des pilotes automatiques, des bus sans conducteur ont fait leur apparition dans certaines villes d'Europe et d'Asie sur des circuits qui leur sont réservés. Les voitures autonomes de transport de bagages et de matériel sont aussi présentes dans les aéroports. Quant à nos voitures quotidiennes, déjà très équipées en systèmes électroniques d'aide à la conduite, les chercheurs et les industriels travaillent intensément pour qu'elles puissent nous assister systématiquement, voire conduire à notre place (voir encadré page suivante). Les objectifs sont multiples : augmenter la sécurité des personnes, économiser l'énergie, limiter les embouteillages, permettre aux personnes handicapées de voyager en voiture, libérer les conducteurs pour qu'ils puissent s'occuper à autre chose pendant le trajet.

Outre les aspects techniques propres à ce type de véhicules, on peut s'attendre à ce que nombre de conducteurs préfèrent le plaisir de la conduite manuelle ou aient peur de se faire conduire par un robot. L'un des principaux défis sera donc celui de l'acceptabilité. À quoi il faut aussi ajouter celui des infrastructures : beaucoup des défis techniques qui se posent concernent la capacité des voitures automatisées à percevoir et interpréter leur environnement à la place du conducteur. Les difficultés sont principalement dues au fait que cet environnement est aujourd'hui non structuré, conçu pour l'homme et non pour les voitures automatisées.

On pourrait très largement simplifier ces problèmes si l'on modifiait l'environnement de manière à le rendre « communicant » avec les voitures, par exemple en installant dans le macadam des éléments électromagnétiques ou des puces RFID (radio-identification) très facilement repérables par des senseurs, qui non seulement peuvent informer la voiture de la forme de la route et de la position courante exacte, mais aussi des règles de circulation

2. Voir les articles de Charles Fattal et Michel Héry, respectivement en p. XX et XX de ce numéro (NDLR).

VERS LA VOITURE AUTONOME

L'automatisation de fonctions est une réalité dans l'automobile depuis près de 20 ans. Elle s'est développée pour la sécurité passive puis active dans les années 1990, d'abord avec les *airbags* et l'assistance au freinage ABS (*Anti-blockersystem*), puis dans les années 2000 avec le contrôle de trajectoire (ESP, électro-stabilisateur programmé) et l'appel d'urgence automatique...

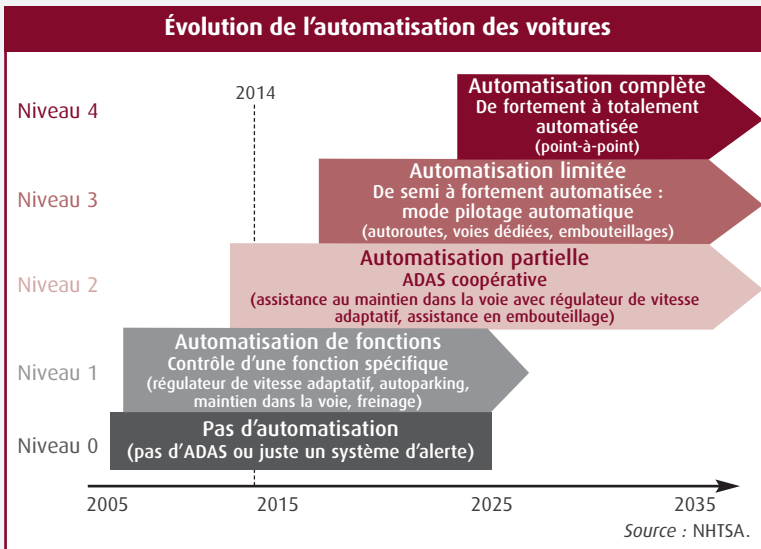
L'intégration de plus en plus de capteurs et l'intelligence embarquée de traitement de données autorisent un nouveau champ de progrès appelés « systèmes avancés d'aide à la conduite » (ADAS, *advanced driver assistance systems*) qui assistent puis visent à automatiser la conduite.

Au printemps 2013, la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) des États-Unis a publié des définitions des différents niveaux d'autonomie des fonctions (schéma ci-dessous) ¹ :

— Le niveau 0 n'a pas de fonction automatisée, seulement des systèmes d'alerte de collision à l'avant ou de changement de file.

— Le niveau 1 a des fonctions spécifiques automatisées comme le régulateur de vitesse adaptatif, le parking automatique ou le freinage automatique en cas d'obstacle.

— Le niveau 2 implique l'automatisation d'au moins deux fonctions de base qui communiquent pour soulager le conducteur. Le système d'assistance en embouteillage en est un bon exemple, la voiture avance et s'arrête au rythme de la voiture qui la précède automatiquement ; le régulateur de vitesse adaptatif et automatique (fonction de la vitesse autorisée et de la vitesse du véhicule qui précède) combiné à l'assistance qui maintient automatiquement le véhicule au centre de sa voie permet un mode proche du pilotage automatique sur voie rapide. Ces sys-



1. Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, mai 2013. URL : http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf. Consulté le 31 janvier 2014.

tèmes existent déjà sur certains modèles de voitures, mais les lois actuelles requièrent que le conducteur conserve ses mains sur le volant et le système est désactivé si le conducteur lâche le volant.

— Le niveau d'automatisation 3 permet au conducteur de laisser le contrôle complet au véhicule lui-même dans certaines situations météorologiques et de trafic.

— Enfin au niveau 4, le véhicule se conduit complètement tout seul. Par construction, les fonctions de conduite déterminantes pour la sécurité reposent entièrement sur le système automatique. Il pourrait y avoir des véhicules de niveau 4 qui autorisent la reprise de la conduite en mode manuel ou ne l'autorisent pas (dans ce cas le volant et les pédales peuvent disparaître).

