

Prospective robotique
Auteurs : les équipes robotique de l'INRIA
Octobre 2006

Table des matières

1	Introduction	2
2	Partie I : La robotique comme domaine scientifique et son impact actuel	2
2.1	La recherche	2
2.2	L'impact sur la société	6
2.2.1	La robotique industrielle dans le monde	6
2.2.2	La place de l'industrie robotique française	8
2.2.3	L'image de la robotique	9
2.2.4	Enseignement	10
3	Partie II : Prospective 2005-2015	10
3.1	Prospective "bottom-up"	11
3.1.1	Robotique manufacturière	11
3.1.2	Robotique de surveillance et d'intervention	13
3.1.3	Robotique de défense	14
3.1.4	Robotique de chantiers	14
3.1.5	Robotique de service	15
3.1.6	Robotique médicale	18
3.1.7	Véhicules intelligents	19
3.1.8	Réalité virtuelle et jeux	20
3.1.9	Micro et nanorobotique	20
3.1.10	Vers une robotique sans robots ?	21
3.2	Prospective "top-down"	22
4	Partie III : La robotique à l'INRIA	24
4.1	Les domaines couverts	24
4.2	Quelques réflexions sur l'organisation de l'INRIA	26
4.3	La nécessité de l'expérimentation	28
4.3.1	Les spécificités des expérimentations robotiques	29
4.3.2	La mutualisation des moyens expérimentaux	30
4.3.3	La robotique expérimentale à l'INRIA et ailleurs	31
4.4	Évolution de la robotique à l'INRIA	34

1 Introduction

Le but de ce document est de se livrer à un exercice de prospective sur l'avenir de la robotique avec une vision à court, moyen et long terme.

Cette prospective inclut à la fois les activités de recherche, les actions autour de l'enseignement (recrutement de doctorants et post-doctorants, enseignement proprement dit) et les perspectives industrielles.

Nous montrerons que la robotique est un domaine en très forte expansion : 19% de croissance pour la robotique industrielle ces cinq dernières années¹ avec une forte diversification des applications, qui devrait faire passer le marché de 11 milliards de \$ en 2005 à plus de 66 milliards en 2025².

Organisation du document :

La partie I de ce document situe la robotique en tant que domaine de recherche scientifique mais également en terme d'impact sur la société. Sont également évoquées l'évolution des débouchés et la place de la France dans la compétition. Une rapide rétrospective des débuts de la robotique permet de mettre en évidence les grandes orientations de la discipline durant ces dernières années, tant sur le plan de la recherche que sur celui des applications. Un état de l'art, les problématiques de la recherche, et les applications qui s'y rattachent sont ensuite présentés.

La partie II est consacrée à ce que nous pensons être les sujets de recherche à l'horizon des dix prochaines années.

La partie III donne un aperçu des activités des équipes robotique de l'INRIA et présente des éléments de réflexion sur l'organisation de cette discipline dans le contexte INRIA. On y trouvera des propositions très concrètes pour anticiper et accompagner le développement très large de ce domaine afin d'y assurer une place au meilleur niveau pour l'INRIA.

2 Partie I : La robotique comme domaine scientifique et son impact actuel

Le robot est, d'une certaine façon, l'évolution ultime de la notion d'outil. Il doit permettre de réaliser une tâche, soit en amplifiant les performances de l'homme (téléopération, accès à des milieux hostiles...), soit en se substituant à lui (systèmes autonomes). Dès l'origine, cet objectif a conditionné les recherches et les réalisations en leur donnant un caractère pluridisciplinaire couvrant une large palette de problématiques, allant de la conception mécanique à la commande, en passant par la perception et le raisonnement.

2.1 La recherche

La recherche en robotique est apparue dans les laboratoires dans les années 60 pour réellement s'imposer comme thème de recherche dans les années 80. Elle résulte de la conjonction des progrès de plusieurs disciplines "anciennes" (mécanique, traitement de l'information et du signal, automatique) et de l'émergence de disciplines "nouvelles" (l'informatique, principalement), le tout nécessitant l'apport de branches très variées des mathématiques (géométrie, analyse numérique, ...). Parallèlement, et en synergie avec ces développements méthodologiques, les développements technologiques ont permis de valider les approches et de traiter des

¹source : rapports World Robotics 2000 à 2005 de la Commission pour l'Europe des Nations-Unis (UNECE, www.unece.org) établi en collaboration avec l'International Federation of Robotics (IFR, www.ifr.org)

²source : Japan Robot Association www.jara.jp/e/

applications réelles, et également de faire apparaître de nouvelles problématiques de recherche. Le retour d'expérimentation est apparu très rapidement comme un élément indispensable aux avancées méthodologiques car il en est bien sûr la validation ultime.

