



2- Les grands défis de la robotique du 21^e siècle



science, technologie, et société





Introduction

Les robots sont partout : dans les usines et dans les champs, au fond des mers et dans l'espace, dans les jardins et les salons. Ils ont une importance économique grandissante, et d'aucuns prédisent qu'ils seront au XXI^e siècle ce que la voiture fut au XX^e siècle. En outre, ils n'ont pas seulement pénétré le monde industriel, ils sont aussi entrain de pénétrer notre vie quotidienne et notre culture, et certains d'entre eux participent au renouvellement de la vision que nous avons de nous même. Cette révolution annoncée, dont l'impact sur la science, l'industrie et la société sera potentiellement très grand, va cependant de paire avec un certain nombre de grands défis à résoudre, tant technologiques que sociétaux. Il est ainsi fondamental que le grand public en soit informé, et participe à la réflexion sur les enjeux sociétaux qui sont impliqués. Ce besoin est d'autant plus aigu que la robotique est un domaine très diffus dont les progrès sont continus et progressifs, le plus souvent sans singularités où évolutions soudaines qui permettraient d'attirer l'attention de la société sur ce qui va néanmoins à long terme profondément la modifier.

C'est pourquoi il est particulièrement pertinent qu'une institution comme la Cité des Sciences et de l'Industrie mette en place une exposition et/ou une série d'évènements sur cette question. Ces événements/exposition(s) pourraient par exemple se structurer autour de la notion de grands défis, tant technologiques que sociétaux, afin de faire prendre conscience au grand public quel est aujourd'hui l'état des technologies (par opposition à l'imaginaire que l'on peut s'en faire au travers du cinéma et de la littérature), dans quelle direction elles évoluent, et quels sont leurs impacts potentiels. Voici un panorama des grands défis actuels de la robotique.





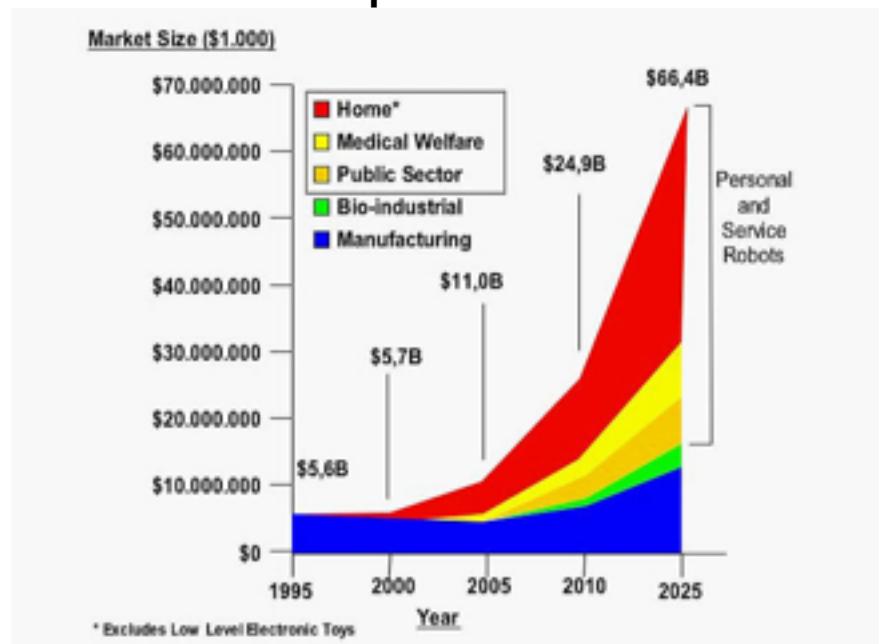
Les grands défis de la robotique

Cette présentation s'organise autour de deux types de grands défis : d'abord des défis articulés autour de grands domaines applicatifs (défis 1, 2, 3, 4, 5, 6), et ensuite un grand défi transversal (défis 7). Chacun de ces grands défis est lui-même présenté et organisé sous la forme d'un ensemble de sous-défis.

I- Les défis de la robotique personnelle et domestique

De nombreuses études prédisent que les robots auront dans les décennies à venir une présence dans notre quotidien, et à la maison en particulier, aussi importante que les voitures au 20^e siècle (voir ci-dessous). On observe un accroissement relatif très net de la robotique domestique et personnelle.

Projection de l'évolution du marché de la robotique dans les prochaines années



(source: Japan Robotics Association).

Alors que la robotique classique et industrielle s'articulait autour des trois D, « dull, dirty and dumb », caractérisant les travaux stupides, ennuyeux et sales pour lesquels les robots devaient remplacer les hommes, une nouvelle robotique se développe autour des trois E, « education, entertainment, everyday », dans laquelle les robots sont présents pour nous accompagner au quotidien pour nous rendre service, nous stimuler, et nous amuser. C'est pourquoi on parle de robotique de compagnie et de robotique personnelle.

Dans ce contexte, c'est une zoologie variée qui arrive et sur laquelle travaille de nombreux chercheurs, mais pour laquelle des défis très



importants restent à résoudre. D'abord, ce sont des robots en accord avec l'imaginaire populaire, qui nous aident dans les tâches domestiques : robots aspirateurs, robots tondeuses, robots de télé-présence qui nous permettent par leur intermédiaire de nous balader dans la maison d'un ami à qui on téléphone, ou plus prospectivement robots qui rangent la chambre des enfants, robots qui nous servent le café au salon, qui surveillent le chat quand on est parti en vacances, ou qui aident et accompagnent une personne âgée quand elle veut sortir pour aller faire des courses.

Afin d'être capables d'évoluer dans un environnement qui est adapté aux humains, beaucoup travaillent sur le développement de robots humanoïdes, idéalement capables de monter les marches d'un escalier, de prendre avec leurs main une tasse et d'y verser du thé, et dont la morphologie peut faciliter les interactions avec les humains.

Une autre famille de robots est en plein essor : les robots ludiques et d'accompagnement social. De forme parfois animaloïde, leur objectif est d'enrichir la vie sociale, émotionnelle, intellectuelle, et parfois même esthétique des humains avec lesquels ils interagissent. Successeur potentiels des consoles de jeux vidéos actuelles, on peut les imaginer comme partenaires pour jouer à cache-cache, au football, à la marelle, à des jeux de société avec petits et grands.

On peut aussi les imaginer lire des histoires, faire travailler aux enfants de manière ludique leurs tables de multiplication, ou discuter avec les personnes âgées pour leur rappeler ce qu'elles ont fait dans leur journée ou ce qu'elles doivent faire le lendemain quand elles commencent à perdre la mémoire. Au contraire d'une technologisation du quotidien, on peut même imaginer que les robots, dont l'une des caractéristiques principales est de s'adapter à l'homme plutôt que le contraire, pourraient permettre d'humaniser la technologie et de la rendre accessible à un plus grand nombre. En remplacement des souris, des claviers, des écrans, des télécommandes, des robots anthropomorphes capables à la fois de comprendre ce que veulent les humains en observant leurs gestes naturels et en les écoutant, et de le traduire automatiquement à tous les appareils électroniques de la maison permettrait de réduire considérablement nos apprentissages et de communiquer avec les machines comme nous communiquons entre nous.





Une troisième tendance va à rebours de l'imaginaire que nous pouvons avoir des robots : plutôt que l'arrivée de robots anthropomorphes bipèdes dans nos maisons, les objets du quotidien, et les maisons elles-mêmes, sont entrain de se transformer en robot. Des écrans se voient dotés d'un cou robotisé et d'une caméra en guise d'yeux qui les font suivre du regard les habitants d'une maison, et quand ceux-ci font certains gestes les écrans-robots peuvent lancer tel morceau de musique ou contrôler les lampes de la maison pour créer telle ambiance lumineuse. Des caméras-projecteurs articulés et fixés au plafond détectent quand quelqu'un s'assoit à une table et d'un clac de doigt projettent devant lui un écran tactile avec lequel il peut interagir. Il change de chaise et l'écran le suit. Sur une commode, des tiges aux allures végétales sont en fait des robots, et leurs postures reflètent les prévisions météo ou le degré d'activité dans la maison. Sur le sol, une chaîne hi-fi en forme d'œuf qui roule au rythme de la musique, et suit un habitant quand il change de pièce.