Rappelons que des prototypes de voitures entièrement automatisées existent. La « Google Car » est la plus

connue : les Google Cars auraient déjà parcouru 500 000 kilomètres en mode automatique sans accident et sont autorisées à rouler dans quatre États américains (Nevada, Floride, Californie et Michigan)².

Il reste des difficultés techniques à surmonter pour voir émerger une voiture grand public complètement automatique : outre le coût, la précision des systèmes de positionnement géographique et des cartes doit encore être améliorée. Les difficultés techniques seront très probablement résolues dans les prochaines années, mais il demeure un frein au développement des voitures automatiques : celui de la responsabilité juridique en cas d'accident (malgré tout). En effet, si le véhicule est complètement automatisé, il semble logique que ce soit l'objet lui-même qui doit être assuré à la vente, et non plus le conducteur / possesseur.

Véronique Lamblin, Futuribles

2. Voir aussi DÉSAUNAY Cécile, « La fin des conducteurs ? », *Futuribles*, n° 394, mai-juin 2013, p. 108-110.

locales. Mais avant que les routes soient systématiquement « augmentées » de la sorte pour les voitures automatisées, il va falloir opérer la transition, c'est-à-dire pouvoir continuer à intégrer des automobiles classiques dans un environnement fait pour des voitures intelligentes. Une autre solution pourrait consister à exploiter les progrès de la géolocalisation, de l'imagerie satellite et du développement des connexions Internet mobiles, pour fournir à chaque voiture les informations dont elle a besoin sans recourir à la transformation physique des réseaux routiers.

Les défis de la robotique médicale

Les robots ont fait leur entrée à l'hôpital et sont une aide de plus en plus importante pour notre santé. La diversité des robots médicaux l'atteste : robots d'assistance chirurgicale (quotidiennement utilisés depuis une quinzaine d'années), capsules endoscopiques robotisées et miniaturisées capables d'explorer le corps humain (apparues plus récemment), prothèses de membres, systèmes robotiques pour la rééducation ou la suppléance, exosquelettes qui pourraient permettre à des personnes incapables de marcher de recouvrer

cette capacité, chaises roulantes robotisées, et même des robots interactifs sociaux, qui sont l'objet de recherches dans le cadre du diagnostic et de la thérapie de problèmes développementaux (comme l'autisme), ou de la stimulation cognitive de personnes âgées.

Les robots chirurgicaux

Les robots peuvent apporter une aide précieuse au chirurgien car ils sont capables de mouvements plus précis et plus répétables, dont la performance est constante. En outre, leur morphologie peut être flexible et s'adapter aux cavités étroites à l'intérieur du corps. Cela permet de réaliser des interventions moins invasives et en principe moins dangereuses pour le patient. Certains robots sont autonomes et réalisent des actions chirurgicales à partir des instructions fonctionnelles données au préalable par le chirurgien. Ceci implique notamment que le robot soit capable de reconstruire les structures anatomiques du corps particulier de chaque patient à partir de mesures diverses (issues de ses senseurs et de données d'imagerie préalablement mesurées).

Pour d'autres robots, les actions opératoires sont directement contrôlées par le chirurgien au travers d'interfaces. Ces interfaces sont particulièrement utiles quand l'échelle des forces et des mouvements à réaliser est très petite, et donc très inférieure à celle des mouvements naturels des mains et des bras du chirurgien. Elles ont alors pour rôle de transformer les mouvements du chirurgien en micromouvements complexes, ainsi que de transmettre aux chirurgiens des informations tactiles et de forces, c'est-à-dire « haptiques », caractérisant le contact entre l'instrument chirurgical et le corps du patient. L'un des défis centraux est d'élaborer des interfaces qui permettent au chirurgien de contrôler efficacement ces micro-instruments complexes, en assurant à la fois précision, sécurité mais aussi facilité d'apprentissage. Ceci constitue un défi à la fois technique et ergonomique, auquel s'ajoutent des questions juridiques et éthiques telle celle des responsabilités en cas d'accident opératoire.

Les microrobots d'exploration du corps

Les robots miniaturisés autonomes ou téléguidés capables de se déplacer sans fil dans les veines, les artères ou les conduits intestinaux sont au centre des recherches de plusieurs laboratoires depuis quelques années. Leur objectif est d'abord de fournir des mesures et images des tissus du corps humain de manière très peu invasive, et d'aider le médecin dans son diagnostic. Les défis qui se posent sont multiples : comment embarquer système de propulsion et de navigation, caméras et autres senseurs, et système de communication sans fil avec l'extérieur dans un robot de la taille d'une gélule ? Comment élaborer des méthodes de locomotion adaptées à l'échelle microscopique à laquelle les liquides ont des propriétés de viscosité très différentes ? Pour les robots téléguidés, comment développer des interfaces qui permettent au chirurgien de les contrôler ? Pour ceux qui sont autonomes, comment embarquer la puissance de calcul nécessaire à la commande du robot ?

Prothèses, suppléances robotiques et rééducation

Des dispositifs robotiques commencent à être disponibles pour remplacer, augmenter, ou rééduquer différentes parties du corps humain. Des prothèses de main ou de bras se développent dans l'objectif de permettre à des personnes amputées d'utiliser une main ou un bras robotique, installé à la place de leurs équivalents biologiques. L'un des plus grands défis consiste à permettre à ces personnes de les contrôler facilement et efficacement pour réaliser des mouvements complexes coordonnés. Le plus souvent, ils sont connectés au corps du patient par l'intermédiaire de capteurs posés sur certains muscles : en les contractant plus ou moins, ces muscles envoient des signaux au bras et à la main robotique. Il s'agit là de permettre au dispositif robotique d'interpréter ces signaux de manière à comprendre les intentions musculaires de l'humain et à les réaliser, mais aussi de développer un système dont l'apprentissage soit facile pour l'humain, et qui ne nécessite pas un recalibrage fréquent.

