

Éditorial

Pierre Couveinhes

Le mot *robot* évoque dans nos esprits deux notions fort différentes. Avec son dérivé *robotisation*, il renvoie à ces puissantes machines qui ont bouleversé l'organisation des usines, à commencer par celles de l'industrie automobile et des autres industries mécaniques. Mais le mot évoque aussi ces compagnons sympathiques et pittoresques de héros de science-fiction, auxquels ils rendent maints précieux services, à l'instar des robots C-3PO et R2-D2 du film de George Lucas *La Guerre des étoiles*. Notons que ces deux types de robot correspondent assez bien, respectivement, à la robotique *industrielle* et à la robotique *personnelle* qu'Olivier Ly et Hugo Gimbert distinguent l'une de l'autre dans leur article.

L'étymologie du mot *robot*, qui fut créé vers 1920 par l'écrivain tchèque Karel Čapek, renvoie plutôt à la première de ces deux notions, en évoquant l'asservissement d'un être artificiel astreint à des tâches pénibles et rebutantes. Bien sûr, une telle idée est très antérieure au XX^e siècle : déjà, au II^e millénaire avant l'ère chrétienne, une légende sumérienne imaginait que les dieux avaient créé les hommes sous la forme de statues d'argile animées, afin que ceux-ci travaillent à leur place...

Ce mythe se retrouve sous une forme assez voisine dans la légende du Golem, cette créature d'argile qu'un savant kabbaliste pragois animait grâce à des inscriptions tracées sur son front, ainsi que sur un parchemin placé sous sa langue : ne peut-on pas voir là une étonnante préfiguration des programmes informatiques qui animent les robots industriels d'aujourd'hui, sans leurs systèmes de commande numérique ?

La première partie de ce numéro de *Réalités Industrielles* présente les services éminents rendus par les robots industriels dans des secteurs tels que l'exploration sous-marine, la construction automobile et l'aéronautique.

Jusqu'à une date récente, ces puissants Golems restaient dangereux pour l'homme, ce qui amenait à les enfermer dans des cages, ainsi que l'indiquent Adel Sghaier et Philippe Charpentier dans leur article consacré aux questions de sécurité.

Mais aujourd'hui, les robots sont de plus en plus conçus pour interagir avec l'homme, et ils peuvent donc sortir de leurs prisons. Ils sont aussi en mesure d'accomplir de nouvelles tâches nécessitant non seulement de la force et de la précision, mais aussi de la délicatesse : la deuxième partie de ce numéro en donne quelques exemples impressionnants, dans les domaines de la logistique, de la cartographie, de la sécurité et de la surveillance, ainsi qu'en matière de médecine et de chirurgie.

Les robots revêtent donc une apparence de plus en plus avenante et ils vont jusqu'à imiter parfaitement la vie, retrouvant ainsi les vertus des automates réalisés par Vaucanson

(au XVIII^e siècle) et par Robert-Houdin (au XIX^e). Le premier de ces inventeurs n'avait-il pas inspiré à Voltaire ces quelques vers :

« *Le hardi Vaucanson, rival de Prométhée,
Semblait, de la nature imitant les ressorts,
Prendre le feu des cieus pour animer les corps* ».

Aujourd'hui, Nao, un petit androïde créé par la société française Aldebaran, attire immédiatement la sympathie des enfants et des adultes, rappelant étonnamment Astro, ce petit robot de dessins animés apparu au Japon, dans les années 1950. De tels androïdes, ou encore des robots conçus sur le modèle d'autres êtres vivants, pourront rendre dans l'avenir des services éminents, notamment en matière d'assistance aux personnes âgées ou handicapées : d'étonnantes applications de ces technologies, susceptibles d'apparaître dans un proche futur, sont présentées dans la troisième partie de ce numéro.

Peut-on imaginer qu'un jour les robots puissent être préférés aux êtres humains, ainsi que Villiers de l'Isle-Adam l'a envisagé, dans son roman *L'Eve future* ? L'on y voit un jeune aristocrate anglais, Lord Ewald, épris d'une femme belle, mais à l'esprit médiocre, demander l'aide de Thomas Edison. Celui-ci crée alors à son intention un sosie de sa bien-aimée, mécanique, certes, mais doté d'une telle intelligence et d'une telle sensibilité que Lord Ewald en tombe éperdument amoureux...

Toutefois, dans le film de Fritz Lang *Metropolis*, un robot (que le maître de la cité a substitué à la vertueuse Maria) menace de conduire la mégapole à sa perte... En définitive, peut-être convient-il de conserver une sage prudence à l'égard des robots (tout au moins pour l'instant) !

*

* *

En hors-dossier, cette livraison de *Réalités Industrielles* présente le compte rendu d'un colloque consacré à L'Ingénierie numérique, organisé, le 25 novembre 2011, par l'Académie des technologies, le Conseil économique, social et environnemental et le Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies.

R É A L I T É S INDUSTRIELLES

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES
MINES**
FONDÉES EN 1794

Rédaction

120, rue de Bercy - Télédéc 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
Fax : 01 53 18 52 72
<http://www.annaes.org>

Pierre Couveinhes, rédacteur en chef

Gérard Comby, secrétaire général de la série
« Réalités Industrielles »

Martine Huet, assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier, lecteur

Comité de rédaction de la série
« Réalités industrielles » :

Michel Matheu, président,

Pierre Amouyel,

Grégoire Postel-Vinay,

Claude Trink,

Bruno Sauvalle

Jean-Pierre Dardayrol

Pierre Couveinhes

Maquette conçue par

Tribord Amure

Iconographe

Christine de Coninck

Fabrication :

Marise Urbano - AGPA Editions

4, rue Camélinat

42000 Saint-Étienne

Tél. : 04 77 43 26 70

Fax : 04 77 41 85 04

e-mail : agpaedit@wanadoo.fr

Abonnements et ventes

Editions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre

75002 Paris

Tél. : 01 42 86 55 65

Fax : 01 42 60 45 35

<http://www.eska.fr>

Directeur de la publication :

Serge Kebabtschieff

Editions ESKA SA

au capital de 40 000 €

Immatriculée au RC Paris

325 600 751 000 26

Un bulletin d'abonnement est encarté
dans ce numéro pages 139-140

Vente au numéro par correspondance
et disponible dans les librairies suivantes :
Presses Universitaires de France - PARIS ;
Guillaume - ROUEN ; Petit - LIMOGES ;
Marque-page - LE CREUSOT ;
Privat, Rive-gauche - PERPIGNAN ;
Transparence Ginestet - ALBI ;
Forum - RENNES ;
Mollat, Italique - BORDEAUX.

Publicité

J.-C. Michalon

directeur de la publicité

Espace Conseil et Communication

2, rue Pierre de Ronsard

78200 Mantes-la-Jolie

Tél. : 01 30 33 93 57

Fax : 01 30 33 93 58

Table des annonceurs

Annales des Mines : 2^e - 3^e et 4^e de couverture

Illustration de couverture :

L'homme et le robot, d'après Michel Ange,

La Création de l'homme.

Photo © Photoresearchers/PHANIE

S o m m a i r e

LES ROBOTS : NOUVEAUX CONCEPTS, NOUVEAUX USAGES

1 Éditorial

Pierre COUVEINHES

5 Avant-propos

Françoise ROURE et Lionel ARCIER

Un état des lieux par secteur

8 A la conquête des abysses : les robots sous-marins

Dominique VILBOIS

15 La valeur ajoutée (en termes de qualité, de sécurité...) de la robotique dans l'industrie aéronautique

Pierre-Laurent KOCIEMBA

19 L'application robotisée de peintures dans l'industrie automobile

Des solutions permettant des économies d'énergie grâce au concept de charge interne

Cédric PERRES et Asbed KECHICHIAN

24 La problématique de l'utilisation des robots industriels en matière de sécurité

Adel SGHAIER et Philippe CHARPENTIER

32 Les actions de Cap Robotique

Philippe ROY et François HANAT

36 L'économie de la robotique : nouvelles données et défis actuels

Françoise ROURE et Grégoire POSTEL-VINAY

Les développements en perspective et la préparation de l'avenir

- 42 **Vers de nouveaux usages des robots mobiles**
Guy CAVEROT
- 49 **Vers une cartographie sémantique d'environnements intérieurs**
David FILLIAT
- 56 **Les drones : la poursuite de leur miniaturisation et son impact sur le déploiement de leurs usages**
Catherine FARGEON et Peter Van BLYENBURGH
- 65 **An overview of medical robotics in Iran**
Farzam FARAHMAND, Hamid R. AMIRNIA, Saeed SARKAR, Saeed BEHZADIPOUR, Alireza AHMADIAN et Alireza MIRBAGHERI

Des nouveaux concepts de la robotique aux usages innovants

- 76 **La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs**
Michel DEVY
- 86 **Des robots humanoïdes multi-applications : le Nao et ses successeurs**
Bruno MAISONNIER
- 94 **L'insertion des robots dans la vie quotidienne (avec un focus sur les robots humanoïdes)**
Olivier LY et Hugo GIMBERT
- 103 **Vivre avec des robots : *designer* la relation**
Dominique SCIAMMA
- 109 **Les perspectives de la robotique dans le programme-cadre 2014-2020 de l'Union européenne (Horizon 2020). Quelles priorités pour la France ?**
Patrick SCHOULLER et Frédéric LAURENT

HORS DOSSIER

- 117 **Compte rendu du colloque sur l'ingénierie numérique organisé, le 25 novembre 2011, par l'Académie des Technologies, par le Conseil Général de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies (CGIET) et le Conseil Economique, Social et Environnemental**
Romain BORDIER, Laurent GUÉRIN et Jonathan NUSSBAUMER
- 126 **Biographie des auteurs**
- 131 **Résumés étrangers**

Avant-propos

Par Dr Françoise ROURE* et Lionel ARCIER**

Et si les robots permettaient de créer plus de valeur, sur notre territoire, que l'automatisation des tâches répétitives les moins qualifiées n'a contribué à en détruire ?

C'est le pari que le groupe Robotique du Syndicat des entreprises de technologies de production (Symop) a fait en forgeant le néologisme de « robocalisation », comme solution alternative durable à la délocalisation des activités de production.

Alors que notre population active a augmenté de 7 millions d'individus en 40 ans, tandis que l'industrie réduisait ses effectifs salariés de 2 millions et demi (passant de 5,7 millions en 1974, année de choc pétrolier, à 3,2 millions fin 2011), il y a urgence à considérer avec lucidité et optimisme l'apport de nouveaux concepts et de nouveaux usages des robots à la production, aux échanges, à l'emploi et à la satisfaction des besoins fondamentaux de notre société.

Après avoir développé l'imaginaire des robots avec l'invention (par ailleurs parfaitement inutile) du mécanisme de son automate *Le Canard digérateur*, qui donnait l'illusion de boire, nager ou de cancaner, Jacques de Vaucanson a contribué, dans la seconde partie du XVIII^e siècle, à l'automatisation et à l'amélioration des processus de production des manufactures de soieries. La révolte des Canuts à Lyon (comme celle des Luddites, au Royaume-Uni), au milieu du XIX^e siècle, était motivée par les difficultés de vivre dignement sa condition de salarié, et certainement pas par une haine supposée atavique pour la machine.

Le rêve de la robotique, tiré par la conquête de l'espace par l'homme, au XX^e siècle, ne s'est pas brisé avec la fin des missions spatiales habitées : il est aujourd'hui relancé par des projets de robotisation de navettes appareillées de manière à pouvoir récolter des matériaux extraterrestres et les rapporter sur la Terre, tels que MoonEx (1), avec l'aide directe ou indirecte de la NASA et de sociétés, telles que Google ou Microsoft. Les robots sont des plateformes idéales d'intégration des technologies avancées, y compris en matière d'énergie embarquée, de matériaux adaptés aux conditions opérationnelles, de systèmes d'acquisition, de traitement et de transmission de données, de mécanique, de capteurs en tous genres...

Encore faut-il que la fréquentation quotidienne des robots dans les usines, les espaces publics, les transactions monétaires, dans l'enseignement et la recherche, et dans la vie quotidienne domestique, s'inscrive dans les mœurs et se banalise, ce qui requiert une vision

claire des avantages qu'ils procurent et ce, dans des conditions de sécurité et de sûreté qui les rendent dignes de confiance. Les professionnels du *design* et de l'ergonomie, ainsi que les concepteurs de normes de sécurité (2) au travail, portent une responsabilité forte dans ce domaine : celle d'ouvrir un marché des robotiques et de déployer leur pleine utilité sociale par une innovation responsable : c'est d'ailleurs la raison pour laquelle ils ont été appelés à contribuer à ce numéro de *Réalités industrielles*.

Parmi les exemples d'utilité sociale, on peut citer l'utilisation de robots dans des conditions opérationnelles comportant des risques pour l'homme, qu'il s'agisse de la sécurité dans les activités d'extraction minière, augmentée par l'usage de simulateurs (3), de l'aide apportée par les robots démineurs, de la précision des gestes chirurgicaux de robots manipulables à distance dans le domaine de l'artériographie (un projet soutenu par Oseo et par la société de capital-développement Ascendi, issue de la communauté monastique de l'abbaye de Saint-Wandrille). Autre piste, suivie aux Etats-Unis par l'Institut national américain de la santé (NIH), celle de robots permettant de récupérer des fonctionnalités motrices en agissant sur le système nerveux central, ce qui requiert une meilleure compréhension de son fonctionnement en vue d'accéder à des techniques d'ingénierie inverse du cerveau (4), sous de strictes conditions d'encadrement éthique. Cette référence met en lumière les

LES ROBOTS :
NOUVEAUX CONCEPTS,
NOUVEAUX USAGES

* Contrôleur général économique et financier, présidente de la section *Technologies et société* au Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGIET) - Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

(1) <http://www.googlelunarprize.org/teams/moon-express>

(2) Le comité technique de l'ISO 184/SC2 est dédié aux robots et aux équipements robotiques (vocabulaire, sécurité des robots industriels et des systèmes).

(3) Cf. la société Immersive Technologies, d'origine australienne, dans le domaine minier ou encore, dans le domaine aéronautique, les logiciels de simulation 3D de Dassault Systems.

(4) NIH FA Number PAR-10-279: Robotics Technology Development and Deployment », 2010.

** Contrôleur général économique et financier, membre permanent de la section « Régulation et ressources » et de la section « Sécurité et risques » au sein du Conseil général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies.

enjeux économique, industriel, stratégique et éthique de notre participation à la normalisation européenne et internationale en la matière.

Qu'entend-on, aujourd'hui, par « robot » ?

Un robot peut être défini comme un système autonome artificiel capable d'agir et d'interagir avec son environnement pour produire (ou coproduire) un bien ou un service. La convergence de technologies avancées et leur interopérabilité croissante, issue de la dématérialisation, font du robot un terreau fertile pour l'innovation, la réduction des coûts et les nouveaux usages. Elle conduit aussi à esquisser de nouvelles formes d'organisation sociale sur les territoires, du local au global, en commençant par l'allègement des contraintes de centralisation et l'émergence de modèles économiques plus sobres et plus propres en matière de consommation énergétique, davantage centrés sur le bien-vivre ensemble, et aussi plus durables.

La robotique, comprise comme l'art de l'assemblage de composants énergétiques, matériels et logiciels capables de conférer aux robots les fonctions attendues, est une technologie-clé en ce sens que la maîtrise, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie, de la capacité opérationnelle d'un robot est un enjeu en termes de compétences, de savoir-faire explicites et implicites, d'aptitude à faire évoluer le système productif industriel, agro-alimentaire et de services et, enfin, en termes de capacité d'anticipation, de surveillance, de contrôle et de gestion des risques et des crises liés aux catastrophes, quelle qu'en soit l'origine, naturelle ou non.

Le robot dépasse d'ores et déjà le rayon d'action de l'homme et la dialectique de substitution homme-machine est ici dépourvue de sens. C'est le cas pour tous les environnements dits « extrêmes » et inhospitaliers, tels que les fonds marins, l'espace, les milieux fortement radioactifs, où il est irremplaçable. Encore faut-il savoir le reconnaître et investir dans la durée pour que le robot soit prêt à l'emploi lorsque cela s'avère nécessaire. L'excellence robotique japonaise n'a pu être mise à contribution lors de la déclaration d'urgence nucléaire sur l'île japonaise de Honshu, et ce sont des robots américains qui ont suppléé à leur absence. Comment expliquer ce paradoxe, si ce n'est en soulignant un défaut d'anticipation sur ses usages, à commencer par ceux hautement improbables ?

Le robot est le complément de l'homme lorsqu'il opère sous la conduite, présente ou en télé-opération de celui-ci, ou lorsqu'il n'est rendu opérationnel que par la présence d'une personne, avec laquelle il interagit. Ce complément étant indispensable lorsque les capacités du robot dépassent les capacités humaines (charge, température, précision, vitesse sur le lieu de travail)... ou lorsqu'il pallie une indisponibilité humaine sur le lieu de vie, dans le cas du robot d'assistance à la personne (handicap, mobilité réduite ponctuelle ou permanente, grand âge solitaire, maintien à domicile d'un patient).

Ses usages à venir, qui devront s'attacher au *design*, à l'ergonomie, aux ressorts de la confiance dans l'interaction (grâce à des normes de sécurité et de protection qui soient adaptées aux usages) et à l'éthique dans l'usage des robots, sont porteurs de progrès à utilité économique, écologique et sociale - en un mot, de développement durable.

C'est aussi un marché et un enjeu pour le développement des métiers émergents dans ce domaine. Nous connaissons déjà les spatonautes et les internautes : la capacité de tirer le meilleur parti de la robotique requerra l'émergence de *Cognautes* et enfin, de *Chronautes* afin de s'adapter à ce que le prospectiviste Thierry Gaudin appelle le « mur du temps », bâti par ces systèmes artificiels autonomes et agissants que l'homme imagine et réalise, avec lesquels il joue pour finalement co-évoluer, pour le meilleur comme pour le pire.

Les investissements, publics et privés, s'orientent vers des plateformes technologiques de taille critique, dans l'Union européenne, en Chine, aux États-Unis et dans les pays émergents (Brésil, Russie, Inde et Chine (BRIC)). Dans leur creuset multidisciplinaire s'élabore l'interopérabilité et l'assemblage de robots du futur aux usages multiples incluant les séquenceurs d'éléments biologiques artificiels, les drones miniaturisés et les robots théranostiques, ces robots dont les usages devraient orienter la conception : au-delà de la démonstration d'un fragment de concept, les nouveaux usages devraient orienter l'acquisition de fonctionnalités critiques, en elles-mêmes ou par leur combinaison. Parmi ces fonctionnalités figurent la perception, l'intégration et l'interprétation d'informations hétérogènes (notamment visuelles, sonores et proprioceptives), l'auto-apprentissage, la capacité d'interagir avec d'autres robots, les capacités mécatroniques augmentées, ainsi que les capacités de se faire accepter et comprendre par l'être humain au moyen d'une communication sensorimotrice adaptée ; ce qui peut passer par une évolution anthropomorphique de certains robots de la vie quotidienne. Bien entendu, la démonstration de concept est essentielle, comme s'y emploie, par exemple, la direction générale de l'armement (DEA), responsable du projet européen de démonstrateur technologique NEURON, d'un montant d'environ 400 millions d'euros. Mais l'intégration des robots et la banalisation de leur usage dans l'industrie et dans les services sont la condition *sine qua non* de la chute drastique de leur coût. L'association robotique du Japon ne s'y trompe pas, qui prévoit en 2025 un marché de l'ordre de 66 milliards de dollars, dont la moitié serait tirée par des applications domiciliaires. Pourtant la crise financière systémique qui se déploie depuis 2008 a induit un recul de production industrielle, avec pour conséquence un repli de l'ordre de 45 %, aux États-Unis, en Asie et en Europe, de la livraison de robots industriels, en particulier à l'industrie de l'automobile et des véhicules à moteur. En France, les 2/3 de la

robotique industrielle installée concernent le secteur automobile.

Le robot dématérialisé et allégé, multifonctions et multi-usages, capable de veiller lui-même à son autonomie énergétique, d'aller chercher sur étagère les modules qui lui sont indispensables à la tâche qui lui est ordonnée, et de ranger les autres, intelligent sans être omniscient, au langage d'exploitation ouvert et interopérable, existe déjà dans les laboratoires. Créer les conditions de son adoption passe par une réflexion sur les usages et sur les coûts qui permette son adoption rapide dans des conditions éthiques, énergétiques et de sécurité acceptables. L'exosquelette, par exemple, qui permettrait aux victimes d'accidents vasculaires cérébraux de retrouver un confort de vie, doit voir son coût baisser drastiquement pour être adopté. Il faut aussi prévoir un encadrement juridique, avec, par exemple, l'interdiction et la criminalisation d'éventuels usages coercitifs. L'exosquelette constitue lui-même un champ de recherche et d'intégration, avec la perspective de muscles artificiels élaborés à partir de polymères conducteurs qui pourraient remplacer des moteurs destinés aux robots, allégeant ceux-ci en poids et en volume. Ces matériaux avancés ouvrent en effet la voie à d'autres applications mobiles ne requérant pas la puissance des actuateurs hydrauliques, ni la rapidité et le moment de rotation des moteurs électriques.

Économie de deniers publics, maintien de l'activité malgré le vieillissement, nouveaux savoirs et nouvelles activités rémunératrices, déploiement de la société de la connaissance, anticipation, gestion et remédiation de crises par un déploiement en univers hostiles, contribution à une production plus sobre en consommation d'énergie fossile : autant de bénéfices attendus des robotiques industrielle et de service.

Des économies et du mieux-être au travail sont aussi à attendre en matière de santé au travail. A titre d'exemple, 800 millions d'euros de dépenses directes de santé sont effectuées pour réparer des troubles musculo-squelettiques (TMS) qui sont la première cause de maladie professionnelle, en forte croissance. Dans une entreprise, un TMS coûte (selon la DARES) l'équivalent d'un 13^e mois de salaire, alors qu'il pourrait être évité, ou limité, grâce à une meilleure approche ergonomique et à l'apport de la robotique. Encore faut-il que les acteurs publics et privés acceptent de tirer les leçons d'un passé qui a vu,

en France, la conception et la production de machines-outils à commande numérique décliner à partir des années 1980.

Si le robot, en particulier le robot d'usinage, « n'est pas une machine-outil, mais une machine à géométrie variable (5) », il mérite les meilleurs architectes pour sa conception et son intégration dans son environnement futur : industries traditionnelles et industries agro-alimentaires, services, hôpitaux, domiciles, transports, environnement(s), écoles et universités.

Transformer la vulnérabilité économique et commerciale de la France, qui réside dans la croissance des importations d'équipements de production à haute technologie lors de la relance d'une activité industrielle (cas de la micro-électronique et des équipements de salles blanches, par exemple), en une opportunité de passer à une robotique fondée sur des technologies avancées et sur leur convergence, en appui sur le développement d'un marché intérieur européen dynamique et porteur, en phase avec les valeurs d'économie sociale de marché de l'Union européenne : cet objectif est réalisable. A la condition d'en faire partager la vision en termes d'opportunités et d'accompagnement public des acteurs privés, et de créer un environnement qui lui soit favorable.

C'est l'ambition de ce numéro de la série *Réalités Industrielles* des *Annales des Mines*, qui propose, en appui sur un état des lieux dans certains secteurs et des éléments d'économie de la robotique, quelques développements en perspective, dans des domaines aussi différents que la cartographie 3D d'un environnement par un robot, les usages des robots sous-marins ou encore les réalisations robotiques dans un pays à la tradition médicale multiséculaire, l'Iran. Cette édition s'achève sur de nouveaux concepts ouvrant la voie à des usages innovants de la robotique dans la vie quotidienne, avec la cobotique, les robots humanoïdes, l'apport du *design* et, enfin, les perspectives de la recherche et de l'innovation dans l'Union européenne, à l'horizon 2020, qui seront encadrées dès 2013 par un dispositif visant à assurer que ces développements se produiront de manière responsable, dans le respect de ses valeurs essentielles.

(5) Christophe Deplatz, CETIM, présentant le programme THESAME européen de mécatronique, lors du salon INNOROBO de Lyon, en mars 2011.

À la conquête des abysses : les robots sous-marins

Les fonds sous-marins restent largement mystérieux. Cependant leur exploration et leur exploitation constituent des enjeux majeurs pour le futur de notre planète. L'exploitation de leurs ressources naturelles (ressources halieutiques et biologiques, minerais, pétrole et gaz) et l'étude de leur influence sur le climat sont des défis incontournables si l'on veut offrir un avenir aux générations futures. Les progrès de la robotique sous-marine permettent d'envisager une meilleure connaissance et une exploitation de ce milieu encore inaccessible à l'homme. Cet article présente l'état actuel de la technique en matière de robotique sous-marine, ses applications civiles (actuelles et abordables dans un futur proche) et, enfin, un panorama rapide d'un marché nouveau et attractif.

Par Dominique VILBOIS*

Alors qu'ils occupent 70% de la surface de la planète, les mers et les océans restent encore largement méconnus, alors que leur exploration demeure un enjeu majeur pour le futur. On peut s'étonner qu'alors que les progrès scientifiques ont permis à l'homme de partir à la conquête de l'espace depuis une cinquantaine d'année, notre connaissance du milieu sous-marin reste imparfaite. Il faut en chercher la raison dans deux difficultés que l'on rencontre dès que l'on veut entreprendre d'explorer ce milieu : les pressions, qui deviennent rapidement extrêmes, et la difficulté à transmettre des communications dans le milieu aquatique.

L'enjeu que représente l'exploration (et, ensuite, l'exploitation) des océans s'est accru au cours des dernières décennies du fait de la raréfaction des ressources terrestres (minerais, pétrole), de l'opportunité d'accéder à des ressources alimentaires nouvelles et,

enfin, à l'heure où l'on parle de plus en plus de réchauffement de la planète, de l'interaction encore mal connue entre les océans et le climat.

BREF HISTORIQUE

Ce sont les militaires qui, les premiers, ont essayé de conquérir cet espace avec le développement des sous-marins, habités et armés, offrant la possibilité de se déplacer en toute discrétion et d'intervenir par surprise.

Depuis une quarantaine d'années, les applications du sous-marin se sont élargies, et on peut les classer en trois grandes catégories : les applications militaires,

* Président Directeur Général du Groupe ECA.

qui s'intéressent à des profondeurs relativement faibles (300 m), les applications scientifiques de l'océanologie et, plus récemment, l'exploitation *off-shore* des ressources en matières premières. Ces deux dernières catégories s'intéressent à des profondeurs beaucoup plus importantes (de 4 000 à 6 000 m, voire plus ; il est couramment admis que le site le plus profond est la Fosse des Mariannes, dans l'Océan Pacifique, avec une profondeur de près de 11 000 m). A ces grandes catégories d'applications qui représentent des enjeux économiques évidents s'ajoute la recherche d'épaves et d'objets abîmés en mer (l'exemple le plus médiatisé étant la recherche des boîtes noires des avions disparus en mer, comme celles du vol AF 447 Rio-Paris, retrouvées en mai 2011 après deux ans de tentatives infructueuses).

LE ROBOT SOUS-MARIN, OUTIL D'EXPLORATION

Comment explorer de si grandes étendues dans un milieu aussi hostile ? Comment exploiter des gisements sous plusieurs centaines de bars de pression, alors que l'homme ne peut y accéder ? La réponse à ces deux questions est le robot sous-marin. L'idée n'est pas nouvelle : dès les années 1970, des robots télé-opérés permettaient de détruire des mines sous-marines sans exposer des vies humaines, et au milieu des années 1980, l'Epaulard (voir la photo 1), un robot autonome développé par ECA, explorait l'épave du paquebot Titanic, échoué par 3 800 m de fond, dans l'Atlantique Nord.



Photo 1 : L'Epaulard
(Source : ECA)

L'évolution de la technologie, au cours des vingt dernières années, a permis de développer des robots sous-marins de plus en plus sophistiqués et de plus en plus dotés de l'autonomie décisionnelle leur permettant de s'affranchir de toute transmission d'informations avec la surface.

On distingue deux types de ces robots : les plus anciens, les ROV (*Remote Operated Vehicles*) (ou

robots télé-opérés) et, plus récemment, les AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*). Les ROV ont un rayon d'action limité car ils sont reliés à la surface par un câble ombilical transportant leur énergie et permettant une communication à haut débit avec un opérateur. Ils sont le plus souvent utilisés pour explorer une zone limitée et sont capables de réaliser des interventions sous-marines grâce à des bras manipulateurs électriques ou hydrauliques (ce sont les ROV dits *Work-Class*). Ils sont utilisés pour des travaux sous-marins sur les champs pétroliers *off-shore*, pour des opérations de récupération (voir la photo 2) ou encore pour des opérations d'inspection ne nécessitant pas un rayon d'action important.

Les AUV sont beaucoup plus complexes puisque, n'étant pas reliés à la surface, ils doivent avoir des capacités d'autonomie en énergie et une autonomie décisionnelle leur permettant d'accomplir leur mission, et cela quelles que soient les circonstances (courants, obstacles...). Ils ont en revanche des rayons d'action pouvant atteindre plusieurs dizaines de miles nautiques et sont particulièrement adaptés pour des missions d'inspection ou de surveillance de zones étendues.

Les ROV et les AUV sont donc des outils complémentaires. Ainsi, c'est l'utilisation successive de ces deux types de robots qui a permis de retrouver les boîtes noires du vol Air-France 447. Au cours de la phase 4 des recherches, une zone de 10 000 km² a été explorée par trois AUV Remus 6000 (de la société



Photo 2 : Le ROV Victor 6000 de l'Ifremer
(Source : ECA/ Ifremer)



Photo 3 : Le ROV 1000, robot d'intervention de la Marine Nationale
(Source : ECA).

Kongsberg). Au bout d'une semaine d'exploration, l'un des AUV mobilisés a pu détecter les débris du fuselage de l'A330 perdu en mer. Un ROV Remora 6000 (construit par Phoenix Int') a alors pu intervenir et récupérer les enregistreurs de vol.

Un robot sous-marin est un système plus ou moins complexe comprenant un véhicule sous-marin (constitué d'une coque, de propulseurs, de systèmes de navigation et de localisation, de guidage, de gestion de l'énergie, de communication), une charge utile composée de capteurs (caméras, sonars, échosondeurs, magnétomètres...) et d'actionneurs (pour les ROV) et, le cas échéant, de systèmes de prétraitement et de stockage d'informations, d'un système mécanique de lancement et de récupération (qui peut être sophistiqué, si le robot doit être lancé et/ou récupéré par mer forte) et, enfin, d'une station au sol (préparation de missions, exploitation des données et post-traitements, station de pilotage (pour les ROV)).

LES ROV

Comme précisé précédemment, les ROV se caractérisent par le câble ombilical (ou plus simplement « l'ombilical ») qui les relie à leur station de pilotage. Cet ombilical a une fonction essentielle de transmission des signaux nécessaires à la télé-opération du véhicule (commande des différents propulseurs qui permet de déplacer et d'orienter le robot), ainsi que des signaux provenant des capteurs (caméras ou sonars) et, enfin, des ordres vers les actionneurs (projecteurs et bras manipulateurs). La photo 3 représente un ROV d'intervention utilisé par la Marine Nationale pour des opérations de recherche jusqu'à 1000 mètres de profondeur.

Cet ombilical achemine éventuellement l'énergie électrique lorsque des puissances importantes sont nécessaires à la réalisation de la mission. Dans un certain nombre de cas, les ROV peuvent toutefois être auto-

nomes en énergie grâce à des batteries embarquées sur le véhicule (on parle alors de ROV hybrides). Cette configuration ne concerne toutefois que des robots dont la mission est limitée soit à de l'observation, soit à des missions de courte durée.

La profondeur d'intervention est déterminante dans le choix des technologies utilisées. Dans les profondeurs de plusieurs milliers de mètres, les contraintes imposent de mettre les différents éléments en équiper pression afin de s'affranchir des risques de fuites et d'écrasement. Pour des interventions sur des hauts-fonds (jusqu'à -300 m), ce sont des technologies plus classiques qui sont utilisées.

Une des caractéristiques dimensionnantes, pour les ROV, est également la puissance nécessaire pour effectuer un travail sous-marin. Ainsi, par grands fonds et pour réaliser des interventions sur des ouvrages sous-marins (notamment dans le domaine de l'*offshore* pétrolier), ce sont des bras manipulateurs hydrauliques qui seront privilégiés.

Cette capacité à réaliser des travaux sous-marins constitue tout l'intérêt de ces robots, avec, cependant, une limitation de leur rayon d'action et des contraintes de mise en œuvre, du fait d'un ombilical dont la longueur peut atteindre plusieurs kilomètres et qui peut être, de ce fait, soumis à des forces importantes dues à son propre poids et à la présence de courants (voir la photo 3).

LES AUV

Afin de s'affranchir de ces limitations, les robots sous-marins autonomes (AUV : *Autonomous Underwater Vehicles*) ont vu le jour. N'étant plus reliés à la surface, les contraintes mécaniques disparaissent. Les inconvénients de cet avantage sont les suivants : l'énergie électrique doit être embarquée, mais les capacités de stockage limitent l'autonomie, cela d'autant plus que la consommation des équipe-



Photo 4 : l'Alistar-3000, AUV d'inspection (utilisable jusqu'à 3 000 m de fond)
(Source : ECA).

ments de bord est importante ; il est également nécessaire d'embarquer un système de navigation et des équipements d'autonomie décisionnelle (centrale de navigation inertielle, dispositif de recalage de position en surface par GPS, calculateur de navigation et de guidage sur une trajectoire, systèmes d'évitement automatique d'obstacles...) et, enfin, une communication quasi inexistante entre la surface et le robot lorsque celui-ci est en plongée. La photo 4 représente un AUV d'inspection utilisé par l'industrie extractive *offshore*.

Les technologies électroniques et informatiques actuelles permettent d'apporter des solutions à ces différents inconvénients. On trouve aujourd'hui des centrales inertielles précises et miniaturisées ; les capacités de traitement permettent d'embarquer des logiciels complexes implémentant des techniques relevant de l'intelligence artificielle ; des sonars, souvent issus des technologies militaires, fournissant des données précises sur l'environnement du robot.

L'impossibilité de communications en temps réel est liée au milieu aquatique. En effet, seules les ondes acoustiques se propagent dans l'eau (et encore, avec de grandes limitations). Les débits de transmission restent faibles (à quelques kbits/sec), ce qui ne permet au mieux que de transmettre des états des systèmes ou des ordres basiques, mais en aucun cas des images ou des flux de données. En revanche, lorsque le robot est remonté à la surface, les communications radio redeviennent possibles et permettent de récupérer les données ou de télécharger de nouvelles planifications de missions.

Les capacités de stockage d'énergie constituent une deuxième limitation. Malgré les progrès technologiques notamment avec les batteries lithium-ion, la multiplication des systèmes embarqués accroît les consommations d'électricité et des systèmes de gestion de l'énergie sont nécessaires pour assurer une autonomie, bien souvent requise, allant de 10 à 15 heures. Cette gestion de l'énergie consiste en un couplage au système de navigation permettant d'optimiser les trajectoires en fonction des courants marins et

de minimiser la consommation des propulseurs, ainsi qu'en un système intelligent de mise en marche (ou de mise en veille) des différents équipements, suivant les diverses phases de la mission.

Des expérimentations ont été réalisées avec des piles à combustible, mais elles ne sont pas concluantes, à ce stade, pour des utilisations opérationnelles.

La limitation des communications et les contraintes d'énergie restreignent l'utilisation des AUV à des missions d'inspection et de surveillance ; ceux-ci n'ont pas la capacité d'effectuer des travaux sous-marins nécessitant des manipulations.

LE SONAR, CAPTEUR CLÉ DU ROBOT SOUS-MARIN

La plupart des premiers robots sous-marins ont été équipés de caméras, et celles-ci sont aujourd'hui encore le senseur le plus communément utilisé pour les ROV. Néanmoins, les caméras ne sont utilisables qu'à proximité des objets à observer, ou sur lesquels il faut travailler. La turbidité des eaux et l'absence de lumière (la portée des projecteurs reste limitée à quelques dizaines de centimètres) limitent considérablement leur utilité. C'est donc le sonar (détecteur à ultrasons) qui est le capteur le plus adapté pour une « vision » à distance, dans un milieu quasi opaque. Tel un radar, le sonar permet en effet de désigner une cible, de l'« accrocher » et de la suivre. La technologie des sonars a considérablement évolué, permettant d'obtenir des résolutions très performantes et des probabilités de fausse alarme très réduites. Des technologies spécifiques se sont développées en fonction du type de mesure à réaliser (*Side Scan, Multibeam Echosounder,...*). De même, sur les sonars les plus performants, les « antennes synthétiques » ont remplacé le balayage mécanique. Les logiciels de traitement des signaux sont eux aussi de plus en plus performants ; ils permettent d'afficher des images sous-marines extrêmement précises et d'une



Photo 5 : Image d'une épave d'avion obtenue par post-traitement de signaux sonar
(Source : ECA/ Triton Imaging Inc.).

qualité comparable à celle d'une photographie (voir la photo 5 ci-dessus).

Il n'est plus nécessaire d'être un spécialiste de l'acoustique sous-marine pour interpréter une image issue d'un sonar. La photo 5 en est une illustration : elle montre l'image acoustique d'une épave d'avion (après post-traitement).

LES APPLICATIONS CIVILES

Les applications de la robotique sous-marine sont nombreuses (nous en avons déjà cité quelques-unes). Dans le domaine de l'*offshore* pétrolier, les ROV sont utilisés pour effectuer des travaux sous-marins tels que des interventions sur les têtes de puits, des réparations, des colmatages... La catastrophe de la plateforme de production de la British Petroleum, l'année

dernière, dans le Golfe du Mexique, a montré toute la complexité d'une intervention sur de tels accidents. Les applications des AUV à ce secteur économique sont encore limitées, mais elles se développent, notamment avec l'inspection et la surveillance des réseaux de pipelines sous-marins (mesure des anomalies, par exemple, dans le but de prévenir des catastrophes environnementales), ou encore avec l'aide à la pose de pipelines par caractérisation du point de touche et la vérification que le pipeline a bien été posé dans le sillon prévu.

Dans le domaine de l'océanographie et de l'hydrographie, les AUV sont utilisés pour effectuer des mesures diverses ou pour cartographier des fonds sous-marins. Ainsi, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) dispose d'un AUV, baptisé Daurade, qui est dédié à des missions de REA (*Rapid Environmental Assessment*) (voir la photo 6 ci-dessous).



Photo 6 : L'AUV Daurade du SHOM.
(Source : ECA).

C'est le domaine de la sécurité civile qui participe sans doute le plus de la médiatisation de ces nouvelles technologies. La recherche d'épaves, d'avions abîmés en mer et de leurs enregistreurs de vol en sont les aspects les plus connus (ainsi que nous l'avons déjà évoqué à propos de la recherche des boîtes noires du vol AF 447 Rio-Paris ou encore de la catastrophe aérienne de Sharm El-Cheikh, en Egypte). Cependant, d'autres applications ont vu le jour : ainsi, la Gendarmerie Nationale utilise fréquemment un ROV lors de recherches (dans des plans d'eau) de personnes disparues, EDF utilise de petits ROV pour inspecter les piscines de ses réacteurs nucléaires et de ses barrages hydrauliques, afin de vérifier l'absence d'anomalies. Nous avons développé, chez ECA, un ROV très particulier, le Rovingbat (voir la photo 7), qui est capable de se plaquer contre la coque d'un navire et de s'y déplacer (grâce à des chenilles) afin de réaliser des missions très diverses et d'éviter ainsi d'avoir recours à des plongeurs : c'est le cas avec l'inspection des coques pour la mesure des corrosions ou la détection de la présence d'engins explosifs ou, plus simplement, le nettoyage des concrétions afin d'éviter une mise en cale sèche.

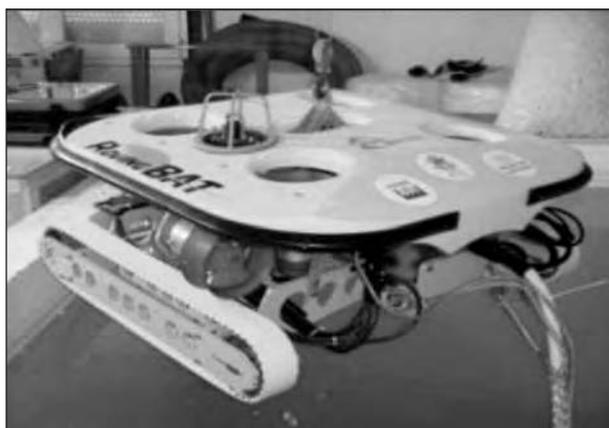


Photo 7 : Le ROV Roving Bat.
(Source : ECA).

Un mot des applications militaires qui financent une bonne partie de la R&D nécessaire à la mise au point de ces robots. L'usage le plus ancien est celui de la guerre des mines. De nombreuses mines sous-marines ont été (et sont encore) déposées par des Etats pour protéger ou empêcher l'accès à des zones sensibles : ports, installations militaires, chenaux d'accès, passages maritimes. Les mines les plus modernes, réagissant à des signatures acoustiques ou magnétiques de navires, sont peu accessibles aux techniques de dragage. Il y a plus de trente ans, l'idée est née d'envoyer des robots les neutraliser. L'un des premiers de ces robots à avoir été utilisé est le PAP (Poisson Autopropulsé Piloté) mis au point par ECA au début des années 1980 (voir la photo 8).

Ce robot télé-opéré grâce à une liaison coaxiale (puis à fibre optique) avec un navire chasseur de mines déposait une charge explosive près de la mine à neutraliser. La mise à feu à distance de cette charge neutralisait la mine, par influence, et donc sans exposer la vie de plongeurs démineurs. Le PAP a été vendu à près de 500 exemplaires, et a été utilisé par de nombreuses marines de par le monde, certaines continuant de l'exploiter. Depuis lors, la technologie a évolué, avec les concepts de *Mine Killers*, des robots « kamikazes » qui reprennent le même principe, à ceci près qu'ils explosent avec la mine (voir la photo 9 de la page suivante). En revanche, ils sont plus maniables, et moins onéreux.

La localisation des mines a également progressé. La localisation classique, à partir d'un sonar de coque ou d'un sonar tracté, présente l'inconvénient d'exposer un navire. L'utilisation d'AUV, seuls ou en coopération avec un USV (*Unmanned Surface Vehicle*), est un nouveau concept qui se développe aujourd'hui. C'est l'objet du plan d'étude amont Espadon, conduite par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et réalisée en coopération entre le groupe DCNS, Thales Underwater Systems et ECA en vue de valider ces concepts innovants (qui seront déployés au sein de la Marine Nationale à l'horizon de 2017).



Photo 8 : Le PAP, mis en œuvre sur un navire-chasseur de mines.
(Source : ECA).

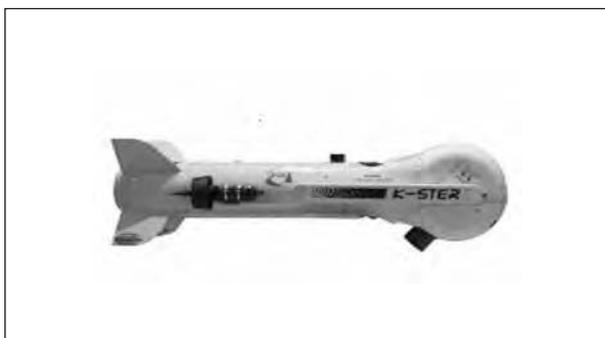


Photo 9 : Le *mine-killer* K Ster.
(Source : ECA)

Ces études (réalisées en France, mais également dans d'autres pays) permettent de progresser considérablement dans les technologies mises en œuvre : sonars, énergie, propulsion, navigation autonome... Il s'agit là, typiquement, de technologies duales : les retombées dans le domaine civil concernent toutes les applications déjà mentionnées, et il en reste sans doute encore bien d'autres à imaginer.

LE MARCHÉ DES ROBOTS SOUS-MARINS

C'est un marché de niche, sur lequel le nombre des acteurs est limité. Ce sont néanmoins les Européens qui sont les plus présents sur ce secteur, sans doute du fait des champs pétroliers de la Mer du Nord, et aussi parce que, dans le domaine militaire, les marines européennes sont sensibilisées (depuis la Deuxième guerre mondiale) aux problèmes du déminage de leurs zones côtières.

Les constructeurs de robots sous-marins sont soit des systémiers qui ont développé de tels équipements pour répondre à leurs besoins propres (Kongsberg (Norvège), SAAB (Suède), BAe (Royaume-Uni) ou STN Atlas (Allemagne)) ou des sociétés spécialisées

dans les technologies de la robotique (ECA (France, avec une offre large d'AUV, d'USV, de ROV, de *Mine-killers*, mais aussi de robots terrestres), ISE (Canada - AUV et ROV), Hafmynd (Islande)) ou encore quelques fabricants uniquement spécialisés dans la fabrication de ROV à usage civil.

A côté de ces quelques industriels, de grands clients font progresser la technologie soit par le financement de programmes de développement de démonstrateurs (c'est le cas de la DGA, en France), soit parce qu'ils sont eux-mêmes des utilisateurs et qu'ils disposent d'équipes de R&D qui font émerger de nouveaux concepts (c'est le cas notamment de l'Ifremer).

Les utilisateurs finaux ont déjà été cités plus haut, pour la plupart. Il convient cependant de mentionner, dans le secteur de l'industrie pétrolière *offshore*, le rôle des sociétés de services (telles que Technip, Bourbon, Oceaneering,...), qui investissent dans ce type d'équipement pour réaliser leurs prestations au profit des compagnies pétrolières, lesquelles jouent plutôt dans ce domaine le rôle de prescripteur.

Ce marché est loin d'avoir atteint sa maturité, il est donc difficile de l'évaluer et de positionner les différents acteurs. D'ailleurs, rares sont les spécialistes indépendants des études de marchés à s'être penchés sur le sujet. Néanmoins, les publications font état de volumes annuels mondiaux de l'ordre de quelques dizaines de millions d'euros, pour les ROV. En ce qui concerne les AUV, le marché civil est encore naissant, et les estimations sont de l'ordre de 20 à 30 millions d'euros/an, avec cependant un taux de croissance élevé (de 15% par an, à partir de 2015).

En conclusion, la robotique sous-marine n'en est encore qu'à ses débuts. Mais, d'ores et déjà, les applications imaginables sont nombreuses. Les problèmes techniques à résoudre pour faire progresser cette discipline sont variés, et enthousiasmants, pour de jeunes ingénieurs. Dans ce secteur, les moyens de financement de la R&D existent et ne sont pas négligeables. Nul doute que les grands fonds sous-marins constitueront notre « Nouvelle Frontière »...

À propos d'ECA

Créée en 1936, l'entreprise ECA est connue partout à travers le monde grâce à son robot sous-marin de déminage, le PAP (Poisson Autopropulsé Piloté), utilisé par plus d'une vingtaine de marines militaires. Son entrée en bourse (en 2004) lui permet de se développer dans le domaine plus large de la robotique pour les milieux hostiles : robotique sous-marine, robotique de surface, robotique terrestre, robotique nucléaire. ECA développe également ses activités dans des secteurs de technologies connexes et notamment dans la simulation et dans les équipements de sécurité. Son modèle économique est fondé sur une R&D soutenue, une forte présence à l'export et une politique orientée produits. ECA réalise 120 millions d'euros de chiffre d'affaires ; son effectif de 600 salariés est composé essentiellement d'ingénieurs et de techniciens.

La valeur ajoutée (en termes de qualité, de sécurité...) de la robotique dans l'industrie aéronautique

Aujourd'hui, un nouveau scénario mondial est en train d'émerger pour l'industrie aéronautique. La Chine, qui fait partie désormais des toutes premières puissances, investit dans la création d'une industrie aéronautique nationale forte. Son objectif principal étant de pouvoir représenter une forte concurrence face aux acteurs actuels. Pour faire face à ces nouveaux défis, les deux leaders mondiaux que sont Airbus et Boeing doivent améliorer tous les ans leur compétitivité en investissant dans la recherche et le développement de nouvelles technologies (carbone, propulsion, ailes) et de nouvelles stratégies de production (comme le *lean manufacturing*).

Par Pierre-Laurent KOCIEMBA*

INTRODUCTION

La programmation hors ligne (*off-line programming*) est un exemple de cette stratégie.

Jusque dans les années 1980, les plans d'avions de référence (ensemble, sous-ensemble) se présentaient sous forme « papier » et étaient signés manuellement par les ingénieurs en chef.

Pour les besoins de l'automatisation (en commande tant numérique que robotique), il s'est avéré nécessaire de saisir les coordonnées des trajectoires du robot, soit manuellement, soit par apprentissage (sur un modèle) :

- la programmation par saisie manuelle sur le plan était utilisée pour les opérations les plus classiques (en 2, 3, 4 ou 5 axes),
 - la programmation par apprentissage s'adressait à des applications plus complexes (en 5, 6, voire 7 axes) avec des gestions d'espaces d'une accessibilité difficile.
- L'arrivée de la CAO, puis plus généralement celle de la CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur - avec la théorie de Pierre Bézier sur les courbes à

* Président de NDT-Expert.

pôles), ont permis d'optimiser et d'automatiser ces préparations de programmation, l'idée étant de travailler directement sur le modèle CAO de la pièce (ou d'un assemblage de pièces) à traiter et de discrétiser un ensemble de points, que le robot ou la machine à commande numérique allait devoir suivre en fonction de leurs propres modes de pilotage.

C'est pourquoi la généralisation des études aéronautiques par des plans CAO qui sont devenus des plans-références a permis :

- d'automatiser la programmation par saisie manuelle, sur le plan, en développant des « post-processors », qui sont en fait une matrice de passage entre le référentiel « dessin CAO » et le référentiel « machine » prenant en compte la cinématique de la machine ;
- de faciliter la programmation par apprentissage en utilisant le modèle de la pièce CAO associé au modèle architecture machine, qui permet de programmer les trajectoires en simulant les accessibilités et en gérant l'ensemble des différentes tâches de l'espace machine sans utilisation de la machine réelle (et donc sans immobilisation de l'outil de production).

Cette approche a permis d'investir dans des améliorations dans la préparation de la production pour être rapidement en mesure de réduire les coûts et d'améliorer la productivité. Cela a permis l'introduction de nouveaux concepts, tels que le *Product Lifecycle Management* (PLM) et le *Digital Manufacturing*.

Le *Product Lifecycle Management* (PLM) est le processus de gestion du cycle de vie du produit et de ses données techniques, depuis sa conception et sa fabrication, jusqu'à sa maintenance et à son recyclage.

Les avantages du PLM incluent :

- une réduction du *time to market* ;
- des économies rendues possibles par l'intégration complète des *workflows* d'ingénierie ;
- une amélioration de la qualité produit ;
- une réduction des coûts de prototypage ;
- la réalisation d'économies grâce à la réutilisation des données d'origine ;
- un cadre pour l'optimisation des produits ;
- enfin, une réduction des déchets.

Le « *Digital Manufacturing* » est la capacité de décrire tous les aspects du *process*, depuis la conception jusqu'à la fabrication, en utilisant des outils incluant la CAO, la CFAO, ainsi que les logiciels d'analyse et de simulation.

Ainsi, la simulation de cellules robotiques s'intègre dans cet environnement *PLM/ Digital Manufacturing*. Les robots sont ainsi facilement reprogrammables pour faire face à de nouveaux *process* de production. Les changements de conception peuvent être mis en œuvre plus rapidement et efficacement, ce qui permet de réduire les délais de livraison.

Dans l'industrie aéronautique, les solutions d'automatisation en cours pour l'assemblage des aéro-structures sont basées sur de grandes machines dédiées (telles

que les machines à riveter), la majorité des composants individuels étant assemblés manuellement avant le processus de rivetage.

L'utilisation excessive du rivetage manuel peut avoir également des implications sur la santé et la sécurité. L'assemblage manuel coûte énormément de temps pour le processus et impose de grands espaces de production (du fait du nombre important de postes de travail individuels).

Ces facteurs ont entraîné un regain d'intérêt pour le développement d'approches plus flexibles de l'automatisation.

DES ROBOTS POUR DES APPLICATIONS DE MANUFACTURING DANS L'AÉRONAUTIQUE

Le soudage au laser automatisé de pièces aéronautiques

La fabrication des pièces pour l'industrie aéronautique impose de sévères exigences de qualité qui ne peuvent être satisfaites, dans la majorité des cas, que grâce à la supervision du processus de fabrication par un personnel hautement qualifié.

Le suivi des joints au laser rend possible l'automatisation du soudage au laser de pièces aéronautiques.

Le perçage robotisé de trous, pour de grandes structures d'avions

Des systèmes robotisés composés de robots à six axes se déplaçant sur des rails permettent d'optimiser le perçage usiné de trous sur de grosses pièces d'avions. Un capteur, monté sur le poignet du robot, est utilisé pour localiser les zones de référence de la pièce de l'avion et, par conséquent, l'emplacement des trous à usiner.

Le système mesure les dimensions, la position et l'orientation de chaque zone de référence et communique ces informations au robot, qui finalise le calcul de la position de chaque trou à percer, et se positionne en conséquence.

Le soudage de pièces, dans l'aérospatial

L'implantation de l'automatisation et/ou de la robotisation dans l'industrie aérospatiale est soumise à deux contraintes :

- la production de faibles volumes,
- et un très haut niveau de précision requis.



Figure : Inspecteur d'aéronefs.

Celles-ci peuvent être facilement surmontées en mettant en œuvre des dispositifs de suivi des joints d'une grande précision.

Les systèmes de suivi des joints montés sur une machine de soudage ont pour principal avantage une grande flexibilité. Cela a permis à l'industrie aérospatiale d'améliorer de façon significative sa productivité et la qualité de ses produits.

Le robot doit assurer deux fonctions essentielles : assurer la qualité et la répétabilité.

Le système robotisé doit pouvoir suivre et contrôler la variabilité des pièces et des processus. Pour obtenir des résultats robustes et précis, le système robotisé doit être pourvu de fonctions complexes et nombreuses, telles que :

- le contrôle de force,
- la compensation active (*compliance*),
- l'usinage adaptatif,
- l'usinage en boucle fermée,
- le calibrage,
- le capteur laser,
- le système de vision,
- la vérification exploratoire (*probing*), etc.

Voici certains des avantages de l'acquisition de systèmes de finition robotisés :

- une réduction directe du coût de la main-d'œuvre ;
- une amélioration de la qualité et de la cohérence en éliminant la subjectivité inhérente à l'humain ;
- une ergonomie et une sécurité améliorées ;
- une augmentation du débit ;
- la capacité à gérer plusieurs types de pièces, avec des changements rapides ;
- la réduction des coûts d'abrasif (pouvant aller jusqu'à 75%) ;

- l'inspection et la validation automatisées ;
- l'usinage de nouvelles pièces facilité.

DES ROBOTS ADAPTÉS AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DANS L'AÉRONAUTIQUE

Le Contrôle Non Destructif (CND) est une technologie qui permet de contrôler la « santé » de la pièce, c'est-à-dire sa matière, sans la détruire et d'en faire un diagnostic en termes d'usure mais aussi de sa mise en œuvre lors de sa fabrication (collage, composites,...). Cette technologie est qualifiée de la conception, intégrée dès la fabrication, jusqu'à la mise en service de l'avion pour les opérations de maintenance.

Aujourd'hui, l'utilisation du CND est un type d'inspection en forte croissance compte tenu de la prédominance des pièces composites dans les structures des avions. Elle est la seule méthode efficace et précise de contrôle de structure sans destruction de la pièce.

La robotisation des essais non destructifs sera ainsi un enjeu majeur pour les années à venir dans le monde de l'aéronautique. Les constructeurs aéronautiques étant amenés à réduire leurs coûts, ils doivent automatiser leurs outils non seulement de production, mais aussi de contrôle. Une solution consiste pour eux à s'orienter vers des solutions robotiques qui soient à la fois mobiles et multi-procédés.

De plus, la fabrication de pièces de plus grandes dimensions et la conception de formes et de structures de plus en plus complexes obligent le contrôleur humain à être assisté d'un robot dans ses expertises. Le premier des enjeux de cette robotisation reste l'inter-

façage avec les outils de simulation de procédés robotiques et le modèle numérique de la pièce à contrôler.

Ceux-ci permettent le dimensionnement des installations, l'évaluation de leur capacité à effectuer un contrôle et la programmation des trajectoires.

Le second enjeu est l'association de capteurs d'efforts et de mesures dimensionnelles aux opérations de contrôle, qui apportera un asservissement tant local que global à la réalité de l'environnement à contrôler (ce que la simulation ne peut fournir complètement).

L'inspection visuelle d'un fuselage

Une inspection visuelle agrémentée d'une inspection instrumentée permet de détecter visuellement des

problèmes apparents dans la structure d'un avion et/ou dans sa sous-structure de soutien. Une inspection dite majeure doit être réalisée, sur une base commerciale, tous les six ans, soit après 24 000 heures de vol ou 12 000 cycles de décollages/atterrissages. Aujourd'hui, ce type d'inspection est majoritairement visuel complétée par une inspection non destructive (NDT) (c'est-à-dire d'une inspection réalisée à l'aide d'instruments électroniques, un type d'inspection qui tend à se généraliser).

Les sondes à courants de Foucault et à ultrasons sont des technologies NDT (*Nondestructive testing*) utilisées pour inspecter un fuselage. Cette inspection est un des axes de recherche en matière d'automatisation tant pour sa manipulation que pour son diagnostic et le traitement des données qui en résultent en liaison avec le modèle numérique (CAO) de la pièce à contrôler.

L'application robotisée de peintures dans l'industrie automobile

Des solutions permettant des économies d'énergie grâce au concept de charge interne

L'application automatisée des peintures (ici, dans l'industrie automobile) doit s'adapter aux possibilités qu'offrent les robots afin d'optimiser l'équation entre la vitesse d'application (liée au robot) et le volume pulvérisé (lié au pulvérisateur). La solution robotisée Accubell 709 Evo, de SAMES, a profondément évolué afin de répondre aux nouvelles utilisations.

Par Cédric PERRES et Asbed KECHICHIAN

Le système d'application de peinture robotisé doit fournir une réponse aux requis suivants :

- l'adaptation de la forme du jet à chaque exigence,
- le traitement de gros volumes,
- une grande vitesse d'application (tout en conservant la stabilité du jet),
- un taux de rendement élevé,
- un temps de réponse rapide,
- la régularité du film de peinture déposé,
- un taux de rebus minimisé,
- la symétrie du faisceau de pulvérisation par rapport à la rotation,
- la compacité du corps du pulvérisateur pour atteindre plus facilement les surfaces à peindre.

Par ailleurs, l'un des bénéfices les plus attendus d'une ligne de peinture robotisée est la répétabilité de la qualité de finition. En effet, là où des aléas peuvent intervenir dans l'application manuelle de la peinture, le robot vient les pallier par une parfaite fidélité dans

la répétition du même geste assurant ainsi un niveau de qualité similaire à toute la série des pièces traitées. Pour répondre à ces critères, le concept de base de la technique d'application repose sur le principe du réservoir de peinture embarqué.

LE SYSTÈME ACCUBELL

Le système Accubell est un pulvérisateur avec charge électrostatique interne qui a été développé pour l'application électrostatique de peintures hydrosolubles. Il est composé d'un réservoir de peinture indépendant équipé d'une turbine intégrée, d'une cascade haute tension ainsi que d'un piston (voir la figure 1).

* Directeur général de SAMES Technologies, Innovalley - Meylan (Isère).

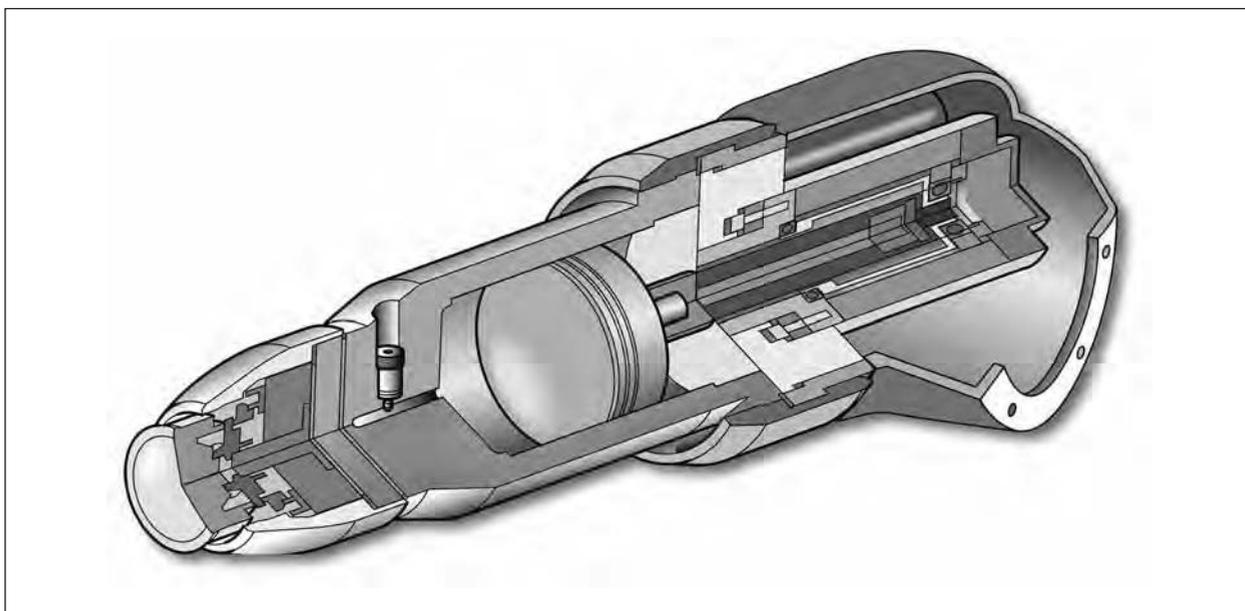


Figure 1 : Schéma d'Accubell Evo.

Le « bol » (une coupelle, en tête du pulvérisateur, dédiée à l'éclatement de la peinture) est entraîné par une turbine actionnée par de l'air comprimé. La turbine est composée d'un rotor et d'un stator fixe : le rotor est entraîné sans contact, grâce à un palier à air magnétique. Sous l'action de deux aimants à pôles opposés (l'un étant intégré dans le rotor et l'autre étant dans le stator de la turbine), le rotor est centré dans l'axe de rotation. Grâce à ce dispositif, le palier est capable d'absorber de très fortes forces dynamiques, et donc d'accélérer (ou de ralentir) avec des temps de réaction infimes.

La chemise du piston sert de réservoir à peinture : elle est remplie en continu de la quantité de peinture nécessaire pour la pièce suivante se trouvant dans la station d'échange de pulvérisateur, ou dans une station d'accostage. Pendant le *process* d'application, il n'y a aucun lien avec l'alimentation en peinture afin que soit assurée la séparation entre la peinture chargée en électricité (dans le pulvérisateur) et la pièce (mise à la terre) dans le système d'alimentation.

Le dosage de la peinture se fait grâce à un piston, qui est contrôlé par un servomoteur. Un capteur micro enregistre le nombre de tours du moteur, calcule la position et la vitesse du piston, et contrôle également le débit de peinture. Tout cela revient à effectuer un réglage volumétrique général fonctionnant en circuit fermé. Le servomoteur est fixé au robot. La connexion mécanique au piston est lâche et se matérialise par un axe. Il en résulte qu'au travers du moteur, une force de pression adéquate est exercée sur le piston.

La technologie supplémentaire (développée dans l'Accubell 709 Evo) consiste en un *booster* qui vient augmenter la pression délivrée à la peinture, à l'intérieur du système Accubell. Le débit est ainsi sensiblement augmenté, réduisant les temps de transfert (et donc d'immobilisation du robot) (voir les figures 1bis et 2).

LA FAMILLE DES BOLS HI-TE (*HIGH TRANSFER EFFICIENCY*) ET LES JUPES D'AIR PROPRES



Figure 1bis : Photo d'Accubell Evo.

Toutes les unités d'application sont équipées des mêmes types de bol et de jupe d'air. La combinaison jupe d'air/bol crée un jet d'air tourbillonnant (voir la figure 3 : ici, il s'agit d'une jupe d'air vortex qui agit avec l'une des directions de rotation de l'air de la jupe du bol et influe efficacement et rapidement sur le jet de peinture). Le bol est cranté et son diamètre peut

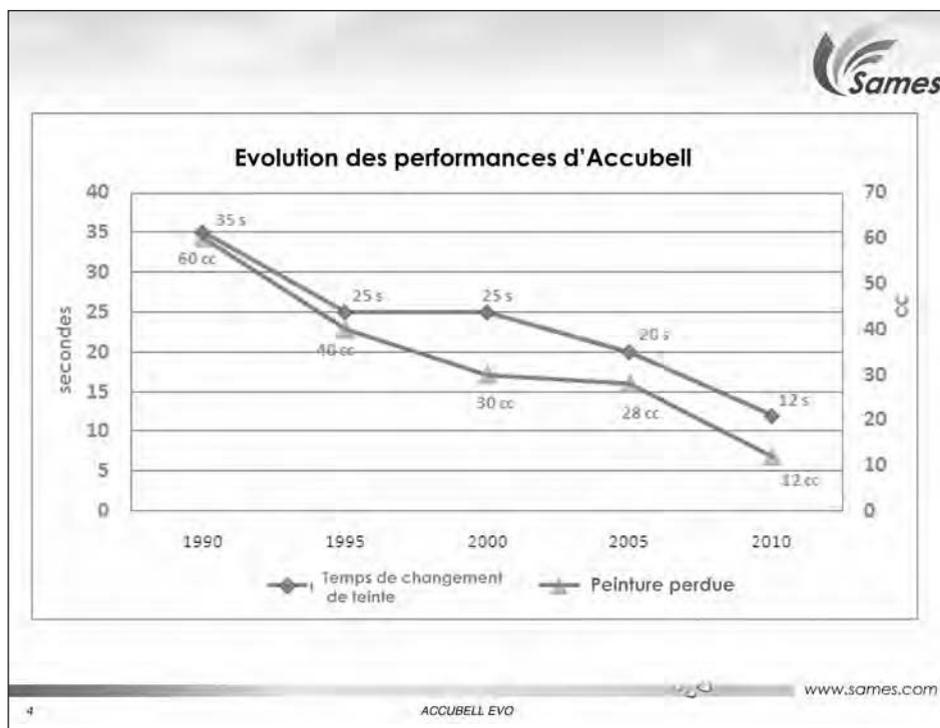


Figure 2 : Graphique du gain de temps de transfert.