Malgré la diversité qui caractérise cette zoologie de robots sur lesquels travaillent de nombreux chercheurs et de nombreuses entreprises, un certain nombre de défis très importants qui les caractérisent à peu près tous sont à relever avant que cette vision ne devienne réalité.

Locomotion, dextérité, morphologie pour se déplacer et manipuler.

Tout d'abord les robots domestiques doivent être capables de se déplacer dans une maison qu'ils ne connaissent pas au départ, c'est-à-dire d'une part savoir comment d'aller d'un endroit à un autre, et d'autre part savoir monter les escaliers ou se frayer un chemin au milieu d'une chambre en bazar. Techniquement et du point de vue d'un robot, une maison est un environnement aussi hostile que la planète Mars ou un champ de bataille.

Comment un robot peut-il se construire une carte de la maison sachant qu'un humain peut le déplacer à tout moment ou réorganiser la disposition de ses meubles ? Comment peut-il être capable de se déplacer efficacement, être assez puissant pour pouvoir transporter des objets, mais ne pas être trop encombrant ? Une solution naturelle explorée par de nombreux chercheurs est de construire des robots humanoïdes dont la morphologie s'inspire de celle des humains. Mais cela pose de très grands problèmes techniques : comment un humanoïde peut-il arriver à marcher à deux jambes dans un tel environnement ? Enfin, comme on l'a vu plus haut, on doit pouvoir attendre de ces robots qu'ils puissent manipuler nos objets quotidiens : outils, poignées de porte, balais, jouets, assiettes et tasses, etc. Hors les recherches sur la dextérité des robots sont bien moins avancées que celles sur la mobilité du bas du corps. Comment construire des mains robotisées de la taille d'une main humaine et avec autant de degrés de libertés et de capacités tactiles ? Comment un robot peut-il planifier les mouvements de son bras et de sa main pour parvenir à attraper un objet ?





Perception et interprétation des comportements humains.

L'un des défis majeurs de la robotique personnelle caractérise la présence centrale d'humains non-ingénieurs dans ces environnements quotidiens: pour pouvoir rendre service à l'homme, ou pour pouvoir le divertir, le stimuler, ou l'accompagner, il est fondamental que ces robots soient capables de percevoir et de comprendre ses comportements, son état émotionnel, ses gestes, ses activités, et les situations sociales. D'abord, comment un robot peut-il repérer la présence d'un humain, localiser son visage et en identifier les expressions et la direction du regard, comprendre ce qu'un humain lui montre quand il pointe avec son doigt ? Comment cela peut-il être réalisé efficacement alors que le robot n'est pas en face de l'humain et le perçoit au milieu d'un paysage visuel complexe ? Comment un robot peut-il savoir qui parle et détecter des commandes dans le flux de parole ? Un robot peut-il détecter quand un humain est content, triste ou en colère ? Comment peut-il comprendre qu'à un moment donné, il est assis entrain de manger ou lire, ou marche en direction de la salle de bain pour y prendre une douche ?

Interactions sociales homme-robot.

Etre capable de comprendre le comportement des humains ou une situation sociale n'est pas suffisant. Les robots domestiques doivent être capable eux-mêmes de se comporter correctement socialement, d'être agréables et polis. Un robot ludique qui observe que son propriétaire est entrain de discuter au téléphone ou de regarder un film devrait pouvoir comprendre qu'il faut le laisser tranquille et ne pas l'embêter en lui demandant de venir jouer avec lui. Si un humain demande à un robot de lui servir un thé, celui-ci doit apporter le thé avec des gestes lents et lui tendre de manière à ce que la tasse soit facile à attraper mais sans trop s'approcher. Comment peut-on modéliser ce qu'est un comportement « agréable » et « poli » ? Comment un robot peut comprendre quel comportement il peut adopter ou pas dans une situation sociale donnée ? Par ailleurs, un robot personnel doit aussi savoir se faire comprendre, être transparent pour ses partenaires humains. Comment peut-il exprimer ses états internes ? Est-il utile de lui donner la capacité d'exprimer des émotions ? Si oui, comment peut-il le faire en modifiant l'intonation de sa voix, les expressions de son visage, où avec la posture de son corps et ses gestes ?

Plus généralement, la morphologie de ces robots n'est pas seulement importante pour leur permettre de se déplacer et de manipuler des objets. Elle est aussi essentielle pour les interactions sociales : quelle que soit sa forme, les humains projettent des attentes sur le robot provoquées par son allure, sa forme et ses mouvements. En face d'un robot en forme de chiot, beaucoup d'humains vont s'attendre à ce qu'il se comporte un peu comme un chiot et vont lui faire des caresses sous le menton. Devant un robot humanoïde de petite taille et aux formes arrondies, beaucoup s'accroupissent spontanément pour lui parler avec la même intonation que l'on utilise pour parler aux bébés humains. Devant un robot à roue de forme rectangulaire, les humains utilisent plus difficilement leurs modes de communication naturels. Comment élaborer le design, la forme, les couleurs, les mouvements d'un robot de telle manière que les humains puissent utiliser spontanément leurs modes de communication habituel ?





Faut-il essayer de construire des humanoïdes les plus ressemblants possibles aux humains, ou au contraire privilégier des formes anthropomorphes mais clairement distinctes ? Par ailleurs, comment concevoir des robots dont les attentes qu'ils provoquent ne soient pas très différentes de ces capacités réelles ? En effet, certains robots humanoïdes de grande taille et dotés de système de dialogue peuvent laisser penser, dans les premières interactions, qu'ils sont très intelligents. Hors la technologie est encore très loin de pouvoir répondre à ces attentes : très vite, les utilisateurs s'aperçoivent du décalage et sont frustrés.

Compréhension et utilisation du langage.

Bien que les systèmes de reconnaissance vocale et de dialogue automatique commencent à faire leur apparition chez les robots, nous sommes encore très loin de pouvoir permettre aux robots de véritablement comprendre les phrases qu'ils entendent ou prononcent, de les relier de manière pertinente et efficace au monde physique et social. Comment un robot peut-il comprendre le sens des mots ? Savoir ce qu'est une « chaise », une « télévision », un « chat » ? Certains mots peuvent être associés à certains motifs visuels ou à certaines actions par un ingénieur, mais il est impossible de tout encoder à l'avance : comment un robot peut-il inférer le sens d'un mot nouveau que veut lui enseigner un humain ? Aussi, le sens des phrases dépend fondamentalement de leur contexte. Par exemple, un enfant entrain de jouer à la marelle avec son robot pourrait lui demander : « va me chercher la pierre ? ». Le robot devrait pouvoir comprendre qu'il s'agit de la pierre avec laquelle ils sont entrain de jouer, et pas l'une de celles qui sont dans le massif de fleurs à côté. Comment un robot peut-il prendre en compte la situation physique et sociale pour inférer le sens des phrases qu'on lui prononce ?

Apprentissage, personnalisation et flexibilité.

Certains robots domestiques peuvent avoir une fonction précise, unique et fixe dans le temps : c'est le cas par exemple des robots aspirateurs. Beaucoup d'autres robots devront être capables d'adapter leur comportement à chaque personne et aux objets particuliers dans une maison, et à apprendre en permanence des savoir-faire nouveaux. Cela est à la fois essentiel pour permettre au robot de rester intéressant longtemps, en particulier pour les robots ludiques et d'accompagnement social, mais aussi tout simplement pour lui permettre d'aider l'humain efficacement. Par exemple, il est impossible pour un ingénieur de connaître à l'avance tous les objets que va devoir manipuler un robot en interaction avec son propriétaire, et donc a fortiori de préprogrammer la manière de les utiliser. Il va donc devoir apprendre à le faire, c'est-à-dire par exemple à allumer certaines lumières en appuyant sur certains boutons, à fermer une porte-fenêtre avec des poignées spéciales, à mettre des pions dans les trous adéquats d'un nouveau jeu acheté par un enfant, à s'assurer que le chat ne va pas dans une pièce qui lui est interdite, etc. Cela pose des défis scientifiques et techniques immenses et nous sommes loin d'y arriver. Comment un robot peut-il comprendre qu'il y a une tâche nouvelle à apprendre ? Comment peut-il réutiliser des savoir-faire déjà acquis pour apprendre une nouvelle tâche ? Comment peut-il arriver à se représenter une tâche nouvelle sans qu'un ingénieur intervienne et uniquement par le biais d'interactions simples et naturelles avec son propriétaire ? Une





fois qu'il a compris quelle était la tâche à apprendre, comment peut-il l'apprendre ? Comment peut-il apprendre en observant l'humain lui faire quelques démonstrations ? Comment ensuite peut-il s'entraîner tout seul pour raffiner ses performances ? Un robot peut-il être curieux et décider d'apprendre par lui-même des choses que l'humain ne lui a pas demandées ? Ces questions sont au centre des recherches de nombreux laboratoires, et caractérisent en particulier le domaine de la robotique développementale.