En outre, la connexion robot-corps humain doit être à la fois solide, propre, durable, et ne pas blesser l'humain. Comme cela a déjà été fait avec des singes, on pourrait imaginer réaliser la connexion directement avec le cerveau, en veillant à ce que cela se fasse de manière à la fois médicalement sûre et éthiquement correcte.

Outre les prothèses, des dispositifs robotiques de suppléance et de rééducation se développent. Parmi les technologies les plus marquantes, citons l'apparition d'exosquelettes, de doubles robotiques du corps humain qui se superposent à lui comme une carapace, dont l'objectif est de démultiplier les forces physiques. Pour les personnes qui justement n'ont plus la résistance ou la force de marcher, cela pourrait être une manière de recouvrer cette capacité. Reste à faire en sorte que l'exosquelette puisse interpréter correctement et en temps réel les mouvements que désire faire celui qui le porte, et ensuite à construire des exosquelettes qui soient sûrs et ne puissent pas blesser l'humain. Cela implique en particulier des recherches sur des « actuateurs » d'un type nouveau, qui se laissent faire quand une force extérieure leur est appliquée.

Robots sociaux pour le diagnostic et la stimulation cognitive et émotionnelle

Dans l'imaginaire collectif, un robot est souvent considéré par définition comme une entité aux comportements stéréotypés et insensible aux émotions. De manière surprenante, des chercheurs travaillent aujourd'hui à leur utilisation pour venir en aide aux enfants atteints de troubles du développement. C'est le cas de l'autisme, qui se caractérise justement par des comportements stéréotypés et un retrait social et émotionnel, dont il est possible qu'il soit partiellement dû à la difficulté qu'ont les enfants concernés à percevoir et interpréter les comportements de leurs congénères, trop variables et trop chargés d'indices. Certains chercheurs ont mis en évidence le fait

qu'en présence de robots aux comportements et aux formes animaloïdes / anthropoïdes, plus simples et plus prédictibles que les humains, mais plus interactifs que les objets inanimés, des enfants pouvaient sortir de leurs comportements stéréotypés et même profiter du robot comme d'un intermédiaire pour interagir avec les autres humains.

D'autres chercheurs utilisent la fonction répétitive des comportements du robot comme un outil de diagnostic permettant de suivre les évolutions de certaines réponses sociales des enfants dans le contexte d'interactions identiques. Néanmoins, ces recherches posent encore d'importants défis et nécessitent d'être poussées pour s'assurer notamment que les effets observés ont (ou non) un effet durable, que le robot ne risque pas d'aggraver le retrait social de l'enfant.

Cette stimulation émotionnelle, cognitive et sociale par les robots peut aussi servir aux personnes âgées, en particulier celles atteintes de la maladie d'Alzheimer. Il s'agit là de développer des robots capables non seulement de faciliter la vie quotidienne de ces personnes, mais aussi de les aider à stimuler leur mémoire et leurs fonctions intellectuelles.

Les défis de la robotique d'exploration et d'intervention en milieu hostile

Les robots sont devenus des outils essentiels pour aller explorer des environnements inconnus ou dangereux. Grâce à eux, nous pouvons continuer sur les pas des grands explorateurs des siècles précédents et découvrir des mondes où l'homme ne peut pas aller. Les plus connus d'entre eux sont probablement Sojourner, Spirit et Opportunity, qui ont posé leurs roues sur Mars et nous ont permis d'en découvrir les propriétés géophysiques, topographiques et chimiques.

Sur terre, les robots permettent d'explorer les grands fonds sous-marins dans des conditions de pression très difficiles et sans lumière, et d'ainsi inventorier une faune et une flore uniques, d'étudier les courants marins ou les phénomènes volcaniques à la limite des plaques tectoniques. Le rôle des robots d'exploration va aussi devenir de plus en plus essentiel pour intervenir dans des zones terrestres très dangereuses (décombres d'une ville à la suite d'un tremblement de terre, centrales nucléaires, zones de guerre...).

Enfin, ces mêmes technologies vont se multiplier pour toute une famille d'applications civiles et militaires moins extrêmes mais tout aussi importantes : véhicules terrestres, aériens ou aquatiques robotisés utilisés pour surveiller la sécurité des frontières, le trafic des bateaux et leurs possibles dégazages, les feux de forêts, la pêche illégale, les mouvements de foule, etc. Un certain nombre de défis se posent aux robots d'exploration et d'intervention en milieu hostile, qu'ils soient autonomes pour réaliser la mission qu'on leur a donnée, ou semi-autonomes quand ils sont partiellement téléguidés par un opérateur humain.

Mobilité en milieu hostile

Il faut par exemple des robots capables de se déplacer dans un champ de ruines ou sur une planète couverte d'obstacles rocheux et de crevasses, mais aussi des robots de petite taille capables de voler dans toutes les conditions atmosphériques. Deux grandes approches se distinguent concernant la morphologie des robots et le mode de propulsion : d'une part la robotisation de véhicules classiques à roues, hélices ou réacteurs ; d'autre part l'élaboration de formes et de matériaux qui s'inspirent du vivant (robots à pattes, à ailes battant comme celles des insectes, ou nageant comme les poissons).

Autonomie énergétique en milieu hostile

Il est par définition très difficile de trouver des stations de recharge énergétique en milieu hostile et il est très souvent impossible d'envisager que le robot puisse revenir en zone « technicisée » pendant le cours de sa mission. Il faut donc construire des robots qui soient autonomes énergétiquement et puissent réaliser des missions de longue durée, ce qui implique d'une part de développer des techniques leur permettant de capter les sources d'énergie disponibles sur leur lieu d'intervention (solaire, courants marins, vent, biomasse...), et d'autre part d'élaborer des robots les plus économes possible en énergie.