être de 35, de 50, de 65 ou encore de 80 millimètres. La coupelle du bol est identique, que ce soit pour une application complète, pour celle d'apprêts ou pour celle de vernis.

De nouvelles jupes d'air développées par Sames permettent désormais de rallonger considérablement le temps d'utilisation entre deux nettoyages (voir les figures 4A et 4B). Ces jupes d'air sont monoblocs, elles permettent un démontage facile et rapide du bol sans démontage de la jupe extérieure. Enfin, un anneau d'air, dit de « compensation », évite le retour des particules de peinture dans les zones de creux de la tête du pulvérisateur.

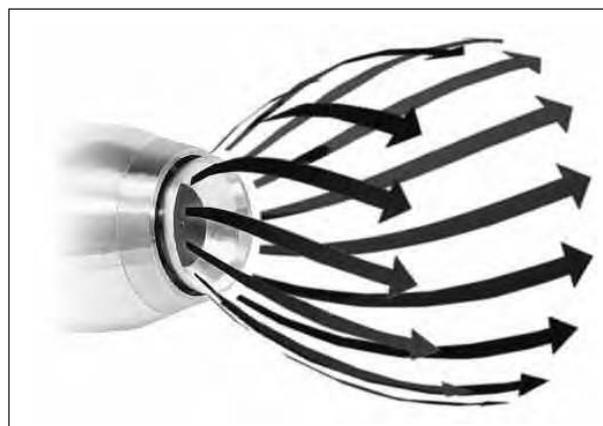


Figure 3 : Coupelle et jupe d'air vortex.

LE VOLUME DE PEINTURE DISTRIBUÉ

La flexibilité des robots a conduit à une réduction des unités de pulvérisation : en comparaison avec une installation comportant neuf pulvérisateurs (qui était le standard des années 1990), on peint désormais les automobiles avec quatre robots par station, générant ainsi une réduction significative des coûts de production (du fait du nombre réduit de robots à acheter, à alimenter et à entretenir). Pour aller plus loin, les efforts sont orientés vers la poursuite de la réduction du nombre des robots afin d'optimiser les coûts d'investissement. Ces deux points impliquent que le volume de peinture pulvérisée doit être augmenté de manière significative : l'augmentation du débit utile de peinture par pulvérisateur permet de réduire le nombre de pulvérisateurs, et donc celui des robots nécessaires. L'incidence de l'air de jupe sur le jet de peinture, ainsi que la stabilité de celui-ci jouent ici un rôle important : en effet, le taux de rendement (pein-

ture déposée/peinture pulvérisée) doit toujours être optimal afin d'assurer la rentabilité économique de la ligne de peinture.

A cette fin, des recherches ont été menées (en coopération avec des fabricants de peinture et des constructeurs de robots applicateurs), qui ont porté principalement sur les volumes maximaux de peinture pulvérisés. Au cours de séries d'essais, les exigences spécifiques imposées aux robots en termes de qualité, quant à la régularité du film déposé, au degré de brillance et au rendu des couleurs, ont été déterminantes pour le résultat des évaluations. Des volumes distribués allant jusqu'à 1 000 cc/min (pour les peintures bases) ont été atteints, avec un taux de rendement d'environ 80 %.

Les tests menés ont permis de constater que les pulvérisateurs sont en mesure d'appliquer des volumes de peinture importants. Néanmoins, le robot doit répondre à de nouvelles exigences pour parvenir à des résultats extrêmes.



Figure 4A : Bol Hi-Te (High Transfer Efficiency).



Figure 4B : Jupe d'air associée.

C'est le défi qu'a relevé l'Accubell 709 Evo. Ce robot applicateur permet en effet de pulvériser un volume de peinture plus important tout en gardant un niveau de finition excellent. La réduction du temps de pulvérisation impacte directement la consommation d'énergie et permet ainsi de réaliser d'importantes économies.

Par ailleurs, la maîtrise de la consommation d'énergie est elle aussi possible grâce à la technologie du *booster*, qui porte le temps de changement de teinte à 12 secondes.

Enfin, la robotisation permet une gestion optimale des quantités de peinture utilisées. Les gains en produit sont conséquents, permettant là aussi des économies importantes.

L'APPLICATION DE PEINTURE À L'INTÉRIEUR DE L'HABITACLE DES AUTOMOBILES

L'application sur des zones intérieures ou rainurées des automobiles au moyen de robots est l'un des

points difficiles de l'automatisation complète des lignes de peinture. On aura à l'avenir de plus en plus souvent recours à l'installation de pulvérisateurs en intérieur afin de profiter de leurs avantages, tels que leur taux de rendement, la symétrie de leur jet par rapport à la rotation (simple programmation) ou la standardisation des applicateurs.

Cette technique a été mise en service dans le cadre du projet Renault Douai. Le recueil d'expérience Sames effectué sur différentes installations permet de démontrer qu'une application automatique des peintures à l'intérieur des véhicules permet un gain de 40% sur les bases par rapport à une application manuelle, un gain pouvant aller jusqu'à 55%, pour le vernis. Cette technique est d'autant plus acceptée par les peintres concernés que leur travail (assez pénible) n'est pas purement et simplement supprimé, mais au contraire transformé en des tâches comportant une plus haute qualification (telles les opérations de maintenance des robots) (voir les figures 5A et 5B).

S'appuyant désormais sur cette tendance « robotisée », avec le couple « haute vitesse = hauts débits », Sames se concentre toujours plus sur la charge interne, qui doit garantir, même avec de gros volumes de peinture mis en œuvre, une très bonne efficacité de transfert, sans contraintes de contournement et sans tuyaux de peinture risquant de se retrouver dans la cinématique du robot. Par ailleurs, avec le robot Accubell 709 Evo, il est possible de satisfaire à des temps de changement de teinte toujours plus courts et ainsi de réduire au minimum le temps nécessaire et l'énergie dépensée.

Pour toutes ces raisons, il faut s'attendre à ce que, dans le futur, on fasse de plus en plus appel à des robots toujours plus performants pour l'application de peinture sur des carrosseries et sur des pièces automobiles.



Figure 5A : Application robotisée sur les intérieurs des véhicules produits sur le site de Renault-Douai.



Figure 5B : Application robotisée sur les intérieurs des véhicules produits sur le site de Renault-Douai.

La problématique de l'utilisation des robots industriels en matière de sécurité

La robotique connaît depuis quelques années une expansion importante. Les applications faisant appel à des robots sont de plus en plus variées et les limites physiques entre l'homme et le robot diminuent. De nouvelles problématiques liées à la sécurité et à la prévention des accidents du travail voient donc le jour dans ce domaine, ce qui nécessite l'identification, puis la réduction des risques associés à l'utilisation de ces robots. Il est important d'imaginer les systèmes qui permettront à l'homme de travailler en toute sécurité avec des robots. La première partie de l'article propose un premier état de l'art des travaux autour de la sécurité en robotique industrielle, ainsi qu'une étude préliminaire des accidents du travail causés par les robots. Des solutions permettant d'améliorer la sécurité seront analysées dans la deuxième partie de l'article.

Par Adel SGHAIER et Philippe CHARPENTIER*

INTRODUCTION

Depuis quelques années, on assiste à des progrès scientifiques et technologiques dans les différents domaines d'application de la robotique : mécanique, électronique, automatique et informatique. Essentiellement cantonné au domaine manufacturier pour réaliser des tâches complexes, pénibles et/ou répétitives ou pour opérer dans des milieux inaccessibles à l'homme (exploration planétaire, nucléaire,...), le spectre des applications envisageables s'élargit aujourd'hui

d'hui considérablement [1, 2]. Outre des applications industrielles de plus en plus nombreuses et variées, on trouve maintenant des robots de service, d'assistance ou encore d'aide aux handicapés ou aux personnes âgées.

Les prévisions laissent présager d'une forte croissance du marché des systèmes robotisés pour les décennies à venir, qu'illustre la figure 1.

Nombreuses sont les applications qui font sortir les robots des cages dans lesquelles ils étaient encore récemment enfermés. Cette suppression des barrières

* Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

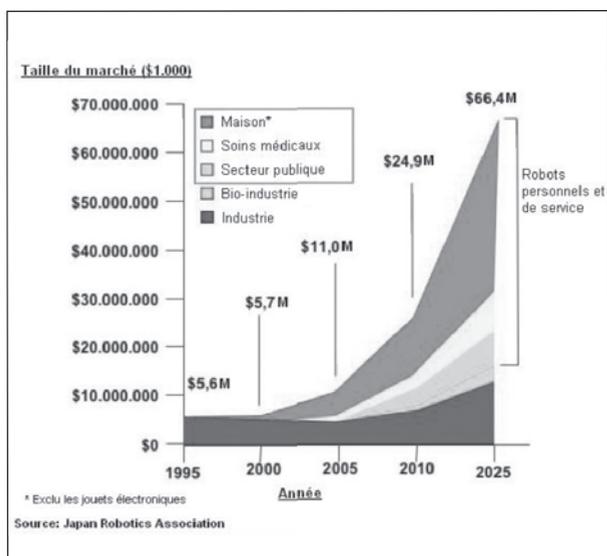


Figure 1 : Croissance du marché des systèmes robotisés (extrait du document EUROP – juillet 2006)

physiques jusqu'alors utilisées pour protéger les hommes (opérateurs ou tiers) des mouvements dangereux des robots a été rendue possible par les évolutions des dispositifs de protection [5].

Les robots deviennent coopératifs : ils sont conçus pour interagir avec l'homme au sein d'un espace de

travail partagé dans lequel robot et humain peuvent réaliser des tâches simultanément [3].

La sécurité des opérateurs pose dès lors des problèmes d'un genre nouveau dus à la proximité entre le robot et l'opérateur, au sein d'un même espace qui n'est ni délimité ni protégé.

LES RISQUES EN ROBOTIQUE INDUSTRIELLE

L'utilisation d'un robot pour réaliser une tâche industrielle, comme c'est le cas pour toutes les machines, peut générer des accidents du travail et des maladies professionnelles. Ces dangers peuvent survenir aussi bien lors de l'utilisation du robot que lors de sa maintenance ou de son réglage.

Phénomènes dangereux liés à l'utilisation des robots industriels

L'utilisation de robots industriels comporte des risques pour l'homme. Dans le cadre de l'analyse du risque des robots industriels, il est nécessaire d'identi-



© Jean-Claude Moschetti/REA

« Nombreuses sont les applications qui font sortir les robots des cages dans lesquelles ils étaient encore récemment enfermés ».



Figure 2 : Accidents du travail liés à l'utilisation de robots

fier les différents phénomènes dangereux qui sont associés à leur utilisation.

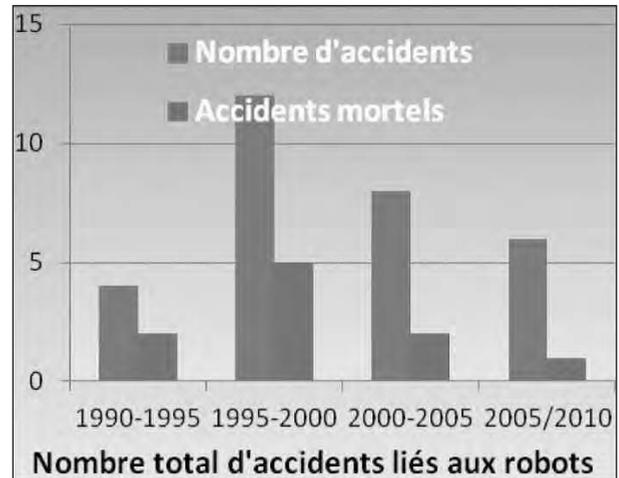
On retrouve une identification détaillée des phénomènes dangereux (sources potentielles des dommages) liés à l'utilisation des robots industriels dans l'annexe A de la norme EN ISO 10218-1 relative aux exigences de sécurité des robots industriels [4]. Dans ce document, ces phénomènes dangereux sont répartis au sein de dix catégories suivantes :

- mécaniques ;
- électriques ;
- thermiques ;
- liés au bruit ;
- à des vibrations ;
- liés à des radiations ;
- liés à certaines substances ;
- liés à l'ergonomie ;
- associés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée ;
- enfin, des combinaisons des différents risques précités.

Les accidents de travail liés à l'utilisation des robots

L'analyse de la base de données publique des accidents du travail de l'Institut National de Recherche et Sécurité (INRS) - la base EPICEA (1) -, permet d'identifier trente accidents du travail liés à l'utilisation de robots industriels entre 1990 et 2010, la totalité de ces accidents étant liés à des phénomènes dangereux d'ordre mécanique. En effet, du fait du mouvement rapide d'un robot et des forces exercées par ses parties mobiles, une collision entre un homme et ce robot peut avoir des conséquences dramatiques. Sur les trente accidents recensés, dix accidents mortels sont à déplorer (voir la figure 2).

Il est intéressant de classer ces accidents suivant leurs causes afin de mieux identifier les sources de risques liés à l'utilisation des robots en milieu industriel. En première approche, les origines des phénomènes dan-



gereux des accidents de la base EPICEA sont les suivantes :

- **Accès non autorisé** : il s'agit de la cause d'accident qui revient le plus souvent. Les accès à l'espace de travail du robot sont conçus de telle façon que l'opérateur peut pénétrer dans la zone dangereuse sans utiliser les accès sécurisés ou en désactivant les dispositifs de sécurité présents.
- **Erreur liée à l'utilisation** : ces accidents impliquent souvent des personnes peu expérimentées.
- **Conception incorrecte des protecteurs et des dispositifs de sécurité** : les dispositifs de sécurité sont soit absents soit mal installés.

Bien que n'étant pas exhaustive, la base de données EPICEA permet de se faire une idée des types d'accidents du travail causés par des robots industriels. On constate que la plupart de ces accidents sont dus à une collision entre l'utilisateur et une partie mobile du robot. Nous allons donc nous focaliser dans la suite de cet article sur ce type d'accident.

ÉTAT DE L'ART DE LA PRÉVENTION EN ROBOTIQUE

Travaux au niveau des institutions de sécurité

Des organismes de recherche en sécurité se penchent sur la problématique de la sécurité des robots. C'est ainsi que 20 % des communications des deux dernières éditions du congrès SIAS (2) (2007 - 2010) ont porté sur la robotique, montrant l'investissement consenti par l'industrie manufacturière pour traiter les risques liés à l'utilisation des robots.

(1) Étude de prévention par l'informatisation des comptes rendus d'enquêtes d'accidents du travail.

(2) Safety of Industrial Automated Systems.

Recherche de base	USA	Europe	Japon/Corée
Mobilité	****	**	*
Perception	****	***	***
Autonomie	****	***	***
Interaction avec l'homme	***	**	*
Manipulation	**	*	*
Applications			
Industrie	*	**	***
Service	**	****	***
Robotique	*	**	****

Tableau 1 : Les axes de recherche selon les continents d'après le WTEC (Activité proportionnelle au nombre d'étoiles)

Le Centre Technique de Recherche finlandais VTT a, par exemple, réalisé une étude des accidents dus aux robots industriels survenus en Finlande [5]. Sur les 67 accidents dénombrés, 55 % sont survenus lors d'opérations annexes à la production : réglage et programmation, dépannage, maintenance, alors que seulement 13 % concernaient la production. 21 % des accidents avaient été provoqués par les mouvements du robot, 39 % par la manipulation de charges ou d'outils. Le VTT a relevé des origines techniques pour certains accidents, par exemple, une protection inadéquate lors d'une intervention à l'intérieur de la zone d'évolution hors des phases de production, mais aussi des origines liées à l'utilisation du robot (par exemple, dans le cas d'un opérateur surpris par un mouvement normal du robot). Dans la continuité de ces travaux, le VTT a élaboré une stratégie de prise en compte de la sécurité pour différentes configurations de robots en fonction des possibilités d'interactions entre l'homme et le robot [5].

Le NPO (3) a proposé lors de l'édition 2010 du congrès SIAS une méthodologie d'analyse de risque adaptée pour tenir compte de l'impossibilité d'isoler le robot, en particulier les robots de service [3]. La « coexistence » entre l'homme et le robot y est abordée *via* les aspects techniques, éthiques, économiques et sociaux. Le JNIO-SH (4) s'est pour sa part associé à la société OPTEX pour étudier la faisabilité d'un système de vision spécifiquement dédié à la détection de personnes placées dans des situations de collaboration avec un robot [6].

L'IFA (5) a, quant à lui, publié en 2009 un guide pour la conception des lieux de travail dans lesquels évoluent des robots collaboratifs [7]. Des recommandations y sont listées portant sur quatre aspects : technologique (lié au matériel du robot), médical et biomédical (on y trouve des critères de blessures définis sur la base d'une étude bibliographique), ergonomique (un aspect qui traite de l'espace dans lequel le robot et l'homme évoluent), l'organisation du travail (pour indiquer les mesures organisationnelles à mettre en place, en particulier pour éviter les collisions). Par

ailleurs, l'IFA travaille en coopération avec des universités allemandes pour développer une architecture de zone robotisée dans laquelle l'environnement du robot est surveillé en permanence, permettant ainsi de prédire les comportements de l'opérateur et d'améliorer, par voie de conséquence, la sécurité globale de l'installation [8].

Recherches universitaires

Un grand nombre de projets de recherche universitaires sont actuellement menés sur la robotique et la co-activité associée. Le tableau 1, établi en 2006 par le WTEC (6), indique les axes majeurs de recherche dans ce domaine aux États-Unis, en Europe et au Japon+Corée [9].

De nombreux programmes internationaux existent, dont un certain nombre sont fédérés dans la structure EURON (7) [2]. Certains, comme le projet SMERobot™, ont été menés en association avec les constructeurs de robots [10]. La France était présente dans ce projet, *via* le CETIM (8), pour participer en particulier à la dissémination des résultats techniques de ce projet auprès des PME/PMI françaises.

En France, on recense environ soixante équipes travaillant sur la robotique [11] dans des domaines tels que :

- les contrôles sensori-moteurs, la perception (action et mouvement),
- la cognition, la décision, l'autonomie et l'apprentissage,

(3) Safety Engineering Laboratory, Japon.

(4) Japan National Institute of Occupational Safety and Health.

(5) Institut für Arbeitsschutz, Allemagne.

(6) World Technology Evaluation Center.

(7) European Robotics Network.

(8) Centre Technique des Industries Mécaniques.

- l'interaction et la coopération,
 - la conception des systèmes robotiques.
- Des projets de recherche se focalisent sur les aspects liés à la co-activité homme-robot, comme le projet PHRIENDS (9) [12, 13], dont la vocation était de développer les composants clés de la prochaine génération de robots conçus pour partager l'environnement avec l'homme et interagir physiquement avec des personnes. Ce projet visait les robots industriels, mais aussi les dispositifs d'aide (qui incluent des robots pour le marché émergent des applications non-industrielles, comme par exemple des robots de service ou de santé/soins).

La sécurité du point de vue de la norme

Les aspects de la sécurité des robots industriels sont détaillés dans la norme EN ISO 10218 [4]. Cette norme est composée de deux parties traitant, pour la première, des recommandations aux concepteurs de robots et, pour la seconde, de la sécurité en matière d'utilisation de robots industriels.

Cette norme est bien adaptée aux robots industriels de type classique. Ses recommandations vont principalement dans le sens de l'isolation de l'utilisateur de la zone de travail du robot pendant le fonctionnement normal de ce dernier. Le fonctionnement du robot est décomposé en trois cas : fonctionnement normal (production), maintenance et apprentissage. Lors du fonctionnement normal du robot, la norme préconise d'interdire (au moyen de protecteurs) la présence de l'homme dans l'espace de travail du robot. Cette fonction peut être assurée, par exemple, par l'utilisation de cages munies de portes de sécurité. La présence de l'utilisateur à proximité du robot n'est autorisée que pendant les temps de maintenance ou d'apprentissage, au cours desquels le robot ne doit pas dépasser la vitesse de 250 mm/s (millimètres par seconde). Cette contrainte permet à l'utilisateur d'anticiper les mouvements du robot afin de pouvoir éviter toute collision.

Les recommandations de la norme EN ISO 10218 peuvent s'avérer insuffisantes ou inadaptées dans le cadre du travail de l'homme à proximité du robot, comme c'est le cas pour les robots collaboratifs. En effet, dans ce cas de figure, le robot doit garder sa vitesse de fonctionnement optimale tout en évoluant à une distance réduite de l'utilisateur.

QUELQUES SOLUTIONS DE SÉCURITÉ

Lors de la présence d'une personne dans l'espace de travail d'un robot, les risques de collision existent du fait de la vitesse de déplacement dudit robot et de la difficulté d'anticiper certains des mouvements de ses parties mobiles. Il est possible qu'un utilisateur se

trouve dans le champ d'action du robot lorsque celui-ci travaille à pleine vitesse. Plusieurs cas d'accès non autorisés sont répertoriés dans la base de données des accidents du travail (voir la figure 2). Il existe donc des risques qui doivent être réduits en suivant la démarche de la directive machine [14] déclinée dans la norme EN ISO 12100 [15], à savoir appliquer des mesures de prévention intrinsèques, mettre en place des protections et des mesures de protection complémentaires et, enfin, donner les informations nécessaires à une bonne utilisation du robot.

Du point de vue fonctionnel, un robot industriel peut être décomposé en une partie commande et une partie opérative (voir la figure 3). Des solutions de sécurité existent au niveau des différentes parties du robot : solutions intrinsèques aux niveaux de l'architecture mécanique du robot, des actionneurs et des capteurs du robot, et solutions innovantes au niveau de la commande du robot.

Nous allons présenter ci-après un certain nombre de techniques novatrices portant pour la plupart sur la réduction de l'effet d'une collision entre un robot et les opérateurs se trouvant à proximité.

Sécurité de la partie opérative

La sécurité de la partie opérative des robots travaillant à proximité ou en collaboration avec l'homme peut être améliorée en diminuant l'impact d'une collision accidentelle avec l'utilisateur. La plupart des solutions de ce type concernent la partie mécanique et les actionneurs du robot.

Afin de réduire la force de l'impact d'une collision d'un robot avec un homme (voire même d'éviter toute collision), une première voie serait de diminuer la vitesse de mouvement des parties mobiles. Cette solution n'est généralement pas acceptable dans un milieu industriel, en raison de son impact négatif sur la productivité. La nécessité de garder les cadences de fonctionnement à un rythme élevé amène à rechercher d'autres solutions.

Robot à masse faible

Une solution ayant pour but de diminuer la masse de la partie mobile d'un robot manipulateur a été proposée par l'Institut de robotique et de mécatronique de l'Agence aérospatiale allemande (DLR) (10). Le bras robotisé conçu par ce laboratoire est d'une masse faible (13,5 kg), mais il conserve un rapport poids/capacité de charge important (voir la figure 4).

(9) Physical Human-Robot Interaction: DepENDability and Safety.

(10) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

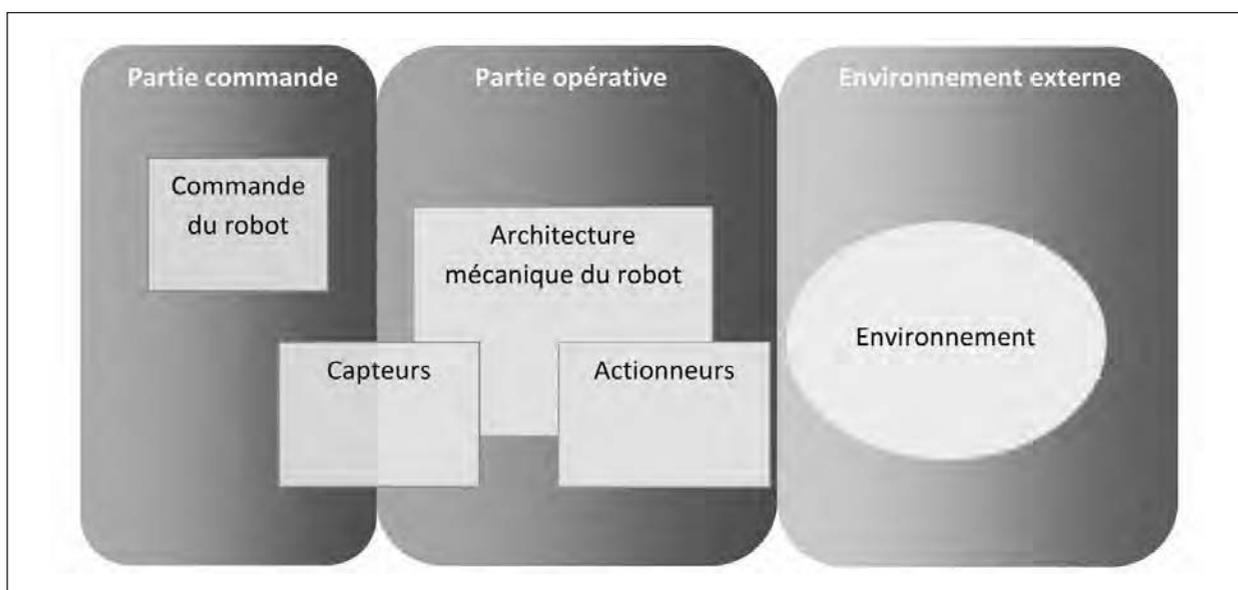


Figure 3 : Architecture fonctionnelle d'un robot industriel

Différentes technologies de capteurs articulaires (et de commandes) permettent de disposer d'un robot performant tout en améliorant la sécurité pour l'utilisateur [13]. Ce travail a fait l'objet d'un transfert de technologie par l'industriel KUKA dans le cadre du projet européen PHRIENDS.

De plus, il est possible de recouvrir les parties mobiles du robot avec un matériau amortissant afin de réduire l'effet d'une collision avec l'utilisateur. Dans une démarche de prévention des risques d'une machine, il sera bien sûr nécessaire de coupler ces méthodes à des systèmes de sécurité classiques et à des stratégies de commande permettant d'assurer la sécurité.

Actionneurs à raideur variable

Une autre voie pour améliorer la sécurité des robots consiste à concevoir autrement les actionneurs. Un effort d'intégration et de distribution des actionneurs peut être fait dans le cadre de la réduction de la masse des parties mobiles.

Une des solutions permettant de réduire les dommages occasionnés par une collision entre une partie mobile du robot et l'utilisateur est de travailler sur la *compliance* (celle-ci pouvant être définie comme étant « la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple ; le robot compliant peut subir un déplacement sous l'effet d'un effort dû au contact du manipulateur avec son environnement, cet effort restant cependant dans des limites raisonnables pour la tâche considérée »). L'utilisation d'actionneurs électriques à raideur variable permettrait d'augmenter la compliance des robots travaillant à proximité de l'homme [16, 17].

Une telle solution peut cependant avoir des répercussions négatives sur les performances du robot et sur sa productivité. Il est donc nécessaire d'associer à cette solution une stratégie de commande performante permettant de contrôler la raideur (et donc l'élasticité) des actionneurs du robot, suivant la tâche à exécuter. Une autre solution permettant de garantir les performances du robot tout en lui conférant un comportement compliant est l'utilisation de mini-actionneurs distribués au niveau des articulations et associés à des actionneurs à raideur variable déportés [18].

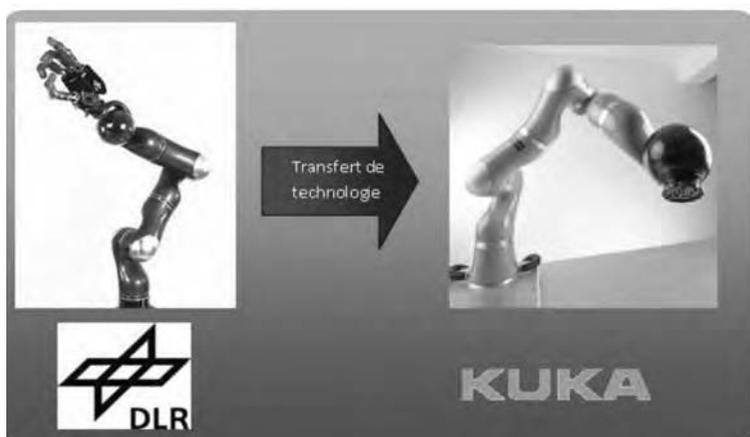


Figure 4 : Le bras robotisé à faible masse DLR/KUKA

Sécurité de la partie commande

Comme pour la partie opérative, des modifications de la partie « commande » des robots sont susceptibles d'en améliorer la sécurité.

Commande du robot en effort/capteurs d'efforts

Les robots industriels classiques sont généralement commandés en position, ce qui permet de commander facilement le déplacement de la partie mobile dans un environnement fixe et connu. Après des opérations d'apprentissage, le robot est capable de répéter à l'infini les mêmes gestes dans un environnement d'où l'homme est exclu par des dispositifs de protection des types cages ou barrières immatérielles (conformément aux recommandations de la norme EN ISO 10218) [19]. En l'absence de dispositif de détection approprié, ce type de commande est inadapté, voire dangereux, en cas de travail de l'homme à proximité du robot.

Un autre type de commande est basé sur l'asservissement des efforts exercés par le robot sur son environnement extérieur en plus de son asservissement de position. Dans différents travaux de la communauté robotique, on retrouve des techniques de détection de collision qui se basent sur l'association de capteurs d'efforts (au niveau des articulations) à la commande en effort. Cette technique permet de détecter les efforts exercés par le robot sur l'homme en cas de collision et de réduire ainsi la gravité des blessures dues à ce type de collision. Cette méthode a notamment été utilisée dans la conception du bras robotisé à faible masse DLR/KUKA développé par le groupe de recherche PHRIENDS [19].

En revanche, cette solution est moins efficace pour les manipulateurs robotisés à forte masse et à forte vitesse. En effet, le temps de réponse de la détection de collisions peut être insuffisant lorsque la vitesse d'évolution du robot est rapide. De plus, dans le cas de fortes masses, la collision (même si le mouvement du robot est stoppé par ce type de dispositif) risque de causer des dommages importants chez l'opérateur.

Capteurs tactiles

Une autre méthode de prévention des collisions entre l'homme et le robot utilise des capteurs de contact. Plusieurs recherches sont en cours dans le but de développer des capteurs qui permettent d'équiper le robot d'une sorte de sens du toucher. Ce type de capteurs, associés à d'autres systèmes de sécurité et à une stratégie de commande performante, stoppe l'action du robot dès l'entrée en contact du robot avec un utilisateur.

Différentes techniques sont utilisées pour détecter le contact entre l'homme et le robot. Certaines techniques préconisent d'équiper le robot d'un capteur se présentant sous la forme d'une membrane capacitive [20]. D'autres utilisent des capteurs de pression pour exercer cette fonction [21]. Comme dans le cas des capteurs d'efforts, cette technique peut s'avérer insuffisante dans le cas de robot rapide et/ou à forte masse.

Techniques d'évitement de collisions

Les différentes solutions décrites précédemment permettent de réduire la force de l'impact d'une collision entre le robot et l'utilisateur. Mais le but premier de la sécurisation des robots industriels, dans le cadre d'un travail à proximité de l'homme ou dans celui du travail collaboratif, est d'éviter les collisions entre les parties mobiles du robot et l'être humain.

Il existe différents travaux sur la détection de présence et de mouvements d'utilisateurs à proximité de robots. Ces travaux préconisent souvent d'équiper les robots d'un système de vision leur permettant de détecter, voire d'anticiper, la proximité d'une partie du corps de l'utilisateur. Le robot peut ensuite commander un mouvement en vue d'éviter toute collision avec son utilisateur [22, 23]. Ce type de solution se base généralement sur la modélisation de l'être humain et sur celle du robot afin d'éviter les collisions. D'autres solutions proposent d'anticiper les mouvements de l'utilisateur grâce à des modèles prédictifs afin d'optimiser l'évitement de collisions [8]. Il est, bien entendu, nécessaire, dans ce type de solution, d'associer au système de vision un algorithme de planification de trajectoire en temps réel qui soit performant.

CONCLUSION

L'utilisation d'un robot industriel, à l'instar de celle de toute machine, peut s'avérer dangereuse pour l'utilisateur. Il est donc nécessaire de réaliser une analyse des risques afin d'identifier ces dangers. Une analyse statistique des accidents du travail générés par les robots industriels en France démontre clairement que le risque prédominant lié à l'utilisation de ce type de machine est celui de collision avec l'utilisateur. Nous nous sommes donc focalisés sur ce risque dans cet article, mais cela ne signifie pas que les autres risques doivent être négligés.

Plusieurs laboratoires s'intéressent à la sécurité des robots travaillant à proximité de l'homme. En effet, ce type de robot comporte des risques élevés de collision avec l'utilisateur. Dans ce cadre, nous avons énuméré dans cet article différentes solutions qui portent tant sur la partie opérative que sur la partie commande du

robot. Certaines de ces solutions permettent d'anticiper (et donc d'éviter) les collisions avec l'utilisateur, tandis que d'autres cherchent à en réduire la gravité. Il est difficile d'obtenir une solution de sécurité parfaite pour les robots industriels : le temps de réponse des solutions d'évitement peut s'avérer insuffisant (dans le cas de robots rapides), les solutions de réduction d'impact peuvent être inefficaces (dans le cas de robots à forte masse), etc. Une voie intéressante serait probablement d'associer différents types de solutions de sécurité afin de réduire au maximum le risque que représente un robot évoluant à proximité de son utilisateur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DARIO (P.), DILLMAN (R.) & CHRISTENSEN (H. I.), *Roadmap of robotic research*, EURON, 2004.
- [2] CHRISTENSEN (H. I.), *A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics*, Computing Community Consortium, 2009.
- [3] KABE (T.), TANAKA (K.), IKEDA (H.) & al., "Consideration on safety for emerging technology - Case studies of seven service robots", *Safety Science*, vol. 48, n° 3, pp. 296-301, 2010.
- [4] Norme ISO: NF EN ISO 10218 : *Exigences de sécurité pour les robots industriels - Robots et dispositifs robotiques*, 2011.
- [5] MALM (T.), VIITANIEMI (J.), LATOKARTANO (J.) & al., "Safety of Interactive Robotics - Learning from Accidents", *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, n° 3, pp. 221-227, 2010.
- [6] MURATA (N.), IKEDA (H.), SHIMIZU (S.) & al., *Feasibility study on a range image camera applied as a human presence sensing device for a human-machine collaboration*, in 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, Tampere, pp. 14-15, 2010.
- [7] *BGIA: BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive: Design of workplaces with collaborative robots*, BGIA - Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, 2009.
- [8] DOMINIK (S.), BJÖRN (O.), HAO (D.) & al., *An Approach for Safe and Efficient Human-Robot Collaboration*, in 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, Finland, 2010.
- [9] BEKEY (G.), AMBROSE (R.), KUMAR (V.) & al., *International assessment of research and development in robotics*, WTEC, 2006.
- [10] NILSSON (K.), JOHANSSON (R.), ROBERTSSON (A.) & al., *Productive robots and the SMERobot™ project*.
- [11] DOMBRE (E.), *Argumentaire pour un programme ANR en Robotique*, GDR Robotique, 2009.
- [12] DE SANTIS (A.) & B. SICILIANO (B.), *Safety issues for human-robot cooperation*, in Tools and Perspectives in Virtual Manufacturing, Napoli, 2008.
- [13] HADDADIN (S), SUPPA (M.), FUCHS (S.) & al., *Towards the robotic co-worker*, *Robotics Research*, vol. 70, pp. 261-282, 2011.
- [14] Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte), p. 63, 2006.
- [15] Norme ISO : NF EN ISO 12100 : *Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque*, p. 93, 2010.
- [16] HYUN (D.), YANG (H.S.), PARK (J.) & al., *Variable stiffness mechanism for human-friendly robots*, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, n° 6, pp. 880-897, 2010.
- [17] VAN DAMME (M.), BEYL (P.), VANDERBORGHT (B.) & al., *The Role of Compliance in Robot Safety*, in IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments (DRHE), pp. 65-71, 2010.
- [18] ZINN (M.), ROTH (B.), O. KHATIB (O.) & al., "A new actuation approach for human friendly robot design", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, n° 4-5, p. 379, 2004.
- [19] DE SANTIS (A.), SICILIANO (B.), DE LUCA (A.) & al., "An atlas of physical human-robot interaction", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, n° 3, pp. 253-270, 2008.
- [20] PHAN (S.), QUEK (Z. F.), SHAH (P.) & al., *Capacitive Skin Sensors for Robot Impact Monitoring*, in IEEE/RSJ IROS, San Francisco, 2011.
- [21] FRITZSCHE (M.), ELKMANN (N.) & SCHULENBURG (E.), *Tactile sensing: a key technology for safe physical human robot interaction*, in Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction, Lausanne, Suisse, 2011.
- [22] KULIC (D.) & CROFT, (E.), "Pre-collision safety strategies for human-robot interaction", *Autonomous Robots*, vol. 22, n° 2, pp. 149-164, 2007.
- [23] DE SANTIS (A.), LIPPIELLO (V.), SICILIANO (B.) & al., *Human-Robot Interaction Control Using Force and Vision: Advances in Control Theory and Applications*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 51-70, Springer Berlin/Heidelberg, 2007.

Les actions de Cap Robotique

Cap Robotique est un *cluster* d'innovation regroupant une cinquantaine de structures (PME, laboratoires de recherche, *designers*) engagées dans une lignée d'innovation qui, demain, bouleversera notre rapport à la maladie, à l'isolement, à l'effort... et réenchânera les modèles d'enseignement, de soins et de loisir.

Par Philippe ROY* et François HANAT**



© Cap Robotique

Photo 1 : Photo de famille de Cap Robotique

LA ROBOTIQUE DE SERVICE

Selon l'*International Federation of Robotics* (IFR), la robotique de service représente aujourd'hui un marché de 1,16 milliard de dollars, qui pèsera 5,26 milliards en 2015, soit un taux de croissance annuel de 100 % (à comparer aux 5,2 milliards de dollars de la robotique industrielle). L'IFR définit ce secteur comme celui des

robots opérant de manière semi-autonome ou totalement autonome pour proposer des services utiles au bien-être des individus et au bon fonctionnement des équipements (en dehors des opérations de fabrication). Ainsi, la robotique de service se distingue de la robotique industrielle par son lien avec les individus, aussi

* Délégué Adjoint, Cap Digital.

**Chargé de mission, Cap Digital.

bien en contexte personnel qu'en contexte professionnel. L'assistance à la personne (personnes âgées, handicapées), l'éducation, les loisirs, la surveillance des lieux et des biens, ... sont autant de cibles applicatives qui font que les acteurs de la robotique sont les acteurs d'une mutation de fond portée par des tendances sociétales fortes (vieillesse de la population, systèmes urbains complexes, bien-être, ...).

Soulignons, de plus, que la robotique industrielle est également impactée par les avancées de la robotique de service, avec l'émergence de robots collaborant avec les ouvriers (ce que certains dénomment la *cobotique*). Celle-ci soulève la question des enjeux de l'interaction Homme-robot, de la « conscience » de l'autre, du partage de l'espace, de la modularité et de la sécurité.

L'ÉMERGENCE DE CAP ROBOTIQUE

Ce contexte étant posé, nous discuterons ici des résultats et des ambitions d'une communauté d'acteurs français engagés dans ce domaine à divers niveaux en concevant ou produisant des robots et des technologies nécessaires à l'exécution par ces derniers de leurs missions. La France compte ainsi des acteurs reconnus qui vendent leurs robots dans le monde entier (Aldebaran Robotics, Gostai, Robosoft, etc.), tout en contribuant à l'excellence française de la recherche dans ce domaine (CEA, CNRS, INRIA).

Au sein du pôle de compétitivité Cap Digital, qui est un pôle francilien des services et des contenus numériques, ces acteurs ont ainsi uni leurs forces, en décembre 2008. La création d'une communauté dédiée à la robotique de service, aux côtés de communautés déjà existantes (comme celles de l'éducation et de la formation, de l'ingénierie des connaissances, du logiciel libre), a lancé une remarquable dynamique de recherche et développement.

Cette position d'incubation a permis d'obtenir des résultats tangibles : en trois ans, 17 projets de R&D ont été imaginés par les membres de Cap Robotique. Ces projets ont été labellisés par Cap Digital, puis financés par l'Etat (16 millions d'euros d'aides publiques venant s'ajouter à 19 millions d'euros investis par le secteur privé).

Par ailleurs, de nombreuses commonalités entre le potentiel de Cap Robotique et la structure de Cap Digital plaident en faveur d'un tel positionnement. Etant un pôle dont la majorité des adhérents sont des PME (la croissance de celles-ci faisant par conséquent partie intégrante de ses missions), la robotique (initiée par de telles structures) allait y trouver tout naturellement sa place. Par ailleurs, beaucoup de technologies fondamentales de la robotique de par leurs interactions avec l'environnement (interfaces Homme-machine, traitement des textes, des images et des sons, ...) étaient déjà présentes dans le pôle. Enfin, les grands organismes de recherche (Université Pierre et

Marie Curie, CNRS, INRIA, CEA, Institut Télécom, ...) étaient déjà membres de Cap Digital. Du point de vue de l'ouverture sectorielle, les marchés de l'éducation, de la santé et de la ville durable sont des thèmes privilégiés au sein du pôle, et cela a permis d'anticiper en amont ces axes de marchés pour la robotique.

Depuis fin 2008, au-delà de la R&D (que nous détaillerons plus loin), les membres de Cap Robotique ont bénéficié des actions du pôle : démonstrations de robots (notamment le Nao d'Aldebaran Robotics, et le Jazz de Gostai) lors de Futur en Seine, un festival de la vie et de la création numérique organisé par Cap Digital ; participation à des missions collectives pour l'export (en particulier au Japon) ou à des salons internationaux (comme Innorobo, dont la première édition a eu lieu à Lyon en 2011) ; interactions avec les pouvoirs publics pour évaluer les mutations rendues possibles par la robotique (en lien avec la DGCIS, par exemple), etc.

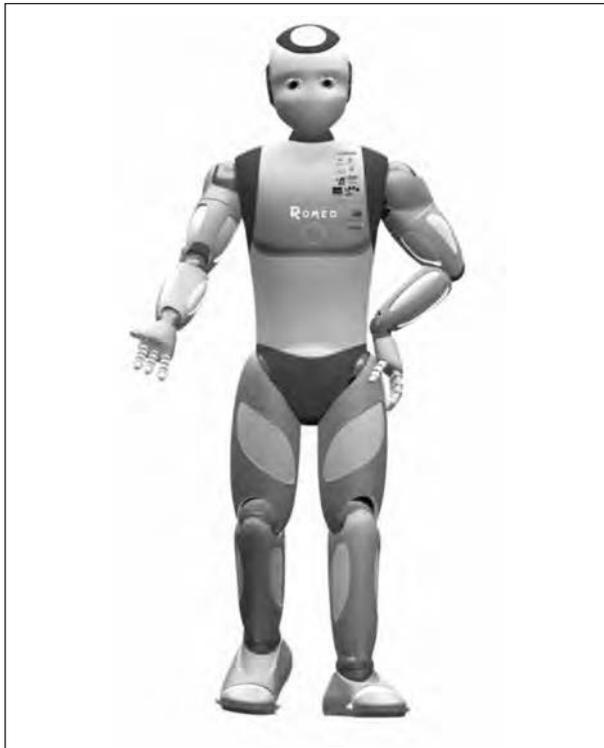
UN CLUSTER D'INNOVATION

Cap Robotique contribue au développement du secteur de la robotique de service par l'innovation dans ces projets :

- la robotique sur roue, ou humanoïde (y compris les problèmes mécaniques complexes associés à ce type de robot) ;
- la télé-présence (applications dans les domaines de la santé et du tourisme) ;
- l'apprentissage (*via* des moteurs d'intelligence artificielle) ;
- la perception de l'environnement (cartographie et perception sonore) ;
- l'interaction Homme-robot (détection des émotions exprimées par le visage ou la voix) ;
- la programmation des robots (avec des systèmes d'exploitation dédiés), etc. (voir la photo 2).

Le projet Roméo est un projet de R&D emblématique de cette démarche d'innovation collaborative. Pour répondre à l'enjeu de l'assistance aux personnes (âgées et/ou souffrant d'un handicap, physique ou cognitif), un consortium de treize structures s'est constitué pour concevoir et développer un robot humanoïde (d'une hauteur de 1,40 mètre) destiné à évoluer dans le domicile d'une personne en perte d'autonomie et à l'assister dans des tâches quotidiennes (ouverture de porte, manipulation d'objets tels qu'un verre, une bouteille, un trousseau de clé), tout en assurant une présence permanente (indispensable en cas de chute de la personne).

Au-delà de ses capacités motrices, Roméo (dont le prototype fonctionnel sera livré début 2012) sera doté de capacités d'interaction inédites : interaction avec son environnement (afin qu'il ne soit pas bloqué face à des



© ALDEBARAN Robotics

Photo 2 : Roméo, vue d'artiste

objets égarés sur le sol ou, encore, face à un escalier), mais aussi interaction avec son propriétaire, avec qui il pourra échanger puisqu'il saura l'écouter (tout en distinguant la voix du locuteur de celles qui pourraient émaner d'un poste de radio ou de télévision) ou entretenir avec celui-ci une conversation (adaptée au locuteur et cohérente avec des conversations antérieures), et détecter ses émotions (comme la joie, la colère ou la tristesse).

On perçoit ici le challenge que cela représente pour la robotique de service : la conception de machines qui soient non seulement opérantes, mais qui doivent interagir en permanence avec leur environnement. Ainsi, l'impératif de collaboration technologique pour à la fois assembler des briques existantes et pouvoir concevoir celles n'existant pas encore, est bien réel. Traiter les consignes orales, détecter les émotions de l'utilisateur, interagir avec lui par la parole, tenir une conversation sensée (personnalisée et stimulante), savoir évaluer la gravité d'une situation, percevoir un environnement et s'y déplacer même si celui-ci est inconnu : autant de « challenges » que la collaboration permet de relever, progressivement, au rythme des investissements R&D des partenaires avec le soutien de l'Etat.

Notons à ce propos que la plupart des acteurs de ces projets de R&D sont des PME, dont la plus grosse emploie près de 150 salariés ; la majorité d'entre elles se situant plutôt dans une tranche d'effectifs allant de 10 à 30 salariés. Ainsi, la difficulté de dégager des fonds pour l'investissement en R&D est réelle et doit être mise en regard des enjeux et des perspectives du marché de la robotique de service.

LA ROBOTIQUE DE SERVICE : MARCHÉ ET PERSPECTIVES

Le marché de la robotique de service n'est pas encore réellement un marché *Business-to-Consumer* (B2C). Seule exception qui confirme la règle : le marché des robots aspirateurs américains, qui commence à atteindre des volumes substantiels, mais dont le leader (iRobot) est avant tout positionné sur le créneau de la robotique militaire. Aussi, aujourd'hui, le marché de la robotique française s'est structuré en fonction de marchés *Business-to-Business* (B2B). Dans le monde entier, des universités s'équipent de plateformes robotiques tant pour l'enseignement que pour leurs activités de recherche.

Cap Robotique vise donc à développer les activités commerciales des sociétés qu'il regroupe. Deux mouvements sont à distinguer : l'adoption des technologies dans les industries dites classiques et le marché (à un horizon temporel plus lointain) de l'électronique grand public.

La commercialisation de robots de service est un réel challenge. Si les robots actuels ont effectivement fait des progrès considérables qui les rendent toujours plus opérationnels sur le terrain des entreprises, ceux-ci restent perçus comme des objets encore trop lointains pour être considérés comme réellement dignes de confiance par le grand public. Des *startups* françaises ont conçu et développé des robots mobiles avec suffisamment d'intelligence embarquée et de connectivité à un poste de surveillance central pour réaliser de la télé-surveillance. Dans de vastes entrepôts, ceux-ci agiraient plus en sentinelles et proposeraient beaucoup plus de réactivité par rapport à un système de télésurveillance classique. L'étape consistant à convaincre des clients potentiels et des investisseurs ne semble pas encore réellement franchie, mais cela n'est probablement qu'une question de mois (la valeur de systèmes dynamiques et réactifs restant bien supérieure à celle des dispositifs statiques, qui pour la majeure partie ne sont efficaces qu'*a posteriori*, c'est-à-dire après une intrusion, dans bien des cas).

Comme toute industrie innovante, la robotique de service se trouve dans une situation de *bowling alley* : face à un marché composé de multiples secteurs allant de la sécurité à l'éducation en passant par l'assistance et le loisir, détecter quel sera le secteur qui saura effectivement incorporer le premier une solution robotique dans ses leviers de compétitivité, et pourra ainsi prescrire celle-ci à d'autres secteurs, est un enjeu de taille. Les membres de Cap Robotique reflètent ainsi la posture à tenir : poursuivre la dynamique collaborative technologique pour étendre le champ des usages adressables, et entretenir avec leurs clients un lien étroit. Geoffrey Moore a explicité cet enjeu dans les industries d'hyper-croissance (principalement *high-tech*), avec son approche *crossing-the-chasm* : avant d'adresser la majeure partie du marché, il convient d'établir des relations

partenariales fortes avec un profil de clients bien plus technophiles que la moyenne. En ce qui concerne la robotique de service, cela se traduit par des éditions dédiées aux universités dans lesquelles les robots sont des plateformes adaptées à leurs besoins en matière de recherche ou d'enseignement.

Toutefois, les universités ne sont sans doute pas la seule première « quille » du bowling à viser. Des industries peuvent aussi tirer profit de la robotique dans la réalisation de leur mission : le commerce (pour l'accueil des clients), le tourisme (pour l'orientation des visiteurs), la santé (pour la stimulation cognitive des patients), etc. Les acteurs de ces divers secteurs peuvent consulter des *mini-consortia* du secteur robotique qui sont à même d'éclairer les problématiques clés de leurs métiers et de leur proposer des robots répondant précisément à leurs besoins.

En parallèle, une autre stratégie se développe, davantage orientée B2C et se rapprochant des travaux de Von Hippel et de ses *lead users* (ses utilisateurs pilotes). Aujourd'hui, il est possible pour tout un chacun d'acquiescer un robot. Toutefois, le degré de familiarité requise avec la technologie retenue est bien sûr élevé puisqu'en l'état, un robot n'est pas packagé pour un usage précis (non pas que cela soit impossible, mais le champ des possibles est particulièrement vaste). Les systèmes d'exploitation des robots (par ailleurs devenus *open-source*) sont équivalents à des *design toolkits*, ce sont de véritables « bacs à sable » permettant de programmer par soi-même son robot : le barycentre de l'innovation se déplace ainsi vers le *lead user*. A la manière d'un Smartphone, et avec un minimum de compétences requis pour le programmer, il est possible de développer ses propres applications pour son robot et d'en faire bénéficier les autres utilisateurs. Ainsi, la « *killer app* » d'un robot, l'application souveraine, celle qui démontrera aux yeux de tous l'utilité d'avoir un robot chez soi, sera peut-être développée par une personne non salariée du fabricant !

LA FEUILLE DE ROUTE

Au travers de ce subtil équilibre entre R&D et commercialisation de technologies innovantes, les membres de Cap Robotique ont déjà en tête les étapes suivantes. La première d'entre elles est de poursuivre les tests en situation réelle. Des robots de petite taille (de 50 centimètres à 1 mètre) ont déjà suscité un intérêt et démontré une réelle valeur, notamment dans le cadre des thérapies de l'autisme (le nombre restreint des degrés d'expression faciale d'un robot, par rapport au visage humain, s'avère apaisant pour des enfants autistes). Mais qu'en est-il pour des robots de taille plus importante, frôlant le mètre-quarante ? Peut-on craindre un

rejet des utilisateurs face à des machines de cette taille, d'un poids certain et pouvant réveiller des craintes inspirées par la littérature de science-fiction ? Jusqu'à présent les retours d'usage sont encourageants, mais les observations doivent être poursuivies. Des comités sociétaux (regroupant sociologues, philosophes, sémioticiens, metteurs en scène, architectes, journalistes,...) sont constitués autour des grandes initiatives de R&D afin de consolider le cadre éthique des démarches. Par ailleurs, il convient d'évaluer précisément les gains perçus en termes de qualité de vie par les utilisateurs : la détection multimodale (audio, vidéo) des émotions rend-elle le robot plus acceptable ? Sa perception de l'environnement fait-elle du robot un objet bien intégré dans le foyer ? Autant de questions qui méritent des expérimentations dédiées afin d'être à même de concevoir des robots qui soient toujours mieux intégrés à leur environnement (qui est aussi le nôtre).

Sur un plan plus technique, des efforts sont toujours consacrés aux performances de perception du robot : une écoute discriminant les sources (plusieurs conversations en simultané), un moteur d'intelligence artificielle doté d'un dictionnaire toujours plus étendu pour enrichir ses conversations. D'autres axes de recherche concernent les aspects d'intégration : moteurs, actionneurs, capteurs, traitement d'informations, énergie,... La robotique de service a le potentiel d'une industrie de conception innovante sachant certes aller « piocher » des technologies sur étagère, mais ayant également la capacité de concevoir des briques technologiques inédites. Pour Cap Robotique, cela nécessite de porter le regard au-delà du pôle Cap Digital pour trouver des gisements d'innovation dans l'hybridation des technologies numériques avec celles d'autres secteurs :

- calculateurs dédiés : massivement parallèles, architectures orientées événements (nombreux couplages avec l'environnement extérieur), processus temps réel (ce que l'image 3D a imposé au monde de l'électronique, avec les processeurs graphiques) ;
- actionneurs : moteurs à fort couple, moteurs miniaturisés ;
- capteurs : réseaux de capteurs, capacités haptiques (le toucher et les textures) ; caméras relief ou thermiques ;
- alimentation : gestion économe de l'énergie, management de puissance ;
- mécanique : matériaux bio-inspirés ou biocompatibles, compliance passive (déformation face à un effort externe) ou active (diminuer un effort face à un contact sollicité), etc.

Le slogan de la communauté Cap Robotique, le « moteur de l'innovation », a donc deux carburants : la collaboration dans un réseau de compétences d'excellence et compétitives à l'échelle internationale, et une innovation relevant sans cesse, par la R&D, l'état de l'art des technologies qui seront là, demain, pour assister, éduquer, soigner et enchanter les humains.

L'économie de la robotique : nouvelles données et défis actuels

Par l'automatisation et la normalisation de la qualité, l'économie industrielle de la machine-outil avait pour objectif d'augmenter la productivité globale des facteurs de production par une réduction drastique du coût du facteur travail.

Dans l'économie de la robotique, à la contribution respective des facteurs de production (travail et capital) s'ajoute celle du facteur « connaissance », qui combine l'information à sa traduction utile dans l'action.

Outre dans l'industrie, le recours à des robots est appelé à croître notamment dans le secteur des services à la personne sous l'effet du vieillissement de la population.

La robotique est ainsi porteuse de nouvelles et vastes perspectives, à l'interface de nombreuses sciences et techniques : la mécanique, le logiciel, l'électronique, les nanotechnologies, les matériaux avancés, la médecine, l'analyse de risques, l'économie, la sociologie, le *marketing* et les sciences de la communication.

Par Dr. Françoise ROURE* et Grégoire POSTEL-VINAY**

L'économie de la robotique est une branche de l'économie industrielle qui reste largement à construire. Se situant à l'intersection entre des filières industrielles bien identifiées telles que l'électronique embarquée, la mécanique, l'énergie et les matériaux avancés que ces systèmes autonomes intègrent sur des plateformes mono ou multi-usages autonomes, la création de la valeur dans ce domaine repose sur la capacité de l'industrie logicielle d'intégrer, d'actionner et de contrôler des modules aux fonctions distinctes.

L'économie industrielle de la machine-outil était comparativement plus facile à cerner, avec un objectif d'automatisation et de normalisation de la qualité

* Contrôleur général économique et financier, Présidente de la section « Technologies et Société » au Conseil général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGIET) - Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

** Ingénieur général des Mines, Chef de la mission Stratégie - Etudes économiques de la Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS) - Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

visant à augmenter la productivité globale des facteurs de production par une réduction drastique du coût du facteur travail. L'économie de la machine-outil se concevait dans une économie réelle mature aux processus de production stables et à fort composant matériel devant délivrer dans les meilleures conditions possibles une production de masse. La machine-outil industriel était et reste un équipement indispensable au maintien d'activités de production dans des territoires où le coût comparatif du travail est relativement élevé.

Dans le contexte d'un libre-échange encore marqué par de fortes asymétries des technologies émergentes et de leurs marchés, la division internationale du travail ne répond plus aux seuls mécanismes traditionnels de la spécialisation internationale des activités (aux pays émergents, la production à bas coût du travail ; aux pays industrialisés, les activités industrielles automatisées grâce aux machines-outils ; aux pays disposant de technologies avancées, l'avantage comparatif de disposer de technologies au degré de maturité encore faible et dont la protection peut être motivée par des raisons de défense et de sécurité, mais aussi par des intérêts vitaux, au rang desquels figure l'économie réelle des Nations). Si la théorie des avantages comparatifs demeure valable, en matière de commerce international, elle repose dorénavant sur un « mix productique » des facteurs de production de nature différente.

Dans un premier temps, cet article examinera ces évolutions et les pistes qu'elles offrent. Dans un second temps, seront rappelées des données comparatives sur la productivité en Europe, qui nécessitent, en tout état de cause, une action - tant des entreprises que de la puissance publique - pour améliorer la productivité et, partant, créer de la croissance et des emplois durables.

APPARITION DE FACTEURS NOUVEAUX DANS L'ÉCONOMIE DE LA ROBOTIQUE

Dans l'économie de la robotique, la contribution respective des facteurs de production (travail et capital) est désormais augmentée de celle du facteur « connaissance » qui combine l'information à sa traduction utile dans l'action (savoir-faire et savoir-être qui, dans le cas de la robotique, ne relèvent pas du savoir dit implicite propre aux ressources humaines qualifiées, mais des fonctionnalités du robot, de leurs paramétrages et de leur programmation). Contrairement à la fonction de production classique, la capacité d'innovation et de création de valeur ajoutée à partir du facteur « connaissance » peut parfois être affectée par une rareté artificielle créée. En effet, lorsque la connaissance est disponible sous la forme numérique, elle constitue un bien non rival, dont (par définition) la consommation n'entraîne pas la destruction. Sa rareté, artificielle, provient alors des conditions juridiques liées à son utilisation, lesquelles organisent une protection de la propriété intellectuelle, qui peut se tra-

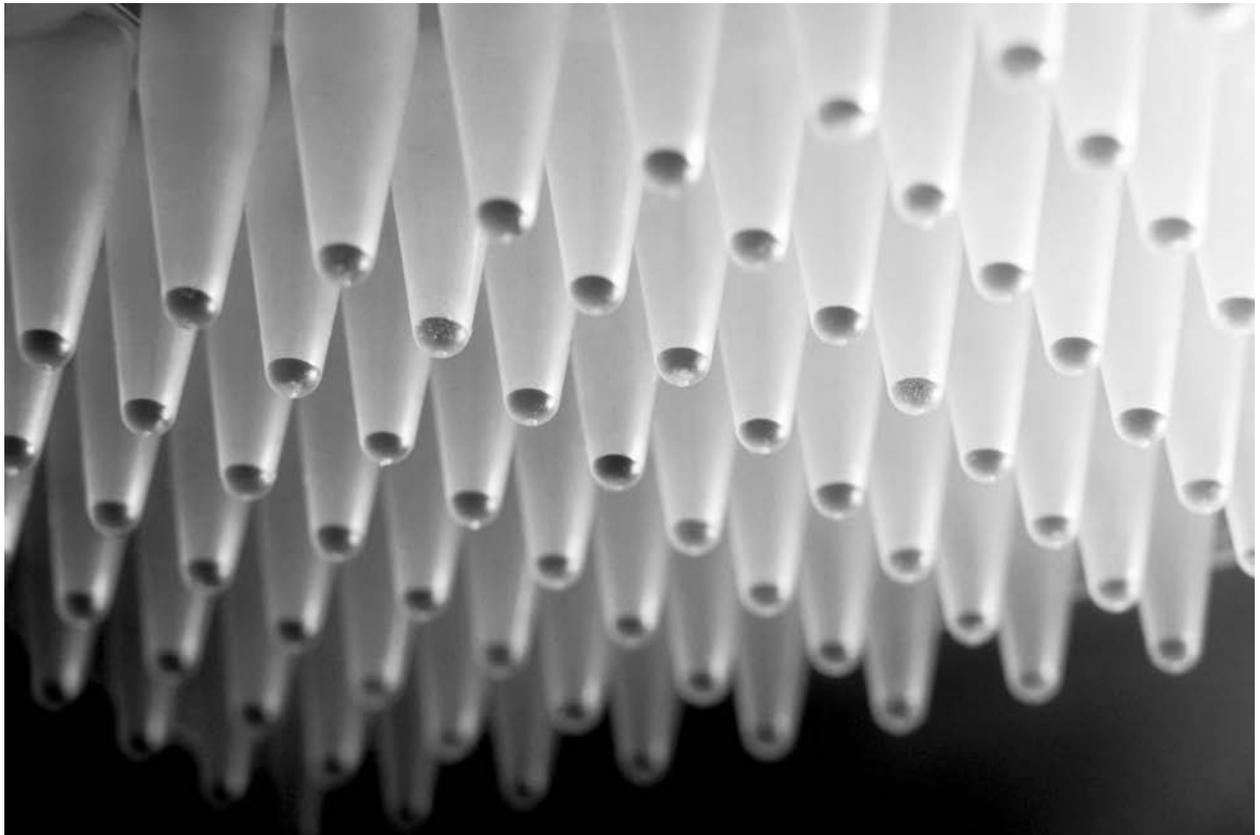
duire, ou non, par des brevets et des redevances sur les œuvres de l'esprit (système du type *Creative Commons*).

Pour les décideurs, l'enjeu est alors de bien comprendre où se trouve la racine d'une valeur ajoutée durable en matière de robotique, et de la valoriser tout en créant un environnement qui soit incitatif et favorable pour l'offre comme pour la demande. Une entreprise telle que la *Willow Garage Company*, située à Menlo Park (en Californie), a délibérément axé ses efforts sur la conception de nouveaux services et sur l'orientation de sa recherche, de son développement et de son innovation vers des applications à forte utilité, faisant preuve d'une adaptabilité élevée aux divers environnements dans lesquels les robots qu'elle produit seront appelés à servir. Cette société met ses prototypes (appelés « PR2 ») à la disposition gratuite des centres de recherche qui le souhaitent, et engrange les retours d'expérience de leurs mises en condition dans des contextes différenciés. Les performances de ses robots proviennent d'une capacité augmentée de reconnaissance des environnements en 3D, ainsi que de bras articulés dotés de sept degrés de liberté qui en font des effecteurs multitâches utilisables tant dans des milieux requérant des processus industriels (usines, hôpitaux...) qu'au domicile de particuliers. Un autre exemple est celui du projet STAIR de l'Université de Stanford, qui a lui aussi pour objet de réaliser un démonstrateur multitâches.

Dans ces deux cas, le robot appréhende son environnement et adapte la mobilisation de ses capacités matérielles en fonction de l'instruction qu'il reçoit. Par *design*, il devient un auxiliaire universel de proximité avec lequel l'homme interagit à son propre bénéfice ou pour co-réaliser une fonction déterminée. Le concept de cobotique traduit cette possibilité de coproduire un bien matériel ou un service dans des conditions de sécurité qui soient satisfaisantes à la fois pour l'homme et pour le robot.

Dans cette perspective, les briques logicielles de base assurant l'interopérabilité des modules deviennent des espaces coopératifs, la valeur ajoutée étant dégagée par l'intégration logicielle asservie à une fonction particulière et optimisée sur cette fonction. L'indication est alors, en amont, celle de logiciels ouverts, libres d'accès et d'utilisation, et, en aval, celle de logiciels protégés, élaborés au plus près du service attendu en milieu industriel ou en matière de services à la personne. A cet égard, l'appel à projet « briques génériques du logiciel embarqué » en vue de R&D en robotique (lancé le 21 juillet 2011 dans le cadre des investissements d'avenir) est bien adapté à cet enjeu.

Leur proximité par rapport aux utilisateurs est ici un facteur déterminant de l'évolution des robots vers des prestataires de services de masse programmables sur mesure, en présentiel ou à distance plus ou moins lointaine. C'est ainsi, par exemple, que l'effondrement du coût du séquençage de l'ADN depuis 2008, a ouvert la voie à l'utilisation de matériaux de synthè-



© SPL/PHANIE

« Des robots séquenceurs et des robots d'assemblage, utilisés à l'interface entre les biotechnologies et les nanotechnologies, peuvent être programmés et actionnés à distance ». *Amplification en chaîne par polymérase (PCR), Centre national de séquençage ADN, Génopôle, Evry.*

se (issus de la production de paires de bases de l'ADN) qui seront eux-mêmes intégrés, *via* la simulation et l'ingénierie numérique, à des systèmes matériels hétérogènes complexes.