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

Bientôt nos voitures seront des robots. Déjà, à l'instar des avions contrôlés par des pilotes automatiques, des bus sans conducteurs font leur apparition dans certaines villes d'Europe et d'Asie sur des circuits qui leur sont réservés. Les voitures autonomes de transports de bagages et de matériel sont aussi présentes dans les aéroports. Quant à nos voitures quotidiennes, déjà très équipées en systèmes électroniques d'aide à la conduite, comme l'ABS, l'antipatinage ou le créneau semi-automatique disponible sur certains modèles, les chercheurs et les industriels travaillent intensément pour qu'elles puissent nous assister systématiquement, voire conduire à notre place. Les objectifs sont multiples : augmenter la sécurité des personnes, économiser l'énergie, diminuer les bouchons, permettre aux personnes handicapées de voyager en voiture, libérer les conducteurs pour qu'ils puissent s'occuper à autre chose pendant le trajet.

Ces recherches ont commencé dans les années 1980 et se sont d'abord concentré sur les mécanismes d'assistance à la conduite sur les autoroutes en conditions climatiques favorables pendant la journée : régulateurs de vitesse avancés qui maintiennent les distances entre les véhicules, synchronisation des vitesses des véhicules pour fluidifier le trafic, avertissements de changement de file ou aide au suivi automatique d'une file, dépassement automatique d'autres véhicules, « platooning » (les voitures se mettent à la file, et seul le conducteur de la première voiture conduit, les autres voitures le suivant à la queue leu leu), surveillance de l'état du conducteur (par exemple pour l'avertir quand il s'endort). Grâce au caractère structuré des autoroutes, ces techniques sont maintenant matures et quasi-prêtes à être industrialisées. Se pose maintenant les défis des environnements intra-urbains et des routes secondaires qui abondent dans les campagnes, qui regorgent d'imprévus, en particulier dus à la présence et au comportement des autres humains. En parallèle, avec l'augmentation du degré d'assistance de la voiture, se pose la question de l'utilisabilité, de l'ergonomie et de l'acceptabilité des tels systèmes par les conducteurs. Enfin, se pose la question des infrastructures qui pourraient en principe permettre aux voitures de mieux percevoir l'environnement routier : doit-on adapter les voitures robotisées aux infrastructures existantes, ou peut on imaginer une transition progressive vers une infrastructure au final complètement renouvelée ? Nous allons maintenant détailler ces défis.





Percevoir, naviguer et respecter le code de la route sur des routes inconnues.

Qu'elle soit semi-assistée ou complètement autonome, les systèmes automatisés de conduites doivent être capables de faire face à l'imprévu qui abonde dans les ruelles des villes et sur les routes de campagne. Cet imprévu concerne tout d'abord la topographie même des routes: Comment par exemple repérer où est la route quand il n'y a pas de lignes blanches ou quand le sol est pavé ? Comment détecter et éviter une poubelle tombée sur la chaussée ou une ornière ? Pour résoudre ces questions, un travail de développement des senseurs, de reconstruction tri-dimensionnelle en temps réel, et d'interprétation de cette scène est au centre des recherches de nombreux laboratoires. Ce travail était aussi l'un des éléments centraux posés par le concours annuel organisé par la DARPA, le « DARPA challenge », et dans lequel des véhicules autonomes devaient effectuer un parcours dans le désert sans communication extérieure et sans accident. Plusieurs années se sont soldées par des échecs, avant que récemment plusieurs équipes ne parviennent à relever le défi. La DARPA a alors déplacé ce défi dans un environnement intra-urbain, qui l'a complexifié. Dans la ville, outre la capacité d'évitement d'obstacles dangereux et soudains, la planification des trajectoires entre les autres voitures, ainsi que la capacité de détecter la route elle-même, la voiture automatisée devra être capables de respecter le code de la route, donc de percevoir et interpréter en contexte les panneaux sur le bord des routes. Comment un système peut-il détecter ces panneaux, les comprendre et adapter la trajectoire de la voiture de manière correspondante ?

Sécurité, piétons et interactions avec les véhicules non-robotisés.

Parmi les imprévus auxquels doivent faire face les voitures (semi) automatisées, le comportement des piétons et des autres voitures non-automatisées est au premier plan. Pour minimiser les risques d'accidents, l'évitement des obstacles et des piétons qui pourraient se trouver sur la chaussée ne peut pas se résumer à une réponse réactive : il est nécessaire d'anticiper. Hors par exemple cela implique la capacité à s'apercevoir qu'un enfant s'apprête à traverser une route sans avoir regardé ni à droite ni à gauche, afin de ralentir et s'arrêter avant qu'il ne se trouve devant la voiture sur la chaussée. Comment une voiture automatisée peut-elle repérer, percevoir, comprendre et anticiper le comportement d'humains aux abords des routes ? Les interactions entre les voitures (semi) automatisées et celles qui sont totalement contrôlées par un humain posent aussi problème. Imaginons qu'à un croisement le feu soit vert, et qu'au moment de démarrer on aperçoive sur la route perpendiculaire une voiture folle conduite par quelqu'un qui semble avoir bu trop d'alcool : un conducteur humain anticiperait le risque qu'elle grille son feu rouge et attendrait d'être sûr qu'elle s'arrête avant d'avancer. Une voiture automatisée pourrait-elle en faire autant ? Comment une voiture (semi) assistée peut-elle percevoir, interpréter et anticiper le comportement des voitures non-automatisées ?





Ergonomie et acceptabilité.

Par définition, les systèmes d'assistance à la conduite sont là soit pour avertir le conducteur de dangers potentiels, soit pour l'empêcher d'effectuer des manœuvres dangereuses, soit pour le remplacer partiellement ou totalement dans la conduite. Le système peut ainsi fréquemment être en conflit avec la volonté du conducteur. Comment arbitrer ? Comment rendre le système utilisable et faire que ces conflits potentiels ne soient pas la source d'accidents ? Par exemple, on peut imaginer qu'un système de limitation de vitesse qui empêche le conducteur de rouler au dessus d'une certaine vitesse puisse être très dangereux dans certaines situations de dépassement. Ensuite, au fur et à mesure que les voitures deviendront plus autonomes, le rôle des conducteurs ne consistera plus à décider de la trajectoire précise mais plutôt à donner des instructions à la voiture du type « tourne à gauche », « prend la direction de Paris » où « va jusqu'à la voiture bleue et gare toi derrière ». Comment permettre au conducteur de transmettre ces instructions de manière efficace, agréable et intuitive ? Cette question implique des travaux d'ergonomie et de facteurs humains très importants. Enfin, outre l'ergonomie, on peut s'attendre à ce que nombre de conducteurs préfèrent le plaisir de la conduite manuelle ou aient peur de se faire conduire par un robot. Comment peut-on rendre les véhicules automatisés socialement acceptables ?

Infrastructures.

Beaucoup des défis techniques qui se posent concernent la capacité des voitures automatisées à percevoir et interpréter leur environnement à la place du conducteur. Les difficultés sont principalement dues au fait que cet environnement est aujourd'hui non structuré, conçu pour l'homme et pas pour les voitures automatisées. On pourrait très largement simplifier ces problèmes si l'on modifiait l'environnement de manière à le rendre « communicant » avec les voitures : c'est déjà le cas par exemple dans les aéroports ou sur certaines voies réservées à des bus sans conducteurs dans plusieurs villes. Cela consiste par exemple à installer dans le macadam des éléments électromagnétiques ou des puces RFID très facilement repérables par des senseurs, qui non seulement peuvent informer la voiture de la forme de la route et de la position courante exacte, mais aussi des règles de circulation locale (l'équivalent informatique de nos panneaux de signalisation).