Interaction opérateur-robot

Qu'ils soient autonomes ou semi-autonomes, ces robots sont là pour réaliser les objectifs fixés par un opérateur humain. Ils doivent donc utiliser des systèmes qu'il est intuitif et facile de commander. Pour les robots autonomes, cela consiste à élaborer des systèmes qui permettent à l'humain d'exprimer des commandes de haut niveau stratégique ou tactique, et qu'un robot puisse transformer en un plan d'action précis. Pour les robots semi-autonomes, les commandes de l'humain sont souvent de plus bas niveau et se rapprochent du téléguidage. Dans ce cas, les défis portent d'une part sur le développement d'interfaces permettant à l'humain de ne pas être gêné par le décalage temporel entre l'envoi de la commande et sa réalisation par le robot, et la minimisation du nombre de commandes à envoyer pour atteindre un objectif donné ; d'autre part sur la capacité du robot à détecter les dangers de certaines commandes de l'opérateur, et à déclencher de manière autonome un programme permettant de les éviter sans entrer en conflit avec la demande de l'opérateur.

Construction automatique de cartes et navigation

Comme les explorateurs humains, l'une des activités principales des robots d'exploration est la construction de cartes, non seulement destinées à l'opérateur humain, mais aussi pour faciliter leur propre navigation dans les environnements inconnus. Comment un robot peut-il construire une carte de

son environnement et s'y localiser ? Les recherches sont extrêmement actives tant sur le plan du développement de nouveaux senseurs (comme les LIDAR, *Ligh Detection And Ranging*, sortes de scanners 3D de l'environnement), que d'algorithmes qui permettent de reconstruire une carte à partir de multiples informations provenant non seulement du robot mais aussi potentiellement d'autres senseurs installés par exemple sur des satellites, ou d'autres robots.

Les défis de la robotique industrielle et de services professionnels

Les robots industriels, apparus dans les années 1960 et définis comme des machines reprogrammables pour réaliser automatiquement des tâches variées de manipulation dans les usines, n'ont cessé de proliférer ces 50 dernières années. D'après la United Nations Economic Commission for Europe, le marché de la robotique industrielle a crû de 19 % entre 2000 et 2005, et représentait 11 milliards de dollars US en 2005. En 2012, les ventes de robots industriels s'élevaient à environ 8,5 milliards de dollars US ; si on inclut les logiciels, les périphériques et l'ingénierie-systèmes, le marché des systèmes robotiques industriels est estimé à 26 milliards de dollars en 2012³. La Japan Robot Association estime qu'il pourrait atteindre 66 milliards de dollars US en 2025.

C'est l'industrie de l'automobile qui en est aujourd'hui la plus grande utilisatrice, avec des usines dont les robots assemblent presque entièrement des voitures sous la supervision fonctionnelle des humains. Le développement de ces robots peut s'expliquer en recourant aux trois D : ils permettent de remplacer les humains pour les tâches *dull* (ennuyeuses), *dirty* (sales) et *dumb* (qui ne requièrent aucune faculté intellectuelle). En outre, ils sont insensibles à la fatigue, peuvent travailler jour et nuit, et sont capables aujourd'hui de manipuler et positionner des pièces industrielles de plusieurs centaines de kilos avec une précision millimétrique dans des environnements structurés.

Cependant, les robots industriels du futur ne seront sans doute pas de simples extrapolations des robots industriels d'aujourd'hui. D'abord, si les très grandes industries peuvent utiliser avec profit les systèmes robotiques existants pour fabriquer en masse certains produits qui ont une durée de vie relativement longue, un très grand nombre de petites et moyennes entreprises doivent être capables de concevoir et fabriquer de nouveaux produits très rapidement, ce qui implique une capacité de réorganisation dynamique des procédés industriels. Dans ce contexte, elles ont besoin de pouvoir construire des robots capables de réaliser des tâches plus variées, plus sophistiquées que le positionnement de pièces, et plus facilement reprogrammables pour une tâche nouvelle. Le travail sur l'élaboration de robots humanoïdes, capables d'une grande dextérité et de manipuler les outils des humains, est ainsi central.

3. Source : World Robotics, 2013.

RELANCER L'INDUSTRIE FRANÇAISE PAR LES ROBOTS : LES RECOMMANDATIONS DE LA FONDAPOL

Le retour en force des débats sur la politique industrielle en 2012 a redonné une actualité à la robotique : peut-on relancer l'industrie française par les robots ? Telle est la question que s'est posée la Fondation pour l'innovation politique (Fondapol) à travers deux rapports de Robin Rivaton parus en 2012¹.

Le premier rapport, sur les enjeux de la robotique, dresse un bilan industriel qui n'est pas favorable à la France. Les chiffres sont en effet éloquentes : alors que la plupart des pays développés se sont

massivement équipés en robots industriels, la France s'est laissée distancer et a raté la révolution robotique. Fin 2011, on comptait quatre fois moins de robots dans l'industrie en France qu'en Allemagne et deux fois moins qu'en Italie, 3 000 robots ont été installés dans l'industrie française en 2011 mais six fois plus en Allemagne. Robin Rivaton souligne que la robotisation est un facteur de compétitivité de l'industrie manufacturière car elle permet de jouer à la fois sur le facteur prix de la production, par des économies de main-d'œuvre, et sur la qualité des produits, qui présentent moins de défauts ; elle diminue ainsi les pertes de matière première, tout en introduisant de la flexibilité (les robots sont reprogrammables).