Des robots séquenceurs et des robots d'assemblage, utilisés à l'interface entre les biotechnologies et les nanotechnologies, peuvent être programmés et actionnés à distance, dès lors que les spécifications techniques sont fournies par le client. Ces robots incorporent des outils de mesure de très haute précision, en 4D, puisqu'aux trois dimensions spatiales s'ajoute la dimension temporelle à une échelle de mesure pertinente laquelle peut descendre jusqu'à la femtoseconde. La recherche en métrologie hybride est ici critique puisque c'est elle et elle seule qui permettra de faire progresser les robots en qualité, en caractérisation et en respect d'une norme, fût-elle propriétaire. La méthodologie avancée est par conséquent un enjeu de compétitivité majeur pour la robotique appliquée aux technologies utilisant des briques de base ou des matériaux de synthèse issus du vivant. L'économie de la robotique qui utilisera des systèmes électroniques embarqués reposant sur ces technologies ne peut être appréhendée aujourd'hui qu'à l'aide de scénarios multicritères incluant les spécifications des utilisateurs et clients en termes d'utilité, de coût, de valeur marchande, d'éthique et de priorités en matiè-

re de recherche et d'innovation responsables. La prospective technologique de la nanoélectronique donne des indications sur le fait que la filière silicium n'aura plus le monopole des matériaux avancés de l'électronique, un monopole qu'elle perdra au profit de matériaux et de systèmes hybrides bio-inspirés : des *memristors*, pour les ordinateurs moléculaires, voire, en s'inspirant des neurosciences et des neurotechnologies, des *synapstors* capables de traiter l'information à l'échelle moléculaire, issus des travaux du 7^{ème} programme-cadre de recherche dans le cadre du projet *Nanocomputing Building Blocks with Acquired Behaviour* (NABAB). Les matériaux avancés de l'électronique de demain, qui seront issus de lignes de production opérant à l'échelle nanométrique, nécessiteront eux-mêmes des robots de production industrielle capables d'opérer avec une précision atomique.

LE BESOIN DE COMBLER UN RETARD TANT DANS L'INDUSTRIE QUE DANS LES SERVICES

Au-delà des évolutions mentionnées plus haut, le débat fait rage aujourd'hui sur la désindustrialisation, au point d'en faire un élément majeur des campagnes en vue des élections nationales, et cela conduit notam-

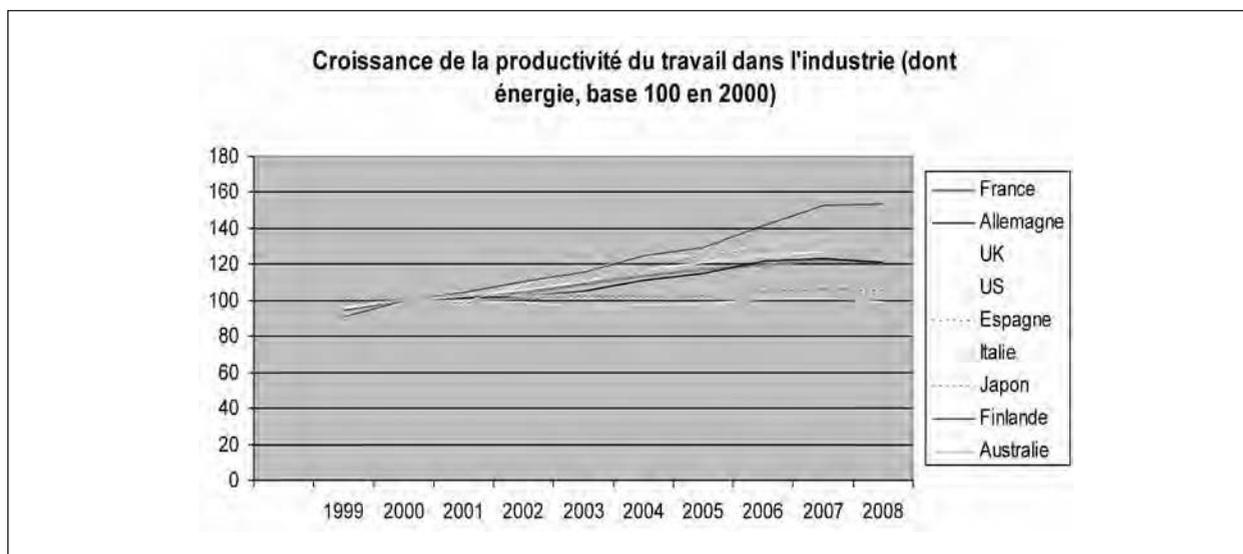


Figure 1.

ment à des comparaisons internationales avec des pays se trouvant dans la même situation monétaire que la France, dont l'Allemagne. Plusieurs éléments ressortent de ces comparaisons.

La productivité du travail dans l'industrie a évolué de façon comparable (voir la figure 1, ci-dessus).

Cependant, les coûts du travail (incluant les charges sociales) ont, quant à eux, divergé, induisant un différentiel sur les marges des entreprises et, au-delà, un sous-investissement relatif, du côté français, par rapport à l'Allemagne (voir les figures 2 ci-après et 3 de la page suivante).

Ce sous-investissement influe sur plusieurs facteurs, à la fois de compétitivité hors coût et de compétitivité coût. Mais, pour la France comme pour l'Allemagne, on constate que le niveau et le degré de modernisation de la robotisation sont en cause (voir la figure 4 de la page suivante).

Que ce soit par rapport à l'Allemagne ou par rapport à l'Italie, la densité des robots, en regard des effectifs

de production, est plus faible en France. On en voit bien les raisons : économiques (liées aux charges pesant sur les entreprises et donc sur leur investissement), techniques (liées à une offre de proximité un peu plus réduite en capacités, même si elle est de qualité et même si le marché intérieur européen devrait - en principe - réduire l'impact de ce facteur), sociales, enfin (avec cette idée que les robots aggraveraient le chômage). Il est de fait que les robots déplacent la nature des emplois, mais le pays qui a le plus investi en termes de robotisation se trouve également être le mieux placé en termes de maintien de la part de l'industrie dans son PIB, et donc des emplois qui lui sont liés. Dans l'industrie, un triple effort apparaît souhaitable : a) de restauration de conditions plus voisines en matière de charges pesant sur les entreprises, b) d'investissement et c) de formation pour utiliser des machines plus complexes. Il est aussi permis de penser que l'arrêt (pour des raisons budgétaires, dans le courant des années 1990) des mesures publiques



Figure 2.

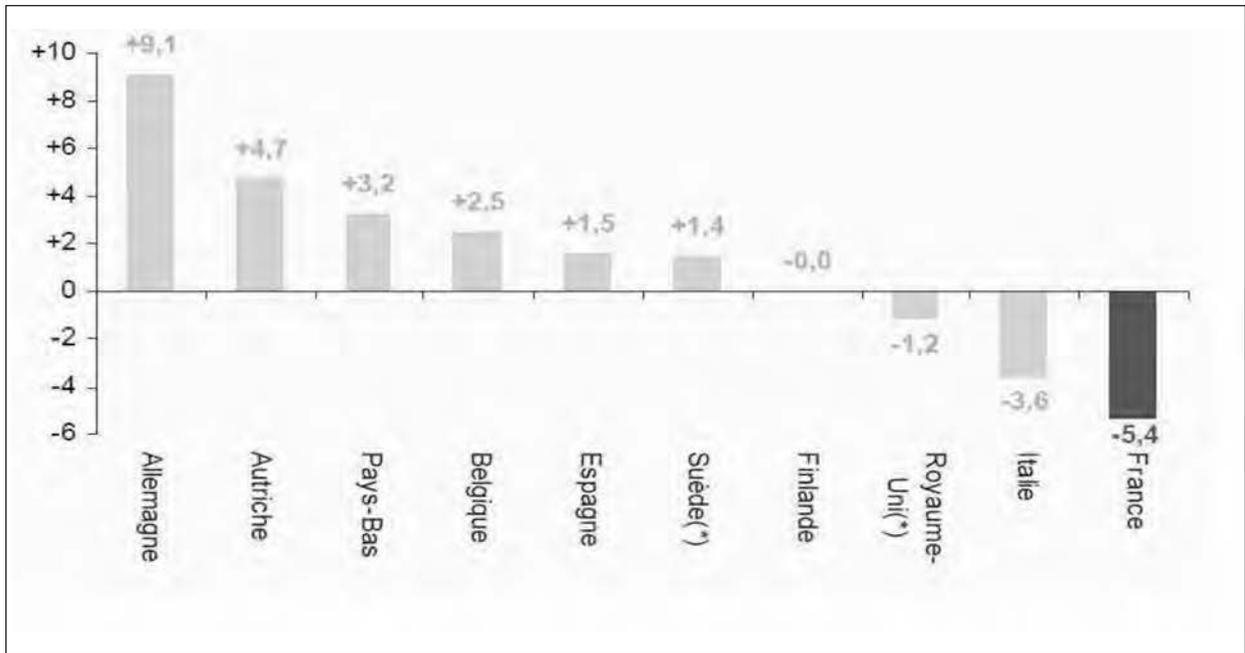


Figure 3 : Evolution du taux de marge 2000-2007 (en points de VA au coût des facteurs).

Source OCDE – base de données STAN.

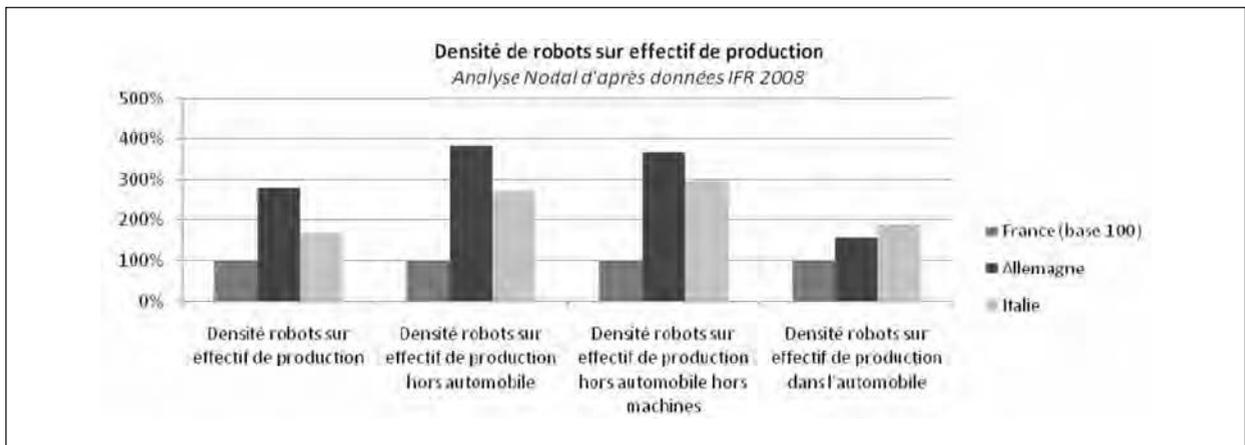


Figure 4.

adoptées en faveur de la robotisation, apparaît *a posteriori* comme une erreur.

S'agissant des services, la robotisation n'apparaît pas intuitivement comme aussi pertinente. Pourtant, là aussi, on peut faire un diagnostic et des suggestions : ce que montre la figure 5 de la page suivante, c'est le fait que ce sont plutôt les pays nordiques ou les pays anglo-saxons qui, avec un niveau de développement comparable à celui de la France, ont trouvé dans les services des gains de productivité les plus importants. L'usage des TIC y est pour beaucoup et on rejoint, en cela, la première partie de cet article : apparaissent ainsi l'intérêt d'une robotisation des services à la personne (qui n'empêche pas la croissance de l'emploi dans ce secteur, un emploi qui accompagne les usages), les traitements automatisés de courrier et de paquets dans les services postaux, le traitement de déchets, les opérations en milieux hostiles ou difficilement accessibles (par exemple, le savoir-faire fran-

çais a été mobilisé pour des robots fonctionnant en atmosphère contaminée ou pour des robots sous-marins intervenant sur les lieux d'accidents récents), les traitements automatisés en matière financière (qui s'ils ont permis l'amélioration de l'efficacité bancaire, ne sont pas pour autant exempts de critiques, notamment en ce qui concerne les opérations automatisées qui peuvent ajouter à la volatilité des marchés).

S'agissant des services à la personne, les pays les plus nettement vieillissants, comme le Japon, se sont très tôt préoccupés non seulement de robotique humanoïde, mais aussi d'autres formes de robots, et ils ont accompagné cet effort technologique par des supports culturels qui font une large place aux robots. La France dispose également en la matière d'outils performants développés notamment, mais pas exclusivement, dans des pôles de compétitivité. Il peut s'agir non seulement de robotique domestique (SEB, par exemple), ou de robotique humanoïde (Aldebaran),

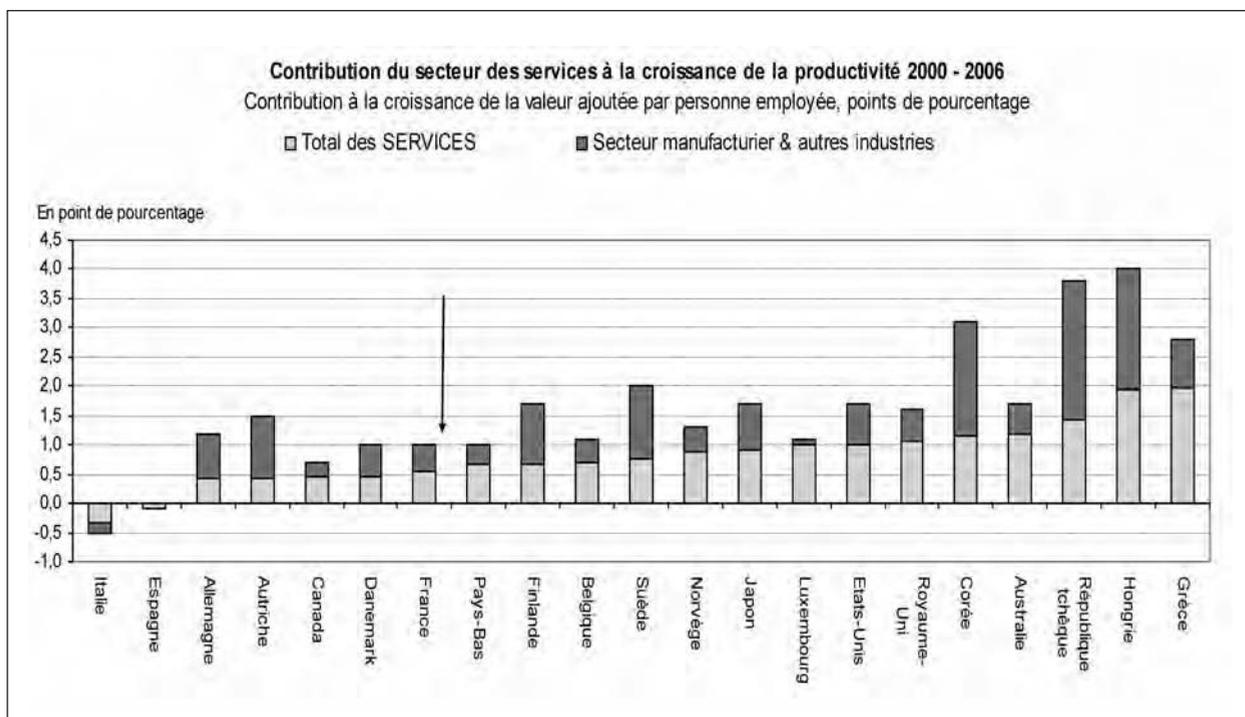


Figure 5 : Productivité comparée des services.

mais aussi de dispositifs comme les différentes formes d'aide au déplacement ou des rampes d'accès mobiles pour escaliers intérieurs qui permettent aux personnes âgées bénéficiant encore d'un certain degré d'autonomie de demeurer à leur domicile. Le bénéfice est double : pour les intéressés qui, en général, souhaitent demeurer dans leur cadre habituel, et pour la collectivité, du fait d'un coût de prise en charge moindre par rapport à celui d'une institution spécialisée. En pratique, on accroît en moyenne d'un peu plus d'un an l'âge à partir duquel une telle prise en charge devient nécessaire. Il est probable que le recours à de tels robots ira croissant à l'avenir : la réforme de la dépendance (annoncée désormais pour 2012) devrait

prendre en compte cet aspect, en ayant aussi pour préoccupation de disposer d'une capacité de création de valeur par l'industrie et les services concernés qui contribuera à en rendre plus supportable le coût pour la collectivité et, à travers leurs charges, pour les entreprises.

Ainsi, la robotique ouvre de vastes perspectives, à l'interface de nombreuses sciences : la mécanique, le logiciel, l'électronique, les nanotechnologies, les matériaux, la médecine, l'analyse de risques, l'économie, la sociologie, le *marketing* et les sciences de la communication. Elle est porteuse de nouveaux progrès pour tous ceux qui, par-delà des schémas convenus, voudront activement les rechercher.

Vers de nouveaux usages des robots mobiles

D'abord utilisée en logistique de production avec pour finalités la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité des produits et la rationalisation des flux à l'intérieur des usines, la robotique s'ouvre à de nouvelles applications dans les domaines de la construction, de la santé ou du nucléaire.

BA systèmes mobilise ainsi son savoir-faire acquis dans l'industrie pour répondre à de nouveaux besoins liés à la protection des êtres humains, à l'amélioration des gestes humains, à leur sécurisation et à l'automatisation d'activités dans des milieux hostiles. Pour répondre à ce défi de diversification, BA systèmes a adopté une organisation originale de son innovation reposant sur la mise en place d'une fonction spécifique, celle d'innovateur relationnel chargé de développer des liens externes, notamment avec les laboratoires de recherche et les utilisateurs.

Par Guy CAVEROT*

Depuis près de trente ans, BA Systèmes, une PME technologique bretonne de plus de cent personnes, conçoit, fabrique et entretient des robots mobiles industriels. Ces machines complexes, d'abord utilisées en logistique de production, s'invitent aujourd'hui dans des applications nouvelles : construction, santé, agriculture. La PME a choisi d'adresser ces nouveaux marchés grâce à une organisation originale de son innovation.

Cet article présentera d'abord les activités de robotique mobile dans le secteur industriel, puis les nouvelles activités de diversification dans ce domaine particulier de la robotique seront exposées en regard de la problématique managériale liée à l'innovation au sein d'une PME. Enfin, des perspectives sur l'évolution possible de l'usage des robots mobiles et sur les tendances observées dans ce domaine à travers le monde seront présentées.

LES ROBOTS MOBILES INDUSTRIELS

Les robots mobiles industriels sont des machines permettant de déplacer automatiquement des charges à l'intérieur des entreprises produisant des biens de consommation ou des équipements. Ces machines autoguidées sont équipées de systèmes de sécurité leur permettant d'évoluer à proximité des personnels. Communément appelés AGV (*Automated Guided Vehicle*), les robots mobiles industriels sont issus des technologies des chariots filoguidés, qui étaient très usités durant les années 1980. Ces machines permettaient jusqu'alors de répondre à des besoins de logistique. Aujourd'hui - grâce au développement des tech-

* BA Systèmes Rennes S.A.S.

nologies du guidage, de la mécatronique et des superviseurs - ces robots sont en mesure de répondre à de nouveaux besoins.

Répondre à des besoins de l'industrie en matière de logistique

L'utilisation des AGV dans l'industrie peut être séparée en trois grandes familles : la logistique de production, le stockage automatisé et les expéditions de biens. Cette typologie, bien établie depuis une vingtaine d'années dans l'industrie, présente l'avantage de permettre l'établissement d'une correspondance entre une application recherchée et des machines y répondant. L'utilisation des AGV s'inscrit dans une démarche d'automatisation des usines de production, la logistique étant souvent le dernier maillon de la chaîne à en bénéficier (voir le tableau 1).

Les applications relevant du domaine de la logistique ont pour fondements la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité des produits et la rationalisation des flux à l'intérieur des usines. Pour des applications à hautes cadences (supérieures à 80 palettes par heure) et pour des fonctionnements en continu (24H/24), les AGV permettent de s'affranchir du coût élevé de solutions manuelles (avec des caristes et/ou des chariots). Pour ces applications recourant aux AGV, le retour d'investissement moyen est inférieur à 18 mois. L'amélioration de la qualité des produits est permise

grâce aux modes de commande des AGV, qui permettent de garantir l'intégrité des charges (accélération continue, vitesse constante, protection de la charge pendant son transfert). Ces choix sont faits pour des charges fragiles ou de grande valeur (fret aérien, médicaments, aliments, cosmétiques). En ce qui concerne les démarches d'amélioration continue visant à garantir le respect des délais de livraison aux clients, l'intégration d'AGV va permettre de rationaliser les flux de production et, parfois même, de donner leur rythme à des lignes de production (applications s'inscrivant dans le cadre du *Lean Manufacturing*).

Des besoins liés à l'hygiène ou à la sûreté sont également satisfaits grâce à leur utilisation dans l'industrie agroalimentaire, dans le nucléaire militaire, le fret « sensible » (valeurs, biens stratégiques) ou les stockages de données confidentielles (archives d'un pays). Dans ces applications, les robots mobiles garantissent la non présence de personnes susceptibles d'altérer, de voler ou de polluer les charges traitées.

L'offre de produits

Le produit : un système robotique complexe

Les systèmes de robots industriels sont des systèmes constitués de plusieurs éléments : la flotte de robots mobiles industriels, une installation de communication, des infrastructures de guidage, un superviseur et

Domaines d'applications	Exemples d'applications	Illustrations
Logistique de production	Transfert de charges entre des points d'entrées et des unités de traitement de ces charges. Dans le fret aérien, par exemple, entre les camions et les gares de préparation des palettes et entre les stocks et les docks de chargement des avions.	
Stockage automatisé	Stockage et déstockage automatisés de palettes ou de bobines dans des stocks dont la taille varie entre 300 et 10 000 emplacements. Dans la chaîne de production des biens, ces stocks sont intermédiaires ou finaux.	
Expéditions	Préparation grâce à des AGV de commandes sur palettes ou préparation des contenus de camions, sur leurs quais de chargement. Le chargement automatique des camions est aussi une tâche opérée par des AGV.	

Tableau 1.

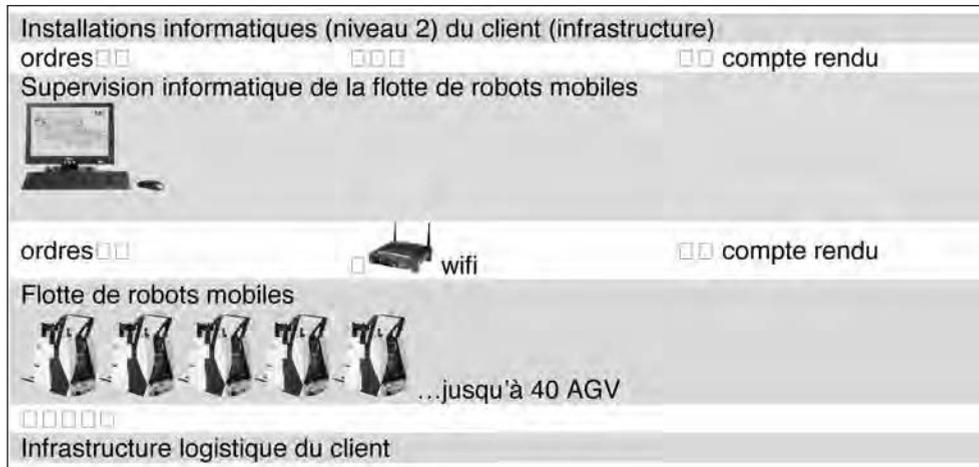


Tableau 2.

des interfaces de logistique. Ces éléments sont reliés entre eux afin de répondre à la fonction de transfert automatique de charges. Le système est également relié à l'installation informatique et logistique du client (voir le tableau 2).

Les AGV (Automated Guided Vehicles)

Les AGV (*Automated Guided Vehicles*) sont considérés comme des objets mécatroniques. Constitués d'une base mécanique formée d'un châssis et d'un outil (fourches, convoyeur) et d'un ensemble de compo-

sants électriques et électroniques, ils sont commandés et contrôlés par un ordinateur embarqué relié à un superviseur informatique par des ondes radio. L'AGV est une machine complexe dont les fonctions robotiques sont assurées par un système de guidage automatique (voir le tableau 3).

La supervision automatique des robots

Le système de supervision automatique est un système informatique permettant d'attribuer des missions de transfert de charges (par exemple, des palettes, des

Guidage automatique	Le guidage automatique est assuré grâce à un scrutateur Laser qui donne la position de l'AGV dans son espace d'évolution. D'autres capteurs, les codeurs, permettent de connaître le déplacement relatif de l'AGV entre deux pointages par le scrutateur Laser. Le guidage automatique par recalage Laser représente en Europe les trois quarts des installations. D'autres techniques de guidage (comme le filoguidage ou le recalage sur aimants) sont également utilisées.
Sécurité	Les AGV évoluent dans des zones fréquentées par des personnes. Ils doivent donc être équipés de capteurs permettant l'arrêt automatique du robot lorsqu'une personne se trouve à proximité. Ces capteurs sont aussi des scrutateurs Laser à nappe dont la zone de détection est paramétrable ou des capteurs radiofréquence (US, radar). La norme française EN-1525 relative aux chariots sans conducteur définit les règles de détection et d'arrêt des robots mobiles.
Energie	Les AGV sont des machines autonomes du point de vue énergétique. Des batteries d'une capacité variant de 120 à 800 ampères-heures sont embarquées sur la machine. Ces batteries sont soit rechargées (le robot se déplace automatiquement vers des plots de rechargement), soit échangées (une opération réalisée grâce à un robot). La technologie des batteries utilisées pour l'énergie des AGV est le plomb étanche.
Contrôle commande	<div data-bbox="399 1678 654 1973" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="702 1666 1404 1984">Un logiciel embarqué sur l'AGV permet de gérer les fonctions principales (de traction, de direction et de préhension) grâce à l'exploitation de données issues de capteurs et à la commande d'actionneurs (moteurs synchrones ou asynchrones, alimentés en 24 ou 48 volts). Un noyau logiciel embarqué temps réel permet de gérer certaines fonctions (comme le guidage automatique). Ce logiciel assure également la communication avec le superviseur. Cette photographie présente les différents composants sur le chariot automatique. La compacité de la machine permet d'assurer une circulation plus aisée au sein des ateliers de production ou des zones logistiques.</p>

Tableau 3.

bobines de papier, des containers...) aux chariots automatiques. Le superviseur permet de gérer la circulation de la flotte de robots, notamment dans les zones de croisement où des programmes informatiques améliorent la fluidité de cette circulation et augmentent ainsi la performance globale de l'installation. Le superviseur permet également de gérer les échanges d'informations avec les AGV et d'afficher, en temps réel, la position de ces derniers (synoptique). De nouveaux programmes sont associés à ce superviseur, comme par exemple les analyseurs, qui permettent de « rejouer » des configurations de fonctionnement afin d'améliorer les performances de l'installation.

L'offre de services

Le maintien des conditions opérationnelles

Associés à ces produits, des services sont proposés pour le maintien des conditions opérationnelles des systèmes robotiques à base d'AGV. Ces services consistent à réaliser de la maintenance, préventive et/ou corrective, et à proposer des services d'assistance technique en informatique. Les AGV présentent des taux de disponibilité opérationnelle importants (de l'ordre de 99,5 %) ; de plus, leur durée de vie moyenne est voisine de 30 000 heures. En conséquence, les opérations de maintenance doivent être menées par des équipes spécialisées et répondre à des niveaux de qualité élevés.

Les autres services

Les autres services proposés par l'entreprise BA Systèmes s'inscrivent dans des axes de diversification ou de réponse à des besoins spécifiques de l'industrie. Ainsi, une filiale est spécialisée dans la location de systèmes à des grands comptes de l'industrie afin de réduire les immobilisations. Des services de formation technique (en matière d'utilisation des machines, d'exploitation, de maintenance) sont également proposés durant les phases d'exploitation des installations. Enfin, grâce à l'exploitation des compétences spécifiques de l'entreprise en matière de recherche et de conception, une nouvelle offre réside dans la proposition de services de recherche à des tiers dans le domaine de la robotique mobile.

Le site de production du groupe Sodebo : un exemple d'installation utilisant des AGV

Sodebo, leader français du marché traiteur frais, compte 2 000 salariés [a]. En 1973, la société se spé-

cialise dans la fabrication et la commercialisation de produits frais. Basé à Saint-Georges de Montaigu (Vendée), Sodebo dispose d'un unique site de production pour produire l'ensemble de la gamme de ses produits destinés à l'Europe. Fort du succès rencontré par le lancement d'un nouveau produit, Sodebo décide d'automatiser les flux sur la ligne de production dédiée à ce produit novateur.

Fin 2010, une installation d'AGV est achetée à BA Systèmes. Les objectifs prioritaires de ce système d'automatisation étaient l'augmentation de la productivité et un gain de sécurité sur cette ligne de production. BA Systèmes a déployé des chariots automatiques baptisés Artemis®. Cet AGV de dernière génération est compact et son interface de commande tactile est conviviale. Artemis® est doté d'une motorisation asynchrone, ce qui accroît ses performances et réduit son coût de maintenance.

Les chariots de type gerbeur à longerons gèrent les flux des palettes de produits finis en sortie des lignes de palettisation, vers la banderoleuse. Un chariot de même type assure les flux, en sortie de la banderoleuse, vers un stock tampon ou vers les quais d'expédition, pour effectuer les chargements des camions en automatique. La flotte AGV alimente également en palettes vides les lignes de palettisation. Cette application logistique performante gagne en efficacité et en sécurité. La sécurité des caristes (mais aussi celle des charges transportées, qui sont très instables en sortie de palettisation, car elles ne sont pas encore « filmées ») en est ainsi accrue. L'ensemble du système logistique est assuré par AGV Manager®, un système de pilotage optimisé. AGV Manager® a été conçu par le bureau d'études de la société BA Systèmes pour assurer le contrôle des fonctions logistiques autour des chariots.

L'ensemble des produits et services proposés ci-dessus s'adresse à des clients industriels de la production de biens de consommation (alimentation, médicaments, hygiène) et de biens d'équipement (construction, machines) [b]. Nous allons voir comment le métier des robots glisse maintenant vers de nouvelles applications.

DU DOMAINE DE L'INDUSTRIE À CELUI DE LA SANTÉ

Depuis cinq ans, BA Systèmes répond aux sollicitations de nouveaux clients dans d'autres domaines d'activités que les domaines habituels d'utilisation des chariots automatiques (AGV) ; ces nouveaux domaines sont l'agriculture, la santé, le nucléaire de

recherche ou la construction [c]. Cette diversification est le fruit d'une expérimentation de recherche en science de gestion.

La solution apportée à un problème managérial d'innovation soulevée par la diversification

En 2007, dans le cadre de son nouveau plan stratégique, l'entreprise a décidé de diversifier son activité avec une déclinaison tactique visant à créer de nouvelles sources de valeur, à exploiter les compétences internes (très fortes, pour une PME comptant, à l'époque, soixante-dix personnes) et à apporter de nouvelles connaissances venues de l'extérieur. Cette volonté de diversification posait cependant un problème majeur, celui de la capacité d'innover au sein d'une PME disposant d'un produit complexe et de ressources limitées, notamment en matière d'innovation. Pour répondre à cet objectif d'innovation, le principe retenu a été celui de la mise en œuvre d'une fonction spécifique d'innovateur relationnel fondée sur le profil des *Technological Gatekeepers* défini dans la littérature scientifique par Thomas Allen (de l'école de management Sloan du Massachusetts Institute of Technology - MIT) [1]. Cet innovateur a ainsi pu développer des liens externes avec les laboratoires de recherche et les utilisateurs, tout en maintenant des liens en interne afin de développer de nouveaux produits dans un cadre d'innovation collaborative [2] en liaison avec des laboratoires de recherche.

L'entreprise s'est alors engagée dans une voie de diversification repositionnant le montage et la participation à des projets de recherche en robotique dans des domaines différents du domaine industriel classique. Cette démarche s'est accompagnée du dépôt d'une série de brevets permettant de protéger les nouvelles connaissances acquises (voir le tableau 4).

La diversification : une réponse à de nouveaux besoins

L'objectif de la diversification étant la création de valeur, BA Systèmes a cherché, *via* le travail de l'innovateur relationnel, de nouveaux usages permettant de valoriser les savoir-faire acquis en matière industrielle dans les thématiques de la robotique mobile. L'innovateur relationnel a ainsi exploré des domaines d'application jusqu'alors inconnus, et la sérendipité (1) a complété cette exploration pour développer, dans ces zones inconnues, de nouveaux projets de robots. Ainsi, le savoir-faire acquis dans l'industrie a

(1) La sérendipité est le fait de réaliser une découverte inattendue grâce au hasard et à l'intelligence, au cours d'une recherche dirigée initialement vers un objet différent de la découverte faite (source Wikipédia).

été étendu à des besoins liés à la protection des êtres humains, à l'amélioration des gestes humains, à leur sécurisation et à l'automatisation d'activités dans des milieux hostiles. L'exploration de ces champs d'application a ouvert aux machines mobiles automatisées de nouveaux marchés dans les secteurs de l'agriculture, de la construction-BTP et de la santé.

Les trois exemples du tableau 5 de la page suivante présentent des robots développés (ou en phase de développement) dans des domaines nouveaux au sein de l'unité de diversification de BA Systèmes.

Les trois projets de robotique en question ont été mis en œuvre dans le cadre de projets collaboratifs de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), du Fonds unique interministériel (FUI) ou régionaux. L'apport de BA Systèmes reposait sur des tâches qu'il maîtrise dans ses activités industrielles. Ainsi, la réalisation de spécifications, la production de dossiers de conception mécatronique, la fabrication et le test de machines ont été les tâches intégrées à des travaux de recherche appliquée ou de développement expérimental traités par le CEA List, L'IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes), l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) ou par des universités européennes.

Notons que cette démarche de diversification ne se limite pas, grâce à l'innovation ouverte, à la seule intégration de nouvelles connaissances au sein de l'entreprise. Elle est aussi une vraie source de valeur ajoutée et de création d'emplois directs (chez BA Systèmes) ou indirects (chez des fournisseurs ou des partenaires). La diversification dans le domaine médical a fait l'objet de la création d'une unité de 2 500 m²

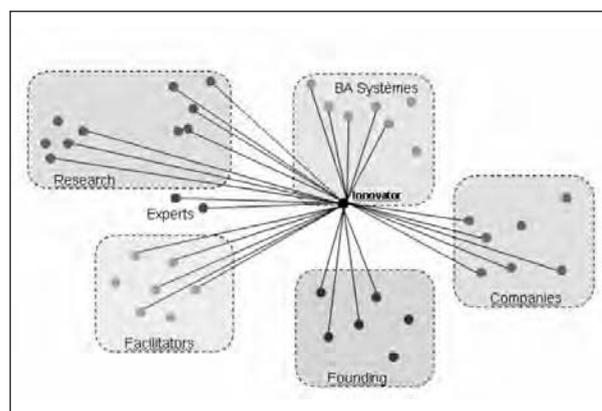


Tableau 4 : L'innovateur relationnel occupe une place centrale au sein des réseaux de l'innovation. L'activité de l'innovateur relationnel - fondée sur le profil des *Technological Gatekeepers* - consiste à établir et à maintenir des liens avec les acteurs de l'innovation (laboratoires, facilitateurs, financeurs), à construire les projets d'innovation collaborative et à gérer les aspects de propriété intellectuelle liés à l'innovation. Ces activités induisent des capacités dynamiques [3] au sein de l'entreprise, qui permettent d'en améliorer la performance.

Domaines	Exemples d'application	Illustrations
Agriculture	Automatisation de l'alimentation du bétail permettant de libérer du temps pour l'éleveur et d'améliorer la qualité de la viande par une alimentation régulière avec des rations précises.	
Construction	Automatisation des opérations de finition sur les bétons (ponçage, perçage, parachèvement) permettant de diminuer les troubles musculo-squelettiques des compagnons dans la construction et permettant d'intervenir en milieu hostile (nucléaire, chaud, froid).	
Santé	Machine de rééducation fonctionnelle pour la correction des maladies dégénératives (Alzheimer, Parkinson) permettant de soulager le kinésithérapeute, d'opérer des exercices de rééducation nouveaux et de réduire les durées de rééducation.	

Tableau 5.

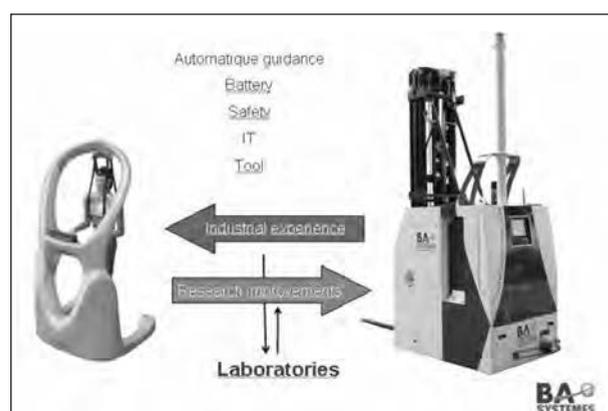


Tableau 6.

dédiée à la production d'un robot développé dans le cadre d'un projet collaboratif FUI.

Transferts de connaissances et de savoir-faire

Le développement de produits innovants de manière collaborative au sein d'une entreprise permet d'enrichir chacune des activités, industrielle et de recherche, par la correction de manques constatés dans une autre activité. Ainsi, l'expérience industrielle sert les activités d'innovation, et les améliorations de la recherche servent l'activité industrielle. Les laboratoires sont impliqués dans ce mouvement de transfert et bénéficient d'expériences ou de références, ou ils fournissent

des contributions scientifiques ou techniques. Ces transferts valent pour les technologies, mais aussi pour les méthodes de management ou de suivi de projet (normalisation ISO 9000) (voir le tableau 6).

PERSPECTIVES

L'ouverture du champ des applications recourant aux AGV est liée à l'exploitation de connaissances issues de laboratoires de recherche, comme le CEA List, pour la cobotique (travail simultané entre une personne et un robot) ou l'IRCCyN, pour l'automatisation des opérations d'usinage de pièces de grandes longueurs. L'AGV est un robot, il apporte la force, la précision et la répétabilité, l'homme apportant, quant à lui, ses capacités décisionnelles et d'adaptation. Demain, d'autres champs de diversification des applications recourant aux AGV concerneront les transports en commun automatisés de nos villes, le travail agricole des sols avec des robots mobiles ou le nettoyage industriel de grandes surfaces. D'un point de vue technologique, les AGV profitent des développements de capteurs et d'actionneurs issus de l'électronique grand public et de l'automobile (caméras, centrales inertiels, moteurs synchrones, scrutateurs (pour la sécurité)). Ces capteurs permettent de réduire le coût global des installations de logistique automatisées.

De nouveaux défis se présentent, en ce qui concerne les robots mobiles [d]. Le groupe de recherche Robotique du CNRS a notamment inscrit six défis, dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE, WEBOGRAPHIE

- [1] ALLEN (T.J.) (1984), *Managing the Flow of Technology*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [2] CHESBROUGH (H. W.) (2003), *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*, Cambridge, MA, Harvard Business School Press.
- [3] TEECE (D.J.) (2007a), "Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance", *Strategic Management Journal*, 28, pp. 1319-1350.
- [a] <http://www.sodebo.fr/>
- [b] <http://www.basystemes.com/>
- [c] <http://www.agv-basystemes.com/>
- [d] http://www.gdr-robotique.org/cp_feuille.php

Vers une cartographie sémantique d'environnements intérieurs

La recherche en cartographie, pour la robotique, porte de plus en plus sur des modèles d'environnements sémantiques contenant des concepts humains (tels que les pièces d'un bâtiment ou les objets). Nous avons développé un robot capable de construire de telles cartes dans le cadre d'une compétition d'exploration de bâtiments. Reposant sur les capteurs d'un type nouveau que sont les caméras de profondeur, ce système montre que la construction de tels modèles est possible, mais qu'elle repose sur des systèmes d'une grande complexité.

Par David FILLIAT*

INTRODUCTION

La robotique de service pour les particuliers en est encore à ses balbutiements. Elle fait l'objet de nombreux programmes de recherche, mais, hormis des succès dans des domaines très spécialisés (comme les robots aspirateurs), il n'existe pas aujourd'hui, commercialement, de robots pouvant assister efficacement des personnes dépendantes ou ranger un appartement. Les facteurs limitants sont multiples, que ce soit au niveau mécanique ou au niveau logiciel, mais l'une des principales limitations reste la capacité, pour le robot, de percevoir l'environnement et de l'interpréter. Ainsi, par exemple, apporter un objet à une personne demande des capacités (de détecter cet objet dans des situations très variées et de se déplacer dans un environnement changeant) qui ne sont pas encore suffisamment fiables pour être utilisées sans préparation, chez un particulier.

LA CARTOGRAPHIE EN ROBOTIQUE

Pour des robots de service, la construction d'une carte de l'environnement est une fonction de base qui sert de support à leur navigation. Les cartes permettent, d'une part, d'obtenir une estimation fiable, à long terme, de la position du robot dans les environnements intérieurs où des méthodes telles que le GPS sont inutilisables et, d'autre part, de planifier des déplacements pour rejoindre des lieux distants. Un certain nombre d'applications sont bien sûr possibles sans cartographie : par exemple, certains robots aspirateurs se contentent de déplacements aléatoires qui finissent par couvrir tout l'environnement à traiter, sans planification préalable de trajectoire. Cependant, des applications de robotique de service plus complexes nécessiteront des capacités de localisation et

* Enseignant-Chercheur à l'ENSTA ParisTech.

de planification évoluées (par exemple, pour aller chercher des objets et les apporter à leur utilisateur).

UN DOMAINE MATURE

La qualité des capteurs utilisés pour la navigation est particulièrement importante pour l'obtention de bonnes performances. Ainsi, l'apparition des télémètres laser à balayage, dans les années 1990, a permis de quasiment résoudre le problème de la cartographie 2D, ce qui a permis l'apparition de solutions commerciales fiables. Le coût de ces capteurs reste assez élevé, mais il existe, par exemple, des modèles commercialisés de robots aspirateurs qui réalisent une cartographie leur permettant de nettoyer plus rapidement l'environnement. Pour des robots de plus grande taille, cependant, la cartographie 2D ne suffit plus et la majeure partie des recherches actuelles porte sur la cartographie 3D. De très nombreux travaux portent sur l'utilisation de la vision seule, qui peut fournir de bonnes performances, mais la démocratisation récente de caméras mesurant la profondeur, avec la commercialisation de la caméra Kinect (de Microsoft), a permis de faire des progrès rapides en cartographie 3D dense. Avec ce type de capteurs, il est non seulement envisageable de construire des cartes 3D, mais aussi d'aller plus loin, en intégrant des informations *sémantiques* au sein de ces cartes.

UNE CARTOGRAPHIE SÉMANTIQUE

L'objectif de la cartographie sémantique est de construire des cartes contenant des informations de plus haut niveau que les cartes brutes (construites directement à partir d'un télémètre laser, par exemple). En effet, pour pouvoir agir efficacement, un robot a besoin de plus d'informations que sa position et celle des obstacles qui l'entourent. Pour chercher un objet, par exemple, il peut être utile de structurer l'environnement en pièces et de savoir si le robot se trouve dans une cuisine ou dans une chambre. De même, dans chaque pièce, il est utile de savoir que certains des obstacles sont des tables sur lesquelles on pourra trouver des objets, ou des placards qu'il faudra ouvrir pour y prendre des objets. Pour la navigation elle-même, une information de plus haut niveau aura son utilité, par exemple, pour déterminer qu'un obstacle est une chaise ou un rideau, c'est-à-dire des objets qui pourront être poussés, si besoin est, pour libérer le passage.

COMPÉTITION CAROTTE

La cartographie sémantique est aussi utile pour un opérateur dans un contexte militaire. Lors de l'utilisation

d'un robot d'exploration, notamment, il serait plus aisé pour un opérateur dans un contexte de stress, d'analyser une carte qui fournirait directement des informations de haut niveau en termes de présence de couloirs, de pièces, de meubles et d'objets, que d'interpréter une simple carte des obstacles. Dans ce contexte, l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) et la Direction Générale de l'Armement (DGA) ont publié un appel d'offres, nommé CARTographie par ROboT d'un TErritoire (« Carotte »), dont l'objectif, pour les projets retenus, est de participer à un défi les opposant entre eux en vue de réaliser la cartographie sémantique d'un environnement intérieur. Le système présenté dans cet article a été développé dans le cadre de l'un des projets retenus, le projet Pacom (*Panoramic and Active Camera for Object Mapping*).

Ce défi se déroule dans des arènes modulaires composées de différentes pièces dans lesquelles sont disposés des objets de différentes tailles. L'objectif des compétiteurs est d'explorer ces arènes de manière complètement autonome, sans intervention de l'opérateur, et de fournir une carte de ces arènes en identifiant les pièces, les types de sols et de murs et les objets présents.

LE PROJET PACOM

Le projet Pacom est commun à trois entités : l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées ParisTech (ENSTA ParisTech) (en charge de la navigation, de la cartographie, de l'exploration et d'une partie de la détection d'objets), l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) de l'université Pierre et Marie Curie (en charge de la détection d'objets et des interfaces de contrôle) et la société Gostai (en charge de l'architecture logicielle).

Pour réaliser la cartographie sémantique proposée dans le défi Carotte, nous avons conçu un robot disposant de nombreux capteurs, auquel nous avons intégré plusieurs algorithmes de cartographie et de détection d'objets complémentaires afin d'obtenir un système qui présente une capacité d'adaptation suffisante et soit robuste.

ARCHITECTURE MATÉRIELLE

Nous avons choisi de nous concentrer sur la problématique logicielle, sans chercher à développer une plateforme spécifiquement adaptée à un contexte militaire. La base mobile que nous avons choisie est le robot Pioneer 3 dx de la société Mobile Robots. Dans la version que nous avons utilisée, la plateforme est dotée de deux roues commandées indépendamment, de seize capteurs sonars disposés sur tout le pourtour du robot, d'un télémètre laser SICK LMS 200 et d'une caméra orientable Canon vcc50i. Le robot est équipé d'un microcontrô-

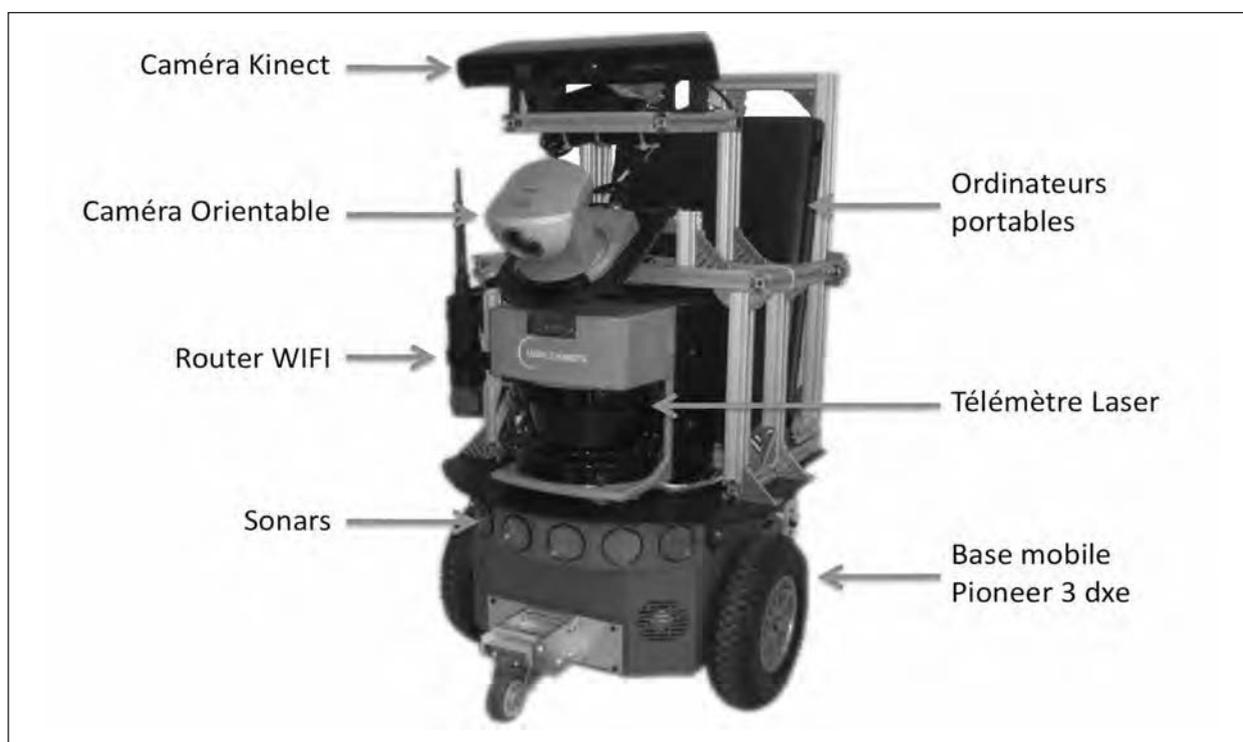


Figure 1 : Le robot développé dans le cadre du projet Pacom présenté au titre de la compétition Carotte.

leur assurant le contrôle des capteurs et l'asservissement des moteurs, et d'un ordinateur embarqué fonctionnant sous Linux (voir la figure 1).

Sur cette base, nous avons conçu une structure mécanique permettant d'ajouter une caméra de profondeur (Kinect de Microsoft) et deux ordinateurs portables, pour exécuter les différents algorithmes impliqués dans la cartographie sémantique. Pour diminuer les coûts et simplifier le développement, nous avons choisi d'utiliser des ordinateurs portables standards, qui ont, de plus, l'avantage de posséder leur propre alimentation. Les différents ordinateurs sont reliés par un réseau Ethernet au travers d'un routeur. Ce routeur est également un point d'accès Wifi qui permet de connecter une station de contrôle externe au robot, pour le contrôle d'exécution.

ARCHITECTURE LOGICIELLE

L'architecture logicielle de l'ensemble du projet utilise le *framework* Urbi développé par la société Gostai. Ce *framework* est basé sur un *middleware* qui permet de distribuer sur plusieurs processeurs des composants écrits en langage C++ (*UObjects*). La mise en œuvre de ces composants se fait très simplement au travers d'un langage de script dédié à la robotique, urbiScript, qui permet de gérer de manière simple l'exécution parallèle des composants et le traitement des événements. L'utilisation de ce langage de script permet une grande souplesse pour la réalisation de tests interactifs et la modification du comportement global du robot.

Urbi permet donc de répartir simplement les calculs sur les différents ordinateurs embarqués sur le robot. De plus, le fait que les *UObjects* en mode distant soient des processus indépendants permet également de répartir naturellement les calculs sur les différents cœurs d'un processeur multi-cœurs. En effet, il suffit de lancer un *UObject* en mode distant sur le même ordinateur pour bénéficier d'un parallélisme certes assez simple, mais sans avoir besoin de programmer spécifiquement les composants dans ce but.

Pour le projet, nous avons donc développé un ensemble d'*UObjects* en langage C++ réalisant les différentes fonctionnalités nécessaires : interface avec le matériel, cartographies 2D et 3D, planification, suivi de trajectoire, exploration, détection d'objets et cartographie sémantique. L'ensemble de ces *UObjects* est réparti sur les différents processeurs du robot. Toute la mission du robot est codée en urbiScript, qui utilise les fonctionnalités de ces *UObjects* et coordonne leur activation.

LA DÉTECTION D'OBJETS

La détection d'objets dans des environnements réalistes reste un problème difficile. Dans notre projet, elle est réalisée à partir des informations fournies par la caméra de profondeur en utilisant à la fois la structure 3D et l'apparence extraite de l'image couleur associée. Dans le cadre de la compétition, la majorité des objets sont connus à l'avance et il est donc possible d'entraîner les algorithmes de reconnaissance avant l'épreuve.

La première étape du processus de reconnaissance est la détection d'objets potentiels avant leur identification. A

partir du nuage de points 3D fourni par la caméra, nous commençons par détecter le plan du sol, dont la position est grossièrement connue, puis nous supprimons les points du sol et nous créons des groupes correspondant à tous les ensembles de points contigus restants. Les groupes sont ensuite filtrés et ceux présentant trop peu de points ou une taille trop faible sont supprimés. Les groupes restants correspondent alors aux objets et aux murs de l'environnement.

Les objets détectés doivent ensuite être identifiés. Pour cela, nous avons développé une nouvelle méthode multimodale qui utilise trois types d'informations pour permettre de traiter l'ensemble des objets : des informations de couleur (utiles pour des objets non texturés, comme les ballons), des informations de texture et des informations de forme 3D. Ces trois types d'informations sont traités selon la même approche, la méthode des sacs de mots visuels, qui représente les objets au moyen d'une collection d'informations locales. Cette approche est particulièrement intéressante pour gérer les occultations susceptibles de cacher une partie des objets.

Les informations nécessaires sont extraites de l'image couleur, dans laquelle, en projetant le nuage de points 3D, on a masqué tout ce qui n'est pas l'objet. Nous utilisons sur cette image des histogrammes de couleur locaux et des points d'intérêt SURF. L'information 3D utilise des *Surflets* calculées à partir de l'orientation relative des normales à l'objet, caractérisant ainsi sa forme globale. Pour chacun de ces types d'informations, nous

avons construit, d'avance, des modèles des objets. La reconnaissance se fait en comparant les modèles de l'objet inconnu à tous ceux des objets connus et en fusionnant les similarités obtenues pour les 3 types d'informations à l'aide d'une méthode d'apprentissage utilisant un réseau de neurones (voir la figure 2).

Notre méthode offre de très bonnes performances de reconnaissance lorsque les objets ont été correctement segmentés, mais une segmentation correcte est difficile à obtenir lorsque le robot explore son environnement de manière autonome. La performance globale de la détection d'objets dépend donc beaucoup de la disposition desdits objets : les objets isolés seront très bien reconnus, mais les objets placés dans des positions rendant difficile leur perception ne seront généralement pas détectés.

CLASSIFICATION DES SOLS ET DES MURS

Pour la classification des sols et des murs, nous utilisons la caméra couleur orientable, que nous pointons vers le bas, ou vers l'avant. Ce processus est particulièrement important pour la détection de zones de gravier, que notre robot ne peut pas franchir. Nous avons utilisé, à cette fin, une méthode de classification de textures utilisant une forêt d'arbres aléatoires appliquée à des sous-images aléatoires. Cet algorithme d'apprentissage se base

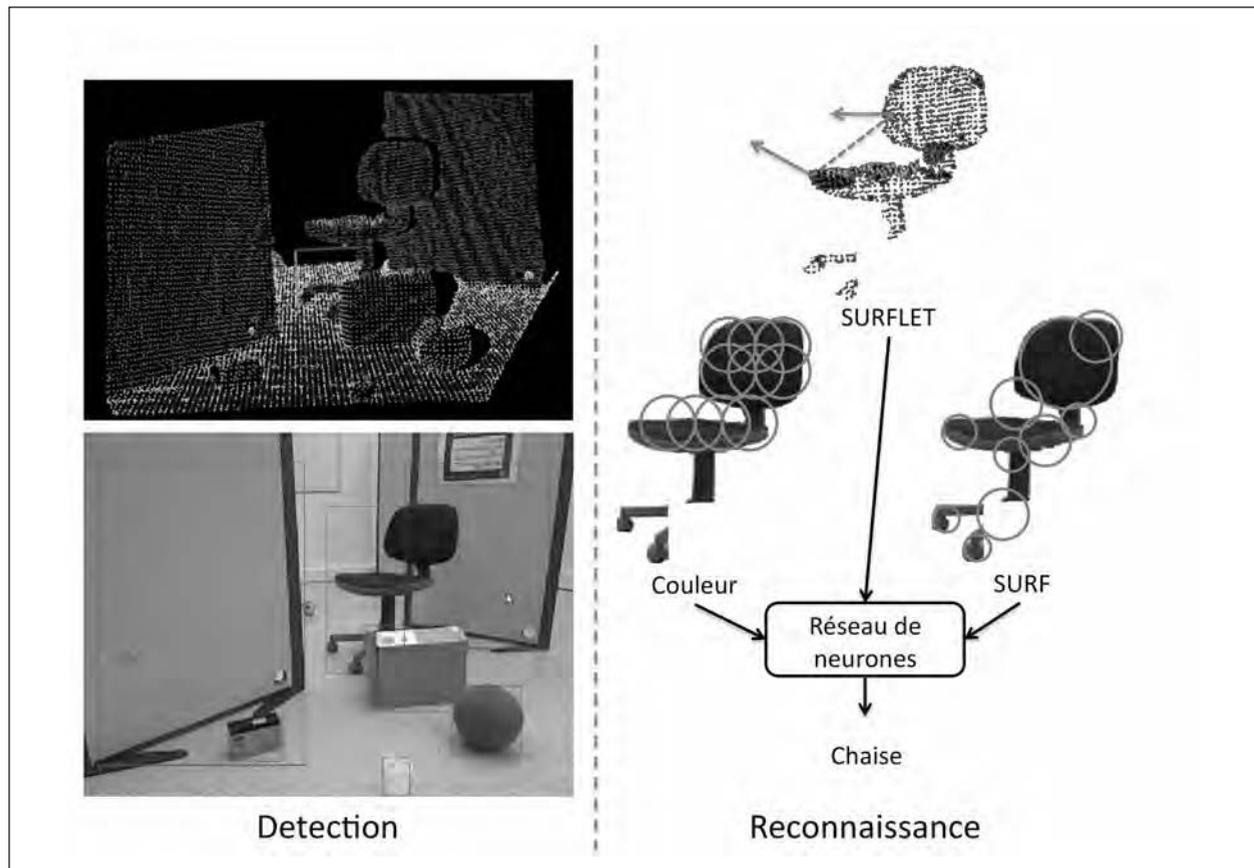


Figure 2 : Illustration de la méthode de détection et de reconnaissance d'objets.

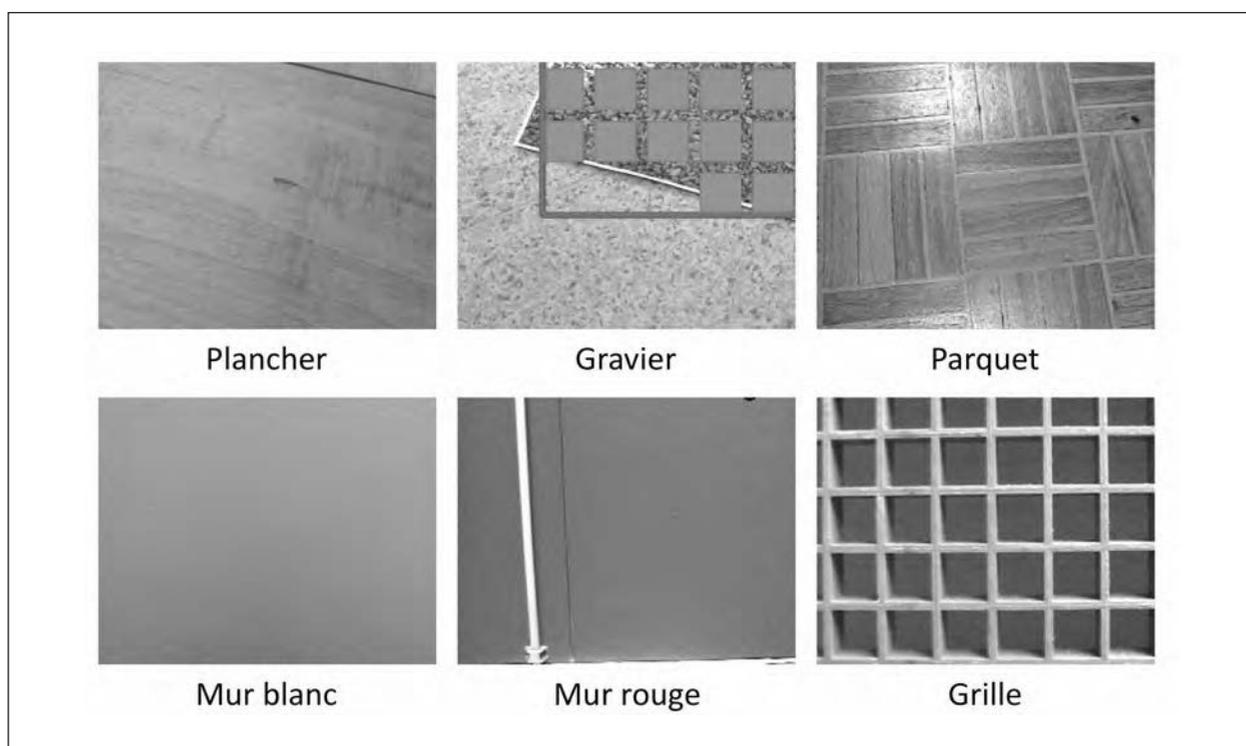


Figure 3 : Exemple de reconnaissances de types de sols et de murs.

simplement sur un ensemble d'images de chaque classe (voir la figure 3).

Cette méthode permet de prédire la catégorie des sols et des murs d'une manière très robuste et rapide. Elle a aussi l'avantage d'utiliser à la fois les informations portant sur la texture et la couleur, et donc de fournir une reconnaissance de couleur que l'on peut rendre très robuste aux variations d'éclairage, simplement en incluant ces variations dans la base d'apprentissage.

LA GESTION DES OBSTACLES

La gestion robuste des obstacles, pour un robot de grande taille, requiert une gestion en 3D de l'environnement, une robustesse qui doit se maintenir même face à des vitres ou à des miroirs. A cette fin, nous intégrons donc les informations de tous nos capteurs. Le télémètre laser détecte de manière très précise les obstacles situés à environ 30 centimètres du sol, et ce sur toute la zone à l'avant du robot. Les capteurs sonars peuvent détecter des obstacles au sol ayant moins de 30 centimètres de hauteur, sur tout le pourtour du robot. Les sonars permettent également de détecter les vitres et les miroirs qui ne sont pas (ou mal) vus par le laser. Pour les obstacles plus grands, mais invisibles pour le laser et les sonars (tels que les tables ou les bancs), nous utilisons la caméra de profondeur. Nous projetons au sol les nuages de points des objets détectés et nous ajoutons le polygone formant l'enveloppe de ces points comme obstacle dans la carte 2D. Enfin, pour les zones de gravier (que notre robot ne peut pas franchir), nous utilisons la

méthode de classification des sols par vision et nous ajoutons à la carte le polygone englobant le gravier détecté. La carte résultante permet ainsi au robot de se déplacer de manière sûre.

CARTOGRAPHIE

Notre objectif principal est de fournir des cartes sémantiques de l'environnement exploré. Dans notre approche, ces cartes sont basées sur des cartes 2D et 3D, sur lesquelles viennent s'ajouter des informations telles que les pièces, les types de sols et de murs, ainsi que les objets détectés.

La cartographie 2D est assurée par la bibliothèque commerciale Karto (de la société SRI). Ce module prend, en entrée, les données d'odométrie et les mesures du télémètre laser, et il fournit, en sortie, la carte de l'environnement sous la forme d'une grille d'occupation, ainsi que la position corrigée (voir la figure 4 de la page suivante).

Sur cette base, nous créons une cartographie 3D sous forme de nuages de points colorés obtenus à partir de la caméra de profondeur. Cette représentation est simplement créée en accumulant des nuages de points extraits par la caméra et associés aux différentes positions du robot. Cette carte permet d'avoir une représentation visuellement attrayante de l'environnement, mais qui est cependant difficile à analyser avec précision (voir la figure 5 de la page 55).

Enfin, la cartographie sémantique permet de détecter les pièces présentes dans l'environnement et d'associer à chacune d'elles la liste des objets et des types de sols et



Figure 4 : Exemple de carte 3D.

de murs détectés. Les pièces sont identifiées en cherchant tout d'abord les « portes » qui lient entre elles deux pièces, puis en analysant les espaces entourés de murs et de portes, qui correspondent alors aux pièces. La position des objets est estimée en fusionnant les différentes perceptions du même objet à l'aide d'un filtre de Kalman afin de confirmer les détections et de réduire les incertitudes de localisation.

STRATÉGIE D'EXPLORATION

Notre robot devant être autonome, l'exploration de l'environnement doit répondre à deux objectifs : découvrir l'ensemble des pièces et détecter l'ensemble des objets. Le calcul d'un ensemble optimal de positions permettant de garantir une exploration exhaustive est difficile à réaliser, mais nous pouvons proposer des solutions de bonne qualité par des méthodes heuristiques. Nous avons donc utilisé une méthode d'échantillonnage stochastique pour rechercher une bonne séquence de positions. A partir de l'état courant de l'exploration, cette méthode va tirer aléatoirement de futures positions possibles et sélectionner celle qui permettra d'obtenir le plus d'informations.

Pour chaque position échantillonnée, un score intégrant plusieurs critères est donc calculé. Le premier critère mesure la surface de l'environnement potentiellement découvert par la caméra du robot depuis la position étu-

diée, avec pour objectif de chercher des objets dans toute la zone identifiée. Le second critère prend en compte les frontières entre les zones cartographiées par le télémètre laser et les zones encore inconnues afin de favoriser la découverte de nouvelles pièces. Enfin, le troisième critère prend en compte la distance à parcourir pour atteindre cette position depuis la position courante du robot afin d'en limiter les déplacements. Cette stratégie permet de réaliser une exploration rapide et exhaustive de l'environnement, en limitant notamment les allers-retours inutiles.

CONCLUSION

Le système développé pour le projet Pacom permet donc d'obtenir des cartes sémantiques plus facilement interprétables par l'opérateur que des cartes construites simplement au moyen d'un télémètre laser. Ces résultats montrent que les techniques de cartographies 2D et 3D actuelles associées à des caméras de profondeur pour la détection d'objets offrent des solutions efficaces dans des environnements encore assez contrôlés.