Cela vaudrait-il le coup que les routes soient systématiquement « augmentées » pour les voitures automatisées ? Comment opérer la transition, c'est-à-dire pouvoir continuer à intégrer des automobiles « classiques » dans un environnement fait pour des voitures intelligentes ? Etant donné les progrès de la localisation par ondes satellites/wifi/gprs, les progrès de l'imagerie satellite, et le développement de connexions internet mobiles à forte bande passante, pourrait-on imaginer par ces moyens pouvoir fournir à chaque voiture les informations dont elle a besoin sans recourir à des transformations physiques de nos réseaux routiers ?





3- Les défis de la robotique médicale : chirurgie, diagnostique, rééducation et stimulation comportementale et émotionnelle



Les robots ont fait leur entrée à l'hôpital, et sont une aide de plus en plus importante pour notre santé. La diversité des robots médicaux l'atteste. Tout d'abord, les robots d'assistance chirurgicale sont quotidiennement utilisés dans nombre d'hôpitaux depuis une quinzaine d'années. Plus récemment, d'autres robots, beaucoup plus petits, ont commencé à pousser la porte des blocs opératoires: des chercheurs mettent au point des capsules endoscopiques robotisées et miniaturisées capable d'explorer conduits intestinaux, artères ou veines pour aider le chirurgien dans son diagnostic. Autre domaine émergent de la robotique d'intervention médicale invasive : les prothèses de mains ou de bras entiers qui permettent à des personnes qui ont perdu le bras d'utiliser un bras robotique pour le remplacer (voir le « Luke arm » de Dean Kamen sur la figure).

Outre la chirurgie, de nombreux travaux en cours s'intéressent au développement de systèmes robotiques pour la rééducation ou la suppléance : par exemple, certains robots font faire des exercices personnalisés et adaptés en temps réel aux besoins d'un patient, et par ailleurs on commence à voir apparaître des exosquelettes qui pourraient permettre à des personnes incapables de marcher de recouvrir cette capacité (ou, dans un autre domaine, aux travailleurs et aux militaires pour décupler leurs forces, voir figure FIG).

Les chaises roulantes sont aussi l'objet de recherches importantes qui visent à en faire des véhicules semi-autonomes facilement contrôlables par la personne et dont la morphologie peut évoluer en fonction du contexte (voir la chaise qui permet à une personne d'avoir une hauteur « position debout » et qui maintient l'équilibre automatiquement sur la figure). Enfin, une dernière famille de robots investit le monde de la santé : les robots interactifs sociaux, de formes animaloïdes ou anthropoïdes, sont l'objet de recherches dans le cadre du diagnostic et de la thérapie de problèmes développementaux chez certains enfants (comme l'autisme), ainsi que dans le cadre de la stimulation cognitive de personnes âgées, notamment atteintes de la maladie d'Alzheimer.

En effet, par exemple en ce qui concerne l'autisme, ce sont des objets intermédiaires entre les objets inanimés sur lesquels ces enfants se focalisent de manière stéréotypée et ses partenaires humains dont la variabilité des comportements les effraie car ils n'arrivent pas à en faire sens. Entre les deux, les robots interactifs sociaux semblent redonner à ces enfants un peu de confiance dans leur capacités d'interactions sociales,





et des chercheurs ont montré qu'ils pouvaient servir de médiateurs pour faciliter les échanges émotionnels et sociaux avec les autres humains. Pour chacune de ces familles de robots et des applications associées pour la santé, des défis se posent.

Les robots chirurgicaux.

Les robots peuvent apporter une aide précieuse au chirurgien car ils sont capables de mouvements plus précis et plus répétables, dont la performance est constante. En outre, leur morphologie peut être flexible et s'adapter aux cavités étroites à l'intérieur du corps. Cela permet de réaliser des interventions moins invasives et en principe moins dangereuses pour le patient. Certains robots sont autonomes, et réalisent des actions chirurgicales à partir des instructions fonctionnelles données au préalable par le chirurgien, par exemple « extraire le tissu contenu dans tel élément de volume ». Comment le robot peut-il alors planifier ses mouvements de manière à réaliser cette action sans dommages collatéraux, et à partir des données de ses senseurs ainsi que de données d'imagerie préalablement mesurées ? Ceci implique en particulier que le robot soit capable de reconstruire les structures anatomiques du corps particulier de chaque patient à partir de toutes ces mesures. Pour d'autres robots, les actions opératoires sont directement contrôlées par le chirurgien au travers d'interfaces. Ces interfaces sont particulièrement utiles quand l'échelle des forces et des mouvements à réaliser est très petite et donc très inférieure à celle des mouvements naturels des mains et des bras du chirurgien. Elles ont alors pour rôle de transformer les mouvements du chirurgien en micro-mouvements complexes, ainsi que de transmettre aux chirurgiens des informations tactiles et de forces, c'est-à-dire haptiques, caractérisant le contact entre l'instrument chirurgical et le corps du patient. L'un des défis centraux est d'élaborer des interfaces qui permettent au chirurgien de contrôler efficacement ces micro-instruments complexes, en assurant à la fois précision, sécurité mais aussi facilité d'apprentissage. Ceci constitue un défi tant techniques (senseurs, transfert haptique) qu'ergonomique. Enfin se pose un défi d'ordre juridique et éthique : étant donné l'importance du rôle que peut avoir un robot dans ce type d'intervention chirurgicale, comment caractériser les responsabilités en cas d'accident ?

Les micro-robots d'exploration du corps.

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





Prothèses, suppléances robotiques et rééducation.

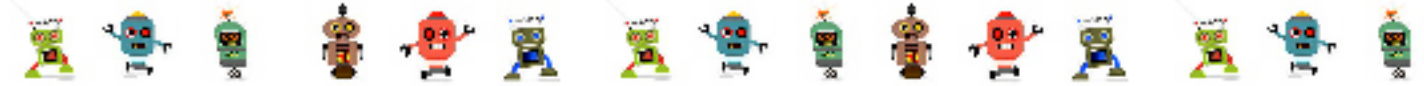
Des dispositifs robotiques commencent à être disponibles pour remplacer, augmenter, ou rééduquer différentes parties du corps humain. Des prothèses de main ou de bras se développent dans l'objectif de permettre à des personnes qui en sont amputées d'utiliser une main ou un bras robotique, installés à la place de leurs équivalents biologiques. L'un des plus grands défis consiste à permettre à ces personnes d'arriver à les contrôler facilement et efficacement pour réaliser des mouvements complexes coordonnés. Le plus souvent, ils sont connectés au corps du patient par l'intermédiaire de capteurs EMG posés sur certains muscles du patient : en les contractant plus ou moins, ces muscles envoient des signaux au bras et à la main robotique. Comment permettre au dispositif robotique d'interpréter ces signaux de manière à comprendre les intentions musculaires de l'humain et de les réaliser ? Comment faire un système dont l'apprentissage est facile pour l'humain, et qu'il n'a pas besoin de recalibrer très souvent ? En outre, la connexion robot-corps humain doit être à la fois solide, propre, durable, et ne pas blesser l'humain. Comme cela a déjà été fait avec des singes, on pourrait imaginer réaliser la connexion directement avec le cerveau : comment réaliser cela de manière à la fois médicalement sûre et éthiquement correcte ?

Outre les prothèses, des dispositifs robotiques de suppléance et de rééducation se développent. Parmi les technologies les plus marquantes, on peut voir ces dernières années dans les laboratoires l'apparition d'exosquelettes, doubles robotiques du corps humain qui se superpose à lui comme une carapace, et dont l'objectif est de démultiplier les forces physiques. Pour les personnes qui justement n'ont plus la résistance ou la force de marcher, cela pourrait être une manière de recouvrer cette capacité. Cependant, deux obstacles majeurs doivent être surmontés : d'abord, comment l'exosquelette peut-il interpréter correctement et en temps réel les mouvements que désire faire celui qui le porte ? Ensuite, comment construire des exosquelettes qui soient sûrs et ne puissent pas blesser l'humain ? Cela implique en particulier des recherches sur des actionneurs « compliants » d'un type nouveau qui se laissent faire quand une force extérieure leur est appliquée.

Robots sociaux pour le diagnostic et la stimulation cognitive et émotionnelle.