La comparaison internationale du nombre de robots pour 10 000 em-

ploqués dans l'industrie met en évidence l'avance du Japon et de la Corée du Sud — respectivement 359 et 347 robots pour 10 000 employés en 2012 —, l'Allemagne étant en troisième position avec 261 robots et la France loin derrière avec 122 robots pour 10 000 employés ; Taiwan

la devance (129 robots pour 10 000 employés) et la Chine commence à s'équiper. Le Japon produit à lui seul 60 % des robots industriels, la Corée du Sud venant en deuxième position, et son industrie automobile a une avance écrasante dans la roboti-

sation des usines, qui explique sa très forte productivité. Les usines automobiles françaises sont près de 60 % moins robotisées que les japonaises et deux fois moins que les allemandes. On remarque que si la France produisait des robots industriels jusqu'au début des années 1990, son industrie s'est depuis lors effondrée.

Aujourd'hui l'industrie est confrontée à de nouveaux enjeux : les capteurs et les logiciels ont fait d'importants progrès et une nouvelle vague robotique se profile avec un meilleur couplage homme-machine. Par ailleurs, des robots de service, dits humanoïdes pour certains, arrivent sur le marché et si le Japon est aussi *leader*, une entreprise française, Aldebaran Robotics, est très bien placée. Robotiser l'industrie française est un impératif stratégique conclut ce premier rap-



1. RIVATON Robin, *Relancer notre industrie par les robots (1) : les enjeux*, et *Relancer notre industrie par les robots (2) : les stratégies*, Paris : Fondapol, décembre 2012, respectivement 56 p. et 44 p.

port, car c'est un moyen de regagner de la compétitivité, en particulier dans l'industrie automobile — la comparaison de la productivité dans les usines Peugeot d'Aulnay et de Sochaux est assez éloquente, celle-ci étant plus élevée dans la seconde dotée de robots récents. Le rapport incite aussi à relancer la production de robots en France.

Les questions de stratégie sont abordées dans le second rapport qui souligne que si la France a perdu ses atouts dans la robotique industrielle, ce serait une erreur stratégique d'abandonner cette branche au profit de la robotique de service car il est nécessaire de tenir toute la chaîne, de la robotique industrielle à la robotique de service, qui sont complémentaires. La Fondapol recommande donc une stratégie intégrée pour la robotique appuyée par les pouvoirs publics. La France ayant de bons atouts dans la recherche avec des organismes de recherche publics qui sont souvent en pointe (Centre

national de la recherche scientifique, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Institut national de recherche en informatique et en automatique...), la R&D ainsi que la formation doivent être un pilier de cette stratégie nationale qui doit mobiliser des moyens financiers, sans doute à l'échelle régionale, pour équiper les petites et moyennes entreprises en robots tout en incitant des roboticiens étrangers à s'implanter en France.

Si l'opinion française semble réticente vis-à-vis de la robotique, qu'elle considère comme cause de chômage, le rapport conclut à la nécessité de montrer que la robotisation n'est pas une lubie futuriste mais un enjeu industriel majeur. Le lancement en mars 2013, quelques mois après la publication de ces deux rapports, du plan France Robots Initiatives² semble indiquer que ces recommandations ont été entendues.

Pierre Papon, Futuribles

2. Voir encadré p. XX de ce numéro.

Manipulation et interactions avec le monde physique

L'une des principales activités des robots industriels aujourd'hui consiste à faire du *pick-and-place*, c'est-à-dire par exemple à prendre des pièces qui arrivent sur un tapis roulant et à les positionner précisément dans une structure du produit final. Quelques autres activités motrices comme le vissage, la soudure ou la peinture sont également très répandues. Leur point commun est que ce sont des activités relativement simples du point de vue de la dextérité requise.

Au contraire, beaucoup des activités réalisées par des ouvriers humains consistent en des manipulations complexes nécessitant la coordination des doigts de leurs deux mains et sont hors de portée des capacités des robots actuels. Pour rendre cela possible, il faut progresser dans l'élaboration, d'une part de senseurs de toucher et de forces pouvant recouvrir la totalité d'une main artificielle, et d'autre part d'algorithmes de contrôle capables de coupler en temps réel les données de ces senseurs et les mouvements des actionneurs pour manipuler des objets complexes, potentiellement flexibles et dont la position n'est pas connue à l'avance par le robot. L'existence de ces bras et mains artificiels pourrait permettre, outre la manipulation complexe sur des

chaînes robotisées traditionnelles, d'en doter des robots afin qu'ils puissent utiliser des outils initialement conçus pour l'homme, donc plus nombreux et plus variés. C'est une des pistes de recherche en cours.

Enfin, un dernier grand défi associé aux capacités de manipulation des robots est posé par les mouvements de plus en plus rapides qui peuvent provoquer des torsions ou des oscillations du corps du robot compliquées à contrôler. Plus généralement, la manipulation d'objets flexibles ou souples sort du cadre des systèmes de commande basés sur l'hypothèse que le robot et l'objet qu'il manipule sont rigides : dans ce nouveau contexte, des propriétés dynamiques très difficiles à modéliser caractérisent la tâche que le robot doit effectuer, et le défi technique est de taille.

Flexibilité, reprogrammabilité et portabilité

Les robots industriels existants sont reprogrammables mais l'effort nécessaire à cette reprogrammation est souvent important. C'est un obstacle majeur pour les usines dont les produits et *process* peuvent changer rapidement. Il reste donc beaucoup à faire pour développer des robots que l'on puisse facilement reprogrammer pour réaliser une tâche nouvelle, ou à qui l'on puisse spécifier une tâche complexe, voire transférer sa propre expertise. À cet égard, un enjeu de recherche très important est le développement de systèmes robotiques capables d'apprendre par imitation et / ou démonstration de la tâche par un ouvrier non ingénieur. Ces défis impliquent notamment la mise en place d'outils logiciels avancés en termes tant d'interface avec l'utilisateur humain que d'interopérabilité entre les systèmes et les robots.