Différents problèmes restent ouverts, tels que celui de la détection des objets dans des situations plus réalistes (par exemple, regroupés en tas ou rangés sur des étagères), situations dans lesquelles l'approche qui est actuellement la nôtre ne pourra pas les détecter. Il est également envisageable de ne plus utiliser de télémètre

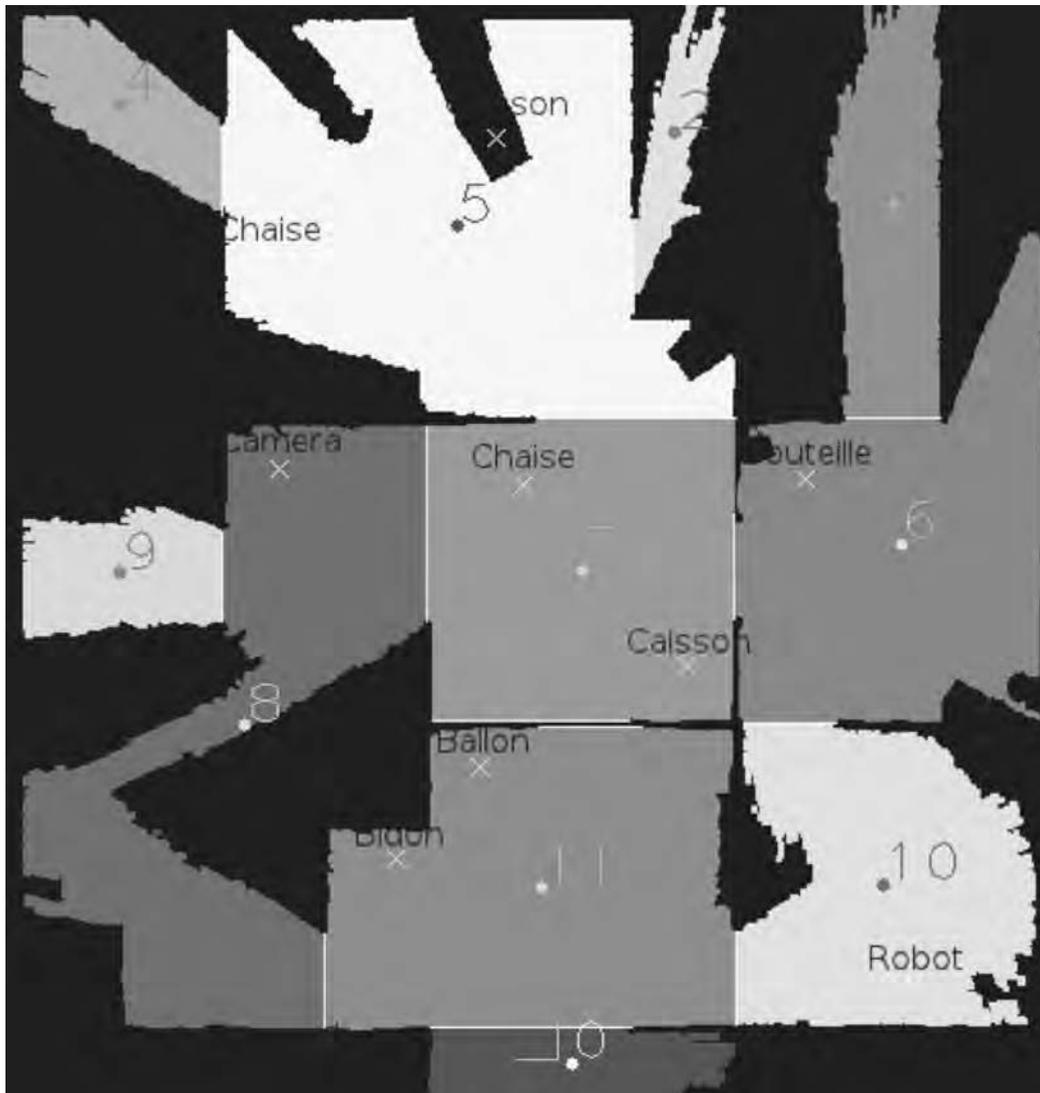


Figure 5 : Exemple de carte sémantique produite durant la compétition Carotte.

laser pour ne dépendre que d'une caméra de profondeur et de capteurs sonar complémentaires, ce qui permettrait de réduire fortement le coût de la plateforme.

L'une des conclusions importantes du projet PACOM est que la réalisation d'une navigation efficace et d'une cartographie sémantique ne peut s'obtenir simplement avec un capteur et un algorithme. Concevoir un système robuste face à de nombreuses configurations courantes (comme la présence de vitres) ou capable de détecter une large gamme d'objets demande d'intégrer différents capteurs et plusieurs algorithmes complémentaires. Cela n'est pas, en soi, une surprise, la robotique étant un bon exemple de système complexe, mais cela fait reposer les performances du système beaucoup plus sur la qualité de l'intégration que sur la qualité des algorithmes utilisés pour les différentes tâches. Ainsi, même si les différents éléments du système ont été largement validés, notamment en obtenant les meilleurs résultats en matière de qualité des annotations sémantiques, la troisième place obtenue dans le cadre de la compétition

Carotte n'est pas à la hauteur des performances individuelles de chaque module. L'amélioration de ces performances est cependant moins un thème de recherche qu'une question, peut-être plus industrielle, d'optimisation du système.

Enfin, au-delà de la construction de cartes sémantiques pour la visualisation abordée dans ce projet, leur utilisation pour la réalisation de tâches complexes (telles que l'assistance aux personnes) est un domaine de recherche prometteur. Ce type de cartes permet en effet d'envisager des comportements beaucoup plus complexes pour le robot, qui sont indispensables pour qu'il puisse agir dans le contexte quotidien des humains.

RÉFÉRENCE

[PACOM]
<http://cogrob.ensta.fr/pacom/>

Les drones : la poursuite de leur miniaturisation et son impact sur le déploiement de leurs usages

Le monde des drones de petite taille est en pleine mutation. Par petite taille, il convient d'entendre les drones de moins de dix kilogrammes. Ce type de porteur aérien de capteurs n'est plus le champ réservé des universitaires, des grands groupes travaillant pour l'armement, ni même des petites sociétés *high tech* ; c'est un secteur dont se sont emparés les *geeks* et les utilisateurs passionnés, qu'ils soient du secteur aéronautique ou non. Ces porteurs aériens embarquent toutes sortes de capteurs et permettent à leurs opérateurs d'offrir des services très variés. Quels sont les enjeux économiques et opérationnels de cette révolution culturelle et technologique ?

Par Catherine FARGEON* et Peter Van BLYENBURGH**

Aujourd'hui, vous vous « loguez » sur Internet, vous tapez, par exemple, Arducopter, et vous récupérez tous les logiciels libres de contrôle de drone dont vous avez besoin, en fonction de la solution aérodynamique que vous préférez et ce, en *open source* ! (voir la figure 1).

Mais quels sont les constituants d'un drone ? Pour être plus précis, on parle de « système de drone », car un drone comporte plusieurs composantes. Voici la panoplie constitutive du système de drones militaires, le plus complexe (voir l'encadré 1).

A quoi servent tous ces compléments par rapport à un avion classique ? Tout simplement à piloter l'engin sans avoir à l'habiter, et à bénéficier d'un retour d'informations et d'une présentation sur un écran, notamment :

- d'images captées par les caméras et les autres senseurs embarqués ;

- de la position dans l'espace de la plateforme aérienne, référencée par rapport à une carte géographique (grâce au GPS) ;
- de tous les paramètres utiles à la gestion du vol (niveau du carburant, etc.).

La figure 2 donne un exemple d'affichage proposé en *open source*.

Dans la catégorie des drones de petite taille, les plateformes aériennes peuvent être à voilure fixe ou à voilure rotative, se déclinant en de multiples solutions (quelques exemples sont donnés dans la figure 1), ou même être à structure convertible pour bénéficier de l'avantage des deux formules précédentes, à savoir, respectivement, une bonne vitesse de déplacement

* Membre du Conseil général de l'Armement (CGARM).

** Président de l'Unmanned Vehicle Systems International (UVSI).

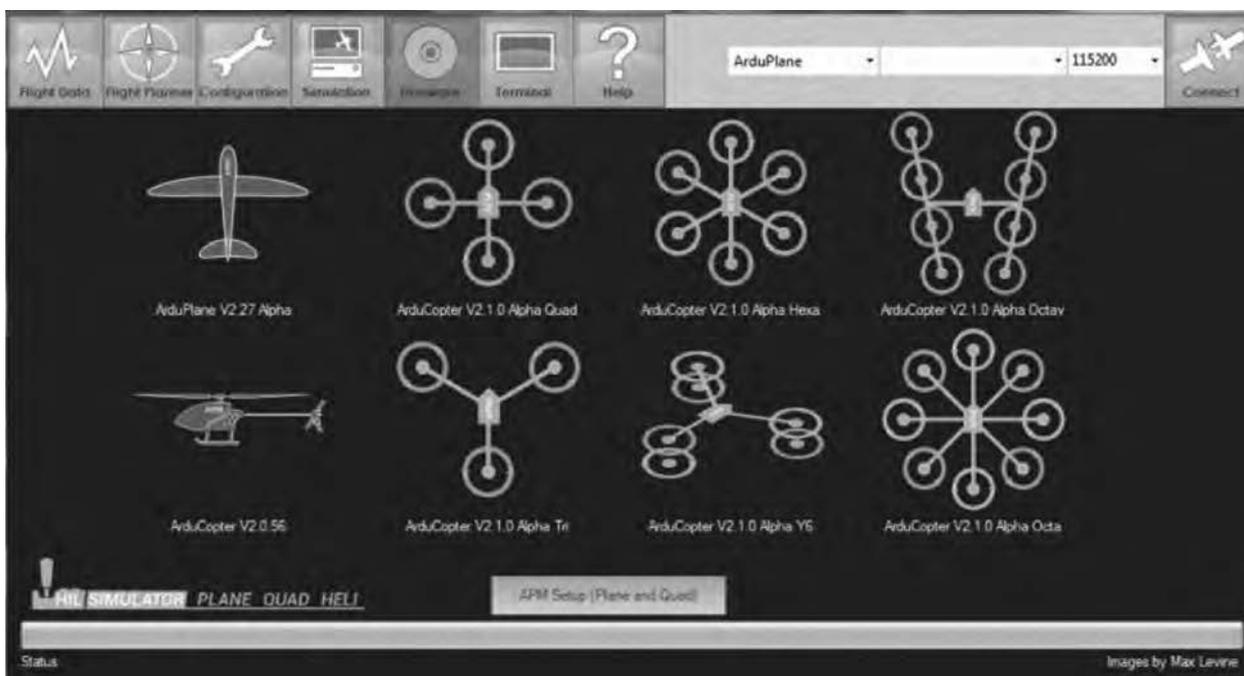


Figure 1.

pour une faible consommation et une capacité de point fixe.

Aujourd'hui, que faites-vous si un marché de services à base de drones vous séduit et que vous souhaitez limiter vos dépenses ?

Vous allez sur Internet et vous achetez les pièces détachées nécessaires, dont l'offre est florissante. Evitez toutefois le matériel chinois, qui n'est pas très fiable. Pour le reste, sans avoir besoin d'être ingé-

nieur, vous parviendrez à monter une plateforme qui vole et transmette des images à votre goût. Vous trouverez sans difficulté des asservissements en suivi de sol, bientôt en suivi de couloir (ou, plus simplement, de mur). Vous avez ainsi cassé votre tirelire à

(1) Les drones « kamikazes », comme le Taïfun (Allemagne), le Harpy (Israël) ou le Lark (Afrique du Sud), non récupérables, sont apparentés aux missiles.

Encadré 1

On entend par UAS – *Unmanned Aerial System* – ou système de drones aériens, l'ensemble constitué par :

- * une ou plusieurs plates-formes aériennes identiques ou de types différents et leurs équipements, servant de support à la mise en œuvre des capteurs ou des armements ; ces vecteurs sont récupérables et réutilisables (1) ;
- * des capteurs ou des armements embarqués ;
- * un segment de commande et de contrôle, assurant les fonctions de mise en œuvre et de contrôle des plates-formes aériennes et des charges ; ce segment peut être au sol, aéroporté, embarqué ou mixte ; il comporte en général plusieurs stations permettant la préparation de missions, le traitement des informations issues des senseurs embarqués, le contrôle des plates-formes aériennes et la mise en œuvre de leurs charges militaires éventuelles ;
- * des liaisons internes au système, entre les plates-formes aériennes et le segment de contrôle, de transfert de données en provenance des capteurs à vocation opérationnelle, et des données de contrôle et de mise en œuvre ;
- * des interfaces d'intégration de ces systèmes avec les autres composants capacitaires de l'environnement opérationnel (liaisons externes, formats), notamment dans le cadre d'une organisation centrée réseau ;
- * des infrastructures nécessaires à son déploiement, à sa mise en œuvre et à sa maintenance.

Les drones dits OPV – *Optionally Piloted Vehicles* – sont des drones optionnellement pilotés.



Figure 2.

hauteur de 4 000 € pour monter un drone de quelques kilos, de bonne qualité et doté de tous les équipements souhaités : caméras, GPS, sonar sol, etc.

Et ensuite, ce drone, qu'en faites-vous ? Un large champ de possibles s'offre à vous, pour vous combler :

- les loisirs,
- le BTP,
- l'environnement,
- l'agriculture,
- les sports,
- les services sécuritaires (police, protection maritime et sécurité civile, surveillance civile contre les malfaiteurs, etc.).

Non seulement vous allez vous faire plaisir, mais, en plus, vous allez contribuer à enrichir plein de monde. Pourquoi ? Voici quelques exemples illustrant notre propos.

Dans le domaine du loisir, la percée de l'AR Drone (à 300 €), pilotable à partir d'un iPhone, a fait le *buzz* des années 2010 et 2011 (voir la photographie 1). La société Parrot, avec plusieurs centaines de milliers « d'oiseaux » disséminés sur toute la planète, a rendu jalouse toutes les entreprises qui investissaient dans ce domaine. Heureusement, Parrot était irréprochable sur le plan réglementaire, en proposant un jouet, et sur le plan de la sécurité d'emploi de son matériel, grâce à sa légèreté et à la frangibilité (2) de ses matériaux constitutifs (sans cela, plus d'un aurait essayé de glisser une peau de banane sous les ailes de cet élégant quadricoptère). Parrot s'est appuyé sur les réalisations des différents gagnants du concours de drones minia-



Photographie 1 : Parrot (France).

tures organisé en 2005 par la Direction Générale de l'Armement (DGA), en assemblant les sous-ensembles les plus réussis du concours et en embauchant les étudiants les plus aguerris parmi ceux qui avaient participé audit concours.

Depuis, les jouets pour enfants à base d'aéronefs pilotables à vue se sont multipliés et font la joie de toutes les familles en périodes de fêtes de fin d'année. La demande est bien là ! Même si l'on sait qu'un drone-jouet nouvellement acquis a une durée de vie très courte...

En effet, la première caractéristique d'emploi de ces drones miniatures est d'être des *Crash and Go*, au sens où ils sont destinés à vivre une succession de *crashes* et être « ressuscités » par leur propriétaire aussi vite que possible, à chaque fois que cela s'avère nécessaire. Le marché a bien entendu ce message du CGARM (Conseil général de l'Armement - LEFAUDEUX & FARGEON, UVS 2006) et développe à grande vitesse une myriade de nouveaux composants. Oui, le marché a compris, mais ce n'est pas encore le cas de certaines autorités de l'aviation civile, qui exigent toujours « un système en provenance d'un intégrateur bien connu et bien référencé », « un pilote bien connu

(2) Ce terme est peut-être une invention, mais il signifie ici « capacité à s'aplatir sans faire de mal lors d'un choc ».

et bien référencé » et « un opérateur bien connu et bien référencé ». C'est d'une lourdeur pachydermique, face à la sveltesse du marché.

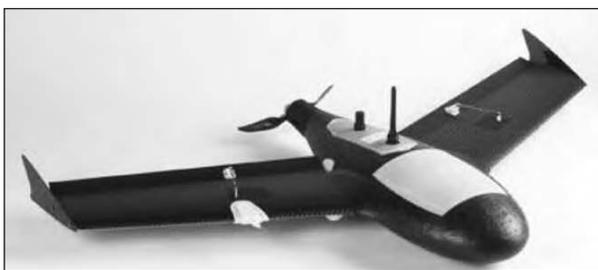
Ainsi, les drones sont vecteurs des joies enfantines et de chiffres d'affaires non négligeables (en première approximation, de l'ordre d'une centaine à quelques centaines de millions d'euros).

Dans le domaine du BTP, il se crée presque chaque semaine une nouvelle PME de services au profit des architectes, géomètres, chefs de chantier et autres acteurs du BTP, qui assure le diagnostic, le suivi de construction, la préparation des chantiers, voire leur surveillance. Le nombre de ces PME, déjà important, ne cesse de croître, si bien qu'il est difficile de les citer toutes ; néanmoins, on peut nommer le groupe Gexpertise, en région parisienne, un des plus gros cabinets par le nombre de géomètres-experts, qui améliore sensiblement la qualité de ses prestations en accompagnant ses relevés d'images prises par des drones (voir la photographie 2).

Alors, pourquoi ce vent de folie ? Eh bien, si vous apportez une économie de plus de 35% de son temps à un prestataire de relevés géométriques, le compte est très bon pour toutes les parties. Mais le retour sur investissement ne s'arrête pas là. Soyons sérieux, un tel engouement ne commence à se justifier qu'à partir de plusieurs zéros. La capacité à améliorer la conformité des constructions à leurs plans de départ apporte une réduction du coût global de celles-ci qui dépasse les 10%. Tout simplement parce que les déviations entraînent des frais de justice et des frais d'arrêt de chantier colossaux. De plus, les déviations « acceptables » ne sont jamais enregistrées et répertoriées, apportant ainsi leur lot de contrariétés pendant toute la vie de la construction.

Vous avez dit 10% ? Oui ! **Plus de dix pour cent** en phase de construction, pour la plus grosse activité salariale du monde, dont le chiffre d'affaires s'exprime en dizaines de milliards d'euros : la maison BTP. Les deux premières entreprises mondiales de BTP sont françaises (Vinci et Bouygues) et représentent à elles deux un chiffre d'affaires d'une cinquantaine de milliards d'euros (comme vous le voyez, tout n'est pas perdu pour le déficit commercial abyssal de la France !). À eux seuls, les petits drones pourraient être la source de quelques économies...

Dans les mises en appétit du drone de chantier, vous avez les missions de surveillance, mais le « flicage » n'est pas le plus intéressant pour gérer une équipe d'ouvriers ; le plus intéressant, c'est la capacité à réagir plus vite si l'un d'entre eux est en détresse, c'est la possibilité de savoir où ils se trouvent, « à la volée », pour mieux optimiser les allocations de tâches. Il y a plein d'autres applications possibles dans ce secteur, mais le propos n'est pas d'être exhaustif.



Photographie 2 : Gatewing (Belgique)

Ainsi, les drones sont des vecteurs de qualité et de sécurité pour les chantiers de construction et de gains de temps pour l'ensemble des prestataires de ce secteur, avec des retours sur investissement potentiels représentant globalement plusieurs milliards d'euros sur la durée de vie des constructions.

En matière d'environnement, il existe quelques applications fétiches auxquelles s'associer n'est pas forcément une bonne idée. C'est le cas de la surveillance des forêts pour prévenir les feux ; les capteurs actuellement développés par le CEA, par exemple, doivent permettre une détection des départs de flamme ; de tels capteurs seront tout aussi efficaces, implantés sur des ballons captifs positionnés au ras des faîtes des arbres, une solution moins onéreuse et plus rationnelle qu'une noria de drones.

En revanche, les interventions dans les ravines et les reliefs accidentés (pour récupérer des personnes accidentées ou encore pour faire des relevés atmosphériques spécifiques) sont crédibles et opportunes. Mais les applications à ce secteur sont assez disparates et dispersées, et ne peuvent générer de chiffre d'affaires significatif.

Ainsi, les drones sont susceptibles d'apporter un bénéfice social et une aide scientifique dans le domaine de l'environnement.

En agriculture, nous sommes bien informés des réussites japonaises en matière de surveillance des progrès des cultures et en matière d'épandage d'intrants agricoles (Yamaha et ses drones hélicoptères d'épandage, fidèles serviteurs agricoles ayant atteint et même dépassé le millier d'exemplaires). Néanmoins, il est bon de rappeler l'impact sur l'environnement d'une surveillance du développement parasitaire au moyen de caméras thermodynamiques, visant à juguler toute expansion de parasites ; un traitement localisé et réactif permet de diminuer les consommations de produits chimiques, de préserver la nature et d'offrir des végétaux de meilleures qualités sanitaire et alimentaire à la population. La prise en charge de cette surveillance par des satellites semble rester aujourd'hui plus onéreuse et moins flexible que la surveillance au moyen de drones.

Le gain de temps pour l'agriculteur mérite aussi d'être signalé, parmi les retours sur investissement.

Ainsi, les drones sont effectivement utilisables en agriculture à des fins sociétales, environnementales et économiques, mais avec un impact que les auteurs ne peuvent encore chiffrer avec précision, car les usages sont multiples et les implications écologiques pour la flore et l'être humain sont complexes (mais gageons que, là aussi, l'ordre de grandeur des gains à l'échelle de la planète devrait s'exprimer en milliards d'euros).

Dans le domaine du sport, aussi surprenant que cela puisse paraître, le drone cameraman a son mot à dire et il n'a pas besoin d'être très gros pour embarquer une caméra répondant aux besoins. Quelle course de côte à vélo, de régates en mer, de compétition de surf ou, plus largement, quelle compétition se développant dans l'espace ne voudrait être suivie et retransmise grâce à un tel moyen ?

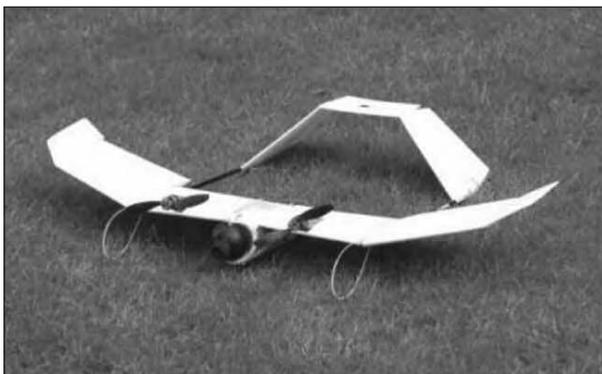
Au vu des tarifs des retransmissions télévisées et des guerres entre les chaînes pour bénéficier de la primeur des compétitions, nous n'exagérons pas ; voilà encore de beaux *business* plans en perspective.

Ainsi, le drone-cameraman en matière sportive a une réelle valeur économique.

Dans le domaine de la sécurité, le petit drone a des applications propres, différentes de celles de ses frères de plus grande taille. Il s'avère utile pour les forces d'intervention dans toute sorte de situations et de configuration de bâtiments (de la prison jusqu'au repère de malfaiteurs). Sauver la vie d'un policier grâce à un drone lui permettant de voir ce qui se cache derrière un angle de couloir ou dans une pièce dont il va franchir la porte n'a pas de prix.

La surveillance discrète de personnes impliquées dans des crimes, contrefaçons et délits de toute sorte est aussi un besoin, mais celui-ci ne sera satisfait que lorsque la durée de vol des drones sera suffisante. La discrétion est pratiquement acquise avec les moteurs électriques, et la miniaturisation fait des progrès quotidiens (voir la photographie 3).

Le drone à rotor capable d'un atterrissage et d'un décollage à la verticale équipe déjà quelques navires afin de les protéger contre les actes de piraterie en



Photographie 3 : Sirehna (France)

mer, par une anticipation d'une attaque de forbans par la voie des eaux.

Les drones offrent une meilleure solution pour les surveillances civiles de sites d'entreposage, car ils peuvent se faufiler dans ces microreliefs de marchandises, à la différence des caméras fixes, dont le champ de vision est précisément obturé par l'entremêlement des caisses et autres conditionnements de produits.

Ainsi, les applications de surveillance à caractère sécuritaire, pour la police, la protection civile ou pour toute autre raison civile, pour contrer les actes de brigandage et les délits, présentent un intérêt sociétal, humain et économique.

Mais, tout cela, vous le saviez déjà !

La question suivante à se poser est celle-ci : quels sont **les aspects techniques majeurs à améliorer** pour satisfaire, dans le confort, toutes ces applications potentielles ?

Il y a plusieurs aspects, parmi lesquels ceux qui suivent (choisis pour leur criticité) :

- Le risque majeur dans l'utilisation d'un drone est ce que l'on appelle **le fly away** ; le vecteur aérien n'est plus contrôlé et sort de la zone où il opérait (il s'enfuit, en quelque sorte). La cause la plus fréquente de ce désordre est une perte de liaison des communications. Ce n'est pas toujours une erreur de conception ou de montage du drone ; des masques imprévus ont pu occasionner une perte de cette nature, surtout en ville.

- Le second risque prépondérant est **l'incompétence du pilote** ; eh bien, ce n'est pas de sa faute ! La station de contrôle aurait dû être conçue de sorte que son utilisateur ne puisse pas faire d'erreurs (ou alors, le moins possible). Même si un minimum d'entraînement est recommandé avant toute opération avec un drone, il n'en reste pas moins que l'ergonomie dudit drone incombe à son concepteur, et cette ergonomie doit coller à l'application. Si vous obligez l'utilisateur à passer une licence de pilotage, vous tuez les marchés, vous augmentez les coûts et vous n'améliorez la sécurité des vols que marginalement, car ce n'est pas une licence de pilotage qui peut préserver d'une éventuelle défaillance du matériel.

- Le troisième risque est **le crash**. Quelle en est la cause ? Le drone a rencontré un obstacle ? Foutaise ! Aujourd'hui, la technologie est capable d'asservir un drone à son environnement : lui faire éviter un mur, le faire voler à distance constante du sol, etc. Encore faut-il l'équiper des capteurs et du logiciel de correction de trajectoire adéquats. Non, le crash, c'est l'imprévu ; cela va, par exemple, de la défaillance d'une pièce à une transition entre modes de pilotage trop lente par rapport au changement d'environnement.

- Le quatrième risque est celui de **blessar une personne** lors d'un crash du drone ; dans toutes les applications mentionnées, aucune ne donne de motifs suffi-

sants pour s'alarmer outre mesure : les enfants jouent avec des drones trop légers pour se faire mal et les utilisent, en général, dans un lieu restreint ; les ouvriers du BTP portent un casque et le chantier est fermé au public ; l'agriculteur effectue des rondes sur des zones par nature non habitées ; les sports de vitesse sont très encadrés, ne laissant au public aucune possibilité de venir gêner les compétiteurs, en prévoyant des zones utilisables en dégagement ; enfin, les policiers privilégient l'utilisation des drones les plus légers. En mer, la question ne se pose qu'à l'atterrissage. Dans tous ces cas, une bonne assurance suffit.

• Le cinquième et dernier risque à signaler, parmi les plus notables, est l'**autonomie de vol**. En fait, ce n'est pas un risque, mais un **inconfort** qui se traduit par un risque économique, celui d'un échec commercial. Aujourd'hui, les drones de très petite taille (moins de 2 kgs) ne volent qu'une vingtaine de minute (si leur motorisation est électrique). C'est très clairement un point de technologie à améliorer pour encourager une utilisation plus massive et régulière de ces engins et, par conséquent, pour exploiter le potentiel économique que nous avons décrit.

Ainsi, la sécurisation des liaisons, la fiabilité des acteurs de contrôle, l'ergonomie et les batteries sont les thèmes techniques les plus sensibles. N'oublions pas, toutefois, les nanotechnologies, qui vont contribuer à alléger le vecteur aérien, diminuant d'autant les risques corporels et ouvrant le champ à de nouvelles applications (inspection de tubulures, etc.).

La sécurisation des liaisons vaut pour des environnements très variables allant de la haute montagne, avec ses ravines, à des villes comme New York et ses « canyons » entre gratte-ciels ; cette sécurisation peut requérir des solutions différentes selon les cas.

Il serait agréable et utile que l'on prenne en considération l'intérêt économique des drones pour leur faire une place dans la cité : en allouant **des fréquences spécifiques** pour l'emploi de ces engins et en mettant au point **des amers – relais de position – et des axes de circulation** pour diminuer les risques associés, tels que le *fly away*.

Il faut que l'on cesse de tenir les drones pour des responsables potentiels d'accidents corporels, au point de les parquer, de chercher à en limiter l'usage en exigeant des utilisateurs des diplômes complexes, limitant leur diffusion à une faible minorité menacée d'une sanction pénale pour toute infraction à une réglementation qui ne laisse la porte ouverte qu'au seul copinage (pardon, au *lobbying*) au profit des grands industriels. A ce compte-là, il faudrait aussi interdire le mariage au motif qu'il présente pour les femmes un risque statistiquement beaucoup plus élevé de violences...

Pas de chance ! Les textes réglementaires en cours d'élaboration cassent toutes ces prévisions économiques et marquent un retour en arrière par rapport

aux acquis. Conseillés par les auteurs de ces textes, les institutions procèdent à de larges consultations auprès de leurs futurs administrés. Facile : ceux-ci n'osent attaquer de front le dispositif, de peur de se fermer les accès aux certificats divers et variés exigés – certificat de pilotage, d'opérateur référencé et avisé, de navigabilité et, dans un autre registre, allocation de fréquences. Pourrait-il ne s'agir que de consultations « parapluies » ou « paravents »... ? (Quand on en voit les retombées, encore insuffisantes...).

Le résultat de tout cela : ce sont, hélas, des milliards d'euros perdus d'avance. C'est à en rire et à en pleurer, quand on sait qu'en cette période électorale les candidats les plus éminents se sont dotés d'un conseiller rapproché en « ré-industrialisation ». Il faudrait commencer par changer la culture des administrations qui nous sont les plus chères, et notamment leur apprendre le bon dosage entre un excès de prudence, au nom de la bonne santé de leurs administrés, et le réalisme, en particulier économique.

La réglementation, en dépit d'une limitation générale de l'altitude de vol des drones à 100 mètres, exige de multiples autorisations et certifications.

Les textes réglementaires considérés appellent des remarques tant sur leurs objectifs que sur les solutions qu'ils adoptent :

• **Sur le plan des objectifs**, ils se concentrent principalement sur les risques de chocs. Or, ils pourraient élargir leurs considérations à la plupart des nuisances modernes comme, par exemple, le bruit, les matériaux polluants et les interférences électromagnétiques.

• **Sur le plan des solutions adoptées**, le vol dans le champ visuel du pilote ne résout pas la problématique des chocs. Un objet situé dans l'axe drone-pilote pourra être caché par le drone lui-même et, même si l'objet est vu, la vitesse relative sur cet axe ne pourra pas être appréciée visuellement.

Par ailleurs, au motif de supprimer les cas les plus dangereux, ces textes éliminent toute utilisation professionnelle de systèmes inoffensifs et ne font pas cas des ressources de l'automatisation et des capteurs en termes de sécurité de vol.

On observe les mêmes faiblesses dans les textes actuellement en préparation aux Etats-Unis ; cela se traduit par une absence de consensus entre les professionnels américains, qui ne savent pas chiffrer les différents seuils dans les exigences de sécurité et cela explique le retard pris dans la publication d'un projet de réglementation. Chacun vote en faveur des paramètres qui favoriseront leurs produits.

En France, l'enjeu économique des drones n'a pas encore été mesuré, alors qu'aux Etats-Unis l'édiction d'un règlement est soumise à une analyse d'impact préalable. Comblant ces lacunes sous-jacentes aux différents textes nationaux et internationaux en cours d'élaboration par une analyse de risque soucieuse d'alléger de manière raisonnée les dispositifs envisagés est un objectif légitime pour accompagner le développe-

ment de ces nouveaux outils professionnels à forte valeur ajoutée économique que sont les drones.

Il est recommandé que cette analyse repose :

- sur la notion de risque minimal en dessous duquel le drone de très petite taille n'a pas besoin d'obéir à des exigences de certification, ni du côté de la machine, ni sur le plan de l'aptitude au pilotage du pilote à distance, ni d'autorisation de vol ;

- sur les bénéfices attendus des techniques automatiques de manière générale, et des perspectives de développement en matière de « détecter et éviter » (« *sense and avoid* ») ;

- sur les dispositifs urbains à mettre en place pour faciliter la circulation des drones de petite taille et orchestrer les altitudes de vol et de distances aux bâtiments (au même titre que les voitures disposent de leurs routes et de leur signalisation).

Les objectifs à atteindre grâce à une telle analyse sont multiples :

Tout d'abord, il s'agit d'isoler la catégorie des drones dont le critère d'impact corporel (par exemple, le HIC – *Head Impact Criterion*) est inférieur à un seuil en dessous duquel les risques de dommages corporels sont majoritairement annulés ou assurables. Cette analyse peut conduire à exiger des dispositifs embarqués spécifiques et complémentaires (parachute, ultrasons, etc.), pour en garantir le résultat.

L'autorisation de mise sur le marché pourrait alors être réduite à l'obtention d'un marquage CE pour cette catégorie, mais avec des exigences principales de natures diverses, telles que :

- en termes de **chocs** : imposer un HIC (ou son équivalent) inférieur à un seuil, se traduisant notamment par :
 - * une absence de zone contondante ;

- * une fragibilité des matériaux constituant le drone (grâce à la présence de structures absorbant les chocs) ;

- en termes de **masse** : limiter, dans tous les cas, le poids du drone (par exemple à 1,8 kg), de façon à être en cohérence avec la capacité des moteurs d'avions à supporter un choc éventuel avec un oiseau de taille équivalente (voir la photographie 4) ;

- en termes de **bruit** : imposer un bruit minimal (par exemple, 45 dB) pour que le drone soit audible des personnes à proximité, à des fins d'évitement potentiel, et un bruit maximal (par exemple, 70 dB, sachant qu'à partir du seuil de 85 dB, il y a obligation de protections auditives et que le matériel équipant le combattant à pied ne doit pas dépasser 75 dB, pour ne pas nuire sur le plan auditif) ;

- en termes de **fiabilité** par rapport aux risques de *fly away* : imposer qu'une coupure de communication entraîne des mesures de sauvegarde automatiques, comme :

- * pour les drones à voilure tournante : une stabilisation en position, suivie, après un délai déterminé, d'un atterrissage en douceur ;

- * pour les drones à voilure fixe : un hippodrome (figures aériennes d'attente), suivi, après un délai



Photographie 4 : Proxdynamics (Norvège)

déterminé, de l'activation d'un parachute et d'un arrêt moteur.

Dans les deux cas, la fixation d'un tel délai est importante pour permettre une reprise en main après d'éventuelles microcoupures ou parasitages de faible durée.

Du côté de l'utilisateur, un simple engagement à respecter la vie privée, à éviter tout usage frauduleux, ainsi qu'à faire évoluer le drone à faible altitude et en dehors des zones aéroportuaires, paraît suffisant.

En revanche, tous les drones doivent être tagués et immatriculés, de façon à ce que la responsabilité du propriétaire soit clairement engagée en cas de délit, le dispositif urbain se chargeant de détecter automatiquement les contrevenants. Avec un peu de créativité, on trouvera comment neutraliser ou détruire sans risque un drone non tagué.

Toutes les autres catégories de drones présentent un danger de collision avec dommages, tant au sol qu'en vol, qu'il convient d'encadrer par un dispositif du type aviation civile. Cependant, on peut distinguer parmi ces drones deux grandes classes, selon qu'ils peuvent, ou non, embarquer un appareil de *sense and avoid*. Ces systèmes d'évitement entre aéronefs sont en cours de développement.

La décision d'embarquer un tel système intéressera principalement les drones ayant à s'insérer dans la circulation aérienne générale qui, par nature, seront exploités en dehors du champ de vue du pilote. Dans ces cas-là, le fait d'exiger une certification de navigabilité qui limite les risques de *fly away* et d'imposer une immatriculation, un certificat d'aptitude de pilotage et un enregistrement de l'opérateur, est légitime, même si cela induit des contraintes pour quelques niches professionnelles. Cette classe de systèmes de drones sera relativement facile à intégrer dans les dispositifs existant déjà pour les avions classiques.

En revanche, les systèmes intermédiaires, trop légers pour embarquer un *sense and avoid*, mais trop lourds pour ne pas présenter de danger à l'écrasement au sol, constituent une catégorie difficile à gérer sur le plan réglementaire, il faut bien le reconnaître. Cette classe de systèmes devrait progressivement se réduire avec la tendance naturelle à une diminution du volume et de la masse des équipements.

CONCLUSION

On peut se référer aux propos d'AeroVironment (firme américaine, numéro Un mondial des drones de petite taille) quant au nombre de systèmes de drones vendus au secteur militaire : « Le marché des drones est dans les drones de très petite taille ».

Préserver un usage à grande échelle de drones inoffensifs est un impératif économique. Il convient de libérer des exigences de l'aviation civile les petits drones (pesant de 1 à 2 kg et, idéalement, moins de 1,8 kg, pour les raisons évoquées précédemment), tout comme leurs pilotes et opérateurs : il suffit de les soumettre à des règles de fabrication standardisée CE et à un principe d'assurance.

Cela évitera non seulement le risque d'engorger les organismes de certification et d'obliger nos administrations à tripler leurs effectifs ou de gonfler immodérément les entités externes les assistant, mais aussi, et surtout, de ralentir la dynamique du marché et de se retrouver bons derniers à toucher les dividendes de ce secteur en pleine croissance. Tout dispositif réglementaire fermerait la porte à ces petites sociétés de services et multiplierait les coûts, freinant, voire asséchant la dynamique économique.

Encadrer le risque de *fly away* est un défi ; dans la plupart des cas, il est dû à une perte de liaison radio et,

de ce fait, il est utile non seulement d'avoir une prospective visionnaire sur l'évolution des communications (3), mais aussi de comprendre les atouts indéniables que représentent les automates largement standardisés et couramment utilisés dans les applications de sécurité de fonctionnement en dehors de l'aviation civile (métros, trains, etc.).

Il convient de rendre aux drones leur nature première, leur définition de base, qui est d'opérer hors du champ de vision de leurs pilotes (voir la définition donnée dans le MTCR (*Missile Technology Control Regime*), un traité signé par plusieurs pays, dont la France).

Il est urgent de concevoir des drones et de leur aménager une circulation urbaine.

Vous l'aurez sans doute compris : le meilleur moyen pour mettre tout le monde d'accord, c'est la miniaturisation des drones. Celle-ci apportera une diminution des risques ; en cela, elle doit donc être encouragée (voir l'encadré 2).

(3) Notamment, la montée en puissance des courants porteurs qui, en conjonction avec le potentiel du *wifi* et du *Bluetooth*, pourrait éventuellement fiabiliser les communications dans les zones de vol à proximité de bâtiments, face aux risques de brouillage des fréquences de communication allouées.

Encadré 2

NOTE SUR LES TRAVAUX RÉGLEMENTAIRES AMÉRICAINS

Les Américains travaillent sur la réglementation des drones depuis plus de vingt ans.

Ils ont créé un groupe de travail préparatoire regroupant des membres de la profession intitulé « *Small Unmanned Aircraft System Aviation Rulemaking Committee* » (ARC) pour élaborer les textes.

Ce comité, qui a été constitué par la FAA (*Federal Aviation Administration*), travaille sur plusieurs aspects :

- le besoin d'une immatriculation,
- les altitudes de vol réglementaires,
- la conception de la station de contrôle,
- la réglementation en matière de :
 - * conception,
 - * production,
 - * tests et réception,
- la maintenance,
- la structure des carnets de bord, d'usage et de pilotage,
- la sélection de sites de récupération (*recovery*),
- l'entraînement et la certification des pilotes à distance, des opérateurs, des instructeurs et des écoles de formation.

Les recommandations de l'ARC sur ces différents points ne sont pas encore finalisées et, de ce fait, l'administration américaine n'envisage pas de publier de réglementation avant fin 2012.

Les équipes de l'ARC démontrent la même absence de concept global que ses homologues, tant du point de vue de la compréhension technique du risque de dommages corporels et de l'aménagement des zones

urbaines pour accueillir ces nouveaux systèmes, que de celui de la prise en compte de nuisances autres, comme les nuisances sonores, les interférences électromagnétiques ou l'usage de matériaux polluants. Il en résulte une absence de consensus sur les différents seuils à adopter.

Dans ce dernier domaine, on note toutefois des exigences qui découlent des réglementations s'appliquant actuellement aux avions, telles que le seuil de 400 pieds pour l'altitude maximale et le fait de devoir prévenir le contrôle aérien si l'on souhaite faire voler son drone à proximité d'un aéroport (la DGAC interdit totalement toute approche d'aéroport, ce qui n'est pas forcément opératoire dans le cas où un drone fait du transport de biens en corrélation avec un avion de ligne).

Aucun consensus n'a pu être obtenu sur la répartition actuelle des trois groupes de masses maximales au décollage – 2 kg, 9 kg et 25 kg – *versus* la sensibilité et le niveau de risque pour les populations survolées.

Certains membres du groupe proposent de classer les régions en trois catégories : très peuplées, moyennement peuplées et peu ou non peuplées (ce qui est, là encore, peu opératoire et trop flou).

Les notions de fragibilité, pour les plus petites catégories, sont encore en débat.

Il est intéressant de noter que l'administration américaine effectue, dans sa procédure, une analyse d'impact économique avant de lancer une consultation auprès de la profession.

An overview of medical robotics in Iran

This paper presents an overview of the current research and development activities on medical robotics in the Islamic Republic of Iran. Medical robotics is believed to be among the most influential and therefore strategic technologies in the area of health and medical services. As a result, the Iranian Ministry of Education, along with the Ministry of Health and Medical education and the Ministry of Industries and Mines have devised a strategic plan to promote and support this branch of technology. A research centre (called RcSTIM) has been assigned to focus on this area and work intensively on long term projects. Collaborative research and development projects in this centre and other technical and/or medical schools have resulted in several domestic technologies and advancements in the field of medical robotics, from which some have already entered the last stages of commercialization and others are passing technical and clinical trials.

By Farzam FARAHMAND (*) (**), Hamid R. AMIRNIA***, Saeed SARKAR**, Saeed BEHZADIPOUR**, Alireza AHMADIAN** and Alireza MIRBAGHERI (*) (**) (****)

MEDICAL ROBOTICS: AN EMERGING DISCIPLINE

Computer assisted and robotic surgery procedures are becoming common clinical practices in recent years as a result of the rising tendency towards minimally invasive and geometrically precise surgeries. They are proved to provide better clinical results and lower the overall costs through shorter hospital stays, shorter recovery times, and reduced need for repeated surgeries. The domain of its applications has now been extended to the full spectrum of medical treatment, from diagnosis to preoperative planning, surgery execution, and postoperative rehabilitation. The prod-

ucts are thus rather diverse, ranging from modelling and visualization software tools to surgical simulator units, navigation systems, surgical robots, and robotic rehabilitation apparatuses. The discipline inherently involves the integration of many different computer-related technologies. Modern medical imaging systems, such as CT, MR, PET, together with

* RcSTIM, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

** School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*** Center for Innovation and Technology Cooperation, I.R Iran Presidency, Tehran, Iran.

**** <http://www.wisegeek.com/what-is-physical-therapy.htm>

advanced techniques of image processing and modelling, 3D anatomy visualization, real-time tracking and sensing, haptics and robotics are considered to be the key underlying technologies in this field.

Considering the wide range of technologies, products and applications, different names have been assigned to the discipline, e.g., image-guided surgery, computer-assisted surgery, medical robotics, medical virtual reality, and computer-integrated surgery. We prefer the term "medical robotics", as it emphasizes the underlying technologies more comprehensively and includes all the tools developed for a range of applications as wide as the medical science itself. It should be noted that the term robotics in this context does not necessarily refer to a robotic mechanism, but indicates an application of the multidisciplinary and the vast robotic science in medicine. The science spans a wide spectrum of fields and techniques such as image processing, 3D object modelling, computer aided design, coordinate measurement and navigation, motion planning, man-machine-interfacing, control and finally design and analysis of mechanisms. Each of the above-mentioned branches of this science has found exciting applications in the medical sciences and is referred to as medical robotics.

MEDICAL ROBOTICS RESEARCH IN IRAN

The research and clinical activity to develop new products and clinical applications for computer assisted and medical robotic systems are increasing sharply worldwide. Following a detailed study on the emerging medical technologies sponsored by the Ministry of Industries and Mines of the I.R. Iran [1] the significant and critical role of this discipline in the prospect of the medicine was formally identified. Consequently, a research lab was established at the Research Centre for Science and Technology In Medicine (RcSTIM) in 2003 for long term concentrated work in this field. A strategy was designated to the lab, focusing on three main points as summarized below:

Active and close collaboration with clinicians - This is essential for an engineering research laboratory such as ours, if a significant contribution to this emerging field was aimed. Close and active collaboration with clinicians makes it possible to identify and understand the real problem in a particular application and to find out if a potential solution works in a clinical environment. On the other hand, progress towards an effective solution is often best developed in the context of a team work with specialists from different disciplines.

Establishment of appropriate infrastructures - A significant contribution to this emerging field requires

continuous long-term efforts which are conceivable through establishing the appropriate human, software, hardware and financial infrastructures. This includes attracting and educating the interested engineering and medical graduate students, developing the software tools which are fundamental to a large variety of applications, e.g., image-based modelling of anatomy, preparing conventional sensors, motors, mechanical components and robotic modules and finally making long term agreements with the interested investment parties.

Applied research towards commercialize-able products - The research should aim problems that are clinically important, seem solvable, require innovation, and could be addressed in due time. This often necessitates developing integrated solutions combining appropriate technologies such as image processing, modelling and analysis, real-time sensing, and manipulation aids to solve a particular problem. The solution should make a significant difference in treatment outcomes and cost-effectiveness. The solution should be pursued at different levels, starting with rapid and iterative generation of prototypes with end-user evaluations to develop more complete solutions. The resulting products and technologies should be applicable in common clinical practices at different development levels; the first versions are to be commercialized in near future while more complete in depth solutions will be explored in the long term. The resulting products and technologies are to be transferred into other groups and enterprises with the required skills of manufacturing, marketing, and supporting for the commercialization.

In implementing this strategy, RcSTIM has worked on a variety of research projects in partnership with clinicians at several hospitals such as Imam Khomeyni Hospital, a leading medical centre in Tehran. A wide range of clinical problems were identified and appropriate technologies were pursued, mainly in four key areas including geometric modelling and registration, virtual reality in medicine, surgical robots, and robotic rehabilitation systems. The projects were supported in preliminary stages of concept development by the Tehran University of Medical Sciences and Sharif University of Technology, and in the technology development stage by the Small Business Development Centre (SBDC) of Industrial Development and Renovation Organization (IDRO) of the I.R. Iran.

While RcSTIM has taken the main role of leadership in the development of domestic medical robotics, technical universities and research centres in the country have also contributed to this field through various research projects some of which have been conducted in collaboration with medical centres. This article tries to elaborate the most successful projects pursued by these institutions.

Surface Modelling

The development of powerful medical imaging systems and the need for 3D geometrical models for surgical applications have brought a new perspective into the anatomical modelling in recent years. Modern medical imaging systems, e.g., Magnetic Resonance Imaging (MRI) and CT scanning, provide detailed cross sectional images of the human tissues which can be processed through segmentation algorithms to extract the 3-D data of an individual tissue. However, the resulting discrete data needs to be further processed through continuous mathematical representation to produce 3-D visualizations for computer pre-planning and/or simulation of surgical procedures. Moreover, there is a high potential for application of analytical representations in the areas of diagnosis, monitoring of disease progress or assessment of surgical outcome. On the other hand, many computer-assisted and robotic surgery applications, e.g., surgical navigation systems, require 3-D geometrical models to be registered to the anatomy or to other images. Mathematical representation of complicated three dimensional surfaces has been a major concern for biomedical engineers in recent years. This includes two steps which are usually performed simultaneously by mathematical techniques, i.e., data smoothing and surface modelling. The smoothing process is essential since the experimental data generally contains a degree of error, leading to creation of ripples in the model, if the mathematical representation of the surface passes exactly through every experimental data point. Data smoothing is achieved using approximation methods, namely the least-square technique, and reduces or eliminates the effect of ripples. The surface modelling is generally conducted using mathematical equations of basic (e.g., polynomials) or piecewise (e.g., B-spline) form for representation of simplified or complicated surfaces, respectively [2].

A modelling method which can be used as a general tool for bio-surface applications needs special capabilities. Bio-surfaces are usually much more complicated than regular engineering surfaces; a flat part may swiftly slope to a needle shape knob or a convex zone can suddenly jog into a concave region. This limits the application of newly developed Computer-aided design (CAD) techniques [3] in bio-surface field. On the other hand, a general tool for modelling bio-surfaces requires providing adequate accuracy in representing the real anatomy. The degree of accuracy required, of course, is variable depending on the nature of each specific application. However, in most

medical applications, an accuracy in the order of ± 0.5 mm is sufficient [2].

The B-spline method has both of the above requirements to stand as a general tool for modelling the bio-surfaces. However, despite its versatility in representation of complicated bio-surfaces, the classic B-spline least-square method has some limitations. First of all, it requires a complete rectangular net of data points which is not usually available for bio-surfaces and needs to be produced via extrapolation [2]. Moreover, the smoothing intensity of B-spline method depends on the number of the control points; hence not only it is a discrete parameter and cannot be changed continuously, a higher smoothing degree requires using a lower number of control points, losing some details of the surface. Finally, the least square formulation of B-spline surfaces is somehow complicated, especially in the common case of moment free edges which leads to constrained Lagrangian optimization.

Considering the limitations of B-spline least-square method, a research group at the RcSTIM has developed a novel, general-purpose algorithm with broad applicability, both within the context of surgery applications and biomechanical investigations [4, 5]. This algorithm is based on the analogy between the B-spline curve modelling and the force-deflection behaviour of a beam subjected to lateral point loads. Mathematical formulations were developed to extend the algorithm so that it can be used for mathematical modelling of incomplete nets of data points, as well as smoothing of noisy and/or filtering of erroneous data points. The required unknown parameters could be solved explicitly, with no need to solve the system of equations simultaneously. The performance of the proposed technique was evaluated on a number of surface modelling problems, including two known analytical surfaces of the human femoral and patellar articular surfaces (Fig. 1). The results indicated that the proposed method was precise, flexible and easy to apply, and has several advantages over the conventional smoothing method, i.e., the B-spline approach. However, further work is being conducted to develop a new method with more capabilities based on the influence surface modelling approach and least square method.

Surface Registration

Registration is the process of finding a mapping between anatomical or functional information in two different spaces, i.e., coordinate systems, so that data that correspond to the same anatomical position are mapped to each other [6]. Registration of medical imaging and/or functional information acquired using different modalities, e.g., x-ray, CT, MR, PET, SPECT, from different viewpoints, or at different times makes it possible to combine different types of

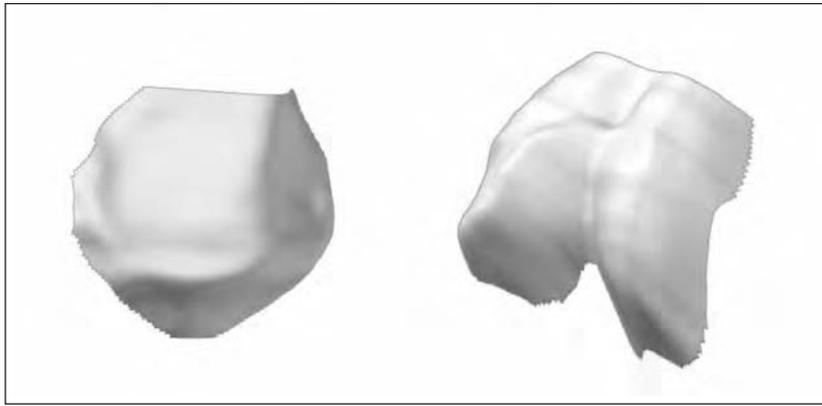


Figure 1: The 3-D representation of the patella (left) and femur (right) of the CT data developed by the proposed technique.

structural information for diagnosis and surgical planning, as well as monitoring the disease progression/regression and postoperative follow ups. More important, however, is the registration of preoperative medical images or model with the patient's body during surgery, which is considered to be a fundamental requirement for interactive intra-operative navigational guidance in computer assisted and robotic surgeries. In surgical navigation systems the image-to-physical registration transformation is used to track and direct a surgical tool on a display of the preoperative images towards an anatomical target, e.g. a tumor.

Many registration methods have been proposed and used for clinical applications. A registration technique for general use in surgical navigation systems should be effective, fast, and simple to apply. The simple method of using anatomic landmarks is not an effective method since these are often difficult to find and sometimes do not exist. Registration using stereotactic frame systems has been used since the early 1970's in image-guided stereotactic surgery. Such systems, however, had several limitations; the frames were bulky and were likely to interfere with the surgical exposures, patients complained about the weight of frames and the pain due to their application, the surgeon was typically limited to target points on a linear trajectory, and most importantly, frame-based stereotactic systems did not provide real-time feedback to the surgeon about anatomical structures encountered in the surgical field.

To address these limitations, a number of frameless navigation systems have been developed over the last decade. The most commonly used method is the iterative-closest-point (ICP) algorithm developed by Besl and McKay (1992) for registration of a 3D set of points to a 3D model that minimizes the sum of squared residual errors between the set and the model [7]. More advanced surface-based and volume-based methods have been proposed recently and have been demonstrated to be more effective and accurate; however, they all need a large number of data points to be measured before starting the surgery.

Considering this important limitation, a project was pursued at the RcSTIM that proposed a new technique for surface registration, based on the transfor-

mation relationships between the initial and transferred state of a mathematical function in space [8]. This was then extended to any points cloud using a mathematical representation for complicated freeform surfaces using the influence surface modelling approach and least square method [9]. The performance of the system has been evaluated for registration of some analytical surfaces as well as the articular surfaces of human knee in two MRI senses to obtain the joints kinematical data. In general, the proposed method was found to be a powerful and accurate technique for registration of complicated freeform surfaces with high accuracies of ± 1 mm and ± 1 degree and fewer data points. However, further investigation is needed to compare the performance of this technique with the methods currently in use, from both the accuracy and computational efficiency points of view.

Surgical Navigation System

Traditionally, surgeons have had to rely on two dimensional X-rays coupled with their knowledge of human anatomy to prepare for surgical procedures. Once patients were opened up, surgeons relying on the traditional methods were only able to see the part of the anatomy that was exposed. This leaves patients with tumors deeply embedded in healthy tissues very vulnerable.

The state of the art image-guided surgical navigation allows surgeons to look inside the body to detect the infected tissues inside cavities, narrow passageways inside arteries and awkwardly positioned tumors deep inside the brain by sophisticated navigation through organs using three-dimensional (3D) images as their guide. Because the view is so precise and controllable, the surgeon can actually see where the healthy tissue ends and a brain tumor begins, or precisely helps him to decide where on the spine to place a pedicle screw to maximize patient mobility. This system enables surgeons to create an exact, detailed plan for the surgery. The technology leads to shortening the operating times, decreasing the size of the patient's incision, and reducing the procedure's invasiveness, all of

which can lead to better patient outcomes and faster recovery.

A project has been started since 2005 at the RcSTIM to develop an image-guided surgery and navigation system, and the first prototype was released in 2011 [10]. The system includes an optical camera to track the surgery tools as well as the software tools to build a 3D model of the patient anatomy prior to the operation and registration techniques (see Fig. 2).

During surgery the instrument communicates with the computer and surgeon in real time basis. This means the surgeon can watch on a computer monitor as one precisely operates on the sensible organ. Looking at the computer monitor, the surgeon can see the position of the instrument as it relates to portions of the patient's anatomy that are beneath the surface of skin, hidden from the surgeon's direct view. Therefore, because of the provided virtual anatomy model of the patient, the surgeon does not need to make a large incision just to expose and see the anatomy underneath the skin.

As explained earlier, the success of an image-guided surgery system depends mostly mainly on the algorithms employed for real-time and accurate coordinate measurement and processing of 3D modelling human anatomy. The development of the image-guided surgery system at the RcSTIM was enabled through several research and development smaller projects to obtain the required tools on 3D surface modelling, model registration and real-time tracking of the objects. Some of these activities are detailed below.

VIRTUAL REALITY IN MEDICINE

A virtual reality system in general includes a 3-D computer simulation and a set of human-interface instruments that allow a user to interact efficiently

with the computerized model in real time using his natural senses and skills. Clinically validated, powerful medical virtual reality simulators are now available and in use all over the world, both for surgical training/assessment and for pre-planning/execution of surgical procedures [11]. In particular, they facilitate the training process of laparoscopic surgery trainees who need to be prepared for more complex gestures and hand-eye coordination, considering the loss of direct visual and tactile information during this type of surgery.

Surgical Simulation System

A surgical simulation system incorporates a virtual reality interactive graphical environment [11] and a force feedback device [12]. Among the several key problems in the development of the graphical environment of a surgical simulator, realistic real-time simulation of the mechanical interactions between the virtual objects, i.e., the surgical instrument, and the human organ, remains the most important issue. This involves a collision detection algorithm to check continuously if the instrument collides with the tissue and to identify the collision point, as well as a modelling algorithm to provide a realistic graphical display of the tissue's response to the external mechanical loads applied by the instrument. These algorithms must be at the same time accurate, to mimic reality, and efficient, to be executable in real-time, in an endeavour to create a make-believe simulation.

Several methods have been proposed in the literature for fast computation of mechanical deformations, including the non-physical models, e.g., free-form deformable representations and deformable splines, the discrete models, e.g., mass-spring systems, linked volumes, chain-mail representations, finite sphere and point-associated finite field models, and those

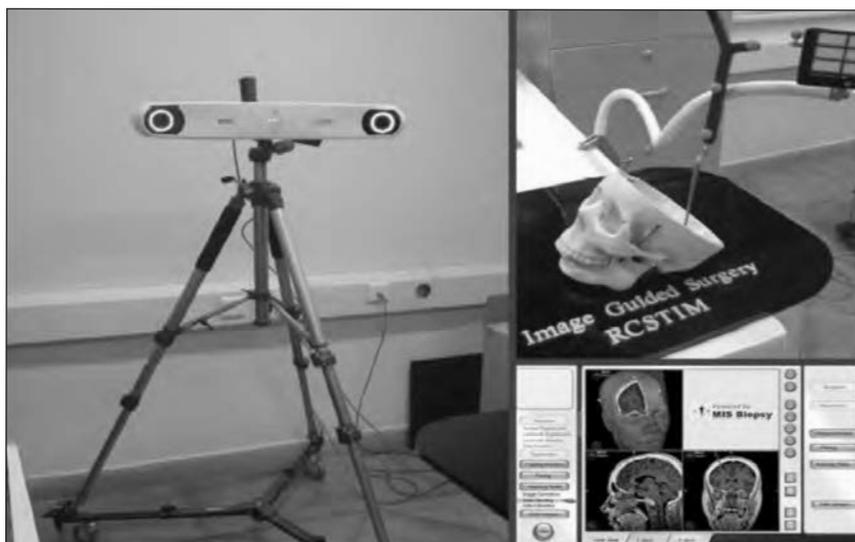


Figure 2: The first prototype of a navigation system for image guided surgery developed at the RcSTIM.

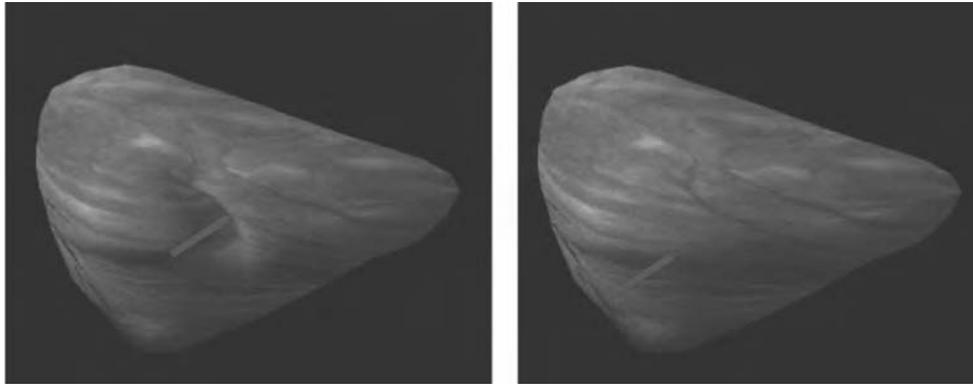


Figure 3: Interactive simulation of a liver model under deformation. The simulation was run at a rate of 200 iterations per second, and the screen was updated every 10 iterations (20Hz visual update).

based on continuum mechanics, e.g., the finite element and the boundary element models. While each of these models has found an advantageous position its own among the diverse applications of deformable modelling, there are concerns over their application in surgical simulation, due to the complicated behaviour of living tissues. In particular, computationally intensive continuum based methods are only capable of simulating small deformations of linear elastic materials in real time. However, as biomechanical literature [13] suggests, the behaviour of living soft tissues is highly nonlinear and time and rate dependent, i.e., viscoelastic, and linear elasticity is only a coarse approximation of their real properties.

Considering the above-mentioned facts, a project has started at the RcSTIM to develop a model for more sophisticated and realistic simulation of the soft tissue deformation during laparoscopic surgery in real time. The project pursued both discrete modelling [11, 14] as well as finite element [15, 16], and meshless continuous approach [17]. The important issues of tuning the model's parameters as well as the collision detection and simulation were also addressed using new practical algorithms to provide a total solution for an interactive graphical environment for a laparoscopic surgical simulator. Results (Fig. 3) indicated that the model can well replicate the complicated mechanical behaviour of biological tissues, e.g., the nonlinear 'toe' region of the force-deformation curve, the strain rate dependent response, and the creeping, relaxation and hysteresis phenomena. The simulated response of the model after tuning in its parameters to the experimental data of a deer liver sample, closely tracked the reference data with very high correlation coefficients and maximum relative differences of less than 5% and 10%, for the tuning and testing data sets, respectively. Finally, the implementation of the proposed model and algorithms in a graphical environment resulted in a visually real-time simulation with updating rates of 150 Hz for interactive deformation and 30 Hz for visual rendering.

SURGICAL ROBOTS

The use of robots and robotic systems in surgical theatres has been rising increasingly in recent years. Surgical robots aim at providing the surgeon with a new set of versatile and effective tools to extend his authority in conducting the operation. They are not supposed to and cannot replace the surgeon, as the surgical procedure is a highly interactive process with many decisions made during the operation. In fact, surgical robots are a special subclass of robots, the master slave manipulators, which work cooperatively with surgeons as surgical assistants.

Currently, there are two main categories of surgical assistant robots. The first category includes surgeon extenders robotic systems that are operated directly by the surgeon to augment or supplement his ability to manipulate surgical instruments [18]. These systems can extend the surgeon's capabilities dramatically, e.g., eliminate his hand tremor or allow dexterous manoeuvres inside the patient's body, to shorten the operation period, reduce the morbidity or error rates, and treat otherwise untreatable conditions. Examples of the robotic systems in this category are telerobotic instruments. These instruments include a slave manipulator, controlled through a spatially consistent and intuitive master with a force feedback (haptic) system and can replace the tactile sensibilities and restore the surgeon's dexterity, diminished during minimal invasive surgery. One such system that is currently in use is the Vinci surgical system including two major components: a console for surgeon's viewing and control, and also two or more surgical arms, which hold and manipulate the detachable surgical instruments [18].

The second category includes auxiliary surgical robots. These systems generally work together with the surgeon and help him in conducting the surgical tasks by performing some auxiliary functions, e.g., holding the endoscope or retracting the neighbouring

tissues. Typically one or more human-machine interfaces, e.g., joystick, head tracker, voice control, etc., is used to provide direct control of these systems, however, there has been efforts to make them intelligent so that they can work automatically with less need to the surgeon's direct control [18].

Some considerations should be taken into account during the design and development of surgical robots. Surgical robots must be compatible with the operating theatre and have sufficient strength, accuracy, and dexterity for their intended use. They must be placed or mounted where they could perform their intended duty, e.g., on the floor, or the operating table, or the ceiling, allowing access to the patient's body by surgical staff. Any part of the robot that might come into contact with the patient or which may contaminate the surgical field must be sterilized or covered with a sterile cover. Furthermore, for image guided operations, they should provide translucency, compactness and compatibility with imaging devices, e.g., MRI. Finally, the important feature of safety must be observed in the design, manufacturing, and application of surgical robots, e.g., thorough multiple emergency stop and checkpoint/restart facilities, redundancy in safety-critical systems; avoidance of unnecessary speed or power in actuators, and rigorous design analysis, documentation, and testing protocols.

Auxiliary surgical robotic tools

Laparoscopic surgery is a branch of minimally invasive surgery that is performed in the abdominal cavity. During laparoscopic surgery, endoscopic instruments are passed through small incisions on the abdominal wall, to reach the surgical site within the patient's abdomen. A long stem laparoscopic lens, attached to a special CCD camera, provides insight view on the surgical site and allows the surgeon to explore the intra-abdominal organs and structures. The use of laparoscopic surgery has increased during the past two decades due to the fact that small incisions are often much less traumatic, causing less post-operative pain and earlier return to normal activities. However, these procedures are more difficult to perform and need more skilful surgeons, since the direct eye-hand coordination is lost.

Efforts have been done to facilitate the laparoscopic surgery procedure by employing robotic systems. In particular, the use of robotic systems to assist surgeons by performing routine tasks such as laparoscopic camera manipulation is becoming a common practice. These systems reduce the need to assistive staff and provide more stability with no fatigue and inattention. Furthermore, they provide a larger space for surgeon's manoeuvres and improved direct control with high geometrical accuracy. The motion of the endo-

scope is controlled by the surgeon using a human-machine interface, e.g., a joystick, foot pedal, voice, or by tracking the surgeon's head movements. Several examples of such laparoscopic robotic cameramen have been introduced in the literature; however, only a few of them [19, 20] have been commercialized.

A project called Robolens was started at the RcSTIM to design and develop a robotic cameraman for laparoscopic surgery, which is dexterous, effective, easy to use, safe and less expensive [21]. The key attribute characteristic of the Robolens system (Fig. 4) is its novel design with the minimum number of degrees of freedom, i.e., four, and actuators, i.e., three, to fulfill all the surgeon's requirements [22]; this is a major advantage over the previous designs considering the cost and maintenance issues of the system when using in clinical practices. Furthermore, there is no moving part on top of the patient body and all actuators are located at a higher level than the surgeon's head providing a larger workspace for the surgeon and clinical staff. Also, for safety reasons, the movements are stopped automatically if continued longer than 6 seconds or if the electrical motors are overloaded due to the contact of lens with body tissues or other objects. The system is equipped with a foot pedal and a voice recognition system to move up/down or left/right and zoom in/out, according to the surgeon's command.

Several technical and safety tests were conducted on the Robolens system, including manipulability, trajectory accuracy, electrical safety, etc. After these tests were successfully done, the system was tested clinically by three surgeons in Imam Khomeini Hospital during different laparoscopic procedures on human samples and the efficacy of the system was evaluated. Results of laparoscopic Cholecystectomy on two groups of patients indicated that the operating period, image stability and the number of times necessary to clean the lens improved when using the robotic cameraman. Robolens system is now in the process of commercialization and at the same time further research is being conducted to add a more sophisticated automated motion control mode to the system in which the endoscope is kept aimed at an anatomic target or track a surgical instrument by using computer vision [23].