Dans l'imaginaire collectif, un robot est souvent considéré par définition comme une entité aux comportements stéréotypés et insensible aux émotions. De manière surprenante, des chercheurs travaillent aujourd'hui à leur utilisation pour venir en aide aux enfants atteints de troubles du développement. C'est le cas de l'autisme, qui se caractérise justement par des comportements stéréotypés et un retrait social et émotionnel, dont il est possible qu'il soit partiellement dû à la difficulté qu'ont ces enfants à percevoir et interpréter les comportements de leurs congénères trop variables et trop chargés d'indices. Certains chercheurs ont mis en évidence le fait qu'en présence de robots aux comportements et aux formes animaloïdes/anthropoïdes, plus simples et plus prédictibles que les humains mais plus interactifs que les objets inanimés, des enfants pouvaient sortir de leurs comportements stéréotypés et même profiter du robot comme un intermédiaire pour interagir avec les autres humains. D'autres





chercheurs utilisent la répétabilité des comportements du robot comme un outil de diagnostic permettant de suivre les évolutions de certaines réponses sociales des enfants dans le contexte d'interaction identiques. Néanmoins, ces recherches posent d'importants défis : comment s'assurer que les effets observés auront un effet durable ? Comment s'assurer qu'au contraire le robot ne va pas favoriser le retrait social de l'enfant ? Si l'on établit que l'effet est bien positif sur le long terme, comment peut-on développer des robots assez robuste et dont le prix est assez bas pour pouvoir toucher cette large population ? En outre, les problèmes développementaux sont très divers et souvent particuliers à chaque enfant : comment adapter le comportement d'un robot pour que son effet thérapeutique soit personnalisé ? Cette stimulation émotionnelle, cognitive et sociale par les robots ne concerne pas seulement les enfants : une autre partie de la population pour laquelle de nombreux efforts sont mis en place est celle des personnes âgées, en particulier celles qui sont atteintes de la maladie d'Alzheimer. Comment peut-on élaborer des robots capables non seulement de rendre la vie quotidienne de ces personnes plus faciles, mais aussi de les aider à stimuler leur mémoire et leurs fonctions intellectuelles ? De même que pour les enfants, comment s'assurer que le robot est là pour enrichir le quotidien et pour soigner, et qu'il ne remplace pas la présence d'un autre humain ?

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



Les robots sont devenus des outils essentiels pour aller explorer des environnements inconnus ou dangereux. Grâce à eux, nous pouvons continuer sur les pas des grands explorateurs des siècles précédents et découvrir des mondes où l'homme ne peut pas aller. Les plus connus d'entre eux sont probablement Sojourner, Spirit et Opportunity, qui ont posé leurs roues sur Mars et nous ont permis de découvrir la planète rouge à travers leurs yeux. Grâce à eux, notre connaissance des propriétés géophysiques, topographiques et chimiques de Mars a progressé considérablement. Sur terre, les robots nous permettent d'explorer les grands fonds sous-marins, dernier territoire que l'homme n'ait encore foulé, dans des conditions de pressions très difficiles et sans lumière. Les robots sous-marins permettent ainsi aux océanologues d'inventorier une faune et une flore unique, d'étudier les courants marins ou les phénomènes volcaniques à la limite des plaques tectoniques. Le rôle des robots d'exploration va aussi devenir de plus en plus essentiel pour intervenir dans des zones terrestres très dangereuses, que ce soit par exemple dans les décombres d'une ville à la suite d'un tremblement de terre, dans une centrale nucléaire à la suite d'un accident, ou au milieu d'une zone en guerre. Enfin, ces mêmes technologies vont se multiplier pour toute une famille





d'application civiles et militaires moins extrêmes mais tout aussi importantes : les véhicules terrestres, aériens ou aquatiques robotisés seront utilisés pour surveiller la sécurité des frontières, le trafic des bateaux et leurs possibles dégazages, les feux de forêts, la pêche illégale, les mouvements de foule, etc.

Un certain nombre de défis se posent aux robots d'exploration et d'intervention en milieu hostile, qu'ils soient autonome pour réaliser la mission qu'on leur a donnée, ou semi-autonome quand ils sont partiellement téléguidés par un opérateur humain :

La mobilité en milieu hostile.

Comment fabriquer des robots capables de se déplacer dans un champs de ruine ou sur une planète couverte d'obstacles rocheux et de crevasses? Comment fabriquer des robots de petite taille capables de voler dans toutes les conditions atmosphériques? Deux grandes approches se distinguent concernant la morphologie des robots et le mode de propulsion : d'une part la robotisation de véhicules « classiques » à roues (e.g. rovers martiens), à hélices (e.g. sous-marins automatiques de l'IFREMER) ou à réacteurs (e.g. drones en forme de petits avions), et d'autre part l'élaboration de formes et de matériaux qui

s'inspirent du vivant. C'est par exemple le cas des robots à pattes (e.g. le robot de déforestation de la figure FIG), de robots dont les ailes battent comme celles des insectes (voir FIGURE), ou de robots qui nagent en ondulant leur corps comme les poissons (voir FIGURE).

Autonomie énergétique. dans les milieux hostiles.

Il est par définition très difficile de trouver des stations de recharge énergétique (électrique ou à base d'énergie fossile), et il est très souvent impossible de supposer que le robot pourra revenir en zone « technicisée » pendant le cours de sa mission. Comment peut-on construire des robots qui soient autonomes énergétiquement et puissent réaliser des missions de longue durée? Ce défi impose d'une part de développer des techniques permettant aux robots de capter les sources d'énergie disponible sur leur lieu d'intervention (e.g. énergie solaire, gradients de températures et puissance des courants marins, vent, biomasse, ...), et d'autre part d'élaborer des robots les plus économes possibles en énergie.

Interaction opérateur-robot.

Qu'ils soient autonomes ou semi-autonome, ces robots sont là pour réaliser les objectifs fixés par un opérateur humain. Comment peut-on construire des systèmes qu'il est intuitif et facile de commander? Pour les robots autonomes, cela consiste à élaborer des systèmes qui permettent à l'humain d'exprimer des commandes de haut niveau stratégiques (e.g. «surveiller les environs aériens du Mont Blanc») ou tactiques (e.g. «observer d'abord le flanc nord, puis le flanc sud du Mont Blanc») : comment ce système peut-il permettre à l'humain de transmettre





intuitivement et efficacement ces objectifs de haut niveau, et comment un robot peut-il les transformer en un plan d'action précis ? Comment peut-il planifier son comportement ? Pour les robots semi-autonomes, les commandes de l'humain sont souvent de plus bas niveau et se rapprochent du téléguidage (e.g. « avance tout droit 2 mètres, et tourne à droite »). Dans ce cas, deux défis centraux se posent : 1) il peut y avoir un temps de latence très important entre l'envoi de la commande et sa réalisation par le robot : par exemple, à cause de la distance, les robots martiens ne peuvent recevoir que deux ou trois commandes par jour. Dans ce contexte, comment développer des interfaces qui permettent à l'humain de ne pas être gêné par ce décalage temporel et de minimiser le nombre de commandes qu'il doit envoyer pour atteindre un objectif donné ?; 2) l'environnement étant inconnu, il est possible que l'humain envoie une commande qui puisse mettre la sécurité du robot (ou d'un être humain présent aux côtés du robot) en danger (par exemple, une crevasse apparaît pendant que le robot est entrain d'avancer selon les commandes de l'opérateur) : comment élaborer des robots qui soient capables de détecter les dangers de certaines commandes fournies par l'opérateur et de décider de manière autonome un programme d'action qui va les éviter ? Comment équilibrer cette capacité de d'autonomie avec la volonté de contrôle de l'opérateur ?

Construction automatique de cartes et navigation.

Comme les explorateurs humains, l'une des activités principales des robots d'exploration est la construction de cartes, non seulement destinées à l'opérateur humain, mais aussi pour faciliter leur propre navigation dans les environnements inconnus. Comment un robot peut-il construire une carte de son environnement et s'y localiser ? Les recherches sont extrêmement actives tant sur le plan du développement de nouveaux senseurs (comme par exemple les LIDAR – Light Detection And Ranging- qui sont des sortes de scanners 3D de l'environnement), que d'algorithmes qui permettent de reconstruire une carte à partir de multiples informations provenant non seulement du robot mais aussi potentiellement d'autres senseurs installés par exemple sur des satellites ou d'autres robots.