Interactions avec l'homme : sécurité, coopération, communication et apprentissage

Flexibilité, variété des tâches, minimisation des transformations à apporter aux usines existantes des petites et moyennes entreprises : ce sont les raisons essentielles qui poussent un certain nombre de chercheurs et d'industriels à développer des robots partiellement humanoïdes qui pourraient seconder les ouvriers humains en travaillant avec eux, de la même manière qu'eux, et avec les mêmes outils.

Les défis sont immenses. Le premier est celui de la sécurité : parce que, dans ce contexte, les robots vont interagir parfois physiquement avec l'humain, il est indispensable qu'il n'y ait aucun risque de blessure pour l'humain. Un axe de recherche très dynamique ces dernières années est ainsi le développement de robots à la fois légers et puissants, équipés de moteurs dits *compliant*, capables d'absorber presque totalement les chocs potentiels non prévus avec des éléments extérieurs, et d'être bloqués facilement dans leur mouvement par la main d'un humain.

Un second défi concerne à la fois les problèmes d'interprétation des intentions de l'ouvrier par les robots, et la coordination avec l'humain pour

réaliser la tâche à accomplir. Cela implique que le robot soit capable de se construire en temps réel un modèle de la tâche et de l'humain. Or, comme chaque humain est différent et peut avoir des préférences qui évoluent au cours du temps, et que les tâches elles-mêmes peuvent évoluer, il est essentiel que le robot soit capable de s'adapter en permanence, d'apprendre à interpréter de nouveaux signaux, les émotions, les intentions ou de nouvelles préférences de l'humain. Pour répondre à ce défi, de nombreux laboratoires dans le monde travaillent sur la mise au point de méthodes d'apprentissage statistique, ainsi que d'interfaces homme-robot permettant à cet apprentissage de se faire au cours d'interactions naturelles avec l'humain.

Les environnements non structurés

Dans le contexte des interactions avec l'humain, un élément fondamentalement différent de la situation des robots industriels d'aujourd'hui est l'impossibilité de prévoir à l'avance tous les comportements et gestes de l'humain : l'environnement est non structuré. C'est le cas également pour les robots de services professionnels, qui se développent pour secondariser le travail de l'homme dans les champs, sur les chantiers, dans les ports et les aéroports. Dans tous ces environnements, des événements imprévus peuvent survenir et la structure de l'environnement lui-même est partiellement inconnue (plan des rues, emplacement des poubelles, etc.).

Ceci implique que les stratégies d'action du robot ne peuvent pas être entièrement programmées à l'avance : elles doivent évoluer automatiquement au cours du temps, grâce à des méthodes d'adaptation et d'apprentissage. Cela doit permettre non seulement d'être capable de gérer des incertitudes sur les mesures des propriétés caractérisant les éléments relatifs à la tâche (par exemple position et nombre de fruits à cueillir dans un arbre), mais aussi de faire face à des événements imprévus dont par définition elles ne peuvent posséder de modèle *a priori*. Opérer efficacement et en sécurité quand il est impossible de modéliser totalement son environnement à l'avance, voilà un autre défi de taille.

Les défis de la nanorobotique

Les recherches en nanotechnologies et en nanorobotique en particulier ont explosé dans la dernière décennie. Les nanorobots sont des machines dont les composants sont à l'échelle atomique ou moléculaire. Ces composants peuvent être soit des molécules biologiques, comme des protéines ou des morceaux d'ADN, dont on utilise les capacités naturelles de réaction à des *stimuli* chimiques, physiques ou électriques, dans un contexte artificiel, pour s'en servir de moteurs, senseurs ou jointures ; soit des assemblages d'atomes créés *de novo* par l'humain. En assemblant ces composants, des machines peuvent être formées et caractérisées par de multiples degrés de liberté, capables d'appliquer des forces et de manipuler d'autres objets nanométriques, et dotées d'une efficacité énergétique très grande.

Les applications pourraient être médicales, environnementales, spatiales ou militaires. Par exemple, on peut imaginer que ces machines soient un jour capables de transporter dans le corps humain des médicaments jusqu'à des cellules identifiées individuellement, et de les injecter dans ces cellules sans toucher aux cellules environnantes. On peut aussi imaginer des nanorobots capables de réparer ces cellules ou d'éliminer sélectivement des cellules cancéreuses. Cependant, plusieurs grands défis restent à relever avant que ces projections ne deviennent réalité.

Moteurs, senseurs, joints et assemblage

Comme les robots macroscopiques, les nanorobots ont besoin de moteurs, de senseurs et de jointures pour agir sur leur environnement et le percevoir. Quels sont les assemblages moléculaires qui permettent de propulser un nanorobot dans un environnement soumis aux lois de la physique atomique et quantique plutôt qu'aux lois de la physique newtonienne ? Quels types de senseurs utiliser ?

Comment assembler de manière robuste, répétée et à un coût raisonnable, les moteurs, senseurs et jointures pour en faire des robots complets ? Ceci est réalisé aujourd'hui au moyen de systèmes microscopiques de très haute technologie, mais peut-on mettre au point des systèmes macroscopiques de manipulation nanoscopique qui soient robustes, précis et susceptibles d'être produits à grande échelle et à bas coût ? Une autre voie de recherche possible est celle de l'autoassemblage : de nombreuses structures biologiques nanométriques s'assemblent en effet spontanément dans certaines conditions locales physico-chimiques.