Along the same line of thought, other research projects have been initiated in some universities to develop new robotic tools to assist the surgeons during the operation for handling difficult tasks. A novel triple finger laparoscopic instrument has been developed in RCSTIM which facilitates the grasping and manipulation of large intra-abdominal organs [24, 25]. A robotic palpation probe is developed at Amirkabir University of Technology [26]. The device utilizes artificial tactile sensing technology to provide the sense of touch for the surgeon while performing laparoscopic operations. The device has been later



Figure 4: Robolens during a laparoscopic surgery in Imam Khomeyni Hospital.

investigated to develop an automatic diagnosis tool for breast tumors. The same team has also worked on a dexterous snake-like robot to be used in minimally invasive surgeries, particularly laparoscopic surgery [27]. The device provides 5 degrees of freedom and a wide range of bending angle from -90 to 90 degrees.

Robotic tele-surgery systems

The RcSTIM has initiated a major project on the development of a laparoscopic tele-surgery system. The system consists of a master console which is operated directly by the surgeon and a set of three slave robots that perform the operation on the patient. The master console includes two master robots with a mechanical interface shaped as a standard laparoscopic surgery tool. The surgeon uses these mechanical interfaces to send the force/motion commands to the slave system. The master robots are developed to provide haptic functionality. Therefore, the surgeon receives force feedback from the robot that mimics the interacting forces between the slave robots and the patients.

The slave system consists of three spherical robots, each of which provides 4 degrees of freedom plus the

grasping function of the laparoscopic tool. One of the slave robots is to manipulate the laparoscope and provide visual feedback to the surgeon at the master console. A special laparoscopic end tool is also developed for the slave robot which is fully instrumented so that automatic grasping and safe manipulation of the tissue can be implemented. Also a novel design for the grasping mechanism is employed to handle the large organs as well as the small ones. The first prototype of the tele-surgery system is fabricated and is going through the technical tests which will afterwards be followed by clinical trials on animals.

ROBOTIC REHABILITATION SYSTEMS

Robotic rehabilitation systems fall in a special subset of medical robotics which focuses on machines that are used to help people recover from severe physical trauma. These systems are generally at early stages of development and are expected to make valuable contributions to the world of physical therapy ****. However, the early results are encouraging in many cases. Robotic rehabilitation systems allow a specific task or series of tasks with high complexity to be designed and implemented on each specific patient.

The current practice of physical therapy is labour-intensive and requires one or more therapist to work with a patient to achieve the therapeutic goal. This has resulted in high associated costs which may not be affordable by the health system. A robotic rehabilitation system, e.g., a robotic gait trainer, allows rehabilitation to be performed with minimum number of therapists, with the robot providing support and tempering the patient's gait. Moreover, using force and motion sensors, the amount of patients interaction involved in these tasks are accurately measured to track his/her progress. Finally, the haptic system allows the rehabilitation tasks to be continuously updated with the progress of the patients while threshold levels are applied to ensure his/her safety.

Robotic Upper Limb Rehabilitation System

Cerebrovascular disorders and traumatic brain injuries are main causes of disabilities resulting in partial or complete motor limitation in upper and lower limbs in adults. Many researchers have investigated the upper limb rehabilitation process using different approaches, e.g., physical therapy, electrical stimulation, and passive manipulation [28, 29]. Recently, new sensory-motor rehabilitation techniques based on the use of robots and mechatronics systems have been proposed for stroke patients [30]. These techniques are claimed to improve the patient's motor performance, shorten the rehabilitation time, and provide objective parameters for evaluation of patient's progress.

The upper limb rehabilitation robotic systems usually have one to three degrees of freedom and are designed for unilateral or bilateral shoulder and elbow movements or bilateral passive and active practice of forearm and wrist [30-34]. During robotic rehabilitation, a paretic arm is manipulated, similar to a traditional physical therapy exercise, and simultaneously the speed, direction and strength of the residual voluntary activity are measured. The Gentle/s system [35], moreover, has coupled the models for human arm movements with haptic interfaces and virtual reality technology.

The RCSTIM has developed an upper limb rehabilitation device, called Wrist-RoboHab (Fig. 5) to provide therapeutic practices to the post-stroke patients [36]. It aims at decreasing the muscles spasticity, increase the power and motor control and relief the pain in the arm of chronic hemiparetic patients. Two movements with one degree of freedom, i.e., pronation/supination of the forearm and flexion/extension of the wrist, were considered.

The system can function in seven working modes for patient treatment and in three working modes for patient evaluation. A graphical user interface is available for switching between working modes, as well as



Figure 5: Wrist-RoboHab, the robotic upper limb rehabilitation system developed at RCSTIM.

for adjusting the parameters and providing visual feedback for both the patient and the therapist. Furthermore, the robot can be connected to a computer via a USB port to facilitate the user communication and data transfer. Clinical results showed an improvement in Fugle-Meyer, AROM, power and the biomechanical assessment of the spasticity in a chronic patient [37]. Furthermore, it was approved that the robot can have a good interaction with both patient and therapist. Furthermore, the multifunctional feature of our robot provides the therapist with the opportunity to use it for patients with various kinds of disabilities, while making it cost-effective and affordable [38].

CONCLUSION

The emerging field of medical robotics has a major role in the future prospect of medicine. For this reason, numerous research and development projects have been initiated in this field; some of them have passed the prototyping phase and entered the clinical trials in Iran. Research activities in this field mainly

focus on these two areas: robotic surgery and rehabilitation robotics.

In robotic surgery, a versatile set of projects have been initiated ranging from image-guided and computer-assisted surgery to fabricating robotic mechanisms to assist surgeon in performing the operations. A complete navigation system has been developed and introduced by the RcSTIM for ENT and brain surgeries. Several robotic tools for laparoscopic surgeries have been also developed. A complete tele-surgery system for laparoscopic surgery is also under development and will soon enter the final test stages. Rehabilitation robotics is the second field of medical robotics research in Iran. Development of a robotic system for upper body physical therapy is done. The prototype has passed the technical and some clinical trials and has entered the commercialization stage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FARAHMAND (F.), REZAEIAN (T.) & GHAZINOURI (S.), "A comprehensive study to improve and promote the surgical device technology in Iran", *Report submitted to the Ministry of Mines and Industry of I.R. Iran*, Tehran, Iran, Feb 2003.
- [2] ATESHIAN (G.A.), *A least-squares B-spline surface-fitting method for articular surfaces of diarthrodial joints*, J Biomech Eng, 115, pp. 366-373, 1993.
- [3] LEE (J.H.), *Modeling generalized cylinders using direction map representation*, Journal of Computer-Aided Design, 37, pp. 837-846, 2005.
- [4] JAFARI (A.), FARAHMAND (F.) & MEGHDARI (A.), Surface modeling of complicated geometries with incomplete erroneous data points-An extension to B-spline approach, *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology (EMBS 2005)*, Proceedings 7 VOLS, art. no. 1616752, pp. 1634-1637, Shanghai, September 2-4, 2005.
- [5] JAFARI (A.), FARAHMAND (F.), MEGHDARI (A.) & GOLESTANHA (A.S.), A new approach to C2 continuous piecewise bicubic representation of the articular surfaces of diarthrodial joints, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers- Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 220 (4): pp. 553-563, May 2006.
- [6] SALVI (J.), MATABOSCH (C.), FOFI (D.) & FOREST (J.), *A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation*, *Image and Vision Computing* 25, pp. 578-596, 2007.
- [7] COLLIGNON (A.) et al., *Surface Based Registration of 3D Medical Images*, Proc. SPIE Vol. 1898: Med. Imag., pp. 32-42. 1993.
- [8] MOSTAFAVI (K.), JAFARI (A.) & FARAHMAND (F.), A Surface Registration Technique for Estimation of 3-D Kinematics of Joints, *The 17th Annual 'Medicine Meets Virtual Reality' Conference (MMVR17)*, Long Beach, CA, USA, 2009.
- [9] WANG (J.), RYU (J.), HAN (J.) & ROWEN (B.), A new method for the representation of articular surfaces using the influence surface theory of plates, *Journal of Biomechanics* 33(2000), pp. 629-633.
- [10] SARKAR (S.), ABOLHASSANI (M.D.), FARAHMAND (F.), AHMADIAN (A.R.) & SABER (R.), *Research Activities at the Research Centre for Science and Technology in Medicine*, Iranian Journal of Public Health, vol. 38, Suppl. 1, pp.153-157, 2009.
- [11] BASAFA (E.) & FARAHMAND (F.), Real-time simulation of the nonlinear visco-elastic deformations of soft tissues, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6: pp. 297-307, 2011.
- [12] BASAFA (E.), SHEIKHOLESAMI (M.), MIRBAGHERI (A.), FARAHMAND (F.) & VOSOUGHI (G.R.), Design and Implementation of Series Elastic Actuators for a Haptic Laparoscopic Device, *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 6054-6057, Minneapolis, Minnesota, USA, September 2-6, 2009.
- [13] FUNG (Y.C.), *Biomechanics: mechanical properties of living tissues*, Springer-Verlag, New York, pp. 196-257, 1981.
- [14] BASAFA (E.), FARAHMAND (F.) & VOSOUGHI (G.H.), A non-linear mass-spring model for more realistic and efficient simulation of soft tissues surgery, *Studies in Health Technology and Informatics*, 132: pp. 23-25, 2008.
- [15] TIREHDAST (M.), MIRBAGHERI (A.R.), FARAHMAND (F.) & ASGHARI (M.), Finite element modeling of spleen tissue to analyze its interaction with a laparoscopic surgery instrument, *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA2010*, Turkey, July 12-14, 2010.
- [16] TIREHDAST (M.), MIRBAGHERI (A.), ASGHARI (M.) & FARAHMAND (F.), Modeling of Interaction between a Three-Fingered Surgical Grasper and Human Spleen, *Studies in Health Technology and Informatics*, 163: pp. 663-669, 2011.
- [17] ABDI (E.), FARAHMAND (F.) & DURALI (M.), Real-time 3D Modeling of Soft Tissue in Simple Interaction with Surgical Instrument Using the EGF Meshless Method, *in proceedings of 19th 'Medicine Meets Virtual Reality Conference'*, Newport Beach, CA, USA, 2012.
- [18] TAYLOR (R. H.) et al., *Medical Robotics and Computer Integrated Surgery*, CAS, 2(2): pp. 47-53, 2000.
- [19] AIONO (S.) et al., *Controlled trial of the introduction of a robotic camera assistant (EndoAssist) for laparoscopic cholecystectomy*, *Surg Endosc.*16(9): pp. 1267-70, 2002.
- [20] KRAFT (B.M.) et al., *The AESOP robot system in laparoscopic surgery: increased risk or advantage for surgeon and patient?*, *Surg Endosc*, 18(8): pp. 1216-23, 2004.

- [21] MIRBAGHERI (A.), FARAHMAND (F.), MEGHDARI (A.) & KARIMIAN (F.), *Design and development of an effective low-cost robotic cameraman for laparoscopic surgery: RoboLens*, *Scientia Iranica-Transactions B: Mechanical Engineering*, 18 (1): pp. 105-114, 2011.
- [22] MIRBAGHERI (A.), FARAHMAND (F.), MEGHDARI (A.) & SAYYAADI (H.), *Design of a Robotic Cameraman with Three Actuators for Laparoscopic Surgery*, *ASME 2006 Frontiers in Biomedical Devices Conference*, NanoBio2006, Irvine, California, USA, June 8-9, 2006.
- [23] AMINI KHOIY (K.), MIRBAGHERI (A.R.), FARAHMAND (F.), & BAGHERI (S.), *Marker-Free Detection of Instruments in Laparoscopic Images to Control a Cameraman Robot*, *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2010)*, Canada, 15-18 August 2010.
- [24] MIRBAGHERI (A.R.), YAHYAZADEHFAR (M.), FARAHMAND (F.), *Conceptual design of a novel laparoscopic instrument for manipulation of large internal organs*, *Proceedings of ASME 2010 5th Frontiers in Biomedical Devices Conference (BioMed2010)*, Newport Beach, California, USA, September 20-21, 2010.
- [25] MIRBAGHERI (A.R.) & FARAHMAND (F.), *Design and analysis of an actuated endoscopic grasper for manipulation of large body organs*, *32nd Annual International IEEE EMBS Conference*, art. n° 5626436, pp. 1230-1233, Argentina, August 31 - September 4, 2010.
- [26] AFSHARI (E.), NAJARIAN (S.) & SIMFOROOSH (N.), *Application of artificial tactile sensing approach in kidney-stone-removal laparoscopy*, *Biomedical Materials and Engineering*, vol. 20, n° 5, pp. 261-267, 2010.
- [27] KHOORJESTAN (S.M.), NAJARIAN (S.), SIMFOROOSH (N.), & FARKOUSH (S.H.), *Design and Modeling of a Novel Flexible Surgical Instrument Applicable in Minimally Invasive Surgery*, *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 4 (1): pp. 53-60, 2010.
- [28] FEYS (H.M.) et al., *Effect of a therapeutic intervention for the hemiplegic upper limb in the acute phase after stroke: A single-blind, randomized, controlled multicenter trial*, *Stroke*, 29(4), pp. 785-792, 1998.
- [29] KWAKKEL (G.) et al., *Intensity of leg and arm training after primary middle cerebral artery stroke: A randomized trial*, *Lancet*, 354: pp. 191-196, 1999.
- [30] DIJKERS (M.P.) et al., *Patient and staff acceptance of robotic technology in occupational therapy: a pilot study*. REHABIL (J.) Res Dev, 28(2): pp. 33-44, 1991.
- [31] JOHNSON (M.J.) et al.; *Driver's SEAT: Simulation environment for arm therapy. in International Rehabilitation Robotics*. Stanford, 1999.
- [32] LUM (P.S.), BURGAR (C.G.) and SHOR (P.C.), *Use of the MIME robotic system to retrain multijoint reaching in post-stroke hemiparesis: why some movement patterns work better than others*, *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society IEEE*. 2003.
- [33] BURGAR (C.G.) et al., *Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience*. REHABIL (J.) Res Dev, 37(6): pp. 663-73, 2000.
- [34] KREBS (H.I.) et al., *Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MIT-Manus*. NEURO-ENG REHABIL (J.), 1(1): p. 5, 2004.
- [35] LOUREIRO (R.) et al., *Upper Limb Robot Mediated Stroke Therapy-GENTLE/s Approach. Autonomous Robots*, 15(1): pp. 35-51, 2003.
- [36] RASHEDI (E.), MIRBAGHERI (A.), TAHERI (B.), FARAHMAND (F.), VOSSOUGH (G.R.) & PARNIANPOUR (M.), *Design and Development of a Hand Robotic Rehabilitation Device for Post-Stroke Patients*, *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 5026-5029, Minneapolis, Minnesota, USA, September 2-6, 2009.
- [37] BANIASAD (M.A.), FARAHMAND (F.) & NAKHOSTIN ANSARI (N.), *Wrist-RoboHab: A Robot for Treatment and Evaluation of Brain Injury Patients*, *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2011)*, Zurich, June 29-July 1, 2011.
- [38] BANIASAD (M.A.), AKBAR (M.), ALASTY (A.) & FARAHMAND (F.), *Fuzzy Control of a Hand Rehabilitation Robot to Optimize the Exercise Speed in Passive Working Mode*, *Studies in Health Technology and Informatics*, 163: pp. 39-43 2011.

La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs

Qu'est-ce que la robotique industrielle aujourd'hui ? Des bras manipulateurs autonomes pour réaliser des tâches répétitives à haute cadence, ou des chariots sans conducteur qui suivent des trajectoires fixes... La mise en œuvre de ces solutions robotisées a un fort impact sur l'environnement humain ; elles doivent satisfaire à des contraintes de sécurité et de robustesse et se caractérisent par leur faible versatilité et des capacités d'adaptation limitées.

De nouveaux bras exploitables à proximité d'opérateurs humains sont désormais disponibles sur le marché. De plus, depuis une dizaine d'années, la recherche en robotique progresse très vite, avec pour objectif la robotique de service en milieu humain, et pour cadre applicatif l'assistance aux personnes.

Pourquoi un robot, compagnon de l'homme hors de son environnement de travail, ne pourrait-il pas l'être aussi dans un atelier ? Comment l'industrie peut-elle tirer parti des nouveaux résultats des recherches menées en robotique de service ? Les réponses à ces questions sont complexes, tant les contraintes sont différentes entre les divers domaines applicatifs. Nous évoquerons ici quelques-uns des défis à relever pour qu'émerge la cobotique, une robotique collaborative entre le robot industriel et l'homme.

Par Michel DEVY*

* DR CNRS - CNRS; LAAS; Université de Toulouse ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse Cedex 4, France. Courriel : michel.devy@laas.fr

INTRODUCTION

Nous avons tous en tête les chaînes de montage robotisées, popularisées en particulier dans l'industrie automobile (voir la figure 1). Tel ou tel constructeur a pu communiquer sur tel ou tel site dans lequel une large majorité des actions sont réalisées par des robots, des bras manipulateurs ou des chariots mobiles sans conducteur (AGV). Néanmoins, plusieurs constructeurs sont revenus en arrière et nombreuses sont aujourd'hui les opérations réalisées par des opérateurs assistés de moyens mécaniques leur permettant de limiter leurs efforts physiques, et ainsi de leur éviter des troubles musculo-squelettiques (les TMS).

Pourquoi cela ? Au-delà de la difficulté de la programmation des robots industriels, des problèmes de robustesse, d'échecs des tâches robotisées dès que survient un imprévu ou des contraintes de sécurité rendent plus complexe l'introduction de robots sur un poste donné d'une chaîne de montage : ces bras, très puissants, doivent être isolés des opérateurs humains, et donc mis dans des cages, lesquelles occupent une importante superficie au sol. Par ailleurs, les opérations de logistique sont plus complexes du fait que les robots n'effectuent pas de montage au défilé ; il faut donc prévoir des convoyeurs spécifiques, des files d'attente en entrée des postes robotisés, etc., ce qui rallonge les lignes de production.

Quand on visite une ligne de montage, par exemple dans l'industrie automobile, on est impressionné par l'immensité des sites industriels. Et, malgré cela, l'un des critères importants du choix entre opération manuelle ou opération robotisée, sur un poste donné, (voir les figures 1 et 2), c'est... l'espace ! (s'y ajoute aussi la complexité des opérations de logistique, et donc celle de l'alimentation du poste en composants de base).

D'un côté, de nombreuses contraintes diminuent la plus-value apportée par les solutions robotisées : certains opérateurs humains assistés de moyens mécaniques permettant de limiter leurs efforts réalisent des actions qu'il est difficile d'automatiser, comme l'assemblage d'objets souples (tels que les joints, les revêtements isolants...) ou encore l'assemblage de sous-parties présentant trop de variations.

Mais d'un autre côté, on assiste à un développement important de la robotique de service en milieu humain, avec pour principale motivation, l'assistance aux personnes, à leur domicile, pour faire face au vieillissement de la population dans les pays occidentaux (en particulier au Japon).

Les roboticiens japonais, sous l'impulsion de grands groupes industriels (Honda, Sony,...) ont privilégié les recherches sur la robotique humanoïde sous prétexte qu'un robot à l'apparence humaine (par exemple, le robot HRP2 - voir la figure 3, robot de



Figure 1 : Robots de soudure (© Flore Fauconnier / JDN)



Figure 2 : Ligne d'assemblage General Motors aux Etats-Unis (Crédits photo : Wieck)

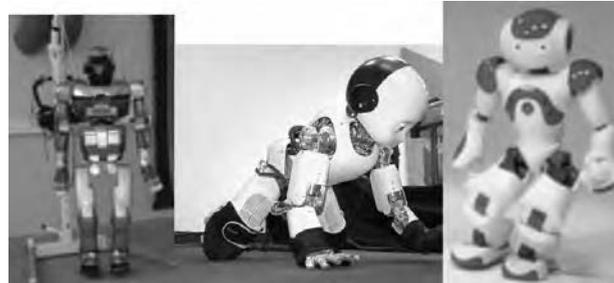


Figure 3 : Robots humanoïdes : HRP2 (© LAAS), ICUB (© IIT), NAO (© Aldebaran [1])

gauche) serait plus adapté pour exécuter des tâches dans des environnements humains (monter des escaliers, manipuler des objets, avec deux bras, à partir de la vision...) et serait mieux accepté par l'homme.

En Europe et aux Etats-Unis, il existe aussi des démonstrateurs humanoïdes surtout destinés à des usages dans la recherche et l'enseignement (Icub (au centre) et Nao (à droite), par exemple - voir la figure 3).

De par la complexité de la programmation des robots de service, les plus avancés (au sens de la complexité des tâches qu'ils exécutent) sont plutôt des robots munis de roues (voir la figure 4 de la page suivante) et équipés d'un bras (comme le Care-O-Bot, de IPA, en Allemagne) ou de deux bras (comme le PR2, de Willow Garage aux Etats-Unis).

Un élément particulièrement favorable à cette évolution vers la robotique de service est l'existence, sur le

marché, de robots satisfaisant à la norme ISO 10218. Cette norme définit les exigences de sécurité d'un robot collaboratif, c'est-à-dire d'un robot appelé à exécuter des tâches en présence d'opérateurs humains.

Citons, en particulier, le robot manipulateur 6 axes KUKA LWR (*Light Weight Robot*) [4], initialement conçu au *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR (Munich, Allemagne). Ces bras sont limités en vitesse ($v < 250$ millimètres/seconde), en puissance (< 80 watts) et en force (< 150 newtons) ; malgré leur faible poids (14 kg), ils ont une bonne capacité d'import (7 kg). Ce robot (voir la figure 5) est disponible dans de nombreux laboratoires, académiques ou industriels.

Au-delà de la conception de robots d'assistance satisfaisant à toutes les contraintes de sécurité, de réactivité et d'acceptabilité propres à l'interaction avec l'homme, il convient de leur donner des capacités autonomes pour percevoir leur environnement, s'y déplacer ou le modifier, et surtout, pour détecter la présence de l'homme et interagir avec lui. Citons, par exemple, le projet ANR ASSIST [6], qui a pour objectif de réaliser un robot compagnon capable d'assister des personnes tétraplégiques lorsqu'elles sont seules à leur domicile. Le robot pourra exécuter des tâches élémentaires, activées par l'homme *via* une interface adaptée (commande vocale, écran tactile, gestes, pointage laser,...). Nous présentons, en figure 6, le *design* du robot ASSIST, qui avec ses deux bras doit pouvoir saisir des objets se trouvant au sol ou sur des étagères. Ces bras sont conçus par le CEA LIST.

Nous avons évoqué deux applications dans lesquelles le robot doit satisfaire des contraintes assez différentes. Pour la production dans l'industrie, les robots, aujourd'hui, sont isolés des opérateurs humains, ce qui prend de l'espace et pose des problèmes de logistique pour organiser une chaîne comportant des postes manuels et des postes robotisés. Les postes robotisés effectuent les tâches qui requièrent rapidité, force et/ou précision : ces tâches sont réalisées en mode autonome, ce sont de ce fait des tâches généralement simples et répétitives. Pour l'assistance à la personne, le robot interagit avec l'homme. Il agit dans sa proximité, voire exécute des tâches partagées avec l'homme. Il est doté d'une autonomie réduite, car il bénéficie de l'expertise humaine, en particulier des capacités sensorielles et décisionnelles de l'homme.

La robotique industrielle doit tirer profit des progrès réalisés en matière de robotique de service pour l'homme. Un nouveau concept est ainsi apparu : la robotique collaborative, ou cobotique, applicable soit à la robotique mobile (par exemple, une boîte à outils robotisée capable de suivre son utilisateur, ou permettant le transport collaboratif de pièces encombrantes), soit à la robotique à poste fixe, avec coaction, ou partage des tâches, entre l'homme et le robot.



Figure 4 : Robots de service à roues : Care-O-Bot (© IPA [2]) et PR2 (© Willow Garage [3])

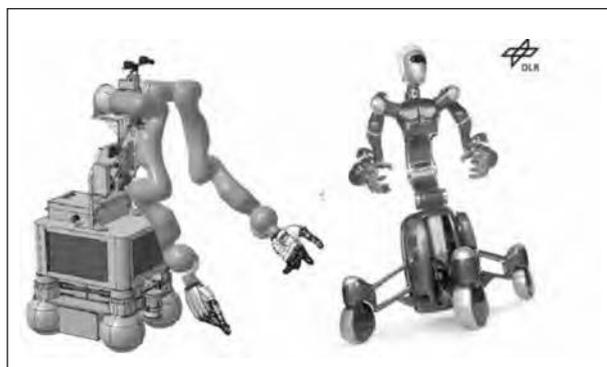


Figure 5 : Bras KUKA LWR [4] embarqués sur les robots JUSTIN (© DLR [5]) en Allemagne, et JIDO2 en cours d'intégration au LAAS (© CNRS)

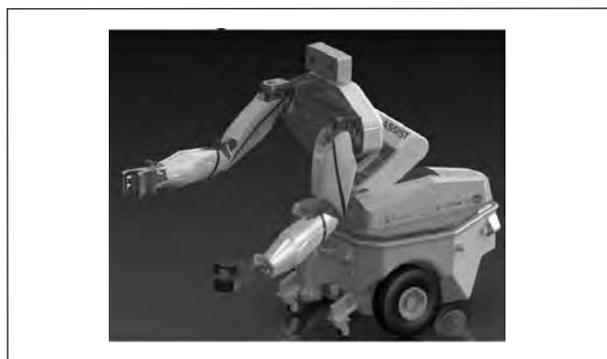


Figure 6 : Démonstrateur du robot ASSIST © CEA LIST

Dans la suite de cet article, nous évoquerons certaines avancées récentes en robotique de service réalisées dans différents domaines, comme la perception de l'homme par le robot, l'exécution de tâches pour la navigation et la manipulation, ou encore le système décisionnel. Nous indiquerons, dans chaque cas, comment décliner ces fonctionnalités sur un robot de service utilisé en milieu industriel. Nous citerons ensuite quelques projets (anciens, en cours ou futurs) portant sur la robotique de service en milieu industriel. Nous concluons, enfin, sur les conditions de réussite de la robotique collaborative dans des applications industrielles.

LA PERCEPTION DE L'HOMME PAR LE ROBOT

Notre « cobot » doit réaliser des tâches en coopération avec l'homme ; il doit se positionner vis-à-vis de l'homme, et comprendre quelles sont ses demandes. Il existe de nombreux schémas d'interaction ; des interfaces plus sophistiquées sont nécessaires, si la tâche est conjointe (c'est-à-dire si elle nécessite la participation active et de l'homme et du robot), si le robot peut prendre l'initiative (le robot peut anticiper les requêtes de l'homme sur la base d'une reconnaissance de l'intention de ce dernier). La perception de l'homme a fait d'énormes progrès au cours de la dernière décennie, essentiellement du fait d'une forte demande pour la vidéosurveillance et, plus récemment, pour les jeux vidéo. Voici quelques exemples de ces fonctions susceptibles d'être transposées sur un cobot.

Apprentissage de l'homme (par le robot)

Au préalable, le robot - plutôt, le cobot - doit connaître l'opérateur avec qui il devra interagir ; cela relève d'un mode d'apprentissage de caractéristiques de l'homme qui soient exploitables par les capteurs embarqués sur le robot : le visage (pour la vision), la voix (pour l'audio), un badge (pour le lecteur RFID (Radio Frequency Identification))... Ce mode d'apprentissage peut être activé hors ligne si l'opérateur ne change jamais, ou bien il peut être activé, en ligne, lorsqu'un nouvel opérateur remplace le précédent. Cette fonction est rapide, mais requiert un protocole spécifique homme-robot

Détection, suivi, identification de l'homme (par le cobot)

Une fois ces caractéristiques connues, le cobot est capable de détecter l'homme auquel il va rendre des services. Les capteurs (caméra, microphone, lecteur RFID, ici connectés à des antennes directionnelles s'agissant du robot de la figure 7) sont embarqués sur le robot. L'exploitation de plusieurs modalités permet d'améliorer les résultats : le capteur audio permet de détecter l'homme, de le localiser en dynamique autour du robot, d'identifier la voix de l'homme (dans un milieu qui peut être bruyant) ; un lecteur RFID apporte sensiblement la même information, si le robot est équipé d'antennes directionnelles ; mais c'est un capteur vidéo qui apporte le plus de précision, grâce à la détection des visages des humains se trouvant à proximité du robot, puis à l'identification parmi tous ces visages de l'homme à assister.

En figure 8, nous illustrons une détection dans l'image par une approche particulière ; chaque point repro-



Figure 7 : Détection de l'homme à partir d'informations multimodales : badge RFID et vision (© CNRS)



Figure 8 : Détection de l'homme par vision (© CNRS)

jeté sur l'image correspond à une hypothèse sur la position de l'homme dans l'image ; est ainsi définie la zone dans laquelle le visage de l'homme sera identifié (zone matérialisée par le rectangle avec des points dans la figure 8). Dès que l'homme a été détecté et identifié dans une image, le cobot va apprendre son apparence, la couleur ou la texture de ses vêtements, dans le deuxième rectangle (celui du bas dans la figure 8), positionné par rapport au visage.

Le suivi des déplacements apparents de l'homme à assister dans la séquence vidéo acquise éventuellement pendant que le robot se déplace, repose lui aussi sur des approches multi-hypothèses fondées sur le filtrage particulière ; le suivi visuel exploite ces deux fenêtres cadrées sur le visage et sur le corps de l'homme. L'exploitation de deux fenêtres amène plus de robustesse, en particulier lorsque le visage est occulté (dans le cas où l'homme tourne le dos au robot ou passe derrière un obstacle).

Les procédures de détection, de suivi et d'identification sont intimement liées ; c'est la fusion de ces trois fonctions, traitées en fonction de plusieurs modalités (audio, vidéo, RFID), qui permettra de traiter des situations complexes (par exemple, quand l'homme est momentanément occulté, ou qu'il se trouve au milieu d'un groupe de personnes, portant éventuellement toutes une blouse blanche !). Des modèles de

mouvement, pour le robot et/ou pour l'homme, sont exploités pour prédire leurs positions sur chaque image et ainsi pour retrouver l'homme à assister, par exemple après une occultation du champ visuel du robot par une autre personne portant le même vêtement (voir la figure 9a de la page suivante).

Malgré cela, si la dynamique de l'homme est trop rapide, il est fréquent que le suivi visuel « décroche ». En figure 9a, la détection par le lecteur RFID (à droite) permet de relocaliser l'homme, essentiellement en orientation (relativement au robot) et de le ré-identifier, bien qu'il soit vu de dos par le robot (à gauche).

Mouvements conjoints de l'homme et du robot

A partir des données sensorielles (dont il dispose grâce à ses capteurs), le robot peut donc estimer les mouvements de l'homme et le localiser avec une précision dépendant de la nature des capteurs, mais toujours d'un ordre de 10 centimètres.

Le robot peut alors effectuer des déplacements conjoints avec ceux de l'homme, en appliquant une loi de commande afin de maintenir une configuration fixe homme-robot, suivant plusieurs modes possibles.

Par exemple, dans un contexte robot de type Boîte à outils intelligente, le robot suit l'homme, et se maintient à 1 mètre derrière lui. La commande peut être calculée en régulant à 0 l'erreur entre les positions courantes et souhaitées de l'homme par rapport au robot dans l'espace 3D (asservissement visuel 3D), ou entre les positions courantes de l'homme dans l'image (asservissement visuel 2D). Dans un contexte robot-guide, le robot suit une trajectoire déterminée pour atteindre un but, et c'est alors l'homme qui doit suivre le robot (celui-ci doit surveiller l'homme afin d'adapter sa propre vitesse à celle de ce dernier). Dans les deux cas, le robot doit aussi surveiller l'environnement pour éviter tout obstacle (en particulier, d'autres humains ou d'autres robots évoluant dans le même environnement). La détection et l'évitement d'obstacles ne sont pas considérés ici.

Interaction homme-robot

L'interaction homme-robot est un cas particulier de l'interaction homme-machine (IHM), largement étudiée par la communauté informatique. Il est connu qu'un IHM trop complexe ou mal adapté limite l'usage d'un outil, voire, au pire, le rend non acceptable pour l'homme. Ainsi, par exemple, les bras artificiels mis à disposition des personnes handicapées pour étendre leur espace de préhension (bras MANUS ou JACO) sont peu répandus car trop complexes à mettre en œuvre, du fait d'un manque total d'autonomie.

Par ailleurs, un robot assistant avancé offre une grande diversité de services, qu'il peut potentiellement exécuter pour l'homme ; dans un tel cas, une simple télécommande du type commande d'un poste de télévision ne suffit pas.

La commande vocale exploitant l'extraction et la reconnaissance de la parole d'un flot audio nécessite généralement le port d'un micro par l'homme, car l'extraction de sa voix pose problème, en milieu bruyant. Par ailleurs, de nombreuses recherches sont dédiées à la définition du dialogue homme-robot, le but étant de définir le langage à partir d'une « ontologie » partagée, c'est-à-dire de termes qui soient d'un emploi naturel pour l'homme et qui puissent être facilement compris par le robot. Citons en particulier les travaux réalisés à l'INSERM dans le cadre du projet ANR AMORCES [7] concernant l'interaction homme-robot pour l'exécution de tâches collaboratives, et portant notamment sur les impacts respectifs de la communication verbale et de la communication non verbale.

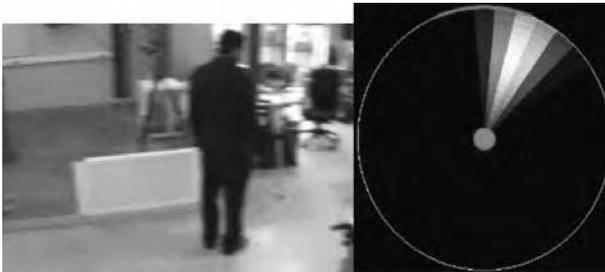
Un clone parlant à visage humain est souvent mis en œuvre sur le robot pour rendre les échanges plus naturels ; le réalisme de ce clone nécessite des traitements très sophistiqués, par exemple pour synchroniser le flot audio avec le mouvement synthétisé de son visage ou de ses lèvres. En figure 9b (de la page suivante), nous présentons l'écran proposé comme IHM sur le robot-guide RACKHAM déployé par le LAAS-CNRS, à la Cité de l'Espace de Toulouse, en 2005. Sur l'écran s'affichait en particulier le plan du site, avec ses différents points d'intérêt, et un clone fourni par le GIPSA-Lab, partenaire du LAAS pour cette opération [8]. Ce clone donnait des explications aux visiteurs.

La détection de gestes est également un mode d'interaction très étudié. De manière générale, la capture des mouvements humains exploite des systèmes multicaméras onéreux et, surtout, nécessite d'équiper l'homme de marqueurs réfléchissants, sur toutes ses articulations. Ces techniques de *Motion Capture* popularisées par l'industrie cinématographique sont trop contraignantes en robotique, même si nous les employons dans les laboratoires afin de suppléer des moyens de perception souvent peu robustes, et aussi afin de donner une « vérité terrain » à nos expérimentations (figure 10 (de la page suivante)).

La capture de mouvements ou de gestes sans marqueurs reste un défi, malgré l'irruption, fin 2010, de la Kinect. Auparavant, nous utilisions la vision monoculaire, stéréo ou 3D (caméras 3D de type Time-Of-Flight ou PMD - *Photonic Mixed Devices* [9]) afin de détecter et de suivre le visage, les mains, voire la configuration de toutes les articulations de l'homme. La figure 10 montre une approche de suivi coordonné des deux mains et du visage par stéréovision ; des contraintes de positionnement entre les mains et le visage permettent de rendre le traitement de ces images plus robuste.

La Kinect, avec sa fonction *Skeleton tracker*, est adaptée des technologies de la société PrimeSense [10] ; elle fournit une solution à ce problème de suivi des gestes de

Figure 9.



(a) Détection de l'homme par RFID (© CNRS)



(b) Ecran tactile utilisé comme IHM (© CNRS)

l'homme. Le capteur, de très faible coût par rapport aux caméras 3D existantes, fournit à la fois une image 3D et une image couleurs de la scène perçue. Il a été largement adopté dans la communauté robotique ; en effet, de nombreux démonstrateurs dans les laboratoires sont équipés de Kinect.

En figure 11, nous montrons le robot Jido, en train d'observer un homme avec sa Kinect : sur l'écran du fond, l'état de la scène (positions des objets, position de l'homme) est mis à jour, en temps réel. Mais le *Skeleton tracker* Version 2011 n'est pas assez robuste en regard des contraintes propres à la robotique pour fournir des données qui soient d'emblée fiables à une détection de gestes et à une reconnaissance des actions de l'homme.

Quelques défis en matière de perception de l'homme

La perception de l'homme est une fonction clé pour développer des stratégies génériques de travail collaboratif homme-cobot. Il est certain que face à un contexte applicatif précis, des solutions d'interactions *ad hoc* peuvent être proposées, qui évitent les difficultés de la reconnaissance vocale ou celles de la détection des gestes ou des actions de l'homme.

Mais à des fins de sécurité (et aussi d'efficacité), il sera nécessaire de doter les cobots de fonctions avancées de perception de l'homme. Certaines fonctions sensorielles pourraient être déportées hors du robot, sur des capteurs fixes (caméras, micros...) enfouis dans l'environnement. Rendre l'environnement plus « intelligent » permettrait certes de multiplier les points de vue sur les scènes à analyser, mais cela 1) accroît les capacités de calcul pour analyser l'ensemble des données nécessaires, 2) rend plus complexes les traitements d'estimation, car ils sont distribués sur plusieurs sites, 3) cela augmente les flux d'informations qui transitent sur le réseau et, enfin, 4) comme pour la vidéo-surveillance, il se pose des problèmes de droit à l'image et de respect de la vie privée.



Figure 10 : Exemple de suivi visage-mains, entrée d'une fonction de détection de gestes (© CNRS)



Figure 11 : Perception de l'homme par la Kinect sur le robot Jido du LAAS caméra (© CNRS)

EXECUTION DE TÂCHES ROBOTIQUES

Nous évoquerons ici (sans entrer dans les détails) les défis concernant l'exécution de tâches de type navigation ou manipulation dans le contexte de la robotique industrielle. Un robot assistant de l'homme doit se

déplacer pour satisfaire une requête de l'homme : typiquement, se rendre dans une autre pièce, pour observer et transmettre une image, ou pour aller chercher un objet. Le robot doit saisir cet objet, pour le donner à l'homme à assister ou le rapprocher de celui-ci. Quels sont, en la matière, les défis spécifiques à la robotique industrielle ?

La navigation : exécuter des déplacements

Les opérations de logistique nécessitent de mettre en œuvre de très nombreux chariots (par exemple, pour alimenter les différents postes d'une chaîne d'assemblage en continu). Pour l'automatisation de ces opérations de logistique, de nombreuses compagnies proposent des AGVs (BA Systèmes en France, Neobotix en Allemagne, SwissLog en Suisse,...), mais la mise en œuvre de capacités de navigation autonomes nécessite certains aménagements, dans les ateliers (lignes au sol, *magnets* ou *tags* RFID enfouis,...) pour matérialiser les chemins que les AGVs peuvent suivre.

Peut-on minimiser ces aménagements ? De nombreux travaux, ces dernières années, ont porté sur la navigation autonome, depuis la cartographie ou la génération des représentations de l'environnement nécessaires à un robot pour planifier et exécuter un déplacement de manière sûre, jusqu'à la prise en compte d'imprévus (typiquement, des obstacles).

Il est possible aujourd'hui de définir hors ligne une trajectoire pour un robot, uniquement sur la base d'amers (points de repère), que le robot extrait lui-même. Si les amers sont connus, le robot peut planifier, puis exécuter en ligne un mouvement, en maximisant certains critères (comme passer le plus loin possible des obstacles, minimiser le temps de parcours, maximiser la localisation en cours d'exécution...).

Quels sont les défis à relever dans ce domaine ? Nous citerons les mouvements conjoints homme-robot, qui nécessitent l'asservissement du robot pour suivre les mouvements de l'homme et l'apprentissage de représentations hiérarchisées, indispensables pour des environnements de grandes dimensions. Surtout, il est nécessaire de prendre en compte, dans les planificateurs de trajectoires, les contraintes sociales que doit respecter un robot pour que l'homme en accepte la présence : par exemple, respecter une distance minimale homme-robot, ne pas passer dans le dos de l'homme...

Les manipulations : déplacer des objets

Dans le milieu industriel, la commande de bras manipulateurs a été très largement étudiée, mais plutôt dans un contexte où le bras est isolé, loin de l'homme.



Figure 12 : Le robot tend un objet à l'homme (© CNRS)

La planification et l'exécution de mouvements d'un bras manipulateur à proximité d'opérateurs humains doivent adopter des stratégies intrinsèquement sécurisées qui garantissent la sécurité et le confort des humains. Le planificateur de mouvements HAMP (*Human Aware Motion Planner*) (présenté dans [11]) prend explicitement en compte la présence de l'homme. Ce planificateur se fonde sur l'outil Move3D [12] développé au LAAS-CNRS ; cette technologie a été transférée par la *start up* KinéoCam [13] dans le produit KineoWorks, leader mondial en planification de trajectoires (voir la figure 12).

HAMP génère des mouvements acceptables par l'homme, car ces mouvementsaturent le *jerk*, l'accélération et la vitesse ; en effet, il est montré que dans le contexte de l'interaction homme-robot, la sécurité est directement liée à la limitation de la vitesse, et le confort, à celle de l'accélération. Ces types de mouvements, souples dans l'espace cartésien, sont exploités par le robot pour donner des objets à l'homme (voir la figure 12). Les défis, dans ce domaine de la manipulation, sont nombreux : la préhension dextre, fondée sur des mains anthropomorphiques, telles que les mains SCHUNK [14] qui équipent le robot Justin du DLR (voir la figure 5), doit permettre de réaliser des assemblages complexes.

La planification de trajectoires pour des systèmes robotiques ayant un très grand nombre de degrés de liberté, comme le robot Justin (voir la figure 13), est résolue si les modèles de l'environnement et des objets à manipuler sont connus à l'avance avec précision. Mais, pour prendre en compte l'incertain et l'imprécis, pour corriger une trajectoire planifiée hors ligne au moment de son exécution, il faut étudier des stratégies de planification réactive.

Cela est d'autant plus nécessaire si l'homme est « dans la boucle ». Le robot doit s'adapter à l'homme (et non l'inverse) : le système de perception et de décision embarqué sur le robot doit donc en permanence surveiller l'homme, et comprendre ses intentions afin d'y adapter le comportement du robot.

Un autre défi concerne la programmation de manipulations complexes par apprentissage interactif. Un opérateur peut facilement entrer une trajectoire dans la mémoire du robot en déplaçant physiquement le

bras KUKA LWR. Mais, au-delà de ce mode manuel, l'apprentissage par la démonstration ou par l'exemple permettrait à un robot d'apprendre la manière d'exécuter une tâche (assemblage, saisie...) en observant l'homme en train de la réaliser.

LE SYSTÈME DÉCISIONNEL

Perception-décision-action : tel est le triptyque de la robotique ! Nous ne développerons pas ici la problématique de l'architecture embarquée sur un robot, système complexe dans lequel les couches fonctionnelles (perception, exécution des actions) et décisionnelles communiquent entre elles en permanence. Différents modèles existent, depuis des robots totalement réactifs (*subsumption*) jusqu'aux robots doués de capacités autonomes. Le système embarqué sur le robot doit avoir une architecture qui garantisse à la fois la réactivité (asservissement, prise en compte d'imprévus) et le raisonnement en ligne (réviser les plans, interagir avec l'homme...). Willow Garage [3] a popularisé le *middleware* ROS (Robot Operating System) ; en France, Gostai [15] propose des outils spécifiques pour la programmation de robots.

De manière classique, un robot autonome intervenant dans un environnement non contrôlé doit planifier les tâches à exécuter à partir de représentations de l'espace, de son propre modèle et des actions qu'il peut exécuter. Un robot collaboratif doit aussi raisonner sur ces mêmes connaissances, mais ces représentations, ainsi que le plan à générer, sont partagées avec l'homme ; le cobot doit adopter un comportement acceptable par l'homme, donc un comportement qui soit

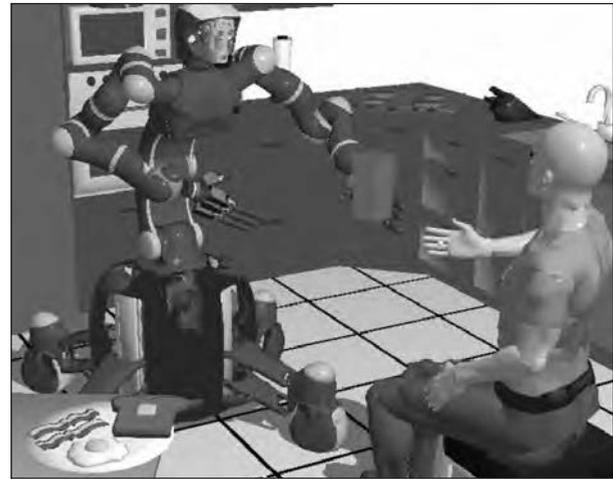


Figure 13 : Planification de mouvements complexes pour l'échange d'objets entre homme et robot (© CNRS)

compris par l'homme et qui respecte les conventions sociales usuelles. Surtout, il doit à tout instant adapter son propre comportement à celui de l'homme.

Afin de raisonner sur les connaissances sur l'espace et sur les tâches à réaliser à un niveau d'abstraction compatible avec l'interaction avec l'homme, de nombreuses recherches exploitent des ontologies afin de représenter l'ensemble des concepts décrivant exhaustivement le domaine dans lequel l'homme et le robot doivent intervenir : ces connaissances sont représentées par un réseau sémantique de concepts liés les uns aux autres par des relations hiérarchiques et sémantiques. Citons ici les travaux réalisés à Munich [16], en particulier le module KnowRob, qui est un système de gestion des connaissances pour un robot de service [17].

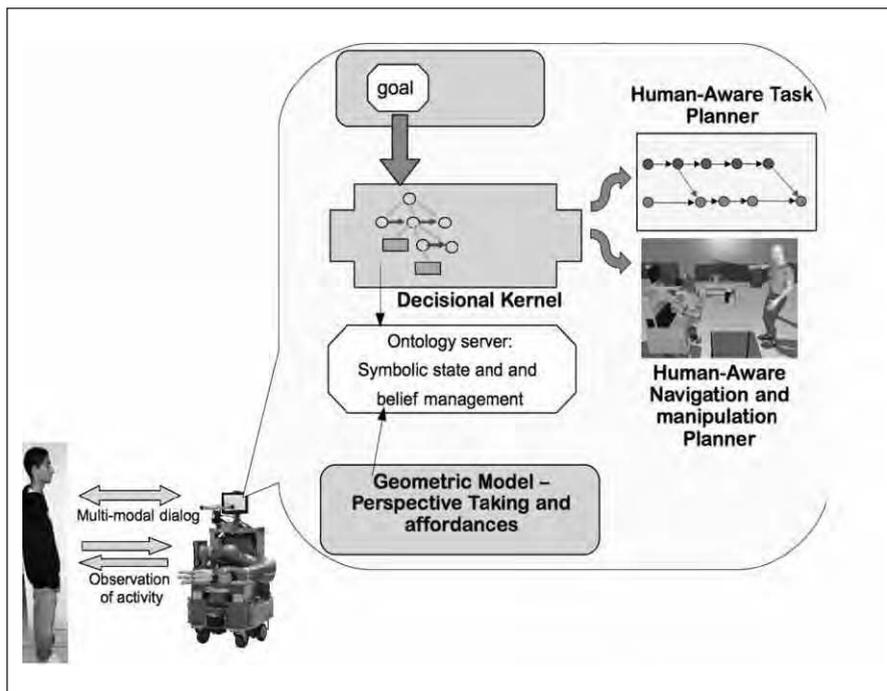


Figure 14 : Système décisionnel d'un cobot (© CNRS)

La figure 14 de la page précédente représente la structure du système décisionnel d'un robot collaboratif vue par l'équipe Robotique et interactions du LAAS-CNRS [18].

Lors de l'exécution du plan généré suite à ces raisonnements, le cobot doit donc détecter, suivre et comprendre les gestes, les actions et les activités qu'exécute l'homme afin de s'y adapter en permanence. L'homme doit rester maître de la cadence, du temps de cycle... et le robot doit, quant à lui, rester *friendly*, non menaçant, prévisible dans son action : il doit *comprendre* ce que l'homme fait.

LES PROJETS

La cobotique, ou robotique collaborative en milieu industriel, doit bénéficier de ces avancées rapides. Citons quelques projets dédiés à cette problématique. Le projet FP6 ROBOT@CWE (*Advanced robotic systems in future collaborative working environments*, 2007-2009) [19] a proposé un environnement permettant d'inclure des robots collaboratifs : les démonstrateurs étaient des robots humanoïdes.

En Europe, le projet FP7 DEXMART (*DEXterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation with smart sensory-motor skills*, 2008-2012)[20] a pour objectif de reproduire les capacités de manipulation des humains avec des systèmes robotiques dextres à deux bras. Le projet SAPHARI (*Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction*, 2012-2015) [21] devrait, quant à lui, étudier des interactions physiques intuitives et sûres entre humains et systèmes robotiques.

En France, le projet ANR ICARO (*Industrial Cooperative Assistant Robotics*, 2011-2014) [22] vise à développer des outils destinés à améliorer et à simplifier l'interaction des robots industriels avec les hommes et avec leur environnement. Il réunit des industriels (EADS IW, Peugeot-Citroën-Automobiles SA), des PME innovantes et des laboratoires.

Citons, enfin, le projet CAAMVIS (Contrôle Automatisé d'Assemblages Mécaniques par Vision artificielle) financé par la Région Midi-Pyrénées, qui a pour but le contrôle d'opérations manuelles d'assemblage à partir de capteurs embarqués sur un robot ; les capteurs permettent d'observer l'homme et les objets qu'il manipule. Le but sera de vérifier qu'un assemblage est correctement effectué par l'homme.

CONCLUSIONS

Nous avons décrit dans cet article quelques fonctionnalités développées récemment en robotique de service. Des évolutions rapides ont été possibles grâce à plusieurs éléments.

D'abord, les besoins sociétaux en matière de robotique de service en milieu humain, notamment pour l'assistance aux personnes âgées ou handicapées, ont permis de financer de nombreux projets. Ensuite, des innovations technologiques (micro-caméras, Kinect, RFID, intelligence ambiante...) développées pour d'autres marchés (téléphonie mobile, jeux) ont un impact important en robotique. Enfin, de nouveaux acteurs (Willow Garage, aux Etats-Unis [3], Aldebaran [1]...) se positionnent sur ce nouveau marché. En France, l'association Syrobo [23] vise à développer la robotique de service avec, en particulier, sa promotion à travers le salon Innorobo (Ndlr - Le prochain se tiendra à Lyon au mois de mars 2012).

Mais quelles sont les conditions du succès de la cobotique ? Au niveau technologique, la versatilité et l'auto-adaptabilité permettront au robot d'exécuter toute une gamme de tâches, pour cela le robot devra pouvoir reconnaître plus d'objets, il devra connaître davantage de trajectoires... Un aspect important concerne le temps réel, pour la réactivité, le respect du temps de cycle, et aussi pour éviter la complication de la logistique autour du robot : la réalisation de tâches robotiques « au défilé » en est une des conditions. Là encore, cela complique quelque peu la problématique. Au niveau humain, l'acceptabilité de la coaction homme-robot ne sera effective que si celle-ci apporte une plus-value, par rapport à une action purement manuelle. L'homme peut profiter de la force et de la précision du robot afin de limiter ses efforts, et réduire ainsi la pénibilité de ses tâches et limiter les troubles musculo-squelettiques (TMS) susceptibles de l'affecter. De son côté, le robot peut être plus robuste, plus facile à programmer, car l'homme peut lui apporter son expertise en matière de perception et de décision.

Enfin, au niveau économique, la robotique de service en milieu industriel doit respecter les contraintes industrielles : robustesse/fiabilité, temps de cycle, réduction des coûts, en particulier celui afférent à l'importance de la surface requise par les chaînes d'assemblage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Entreprise Aldebaran, sur la robotique humanoïde. <http://www.aldebaran-robotics.com>
- [2] Fraunhofer IPA et son robot Care-O-Bot. <http://www.care-o-bot.de/english/>
- [3] Entreprise Willow Garage, USA, sur la robotique de service. <http://www.willowgarage.com/>
- [4] Entreprise KUKA et son bras LWR. <http://www.kuka-robotics.com/en/products/addons/lwr>
- [5] Département *Robotics and Mechatronics* du DLR, et son robot Justin. <http://www.dlr.de/rm-neu/en/>

- [6] Projet ANR ASSIST (1^{er} juillet 2008 / 31 décembre 2012).
<http://www2.lirmm.fr/assist>
- [7] Equipe Inserm Robot Cognition Laboratory.
<http://pfdominey.perso.sfr.fr>
- [8] Département Parole et Cognition du GIPSA Lab.
<http://www.gipsa-lab.inpg.fr/index.php?id=334>
- [9] Entreprise Mesa.
<http://www.mesa-imaging.ch>
- [10] Entreprise Primesense, Israël, sur l'interaction gestuelle, Kinect.
<http://www.primesense.com>
- [11] E.A. Sisbot, L.F. Marin-Urias, X. Broquère, D. Sidobre & R. Alami, "Synthesizing Robot Motions Adapted to Human Presence", *International Journal of Social Robotics*, 2010.
- [12] T. Siméon, J-P. Laumond & F. Lamiroux, *Move3D : a generic platform for motion planning*, Proc. 4th Int. Symp. on Assembly and Task Planning, Japon, 2001.
- [13] Entreprise Kineo CAM, sur la planification de trajectoires.
www.kineocam.com
- [14] Entreprise Schunk, sur les préhenseurs dextres.
<http://www.schunk.com>
- [15] Entreprise Gostai, sur la programmation des robots.
www.gostai.com
- [16] Equipe *Intelligent Autonomous Systems Group* du TUM, Allemagne.
<http://ias.cs.tum.edu>
- [17] M. Tenorth & M. Beetz, *KnowRob: Knowledge Processing for Autonomous Personal Robots*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St.Louis, MO, 2009, pp. 4261-4266.
- [18] Equipe Robotique et Interactions du LAAS-CNRS.
<http://www.laas.fr/RIS/>
- [19] Projet FP6 Robot@cwe, IST-2005-2.5.9.
http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=PROJ_ICT&ACTION=D&CAT=PROJ&RCN=80174
- [20] Projet FP7 DEXMART, ICT-216239.
<http://www.dexmart.eu>
- [21] Projet FP7 SAPHARI.
<http://www.saphari.eu/>
- [22] Projet ANR ICARO.
<http://www2.lirmm.fr/icaro>
- [23] Association Syrobo, salon Innorobo.
<http://www.syrobo.org>
<http://www.syrobo.org>

Des robots humanoïdes multi-applications : le Nao et ses successeurs

Si les robots industriels ont fait leur apparition dans les années 1950 aux Etats-Unis (avec pour finalité l'optimisation de la production), la robotique au service de l'homme apparaît au Japon, dans les années 1980, en réponse au vieillissement de la population de ce pays.

L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima a réaffirmé le besoin de disposer de machines ayant les capacités de mobilité et d'agilité de l'homme, sans en présenter la fragilité.

Le robot au service de l'homme exige de relever plusieurs défis : maîtriser l'interaction entre le robot et l'homme, développer l'agilité du robot, sa capacité à percevoir et à analyser son environnement, et surtout garantir la sécurité des humains évoluant à proximité.

Un ensemble de défis qui ne pourront être relevés qu'avec le développement de partenariats entre le monde de l'industrie et celui de la recherche, avec pour objectif de passer du stade de la fabrication de prototypes robotiques à celui d'une véritable industrie de la robotique de service.

Par Bruno MAISONNIER*

INTRODUCTION

Aldebaran Robotics est une entreprise française qui a été créée en 2005 avec, pour objectif, la production de robots humanoïdes destinés à évoluer à nos côtés. En 2008, le robot Nao a vu le jour. C'est un petit humanoïde de 57 centimètres de hauteur doté de vingt-cinq articulations commandées par un ordinateur embarqué exploitant tous les capteurs qui donne au robot la vue, l'audition et le sens du toucher. Le Nao

est aujourd'hui vendu à des laboratoires et à des universités, où il est utilisé comme support de recherche et d'enseignement. Plus de 1 500 exemplaires du Nao ont déjà été vendus dans le monde entier (même au Japon, un pays pourtant connu pour son avance dans le domaine de la robotique). Mais pour Aldebaran ce marché académique n'est qu'un tremplin vers d'autres marchés professionnels, puis vers le grand public. En 2010, le géant américain Intel est entré au capital

* Aldebaran Robotics.



Figure 1 : Nao, le robot humanoïde produit par Aldebaran Robotics.

d'Aldebaran pour l'accompagner sur ce chemin vers la large diffusion de la robotique (voir la figure 1).

Dans cet article, nous présenterons les raisons qui ont amené Aldebaran à se lancer dans l'aventure de la robotique humanoïde, les services qu'elle peut selon nous rendre et les étapes à franchir pour que la robotique devienne un secteur aussi important que ceux de l'automobile, de l'aéronautique, de l'informatique ou des télécommunications.

POURQUOI DES ROBOTS HUMANOÏDES ?

Si c'est aux Etats-Unis que les robots industriels ont fait leur apparition dès les années 1950 (dans des

usines pour en optimiser la production), ce sont les Japonais qui, les premiers, ont envisagés sérieusement, dès les années 1980, d'utiliser les robots pour aider les personnes dans leur vie quotidienne. En raison du vieillissement de sa population, le Japon s'est retrouvé devant deux besoins incontournables : 1) s'occuper de personnes âgées de plus en plus nombreuses et 2) trouver un moyen de compenser la diminution de la main-d'œuvre disponible. Plutôt que d'encourager une politique nataliste ou l'immigration, les Japonais ont décidé d'investir dans la recherche en robotique, mais une robotique plus proche de l'homme que celle imaginée aux Etats-Unis : une robotique au service de tous. Le vieillissement de la population étant au Japon une cause nationale, les investissements en recherche ont été énormes dans ce pays, et on en voit aujourd'hui les résultats, avec des démonstrations toujours plus spectaculaires des robots humanoïdes que sont le HRP2 et le HRP4 (de Kawada Industries), le Partner (de Toyota) et, surtout, le célèbre Asimo (de Honda). Il est intéressant de constater que ces grands industriels qui démontrent leur savoir-faire technologique avec ces robots humanoïdes sont issus de secteurs « traditionnels » (Kawada est un groupe œuvrant dans le secteur du bâtiment et des travaux public, quant à Toyota et Honda, on ne les présente plus...) et pour lesquels la robotique n'est pas leur cœur de métier et encore moins, la principale source de revenus (voir la figure 2).

Mais l'Europe, de manière générale, et la France, en particulier, n'ont pas ignoré les capacités et l'intérêt de la robotique. Dès les années 1980, le projet fédérateur ARA, dans lequel on retrouvait notamment le CNRS et le CEA, visait à développer des robots pour l'assistance aux personnes handicapées. Mais ce marché étant (heureusement, ou malheureusement) bien moins important que celui des personnes âgées iden-

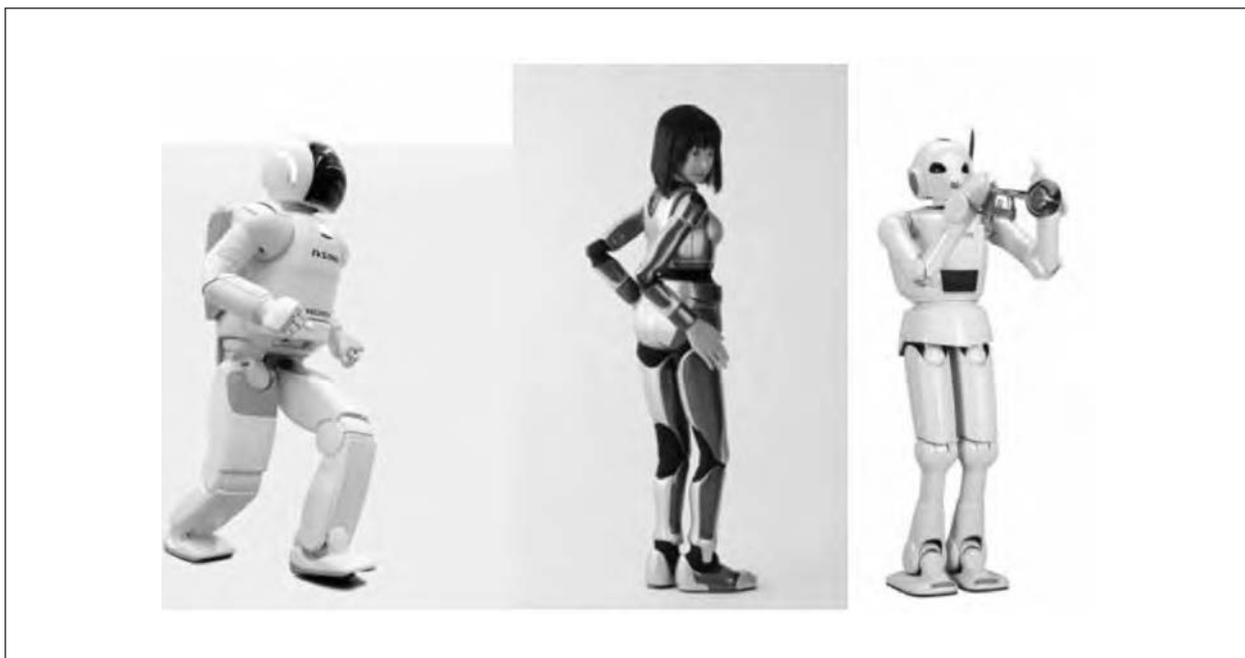


Figure 2 : Des robots humanoïdes japonais : Asimo (de Honda), HRP4 (de Kawada) et Partner (de Toyota).

tifié par les Japonais, ces développements y ont été plus confidentiels qu'au Japon, mais ils n'en ont pas été pour autant d'une qualité moindre. A titre d'exemple, il faut noter que dès le milieu des années 1990, les Japonais sont venus chercher des compétences robotiques en France en créant le JRL (*Joint Robotics Laboratory*) entre l'AIIST (Institut National de la Science et des Technologies Avancées du Japon) et le CNRS.

Aujourd'hui, le problème du vieillissement de leur population a rattrapé tous les pays industrialisés, et même si nos cultures occidentales sont peut-être *a priori* un peu moins enclines à faire confiance à des machines que la culture japonaise, les spécialistes du domaine envisagent le robot comme une solution raisonnable pour améliorer les conditions de vie des personnes en situation de perte d'autonomie.

Le choix de la forme humanoïde s'impose tout naturellement pour ses composantes supérieures. La tête est tout de suite identifiée comme l'organe principal pour la communication avec le robot : l'utilisateur sait où sont les oreilles et les yeux du robot, cela va l'amener à focaliser sa parole et ses gestes au plus près des capteurs du robot. Les bras fixés sur un torse qui supporte la tête permettent au robot une interaction naturelle avec l'environnement conçu pour l'humain, et dans lequel il va devoir évoluer. La question des jambes, et plus particulièrement la locomotion sur deux jambes, est plus délicate. Les jambes ne sont pas la seule solution pour que les bras et la tête soient à la bonne hauteur ou pour que le robot ait une apparence conforme aux canons esthétiques humains : on peut très bien imaginer un torse fixé au dessus d'une longue jupe, qui dissimulerait des roues. C'est sans doute la capacité de franchir des obstacles qui est l'argument le plus rationnel du choix fait d'un déplacement du robot sur deux jambes : pour franchir un escalier, pour enjamber un obstacle, pour monter dans un véhicule, les jambes sont en effet, quand on sait les commander, une excellente solution. Mais le problème, et donc une partie de la réponse, réside précisément dans la commande. La locomotion sur deux jambes est très difficile à réaliser et c'est d'ailleurs pour cette raison que de nombreux chercheurs se sont intéressés à la marche des robots. Ils cherchaient à mieux comprendre comment l'homme faisait pour piloter ce système de deux membres parallèles et donc naturellement instables auquel des millions d'années d'évolution nous ont amenés, alors que nous n'étions finalement pas si mal que cela, à quatre pattes, pour peu que l'on ait pu se redresser de temps en temps pour utiliser nos mains.

LES APPLICATIONS

Quand vous êtes fabricant de robots (de robots humanoïdes, en particulier), la première question que l'on

vous pose est celle-ci : « Alors, qu'est-ce qu'il sait faire, ton robot ? ». On s'en sort par une pirouette en disant qu'il sait marcher, manipuler des objets, écouter ce qu'on lui dit, répondre aux questions qu'on lui pose et reconnaître les objets qu'on lui montre. Mais, au fond, on sait que ce n'était pas le sens de la question initiale. La vraie question est de savoir à quoi sert notre robot, comment peut-il rendre service aux gens. Celui qui aura une bonne réponse à cette question envahira le monde de ses robots. C'est d'ailleurs ce qu'a fait iRobot avec son robot aspirateur Roomba, en disant : « Mon robot, il passe l'aspirateur chez toi quand tu n'es pas là ». Résultat : des millions de robots vendus dans le monde entier. Mais, heureusement, si la question est unique, les réponses sont multiples et dépendent de la forme du robot. Nous allons en présenter ici quelques-unes, qu'Aldebaran a identifiées comme appropriées à ses robots.