5- Les défis de la robotique industrielle et de services professionnels



Le premier robot industriel, construit par Unimate, a été installé dans une usine de General Motors en 1961. La présence de ce type de robot, défini comme une machine reprogrammable pour réaliser automatiquement des tâches variées de manipulation dans les usines, est donc très ancienne, et n'a cessé de se renforcer dans les cinquante dernières années : d'après l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), le marché de la robotique industrielle a réalisé une croissance de 19% entre 2000 et 2005, correspondant à 11 milliards de \$ en 2005. La Japan Robot Association prédit qu'il sera de 66 milliards de \$ en 2025. C'est l'industrie de l'automobile qui en est aujourd'hui la plus grande utilisatrice, avec des usines dont les robots assemblent presque entièrement des voitures sous la supervision fonctionnelle des humains. Le développement de ces robots peut s'expliquer en recourant aux trois « D » : ils permettent de remplacer les humains pour les tâches « dull » (ennuyeuse), « dirty » (sales) et « dumb » (qui ne requièrent aucune faculté intellectuelle). En outre, ils sont insensibles à la fatigue, sont capables de travailler jour et nuit, et capables aujourd'hui de manipuler et de positionner des pièces industrielles de plusieurs centaines de kilos avec une précision millimétrique dans des environnements structurés.

Cependant, un certains nombre d'évolutions importantes sont entrain de prendre formes, et il est possible que les robots industriels du futur ne seront pas de simples extrapolations des robots industriels d'aujourd'hui. D'abord, si les très grandes industries peuvent utiliser avec profit les systèmes robotiques existants pour fabriquer en masse certains produits qui ont une durée de vie relativement longue (comme les voitures), un très grand nombre de petites et moyennes entreprises doivent être capables de concevoir et fabriquer de nouveaux produits très rapidement, ce qui implique une capacité de réorganisation dynamique des process industriels. Dans ce contexte, le besoin de pouvoir construire des robots capables de réaliser des tâches plus variées, plus sophistiquées que le positionnement de pièces (« pick-and-place »), et plus facilement reprogrammable

pour une tâche nouvelle est important. Le travail sur l'élaboration de robots humanoïdes, capables d'une grande dextérité et de manipuler les outils des humains, est ainsi central. Plus encore, alors que jusqu'à présent





les robots travaillaient plutôt de manière autonome dans les usines, ce besoin de pouvoir réaliser des tâches variées et changeantes implique un travail coopératif et coordonné entre les robots et les humains. Enfin, les robots travailleurs commencent à sortir les usines pour venir seconder le travail de l'homme dans les champs, sur les chantiers, dans les ports et les aéroports, dont la principale différence avec l'usine est que ce sont des environnements qui ne sont pas totalement contrôlés, qu'on appelle « non-structurés ». Voici maintenant plus en détails les défis qui doivent être relevés par ces nouvelles tendances :

Manipulation et interactions avec le monde physique.

L'une des principales activités des robots industriels aujourd'hui consiste à faire du « pick-and-place », c'est-à-dire par exemple à prendre des pièces qui arrivent sur un tapis roulant et à les positionner précisément dans une structure du produit final. Quelques autres activités motrices comme le vissage, la soudure ou la peinture sont également très répandues. Leur point commun est que ce sont des activités qui sont relativement simples du point de vue de la dextérité requise. Au contraire, beaucoup des activités réalisées par des ouvriers humains consistent en des manipulations complexes nécessitant la coordination des doigts de leurs deux mains et sont hors de portée des capacités des robots actuels.

Comment peut-on construire des robots dotés de la même dextérité que les mains humaines ? Deux des grands obstacles pour réaliser cet objectif sont d'une part l'élaboration de senseurs de touches et de forces pouvant recouvrir la totalité d'une main artificielle, et d'autre part l'élaboration d'algorithmes de contrôle capables de coupler en temps réel les données de ces senseurs et les mouvements de actionneurs pour manipuler des objets complexes, potentiellement flexibles et dont la position n'est pas connue à l'avance par le robot. L'existence de ces bras et mains artificielles pourrait permettre, outre la manipulation complexe sur des chaînes robotisées traditionnelles, d'en doter des robots capables d'utiliser des outils initialement conçus pour l'homme, donc plus nombreux et plus variés : la variété des tâches réalisables par le robot s'en trouverait décuplée.

Cependant, un défi technique majeur consiste à savoir comment on peut mettre au point des techniques permettant à un robot d'apprendre facilement et efficacement à utiliser les outils de l'humain. Enfin, un dernier grand défi associé aux capacités de manipulation des robots est posé par les mouvements de plus en plus rapides qui peuvent provoquer des torsions ou des oscillations du corps du robot compliquées à contrôler. Plus généralement, la manipulation d'objets flexibles ou souples sort du cadre des systèmes de commande basés sur l'hypothèse que le robot et l'objet qu'il manipule sont rigides : dans ce nouveau contexte, des propriétés dynamiques très difficiles à modéliser caractérisent la tâche que le robot doit effectuer. Comment un robot industriel peut-il travailler quand la flexibilité de son corps n'est plus négligeable ou quand il manipule des objets déformables ?





Flexibilité, reprogrammabilité et portabilité.

Les robots industriels existants sont reprogrammables, mais l'effort nécessaire à sa reprogrammation est souvent important. Cela est un obstacle important quand il s'agit d'usines dont les produits et processus peuvent changer rapidement d'un mois, ou même d'une semaine à l'autre. Comment peut-on construire des robots qu'on puisse facilement reprogrammer pour réaliser une tâche nouvelle ? Comment un humain peut-il spécifier cette tâche quand il s'agit de manipulation complexe ? Comment peut-il transférer au robot sa propre expertise ? En particulier, un enjeu de recherche très important est le développement de systèmes robotiques capables d'apprendre une tâche nouvelle par imitation et/ou démonstration de la tâche par un ouvrier non-ingénieur. Ensuite, comment peut-on réutiliser un programme élaboré pour une tâche 1 pour réaliser une tâche 2 similaire ? Comment peut-on réutiliser un programme élaboré pour une tâche 1 sur le robot 1 pour la faire réutiliser par un autre robot qui n'a pas tout à fait les mêmes propriétés morphologiques ? Ces défis impliquent notamment la mise en place d'outils logiciels avancés tant en termes d'interface avec l'utilisateur humain qu'en termes d'interopérabilités entre les systèmes et les robots.

Interactions avec l'homme : sécurité, coopération et coordination.

Flexibilité, variété des tâches, minimisation des transformations à apporter aux usines existantes des petites et moyennes entreprises : ce sont les raisons essentielles qui poussent un certain nombre de chercheurs et d'industriels à développer des robots partiellement humanoïdes qui pourraient seconder les ouvriers humains en travaillant avec eux, de la même manière qu'eux, et avec les mêmes outils. C'est par exemple le cas du robot HRP-2 développé par l'industriel japonais Kawada Industries. Les défis sont immenses. Prenons l'exemple d'un robot qui doit aider un humain à déplacer une grande planche dans une usine, puis ensuite l'aider à percer cette planche selon un motif nouveau pour chaque série de planches. Comment le robot peut-il comprendre que l'humain, à un moment donné, voudrait qu'il l'aide pour transporter cette planche, et à quel endroit ? Il s'agit là du problème de l'interprétation des intentions de l'ouvrier. Comment le robot peut-il se coordonner avec l'humain de manière à ce que chacun se positionne à un endroit complémentaire pour porter la planche ? Il s'agit ici d'un problème de planification dynamique, qui nécessite que le robot soit capable de se construire en temps réel un modèle de la position de la table et de l'humain dans l'environnement.

Comment le robot peut-il ensuite comprendre qu'il faut changer de tâche et passer au perçage ? Les problèmes d'interfaces homme-robot sont ici cruciaux. Comment le robot peut-il agir de manière à ne pas blesser l'humain quand il va percer à un endroit que lui montre l'humain, ou simplement quand il va attraper la perceuse que lui tend l'humain ? En effet, pour pouvoir aider l'humain dans ses travaux manuels, le robot doit être assez puissant, ce qui a pour conséquence que ces mouvements peuvent potentiellement être très dangereux pour l'humain. Un axe de recherche très dynamique en ce moment est ainsi le développement de robots à la fois légers et puissants, équipés de moteurs « compliants » qui sont capables d'absorber presque totalement les chocs potentiels non-prévus avec des





éléments extérieurs et d'être bloqués facilement dans leur mouvement par la main d'un humain (par exemple, voir le travail de l'institut allemand DLR : <http://www.youtube.com/watch?v=pGpOENf5Y0o>).