Contrôle, communication, traitement de l'information

Les nanorobots devront pouvoir être contrôlés tout comme sont contrôlés les macrorobots. Or, cela implique des capacités de stockage et de traitement des informations, qui représentent un immense défi à l'échelle nanométrique. Il faudrait pouvoir construire et programmer des nanomicrocontrôleurs embarqués sur un nanorobot. Dans un premier temps, certains chercheurs proposent que ce contrôle se fasse à distance, sous la forme d'un téléguidage, réduisant les fonctionnalités embarquées du nanorobot au seul stockage de l'information, et à son envoi et sa réception depuis un système macroscopique extérieur opéré par un humain. Le défi qui se pose est alors celui de l'interface entre le nanorobot et le système technique macroscopique : par quel moyen peut-on envoyer des commandes au robot et recevoir les informations captées par ses senseurs ?

Essais de nanorobots, sécurité

Nombreux sont les chercheurs qui envisagent d'utiliser des essais de nanorobots : tout comme dans les sociétés d'insectes sociaux, leur intelligence comportementale serait ainsi le résultat d'interactions massives entre eux et

avec l'environnement. Comment mettre au point des sociétés de nanorobots pour réaliser une tâche donnée, et comment la programmer ?

Les capacités de manipulation de la matière au niveau atomique, d'auto-assemblage et de réplication peuvent permettre des applications extraordinaires autant que des usages très dangereux pour l'humain. Comment s'assurer par exemple que des nanorobots capables de désagréger les structures moléculaires autour d'eux et de s'en nourrir pour construire d'autres machines identiques ne fassent pas disparaître toute matière et donc toute vie autour d'eux ? Comment garantir que les nanorobots médicaux ne se transforment pas en substances toxiques pour l'organisme ? Comment s'assurer que des nanorobots capables de se répliquer ne puissent pas devenir de nouveaux types de virus / parasites perturbant les écosystèmes et pouvant porter atteinte à la santé des êtres vivants ?

Les défis sociétaux de la robotique

Au-delà des défis technologiques et scientifiques posés à la robotique, et de par les impacts potentiels que ces travaux pourraient avoir sur la société, des questions fondamentales, sociétales et éthiques, se posent aujourd'hui.

L'acceptation sociale au quotidien

Comme nous l'avons vu, les robots pourraient rapidement devenir des objets très présents dans notre quotidien. Cependant, cette arrivée ne fait pas simplement face à des obstacles technologiques, elle rencontre aussi l'opposition d'une partie de la société. Beaucoup des robots existants, s'ils sont vus avec amusement et / ou bienveillance, provoquent aussi des réactions hostiles, en particulier en Occident. Une partie de cette hostilité vient du fait que ces robots sont destinés à prendre part aux interactions sociales avec et entre humains, mais sont perçus comme des créatures étranges, insensibles ou « machiniques », qui déshumanisent la vie quotidienne.

Pour contrer cette hostilité, et comme on l'a vu plus haut, de nombreux chercheurs travaillent sur le développement de robots capables de comportements gestuels, affectifs ou linguistiques qui se basent sur ceux des humains. En bref, les chercheurs essaient d'élaborer des robots qui s'adaptent à l'humain et non le contraire : ils essaient d'humaniser les robots. Mais ces robots humanisés rencontrent encore des hostilités : en bousculant les frontières entre le monde vivant et sensible, et le monde inerte et artificiel, ainsi que les frontières entre ce qui distingue l'homme des autres créatures, ces robots remettent en question, en Occident, la manière dont on conçoit l'homme et le vivant. Outre cet aspect philosophique, ils incarnent aussi un tabou religieux : la tentative de construction de robots humanisés, capables de raisonnement et d'émotions, est vue par certains comme une manière de « jouer à Dieu », ce qui, pendant de nombreux siècles, a été considéré comme un sacrilège ; et même si les sociétés occidentales sont aujourd'hui largement sécularisées, les créatures artificielles humanisées y restent perçues négativement.

Comment rendre les robots socialement acceptables dans la vie quotidienne, et ne pas heurter les sensibilités des personnes avec qui ils vont interagir ? Ce défi implique un travail à la fois sociologique pour articuler en détail les raisons de ces hostilités, et pédagogique, de la part des chercheurs et des ingénieurs, pour expliquer que leur objectif est de construire des machines plus humaines que celles qui nous entourent aujourd'hui, et que donc, plutôt qu'une déshumanisation, il s'agit d'une humanisation de la présence de la technologie au quotidien.

Le respect éthique de la personne

Outre le fait que les robots peuvent ne pas être agréablement accueillis socialement, se posent aussi de fortes questions éthiques, en particulier dans le domaine de la robotique d'assistance aux personnes handicapées mentales ou physiques. C'est le cas s'agissant de l'utilisation de robots dans le cadre de l'autisme ou de l'accompagnement de personnes âgées.

Dans les deux cas, des raisons fortes justifient les intérêts potentiels de tels types de recherche et de technologie. Cependant, on peut aussi se demander s'il n'y a pas un risque que le lien social introduit grâce au robot contribue à réduire encore le lien social effectif avec les autres humains, et donc à renforcer, à moyen terme, l'isolement social des sujets concernés. Ces recherches et les applications associées posent ici des défis éthiques importants.

Un autre exemple de problématique éthique concerne la robotique de rééducation physique et de suppléance fonctionnelle. Un certain nombre de projets de recherche visent à développer des appareils robotiques incluant potentiellement des technologies intrusives pour le corps, dont l'objectif est d'aider des personnes handicapées physiquement après un accident à retrouver tout ou partie de leurs capacités physiques. Bien qu'il y ait des avantages évidents à ce type de technologie, celle-ci comporte aussi des risques, sur le plan tant de l'atteinte physique des personnes que du respect de leur identité et de leur dignité. Comment peut-on peser l'ensemble de ces considérations pour réaliser une recherche responsable et ensuite introduire convenablement ce type de technologie parmi les outils thérapeutiques *standards* ?