L'edutainment

Un robot humanoïde, en général (le Nao, en particulier, avec ses dimensions de bébé et ses grands yeux colorés), attire instantanément la sympathie et l'envie de communiquer. Rares sont les gens qui, voyant un Nao pour la première fois, résistent à l'envie de lui faire un signe de la main en lui disant « Bonjour, Nao ! ». C'est un objet avec lequel l'envie d'interagir vient spontanément, et comme avec un enfant, un des modes d'interaction le plus spontané est le jeu. C'est la culture de nos vingt dernières années qui nous fait voir, en regardant un ordinateur (même éteint), la possibilité de jouer. Mais c'est un réflexe beaucoup plus ancien qui donne envie de jouer avec un Nao dès la première rencontre. Le Nao et ses successeurs seront donc attendus comme des compagnons de jeu, comme un chien auquel on lance une balle pour se changer les idées. On jouera aux devinettes avec le Nao, on lui lancera des objets ou on lui demandera d'en retrouver d'autres que l'on aura cachés. Mais derrière ces distractions futiles, on trouvera toute la puissance d'un objet connecté qui a accès à tout le savoir disponible sur les disques durs de la maison et sur les bases de données d'Internet. Le Nao peut passer en un clin d'œil du rôle d'animal domestique à celui de camarade de classe qui va aider l'enfant à penser à faire ses devoirs, à l'interroger sur la leçon du lendemain et à trouver sur le Web les explications qui lui manquent. Sa forme humanoïde permet une incarnation très forte de ce rôle de compagnon et autorisera pour une machine un comportement que l'on n'attend pas spontanément : si un ordinateur sur lequel l'enfant est en train de jouer au jeu vidéo s'interrompt pour afficher un message rappelant qu'il est temps de faire ses devoirs, cela sera interprété comme un *bug* ou une fenêtre publicitaire de plus. Mais si Nao vient arrêter le jeu et dit, en regardant l'enfant : « Et si l'on tra-



Figure 3 : La fascination des enfants pour Nao.

vaillait un petit peu, maintenant ? », la transition sera plus aisée. Enfin, la mobilité du robot lui permettra d'aller chercher l'enfant devant le poste de télévision pour lui rappeler qu'il a quelque chose à faire (voir la figure 3).

L'assistance à la personne

L'application domestique que nous venons de décrire ne rencontrera son marché que lorsque la technologie aura encore fait quelques progrès, dont nous parlerons plus tard, mais surtout quand elle sera accessible à un prix compatible avec le service rendu. L'évaluation de ce ratio entre le prix et le service rendu est la question essentielle, pour les fabricants de robots de service. iRobot a montré que 300 € est le prix que des millions de gens sont prêts à payer pour se débarrasser presque complètement de la corvée d'aspirateur. Et les concurrents qui ont essayé de produire des robots aspirateurs plus sophistiqués pour un prix se situant aux alentours de 1 000 € s'y sont cassé les dents. La distraction et l'éducation d'un enfant n'ont pas de prix, mais nous savons déjà que, pour le plus grand nombre, un robot ludo-éducatif à 12 000 € (le prix actuel du Nao) risque d'être aussi mal reçu par le public qu'un aspirateur au prix de 1 000 €. Mais pour certains enfants aux besoins très spécifiques, comme ceux atteints de certaines formes d'autisme, le Nao s'est déjà révélé un très bon intermédiaire entre l'enfant et le reste du monde, et les institutions spécialisées manifestent une forte attente pour les solutions que nous pourrions leur proposer en la matière.

Cela dit, pour commencer à vendre ces robots à d'autres que des passionnés, des chercheurs et des enseignants, il faut trouver des applications dans lesquelles le robot rendra un service quantifiable pour lequel le modèle économique justifiera la dépense de quelques milliers d'euros, en attendant que la technologie et la dimension du marché permettent une baisse drastique des prix de vente.

Dès les premières démonstrations publiques du Nao, Aldebaran a été sollicité pour faire de son petit robot une attraction lors d'événements de prestige. La première grande apparition publique du Nao a été l'Exposition universelle de Shanghai, en 2010, où vingt Naos dansaient ensemble devant des millions de visiteurs. Les équipes d'Aldebaran ont développé un savoir-faire qui leur permet d'offrir des prestations chorégraphiques de ces robots à des entreprises souhaitant afficher la haute technologie comme l'une de leurs valeurs importantes. Si ces chorégraphies sont spectaculaires, elles n'illustrent qu'une infime partie des capacités du Nao, qui a été conçu pour l'interaction, et pas seulement pour l'affichage. Le Nao, en présence du public, peut donc non seulement danser, mais aussi parler aux visiteurs, leur donner des informations sur l'endroit où ils se trouvent et répondre à leurs questions. C'est une application d'accueil et de guide qui a déjà été identifiée il y a une dizaine d'années pour des robots de service plus conventionnels (des bases mobiles montées sur roues et équipées d'un écran d'affichage), et à laquelle le Nao se prête très bien : les visiteurs s'approchent naturellement du Nao pour le voir, ce qui lui permet de capter leur attention et de leur être utile, quand un objet roulant d'assez grande dimension peut être pris pour un élément de

mobilier, ou pour un appareil de nettoyage oublié dans un couloir. Le Nao, et (surtout) ses successeurs de plus grande taille, pourront alors accompagner les visiteurs vers les lieux objets de leur recherche. Pour une institution qui reçoit beaucoup de public, le service rendu et l'impact en termes d'image justifieront rapidement l'achat d'un robot pouvant coûter plusieurs milliers d'euros.

D'autres types d'établissements accueillant du public ont montré leur intérêt pour des assistants robotisés : les hôpitaux, les maisons de retraite et autres centres de rééducation voient parfaitement en quoi un robot capable de se déplacer de façon autonome, de transporter des objets et de communiquer simplement avec le plus grand nombre pourra leur être utile. Devant la contraction des moyens en personnel et l'augmentation de leur patientèle, tous les intervenants du domaine de la santé s'accordent à dire qu'un coup de main robotisé sera le bienvenu. Des chariots autonomes distribuent déjà les médicaments aux patients, dans certains hôpitaux : l'utilisation de robots humanoïdes à cette fin augmentera l'offre de service puisque leur forme incitera davantage le patient à engager un dialogue et à formuler des requêtes simples (besoin d'un verre d'eau, d'une couverture), que le robot pourra soit satisfaire lui-même soit transmettre à une personne autorisée. Là encore, les institutions concernées arriveront à faire financer des investissements plus importants que des particuliers, car le service rendu et l'amélioration de la condition de leurs hôtes seront facilement évaluables.

Quand un robot aura appris à rendre des services à une personne âgée ou handicapée placée dans une

institution, il aura rapidement la capacité de rendre les mêmes types de services à domicile. L'évolution doit porter sur plusieurs domaines : il ne s'agira plus de rendre quelques services à un nombre important de personnes, mais de rendre de nombreux services à une seule personne ; l'environnement dans lequel le robot évoluera sera moins formaté et les contraintes financières seront plus fortes. Néanmoins, toutes les discussions que nous avons eues avec des sociétés d'assurances qui fournissent des services de téléassistance ou de télésurveillance, ont montré que ces sociétés sont capables d'estimer le coût d'une présence humaine auprès d'une personne en situation de perte d'autonomie, et donc le coût acceptable pour un robot rendant une partie des services qu'elle attend. Ces chiffres sont peu divulgués, mais on peut d'ores et déjà dire que l'utilisation de robots d'assistance à la personne à domicile sera bientôt rentable (voir la figure 4).

A côté de ces marchés de l'assistance à la personne au quotidien, le recours à la robotique pour remplacer l'homme dans des tâches pénibles (voire dangereuses) reste toujours une demande forte de la société. Le récent accident de la centrale nucléaire de Fukushima a ramené au premier plan le besoin de machines ayant les capacités de mobilité et d'agilité d'un homme, sans en présenter la fragilité. Si des robots américains à chenilles ont finalement été utilisés pour inspecter les bâtiments accidentés, le monde entier s'est demandé pourquoi les fameux robots humanoïdes japonais, que nous avons cités plus haut, n'ont pas pu faire ce travail. Il se trouve qu'aujourd'hui, la locomotion des robots sur deux jambes ne permet pas le déplacement sur des sols



Figure 4 : Nao, le futur compagnon des personnes âgées vivant chez elles ?

aussi irréguliers que ceux que présentent les sites post-accidentels ou même leurs abords. En outre, les niveaux de radiation seraient sans doute assez destructeurs pour l'électronique et les capteurs à hautes performances utilisés sur ces robots. Néanmoins, à moyen terme, il sera demandé aux robots humanoïdes d'intervenir sur ce type de sites ayant subi un accident ou une catastrophe, ou sur des opérations de déminage, c'est-à-dire dans les cas où l'on veut exposer le moins possible la vie d'êtres humains mais où la morphologie humanoïde reste la plus appropriée. C'est donc là aussi un des marchés auxquels Aldebaran souhaitera apporter une réponse un jour.

LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES DE LA ROBOTIQUE HUMANOÏDE

Les domaines technologiques concernés

Pour répondre aux attentes des applications que nous venons de présenter, les robots au service des hommes devront s'appuyer sur des technologies incontournables dont les premières briques sont déjà disponibles, mais dont les autres doivent encore progresser, grâce aux efforts des industriels et des chercheurs.

Le premier défi, celui qui permettra au robot d'être accepté par les humains, est celui de l'interaction entre l'homme et le robot. Il est indispensable qu'un robot appelé à vivre au milieu de nous soit capable de nous percevoir, de comprendre nos paroles, nos gestes et nos intentions, pour s'y adapter, nous obéir et faire ce que nous attendons de lui. Le visiteur que nous citons tout à l'heure, et qui disait : « Bonjour Nao ! », en lui faisant un signe de la main est toujours un peu déçu quand Nao ne lui répond pas en faisant de même simplement parce que le visiteur n'était pas exactement en face de la caméra ou parce qu'il était en contre-jour, et qu'il n'avait donc pas été détecté, ou encore parce que sa voix, trop distante des « oreilles » de Nao, a été noyée dans le bruit ambiant. Une fois ce niveau initial de contact obtenu de façon robuste, tous les développements en termes de dialogue et d'intelligence artificielle qui sont intervenus ces dernières années pour des applications de services sur Internet pourront être intégrées au robot, qui deviendra aussitôt un interlocuteur avec lequel la communication sera d'une grande simplicité et qui pourrait même devenir, tels R2D2 et C3PO, les robots du film *La Guerre des étoiles*, les intermédiaires entre l'homme et tous les objets communicants qui l'entourent.

Le second défi est celui de l'agilité. Si vous demandez à quelqu'un de se déplacer à la manière d'un robot, il adoptera des gestes saccadés, lents, peu précis et, somme toute, assez effrayants. Si cette image est tou-

jours assez réaliste, ce n'est pas une fatalité et les dernières démonstrations d'Asimo ou encore les danses du HRP4 montrent qu'un robot peut avoir des gestes gracieux, précis, rapides et rassurants. Mais pour atteindre de telles performances sur des robots diffusés en grand nombre, il va falloir réaliser des progrès dans la conception mécatronique des robots, dans la conception des moteurs qui les animent, ainsi que dans celle des capteurs qui les contrôlent. Les concepteurs de robots éprouvent une fascination empreinte de jalousie pour les muscles des êtres vivants, qui sont capables, pour un encombrement limité, d'offrir aussi bien de la vitesse que de l'effort, de la rigidité et de la souplesse, cela, sans dégager trop de chaleur et sans requérir une source d'énergie trop encombrante ou trop bruyante. Les moteurs électriques tournent vite, mais sans délivrer beaucoup de puissance. Des actionneurs pneumatiques peuvent être rapides et délivrer du couple, mais ils sont bruyants et difficiles à piloter avec précision. Les actionneurs hydrauliques présentent, quant à eux, bien des qualités pour délivrer des efforts importants et de grandes vitesses de déplacement, mais leurs sources d'énergie sont encore plus encombrantes que les batteries électriques, qui sont elles-mêmes une contrainte forte pour l'autonomie des robots. Mais réaliser des gestes rapides, précis et souples, cela ne suffit pas à donner de l'agilité à un robot : il faut encore que celui-ci soit capable de percevoir le monde qui l'entoure et d'y adapter ses mouvements.

C'est l'objet du dernier défi que nous citerons, celui de la perception de l'environnement. La différence entre un beau sportif et un grand sportif, c'est la capacité du second à adapter des gestes répétés des milliers de fois à l'entraînement dans des conditions idéales au cas particulier qui va survenir en compétition : un ballon qui rebondit un peu trop loin du pied avant le shoot ou une balle qui arrive trop près du corps pour être frappée correctement avec la raquette. Pour le robot, tous les gestes qu'il a appris doivent être effectués dans des conditions particulières : l'anse de la tasse à saisir n'est pas tournée dans le bon sens, une bouteille empêche de saisir le verre sur la table, il y a une personne sur le chemin de la porte à atteindre. Pour s'adapter à tous ces cas particuliers, le robot doit en permanence être capable d'analyser son environnement, de le comprendre et de modifier ses gestes en conséquence. Cette perception en temps réel d'un monde qui ne fait rien pour l'aider à réaliser sa mission est une spécificité du robot de service, par rapport à toutes les autres machines automatiques qui évoluent généralement dans des environnements adaptés à leurs contraintes.

Comment répondre à ces défis

Face à ces défis, Nao présente déjà quelques atouts sérieux : il est doté d'une reconnaissance de la parole

qui lui permet de comprendre ce qu'on lui dit (ou tout au moins de transcrire sous forme textuelle les mots prononcés à proximité de ses micros), de détecter et reconnaître un visage (pour peu que l'on se soit placé devant ses caméras et que l'éclairage soit de bonne qualité). Il est capable de marcher en suivant un objet qu'il aura détecté devant lui grâce à sa caméra et d'éviter ainsi les obstacles qui se dresseront devant lui. Tous les éléments sont donc là, mais avec une robustesse dans la réaction qui reste à être améliorée. Dès que le sol n'est pas rigoureusement plat, Nao a du mal à garder son équilibre. Si on lui parle d'un peu loin ou s'il y a du bruit autour de lui, il ne comprend plus ce qu'on lui dit. Et sa réaction à des événements inattendus reste assez lente : il n'est pas capable de se rattraper, si on le bouscule un peu fortement.

Le nouveau processeur installé dans la tête de Nao et ses nouvelles caméras vont permettre d'améliorer les performances actuelles de ce petit robot, mais des sauts « quantiques » restent à faire en termes d'interprétation de l'environnement et de l'interaction homme-machine, de commande des moteurs et de performances d'actionnement.

Aldebaran restera une entreprise innovante et ses ingénieurs continueront de rechercher des solutions nouvelles et originales pour relever les défis technologiques à venir, mais elle sait que la robotique est une technologie trop « intégrative » pour que tous les domaines concernés soient entièrement traités en interne. Que ce soit dans les domaines de l'interaction homme-machine, de la perception de l'environnement, de la commande et de l'actionnement, des chercheurs du monde entier explorent de nouvelles pistes, proposent de nouvelles solutions et obtiennent de meilleures performances. Aldebaran doit aller chercher ces compétences dans les laboratoires français, européens et même mondiaux, pour se doter d'un avantage concurrentiel avant que le marché de la robotique de service ne s'ouvre à la compétition internationale.

Mais il faudra aussi aller chercher l'innovation chez d'autres industriels : chez les fabricants de capteurs, de processeurs, de moteurs, de matériaux et de batteries. Aujourd'hui, la robotique doit rechercher chez ces industriels fournisseurs ceux de leurs produits qui s'adaptent le mieux aux besoins de la robotique. Mais notre objectif est de faire en sorte que le marché de la robotique devienne si important qu'il puisse dicter ses besoins spécifiques à ses fournisseurs. C'est le nouveau paradigme qu'il faudra mettre en place pour que la robotique prenne son envol : la robotique deviendra un donneur d'ordres vis-à-vis de ses équipementiers (pour reprendre la terminologie automobile) et abandonnera sa place actuelle de client consommant des produits sur étagère qui ne lui convienne pas parfaitement.

Enfin, il faudra que Nao grandisse pour pouvoir rendre des services pratiques à ses utilisateurs, comme

prendre des objets sur une table, ouvrir une porte, déplacer des objets qui encombreront le passage, ou monter des escaliers. Avec le changement de taille, un nouveau type de défi apparaîtra, celui de la sécurité. Si Nao, avec ses 57 centimètres, ne présente pas le moindre danger, un robot de plus d'un mètre de hauteur, doté de moteurs lui permettant de se déplacer et d'interagir avec les objets du quotidien, représentera un risque de collision en cas de gestes mal maîtrisés ou de chute qui rendra les enjeux d'interaction homme-machine, de perception de l'environnement et d'agilité mentionnés plus haut encore plus importants. Dans le cadre du projet FUI Romeo, Aldebaran travaille avec une douzaine de partenaires industriels et académiques au développement d'un robot humanoïde de grande taille destiné à l'assistance à la personne (voir la figure 5 de la page suivante).

UN NOUVEAU SECTEUR D'ACTIVITÉ

Opportunité pour la France et l'Europe

Les chiffres de la Fédération internationale de la robotique (IFR) sont très clairs : le marché de la robotique de service doit se développer, pour faire de ce secteur d'activité l'équivalent de celui de l'automobile ou de l'informatique personnelle. Là où il y a plus de flou, c'est sur la date à laquelle ce secteur tiendra ses promesses. Comme lors d'un sprint, dans une course de vélo, il ne faut pas démarrer trop tôt, mais il ne faut surtout pas démarrer trop tard. C'est ce qu'a estimé Aldebaran en lançant le sprint en 2005. Comme en matière de cyclisme, pour lancer le sprint, il ne faut pas être seul contre tous. En France, Aldebaran a rejoint une communauté de chercheurs en robotique regroupant des équipes du CNRS, du CEA et de l'INRIA (une communauté qui comme nous l'avons mentionné plus haut jouit d'une reconnaissance internationale). Ces équipes de recherche ont donné naissance à des PME, comme Wany Robotics et Robosoft, qui, depuis les années 1980 et 1990, entretenaient une activité robotique industrielle à la française aux côtés d'entreprises de plus grande taille, comme ECA et Cybernétix. A l'échelle de l'Europe aussi, Aldebaran a rejoint une communauté de chercheurs et d'industriels qui bénéficient d'un fort soutien de la part des instances européennes, lesquelles, depuis plus de vingt ans, soutiennent la recherche et l'industrie robotique. Il en résulte que la France et l'Europe ont tout à fait une place à prendre dans le peloton qui va se battre pour accéder au marché de la robotique de service, sans avoir à redouter les grosses équipes américaines et asiatiques (qui ont, il ne faut pas le nier, de belles cartes en main, mais pas autant d'avance que l'on



Figure 5 : Romeo : un assistant robotique à domicile.

pourrait le craindre). Aujourd'hui, Aldebaran est d'ailleurs le leader mondial de la robotique humanoïde et vend ses robots aux universités japonaises.

Passer de l'artisanat à l'industrie

Pour aller plus loin, Aldebaran (et avec lui toute la filière robotique) doit tourner la page de la fabrication de prototypes robotiques pour se lancer dans une véritable industrie de la robotique de service. C'est le pari que nous avons fait, en réalisant les investissements nécessaires pour produire des robots humanoïdes en série et atteindre des prix de vente certes encore élevés pour le marché grand public, mais tout à fait acceptables pour les marchés professionnels que sont la recherche et l'enseignement. Et il faut aller encore plus loin pour faire émerger le nouveau paradigme évoqué plus haut, celui d'une industrie exprimant ses besoins à des sous-traitants qui fourniront des composants de meilleure qualité, au meilleur prix. La fia-

bilité des robots étant une composante essentielle pour leur acceptation par le marché, des normes de qualité devront être adoptées tant au niveau de leur conception mécatronique que de leur conception logicielle. La production de robots ne devra plus être uniquement une activité de passionnés et de créatifs géniaux mais devra devenir aussi une activité de professionnels méthodiques traquant les coûts et les défauts dès la conception des robots. En marge de cette industrie de fabrication de robots se développera également une industrie de la création de contenus robotiques, à l'instar de ce qui se passe avec l'industrie des jeux vidéos, qui est née avec celle des PC portables ou avec celle des applications pour Smartphones. Aldebaran produira des applications qui tourneront sur ses robots. Mais il faudra que tout un écosystème de développeurs d'applications s'organise autour d'elle pour pouvoir répondre à toutes les attentes des futurs utilisateurs de robots. C'est à ce prix que la robotique de service se développera et qu'elle deviendra une industrie majeure du XXI^e siècle après avoir été le rêve du siècle passé.

L'insertion des robots dans la vie quotidienne (avec un focus sur les robots humanoïdes)

Cet article aborde le problème du déploiement de robots, en particulier de robots humanoïdes, à l'échelle du grand public. Jusqu'à présent, la robotique trouvait ses applications essentiellement dans les outils de production. Mais, depuis peu, elle investit le marché grand public, mettant à la portée de tout un chacun de véritables robots. Les potentialités sont énormes, mais des obstacles subsistent. Cet article présente les potentialités en question et examine les principaux défis à relever tant du point de vue technologique que des points de vue industriel et commercial.

Par Olivier LY* et Hugo GIMBERT**

ROBOTIQUE PERSONNELLE – ROBOTIQUE HUMANOÏDE

La robotique personnelle

L'introduction de robots dans la vie quotidienne relève de la robotique dite personnelle, qui se définit par opposition à la robotique dite industrielle. Il s'agit de donner à l'homme un accès aux technologies robotiques pour que celles-ci l'assistent et l'aident dans la vie de tous les jours et de mettre ainsi à la disposition de tout un chacun des machines dotées d'un appareil sensorimoteur permettant la locomotion et/ou la manipulation, associé à un système de décision auto-

nome. Le robot dépasse le stade d'outil de production et devient une machine destinée à l'utilisateur final. Au vu du marché potentiel, le déploiement à grande échelle de robots parmi les hommes comporte non seulement un enjeu économique considérable, mais aussi des changements profonds d'ordre sociétal. Aujourd'hui, nombre de robots sont d'ores et déjà déployés à grande échelle. Ainsi, les voitures sont dotées progressivement de systèmes automatisés assistant l'homme dans la conduite, en l'occurrence des régulateurs de vitesse ou encore des systèmes de guidage facilitant le parcage des véhicules. Dans le monde de la recherche, les technologies de véhicules autonomes dont la conduite est totalement

* LaBRI - Université de Bordeaux / INRIA Flowers.

** LaBRI - CNRS.



© Coll. IM/KHARBINE-TAPABOR

« La conception de robots humanoïdes s'inscrit dans la continuité d'un rêve ancestral qui fascine l'homme depuis l'apparition des premiers automates, ceux de Vaucanson, au XVIII^e siècle, voire ceux de Léonard de Vinci, au XVI^e siècle. » *"Le joueur de galoubet, le canard et le joueur de tambour", pièces automatiques construites par Vaucanson, gravures in "Histoire des jouets" par Henri-René d'Allemagne, vers 1900.*

automatisée sont d'ores et déjà opérationnelles (comme les « Google Cars » autorisées à la circulation dans l'Etat du Nevada [30]). Dans un autre domaine, les avions de ligne peuvent aujourd'hui être qualifiés de robots du fait de leur caractère autonome. Mentionnons également les robots d'entretien autonomes, en particulier les robots-aspirateurs, qui sont depuis peu des produits communs distribués à grande échelle.

Dans l'avenir, nombre de tâches robotisées sont envisageables : entretien, manutention, assistance à la personne, surveillance, conduite, sauvetage, etc. ; cela, aussi bien dans un cadre quotidien qu'en milieu hostile (comme, par exemple, les sites de catastrophes).

La robotique humanoïde

La *robotique* humanoïde se caractérise, quant à elle, par une morphologie du robot similaire (ou partiellement similaire) à celle de l'homme. Un robot humanoïde est généralement doté d'un grand nombre de degrés de liberté lui conférant un champ d'action très étendu. La conception de robots humanoïdes s'inscrit dans la continuité d'un rêve ancestral qui fascine l'homme depuis l'apparition des premiers automates,

ceux de Vaucanson, au XVIII^e siècle, voire ceux de Léonard de Vinci, au XVI^e siècle (voir [1] [2]). Les robots humanoïdes sont apparus il y a une quarantaine d'années (probablement avec le Wabot-1, en 1973). Depuis, de nombreux projets ont vu le jour. On peut mentionner les plus connus, comme l'Asimo (*Advanced Step in Innovative MObility*) [7] [8] [9] de la société Honda ou encore le Hubo 2/KHR-4 ([11]), des robots capables de courir ; Lola[13], ou encore le robot ICub [14], création d'un consortium européen. Mentionnons également Sarcos [17] ou Petman [4] reposant sur une technologie hydraulique, ou Justin ([26]), des robots contrôlés en force ou, enfin, l'androïde HRP-4C [6] [12], dernier-né de la série produite par la plateforme de recherche japonaise HRP (*Humanoid Robotics Project*) conçue par l'Institut public Japonais des technologies industrielles avancées (AIST).

Les robots humanoïdes s'inscrivent tout naturellement dans la perspective de la robotique personnelle :

- leurs possibilités d'action très diverses ajoutées à la locomotion permettent d'envisager la réalisation d'un grand nombre de tâches assumées par la même plateforme, tout comme le ferait l'homme. Ce caractère multitâches est d'autant plus à souligner qu'il implique un rapport plus favorable entre le coût et le service rendu ;

- leur morphologie les rend *a priori* plus adaptés aux infrastructures conçues pour l'homme et, par conséquent, leur déploiement ne nécessite aucune adaptation de l'environnement ;

- enfin, avec eux, l'interaction entre l'homme et le robot est plus naturelle.

Bien qu'une des caractéristiques attendues d'un robot humanoïde soit un déplacement bipède, la notion de robot humanoïde doit être comprise de manière plus générale : par exemple, l'usage d'un bras robotique anthropomorphe, ou encore d'une main ressemblant à une main humaine, pour la préhension, relève typiquement de la robotique humanoïde (voir, par exemple, le robot Justin [26]).

Dans un autre domaine, la robotique humanoïde révolutionne le principe de la prothèse, avec le concept de l'exosquelette, qui permet d'étendre les capacités motrices de l'homme tant à des fins médicales que professionnelles (voir, par exemple, le bras robotisé Jaco, de la société Kinova). Ce domaine repose sur deux défis technologiques. Le premier est l'intégration du système robotique au corps humain. Différents modes sont envisagés, qui vont de la combinaison, dans laquelle l'utilisateur se glisse (voir, par exemple, [31]), jusqu'au bras robotisé qui permet à l'utilisateur d'étendre son champ d'action. Le second défi est la mise au point d'interfaces homme/machine

qui doivent être les plus directes et les plus naturelles possible. Le robot doit comprendre les mouvements de l'utilisateur pour les accompagner et les compléter. On imagine souvent cette interaction sur un mode physique où le robot capture directement les tensions des muscles de l'utilisateur *via* des capteurs cutanés, voire *via* des prothèses connectées aux terminaisons nerveuses (on parle alors de neuroprothèses).

Enfin, un certain nombre de recherches s'orientent vers l'utilisation de robots humanoïdes dans le champ des relations publiques, pour des applications d'accueil ou de divertissement (en anglais, *entertainment*). Ces robots, des *androïdes*, dont non seulement la morphologie, mais également l'apparence, sont extrêmement proches de celles de l'humain, incarnent, avant même d'être utiles, toute une mythologie issue de la science-fiction et ils exercent de fait une très forte fascination, positive comme négative. Le robot HRP-4C [6] [12] en est une belle illustration. Le projet Amio [3] pousse plus avant encore ces idées en recherchant la mise au point d'algorithmes décryptant les émotions humaines en vue de permettre au robot d'accéder à une communication non verbale avec son utilisateur. Mentionnons également les Geminoids, d'Hiroshi Ishiguro, dont le plus célèbre est une réplique exacte de lui-même (voir, par exemple, le Geminoid F [27]).



© Hitoshi Yamada/ANDIA

« Dans un autre domaine, la robotique humanoïde révolutionne le principe de la prothèse, avec le concept de l'exosquelette, qui permet d'étendre les capacités motrices de l'homme tant à des fins médicales que professionnelles. » *Home Care and Rehabilitation Exhibition (HCR), Tokyo (Japon), septembre 2010.*

LES DÉFIS À RELEVER

Un robot est un système *réactif*. Il reçoit de l'information de son environnement *via* ses capteurs (accéléromètre, gyroscope, vision, etc.), et adapte - en temps réel - son comportement en fonction de cet environnement. Les actions d'un robot peuvent se stratifier selon deux niveaux : d'abord, au niveau moteur, le robot adapte continuellement et continument ses *primitives motrices* (c'est-à-dire ses mouvements) à l'environnement tel qu'il le perçoit : c'est la boucle de rétroaction sensorimotrice. Ensuite, au niveau (plus abstrait) de la prise de décision symbolique, il doit adapter l'enchaînement de ses actions (ses stratégies) à la configuration de l'environnement. L'analyse symbolique permet à une machine de savoir communiquer et appréhender son environnement, et ses facultés motrices lui permettent d'agir (locomotion, préhension).

Une connaissance partielle de l'environnement

La perception qu'a le robot de son environnement est en général *partielle* et *incomplète*. Typiquement, le calcul d'une position absolue, à partir d'un gyroscope électronique qui fournit la vitesse de rotation instantanée, est incertain : en s'accumulant, le bruit du capteur produit une dérive qui entraîne une erreur non négligeable sur le résultat.

De même, la vision met en œuvre des processus de segmentation de l'image dont l'efficacité et la pertinence peuvent être détériorées dans des conditions exceptionnelles ou en présence d'éléments visuels inattendus. A cela s'ajoutent les délais de traitement, qui peuvent être importants (en particulier, pour l'analyse des images).

Un robot s'appuie habituellement sur une connaissance *a priori* de l'environnement, ainsi que sur celle de lui-même, un *modèle* dont il se sert et qu'il adapte à la réalité de ses observations. Ce modèle peut lui-même être partiel, mais il peut néanmoins permettre au robot de s'appuyer sur un certain nombre d'hypothèses. Par exemple, savoir que le sol est plat ou non est une information primordiale pour sa locomotion. En général, un robot opérant sur une chaîne de production dispose d'un modèle précis de son environnement. Il connaît la géométrie, les événements probables pouvant survenir, la géométrie exacte des objets à manipuler, etc. Ainsi, sa conception peut se concentrer sur la précision, l'efficacité énergétique ou la rapidité d'exécution.

A cet égard, le cadre de la robotique personnelle comporte des difficultés d'un type nouveau :

- *L'environnement n'est pas, a priori, adapté au robot.* Cela contraste avec le cadre d'un processus de production dans lequel le concepteur a, dans une certai-

ne mesure, la latitude d'adapter l'environnement (la chaîne de montage, typiquement) à l'usage du robot.

- *L'environnement est a priori inconnu.*

En effet, le déploiement de robots dans les maisons individuelles, sur des chantiers ou sur d'autres sites d'opération où la présence des robots n'était pas prévue implique une connaissance *a priori* de l'environnement qui est encore extrêmement parcellaire au moment de la conception du robot. Le caractère multitâches d'un robot humanoïde accroît d'autant plus la complexité de ce problème.

Il en résulte que la compréhension du monde dans lequel le robot évolue est difficile pour lui. Pourtant, appréhender une tâche pour la mener à bien est une action qui repose en général pour beaucoup sur cette compréhension. Par exemple, la capacité à reconnaître et à distinguer les objets qui composent l'environnement est souvent nécessaire. On peut imaginer aisément la difficulté de cette opération si l'on songe à la variabilité des objets du quotidien. Les formes que peuvent prendre une chaise ou un fauteuil, par exemple, sont nombreuses et variées. Le concept même d'objet est difficile à définir ; il nécessite d'inclure des éléments abstraits, comme, par exemple, le fait pour un fauteuil d'« être susceptible de soutenir un homme assis ». Ainsi, reconnaître et classifier les différents objets de son environnement sont d'ores et déjà des problèmes difficiles pour le robot.

Cependant, les stratégies de compréhension de l'environnement se sont considérablement développées au cours de la dernière décennie. En particulier, des progrès importants ont été réalisés en matière de segmentation d'images. On voit ainsi, par exemple, des appareils photo capables de distinguer les visages, lors de la mise au point automatique, en s'appuyant sur un système embarqué à ressources limitées. Par ailleurs, très récemment, les technologies de vision en trois dimensions (3D) ont enregistré des avancées très significatives, et elles se sont, dans le même temps, démocratisées (la Kinect, par exemple, est aujourd'hui disponible pour une centaine d'euros). Ces technologies très récentes simplifient considérablement le problème. Et l'on peut espérer de nombreuses avancées dans l'analyse de ces images 3D dans un futur très proche [28], avancées qui se traduiront directement par des performances accrues des robots personnels.

La robotique personnelle doit faire preuve d'une robustesse plus importante au regard des incertitudes et de la variabilité de l'environnement. Ainsi, un robot personnel doit être doué d'une faculté d'adaptation très développée. Celle-ci se décline aux deux niveaux précédemment décrits : moteur et symbolique.

L'apprentissage

Les animaux, de manière générale, et en particulier les êtres humains, possèdent une capacité remarquable à

apprendre et à adapter rapidement leurs facultés, notamment motrices, à de nouvelles conditions. La locomotion en est un exemple saisissant : son apprentissage rapide eu égard à la difficulté du problème posé, l'adaptation à toutes natures de sols, le réapprentissage, en cas de problème physique (comme, par exemple, après une entorse). Cette faculté d'apprendre est une source naturelle d'inspiration pour la robotique en ceci qu'elle constitue l'un des atouts essentiels des êtres vivants.

Si les règles et conditions des prises de décisions symboliques (comme celle de choisir une tâche à effectuer en fonction d'un objectif donné) peuvent être typiquement spécifiées de manière exhaustive par les concepteurs d'un robot, la mise en œuvre de ces décisions ne peut être que grossièrement esquissée *a priori*, car il existe tout un *continuum* de conditions environnementales dans lesquelles le robot devra réaliser avec efficacité des actions.

Les concepteurs d'un robot humanoïde peuvent être tentés d'analyser eux-mêmes, *ex-ante*, ce *continuum* de conditions pour fixer de manière définitive les modes opératoires du robot. Mais dans le cadre de la robotique personnelle, cette démarche se heurte rapidement à la variabilité très importante de l'environnement. Au niveau moteur, comme on peut facilement l'imaginer, cette barrière est encore plus importante.

Cette analyse doit donc être complétée par des mécanismes d'adaptation mis en œuvre tout au long du cycle de vie du robot (en particulier après son déploiement). Notons que ces mécanismes doivent par conséquent être autonomes ou, en tout cas, qu'ils ne peuvent s'appuyer que sur des utilisateurs finaux n'ayant *a priori* aucune connaissance technique.

Dans les cas les plus favorables, l'optimisation des comportements (moteurs ou décisionnels) du robot sera suffisante : il effectuera ses tâches de mieux en mieux, mais il sera opérationnel dès sa mise en service, comme l'est aujourd'hui un aspirateur automatique. Mais dès lors que des tâches plus complexes sont envisagées, la variabilité de l'environnement est telle que des processus d'apprentissage plus complexes peuvent s'avérer nécessaires. Un robot de service opérant dans une maison individuelle (par exemple, pour y effectuer du rangement) devra apprendre avant toute chose la configuration des lieux : il pourra le faire avec l'aide de l'utilisateur ou bien seul, mais il ne pourra en aucun cas s'appuyer sur ses concepteurs. Il devra donc mettre en œuvre un processus d'apprentissage s'appuyant, la plupart du temps, sur des méthodes nécessitant un processus d'essais et d'erreurs.

Un robot autonome peut également être guidé par son utilisateur. Dans ce cadre, le développement d'une interface homme/robot qui soit à la portée de tous est l'une des clés de la démocratisation des robots humanoïdes et de leur insertion dans le quotidien.

L'interaction homme/machine nécessite des capacités d'analyse symbolique, un aspect crucial dans le cadre de la robotique personnelle (et en particulier humanoïde) où le mode de communication canonique est la communication orale et visuelle.

Alors que la reconnaissance des gestes et son utilisation dans les interfaces hommes/machines sont des technologies émergentes (Wii, Kinect, domotique) mais déjà opérationnelles, la communication orale est un des vieux démons de l'informatique (voir le test de Turing et le Prix Loebner). Des méthodes statistiques (voir, par exemple, [29]) ont mis à la portée des machines des tâches linguistiques avancées (telles que la traduction automatique), et elles représentent un premier pas vers une communication orale fluide entre un robot et un être humain.

Par ailleurs, pour les apprentissages moteurs, l'interaction physique entre le robot et l'utilisateur est très prometteuse (l'interface la plus naturelle pour l'apprentissage de mouvements est d'ailleurs la manipulation directe du robot par son utilisateur).

La locomotion

La locomotion est un point essentiel de la robotique, et plus encore dans le cadre de la robotique personnelle où elle est un pré-requis à la réalisation de nombreuses tâches.

Les roues ou les chenilles offrent des solutions éprouvées dans le cas d'un terrain plat (dans un appartement, par exemple) ou peu accidenté. Elles rendent possible la conception de plateformes d'ores et déjà opérationnelles dans le quotidien (par exemple, pour les tâches d'entretien).

Ces solutions deviennent cependant moins adaptées en présence d'obstacles, que ce soit sur un site accidenté après une catastrophe, ou simplement dans un cadre domestique (marches d'escalier, présence de petit mobilier). Des robots munis de jambes (ou de pattes), bipèdes, quadrupèdes ou hexapodes... peuvent alors être envisagés, cela d'autant plus que ce type de morphologie est davantage adapté aux infrastructures conçues par les humains. Cela soulève néanmoins des problèmes fondamentaux, de robustesse et d'équilibre. D'importants progrès ont été accomplis durant les trois dernières décennies (voire, par exemple, [16] [9] [8] [15] [19]). Cependant, le problème de la bipédie n'a pas encore été complètement résolu : *aucun robot bipède n'a jusqu'à présent atteint la robustesse, l'agilité et la fluidité de l'être humain.*

L'étude de ce problème fascinant est très active aujourd'hui et suscite l'exploration de nombreuses pistes nouvelles, que ce soit dans le contrôle et la planification, les techniques basées sur le « *Zero Moment Point* » [9] [15] ou sur le « *virtual leg* » [3] [4], ou encore, dans la mécatronique, avec le contrôle en



© Jastrow/LOOK AT SCIENCES

« Des robots munis de jambes (ou de pattes), bipèdes, quadrupèdes ou hexapodes... peuvent alors être envisagés, cela d'autant plus que ce type de morphologie est davantage adapté aux infrastructures conçues par les humains ». *Maquette du véhicule lunaire de l'Agence Spatiale Européenne, un véhicule inspiré de la marche à huit pattes d'une araignée, Salon international du Bourget, 2007.*

force [17] [25], mais aussi dans le domaine de l'apprentissage, ou encore dans celui de la morphologie. L'explication de ces différentes méthodes excède le cadre de cet article ; remarquons néanmoins que l'exploration de nouvelles structures basées sur des *matériaux souples et/ou flexibles* est elle aussi très prometteuse. Un exemple intéressant en est le robot RHEX [21]. Ce robot n'emploie pas de roue ni de pattes. Son déplacement repose sur des membres flexibles accumulant et restituant l'énergie, tout en absorbant les perturbations. Une idée importante de ce type de conception est de laisser une partie du contrôle à la structure mécanique elle-même, laquelle, de par sa flexibilité et sa souplesse, s'adapte directement à l'environnement. L'inspiration est toujours biologique, mais, cette fois-ci, elle provient des insectes. Il en résulte un robot extrêmement robuste dans ses déplacements. Mais, dans le même temps, cela complexifie les algorithmes de contrôle, qui doivent prendre en compte la déformation de la structure, une déformation qui n'est contrôlée qu'indirectement. Cette idée de déformation non contrôlée est poussée encore plus avant par le concept des *robots passifs*. Il s'agit en fait de mécanismes sans motorisation dont les mouvements sont engendrés uniquement par la force de gravité. Malgré leur apparente simplicité, leur conception produit des démarches saisissantes de réalisme [18].

La préhension

On attend d'un robot de service qu'il se charge de la réalisation de tâches quotidiennes. A la maison, il pourrait se charger de l'entretien, du rangement, voire de certaines réparations ; sur un chantier, il peut s'occuper de la manipulation de matériaux lourds ou de tâches répétitives ou pénibles. Ces tâches reposent sur la *préhension*, la faculté de saisir et manipuler des objets (qui est également une question centrale pour la robotique), qui se décline en deux problèmes : la conception mécanique de stratégies de préhension et leur mise au point.

Planifier une stratégie de préhension d'un objet donné est un problème difficile, notamment à cause de la variabilité des objets à manipuler, et donc de la difficulté à les représenter (voir, par exemple, [19]). D'autre part, la conception d'une main ou d'une pince efficace est un problème mécanique difficile eu égard à la complexité mécatronique intrinsèque et à des dimensions souvent réduites (degrés de liberté nombreux, nécessité d'une force importante, mais aussi d'une dextérité et d'une finesse tactile très développées). Les progrès sont également importants dans ce domaine. On peut mentionner, entre autres, de nouveaux procédés de conception basés sur des matériaux nouveaux, comme le plastique modelable (voir

le robot ECCE [20]). Enfin, l'analyse et la compréhension de l'environnement sont des points cruciaux de la préhension, et les avancées récentes en matière d'imagerie 3D laissent augurer des progrès très significatifs, dans un futur proche.

Les aspects industriel et commercial

La robotique au quotidien est également *un grand défi industriel*. La maîtrise des coûts de production d'un robot est un obstacle important au développement massif de la robotique personnelle, qui implique des coûts abordables à l'échelle de l'individu.

Ces dernières années, le développement extraordinaire du marché de la téléphonie mobile a permis une baisse très significative des coûts de matériels autrefois inaccessibles (capteurs, systèmes embarqués, etc.), ainsi que les progrès accomplis dans le domaine de l'énergie (en particulier dans celui des batteries), de la miniaturisation des systèmes embarqués et de leur puissance de calcul, en perpétuelle augmentation.

Mais la robotique repose également sur la motorisation et la mécatronique, ainsi que sur une mécanique de précision. Ces éléments sont encore très onéreux, et ils le sont d'autant plus pour la robotique humanoïde, du fait du haut niveau de complexité mécanique requis.

Cependant, il devient possible d'abaisser le niveau de précision et de puissance ; ainsi, depuis peu, apparaissent des robots extrêmement sophistiqués pour des coûts de moins en moins importants (comme les robots Nao [23], Darwin OP [22] ou encore Acroban [24]). Sans pour autant s'être démocratisés, ils ouvrent actuellement deux segments de marchés intéressants qui touchent au grand public : le marché de l'éducation et celui de la robotique de loisirs. La robotique, en général, et les robots humanoïdes, en particulier, couvrent un très large spectre de connaissances et de savoir-faire allant d'une ingénierie mécanique très concrète à l'intelligence artificielle la plus abstraite. Les robots précédemment cités sont aujourd'hui de par leur prix accessibles aux établissements éducatifs non nécessairement spécialisés en robotique. Le second marché actif aujourd'hui est celui des passionnés : comparable à celui du modélisme, il se développe de façon très significative, comme en atteste le succès de compétitions, telle Robo-One, en Asie [25].

Au niveau du grand public, il faut mentionner le succès très important des aspirateurs et des tondeuses autonomes, comme par exemple le robot Roomba. On peut également observer, dans le domaine du jouet, l'apparition (à des prix extrêmement bas) de produits disposant de l'infrastructure propre aux robots (mécatronique, capteurs, unité de calcul).

L'exemple des jouets robotisés est important ; il démontre, en effet, la faisabilité industrielle du déploiement à l'échelle du « grand public » de véritables robots autonomes.

Le second obstacle au déploiement « grand public » de robots personnels est la *sûreté de leur fonctionnement*. Comme nous l'avons vu précédemment, le robot personnel opère sur la base d'une information partielle sur son environnement. La sûreté de son fonctionnement en est d'autant plus difficile à assurer. Il y a aussi probablement un facteur psychologique qui fait qu'en information partielle, la décision humaine est bien mieux admise qu'un processus automatisé, sur la base notamment du concept commun « d'intuition ». Pourtant, des technologies basées sur l'adaptation et l'apprentissage impliquent souvent l'occurrence d'erreurs qui ne sont pas des défaillances, mais plutôt des étapes dans l'optimisation d'une tâche. Cette variabilité de la sûreté de fonctionnement est un frein important au développement de la robotique « grand public » (par exemple, dans le domaine des transports).

Cependant, certains domaines d'application peuvent accepter cette variabilité. C'est notamment le cas du domaine agricole, par exemple, ou le coût d'erreurs de fonctionnement lors des phases d'apprentissage est acceptable, car la mesure d'efficacité est plutôt d'ordre quantitatif et s'évalue sur le long terme. C'est également le cas du marché de l'*Entertainment*, dont l'essor est très important ces dernières années.

Notons également que les robots humanoïdes (mais également le concept d'apprentissage, lorsqu'il est appliqué aux machines) suscitent en général une certaine fascination, qui peut être soit positive soit négative ; une fascination portée par toute une culture, notamment à travers la science-fiction. Pour le marché ludique, il est évident que cela favorise le développement commercial. Mais dans le domaine du service, l'impact de cet état de fait est plus difficile à évaluer.

CONCLUSION

La robotique a toujours suscité une fascination importante auprès du grand public. Le cinéma, depuis les années 1960, confirme très régulièrement cet intérêt intrinsèque. Mais il aura fallu des dizaines d'années pour mettre de véritables robots à la portée du grand public. C'est, depuis peu, le cas, et l'on observe aujourd'hui une certaine effervescence autour de la robotique personnelle, et de la robotique humanoïde, également, même si les robots réellement accessibles au public restent aujourd'hui extrêmement simples.

Sur le plan technologique, il subsiste encore des obstacles réels, et la robotique pose de nombreux défis scientifiques et techniques. Par conséquent, les capa-

cités des robots « grand public » resteront dans l'imédiat limitées et l'équation qui mettra en relation de véritables robots et des attentes (parfois fantasmagiques) des consommateurs est une des inconnues de ce marché naissant. Cependant, de récentes avancées permettent d'être optimistes, car elles laissent augurer de l'apparition prochaine de robots de service multitâches réellement utiles, et déployés à grande échelle.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jacques de Vaucanson, *Le Mécanisme du flûteur automate, présenté à Messieurs de l'Académie royale des sciences*, 1738.
- [2] Jean-Claude Heudin, *Les Créatures artificielles : Des automates aux mondes virtuels*, 2008.
- [3] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter & the Big-Dog Team, "Bigdog, the rough-terrain quadruped robot," Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, 2008.
- [4] The Petman Humanoid Robot. Boston Dynamics. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/stunning-video-of-boston-dynamics-petman-humanoid>
- [5] Hyun Seung Yang, Il Woong Jeong, Yeong Nam Chae, Gi Il Kwon & Yong-Ho Seo, *Developing New Abilities for Humanoid Robots with a Wearable Interface*, Humanoid Robots, Ben Choi Editor, InTech, 2009.
- [6] Kenji Kaneko, Fumio Kanehiro, Mitsuharu Morisawa, Tokuo Tsuji, Kanako Miura, Shinichiro Nakaoka, Shuuji Kajita & Kazuhito Yokoi, Hardware Improvement of Cybernetic Human HRP-4C for Entertainment Use, in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, 2011.
- [7] K. Hirai, "Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 500-508, 1997.
- [8] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa & T. Takanaka, "The development of Honda humanoid robot", in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998.
- [9] K. Nishiwaki and S. Kagami, "High frequency walking pattern generation based on preview control of zmp", in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2006.
- [10] M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka & K. Hirai, "Development of Humanoid Robot ASIMO", Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop2, 29 octobre 2001.
- [11] B. K. Cho, S. S. Park and J. H. Oh, "Controllers for Running in the Humanoid Robot, HUBO", Proc. IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots, pp. 385-390, 2009.
- [12] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka & S. Kajita, "Cybernetic Human HRP-4C", Proc. IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots, pp. 7-14, 2009.
- [13] S. Lohmeier, T. Buschmann & H. Ulbrich, "Humanoid Robot LOLA", Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 775-780, 2009.
- [14] Giorgio Metta, Giulio Sandini, David Vernon, Lorenzo Natale & Francesco Nori, The iCub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition, Proc. of 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS'08), New York, 2008.
- [15] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi & H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point", In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, 2003.
- [16] P.-B. Wieber, "Trajectory Free Linear Model Predictive Control for Stable Walking in the Presence of Strong Perturbations", in Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, vol. 25:4, 2006, pp. 137-142.
- [17] B. J. Stephens and C. G. Atkeson, "Dynamic Balance Force Control for Compliant Humanoid Robots", in Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010.
- [18] Collins S. H., Ruina A. L., Tedrake R. & Wisse M. (2005), "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers", Science, 307, pp. 1082-1085.
- [19] Sébastien Dalibard, Alireza Nakhaei, Florent Lamiraux & Jean-Paul Laumond, "Manipulation of Documented Objects by a Walking Humanoid Robot", in Proc. of 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Nashville, 2010.
- [20] HG. Marques, M. Jäntschi, S. Wittmeier, C. Alessandro, O. Holland, C. Alessandro, A. Diamond, M. Lungarella & R. Knight (2010), "ECCE1: the first of a series of anthropomorphic musculoskeletal upper torsos", in Proceedings of Humanoids'2010, Paris.
- [21] U. Saranlı, M. Buehler & D. E. Koditschek, "RHEx: A simple and highly mobile robot", *International Journal of Robotics Research*, 20(7): pp. 616-631, July 2001.
- [22] Muecke K. & Hong D., "DARwIn's Evolution: Development of a Humanoid Robot", IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems, San Diego, CA, 29 octobre – 2 novembre 2007.
- [23] *The NAO Humanoid Robot*, Aldebaran robotics. www.aldebaran-robotics.com
- [24] O. Ly, M. Lapeyre & P.-Y. Oudeyer, "Bio-Inspired Vertebral Column, Compliance and Semi-Passive Dynamics in a Lightweight Humanoid Robot", in proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on

Intelligent Robots and Systems (IROS'2011), San Francisco, 2011.

[25] The ROBO-ONE biped robot entertainment competition. www.robo-one.com

[26] C. Borst, T. Wimböck, F. Schmidt, M. Fuchs, B. Brunner, F. Zacharias, P. Robuffo Giordano, R. Konietschke, W. Sepp, S. Fuchs, C. Rink, A. Albu-Schäffer & G. Hirzinger, "Rollin' Justin - Mobile Platform with Variable Base", in Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, 2009, ICRA'09.

[27] Hiroshi Ishiguro: Studies on Humanlike Robots - Humanoid, Android and Geminoid, SIMPAR 2008:2.

[28] The Point Cloud Library. <http://pointclouds.org>

[29] F. J. Och & H. Ney, "The Alignment Template Approach to Statistical Machine Translation", Computational Linguistics, 30(4), pp. 417-449.

[30] « La Google Car, le rêve d'une voiture sans conducteur », Journal *Le Monde*, 10 octobre 2010.

[31] Top 5 DARPA Technology Projects of 2010. www.networkworld.com/community/node/57992

Vivre avec des robots : *designer* la relation

DES NOUVEAUX CONCEPTS
DE LA ROBOTIQUE
AUX USAGES INNOVANTS

Plus que des objets techniques, les « robjets » (contraction de « robot » et d'« objet ») témoignent d'une nouvelle dimension, une dimension sociale où les objets sont porteurs de comportements et non plus seulement de fonctionnalités.

Le robjet devient un acteur « intelligent » de la relation non seulement à l'homme, mais aussi aux autres objets.

Dans ce nouvel environnement, le *designer* aura la responsabilité majeure de penser les robots de demain dans le cadre de situations de vie, de repenser le « vivre ensemble ». Tout l'enjeu pour le *designer* est d'arriver à une insertion sociale réussie des robots.

Par Dominique SCIAMMA*

UN MONDE DE ROBOTS

Que l'on demande à un enfant ou à un prospectiviste chevronné d'imaginer le futur, soyez sûr qu'il le peuplera inmanquablement de robots. Ainsi, que nous soyons guidés par l'imagination ou la raison, que nous soyons rêveurs ou raisonneurs, que nous soyons jeunes ou mûrs, la figure du robot s'impose à notre imaginaire comme une évidence.

La raison en est simple : nous disposons aujourd'hui des technologies qui permettent de réaliser, sinon de « donner vie » à des figures mythologiques très anciennes, qui peuplent et structurent nos imaginaires. Dans son dernier ouvrage intitulé *Robots - Le mythe du Golem et la peur des machines*, Brigitte Munier (1) fait la démonstration que le robot n'est en effet que le dernier avatar de mythes bien plus anciens, comme ceux du Golem, de Prométhée et de Dom Juan.

Si la maîtrise des technologies – mécatronique, électronique, logiciel, Intelligence artificielle – est la condition nécessaire de l'émergence du robot, elle n'est en aucun cas celle de son insertion sociale.

L'imagination est comme d'habitude plus importante que la connaissance, comme le disait Albert Einstein. Là encore, si la figure du robot naît de l'imagination de Karel Čapek (2), en 1920, dans sa pièce *R.U.R.*, aucune science, et encore moins aucune technologie, n'était pourtant prête à cette date pour lui donner vie, ce qui ne l'empêcha pas d'en penser tant les usages que les conséquences.

Qu'on se le dise : notre vie future sera donc dépendante de robots qui peupleront nos espaces privé, public et professionnel. Il ne sera pas un moment de nos vies qui ne sera animé et servi par une créature artificielle, mais attentive. Cette perspective peut tout aussi bien être un rêve qu'un cauchemar, suivant que nous aurons pensé ou non les conditions de mise en œuvre d'un « vivre ensemble » radicalement différent.

* Directeur du Développement et de la Recherche, Directeur du Département « Systèmes et Objets Interactifs » Strate Collège. ds@stratecollege.fr

(1) *Robots - Le mythe du Golem et la peur des machines*, Brigitte Munier, Editions De La Différence, 2011.

(2) *RUR : Rossum's Universal Robots*, Carel Čapek, Minos, Editions De La Différence.

Aussi étrange que cela puisse paraître, ce « vivre ensemble » repensé dépend en grande partie du travail des *designers* et non pas de celui des seuls ingénieurs, et encore moins des seuls *marketteurs*. Et même si, au bout du compte, il revient aux acteurs politiques (du citoyen au responsable mandaté) de veiller à l'équilibre de ce vivre ensemble réinventé, le *designer* aura la responsabilité majeure de penser les robots de demain dans le cadre de situations de vie.

Cet article se propose donc d'expliquer comment les *designers* peuvent permettre de penser ces usages et, en conséquence (et c'est bien dans ce sens), de penser les objets qui les portent.

QU'EST-CE QU'UN DESIGNER ?

Mais, avant même de nous lancer dans cette démonstration, il nous semble tout d'abord nécessaire de définir ce que nous entendons par *designer* (3). Si cette précaution ne serait pas nécessaire dans un pays anglo-saxon, elle l'est dans un pays où les élites institutionnelles, industrielles, culturelles, à l'instar des médias, sont souvent ignorantes des réalités et des pratiques de ce métier.

Loïn d'être un décorateur, un esthéticien, un artiste, le *designer* est avant tout un analyste des situations de vie et un penseur de systèmes permettant d'y répondre. A la croisée de plusieurs disciplines (sciences humaines, ingénierie, *marketing*) et fort d'une expertise dans les techniques de représentation et de formalisation, et cela, toujours dans le cadre d'un système de valeurs humaniste, le *designer* contribue à la conception de services, de systèmes, d'objets censés faciliter et améliorer la vie de ses semblables.

Dans un monde qui se numérise de manière exponentielle, le rôle du *designer* est plus que jamais déterminant, car c'est lui qui pense l'interaction de l'homme avec les nouveaux systèmes rendus possibles par les nouvelles technologies de l'information et de la communication, les NTIC. Et parmi ces systèmes, les « robots » ne seront pas les moindres.

QU'EST-CE QU'UN ROBOT ?

Dans l'imaginaire collectif, le robot évoque immanquablement un être humanoïde ou au minimum un animal dont les formes, les comportements et les objectifs tendent à se rapprocher toujours plus du vivant. Quand ce n'est pas le corps tout entier qu'il s'agit d'évoquer, comme dans les cas des robots Nao ou Romeo (4) de la société Aldebaran Robotics, c'est d'une partie anatomique, comme le bras, la jambe, la main, le torse ou la tête, dont on tente de s'inspirer. Il est donc souvent difficile pour les concepteurs, et encore plus, pour le grand public, de se départir de

cette tentation de voir le robot comme une réplique mimétique, fût-elle partielle, du vivant.

Et pourtant, à n'en pas douter, ce qui caractérise le robot relève davantage de son rapport au monde qu'à ses formes. Comment ce rapport au monde se définit-il ?

Un robot peut être défini comme un système capable de percevoir des informations issues du monde ambiant, d'avoir une certaine représentation de ce monde, d'être capable de prendre des décisions dans le cadre de cette représentation, à partir des informations perçues, et d'agir dans ce monde. Ces informations comme ces actions peuvent être de nature très différente (mouvements, forces, sons, odeurs, images, compositions chimiques, lumière, *bits*, radio, etc.).

On l'admettra : rien dans cette définition n'induit une quelconque forme, et rien ne s'oppose dès lors à ce que l'on applique cette définition à n'importe quel objet de notre quotidien. Un meuble, une automobile, un tapis, un parapluie, un mur, une fenêtre, un jouet pourraient, chacun, être dotés de ces capacités de percevoir, représenter, décider et agir. Une telle perspective change radicalement la donne, tant au niveau de nos imaginaires que des opportunités industrielles.

VERS LES OBJETS

Ces objets, nous avons proposé de les appeler, dès 2008 (5), « objets vivants », ou encore « robjets » (contraction des deux mots « robot » et « objet ») dans la mesure où, d'un côté, ils reproduisent les caractéristiques du vivant (percevoir, décider, agir) et, de l'autre, ils représentent une généralisation des concepts de la robotique à toutes les catégories d'objets.

Bourrés de capteurs, ils seront capables d'entendre, de voir, de sentir, de mesurer. Dotés de moyens de calcul, ils sauront élaborer des décisions. Dotés d'actuateurs (c'est-à-dire des moyens leur permettant d'agir véritablement dans et sur le monde), ils seront à même de transformer ces décisions en actions. Connectés à des réseaux divers (de proximité, locaux ou globaux), ils pourront non seulement participer et accéder à la puissance du *cloud*, mais, surtout, constituer, au travers de ces réseaux, des super-systèmes dont les comportements seront les conséquences émergentes des collaborations entre leurs composants.

Parmi toutes ces nouvelles caractéristiques, cette dernière n'est sans aucun doute pas la moindre. Cela sera

(3) *Court traité du design*, Stéphane Vial, (2007).

(4) Romeo sur le Web : <http://www.projetromeo.com/>

(5) Le néologisme *robjet* est né lors d'une conférence donnée à la Cité des Sciences et de l'Industrie dans le contexte du projet RoboCité piloté par la FING (Fondation Internet Nouvelle Génération).

la première fois que le système d'objets d'une civilisation humaine pourra potentiellement constituer un réseau d'acteurs interconnectés dotés d'autonomie comportementale, un réseau donnant naissance à un « super-objet », matérialisant ainsi une émergence comportementale systémique potentielle.

Cette dimension systémique induit un changement majeur dans le rôle et dans la responsabilité du *designer*. Là où celle-ci n'était engagée que très localement, dans un système d'objets statiques et inertes, l'Internet des objets (qui est en fait l'Internet des « objets ») lui impose de penser la complexité, de la maîtriser et de la mettre au service d'usages innovants dans une interaction simple avec des objets complexes.

DESIGNER LES COMPORTEMENTS

Au-delà de son inscription dans un réseau complexe, le *design* d'un « objet » ne se résume pas à sa seule conception formelle. La sacro-sainte formule « la forme suit la fonction », qui a longtemps fait figure de leitmotiv d'un *design* au service d'une industrie de l'objet fonctionnel et répétitif (parce qu'un objet se confondait avec l'ensemble des fonctionnalités dont il était porteur), ne peut désormais plus être invoquée.

Ces objets vont devoir être vus comme porteurs de comportements, et non plus de seules fonctionnalités. C'est par leurs comportements que ces objets vont s'inscrire dans le monde et exister. Et c'est par leurs comportements qu'ils vont s'immiscer dans nos quotidiens et tisser de ce fait de véritables relations avec leurs interlocuteurs (et non plus avec leurs seuls « utilisateurs », un terme qui devient impropre à décrire leur nouvelle place dans le monde des hommes).

Ce changement de point de vue est fondamental parce qu'il modifie profondément la manière dont nous allons considérer les objets. Fondamental, ce changement l'est d'autant plus que ce sont *tous* les objets du quotidien, depuis la cuillère jusqu'au building, qui sont susceptibles de devenir intelligents en étant porteurs de comportements. C'est donc, à terme, tout le système des objets qui est susceptible d'effectuer ce saut quantique. Ce changement est aussi fondamental pour le *designer*, dans la mesure où les comportements, plus que les fonctionnalités, seront désormais le point d'entrée de ses pratiques professionnelles.

LA FORME N'EN EST PAS MORTE POUR AUTANT

La chose est donc entendue : plus que des objets techniques, les « objets » seront donc des objets sociaux. Si les défis technologiques sont réels, il est inutile de les relever si le *robjet* se voit rejeté par les

utilisateurs, leurs proches ou la communauté humaine dans son ensemble : c'est là tout l'enjeu de l'acceptabilité.

La prise en compte d'un ensemble de facteurs devra en assurer la réussite. Ces facteurs se traduiront dans la nature, le rythme et la forme des comportements des *robjets*, et, pour le dire métaphoriquement, par leur petite « musique ». Cette musique comportementale se construira aussi à l'aide de langages formels statiques et dynamiques.

En termes statiques, la nature et la qualité perçue des matériaux, des textures, des formes, ainsi que leurs articulations, mais aussi les éléments d'expression et de « *body language* » (langage corporel) seront déterminants dans la perception de cet « autre » qu'est le *robjet*, et donc de la relation qui se construira entre lui et l'être humain.

En termes dynamiques, c'est de l'expression du mouvement, de la chorégraphie corporelle (y compris, paradoxalement, dans ses immobilités), mais aussi de la qualité sonore du *robjet* que naîtront la confiance, voire l'indifférence, vis-à-vis de ce nouvel acteur social.

DE L'INTERACTION À LA RELATION

Pour autant, ces objets singuliers « conscients » de leur environnement et capables de prises d'initiatives, définis par leurs comportements, acceptés, sinon accueillis dans la société des hommes, ne peuvent pas (et ne doivent pas) être considérés comme des « super-interfaces » matérialisées et en mouvement.

Il y a en effet une propension coupable à vouloir faire de l'interface l'Alpha et l'Omega d'un *design* qui se dirait « numérique ». L'envahissement de notre quotidien par des objets digitaux (depuis le baladeur MP3 jusqu'à la télévision connectée, en passant par la console de jeux et le mobile), qui ne sont en fait, tous, que des avatars de l'ordinateur, pousse le grand public dans une forme de pensée en continuité avec ce qu'il connaît déjà, quand il s'agit d'imaginer l'avenir de l'objet. Dans le même temps, les *designers* voient l'interface comme le lieu par excellence de leur expression, que celle-ci se déploie sur un écran ou sur l'objet lui-même.

C'est que l'interface est l'expression moderne du levier, et plus généralement de l'outil de contrôle, et qu'il y a quelque chose de rassurant à penser que le monde est pilotable au travers de ces artifices. Le *robjet*, même s'il est, au bout du compte, à notre service, fait disparaître cette approche parce qu'il est un preneur d'initiatives capable d'agir sans qu'il soit besoin d'appuyer sur des boutons, de dérouler des menus et de choisir.

Si l'écran et ses avatars sont le lieu de l'interactivité - c'est-à-dire du contrôle sous dialogue - le *robjet* est, quant à lui, un des acteurs de la relation (à l'homme,



Photo 1 : Oboe

certes, mais aussi aux autres *robjets*). C'est même l'absence d'artifice de contrôle qui permet la construction de cette relation. La mise à distance physique, comme la prise d'initiative de l'objet, est donc la condition de la création de celle-ci.

TROIS EXEMPLES

Afin d'illustrer comment les *designers* de demain se saisiront des enjeux de la robotique étendue au *design* de *robjets*, quoi de mieux que de choisir trois projets (deux projets portés par des étudiants et un projet collaboratif) ?

Oboe

Oboe (6), conçu par Arnaud De Loustal en 2008, s'intéresse à la place du robot humanoïde dans une société japonaise qui a fait le choix de la technologie,

(6) <http://www.yankodesign.com/2008/07/16/be-immortal-thru-japanese-robots/>

(7) Moovi sur Youtube : <http://www.youtube.com/watch?v=eKAfpEWLkrU>

(8) Gregory Lebourdais est aujourd'hui associé de la *startup* EOS, qui conçoit et vend des robots de services (<http://www.eos-innovation.eu/eos>)

et des robots, en particulier, pour résoudre le problème de la dépendance et du vieillissement de sa population. En considérant comme acquis le fait que ces robots sauront être des serveurs attentionnés, Arnaud de Loustal s'intéresse explicitement, avec Oboe, à la relation entre la personne âgée et le robot, et plus généralement au robot comme médiateur entre les générations.

Plus qu'un serveur, Oboe est surtout un observateur attentif, un témoin, un confident qui va écouter et mémoriser les anecdotes, les souvenirs, que ceux-ci soient professionnels ou personnels. Il va aussi observer et mémoriser les gestes, les mouvements, les tics, la démarche qui caractérisent la personne qu'il sert. Il va emmagasiner dans son cœur (son *Kokoro*) l'ensemble de ces informations. Et au jour, inéluctable, du décès de son maître, le cœur du robot sera cloné et plongé dans autant de robots qu'il y aura de descendants consentant à les accueillir. Dans ces familles d'accueil, le robot pourra alors évoquer, gestes et voix à l'appui, les souvenirs, la mémoire, les mouvements, les gestes du disparu (voir la photo 1).

Moovi

Moovi (7), imaginé par Gregory Lebourdais (8) en 2009, est un système dédié à des thérapies innovantes de certaines formes de l'autisme. Certains autistes ont

en effet un réel problème d'appropriation et de contrôle de leur corps. Ils ont aussi une réelle difficulté à différencier le bruit de l'information quelle qu'en soit la nature (auditive ou visuelle).