Les environnements non-structurés.

Dans le contexte des interactions avec l'humain, un élément fondamentalement différent de la situation des robots industriels d'aujourd'hui est l'impossibilité de prévoir à l'avance tous les comportements et gestes de l'humain : l'environnement est non-structuré. C'est le cas également des robots de services professionnels, qui se développent de manière importante pour participer au travail dans les champs (ex: pour semer ou récolter automatiquement), dans les rues (ex: pour nettoyer et ramasser les poubelles), dans les ports (ex: pour transporter les conteneurs) : dans tous ces environnements, des événements imprévus peuvent survenir (par exemple un tracteur stationné au milieu d'un champs qu'est entrain de semer un robot) et la structure de l'environnement lui-même est partiellement inconnue (e.g. plans des rues, emplacement des poubelles). Ceci implique d'abord que les mouvements des robots ne peuvent pas être programmés à l'avance : des lois de contrôle basées sur les informations des senseurs doivent être mises en place. En outre, ces lois de contrôle ne doivent pas seulement être capables de gérer des incertitudes sur les mesures des propriétés caractérisant les éléments relatifs à la tâche (par exemple position et nombre de fruits à cueillir dans un arbre), mais ils doivent aussi être capables de faire face à des événements imprévus dont par définition elles ne peuvent posséder de modèle a priori. Comment une machine peut-elle opérer efficacement et en sécurité quand il est impossible de modéliser totalement son environnement à l'avance ?

6- Les défis de la nano-robotique

En 1959, le physicien Richard Feynman prédisait que des machines nanométriques pourraient être un jour construites et généreront des applications techniques extrêmement importantes. Ces machines n'existent pas encore, mais les recherches en nanotechnologies, et en nano-robotique en particulier, ont explosé dans la dernière décennie. Les nano-robots sont des machines dont les composants sont à l'échelle atomique ou moléculaire. Ces composants peuvent être soit des molécules biologiques, comme des protéines ou des morceaux d'ADN, dont on utilise les capacités naturelles de réaction à des stimuli chimiques, physiques ou électriques dans un contexte artificiel et pour s'en servir de moteur, de senseurs ou de jointures, ou soit des assemblages d'atomes créés de novo par l'humain. En assemblant ces composants, des machines peuvent être formées et caractérisées par de multiples degrés de liberté, capable d'appliquer des forces et de manipuler d'autres objets nanométriques, et dotés d'une efficacité énergétique très grande. Les applications pourraient être médicales, environnementales, spatiales ou militaires. Par exemples, on peut imaginer que ces machines soient un jour capable de transporter dans le corps humains des médicaments jusqu'à des cellules identifiées individuellement, et de les injecter dans ces cellules sans toucher aux cellules environnantes. On peut aussi





imaginer des nanorobots capables de réparer ces cellules ou d'éliminer sélectivement des cellules cancéreuses. Cependant, plusieurs grands défis restent à relever avant que ces projections ne deviennent réalité.

Moteurs, senseurs, joints. Comme les robots macroscopiques, les nanorobots ont besoin de moteurs, de senseurs et de jointures pour leur permettre d'agir sur leur environnement et de le percevoir. Quels sont les assemblages moléculaires qui permettent de propulser un nanorobot dans un environnement qui est soumis aux lois de la physique atomique et quantique plutôt qu'aux lois de la physique Newtonienne ? Quels types de senseurs peuvent être utilisés ? Faut-il tenter de ré-utiliser au maximum les structures moléculaires biologiques existantes, protéines et ADN, très efficaces mais très différentes des structures des macro-robots, ou bien tenter de recréer à l'échelle nanométrique des assemblages qui s'inspirent des macro-robots ?

L'assemblage du corps.

Comment pouvons nous assembler de manière robuste, répétée et à un coût raisonnable les moteurs, senseurs et jointures pour en faire des robots complets ? Ceci est réalisé aujourd'hui au moyen de système microscopique de très haute technologie, comme le microscope à effet tunnel (STM), ou les microscopes SEM ou TEM. Peut-on mettre au point des systèmes macroscopiques de manipulation nanoscopique qui soient robustes, précis et pouvant être produits à grande échelle et à bas coût ? Une autre voie possible est celle de l'auto-assemblage : de nombreuses structures biologiques nanométriques s'assemblent en effet spontanément dans certaines conditions locales physico-chimiques. Comment peut-on élaborer des nanorobots capables d'auto-assemblage ?

Contrôle, communication et traitement de l'information.

Pour réaliser des tâches non-triviales, les nano-robots devront pouvoir être contrôlés tout comme sont contrôlés les macrorobots. Hors, cela implique des capacités de stockage et de traitement des informations, ce qui représente un immense défi à l'échelle nanométrique. Comment pourrait-on construire des nano-microcontrôleurs embarqués sur un nanorobots ? Comment les programmer ?

Dans un premier temps, un certain nombre de chercheurs proposent que ce contrôle se fasse à distance, sous la forme d'un « téléguidage », réduisant les fonctionnalités embarquées du nanorobot au seul stockage de l'information et à son envoi et sa réception depuis un système macroscopique extérieur opéré par un humain. Le défi qui se pose est alors celui de l'interfaçage entre le nanorobot et le système technique macroscopique : par quel moyen peut-on envoyer des commandes au robot et recevoir les informations captées par ses senseurs ?

Essais de nanorobots.

De part leur petite taille et leur relative simplicité de traitement de l'information, nombreux sont les chercheurs qui envisagent d'utiliser des essais de nanorobots : tout comme dans les sociétés d'insectes sociaux, leur intelligence comportementale serait ainsi le résultat de leurs interactions massives entre eux et avec l'environnement. Comment peut-on mettre au point des sociétés de nanorobots pour réaliser une tâche donnée ? Peut-on programmer et contrôler une société de nanorobots ?





Sécurité.

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

7- Les défis sociétaux de la robotique

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

L'acceptation sociale au quotidien.

Comme nous l'avons argumenté dans les défis précédents, les robots vont être rapidement amenés à devenir des objets très présents dans notre quotidien. Cependant, cette arrivée ne fait pas simplement face à des obstacles technologiques, mais aussi à des oppositions d'une partie de la société. Beaucoup des robots existants, s'ils sont vus avec amusement et/ou bienveillance, provoquent aussi des réactions hostiles d'une partie importante de la population, en particulier en occident. Une partie de cette hostilité vient du fait que ces robots sont destinés à prendre part aux interactions sociales avec et entre humains, mais sont perçus comme des créatures «étranges», «insensibles» ou «machiniques» qui déshumanisent la vie quotidienne. Pour contrer cette hostilité, et comme on l'a vu plus haut, de nombreux chercheurs travaillent sur le développement de robots capables de comportements gestuels, affectifs ou linguistiques qui se basent sur ceux des humains.

En bref, les chercheurs essaient d'élaborer des robots qui s'adaptent à l'humain et non le contraire : ils essaient d'humaniser les robots. Mais ces robots humanisés rencontrent encore des hostilités, en particulier en occident : en bousculant les frontières entre le monde vivant et sensible et le monde inerte et artificiel, ainsi que les frontières entre ce qui distingue l'homme et les autres créatures, ces robots remettent en question en occident la manière dont on conçoit l'homme et le vivant. Ils provoquent donc un choc cosmogonique et philosophique. En outre, ils incarnent aussi un tabou religieux : la tentative de construction de robots humanisés, capables de raisonnement et d'émotions, est vue par certains comme une manière de « jouer à Dieu ». Hors, cela a été considéré pendant de nombreux siècles comme un sacrilège, comme en témoignent des mythes comme celui du Golem, et même si nos sociétés occidentales sont aujourd'hui largement sécularisées, les créatures artificielles humanisées restent ainsi perçues négativement. Comment alors peut-on rendre les robots socialement acceptables dans la vie quotidienne, et ne





pas heurter les sensibilités philosophiques, cosmogoniques ou religieuses des personnes avec qui ils vont interagir ? Ce défi implique notamment à la fois un travail sociologique pour articuler en détails les raisons de ces hostilités, ainsi qu'un travail pédagogique très important de la part des chercheurs et des ingénieurs pour expliquer que leur objectif est de construire des machines plus humaines que celles qui nous entourent aujourd'hui, et que donc plutôt qu'une déshumanisation il s'agit d'une humanisation de la présence de la technologie au quotidien.