Un troisième exemple concerne la robotique androïde. Certains chercheurs développent des robots, appelés androïdes, reproduisant l'apparence humaine, en termes tant de matière, de couleur, que de mouvements, notamment pour étudier les comportements de l'humain. Ces androïdes sont parfois construits sur le modèle d'une personne humaine existante : est-ce acceptable et peut-on raisonnablement envisager de confronter des personnes à de tels robots ?

Un dernier exemple est celui de la robotique autonome à usage militaire. Beaucoup de chercheurs travaillent sur des techniques de navigation et de cartographie automatique, de franchissement d'obstacles, ou de suivi d'objets visuels. Bien qu'il existe de nombreuses applications potentielles pacifiques de ces techniques, les applications militaires sont largement les

plus fréquentes en pratique. Or on ne prête que peu d'attention aux applications potentielles de ces recherches, qui posent évidemment d'importantes questions éthiques.

Réconcilier imaginaire et réalité

La robotique est un domaine que les œuvres de fiction ont exploré de manière extrêmement importante, et le plus souvent très en amont des recherches scientifiques et techniques. Les fictions occidentales et orientales diffèrent considérablement dans la manière de présenter les robots : alors qu'ils sont typiquement la cause de grandes catastrophes dans les histoires occidentales, ils sont au contraire souvent les sauveurs de l'humanité dans les histoires asiatiques. Ces différences s'enracinent dans l'histoire, les mythologies, la cosmogonie et les traditions religieuses de ces deux parties du monde. Cependant, ces deux univers de fiction ont deux grandes similarités : 1) ils ont eu et continuent d'avoir un impact très important dans l'imaginaire populaire ; 2) ils sont très en décalage avec l'état de la réalité technologique sur laquelle travaillent chercheurs et industriels.

En effet, alors que dans ces histoires les robots sont doués d'intelligence quasiment humaine, savent parler, se déplacer et manipuler leur environnement comme des êtres vivants, et que ces capacités sont le ressort de leurs scénarios, les robots réels sont au contraire très démunis face à la complexité et à la variabilité des environnements domestiques. Ils sont encore très loin de pouvoir survivre physiquement et fonctionnellement dans nos salons et lors d'interactions avec des humains non prévenants. Or, ce décalage entre l'imaginaire collectif et la réalité est très problématique car quand elle considère l'arrivée des robots dans notre quotidien, l'attention de la société est focalisée sur des questions qui ne deviendront peut-être pertinentes que dans plusieurs centaines d'années, alors que des questions plus pressantes et tout aussi importantes, relatives aux défis éthiques ou aux usages que nous voulons faire des robots à court et moyen termes, ne sont pas traitées ou sont déformées par le prisme de la fiction. La réduction du décalage entre imaginaire populaire, fiction et réalité de la robotique est aussi un défi essentiel des années à venir.

La place des robots dans la société

L'avenir de la robotique et de son impact dans la société est encore largement à construire. Bien qu'un certain nombre de travaux de recherche et de robots déjà commercialisés s'intéressent à des fonctionnalités comme le travail dans les usines, l'exploration spatiale, la réalisation autonome de travaux ménagers ou l'assistance à la personne, on peut se demander s'il s'agit des usages les plus utiles ou préférables pour notre société. Il est encore largement possible de redéfinir ces usages et d'en inventer de nouveaux : que voulons-nous vraiment faire des robots ? En effet, le choix des usages sur lesquels la plupart des chercheurs et des industries travaillent aujourd'hui est au croisement à la fois de notre imaginaire et d'intérêts scientifiques,

industriels et économiques. Mais est-ce l'intérêt des utilisateurs, c'est-à-dire de la société ?

Par exemple, de nombreux robots sont conçus pour remplacer l'homme dans certains types de tâches et d'environnements : c'est le cas des robots ouvriers, des robots agricoles, des robots aspirateurs, voire de robots infirmiers en développement en Corée du Sud ou au Japon. Bien que beaucoup de ces tâches soient souvent ennuyeuses ou fatigantes, voulons-nous vraiment que les robots nous remplacent ? Outre le fait que cela change le paysage des emplois en en faisant disparaître certains et en en créant d'autres plus qualifiés (mais pour des personnes différentes), cette tendance peut facilement être extrapolée et on pourrait imaginer un futur dans lequel la plupart de nos activités physiques quotidiennes soient réduites à leur part minimale grâce au travail des robots. *De facto*, nous pourrions arriver dans une situation similaire à celle dans laquelle se retrouvent les humains dans le film *Wall-e*⁴ : les robots les ayant remplacés dans toutes leurs tâches physiques jusqu'à même les nourrir, ils deviennent incapables de se servir de leur corps. Leur situation n'est ainsi guère enviable, et la privation d'activité physique et quotidienne a des conséquences très négatives sur le mental. Nous sommes encore très loin de cette vision imaginaire, mais elle pose réellement la question des directions que peut prendre la robotique aujourd'hui.

Plutôt que remplacer l'homme, ne pourrait-on pas inventer des usages dans lesquels les robots accompagnent, enrichissent, stimulent l'humain dans son quotidien ? Alors qu'aujourd'hui les robots pour l'accompagnement social et intellectuel, les loisirs et l'amusement sont considérés comme beaucoup moins sérieux que les robots travailleurs, ne correspondraient-ils pas en fait à des usages plus profitables à la société à long terme ? Dans tous les cas, il semble fondamental de mettre les utilisateurs et la société dans son ensemble au cœur de l'élaboration des nouveaux robots et de leurs usages, afin que ceux-ci soient choisis plutôt qu'imposés par une dynamique scientifique, industrielle et économique. C'est probablement là l'un des plus grands défis de la robotique. ■

4. Film d'animation américain réalisé par Andrew Stanton, sorti en 2008.