Moovi est donc d'abord un petit robot qui peut être piloté par le seul mouvement de la main. Dans un premier temps, Moovi est placé à terre par le thérapeute et la personne autiste se contente de faire l'apprentissage des déplacements du petit robot au travers des mouvements de sa main, que ce dernier perçoit et interprète. Dans un second temps, le thérapeute va définir sur le sol des chemins contraints que la personne autiste va chercher à respecter, induisant ainsi chez celle-ci une certaine maîtrise de sa motricité fine. Moovi est aussi doté d'une caméra permettant de distinguer et de nommer des objets parmi d'autres, et ainsi de différencier le bruit né de la multitude des objets de l'information que représente l'objet visé (voir la photo 2).

Le Jardin des Amours : un système de mobiliers intelligents

Quand, en juin 2010, la Région Île-de-France et le Pôle de Compétitivité Cap Digital lancent leur appel à prototype technologique pour Futur en Seine 2011, Strate Collège a décidé de s'associer au Centre de robotique intégrée d'Île-de-France (CRIIF) (9) et au Cube (premier centre de création numérique créé en France) pour donner vie au « Jardin des Amours », un projet imaginé dès 2000 par Florent Aziosmanoff, directeur de la création du Cube et par ailleurs théoricien de l'art numérique (10).

Le Jardin des Amours est un ensemble de mobiliers urbains robotisés (une poubelle, un luminaire et un banc) autonomes et mobiles, capables d'évoluer libre-

ment, de se placer là où le public en a besoin, et permettant par ailleurs de délivrer des services numériques multiples. Capables de percevoir leur environnement au travers de capteurs (de distances, de présence) et de caméras, ces mobiliers disposent aussi de la capacité de s'exprimer non seulement au travers de leurs mouvements, mais également de diodes électroluminescentes et de musiques.

Ces mobiliers peuvent en permanence se répartir dans l'espace d'une manière optimale pour apporter le meilleur service aux usagers. Vivant au gré des relations avec ceux-ci, ils se disposent là où le public les attend, anticipant même au fil du temps les habitudes du lieu, s'écartant aux temps des circulations de pointe, se dispersant aux moments tranquilles, s'orientant au soleil les jours de fraîcheur, cherchant l'ombre en pleine chaleur. Chaque mobilier est porteur de services propres : le banc dispose d'un écran tactile permettant de jouer ou d'accéder à des services, tandis que le luminaire apporte ombre ou lumière. La poubelle, quant à elle, piste les papiers usagés, elle est même capable de vous sermonner si vous laissez tomber un papier par terre.

Si chacun des objets a sa propre personnalité et peut agir de façon autonome, ils sont aussi amenés à collaborer et à offrir des services complémentaires. Ainsi, alors que deux personnes sont assises sur le banc (peut-être sont-elles en train de jouer aux dames avec l'écran tactile intégré...), le luminaire peut détecter leur présence (reconnaissance de visages, grâce à sa caméra intégrée) ; il peut alors s'approcher et proposer de faire une photo de ce moment partagé. En cas de réponse orale positive,

(9) <http://www.criif.fr/>

(10) Florent Aziosmanoff, *Living Art. L'art numérique*, CNRS Editions, 2010.



Photo 2 : Moovi



Photo 3 : Le Jardin des Amours : un système de mobiliers intelligents

la photo est prise, envoyée à la poubelle, qui s'approche alors du banc, pour la délivrer, comme en tirant la langue ! (voir la photo 3).

Au-delà de cette seule dimension servicielle, l'objectif du Jardin des Amours était surtout d'investir la fonction dramatique des échanges avec le public et de donner un sens clair à la relation établie entre les mobiliers et le public.

Il s'agit donc de mettre en scène les enjeux relationnels entre l'homme et ces futurs *robjets* : il était absolument nécessaire que ceux-ci aient d'abord des relations entre eux, particulièrement au moment où l'on ne se sert pas d'eux. Florent Aziosmanoff a alors choisi de travailler sur les enjeux du théâtre de Marivaux, dans la mesure où ce dramaturge a su mieux que quiconque parler avec légèreté de ce qui fonde les relations humaines au quotidien, des relations qui régissent aussi les destinées : amours, confidences, jalousie, séduction, complot, alliances, hiérarchie, servitude ou révolte. Il y a là tous les ingrédients de la mise en abyme de nos propres relations avec nos contemporains, et de nos relations futures avec nos compagnons sensibles et attentionnés.

CONCLUSION

Si le robot doit peupler demain l'espace de nos vies, il doit donc devenir plus qu'un objet utile et fonctionnel, il doit devenir un compagnon. Mais pour qu'il puisse avoir un jour ce statut, il faudra amorcer une nouvelle révolution copernicienne qui pensera une nouvelle espèce d'objets en éveil et capables de prise d'initiative, connectés au monde, connectés entre eux, connectés à nos vies.

Les *designers* seront déterminants dans l'avènement de cette révolution copernicienne. Ils le seront parce qu'il leur reviendra de penser les situations de vie que ces objets induiront et serviront. Ils devront mettre toute leur expertise, leur sensibilité et leur technicité au service de la construction de la relation avec des objets avec lesquels nous partagerons de fait le monde.

Parce qu'ils sont naturellement les artisans d'un vivre ensemble sans cesse amélioré, les *designers* seront les artisans de ce monde partagé.

Les perspectives de la robotique dans le programme-cadre 2014-2020 de l'Union européenne (Horizon 2020)

Quelles priorités pour la France ?

Patrick Schouller et Frédéric Laurent, les deux représentants de la France au Comité de gestion de la thématique Technologies de l'Information et de la Communication du Programme-Cadre de Recherche et Développement Technologique, dressent dans cet article un aperçu de ce qu'a été l'approche européenne en matière de recherche sur la robotique et de ce qu'il faut espérer voir figurer comme thèmes dans le prochain programme de recherche européen Horizon 2020.

Par Patrick SCHOULLER* et Frédéric LAURENT**

LA ROBOTIQUE, UNE PRÉOCCUPATION EUROPÉENNE DE LONGUE DATE...

Dès le lancement de ses premiers programmes-cadres de recherche et de développement technologique (PCRDT), l'Union européenne a apporté un soutien à la recherche et au développement de la robotique. Cependant, si, initialement, cet effort portait plutôt sur les aspects cognitifs que sur les aspects mécatroniques, c'est parce qu'à l'époque, les robots étaient considérés surtout comme des automates de produc-

tion industrielle, leur rôle de compagnon de la vie quotidienne n'ayant émergé que plus tardivement. Bien sûr, la part de la robotique industrielle reste toujours aussi importante, comme en témoigne la volonté actuelle des pays à bas coûts de main-d'œuvre de multiplier l'utilisation d'automates dans leurs usines (à l'exemple, de Foxconn, sous-traitant chinois majeur

* Représentant de la France aux comités TIC et Sécurité du 7^{ème} PCRDT, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

** Chargé de mission auprès du Chef de Service, représentant national aux comités PCRDT-CIP- SAFER INTERNET, représentant Euréka pour le MEFI - MEFI DGCIS STIC.

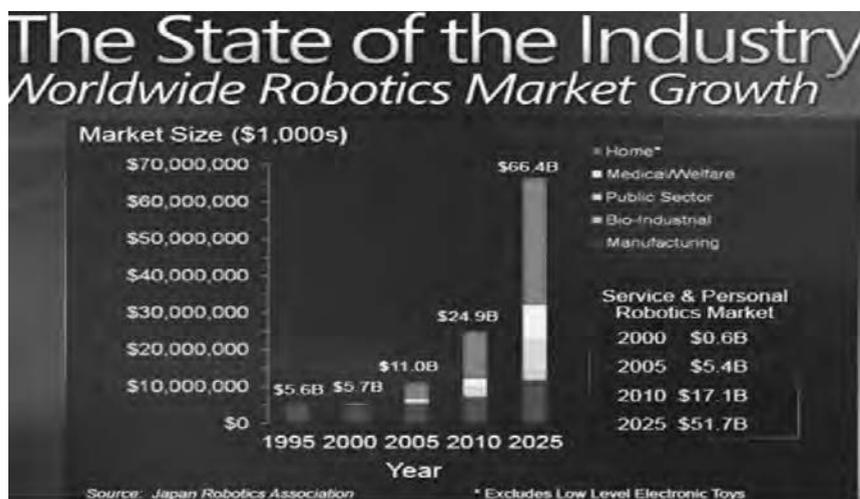


Figure 1 : Croissance du marché mondial de la robotique (1995-2025).

dans la production des iPhone), mais le robot compagnon, non plus cette fois comme substitut, mais maintenant comme complément de l'homme, apparaît comme un marché en émergence (voir la figure 1).

C'est vraiment sous le 6^{ème} PCRDT (2002-2006) que la « robotique » a été prise en compte, avec vingt-six projets bénéficiant de près de 104 millions d'euros de subventions communautaires, *via* le programme intitulé *Advanced robotics*. Les principaux projets retenus concernaient une robotique flexible (*graspers, manipulators, sensors, etc.*) et des réseaux de robots travaillant en collaboration. Parmi ces projets, nous pouvons citer :

- Iromec, une sorte de médiateur social robotisé utilisé en thérapie pour permettre aux enfants présentant certaines déficiences de jouer et d'apprendre.
- Indigo, qui aborde les représentations anthropomorphiques faciales acceptables pour l'humain dans son quotidien, grâce à sa reconnaissance des personnes, de leurs gestes et de leurs émotions.
- Robots@home, robuste, sans danger, disposant d'un système de vision indépendant de reconnaissance de gestes et de parole, aborde le comportement du robot dans différents types d'habitation, avec une capacité d'auto-adaptation au changement d'habitat.
- AcroBoter, une nouvelle sorte de robot se déplaçant en trois dimensions sur des treillis fixés au plafond (un peu comme des araignées), s'affranchissant ainsi de tous les obstacles au sol.
- Guardians qui aborde la détection des odeurs pour des robots se déplaçant dans des zones sinistrées afin d'informer les services de secours sur des odeurs potentiellement dangereuses (gaz, etc.).
- Urus, un réseau de robots pour le transport des objets ou la surveillance, tout en étant capable de respecter le comportement humain et les interfaces de communication.
- Drones, un petit drone de type VTOL (*Vertical take off and landing*) pour la surveillance et la détection extérieure en univers contraint.
- CommRob qui traite des modes de communication entre robots, et entre robots et humains, en y intégrant plus particulièrement la gestuelle.

- DustBot, un minirobot éboueur, qui collecte et transporte les déchets des zones pavillonnaires. Ce ne sont là que quelques exemples. La communauté a ensuite recommandé à la Commission d'accroître l'effort de R&D sur les architectures et les problèmes d'intégration entre systèmes complexes intelligents et systèmes cognitifs.

... QUI REVÊT ENCORE PLUS D'IMPORTANCE DANS LES PROGRAMMES ACTUELS...

Avec le 7^{ème} PCRDT (2007-2013), la robotique a été pleinement intégrée dans un objectif plus vaste regroupant les systèmes cognitifs et la robotique. On a alors assisté à un changement de paradigme : en effet, entre 1998 et 2002, les programmes européens ont essentiellement traité de cognitive, avec une dizaine de projets soutenus ; puis de 2002 à 2006, le champ s'est étendu et l'Europe a financé quarante-cinq projets de systèmes cognitifs et de robotique dite « avancée ». Enfin, entre 2007 et 2013, les quarante-vingt-quatre projets financés traitent non seulement des systèmes cognitifs et des interactions robotiques, mais aussi des « fabriques du futur », avec tout ce que cela implique en termes de robotique. A l'heure où s'écrit cet article, il reste encore deux importants appels à projets à venir sur ces thématiques. Pour l'instant, l'ensemble du soutien communautaire représente déjà plus de 150 projets impliquant 900 partenaires et bénéficiant de plus de 500 millions d'euros de subventions communautaires. La recherche européenne se concentre donc essentiellement sur les systèmes cognitifs artificiels et sur les robots qui fonctionnent de façon dynamique et non-déterministe dans la vie réelle, en fonction de divers environnements spécifiques. Ces systèmes doivent être capables de répondre dans les délais, avec une autonomie appropriée et être aussi capables de combler les lacunes dans leurs connaissances afin d'être à même de faire face à des situations non encore prévues au moment de leur conception. L'objectif est

donc double : soutenir la recherche sur les systèmes robotiques, mais aussi doter les systèmes artificiels de capacités cognitives. Ces deux volets de recherche sont intimement liés, car de nombreuses fonctionnalités et propriétés souhaitables pour les systèmes robotiques reposent sur des capacités cognitives. Inversement, les systèmes robotiques représentent des plates-formes appropriées pour mettre au point les systèmes cognitifs fondamentaux. Enjeux de la recherche scientifique et technologique, les robots doivent être aptes à rendre des services de qualité et à prendre toute leur place dans des scénarii de fabrication flexible. Le changement de paradigme le plus important est sans aucun doute celui du passage de robots largement pré-programmés à des robots programmables par l'enseignement et l'apprentissage.

... ET QUI PRENDRA ENCORE PLUS D'IMPORTANCE DANS LE PCRDT HORIZON 2020

En 2011, dans le cadre des derniers appels à projets du 7^{ème} PCRDT, la Commission a lancé une nouvelle initiative : les *Future Emerging Technologies (FET) Flagship* (1). Cette initiative, qui s'inscrit dans la communication de l'initiative FET intitulée COM 184 « *Moving the ICT Frontiers : a strategy for research on future and emerging technologies in Europe* » soutenue par le Conseil de l'Union européenne, vise à lancer de grandes initiatives de recherche sur d'importants défis scientifiques à fort impact sociétal et susceptibles de préparer les industries de demain, qui respectent les principes de la R&D type FET et qui, touchant différents domaines au titre de la fertilisation croisée, vont au-delà des frontières classiques de FET. Ces projets

pourraient recevoir 100 millions d'euros par an, sur une période de dix ans. Parmi les six projets en compétition, l'un d'eux, RoboCom, porte directement sur la robotique. L'objectif de ce projet est le développement de robots compagnons destinés à assister l'être humain (vieillissant) dans ses tâches quotidiennes. Deux autres projets pourront également apporter des contributions à ce thème (*Guardian Angel et Human Brain*).

Enfin, le programme Horizon 2020, qui prendra le relai à partir de 2014, tel que proposé par la Commission européenne le 30 novembre 2011, comprend trois piliers dont chacun offrira des opportunités pour la robotique.

- En effet, le pilier Excellence de la science comprend l'*European Research Council* (ERC) (rien n'interdit de déposer des projets robotiques dans ce cadre), mais aussi les FET et les FET Flagship, ainsi que les bourses Marie Curie, autant de thèmes potentiellement ouverts aux aspects robotiques.
- Le pilier en soutien à la primauté industrielle européenne mentionne explicitement et comme thème important, la robotique et les espaces intelligents, c'est-à-dire non seulement les TIC et leurs composantes robotiques, mais aussi les technologies clés habilitantes au sein desquelles des applications robotiques sont possibles.
- Le pilier dédié aux défis sociétaux permettra sans aucun doute de s'ouvrir à des applications au titre de la robotique, ne serait-ce que dans des domaines comme la santé et le bien-être (robots chirurgiens, robots compagnons). Il en sera très probablement de même pour les énergies sûres, propres et efficaces, ainsi que pour les transports, la sécurité, les villes intelligentes et la mise en place d'une société inclusive (voir la figure 2).

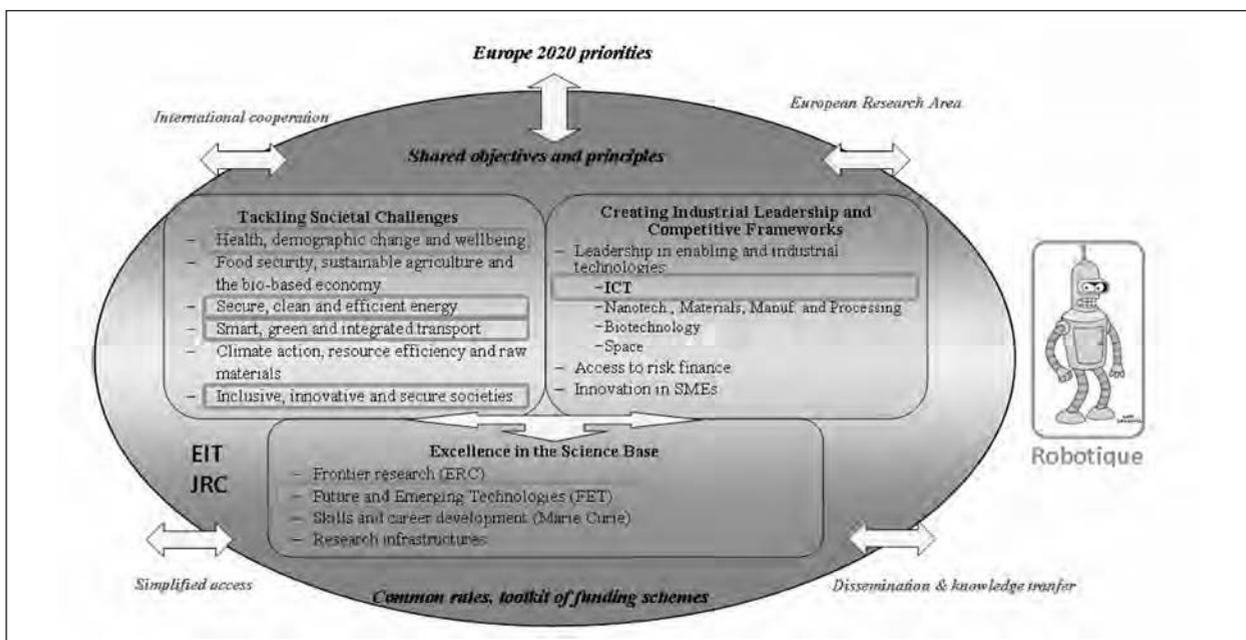
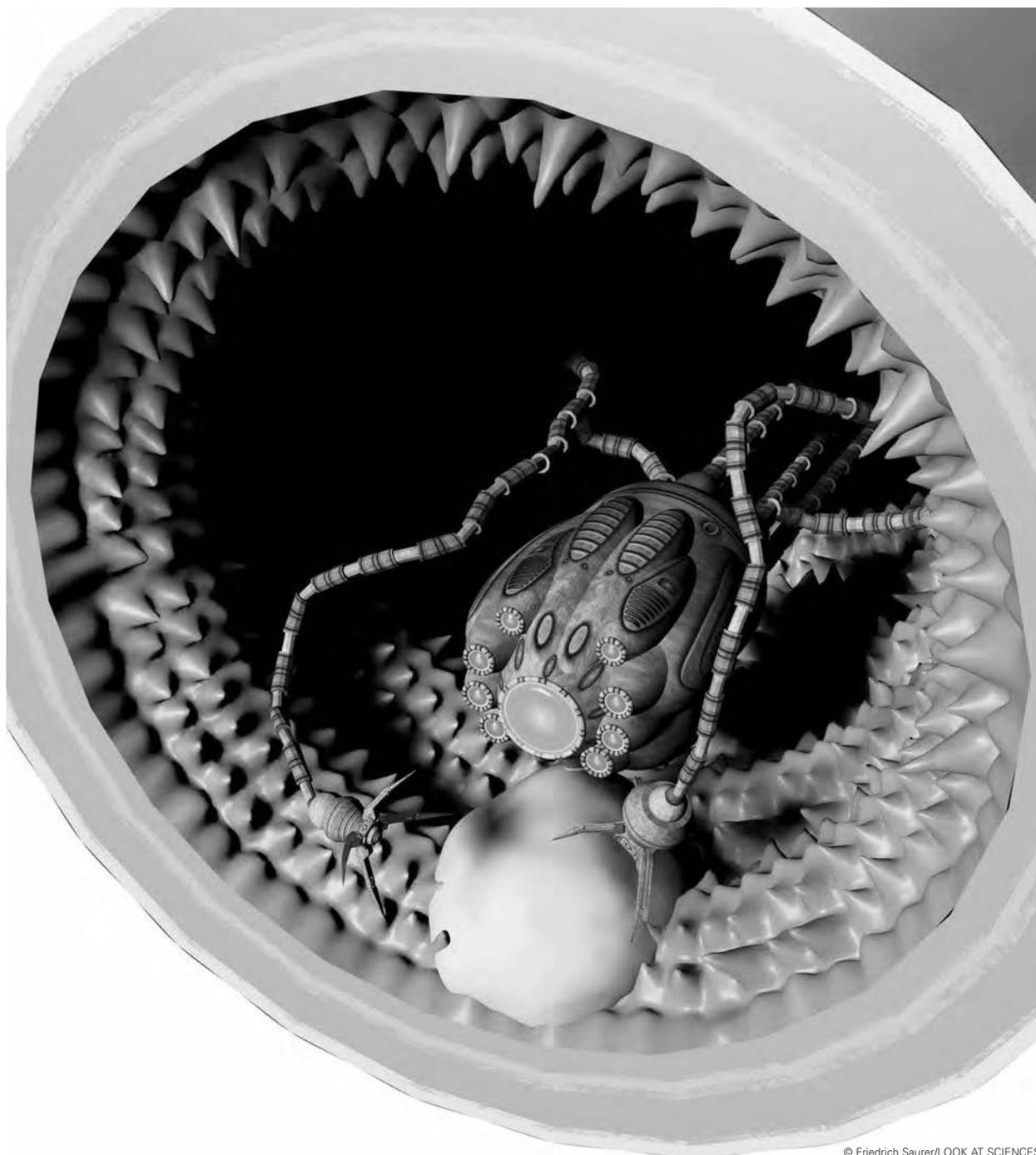


Figure 2 : Commission européenne – MESR-MEFI.



© Friedrich Sauerer/LOOK AT SCIENCES

« Le pilier du programme Horizon 2020 dédié aux défis sociétaux permettra sans aucun doute d'ouvrir la voie à des applications au titre de la robotique, ne serait-ce que dans des domaines comme la santé et le bien-être (robots chirurgiens, robots compagnons). » *Vue d'artiste d'un nanorobot nettoyant les dépôts dans un vaisseau sanguin.*

QUE REGROUPE LE VOCABLE DE « ROBOTIQUE »,
POUR L'EUROPE ?

Définition

La notion de robotique recouvre plusieurs acceptions ; au sens retenu par l'Union européenne, elle vise à concevoir des artefacts qui prélèvent des signaux

et des informations dans leur environnement, puis les interprètent pour réaliser des tâches finalisées, prédéterminées ou non, impliquant des actions physiques sur le monde réel. En fonction de l'usage attendu, les robots peuvent alors avoir ou non une forme humanoïde qui, en plus des problèmes scientifiques et technologiques fondamentaux de conception (des problèmes communs à la robotique en général), soulève des défis technologiques propres d'équilibre, de déplacement, d'intégration et d'interaction avec l'environnement. La robotique fait ainsi largement appel à des

activités de recherche sur la modélisation et la simulation de fonctions cognitives, mais elle ne se réduit pas à cela (2).

Les applications

Les applications actuelles de la robotique visent principalement à améliorer la productivité de nos sociétés et de nos industries en supplantant ou en aidant l'homme dans l'exécution de tâches répétitives. Les applications robotiques concernées peuvent alors être classées de la manière suivante :

- la robotique manufacturière : le robot réalisant de façon autonome des tâches répétitives simples ou coopérant avec l'homme dans l'exécution de tâches plus complexes et ce, très souvent, afin d'améliorer la productivité et la compétitivité industrielle du couple homme/robot. Notons l'apparition de nouvelles applications de cette robotique manufacturière liées à la manipulation des nanomatériaux (l'infiniment petit) ;
- la robotique d'intervention dans les cadres traditionnels NBC (nucléaire-biologique-chimique) - environnements contaminés ou pollués - et dans les environnements extrêmes, etc. ;

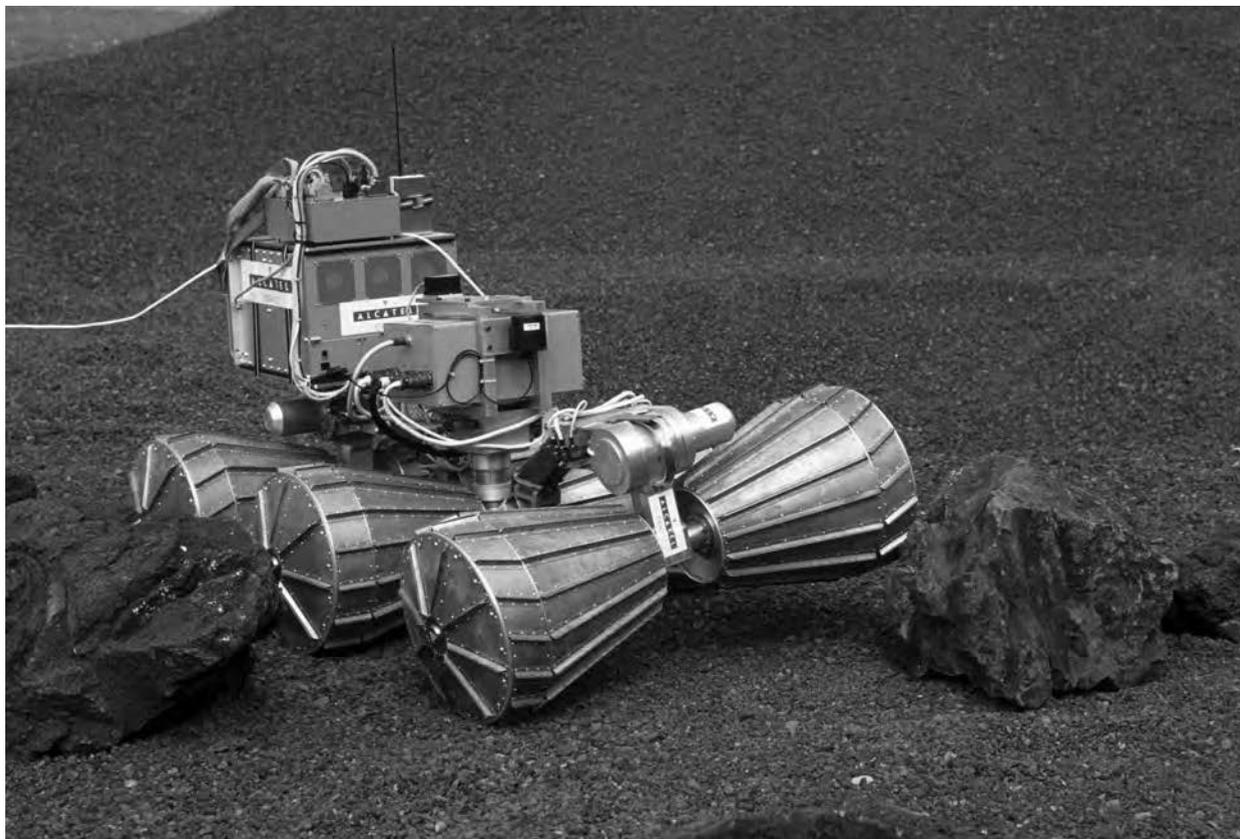
- la robotique embarquée sur des moyens de transports autonomes pour lesquels l'interaction avec l'environnement présente un enjeu crucial (drones, véhicules terrestres autonomes, exploration spatiale, etc.).

De nouveaux défis entraînent de nouveaux robots

On commence aujourd'hui à voir apparaître une robotique plus orientée vers les activités humaines en dehors des lieux de travail, que ce soit au domicile (aspirateurs autonomes, tondeuses à gazon, etc.), ou dans des activités plus personnalisées, le robot devenant alors un véritable assistant personnel, notamment dans le domaine médical et dans celui de l'assistance aux personnes à autonomie réduite (handicapés, personnes âgées, etc.).

Nombre de ces applications présentent un caractère dual important et les avancées obtenues sont susceptibles de trouver des débouchés simultanés aussi bien dans l'industrie de la défense que dans d'autres industries, comme celle de la santé (comme par exemple l'exosquelette).

Enfin, le vieillissement continu de la population européenne, le coût important de la main-d'œuvre européenne ou encore la complexité grandissante de nos



© Patrick Dumas/LOOK AT SCIENCES

« Pour la robotique embarquée sur des moyens de transports autonomes, l'interaction avec l'environnement présente un enjeu crucial (drones, véhicules terrestres autonomes, exploration spatiale, etc.). » *Test du robot d'exploration de la planète Mars "LAMA", Alcatel Espace, Toulouse, 1996.*

sociétés européennes et mondiales font peser des contraintes toujours plus lourdes sur notre modèle de société, lequel est menacé par la compétition économique acharnée à laquelle se livrent les grandes régions du monde. Pour préserver ce modèle social et, par là-même, conserver la qualité de vie élevée qui caractérise l'Europe actuelle, il est donc important que cette même Europe investisse dès à présent dans les technologies susceptibles de répondre à ces défis. Le développement et la diffusion des applications robotiques sont un élément déterminant de la réponse à apporter.

LES PRIORITÉS FRANÇAISES POUR LE FUTUR PROGRAMME DE RECHERCHE ET D'INNOVATION EUROPÉEN

Pour réaliser des tâches toujours plus complexes, les robots de demain devront être dotés de capacités critiques qu'ils ne possèdent pas encore ou alors seulement sous une forme encore trop primitive.

Les principales capacités à développer sont :

- Des capacités mécatroniques : au niveau de la dextérité dans la préhension et la manipulation des objets, dans l'adaptation à des environnements complexes, dans la résistance à des environnements défavorables, etc. ;
- Des capacités d'auto-apprentissage permettant au robot de s'adapter tout seul à de nouvelles situations et/ou à de nouveaux environnements ;
- Des capacités à se mouvoir dans des environnements non structurés, inconnus, non prédéterminés ou précontraints, et surtout au milieu des humains, et cela dans des conditions de sécurité maximales pour tout le monde ;
- Enfin, des capacités à coopérer efficacement entre robots, et entre robots et humains.

Le développement de ces capacités critiques a servi de base à la définition des priorités devant figurer dans le 8^{ème} PCRDT. C'est pourquoi les autorités publiques françaises recommandent que le futur programme-cadre de R&D intitulé « Horizon 2020 » soutienne plus particulièrement les cinq défis scientifiques et technologiques suivants :

- **La perception, l'intégration et l'interprétation d'informations hétérogènes** : signaux divers (RFID, GPS,...), informations visuelles, sonores (y compris verbales), proprioceptives (3). Un défi, encore non relevé, est celui d'arriver à une interprétation sémantique de combinaisons de signaux prélevés par des canaux différents.
- **La conception de robots capables d'acquérir de nouvelles capacités** par apprentissage dans des environnements initialement inconnus, soit de façon complètement autonome, soit en interaction avec d'autres robots ou avec des humains.
- **La robotique en essaim** : la planification spatio-temporelle des actions au niveau du robot individuel

devant alors prendre en compte les actions possibles des autres robots pour permettre des actions collectives « intelligentes » d'un essaim de robots. Le modèle est celui des insectes sociaux, qui réalisent collectivement des actions beaucoup plus complexes que ce que pourrait réaliser un individu isolé (par exemple, la construction d'un nid à alvéoles).

- **Les plateformes de développement et d'expérimentation.** Même si elle peut jouer un rôle pour les recherches en laboratoire, la simulation « cognitive » de robots ne peut se substituer aux expérimentations physiques réelles. Les plateformes d'expérimentation en robotique doivent nécessairement être fondées sur des robots réels, physiques. Ces plateformes physiques d'expérimentation incluant les capteurs, les actionneurs et les unités de traitement et le système logiciel *open-source*, sont nécessaires à la réalisation des expérimentations de recherche dans des conditions économiques acceptables.

- **La programmation et la validation de robots.** Il existe un fossé entre une démonstration en laboratoire visant à prouver un concept théorique et un robot validé, que l'on peut certifier d'opérationnel dans un environnement de production et ce, dans de bonnes conditions de sécurité et de fiabilité. Le développement de la robotique nécessite la mise au point de méthodes formelles de validation. Ce point est étroitement lié à l'automatisation de la programmation des robots. Plus la robotique industrielle se complexifie, plus elle a besoin de méthodes et d'outils efficaces comme par exemple d'intégrer, dès la conception assistée par ordinateur d'objets, le fait que, sur ces objets, des robots interviendront.

LES ACTEURS CONCERNÉS

L'analyse des participations aux activités robotiques du PCRDT montre deux choses : d'une part, la participation de la France est étonnamment faible et d'autre part, elle est essentiellement le fait d'académiques. Ainsi, dans le classement des vingt premiers bénéficiaires (4) du programme, on ne trouve que le CNRS en dixième position et l'INRIA en vingtième position. Plus inquiétant encore : aucun industriel, qu'il soit français ou européen, ne figure dans ce classement. On trouve bien sûr d'autres acteurs français dans cette participation mais plus bas dans le classement, comme l'université Pierre et Marie Curie, Thales, l'Inserm, Sony, Elda, le CEA, Gostai et Supelec (voir la figure 3).

L'Allemagne apparaît en revanche comme le grand gagnant du domaine. Cette situation est probablement liée au fait que si l'Europe représente plus de 30 % du marché mondial des robots industriels, l'Allemagne en est le premier marché (voir la figure 4).

Les grands utilisateurs français de robotique des secteurs de l'aérospatial (EADS, Dassault,...), de l'indus-



© Massimo Brega/LOOK AT SCIENCES

« La planification spatio-temporelle des actions au niveau du robot individuel devrait prendre en compte les actions possibles des autres robots pour permettre des actions collectives « intelligentes » d'un essaim de robots. Le modèle est ici celui des insectes sociaux, qui réalisent collectivement des actions beaucoup plus complexes que ce que pourrait réaliser un individu isolé. » *Mini-robot Alice, prenant modèle sur les fourmis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, avril 2010.*

trie automobile et des applications militaires sont hélas quasiment absents. Pourtant, en robotique, la France dispose de nombreuses compétences, comme celles des entreprises Aldebaran Robotics, BA Systèmes, Cybernetix, Dassault Aviation, EADS, ou Cassidian, Ekium, Easyrobotics, ERI, Hexagone, Gostai, Intempora Robotics Concept, Pob, Robosoft, Sagem, Sorobot, Thales, et de bien d'autres encore.

Selon le dernier rapport du « groupement de recherche en robotique », la recherche en robotique industrielle et de service aurait bénéficié en 2009 de 30 millions d'euros de concours publics émanant de financeurs multiples (Agence Nationale de la Recherche, Direction Générale pour la Recherche et l'Innovation, Direction Générale de l'Armement, Fonds Unique Interministériel, Fonds Communautaires). Ce chiffre est à

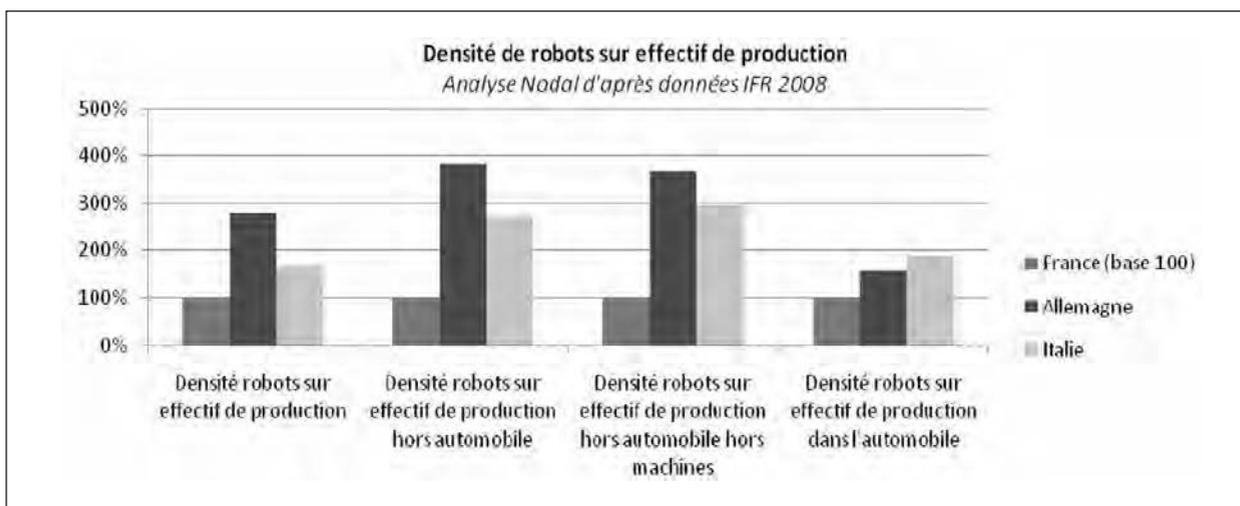


Figure 3 : Densité de robots sur effectif de production.

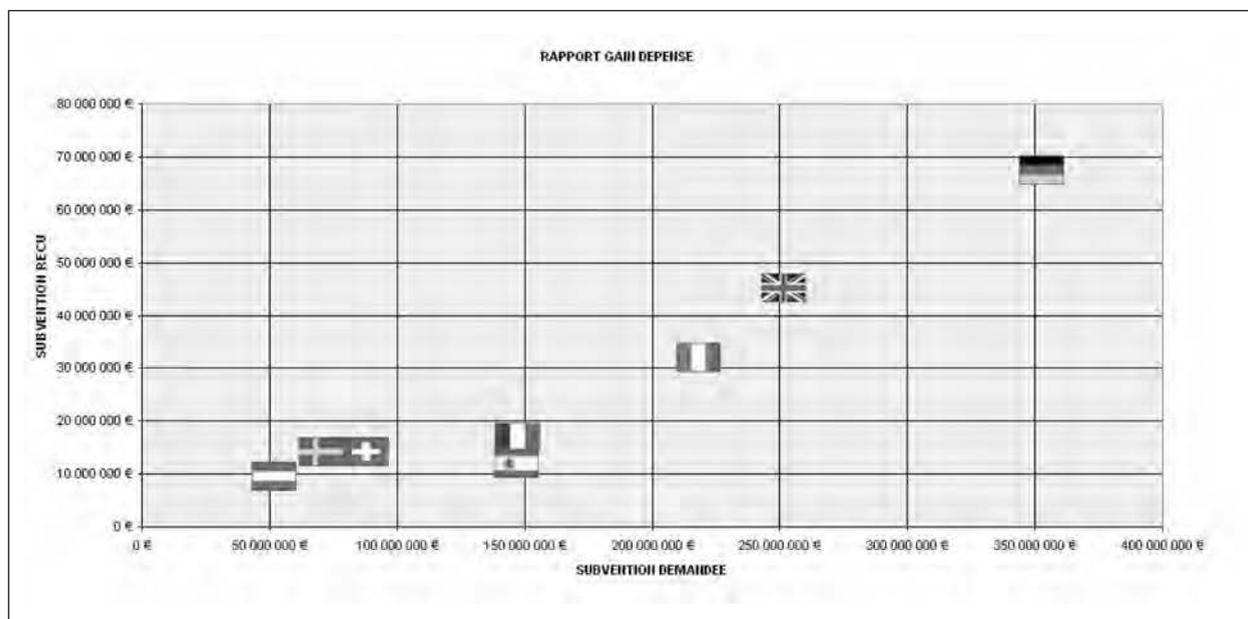


Figure 4 : Rapport Gain - Dépense.

mettre en regard des 12 millions d'euros « perdus » annuellement par la France, ces dernières années, dans le domaine de la robotique au niveau du PCRDT (5).

Les cinq *défis scientifiques et technologiques* que nous avons mentionnés plus haut constituent les priorités de la recherche française en robotique, car ce sont des défis susceptibles de donner lieu à des participations dans le futur programme de recherche européen.

Les trois premiers (perception et intégration d'informations hétérogènes, apprentissage, robotique en essai) sont en effet des défis scientifiques pour lesquels les chercheurs français ont une forte compétence, ce qui est susceptible alors de les inciter à participer avec succès à des projets européens.

Le quatrième (plateforme d'expérimentation) est un domaine fortement concurrentiel (aux Etats-Unis, l'entreprise Willow Garage propose la plateforme PR2 comme base de R&D destinée à tous les acteurs de la R&D en robotique), mais pour lequel la France dispose néanmoins d'un atout certain. En effet, la communauté de la recherche académique en robotique s'est bien structurée autour du groupe de recherche (GDR), qui regroupe environ 800 chercheurs, répartis entre une soixantaine d'équipes, parmi lesquelles : le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS, Toulouse), le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR, Paris), l'Institut de Recherche en

Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN), l'équipe Systèmes Robotiques Interactifs (SRI – Institut Prisme, Orléans), le Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV), Heudyasic (Compiègne), le Groupe Images, Signal, Parole et Automatique (GIPSA, Grenoble), le Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG), le laboratoire Techniques de l'Imagerie Médicale et de la Complexité (TIMC, Grenoble), l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), l'École nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA, Mines-Paristech), mais aussi des organismes comme CEA List, le Cemagref, le CNES, l'Ifremer, l'Inserm et l'Onera. On peut raisonnablement espérer que ce GDR sera le creuset d'où sortiront de nombreux projets collaboratifs français et européens.

Dans le même temps, l'entreprise française Aldebaran Robotics propose Nao, un robot humanoïde d'expérimentation considéré par les experts comme plus évolué que PR2. Nao pourrait être une des plateformes de référence pour les recherches européennes en robotique.

Enfin, le cinquième défi technologique (celui des méthodes formelles de validation) répond à un besoin des industriels utilisateurs. On peut donc espérer que si ce défi apparaît dans le programme de travail de l'Horizon 2020 sous un instrument adéquat, les groupes précités sauront se mobiliser pour y répondre.

Compte rendu du colloque sur l'ingénierie numérique organisé, le 25 novembre 2011, par l'Académie des Technologies, le Conseil Économique, Social et Environnemental et le Conseil général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies

Le 25 novembre dernier, s'est tenu dans l'hémicycle du Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) un colloque portant sur l'ingénierie numérique organisé conjointement par l'Académie des Technologies, le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) et le Conseil Général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGIET).

Le sous-titre *Entre ruptures technologiques et progrès économique et sociétal* donné à cet événement attirait d'emblée l'attention des participants sur l'ambition de cette journée de réflexion et sur l'ampleur des enjeux soulevés par ce qui aurait pu être perçu comme une discipline d'ingénieur parmi d'autres.

Par Romain BORDIER*, Laurent GUÉRIN** et Jonathan NUSSBAUMER***

* Ingénieur des Mines et membre d'un groupe de travail sur l'Avenir de la radio en France (romain.bordier@mines.org).

** Ingénieur des Mines et rapporteur général au Conseil National du Numérique (laurent.guerin.2009@mines.org).

*** Ingénieur des Mines et membre d'un groupe de travail sur l'Avenir de la radio en France (jonathan.nussbaumer@mines.org).

A la lecture du programme, on ne pouvait qu'être frappé par la diversité des secteurs abordés, allant de l'aéronautique à l'automobile, en passant par la chimie, la santé et le tourisme. Comme pour parachever la démonstration de l'ubiquité du numérique, la journée était clôturée par une table ronde d'acteurs de l'agro-alimentaire, fermant la boucle entre le vieux secteur primaire et l'« économie du quaternaire », pour reprendre, comme l'ont fait plusieurs intervenants, le concept créé par Michèle Debonneuil.

Le numérique n'est pas seulement transversal, il est aussi « très structurant », rappelait en introduction Bruno Revellin-Falcoz, président de l'Académie des Technologies, tandis que Pascal Faure, Vice-président du CGIET, le situait « au cœur de la transformation de l'industrie ». Difficile de ne pas penser à une nouvelle Révolution industrielle : on imagine sans peine d'illustres prédécesseurs menant, sur la vapeur ou sur la fée électricité, des discussions similaires, rassemblant fervents enthousiastes, pragmatiques, cassandres et sceptiques, mais tous s'évertuant à en digérer, à en mesurer et à en prévoir les implications.

Si les présentations faites durant toute cette journée ont principalement porté sur l'ingénierie numérique en elle-même, les conséquences sociétales de la diffusion du numérique ont été elles aussi largement abordées. Et non seulement les conséquences, mais aussi les causes : comme le soulignait Bruno Révellin-Falcoz, « l'innovation est un peu technologique, et pour le reste, [elle est] liée à des questions sociales et environnementales ».

LE NUMÉRIQUE, À LA FOIS FAMILIER ET INCONNU

Comme son cousin anglais « *digital* », le numérique fait simplement référence aux nombres 0 et 1 du système binaire. Ce terme est donc bien connu des ingénieurs et des scientifiques : un signal numérique est une version quantifiée et échantillonnée d'une information analogique brute. La combinaison de l'analyse numérique et de la puissance de calcul des ordinateurs permet donc de résoudre avec des calculs discrets ces problèmes mathématiques complexes que sont les modélisations et les simulations.

Mais l'irruption du terme « numérique » dans le discours médiatique et les débats politiques révèle autre chose. On parlait jusque dans les années 1990 de calcul, et un peu plus tard d'informatique, puis, au plus fort de la bulle Internet, des « nouvelles technologies de l'information et des communications », les NTIC. Il s'agissait alors d'en capturer la nouveauté et le caractère foisonnant. Mais, les années passant, le N (correspondant à « nouveau ») de cet acronyme est très logiquement tombé en désuétude, et on parle donc, de nos jours, des TIC.

Le concept générique et englobant de « numérique » a balayé ces termes et acronymes, son utilisation étant démocratisée par la popularisation des concepts de « fracture numérique », « d'aménagement numérique » ou encore de « natifs numériques », et par son institutionnalisation (de la création d'un Secrétariat à l'Economie Numérique jusqu'à la récente installation du Conseil National du Numérique).

Selon Gérard Berry (un membre de l'Académie des Technologies), le numérique, c'est l'unification de toutes les formes d'information par les nombres, alors que les échanges d'information étaient autrefois interdits par l'hétérogénéité de leurs supports (photo argentique, disque gravé, texte écrit, etc.). Il n'y aura bientôt plus lieu d'évoquer les modalités techniques de cette grande unification, qui superpose au monde physique un double numérisé, homogène et fluide. Comme le soulignait en introduction Christian Saguez, membre de l'Académie des Technologies : « Toute l'information est désormais numérique ». De là découle le fait que le numérique s'est imposé au travers des fameux « usages », dans notre société, dans notre culture, dans nos objets, dans nos corps, parfois, et, même, dans notre façon de penser.

On est donc passé du numérique en tant qu'outil utilisé par les ingénieurs pour des applications bien délimitées, en silo, à un numérique « distribué, interconnecté, parallèle », comme l'a caractérisé Pascal Faure, un numérique qui affecte tous les champs de l'activité humaine. Une question latente, durant ce colloque, était celle du rapport entre ces deux utilisations du même terme : y a-t-il un malentendu, ou véritablement une continuité ?

QUE FAIRE AVEC LE NUMÉRIQUE ?

Quoi qu'il en soit, la réponse à cette question nous est d'abord venue des exemples de produits, d'outils ou de services utilisant ces prouesses technologiques. L'auditoire de l'hémicycle du Palais d'Iéna aura pu apprécier, tout au long des débats et des présentations qui ont jalonné cette journée, de nombreux cas concrets d'utilisation du numérique, souvent époustouflants. Que de travail accompli, depuis le Sensorama de 1962 !

En nous signalant que « le calcul devient de plus en plus accessible », notamment grâce à l'essor du *cloud-computing* (voir l'encadré 2), Pierre Leca, chef de département au CEA, nous a rappelé quel est l'intérêt premier du numérique. Ses capacités de calcul sans cesse croissantes sont massivement exploitées dans les industries traditionnelles, telles que les transports (comme nous l'a présenté Gérard Poirier, directeur scientifique adjoint chez Dassault Aviation), ou encore pour la simulation des matériaux (une application exposée par Nicolas de Warren, directeur des relations industrielles chez Arkéma). Dans la plupart des cas, le

Encadré 1**ET PENDANT CE TEMPS-LÀ, SUR TWITTER...**

Suiviez-vous la conférence parallèle ? Pendant que les intervenants se succédaient au perchoir, les plus bavards, dans l'assistance, se livraient en *live* à un véritable commentaire de la conférence. Cela se passait sur Twitter. Nous avons sélectionné pour vous quelques extraits (en 140 caractères, pas plus !) :

@matthieusoule : un #hashtag pour aujourd'hui ? Pourquoi pas #RupturesTechno ?

@ChristianLeRoux : ouverture du grand débat sur l'ingénierie numérique de l'Académie des Technologies au @lecese

@HenriVerdier : *la biologie de synthèse vie* par Dassault Systèmes, l'm faut dire que ça a de la gueule.

@matthieusoule : #DassaultSystemes est notre #Pixar industriel à nous. Fascinant sur la 3D & une vision du #numérique incroyable.

@HenriVerdier : l'intelligentsia française est paternaliste pour les PME. Elle confond *startup* et sous-traitant.

@matthieusoule : c'est touchant de leur part mais ac filières industrielles le carcan empêche une sortie par le haut pour #PME.

@MaximeLegendre : le métier de data scientist est à créer !

@MaximeLegendre : « 2 données c'est bien, 2 données reliées c'est 10 fois mieux »

@pdewest : @HenriVerdier enfin un intervenant sachant utiliser son *slideware*

@pdewest : chapeau à Pierre Marchadier de @3dsfrance qui a relevé avec brio le défi de remplacer au pied levé Bernard Charlès! #noshow

numérique permet de concevoir avec plus d'agilité des *process* industriels innovants. Il s'agit par exemple, pour François Mudry, directeur scientifique d'ArcelorMittal, de modéliser avec une finesse exceptionnelle une coulée d'acier afin d'optimiser la production. Des modèles dynamiques similaires permettent de prévoir le comportement des matériaux, comme celui de la tôle d'une voiture lors d'un *crash-test*. La génomique, les biotechnologies et la chimie tirent également profit des progrès du numérique. Dans tous ces cas, l'ingénierie numérique apporte des gains de compétitivité essentiels en tirant profit de tests virtuels. Ainsi, comme le souligne Daniel Zamparini, directeur des services informatiques chez PSA Peugeot Citroën, la modélisation numérique permet « l'accélération du rythme » des cycles industriels. Les entreprises utilisent aussi de plus en plus souvent le numérique pour relever des défis organisationnels. L'immersion 3D et la virtualisation permettent une véritable fusion des corps de métier. Partant du principe que « le numérique est l'esperanto du XXI^e siècle » (Pierre Marchadier, directeur de l'innovation chez Dassault Systèmes), ces entreprises utilisent le numérique pour faire dialoguer leurs équipes. Chez Airbus, c'est sur une maquette 3D de l'A380 que les équipes travaillent et échangent. Le numérique est

l'antichambre de la réalité. Ainsi, les militaires sont friands de visualisations en 3D : Dassault Systèmes est, par exemple, capable de produire en moins d'une heure un modèle 3D de n'importe quel bateau à partir de données récupérées sur le Web, ce qui permet à des troupes de prévisualiser le lieu d'une mission imminente périlleuse. De manière générale, le *serious-gaming*, également appelé « déjà-vu », donne aux militaires la possibilité d'aborder une mission avec plus de confiance, du fait qu'ils ont pu en reconnaître virtuellement le terrain.

Alors que la production des données augmente exponentiellement, le numérique apporte également des solutions pour l'analyse et la compréhension de notre environnement. Il permet ainsi de construire des systèmes de transport intelligents, qui fluidifient le trafic en modifiant de façon globale le comportement des véhicules. Autre exemple, dans le domaine de l'énergie, on peut, grâce au numérique, connaître et analyser avec précision la consommation des utilisateurs, ce qui permet de mettre en œuvre des stratégies d'économies d'énergie adaptées à l'utilisation du réseau. Des métiers traditionnels, comme celui de la cartographie, ne sont pas en reste : des entreprises comme Archividéo, qui nous a été présentée par son directeur général François Gruson, réalisent des repré-

Encadré 2**LE NUMÉRIQUE, KESAKO ?*****L'API (Application Programming Interface)***

Tout programme informatique voulu interopérable, c'est-à-dire utilisable par d'autres programmes ou d'autres applications informatiques (éventuellement développées par d'autres entités), doit être doté d'une API, c'est-à-dire d'une bibliothèque de fonctions et de briques logicielles publiques et donc utilisables à l'extérieur du programme principal. A titre d'exemple, Google fournit à l'adresse <http://code.google.com/> de nombreux outils pour développer des applications sur la base du code source Google.

L'Open Data

Le mouvement *Open Data* est né de l'idée que, pour la libre concurrence et le bien-être global, certaines données devraient être non seulement accessibles à tous, de préférence gratuitement, mais aussi librement réutilisables. Dans les domaines scientifiques, c'est le partage sans limite de toutes les connaissances actuellement disponibles (publications, résultats de recherche), notamment *via* l'Internet. Plus récemment, cela concerne des grands jeux de données publiques, à commencer par celles des administrations et, si la tendance se poursuit, celles des délégataires de service public : dépenses publiques, statistiques diverses, consommation d'électricité, données sur la santé ou l'agriculture, trafic routier, etc. La France a lancé en décembre 2011 son site d'*Open Data* : www.data.gouv.fr, à la fois par souci de transparence (loi CADA de 1978) et par espoir de voir des entreprises développer de nouveaux services à partir de ces données. Les données personnelles ou confidentielles (touchant, par exemple, à la sécurité nationale) sont naturellement exclues.

La Loi de Moore

Enoncée en 1965 par Gordon Moore, co-fondateur de la société Intel (premier fabricant mondial de semi-conducteurs, en particulier de microprocesseurs), cette loi, à la fois empirique et autoréalisatrice, stipule (dans sa version vulgarisée) que la puissance de calcul des ordinateurs double tous les 18 mois, à coût constant. Cependant, Moore lui-même a prédit une obsolescence de cette loi, sans doute aux alentours de 2015-2020, en raison notamment d'effets quantiques parasites (la taille des transistors présents sur les microprocesseurs se rapprochant de celle de l'atome). Thierry Coupez, directeur du Centre de mise en forme des matériaux de Mines ParisTech, n'a d'ailleurs pas manqué de le rappeler : désormais, on ne pourra plus compter sur les progrès continus des microprocesseurs ; les évolutions se feront dès lors par sauts technologiques (comme, par exemple, l'apparition des appareils-photo numériques).

Le cloud-computing (en français : « l'informatique en nuage »)

Il s'agit d'une forme de gérance de l'informatique qui consiste essentiellement à délocaliser les traitements informatiques sur des serveurs distants. Lorsqu'une entreprise loue du temps de calcul sur les serveurs d'un prestataire, lorsqu'un utilisateur consulte ses courriels *via* un *webmail*, lorsqu'une société stocke ses documents sur des serveurs sans en connaître la localisation exacte, c'est du *cloud-computing*. Le *cloud-computing* nécessite une excellente bande passante pour pouvoir expédier à la volée les contenus nécessaires de façon aussi satisfaisante que si ceux-ci étaient stockés localement.

sentations graphiques très réalistes de zones géographiques étendues.

Depuis plus récemment, le numérique permet d'appréhender les quantités impressionnantes « d'empreintes numériques » que nous laissons derrière nous chaque jour - et il en est de plus en plus de même pour nos objets. C'est tout le challenge du *Big Data*, qui, sur de grands ensembles de données, tolère un nouveau ratio signal/bruit et permet, de ce fait, d'accéder à une richesse d'information incroyable, notamment grâce à des interfaces API (voir l'encadré 2). Aujourd'hui, 60 % des vidéos du célèbre site légal de streaming vidéo Netflix, aux Etats-Unis, sont visionnées sur recommandation du *Big Data*, c'est-à-dire suivant une suggestion générée automatiquement par une analyse fine des préférences du consommateur, en fonction non seulement de l'historique de ses requêtes et de celui des autres utilisateurs, mais aussi d'autres informations croisées.

Les gouvernements entrevoient également dans ce mouvement une opportunité de stimuler la vie démocratique et de moderniser le fonctionnement des administrations en mettant à disposition les quantités de données dont ils disposent sous des formes aisément exploitables : c'est l'*Open Data* (voir l'encadré 2). La France vient d'ailleurs de rentrer dans le club toujours plus large des pays *Open Data* en créant son propre portail. Cette facilitation de la réutilisation des données publiques dope aussi l'innovation et ouvre un nouveau marché pour les acteurs du numérique : l'entreprise Greenext, de Caroline Alazard, donne ainsi accès, *via* une application iPhone, à une mesure de l'impact environnemental de 300 000 produits alimentaires de consommation courante.

On ne peut que s'émerveiller devant ces exploits technologiques qui repoussent les limites du possible et l'on prend alors toute la mesure de la formule de Francis Jutand, directeur scientifique de l'Institut Télécom, qui définit le numérique comme « une étape dans la métamorphose du projet humain ». Hélas, comme souvent, c'est moins la technologie elle-même que son utilisation qui représente la limite.

S'APPROPRIER LE NUMÉRIQUE

Si le numérique fascine, est-ce que « l'essayer, c'est l'adopter » ? Pas vraiment, si l'on compte le nombre de projets numériques désormais répertoriés au panthéon des flops ! L'une des interrogations les plus partagées, dans ce séminaire, portait sur l'acceptabilité de ces technologies.

Tous s'accordent à voir dans l'utilisateur lui-même, et aussi dans sa créativité, le véritable facteur limitant l'expansion de la technologie. En effet, l'utilisateur éprouve généralement de la difficulté à saisir toute la mesure de la révolution en marche et à oser deman-

der des choses qui sont souvent d'ores et déjà possibles.

L'adoption du numérique comporte souvent un risque, lié au bouleversement des habitudes de travail. Les gains peuvent être réels, mais des entreprises familiales traditionnelles ne sont pas toujours prêtes pour cette révolution ou, du moins, leurs directions peuvent le supposer. Le basculement au numérique peut générer des incertitudes angoissantes : vais-je conserver ma marge de manœuvre, dans ces grands systèmes informatiques ? Comment vais-je être formé à ces nouveaux produits ? Vais-je garder la maîtrise de mes données ? Les collaborateurs d'une entreprise ou d'une administration se posent bien souvent ces questions, surtout lorsqu'ils n'ont pas baigné dans le numérique depuis leur naissance. Les dispositifs numériques apparaissent souvent comme opaques et incontrôlables, et leur utilisateur est submergé de possibilités dont l'utilité n'est pas immédiatement évidente. Comme le rappelait Serge Catoire, membre du CGIET, citant George Bernanos, nous nous trouvons souvent, face au numérique, « informés de tout, et condamnés ainsi à ne rien comprendre ».

De fait, nous ne sommes pas préparés à gérer ce foisonnement, nous assure Francis Jutand. Eric Duceau, directeur scientifique chez EADS, précise : « Il faut dix ans pour digérer une rupture technologique, vingt ans, si elle touche à l'organisation ». Et pour répondre à ces problématiques d'acceptabilité, différents exemples peuvent nous inspirer. Citons le cas de Jean-Louis Dautin, directeur de la société Clarté qui conçoit des postes de travail en atelier. Il a choisi de réaliser ses produits en collaboration directe avec l'utilisateur final, une méthode en apparence fastidieuse, mais payante : inclure l'opérateur dans la phase de conception en filmant et en analysant ses gestes permet de s'assurer de la cohérence du produit.

DES RISQUES INDUSTRIELS D'UN TYPE NOUVEAU

Le numérique suscite un certain nombre de préoccupations légitimes. L'acceptabilité en est une, nous l'avons vu, mais la sécurité numérique en est une autre. Ce thème est revenu en filigrane, tout au long de la journée, comme un enjeu majeur (en particulier, au travers des interventions de la salle). Il nous vient à l'esprit cette citation du général d'armée Keith Alexander, commandant de l'US Cyber Command et directeur de la NSA, en septembre 2011 : *"Massive losses of private and public data in recent years to computer criminals and spies represent the largest theft in history"*. [« Le fait que des quantités massives de données tant privées que publiques soient tombées ces dernières années entre les mains de criminels informatiques et d'espions représente le vol le plus important de toute l'Histoire »].

Dans ce domaine, les menaces sont colossales et souvent sous-estimées, car moins palpables que les risques industriels conventionnels. L'attrait et la fascination qu'exercent les nouvelles technologies sur un public souvent profane rendent ces menaces d'autant plus grandes. En premier lieu, il s'agit de protéger le secret industriel, et donc le patrimoine des entreprises : cyberespionnage, intelligence économique, cybercriminalité, prédation informationnelle... Les risques de voir du capital de connaissance s'échapper de nos entreprises sont très réels.

Les PME, en particulier, sont désarmées, car elles sont mal formées sur ces questions et elles sont peu assistées, alors qu'un réel accompagnement est nécessaire pour les aider à développer leur politique de sécurité. Comme l'a rappelé Marie-Christine Oghly, présidente du MEDEF Île-de-France, lors de la première table ronde : « 90 % des entreprises [françaises] sont des TPE/PME, auxquelles le numérique fait peur ».

Mais le vol de données n'est pas le seul risque informatique encouru : on doit aussi redouter le sabotage informatique et la pénétration dans les systèmes de contrôle d'industries ou d'infrastructures de plus en plus interconnectées. Ainsi, lors de la première table ronde de l'après-midi, Gérard Segarra, pilote innovation au niveau de l'ingénierie-amont des systèmes télématiques, chez Renault, nous a présenté un futur « système de transports intelligents » appelé Système Coopératif Routier, qui prévoit à (long) terme la cession d'une partie des commandes du véhicule à un système d'information central prenant en compte de multiples paramètres, comme l'intensité du trafic et la signalisation.

Sans dramatiser l'enjeu, il est indispensable d'envisager dès aujourd'hui les risques de prise de contrôle du système par un agent malveillant : les ravages du « ver » informatique Stuxnet (qui a causé en Iran un ralentissement des centrifugeuses pour l'enrichissement du combustible nucléaire) et, plus récemment, ceux du virus Duqu, doivent nous alerter sur les vulnérabilités des systèmes, y compris de ceux fonctionnant en boucle fermée (c'est-à-dire non connectés à Internet).

Sécurité numérique, appropriation... : autant de freins, qui n'ont néanmoins pas empêché le grand public de se prendre à rêver.

« NOUS SOMMES SEULEMENT AU DÉBUT DE LA MAGIE NUMÉRIQUE » (FRANCIS JUTAND)

« Magie », c'est bien le mot que le grand public a en tête en découvrant, émerveillé, les innombrables applications du numérique, et surtout les miracles qu'il promet. On ne peut alors s'empêcher de penser à la Renaissance et à ce sentiment qu'avaient alors les scientifiques, les artistes et les puissants d'œuvrer au futur de l'humanité. On retrouve aujourd'hui le

même foisonnement d'innovations et cette idée que l'on n'en est encore qu'à l'aube d'une ère nouvelle. Comme si le scientifique, l'entrepreneur et le citoyen étaient encore étourdis par les formidables capacités d'échange et de traitement dont ils disposent désormais, alimentées par un déluge de données sans précédent. Et l'on se prit soudainement, durant ce colloque, à rêver de mettre enfin un terme à la « faim dans le monde », cet archétype du problème en apparence insoluble, en éliminant grâce à la magie du numérique les gaspillages « entre le champ et l'assiette ». La société Agro Edi Europe, représentée par son directeur général Bruno Prépin, travaille notamment à l'échange de données informatisées et à la standardisation des données agricoles et agro-industrielles pour mieux comprendre l'origine et la destination des flux de nourriture. Cet exemple illustre bien la conclusion de Jean-Paul Delevoye, président du CESE : « Le progrès doit être le moteur des espérances ».

Comment ne pas ressentir une certaine impatience, face à l'immensité des possibilités offertes par le numérique ? Dès lors, toutes les barrières à « l'irrésistible fluidité » (1) doivent être abattues. Les partisans de l'*Open Data*, dont la Commission européenne estime à plusieurs dizaines de milliards d'euros les retombées potentielles, trépigent devant la lenteur avec laquelle les pouvoirs publics libèrent leurs données ; les claviers (et autres interfaces imparfaites) doivent s'effacer pour laisser place à une ergonomie plus sensorielle basée sur la voix, les gestes (et, demain, la pensée ?) ; l'interopérabilité et la transparence des dispositifs sont dans toutes les bouches ; le concept de propriété intellectuelle se voit lui-même remis en cause. Même si des appels à la prudence se font entendre (« le libéralisme pur et dur des données serait aussi idiot que le libéralisme pur et dur », nous avertit Henri Verdier, président du Pôle de compétitivité Cap Digital et directeur de MFG Labs), la mise en oeuvre du projet numérique semble inévitable.

Mais la pierre d'achoppement de ce développement fantastique demeure la formation et l'émergence des talents. Et cette course vers la maîtrise de ces nouvelles technologies est aussi celle de nos économies tout entières : comme le souligne Pierre Leca, « le cœur de métier n'est pas le numérique, c'est de pouvoir utiliser efficacement le numérique ». De la maîtrise du numérique, qui « catalyse l'innovation dans tous les domaines » (Pierre Marchadier), dépend le futur de notre pays. Maîtrise, et non simple utilisation, comme on a trop souvent pu le penser par le passé : « En France, on ne doit pas oublier qu'il ne faut pas seulement accompagner la métamorphose, mais aussi la développer » (Francis Jutand). Ainsi, les cartes du jeu économique mondial seront rebattues par le numé-

(1) Titre d'un mémoire consacré à l'économie numérique, rédigé par Franck Lirzin et Stéphane Reiche dans le cadre de leur formation pour le corps des Mines.

rique, et l'issue sera directement liée au degré de préparation de nos écoles, de nos universités et de nos laboratoires.

DESCARTES EST-IL TOUJOURS D'ACTUALITÉ ?

Les paradigmes de la formation, notamment en France, sont donc largement remis en cause par cette révolution.

Dans le monde propre et lisse du raisonnement cartésien, la démarche scientifique consiste généralement à formuler des hypothèses, énoncer des axiomes et en déduire, par un raisonnement logique, des résultats. Dans ce cadre, le raisonnement est rarement contesté, au contraire des axiomes qui sont le plus souvent formulés arbitrairement ou à l'instinct, ce qui revient à peu près au même. Afin de confronter ces hypothèses au monde réel et ainsi les confirmer ou les infirmer, il est d'usage, depuis que la Science existe, de faire des expériences. En 1856, Michel-Eugène Chevreul expliquait : « Un phénomène frappe vos sens ; vous l'observez avec l'intention d'en découvrir la cause et, pour cela, vous en supposez une, dont vous cherchez la vérification en instituant une expérience ».