Le respect éthique de la personne.

Outre le fait que les robots peuvent ne pas être agréablement accueillis socialement, se posent aussi de fortes questions éthiques, en particulier dans le domaine de la robotique d'assistance pour les personnes handicapées mentales ou physiques. Par exemple, un certain nombre de chercheurs, roboticiens et médecins, travaillent aujourd'hui à l'utilisation de robots dans le cadre du diagnostique et de la thérapie des enfants autistes.

En effet, un certain nombre d'arguments solides montrent que les robots, intermédiaires entre des objets inanimés et des partenaires sociaux humains, permettent aux enfants autistes de sortir de certains blocages psychologiques et comportementaux caractérisant leurs interactions sociales. D'autres chercheurs travaillent sur l'utilisation de robots comme partenaires d'accompagnement pour les personnes âgées, à la fois pour aider à diminuer le sentiment de solitude et pour faire de la stimulation cognitive. Dans les deux cas, des raisons fortes justifient les intérêts potentiels de tels types de recherche et de technologie. Cependant, on peut par exemple se demander s'il n'y a pas un risque que le lien social introduit grâce au robot ne soit plus un équivalent des antidépresseurs chimiques qu'un véritable outil pour renforcer le lien social effectif entre les humains. A moyen terme, il y a donc potentiellement un risque que l'utilisation de tels robots participe en fait à renforcer l'isolement social. Ces recherches et les applications associées posent donc toutes les deux des défis éthiques importantes.

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





Un troisième exemple concerne la robotique androïde. Certains chercheurs développent des robots, appelés androïdes, reproduisant l'apparence humaine, tant en terme de matière, de couleur, que de mouvements. L'objectif scientifique défendu par les concepteurs est l'utilisation des androïdes en interaction avec des humains comme outils pour l'étude du comportement de l'humain, en particulier en ce qui concerne ses réactions face à certains types d'indices gestuels. Ces androïdes sont parfois construits sur le modèle d'une personne humaine existante. Par exemple, un chercheur japonais a construit un androïde sur le modèle de sa fille, et a organisé la rencontre entre les deux. On peut imaginer que cela peut avoir des conséquences psychologiques sur cet enfant. Se pose donc ici la question éthique de savoir s'il est acceptable de construire des androïdes calqués sur des personnes existantes, et plus généralement dans quelle mesure on peut confronter des personnes à de tels robots.

Un dernier exemple est celui de la robotique autonome à usage militaire. Beaucoup de chercheurs travaillent sur la robotique autonome, en particulier sur des techniques de navigation et de cartographie automatique, de franchissement d'obstacles, ou de suivi d'objectifs visuels. Bien qu'il existe de nombreuses applications potentielles pacifiques de ces techniques, les applications militaires sont largement les plus fréquentes en pratique. Or de nombreux chercheurs ne prêtent que peu d'attention aux applications potentielles de ces recherches, et le débat de savoir s'il est éthique ou pas de réaliser ce type de recherche n'existe pas dans les laboratoires, bien que de facto les chercheurs aient une responsabilité éthique. Dans certains projets de recherche en robotique, l'application militaire est d'ailleurs rendue explicite par la collaboration avec des organismes ou des entreprises du domaine de la défense nationale. On peut imaginer que certains programmes de recherche visent à optimiser le rapport entre le coût de fabrication de certaines armes et leur précision, c'est-à-dire la probabilité d'éviter des "dégâts collatéraux". Cela pose évidemment d'importants défis éthiques.



Réconcilier imaginaire et réalité.

La robotique est un domaine que les œuvres de fiction ont exploré de manière extrêmement importante, et le plus souvent très en amont des recherches scientifiques et techniques. Avant même que le terme « robot » soit introduit dans le roman R.U.R. de Karel Capek en 1921, les créatures artificielles ont peuplé des romans comme Frankenstein, L'ère future, Le Marchand de Sable ou les contes d'Hoffman. Depuis le milieu du 20^{ème} siècle, ils sont omniprésents dans les mangas et les films asiatiques (Tetsuwan Atom – Astroboy -, Tetsujin 28 go, Goldorak, Giant Robot, Ghost in the Shell ...) ainsi que dans la littérature et le cinéma Européen (les romans d'Asimov, Metropolis, Terminator, Blade Runner, 2001 l'Odyssée de l'espace, Star Wars, I-robot, A.I., Wall-E, ...).



Les fictions occidentale et orientale diffèrent considérablement dans la manière de présenter les robots : alors qu'ils sont typiquement la cause de grandes catastrophes dans les histoires occidentales, ils sont au contraire souvent les sauveurs de l'humanité dans les histoires asiatiques. Ces différences s'enracinent dans l'histoire, les mythologies, la cosmogonie et les traditions religieuses de ces deux parties du monde. Cependant, ces deux univers de fiction ont deux grandes similarités :

1) ils ont eu et continuent d'avoir un impact très important dans l'imaginaire populaire : les gens conçoivent les robots au travers du prisme de ces romans, mangas et films ;

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

La place des robots dans la société.

Le futur de la robotique et de son impact dans la société est encore largement à construire. Bien qu'un certains nombre de travaux de recherche et de robots déjà commercialisés s'intéressent à des fonctionnalités comme le travail dans les usines, l'exploration spatiale, la réalisation autonome de travaux ménagers ou l'assistance à la personne, on peut s'interroger sur le fait que ce soit les usages les plus utiles ou préférables pour notre société. Il est encore largement possible de redéfinir ces usages et d'en inventer de nouveaux : que voulons-nous vraiment faire des robots ?

En effet, le choix des usages sur lesquels la plupart des chercheurs et des industries travaillent aujourd'hui est le résultat à la fois de notre imaginaire et d'intérêts scientifiques, industriels et économiques. Mais est-ce l'intérêt des utilisateurs, c'est-à-dire de la société ?

Par exemple, de nombreux robots sont conçus pour remplacer l'homme dans certains types de tâches et d'environnements : c'est le cas des robots-ouvriers, des robots agricoles, des robots aspirateurs, voire même





des robots infirmières en développement en Corée ou au Japon. Bien que beaucoup de ces tâches soient souvent ennuyeuses ou fatigantes, voulons-nous vraiment que les robots nous remplacent ?

Outre le fait que cela change le paysage des emplois en en faisant disparaître certains et en en créant d'autres plus qualifiés (mais pour des personnes différentes !), cette tendance peut facilement être extrapolée et on pourrait imaginer un futur dans lequel la plupart de nos activités physiques quotidiennes soient réduites à leur part minimale grâce au travail des robots. De facto, nous pourrions arriver dans une situation similaire à celle dans laquelle se retrouvent les humains dans le film Wall-E : les robots les ayant remplacés dans toutes leurs tâches physiques jusqu'à même les nourrir, ils deviennent incapables de se servir de leur corps. Leur situation n'est ainsi guère enviable, et la privation d'activité physique et quotidienne a des conséquences très négatives sur le mental. Nous sommes encore très loin de cette vision imaginaire, mais elle pose réellement la question des directions que peut prendre la robotique aujourd'hui.

Plutôt que de remplacer l'homme, ne pourrait-on pas inventer des usages dans lesquels les robots accompagnent, enrichissent, stimulent l'humain dans son quotidien ? Alors qu'aujourd'hui les robots de loisirs, d'amusement, d'accompagnement social et intellectuel sont considérés comme beaucoup moins sérieux que les robots travailleurs, ne correspondraient-ils pas en fait à des usages plus profitables à la société sur le long terme ?

Dans tous les cas, il semble fondamental de mettre les utilisateurs et la société dans son ensemble au cœur de l'élaboration des nouveaux robots et de leurs usages, afin que ceux-ci soient choisis plutôt qu'imposés par une dynamique scientifique, industrielle et économique. **C'est probablement l'un des plus grands défis de la robotique.**