Parfois même, le calcul sous-tendant le raisonnement est si complexe qu'il n'est pas réalisable et l'on se contente de conduire des expériences afin de valider un modèle.

Dans le monde industriel, cela a des conséquences matérielles et financières colossales, car de nombreux essais (en particulier des essais destructifs préalablement à l'obtention de l'autorisation de mise sur le marché d'un produit) sont indispensables. Dans l'aéronautique, une industrie fortement capitaliste produisant un faible nombre d'unités, c'est un souci majeur.

Que ce soit le projet Manhattan qui ait, le premier, fait usage de la simulation numérique en lieu et place de l'expérimentation n'est pas étonnant ! Que l'usage de la simulation numérique se soit développé au rythme de la loi de Moore et qu'il ait permis de réaliser des économies d'échelle l'est encore moins. La simulation numérique a également connu un succès fulgurant dans les processus de *design*, comme l'énonce Eric Duceau, coordinateur de la recherche sur la virtualisation chez EADS : « Il est possible [non seulement] de supprimer des essais, mais aussi de réaliser des maquettes numériques, et donc de gagner des marges ! », et d'ajouter : « Avant, la contractualisation se faisait sur la base d'un produit. De plus en plus, elle se fera sur des simulations ».

On peut en revanche regretter que, dans l'industrie, la simulation numérique et l'ingénierie numérique en général soient restées jusqu'à récemment cantonnées au rôle de substituts à l'expérimentation.

Fort heureusement (les intervenants des différentes tables rondes nous l'ont montré), de nouvelles initia-

tives viennent bouleverser nos modes de raisonnement usuels. Ainsi, Jean-Louis Dautin fait ni plus ni moins du *mind mapping* : la reproduction des gestes des opérateurs et l'identification de leurs zones d'inconfort ou de frein leur permet de repenser leur poste de travail en 3D, avec des résultats surprenants.

Henri Verdier a lui aussi évoqué un changement de paradigme : partant du principe que le nombre de données accessibles *via* le Web explose (*Big Data*), il devient contreproductif de commencer par construire un modèle théorique et d'essayer de le valider grâce aux données disponibles. Il est préférable au contraire de commencer par analyser ces données et de les regarder sous de multiples angles afin d'en tirer de la structure.

Les technologies associées au traitement des *Big Data* reposent souvent sur des méthodes telles que la réduction en composantes principales. Des résultats récents ont démontré qu'à des dimensions suffisamment grandes (c'est le cas des *Big Data*), il était possible de donner du sens à des données en apparence éparées. Dans un futur très proche, les nouveaux systèmes d'analyse comportementale ou de *business intelligence* verront leur performances ainsi démultipliées : la simple recommandation laissera la place à l'anticipation des événements et des désirs.

On n'oubliera pas cependant que tous ces outils de prétraitement s'appuient sur une solide base de résultats mathématiques et algorithmiques, et qu'ils n'auraient pas vu le jour sans un minimum de raisonnement. Descartes a donc encore de beaux jours devant lui !

LA NON RÉVOLUTION NUMÉRIQUE

Mais qu'est-ce qui a fondamentalement changé, avec le numérique ? Les défenseurs de la cause du numérique ne s'extasient-ils pas un peu trop vite devant les mérites de la révolution en marche ? Et si rien n'avait réellement changé ?

« Le numérique n'est pas une révolution ! », s'exclame Jean-Luc Placet, président de Syntec Conseil en Management et membre du Conseil Exécutif du Medef.

A contre-courant du mythe selon lequel le numérique aurait profondément modifié nos modes de vie, Jean-Luc Placet se fait provocateur en affirmant que le numérique n'est pas la transformation sociétale attendue.

Ce n'est pas parce que l'on peut désormais *linker* une information, tout pré-calculer en 3D, presser « contrôle-Z » à la moindre fausse manœuvre, regarder ses *e-mails* et bientôt la télévision sur son smartphone, que la civilisation s'en trouve pour autant profondément bouleversée. Des intervenants ayant une longue expérience ont d'ailleurs relevé que « cela fait

trente ans qu'on nous promet la révolution » (et que celle-ci n'a toujours pas eu lieu).

Les nouvelles technologies changent-elles la manière de manager ? Non, répondent-ils en chœur. Le numérique n'est que l'écume. Selon eux, les préoccupations des employés sont restées imperméables aux bouleversements de la numérisation de la société : quelle est ma place dans l'entreprise ? Quel *feedback* puis-je obtenir de la part de mes collègues ? Quelles compétences et quelles responsabilités vais-je pouvoir acquérir ? Les jeunes actifs arrivant sur le marché du travail ont ces interrogations, et ce sont les mêmes qu'il y a trente ans. Ils veulent se faire une place dans l'entreprise et être managés. Ils ont peut-être seulement perdu le dévouement envers l'entreprise de leurs parents et ils ne comprennent plus pourquoi il faudrait donner son corps à l'entreprise, alors que celle-ci peut arbitrairement décider de se séparer de vous d'un clic de souris.

Certaines entreprises ne fonctionnent plus qu'au BlackBerry. L'image des entreprises est devenue extrêmement poreuse, ce qui pose, en creux, la question de leur frontière.

Le numérique remet-il en cause le *business model* des entreprises ? Il semble à certains que ce serait une erreur de le penser. Créer un compte Twitter n'a jamais fait décoller un avion.

Pourtant, même les plus réfractaires l'admettent : en profondeur, le numérique n'a peut-être pas modifié les comportements, mais il les a au moins transformés et accélérés. On ne doit plus être au contact, on doit être à l'hyper-contact. On ne doit plus répondre rapidement aux demandes, on doit y répondre hyper-rapidement. On ne doit plus écouter son marché, on doit l'hyper-écouter. La transformation des entreprises s'effectue d'autant plus autour du numérique qu'« auprès de la tribu des jeunes, l'acceptabilité se passe plutôt bien » (selon l'expression de Pierre Marchadier). Mais gardons-nous de nous précipiter : l'accélération pourrait fort bien nous faire perdre la tête, et nos partisans de la non révolution se moquent allègrement de tous ces penseurs de pacotille qui *tweetent* déjà le Grand Soir.

CONCLUSION

Du reste, le numérique n'est plus une économie naissante. De nombreuses études (rapport McKinsey, étude du COE-REXODE « L'économie numérique et la croissance ») s'accordent à attribuer au numérique un quart de la croissance française de ces vingt dernières années. Cela représente 0,52 point de croissance par an, ce qui est déjà très significatif, mais encore loin du 1,08 point de croissance par an américain, pour le même secteur économique. Et encore, on ne parle pas ici de l'emploi, pour lequel la filière numérique fournit déjà plus de 3% des actifs.

Ces chiffres très encourageants nous font néanmoins prendre conscience du chemin à parcourir et de la masse des investissements à réaliser afin de rattraper notre retard, notamment sur les Etats-Unis - rappelons que 6 des 10 premières entreprises de services Internet sont américaines. L'accélération des cycles de développement et l'effondrement des frontières entre les disciplines bouleversent notre conception traditionnelle, linéaire, de l'innovation et remettent à l'honneur l'esprit entrepreneurial. Parmi les investissements d'avenir, citons, par ailleurs, les 20 à 30 milliards d'euros d'investissement nécessaires au déploiement de la fibre optique sur tout le territoire pour favoriser l'accès au très haut débit.

Ce développement extrêmement rapide fait craindre (à juste titre) une nouvelle fracture numérique entre, d'un côté, des entreprises très agiles numériquement et, de l'autre, des entreprises plus poussives, peinant à prendre le train en marche et à organiser leurs processus d'innovation autour du numérique.

Les premières font déjà leur communication pour « 0 euro » sur Twitter, Facebook et LinkedIn, et elles ont créé des postes de *community manager*, quand les secondes viennent à peine de mettre à jour leur page Web.

Les premières, conscientes des risques numériques, engagent un directeur de la sécurité des systèmes d'information chargé de définir la politique de sécurité de l'entreprise, alors que les secondes sont, sans même le savoir, à la merci du cyberespionnage, véritable pillage numérique sans effraction.

Les premières sont « excitées » par le numérique, qui leur a permis, depuis dix ans, de réduire leurs coûts, de se différencier et d'augmenter leurs marges. Les secondes « ont peur », elles ont du mal à se départir du papier, à comprendre l'anglais et à utiliser à bon escient la simulation numérique.

Oui, le numérique est bel et bien une révolution ! A tel point, d'ailleurs, qu'il est urgent d'accompagner les entreprises (notamment les PME) qui sont en difficulté numérique, et d'investir dans la formation aux technologies du numérique et aux méthodes de management associées, la sécurisation des données et l'apprentissage de l'anglais, dont la maîtrise est indispensable pour évoluer dans le monde numérique d'aujourd'hui.

BIBLIOGRAPHIE

George Bernanos, *La France contre les robots*, 1947 (LGF - Livre de Poche, 1999).

David L. Donoho, *High-Dimensional Data Analysis: The Curses and Blessings of Dimensionality*, Department of Statistics Stanford University, août 2000.

<http://www-stat.stanford.edu/~donoho/Lectures/AMS2000/Curses.pdf>

McKinsey, *Impact d'Internet sur l'économie française*, mars 2011.

<http://www.economie.gouv.fr/files/rapport-mckinsey-company.pdf>

Centre d'Observation Economique et de Recherche pour l'Expansion de l'Economie et le Développement

des Entreprises, *L'économie numérique et la croissance.*

Poids, impact et enjeux d'un secteur stratégique, Document de travail Rexecode n°24, mai 2011.

<http://blog.images-et-reseaux.com/wp-content/uploads/2011/09/5-economie-numerique-et-croissance-REXECODE.pdf>

AHMADIAN Alireza

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

AMIRNIA Hamid R.

Center for Innovation and Technology Cooperation, I.R Iran Presidency, Tehran, Iran.

ARCIER Lionel

Lionel Arcier est contrôleur général économique et financier et est membre permanent de la section « Régulation et ressources » et de la section « Sécurité et risques » au sein du Conseil général de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies.

BEHZADIPOUR Saeed

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

BORDIER Romain

Ingénieur des Mines, Romain Bordier est membre d'un groupe de travail sur l'Avenir de la radio en France
romain.bordier@mines.org.

CAVEROT Guy

Guy Caverot est responsable de l'innovation chez BA Systèmes.

Ingénieur de l'INSA en automatique, diplômé de l'IAE et titulaire d'un DEA en Génie des Systèmes Industriels, Guy CAVEROT a débuté sa carrière d'ingénieur chez Thomson CSF, puis a rejoint la division Savoye Logistics du groupe Legris Industrie en 1997.

Il a d'abord occupé un poste de chef de projet en charge des projets d'intégration de robots mobiles dans l'industrie du papier, puis a développé et géré les activités de service de la filiale BA Systèmes de Savoye Logistics.

Après diverses expériences dans d'autres domaines de la robotique chez EGEMIN (robotique appliquée à la logistique) et MEPAL (robotique appliquée à l'emballage), il a rejoint BA Systèmes pour développer des activités innovantes en robotique.

Depuis 2008, en parallèle de cette activité d'innovation, il mène un travail de recherche en sciences de

gestion au sein de l'Institut de Gestion de Rennes (Centre de Recherche en Economie et Management). Ses travaux de recherche sont principalement fondés sur des interventions de terrain (recherche-intervention) et portent sur l'innovation ouverte au sein des PME et sur le rôle des *technological gatekeepers* (agent relationnel de l'innovation) dans ces PME.

Membre du Groupe de Recherche en Robotique du CNRS, Guy Caverot est notamment en charge de la feuille de route du Club des partenaires dudit groupe de recherche. Il est également expert en robotique au sein de l'ANR et membre de la plateforme technologique en robotique EUROPE.

Guy Caverot est associé de BA Systèmes, depuis 2009.

CHARPENTIER Philippe

Diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique de Nancy et titulaire d'une thèse de docteur en automatisme, Philippe Charpentier a commencé sa carrière au sein de la société Thomson CSF. En 1987, il entre à l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) pour y travailler sur la sécurité des systèmes de commande de machines.

Il est responsable du laboratoire Sûreté des Systèmes. A ce titre, il encadre les actions de l'INRS en matière de sécurité des machines, que ce soit en termes d'études et de recherche ou d'assistance aux préventeurs et aux entreprises françaises. Ces différentes actions portent sur les méthodes de conception et de validation des systèmes de commande relatifs à la sécurité, sur la sécurité des machines et des installations, ainsi que sur les systèmes et composants intervenants dans des fonctions de sécurité.

Il est membre du groupe de normalisation TC 44 WG 7 en charge de la norme CEI 62061 sur la sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques.

DEVY Michel

Michel Devy est directeur de Recherche au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS (LAAS-CNRS) à Toulouse.

Il est responsable du groupe de recherche Robotique, Action et Perception. Ingénieur ENSIMAG et docteur de l'université de Toulouse, il participe aux travaux du thème *Robotique* du LAAS-CNRS, depuis 1980.

Ses thèmes actuels de recherche concernent la navigation et la manipulation référencée Vision, la modélisation d'environnements et d'objets 3D, l'intelligence ambiante, le développement de capteurs intégrés... et

l'application des technologies de la Robotique dans les transports intelligents, le Test non destructif, la numérisation 3D...

Il a travaillé sur de nombreux projets coopératifs nationaux (CNES, Thalès, Siemens, Renault...) ou européens (Cogniron, CommRob...) relatifs à la navigation en milieu naturel, la sécurité des transports, le robot compagnon...

Il a encadré ou co-encadré plus de 30 doctorants, et il est co-auteur d'environ 300 communications scientifiques.

FARAHMAND Farzam

RcSTIM, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

FARGEON Catherine

Catherine Fargeon est membre du Conseil général de l'Armement (CGARM).

Ingénieur de l'aéronautique et de l'espace, docteur-ingénieur en automatique et systèmes, elle a, pendant plus de trente ans, dirigé les recherches de la DGA dans le domaine de l'automatisation des procédures de production ainsi que dans les domaines des systèmes d'armes (air, terre, mer), de l'intelligence artificielle, des interfaces homme-machine et des drones.

Elle a eu à s'occuper des premiers achats de systèmes de drones pour l'armée de terre et l'armée de l'air, et a dirigé le programme technologique européen ETAP visant au rapprochement des industries européennes dans le domaine des avions de chasse et des UCAV.

Aujourd'hui, elle contribue aux réflexions stratégiques au sein du CGARM et participe, en tant qu'évaluateur de projets, aux travaux de recherche de la Commission européenne.

Elle a reçu la Médaille de l'aéronautique et est Officier des Palmes académiques.

FILLIAT David

David Filliat est ingénieur en chef de l'Armement et Enseignant-Chercheur à l'ENSTA ParisTech.

David Filliat est diplômé de la promotion 1994 de l'Ecole Polytechnique et a obtenu, en 2001, un doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) sur la navigation bio-inspirée pour la robotique. Après quatre années d'exercice en qualité d'expert en robotique terrestre et en microdrones pour la Direction générale de l'Armement, il est, aujourd'hui, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées ParisTech.

Depuis 2006, il est responsable de l'équipe de Robotique Cognitive.

Ses principaux thèmes de recherche sont : la perception, la navigation et l'apprentissage dans le cadre de l'approche développementale de la robotique, obtenant en 2011 une Habilitation à Diriger des Recherches.

Adresse Internet :

<http://www.ensta-paristech.fr/~filliat/>

GIMBERT Hugo

Hugo Gimbert exerce au sein du Laboratoire bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI), une unité de recherche associée au CNRS et aux universités de Bordeaux I et II. LaBri est également partenaire de l'Inria (Flowers).

GUÉRIN Laurent

Ingénieur des Mines, Laurent Guerin est rapporteur général au Conseil National du Numérique.

laurent.guerin.2009@mines.org

HANAT François

Chargé de mission à Cap Digital, François Hanat est diplômé de l'Ecole Polytechnique (X2006) et est titulaire de sa chaire Management de l'Innovation.

Au sein de Cap Digital, il a été jusqu'en 2009 en charge d'études prospectives (contribution volontaire de solidarité, numérique et politique de la ville), avant de rejoindre l'équipe en charge de l'animation stratégique des communautés du pôle (travaillant notamment dans les domaines de la robotique, l'interactivité et l'ingénierie des connaissances).

Tel : 06 73 42 64 90

francois.hanat@capdigital.com

KECHICHIAN Asbed

Diplômé de l'Ecole de Management de Grenoble (GEM), Asbed Kechichian est responsable Marketing & Communication de SAMES Technologies, qu'il intègre en 1999.

Après six années où il a été en charge du développement commercial dans les pays de l'Est de l'Europe et dans le Moyen-Orient pour Framatome Connectors International, puis au sein de SAMES, il crée et développe le département Marketing et Communication de SAMES, en 2001.

KOCIEMBA Pierre-Laurent

Pierre-Laurent Kociemba est Président Exécutif de NDT-EXPERT & TESTIA (Europe, Afrique du Sud, Mexique) - Groupe EADS et Président Exécutif de MACROS & DATADVANCE (France, Bulgarie, Russie) - Groupe EADS.

Il est diplômé de l'ENSAM et de l'ENSTA.

LAURENT Frédéric

Frédéric Laurent est ingénieur aéronautique (diplômé de l'ENSICA) et est titulaire d'un master en management de Centrale Lyon et EM Lyon.

Pendant huit ans, Frédéric Laurent a suivi les programmes européens pour le compte du CEA et a rejoint, il y a un an, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, en qualité de représentant de la France aux comités TIC et Sécurité du 7^{ème} PCRDT.

LY Olivier

Olivier Ly exerce au sein du Laboratoire bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI), une unité de recherche associée au CNRS et aux universités de Bordeaux I et II. LaBri est également partenaire de l'Inria (Flowers).

MAISONNIER Bruno

Bruno Maisonnier est le fondateur et Président d'Aldebaran Robotics.

Issu de Polytechnique et Telecom Paris, sa carrière a été bâtie sur deux piliers : l'informatique et la DG de banques.

Il a travaillé dix ans dans l'informatique de SSII et banques, où il a mené des projets multi-partenaires, puis il a exercé avec succès les fonctions de président directeur général dans plusieurs entreprises financières dans plusieurs pays (Brésil, Pologne, Portugal et France), lui permettant d'acquérir une forte expérience en management multiculturel.

Depuis vingt-cinq ans, il suit activement le secteur de la robotique, en surveillant le marché et la disponibilité des technologies nécessaires au développement de la robotique, et plus spécifiquement des humanoïdes autonomes.

MIRBAGHERI Alireza

RcSTIM, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

NUSSBAUMER Jonathan

Ingénieur des Mines, Jonathan Nussbaumer est membre d'un groupe de travail sur l'Avenir de la radio en France.

jonathan.nussbaumer@mines.org

PERRES Cédric

Titulaire d'un MBA (Master of Business Administration), Cédric Perres est, depuis 2009, Directeur Général de la société SAMES Technologies, sise à Meylan (Isère).

Il justifie d'une forte expérience internationale et multi-disciplinaire, acquise au travers des postes de direction qu'il a occupé dans des sociétés implantées en Europe, en Amérique latine, en Asie et aux États-Unis.

Il a réalisé l'essentiel de sa carrière chez des équipementiers automobile de rang 1, tels que Venture Peguform (plasturgie). Il a aussi conduit des missions dans les secteurs de l'aéronautique, du ferroviaire et de l'énergie.

Grâce à ses équipes, SAMES Technologies se déploie sur les marchés globaux, capitalisant sur son innovation, son savoir-faire, les synergies développées avec sa société sœur KREMLIN REXSON, et ses alliances stratégiques.

POSTEL-VINAY Grégoire

Grégoire Postel-Vinay est Responsable de la Mission « Stratégie » à la Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS) - Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.

ROURE Françoise

Contrôleur général Economique et Financier, le Docteur Françoise Roure est la Présidente de la section *Technologies et Société* au Conseil général de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies (CGIET) - Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.

ROY Philippe

Ancien élève de l'École Normale Supérieure et docteur ès Sciences, Philippe Roy débute sa carrière en tant que chercheur à l'ONERA où il aborde l'informatique par la simulation numérique d'écoulements turbulents sur super-calculateur. Puis, il rejoint, en 1985, le groupe Bull et participe à la conception de ses produits en qualité de chef de projet de développement et de chef de produit dans les domaines Unix, production transactionnelle et bases de données.

Il participe à la création de la filiale Evidian, acteur mondial des technologies de gestion de réseaux, systèmes et sécurité, dont il est d'abord le directeur des Partenariats OEM, avant d'en devenir le CTO.

En 2001, il devient Vice-président, Partenariats Technologiques, de la société iMediation, un des créateurs du secteur du PRM (Gestion de la Relation Partenaire).

En 2004, Philippe Roy rejoint la direction de Delia Systems, en tant que directeur du Marketing, des Partenariats OEM et Technologiques.

Depuis 2006, il est délégué adjoint du Pôle de compétitivité Cap Digital, en charge des projets, contribuant notamment à la mise en place de l'usine à projets de ce Pôle qui a permis le financement de

400 projets de R&D dans les secteurs des contenus et des services numériques.
Tél. : 01 40 41 11 85
Fax : 01 40 41 11 65
philippe.roy@capdigital.com

SAKAR Saeed

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

SCHOULLER Patrick

Après vingt années passés à France Telecom, Patrick Schouller s'est occupé au sein de la direction de la réglementation générale, de la prospective technologique, avant de rejoindre, en 1995, le ministère en charge de l'Industrie en tant que représentant national de la France au sein des différents comités de gestion de programmes européens relatifs à la société de l'information PCRDT CIP Safer Internet, Applications télématiques, Econtent, TEN telecom...

Sa formation est triple : académique (université de Dijon), technique (Institut National des Télécommunications) et administrative et juridique (ENA).

SCIAMMA Dominique

Dominique Sciamma est le directeur du Développement et de la recherche de Strate Collège, une des écoles de *design* françaises de référence.

Acteur des TIC depuis trente et un ans, il en a abordé de nombreux aspects : chercheur en IA, auteur logiciel, directeur marketing, responsable international en Asie, consultant en stratégie, consultant en résolution de problèmes complexes, marketing multimédia, direction des éditions électronique de la Tribune, développeur d'un CMS, scénariste de BD et de jeux vidéo, concepteur d'interfaces.

Travaillant pour Strate Collège Designers depuis 1998, y encadrant l'ensemble des diplômés, il y crée en 2007 le département « Systèmes et Objets Interactifs », avant d'en prendre également la direction de la recherche, en 2010.

Attentif à la création autant qu'à la pensée, Dominique Sciamma est un acteur engagé autant qu'un théoricien avisé de la transformation numérique. L'idée force du département qu'il dirige au sein de Strate Collège est que la nouvelle frontière du numérique est l'objet. Pucés, Telecom, logiciels, nanotechnologies vont potentiellement envahir le moindre lieu, la moindre situation, le moindre objet, et ainsi transformer radicalement la relation que l'homme entretient avec son environnement. Apporter de l'intelligence à l'objet va profondément modifier l'expérience humaine et transporter les enjeux numériques dans le monde réel, celui de l'espace, de la matière, du corps.

L'autre grand projet de Dominique Sciamma est aujourd'hui celui de la recherche en matière de *design*, une discipline où tout reste à être défini et construit en France. A la croisée des disciplines, appliquée par définition, collaborative par nature, la recherche en *design* représente une magnifique opportunité de faire se rencontrer à nouveau la sensibilité, la créativité, l'expérience, la curiosité, les savoirs et la rigueur, le tout au service des hommes.

Dominique Sciamma est diplômé de l'université Paris 7 en mathématiques (Maîtrise), ainsi qu'en informatique théorique (Maîtrise et DEA).

SGHAIER Adel

A l'issue de son cursus à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax (ENIS), Adel SGHAIER s'est vu décerné un diplôme d'ingénieur en génie électrique. Il a ensuite obtenu le diplôme de doctorat en Sciences et Techniques Industrielles de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (Supméca) en 2005. Il a occupé le poste de chercheur et d'enseignant à Supméca, puis à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Tarbes (ENIT) jusqu'en 2009, dans le domaine de la mécatronique et de l'informatique industrielle.

Depuis 2005, Adel SGHAIER mène des recherches portant sur la modélisation et la simulation de machines industrielles.

Depuis 2011, il réalise une *étude et recherche* à l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) portant sur la problématique de l'utilisation en sécurité des robots.

Van BLYENBURGH Peter

Peter Van Blyenburgh est Président de l'*Unmanned Vehicle Systems International* (UVSI).

Diplômé de HEC Lausanne, il s'investit dans le domaine des « Unmanned Aerial Systems » (UAS) et plus généralement des « Unmanned systems » depuis 1987. Dans ce domaine, il apporte ses conseils au plus haut niveau à des grandes industries et à des organismes gouvernementaux, aussi bien en Europe, qu'aux Etats-Unis, en Chine, en Inde, ou encore au Brésil. Il agit aussi au profit d'ICAO, de l'EASA, de l'EDA et des DG compétentes de la Commission européenne.

En 1995, il a lancé le principe d'une association regroupant l'ensemble des partenaires du domaine, une association qu'il va finalement créer en 1997 sous le nom de « European Unmanned Vehicle Systems Association » (EURO UVS), nom qui s'est transformé, en 2004, en UVS International, pour tenir compte de son positionnement unique au plan international. Son expertise personnelle se concentre sur les aspects légaux et réglementaires, et, en particulier, sur la problématique de l'insertion des drones dans des espaces non ségrégués.

Disposant d'un carnet d'adresses de plusieurs milliers d'intervenants dans le domaine considéré, il est

donc à même d'insuffler une dynamique puissante dans ce secteur en émergence.

VILBOIS Dominique

Dominique Vilbois est diplômé de l'Ecole Polytechnique (promo 74) et de Sup'Aéro.

Il débute sa carrière en tant qu'ingénieur de l'Armement à la DGA de 1979 à 1986, puis rejoint une *startup* innovante dans le secteur du Génie Logiciel, où il occupe des fonctions de directeur du Business Development jusqu'en 1991.

De 1991 à 1993, il est directeur régional de SYSECA (Groupe Thomson CSF), puis directeur général de MORS de 1994 à 1998.

Puis pendant dix ans, il occupera différents postes de direction dans ce qui deviendra, en 2001, INEO, filiale de SUEZ.

A son départ de l'INEO, dont il est alors le directeur général délégué, il rejoint l'ECA en tant que président directeur général. Toute sa carrière a été consacrée au développement d'activités technologiques et innovantes pour les secteurs de la Défense, de l'Energie, de l'Aéronautique et des Télécommunications.

FOR OUR ENGLISH-SPEAKING READERS

ROBOTS: NEW CONCEPTS, NEW USES

Issue editor: Françoise Roure and Lionel Arcier

Editorial

Pierre Couveinhes

Foreword

Françoise Roure and Lionel Arcier

An inventory by sector

Conquering the ocean's depths: Robot submarines

Dominique Vilbois

The ocean's depths are still mysterious, but at stake for the future of our planet is the exploration and use of the natural resources there (fish, plant-life, minerals, oil and gas) and the study of the ocean's impact on the climate. We must address these issues in order to offer a future to upcoming generations. The progress made in underwater robotics opens the prospect of improving our knowledge of an environment inaccessible to man and of tapping its resources. The current state of science in underwater robotics is described, along with its civilian applications (current or foreseen for the near future); and a quick overview is presented of this attractive new market.

Robotics' added value in terms of quality, safety, etc. in aeronautics

Pierre-Laurent Kociemba

A new world pattern is emerging in the aeronautics industry. China, now among the top-ranking players, is investing in a national aircraft construction industry. It intends to become a strong competitor in this field. To take up this new challenge, Airbus and Boeing, the two world leaders, must improve, year in, year out, their competitiveness by investing in research and the development of new technology (carbon, propulsion, wings) and new production strategies (such as lean manufacturing).

Robotized painting in the automobile industry: Saving energy thanks to the concept of "internal load"

Cédric Perres and Asbed Kechichian

The automatized painting of automobiles has to be adapted to the possibilities offered by robots so as to optimize the equation relating speed (dependent on robots) and the volume sprayed (dependent on the spray system). SAMES' robotized solution, Accubell 709 Evo, has significantly evolved to meet up to the new requirements.

Problems of safety in industrial robots

Adel Sghaier and Philippe Charpentier

Robotics has expanded considerably in recent years. Applications using robots are ever more varied; and the physical limits between man and machine are being trimmed. New issues related to safety and the prevention of occupational accidents are arising, whence the need to identify and

then reduce the risks associated with robots. It is important to imagine systems in which people can work safely with robots. The current state of work on the safety of industrial robotics is described; and a preliminary study of work-related accidents caused by robots, presented. Solutions are then proposed for improving security.

CAP Robotique's actions

Philippe Roy and François Hanat

Cap Robotique is a high-tech "cluster" of about fifty establishments (small businesses, research laboratories, designers) involved in a process of innovation that will transform our relation to sickness, isolation, effort... and re-enchant teaching, caregiving and leisure activities.

The robotics economy: New facts, current issues

Françoise Roure and Grégoire Postel-Vinay

Owing to the economics of automation and the standardization of quality, the machine tool industry sought to increase the global productivity of the factors of production by drastically cutting labor costs. In the economics of robotics, another factor of production — knowledge capable of putting information to work — is to be taken into account in addition to labor and capital. More and more robots will be used, in particular, to provide services to an ageing population. The vast, new prospects of robotics lie at the interface between several sciences: mechanics, software, electronics, nanotechnology, medicine, risk analysis, economics, sociology, marketing and communications.

Coming developments and prospects

New uses for mobile robots

Guy Caverot

First applied in production logistics to cut costs, improve product quality and rationalize the work flow in factories, robotics is moving toward new applications in the fields of construction, health and nuclear power. BA Systems has tapped its know-how acquired in industry to respond to new needs for protecting human beings, improving their gestures and safety, and automating activities conducted in hostile environments. For the sake of diversification, BA Systems has adopted an original organization of innovation based on installing the function of "relational innovator" in charge of developing external relations, in particular with research laboratories and the users of the new technology.

Toward a semantic cartography of indoor environments

David Filliat

In robotics, research on cartography increasingly focuses on "models of semantic environments" containing human concepts, such as parts or objects. We have developed a robot that was able to design an indoor map during a competition in exploring buildings. Using sensors of a new type (in-depth cameras), our approach proves that it is possible to construct such models; but it is based on highly complex systems.

Drones: Their miniaturization and its impact on their deployment and uses

Catherine Fargeon and Peter Van Blyenburgh

The world of small-scale drones, weighing less than ten kilograms, is evolving fast. This sort of aerial vehicle is no longer reserved for academics, big firms in the weapons industry or small high-tech businesses. Geeks and enthusiastic consumers, whether or not from aeronautics, have become passionately involved. These aerial vehicles carry all sorts of sensors on board. Their operators can propose a wide range of services. What are the economic and operational issues in this cultural and technological revolution?

An overview of medical robotics in Iran

Farzam Farahmand, Hamid Amirnia, Saeed Sarkar, Saeed Behzadipour, Alireza Ahmadian and Alireza Mirbagheri

This paper presents an overview of the current research and development activities on medical robotics in the Islamic Republic of Iran. Medical robotics is believed to be among the most influential and therefore strategic technologies in the area of health and medical services. As a result, the Iranian Ministry of Education, along with the Ministry of Health and Medical education and the Ministry of Industries and Mines have devised a strategic plan to promote and support this branch of technology. A research centre (called RcSTIM) has been assigned to focus on this area and work intensively on long term projects. Collaborative research and development projects in this centre and other technical and/or medical schools have resulted in several domestic technologies and advancements in the field of medical robotics, from which some have already entered the last stages of commercialization and others are passing technical and clinical trials.

From new concepts to innovative uses

Co-botics: From industrial robotics to robots that assist, cooperate and are co-operators

Michel Devy

What is the current state of industrial robotics? Arms autonomously manipulate objects and perform high-speed repetitive tasks; vehicles without drivers follow set itineraries... Robotized solutions strongly impact the human environment. They must satisfy requirements of safety and sturdiness, but they are not versatile and have a very limited degree of adaptation. New arms for manipulating objects in the vicinity of human beings are now on the market. In the past ten years, research in robotics has rapidly advanced toward placing robots in a human environment and providing assistance to people. Why could a robot, a companion of man outside the workplace, not also accompany him in the workplace? How can industry take advantage of the new findings of research in service robotics? Answering these questions is complicated since the constraints vary depending on the field of application. A few of the issues are described that have to do with a "co-botics", a robotics of collaboration between industrial robots and people.

Multi-tasking humanoid robots: Nao and its successors

Bruno Maisonnier

Industrial robots saw the light of day during the 1950s in the United States for the purpose of optimizing production. Robots for serving people came into being in the 1980s in Japan as a response to the ageing of the country's popula-

tion. The accident at the Fukushima nuclear power plant has emphasized the importance of having machines as mobile and agile as people but not as fragile. Placing robots in the service of human beings entails addressing several issues: how to control interactions between robots and people, how to develop the robot's agility and its ability to perceive and analyze the environment, and, above all, how to make it safe for humans in the vicinity of robots. All this calls for partnerships between industry and academia with the objective of advancing toward the phase of developing prototypes and a service robotics industry.

Deploying robots in everyday life (with special focus on humanoid robots)

Olivier Ly and Hugo Gimbert

Till present, robotics' applications were mainly in manufacturing. They are now shifting to the general market, as robots are being proposed to consumers. The potential is enormous, but there are still hurdles, as explained herein. The major issues are examined that must be addressed technologically, industrially and commercially.

Living with robots: Designing the relationship

Dominique Sciamma

"Robjcts" — a contraction of "robot" and "object" — are more than technical contraptions. They represent a new, social dimension in which objects are not just an assemblage of features but are endowed with behaviors. Robjcts are becoming "smart" in their relations with not only people but also other objects. In this new context, a key responsibility is arising: designing the robots for tomorrow and re-imagining what it means to "live together". The goal for designers is to see robots successfully integrated in society.

The prospects for robotics in Horizon 2020, the EU's 2014-2020 framework program: What are the priorities for France?

Patrick Schouller and Frédéric Laurent

Patrick Schouller and Frédéric Laurent, France's two representatives on the committee that oversees the theme of information and communication technology in the Framework Program for Research and Technological Development, provide an overview of the EU approach to research in robotics. What themes can we hope to find in the next EU research program, Horizon 2020?

Miscellany

A synopsis of the symposium on digital engineering, organized on 25 November 2011 by the Académie des Technologies, the Conseil Général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies and the Conseil Économique, Social et Environnemental

Romain Bordier, Laurent Guerin et Jonathan Nussbaumer

On 25 November 2011, a meeting was held in the auditorium of the Conseil Économique, Social et Environnemental (CESE) on the topic of digital engineering. It was jointly organized along with the Académie des Technologies and the Conseil Général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGIET). The subtitle for this symposium, "Between technological ruptures and economic and societal progress", drew the attention of participants to the purpose of this meeting and to the scope of the issues related to what could have been seen as one discipline of engineering among others.

AN UNSERE DEUTSCHSPRACHIGEN LESER

DIE ROBOTER : NEUE KONZEPTE, NEUE VERWENDUNGEN

Leitartikel

Pierre Couveinhes

Vorwort

Françoise Roure und Lionel Arcier

Eine Zustandsbeschreibung nach Sektoren

Die Eroberung der Tiefsee : die Tiefseeroboter

Dominique Vilbois

Die Meeresböden der Tiefsee sind noch weitgehend voller Geheimnisse, während ihre Erforschung und ihre Ausbeutung für die Zukunft unseres Planeten von entscheidendem Interesse sind. Der Abbau der natürlichen Ressourcen (Fischbestände und andere biologische Ressourcen, Erze, Erdöl und Gas) und die Untersuchung ihres Einflusses auf das Klima sind unumgängliche Herausforderungen, wenn man die Zukunft der kommenden Generationen sichern will. Den Fortschritten der Tiefseeroboter ist es zu verdanken, dass eine bessere Kenntnis und Erschließung dieser Zonen möglich wird, die heute noch für den Menschen unzugänglich sind. Dieser Artikel stellt den gegenwärtigen Stand der Technik der Unterwasserrobotik und ihrer zivilen Anwendungsgebiete (aktuell und erschwänglich in naher Zukunft) vor und bietet schließlich einen kurzen Überblick über einen neuen und attraktiven Markt.

Der Mehrwert (bezüglich der Qualität, der Sicherheit ...) der Robotik in der Luftfahrtindustrie

Pierre-Laurent Kociemba

Die Luftfahrtindustrie muss sich heute auf globale Wandlungsprozesse einstellen. China gehört nunmehr zu den wichtigsten Großmächten und investiert in den Aufbau einer starken nationalen Luftfahrtindustrie. Sein Hauptziel ist es, sich neben den gegenwärtigen Akteuren als starker Wettbewerber behaupten zu können. Aufgrund dieser neuen Herausforderungen müssen die beiden Marktführer *Airbus* und *Boeing* jährlich ihre Wettbewerbsfähigkeit verbessern, indem sie in die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien (Kohlenstoff, Antrieb, Tragflächen) und neuer Produktionsstrategien (z.B. *lean manufacturing*) investieren.

*Die automatisierte Lackierung in der Automobilindustrie
Möglichkeiten zur Energieeinsparung durch das innere elektrostat-
ische Aufladungssystem*

Cédrik Perres und Asbed Kechichian

Der automatisierte Lackierungsvorgang (hier in der Automobilindustrie) muss an die Möglichkeiten der Robotisierung angepasst werden, um die Gleichung zwischen der Applikationsgeschwindigkeit (die der Roboter bewirkt) und der zerstäubten Menge (durch den Zerstäuber) zu optimieren. Die durch den Robotereinsatz ermöglichte Lösung *Accubell 709 Evo* von *SAMES* ist erheblich verbessert worden, um den neuen Anwendungen zu entsprechen.

Die Problematik der Benutzung industrieller Roboter auf dem Gebiet der Sicherheit

Adel Sghaier und Philippe Charpentier

Die Entwicklung der Robotik verläuft seit einigen Jahren sehr expansiv. Die Anwendungen für Roboter sind immer vielfältiger und die physischen Grenzen zwischen Mensch und Roboter werden durchlässiger. Dies wirft neue Problematiken auf, die mit Sicherheitsfragen und Unfallverhütung am Arbeitsplatz zu tun haben, und die die Identifizierung und dann die Reduktion von Risiken notwendig machen, die sich aus der Benutzung dieser Roboter ergeben können. Es müssen unbedingt Systeme geschaffen werden, die es möglich machen, in aller Sicherheit mit Robotern zu arbeiten. Der erste Teil des Artikels stellt eine erste Zustandsbeschreibung der Bemühungen um Sicherheit in der industriellen Robotik vor, sowie eine kurze Untersuchung zu Arbeitsunfällen, die von Robotern verursacht wurden. Lösungen zur Verbesserung der Sicherheit werden im zweiten Teil des Artikels besprochen.

Neue Verwendungszwecke der mobilen Roboter

Die Politik von CAP robotique

Philippe Roy und François Hanat

Cap robotique ist ein Kompetenznetz für innovative Technologie, das etwa fünfzig Strukturen umfasst (kleine und mittelständische Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Designer), die sich Innovationsziele gesetzt haben, die in naher Zukunft unsere Einstellung zur Krankheit, zur Isolierung, zur körperlichen Arbeit tiefgreifend verändern ... und die unsere Phantasie auf Gebieten wie dem Schulwesen, der Krankenpflege und der Freizeitgestaltung neu beflügeln werden.

Die Robotikindustrie : neue Sachlagen und aktuelle Herausforderungen

Françoise Roure und Grégoire Postel-Vinay

Mit der Automatisierung und Vereinheitlichung der Qualität verfolgte die Werkzeugmaschinenindustrie das Ziel, die globale Produktivität der Produktionsfaktoren durch eine drastische Reduzierung der Arbeitskosten zu erhöhen.

In der Robotikwirtschaft ist neben dem Beitrag der Produktionsfaktoren (Arbeit und Kapital) derjenige des Faktors „Wissen“ von Bedeutung, der die Information mit seiner praktischen Umsetzung kombiniert.

Über die Industrie hinaus wird der Einsatz von Robotern zunehmen, insbesondere im Dienstleistungssektor der Pflege aufgrund der Überalterung der Gesellschaft.

Mit der Robotik verbinden sich also neue und vielversprechende Perspektiven an der Schnittstelle zwischen vielen Wissenschaften : Mechanik, Programmentwicklung, Elektronik, Nanotechnologien, Materialwissenschaften, Medizin, Risikoanalyse, Wirtschaft, Soziologie, Marketing und Kommunikationswissenschaften.

Die voraussichtlichen Entwicklungen und die Vorbereitung der Zukunft

Guy Caverot

Die ersten Verwendungszwecke fand die Robotertechnik in der Produktionslogistik, um zur Reduzierung der Kosten, zur

Verbesserung der Produktqualität und zur Rationalisierung der Betriebsabläufe beizutragen. Neue Nutzungsmöglichkeiten findet sie nunmehr auch in der Bautätigkeit, im Gesundheitswesen und in der Nukleartechnik.

So mobilisiert *BA systèmes* sein industrielles Know-how, um den neuen Bedürfnissen zu entsprechen, die mit Schutzaufgaben, mit der Verbesserung menschlicher Beweglichkeit und ihrer Sicherung sowie mit der Automatisierung von Tätigkeiten in lebensfeindlichen Regionen zusammenhängen.

Um dieser Herausforderung der Diversifikation gerecht zu werden, hat *BA systèmes* eine originelle Organisation seiner Innovationstätigkeit eingeführt, deren spezifische Aufgabe in der Innovation der Beziehungen besteht, durch die externe Verbindungen, insbesondere mit den Forschungseinrichtungen und den Benutzern entwickelt werden sollen.

Die Entwicklung einer semantischen Kartographie von Innenräumen

David Filliat

Für die Robotik befasst sich die Forschung auf dem Gebiet der Kartographie immer mehr mit Modellen semantischer Räume, die auf humanen Konzepten (wie Zimmer und Gegenstände) beruhen. Wir haben einen Roboter entwickelt, der dazu fähig war, im Rahmen eines Wettbewerbs zur Erfassung von Häusern derartige Karten zu produzieren. Mithilfe von Sensoren eines neuen Typs, wie es die Tiefenkameras sind, zeigt dieses System, dass die Konstruktion solcher Modelle möglich ist, aber dass sie auf Systemen von großer Komplexität beruht.

Die Dronen : die fortschreitende Miniaturisierung und ihre Auswirkung auf die Entwicklung ihrer Verwendungen

Catherine Fargeon und Peter Van Blyenburgh

Die Welt der kleinen Dronen befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel. Unter kleiner Größe sind Dronen zu verstehen, die weniger als zehn Kilogramm wiegen. Dieser Typ des fliegenden Sensorenträgers ist nicht mehr nur der universitären Forschung vorbehalten, oder großen Konzernen, die für die Rüstung tätig sind, nicht einmal kleinen High-tech-Firmen ; es ist ein Sektor, der von den „geeks“ und den leidenschaftlichen Benutzern erobert wurde, egal ob sie dem Luftfahrtsektor angehören oder nicht. Diese Fluggeräte sind mit allen möglichen Sensoren bestückt und ermöglichen den Anbietern die verschiedensten Dienstleistungen. Welches wirtschaftliche und operationelle Potenzial steckt in dieser kulturellen und technologischen Revolution ?

An overview of medical robotics in Iran

Farzam Farahmand, Hamid R. Amirnia, Saeed Sarkar, Saeed Behzadipour, Alireza Ahmadian und Alireza Mirbagheri

Von den neuen Konzepten der Robotik zu den innovativen Anwendungen

Die Co-botik : von den Industrierobotern zu den kollaborativen Assistenzrobotern

Michel Devy

Was ist heute die industrielle Robotik ? Selbsttätige Greifarme zur Ausführung sich wiederholender Aufgaben in schneller

Abfolge oder fahrerlose Fahrzeuge, die sich auf festgelegten Bahnen fortbewegen ... Die Anwendung dieser automatisierten Lösungen hat eine starke Auswirkung auf die Umwelt der Menschen ; sie müssen hohen Sicherheits- und Festigkeitsanforderungen genügen und sind von geringer Flexibilität und begrenzter Anpassungsfähigkeit.

Neue Roboter zur Unterstützung menschlicher Tätigkeiten sind nunmehr auf dem Markt erhältlich. Zudem hat sich die Robotikforschung seit etwa zehn Jahren äußerst schnell weiterentwickelt und verfolgt dabei das Ziel, Serviceroboter für den menschlichen Bedarf bereitzustellen und Anwendungen für die Unterstützung von Personen zu entwickeln.

Warum könnte ein Roboter, der einen Menschen außerhalb seines Arbeitsumfeldes begleitet, dies nicht auch in einer Werkstatt tun ? Wie kann die Industrie aus den neuen Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Servicerobotik Nutzen ziehen ? Die Antworten auf diese Fragen sind komplex, da die Zwänge in den verschiedenen Anwendungsgebieten unterschiedlich sind. Wir beschreiben einige der Schwierigkeiten, die noch überwunden werden müssen, bevor eine Co-botik entstehen kann, eine kollaborative Robotik, die zwischen dem Industrieroboter und dem Menschen vermittelt.

Humanoide Mehrzweckroboter : Nao und die Nachfolger

Bruno Maisonnier

Industrieroboter wurden erstmals in den 1950er Jahren in den Vereinigten Staaten geschaffen (mit der Absicht, die Produktion zu optimieren), während die Assistenzrobotik für den Dienst am Menschen in Japan in den 1980er Jahren als Antwort auf die Alterung der Bevölkerung dieses Landes konzipiert wurde.

Der Unfall des Atomkraftwerks von Fukushima hat den Bedarf an Maschinen bewusst gemacht, die über die Mobilität und Gelenkigkeit des Menschen verfügen, ohne durch dessen Empfindlichkeit eingeschränkt zu sein.

An den Roboter im Dienst am Menschen werden mehrere Ansprüche gestellt : die gelingende Interaktion zwischen Roboter und Mensch, die Gelenkigkeit, die Fähigkeit, das Umfeld zu erfassen und zu analysieren und die Sicherheitsgarantie für die Menschen, die mit ihm agieren.

Es handelt sich um einen Komplex von Herausforderungen, die nur durch die Entwicklung von Partnerschaften zwischen Industrie und Forschung angenommen werden können. Ziel ist es schließlich, in der Lage zu sein, vom Stadium der Herstellung von Prototypen zu einer wahren industriellen Produktion von Servicerobotern zu gelangen.

Die Integration von Robotern im Alltag (insbesondere von humanoiden Robotern)

Olivier Ly und Hugo Gimbert

Diese Artikel befasst sich mit der Verbreitung der Roboter, insbesondere der humanoiden Roboter, im breiten Publikum. Bis jetzt fand die Robotik ihre Anwendungsbereiche vornehmlich im Bereich der Produktionswerkzeuge. Doch seit kurzem dringt sie in die breite Öffentlichkeit vor und macht auf dem Markt wahre Roboter allgemein zugänglich. Die Möglichkeiten sind von großer Vielfalt, doch gibt es auch noch Hindernisse. Der vorliegende Artikel befasst sich mit den vorhandenen Potentialitäten und prüft die wichtigsten Herausforderungen, die vom technologischen wie vom industriellen und kommerziellen Blickpunkt aus noch anzunehmen sind.

Ein Leben mit Robotern : die Gestaltung von Beziehungen

Dominique Sciamma

„Robjekte“ (Zusammenziehung von „Roboter“ und „Objekt“) sind mehr als nur technische Objekte, denn sie besitzen eine neue Dimension, eine soziale Dimension, in der die Objekte Verhaltensweisen und nicht nur Funktionalitäten verkörpern. Das „Robjekt“ wird zu einem „intelligenten“ Akteur - nicht nur in der Beziehung zum Menschen, sondern auch zu anderen Objekten.

Auf diesem neuen Gebiet wird der Designer die große Verantwortung dafür tragen, wie die Roboter von morgen in verschiedenen Lebenssituationen aussehen und wie das „Zusammenleben“ gestaltet wird. Die entscheidende Herausforderung für den Designer besteht darin, eine gelungene soziale Anpassung der Roboter zu erreichen.

Die Perspektiven der Robotik im Rahmenprogramm 2014-2020 der EU

(Horizont 2020)

Welche Prioritäten für Frankreich ?

Patrick Schouller und Frédéric Laurent

Patrick Schouller und Frédéric Laurent repräsentieren Frankreich im Ausschuss für die Themen Informationstechnologien und Kommunikation des Rahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung. Sie bieten in diesem Artikel einen

Überblick über das bisherige europäische Vorgehen auf dem Gebiet der Robotikforschung und über die Hoffnungen bezüglich der Themen im nächsten europäischen Forschungsprogramm bis zum Jahr 2020.

Sonderthema

Zusammenfassung des Kolloquiums über die rechnergestützte Technik, das am 25. November 2011 von der Académie des Technologies, vom Conseil Général de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies (CGIET) und vom Conseil Economique, Social et Environnemental veranstaltet wurde.

Romain Bordier, Laurent Guerin et Jonathan Nussbaumer

Am 25. November fand im Versammlungssaal des *Conseil Economique, Social et Environnemental* (CESE) ein Kolloquium über die rechnergestützte Technik statt, das von der *Académie des Technologies*, vom *Conseil Economique, Social et Environnemental* (CESE) sowie vom *Conseil Général de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies* (CGIET) organisiert wurde.

Der Untertitel dieses Kolloquiums *Entre ruptures technologiques et progrès économique et sociétal* lenkte die Aufmerksamkeit der Teilnehmer sogleich auf das ehrgeizige Ziel des Gedankenaustausches und auf den Umfang der Themen, die als eine Ingenieursdisziplin unter anderen hätten wahrgenommen werden können.

A NUESTROS LECTORES DE LENGUA ESPAÑOLA

LOS ROBOTS: NUEVOS CONCEPTOS, NUEVOS USOS

Este dossier fue coordinado por **Françoise Roure** y **Lionel Arcier**

Editorial

Pierre Couveinhes

Prefacio

Françoise Roure y **Lionel Arcier**

Panorama por sector

A la conquista de los abismos, los robots submarinos

Dominique Vilbois

El fondo del mar sigue siendo en gran parte misterioso. Sin embargo, su exploración y explotación son grandes retos para el futuro de nuestro planeta. La explotación de los recursos naturales (pesca y minerales orgánicos, petróleo y gas) y el estudio de su influencia en el clima son retos ineludibles que se deben afrontar si se quiere ofrecer un futuro a las generaciones venideras. Los avances en la robótica submarina permiten prever un mejor conocimiento y uso de este medio inaccesible para los seres humanos. En este artículo se presenta el estado actual de la robótica submarina, sus aplicaciones civiles (disponibles actualmente y en un futuro próximo) y, por último, una breve descripción de un mercado nuevo y atractivo.

La aplicación robotizada de pintura en la industria automovilística

Soluciones que permiten ahorrar energía gracias al concepto de carga interna

El valor añadido (en términos de calidad, seguridad, etc.) de la robótica en la industria aeronáutica

Pierre-Laurent Kociemba

Hoy en día, un nuevo escenario global está emergiendo en la industria aeronáutica. China, que ahora forma parte de las principales potencias, invierte en la creación de una industria aeronáutica nacional sólida. Su principal objetivo es convertirse en un competidor feroz para los actores existentes. Para enfrentar estos nuevos desafíos, los líderes mundiales del sector, Airbus y Boeing, deben mejorar cada año su competitividad mediante la inversión en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías (carbono, propulsión, alas) y nuevas estrategias de producción (como el *lean manufacturing*).

Cédric Perres y **Asbed Kechichian**

La aplicación automatizada de pintura (en este caso en la industria del automóvil) debe adaptarse a las capacidades de los robots con el fin de optimizar la relación entre la velocidad de aplicación (que depende del robot) y el volumen pulverizado (que depende del aspersor). La solución robotizada Accubell 709 Evo, de SAMES, ha cambiado radicalmente para satisfacer los nuevos usos.

El problema de la seguridad en el uso de robots industriales

Adel Sghaier y **Philippe Charpentier**

Desde hace algunos años la robótica conoce un desarrollo importante. Las aplicaciones que utilizan robots son cada vez

más variadas y los límites físicos entre el hombre y el robot se reducen. Por ello, nuevos problemas relacionados con la seguridad y la prevención de accidentes de trabajo aparecen en esta área, lo que requiere la identificación y reducción de riesgos asociados con el uso de dichos robots. Es importante imaginar sistemas que permitan al hombre trabajar en toda seguridad con los robots. La primera parte del artículo ofrece un panorama de los estudios en torno a la seguridad de la robótica industrial, al igual que un estudio preliminar de los accidentes causados por robots. En la segunda parte del artículo se analizan soluciones para mejorar la seguridad.

Las acciones de CAP robotique

Philippe Roy y **François Hanat**

Cap Robotique es un *cluster* de innovación que reúne unas cincuenta estructuras (PYMES, laboratorios de investigación, diseñadores) que participan en una larga línea de innovaciones que en el futuro revolucionarán nuestra actitud frente a las enfermedades, el aislamiento, el esfuerzo, etc. y dará un nuevo impulso a los modelos de enseñanza, atención médica y ocio.

La economía de la robótica, nuevos datos y desafíos presentes

Françoise Roure y **Grégoire Postel-Vinay**

A través de la automatización y la estandarización de la calidad, la economía industrial de la máquina herramienta tenía como objetivo aumentar la productividad total de los factores de producción mediante una reducción drástica del coste de la mano de obra.

En la economía de la robótica, a la contribución respectiva de los factores de producción (trabajo y capital) se añade el factor "conocimiento", que combina la información y su puesta en práctica mediante la acción.

Además de en la industria, es muy probable que el uso de los robots aumente, en particular en el área de servicios humanos, como resultado del envejecimiento de la población.

De esta manera, la robótica porta nuevas y grandes perspectivas debido a su especificidad, en el cruce de muchas ciencias: mecánica, programación software, electrónica, nanotecnología, explotación de materiales, medicina, análisis de riesgos, economía, sociología, marketing y ciencias de la comunicación.

Los desarrollos en perspectiva y la preparación del futuro

Nuevos usos de los robots móviles

Guy Caverot

La robótica, utilizada al principio en la logística de producción para reducir costes, mejorar la calidad del producto y racionalizar los flujos dentro de las fábricas, descubre nuevas aplicaciones en los campos de la construcción, la salud o la industria nuclear.

La empresa *BA systèmes* moviliza su *know-how* industrial para satisfacer las nuevas necesidades relacionadas con la protección de los seres humanos, la optimización de sus movimientos, su seguridad y la automatización de actividades en entornos inhóspitos.

Para afrontar el reto de la diversificación, *BA Systèmes* ha adoptado una organización única de la innovación creando un puesto específico, el de innovador de relaciones, encargado de desarrollar vínculos externos, principalmente con los laboratorios de investigación y los usuarios.

Hacia una cartografía semántica de los entornos internos

David Filliat

Para la robótica, la investigación cartográfica se basa cada vez más en los modelos de entornos semánticos que contienen conceptos humanos (por ejemplo, piezas u objetos). Hemos desarrollado un robot capaz de construir dichos mapas como parte de un concurso de exploración de edificios. Este sistema, que utiliza cámaras de profundidad, un nuevo tipo de sensores, demuestra que la construcción de estos modelos es posible, aunque se basa en sistemas de gran complejidad.

Los UAV, su miniaturización continua y el impacto en el despliegue de su uso

Catherine Fargeon y Peter Van Blyenburgh

El mundo de los pequeños UAV está cambiando rápidamente. En este caso pequeño quiere decir menos de diez kilos. Este tipo de portador aéreo de sensores ya no es el privilegio exclusivo de las universidades, de los principales grupos de armamento ni de las pequeñas empresas de alta tecnología. Es un sector que se ha visto invadido por los *geeks* y los usuarios aficionados, ya sean de la industria aeronáutica o no. Estos equipos aéreos transportan una variedad de sensores que permiten a sus operadores ofrecer toda una serie de servicios. ¿Cuáles son los desafíos económicos y operativos de esta revolución cultural y tecnológica?

Presentación general de los robots médicos en Irán

Farzam Farahmand, Hamid R. Amirnia, Saeed Sarkar, Saeed Behzadipour, Alireza Ahmadian y Alireza Mirbagheri

Artículo en inglés sin traducción.

De los nuevos diseños de la robótica a los usos innovadores

La cobótica, de los robots industriales a los robots asistentes, cooperantes y co-operadores

Michel Devy

¿Qué es la robótica industrial hoy en día? Brazos manipuladores autónomos que realizan tareas repetitivas a alta velocidad o una carretilla sin conductor que sigue rutas fijas. La implementación de estas soluciones robotizadas tiene un impacto considerable sobre el entorno humano, deben cumplir con restricciones de seguridad y de robustez, y se caracterizan por su poca versatilidad y capacidad de adaptación limitada.

En la actualidad, nuevos brazos accionables cerca de los operadores humanos están disponibles en el mercado. Además, en los últimos diez años, la investigación en robótica ha avanzado rápidamente, hacia la robótica de servicios en un entorno humano con el objetivo de asistir a las personas.

¿Por qué un robot, compañero del hombre fuera de su entorno de trabajo, no puede serlo en una fábrica? ¿Cómo puede la industria sacar provecho de los resultados de nuevas investigaciones en robótica de servicios? Las respuestas a estas preguntas son complejas, ya que las restricciones son muy diferentes dependiendo de las diversas áreas de aplicación. En el artículo se analizan algunos de los retos que se deben afrontar para el

surgimiento de la cobótica, una robótica colaborativa entre el robot industrial y el hombre.

Robots humanoides multi-aplicaciones, el Nao y sus sucesores

Bruno Maisonnier

Si los robots industriales se introdujeron en los Estados Unidos en 1950 (con el objetivo de optimizar la producción), la robótica al servicio del hombre aparece en Japón en la década de 1980, en respuesta al envejecimiento de la gente de ese país.

El accidente de la central nuclear de Fukushima reiteró la necesidad de contar con máquinas con las capacidades de movilidad y agilidad del hombre, pero sin sus puntos débiles.

El robot al servicio de la humanidad debe enfrentar varios retos: lograr la interacción entre el robot y el hombre, desarrollar la agilidad del robot, su capacidad para percibir y analizar su entorno y, sobre todo, garantizar la seguridad de las personas a su alrededor.

Una serie de desafíos que sólo pueden ser satisfechos con el desarrollo de asociaciones entre el mundo de la industria y de la investigación, con el objetivo de pasar de la fabricación de prototipos robóticos al de una verdadera industria de la robótica de servicios.

La inserción de los robots en la vida diaria (con un enfoque especial en los robots humanoides)

Olivier Ly y Hugo Gimbert

En este artículo se aborda el tema de la implementación de robots, especialmente los robots humanoides, a gran escala. Hasta ahora, la robótica encuentra principalmente sus aplicaciones en las herramientas de producción. Sin embargo, recientemente ha surgido en el mercado de consumo, poniendo los robots al alcance de todos. El potencial es enorme, pero aún quedan muchos obstáculos. En este artículo se describe el potencial y se examinan los principales retos tanto en términos de puntos de vista tecnológico como industrial y comercial.

Vivir con robots. Diseñar la relación

Dominique Sciamma

Mucho más que objetos técnicos, los “robotjetos” (abreviatura de “robot” y “objeto”) ponen de manifiesto una nueva dimensión, una dimensión social donde los objetos portan una conducta y no sólo funciones.

El *robotjeto* se convierte en un actor “inteligente” de la relación no sólo al hombre sino también a otros objetos.

En este nuevo entorno, el diseñador tendrá la responsabilidad principal de crear los robots del futuro teniendo en cuenta las situaciones de la vida diaria, reestructurando el “convivir”. El reto para el diseñador es lograr una integración social de los robots.

Las perspectivas de la robótica en el programa marco 2014-2020 de la Unión europea (Horizonte 2020)

¿Cuáles son las prioridades francesas?

Patrick Schouller y Frédéric Laurent

En este artículo Patrick Schouller y Frédéric Laurent, los dos representantes de Francia en el Comité de Gestión del tema de las Tecnologías de la Información y la Comunicación del Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico, realizan una presentación general de lo que ha sido el enfoque europeo en la investigación sobre robótica y de los temas que pueden aparecer en el próximo programa europeo de investigación Horizon 2020.

Otros temas

Síntesis del coloquio sobre la ingeniería digital organizado el 25 de noviembre de 2011 por la Academia Francesa de Tecnología, por el Consejo General Francés de la Industria, Energía y Tecnología (CGIET) y por el Consejo Económico, Social y Ambiental.

Romain Bordier, Laurent Guerin et Jonathan Nussbaumer

El 25 de noviembre pasado se celebró en el hemiciclo del Consejo Económico, Social y Ambiental francés (CESE) un

simposio sobre la ingeniería digital, organizado por la Academia de Tecnología, el Consejo Económico, Social y Ambiental (CESE) y el Consejo General de Industria, Energía y Tecnología (CGIET).

El subtítulo *Entre rupturas tecnológicas y progreso económico y social* dado a este evento llamó inmediatamente la atención de los participantes sobre la ambición de esta jornada de reflexión y el alcance de las cuestiones planteadas por lo que podría considerarse como una disciplina de la ingeniería, entre tantas otras.

Fondées en 1794, les Annales des Mines comptent parmi les plus anciennes publications économiques. Consacrées hier à l'industrie lourde, elles s'intéressent aujourd'hui à l'ensemble de l'activité industrielle en France et dans le monde, sous ses aspects économiques, scientifiques, techniques et socio-culturels.

Des articles rédigés par les meilleurs spécialistes français et étrangers, d'une lecture aisée, nourris d'expériences concrètes : les numéros des Annales des Mines sont des documents qui font référence en matière d'industrie.

Les *Annales des Mines* éditent trois séries complémentaires :

**Réalités Industrielles,
Gérer & Comprendre,
Responsabilité & Environnement.**

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

Quatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* fait le point sur un sujet technique, un secteur économique ou un problème d'actualité. Chaque numéro, en une vingtaine d'articles, propose une sélection d'informations concrètes, des analyses approfondies, des connaissances à jour pour mieux apprécier les réalités du monde industriel.

GÉRER & COMPRENDRE

Quatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* pose un regard lucide, parfois critique, sur la gestion « au concret » des entreprises et des affaires publiques. *Gérer & Comprendre* va au-delà des idées reçues et présente au lecteur, non pas des recettes, mais des faits, des expériences et des idées pour comprendre et mieux gérer.

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

Quatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* propose de contribuer aux débats sur les choix techniques qui engagent nos sociétés en matière d'environnement et de risques industriels. Son ambition : ouvrir ses colonnes à toutes les opinions qui s'inscrivent dans une démarche de confrontation rigoureuse des idées. Son public : industries, associations, universitaires ou élus, et tous ceux qui s'intéressent aux grands enjeux de notre société.

ABONNEZ-VOUS AUX ANNALES DES MINES

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

et

GÉRER & COMPRENDRE

et

**RESPONSABILITÉ
& ENVIRONNEMENT**

**DEMANDE DE
SPÉCIMEN**

BULLETIN D'ABONNEMENT

A retourner accompagné de votre règlement
aux Editions ESKA <http://www.eska.fr>

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 Paris
Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35

Je m'abonne pour 2012 aux Annales des Mines :

Réalités Industrielles

4 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 88 €	<input type="checkbox"/> 107 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 114 €	<input type="checkbox"/> 138 €

Réalités Industrielles + Responsabilité & Environnement

8 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 168 €	<input type="checkbox"/> 202 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 211 €	<input type="checkbox"/> 273 €

Réalités Industrielles + Gérer & Comprendre

8 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 168 €	<input type="checkbox"/> 202 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 211 €	<input type="checkbox"/> 273 €

Réalités Industrielles + Gérer & Comprendre + Responsabilité & Environnement

12 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 214 €	<input type="checkbox"/> 271 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 317 €	<input type="checkbox"/> 379 €

Nom

Fonction

Organisme

Adresse

Je joins : un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
 un virement postal aux Editions ESKA,
CCP PARIS 1667-494-Z
 je souhaite recevoir une facture

DEMANDE DE SPÉCIMEN

A retourner à la rédaction des Annales des Mines
120, rue de Bercy - Télédod 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68 - Fax : 01 53 18 52 72

Je désire recevoir, dans la limite des stocks
disponibles, un numéro spécimen :

- de la série **Réalités Industrielles**
 de la série **Gérer & Comprendre**
 de la série **Responsabilité & Environnement**

Nom

Fonction

Organisme

Adresse

Publié par
**ANNALES
DES
MINES**
Fondées en 1794

Fondées en 1794, les Annales des Mines comptent parmi les plus anciennes publications économiques. Consacrées hier à l'industrie lourde, elles s'intéressent aujourd'hui à l'ensemble de l'activité industrielle en France et dans le monde, sous ses aspects économiques, scientifiques, techniques et socio-culturels.

Des articles rédigés par les meilleurs spécialistes français et étrangers, d'une lecture aisée, nourris d'expériences concrètes : les numéros des Annales des Mines sont des documents qui font référence en matière d'industrie.

Les Annales des Mines éditent trois séries complémentaires :

**Réalités Industrielles,
Gérer & Comprendre,
Responsabilité & Environnement.**

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines fait le point sur un sujet technique, un secteur économique ou un problème d'actualité. Chaque numéro, en une vingtaine d'articles, propose une sélection d'informations concrètes, des analyses approfondies, des connaissances à jour pour mieux apprécier les réalités du monde industriel.

GÉRER & COMPRENDRE

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines pose un regard lucide, parfois critique, sur la gestion « au concret » des entreprises et des affaires publiques. Gérer & Comprendre va au-delà des idées reçues et présente au lecteur, non pas des recettes, mais des faits, des expériences et des idées pour comprendre et mieux gérer.

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines propose de contribuer aux débats sur les choix techniques qui engagent nos sociétés en matière d'environnement et de risques industriels. Son ambition : ouvrir ses colonnes à toutes les opinions qui s'inscrivent dans une démarche de confrontation rigoureuse des idées. Son public : industries, associations, universitaires ou élus, et tous ceux qui s'intéressent aux grands enjeux de notre société.

L'INDUSTRIE
AU
CONCRET