Durant la période 60-90, les fondements méthodologiques de la robotique ont été posés. Le terrain étant alors vierge, les apports sont venus principalement des disciplines dites "classiques" qui trouvaient dans la robotique une source de problématiques nouvelles et de nouveaux champs applicatifs, et aussi –il faut le reconnaître– une source de financement. Parmi les problèmes nouveaux abordés à cette époque et directement inspirés par la robotique, on peut citer :

- la planification des déplacements,
- la modélisation et le contrôle des systèmes mécaniques articulés ainsi que le développement de nouveaux composants mécaniques,
- le contrôle des interactions avec l'environnement,
- l'acquisition et le traitement des données capteur (vision, force, télémétrie...) ainsi que le développement de nouveaux actionneurs,
- la modélisation et la reconnaissance des formes et l'analyse de scène et d'une manière plus générale la vision par ordinateur,
- la réalité virtuelle et augmentée (appelée pudiquement téléopération avancée),
- les interfaces homme/machine,
- les langages de programmation de niveau tâche et CAO,
- l'informatique temps réel.

La liste des problèmes ayant participé au développement de la robotique est donc longue. A contrario, la robotique a eu une grande part dans l'émergence et la reconnaissance de nouvelles disciplines scientifiques comme la vision par ordinateur.

Parallèlement à l'apport des disciplines classiques, est apparue la notion de centre de recherche en robotique visant à regrouper des compétences pluridisciplinaires dans le cadre de grands projets. Citons, comme exemple, le CMU à Pittsburgh avec le projet *Navlab*, ou le JPL à Pasadena sur la robotique d'exploration planétaire. Ces centres, à fort potentiel technologique, ont accéléré le passage de la méthodologie à la validation expérimentale et fourni en retour des données réelles aux chercheurs.

La France, n'ayant ni les mêmes moyens ni la même structure de recherche, a conçu, face à ces groupements importants de chercheurs, et au moment où l'industrie automobile commençait à s'équiper en bras manipulateurs pour l'automatisation des chaînes de montage, le programme de recherche ARA³. Ce programme ambitieux, centré sur la robotique manufacturière (robotique de manipulation) et, dans une moindre mesure, la robotique mobile, était géographiquement distribué sur la quasi totalité des équipes françaises et doté d'une coordination globale. Un des succès de ce programme, encore appréciable vingt ans plus tard, est d'avoir permis aux équipes françaises d'occuper une place importante sur la scène internationale. Une des raisons de ce succès a été l'investissement des chercheurs dans l'ensemble des domaines de la robotique, en partant du matériel de base jusqu'aux développements théoriques les plus abstraits. Ceci explique que la recherche française soit encore très présente, alors que d'autres pays, comme le Royaume-Uni, ont quasiment disparu de la scène de la recherche après s'être focalisés sur des points particuliers. L'INRIA a aussi bénéficié du programme ARA via l'initialisation de thèmes de recherche reconnus maintenant comme des domaines d'excellence de l'Institut (vision par ordinateur, géométrie algorithmique, commande de systèmes non-linéaires,...).

Si les années 80-90 ont permis d'établir les fondements théoriques de la discipline avec pour problématique principale la manipulation et la robotique manufacturière, les quinze dernières années se caractérisent par une

³L'INRIA avait d'ailleurs anticipé ARA avec le Projet Pilote *Spartacus*, projet national financé par le SESORI (au sein de l'INRIA), qui avait permis le développement des premiers robots pilotés par microprocesseurs et des premiers langages de programmation de robot en France

diversification massive des applications de la robotique, l'augmentation en dimension et en complexité des problèmes abordés, et l'impact croissant de la technologie dans les solutions apportées à ces problèmes.

La diversification des applications et l'augmentation en dimension et complexité des problèmes abordés : Précédemment cantonnée au manufacturier et aux milieux inaccessibles à l'homme (planétaire, nucléaire...) la robotique, et les méthodes qui en sont issues, sont en passe d'investir les transports, le médical, les services, et même le ludique. Cette évolution va de pair avec des systèmes plus complexes à modéliser et à commander (robots mobiles terrestres, aériens, humanoïdes...), des environnements pour les robots étendus et dynamiques (villes, milieux naturels...), des interactions avec ces environnements plus évoluées (robotique médicale, milieux "déformables"...), et de nouvelles contraintes de fonctionnement (robot en contact direct avec les humains dans des environnements non sécurisés). Cette diversification et le changement d'échelle en terme de complexité s'est accompagné de l'émergence de technologies et d'approches nouvelles, comme par exemple la robotique probabiliste ou le développement de modèles cohérents avec les ceux utilisés par les neurophysiologistes (voir par exemple le projet BIBA coordonné par l'INRIA et son successeur le projet BACS).

L'impact croissant de la technologie : Robotique et technologie sont étroitement liées. L'informatique participe pour beaucoup à cette imbrication mais ce n'est pas le seul élément : les progrès dans les matériaux, les capteurs, les actionneurs ont ouvert la voie à des axes totalement nouveaux tels que la nanorobotique, les drones aériens, ou encore la stimulation fonctionnelle pour les personnes handicapées. Une conséquence directe pour le chercheur, est que ses résultats ne sont plus évalués exclusivement sur la qualité du travail théorique (éventuellement accompagné d'une pré-validation sur des maquettes de laboratoire) mais également sur leur validation expérimentale, dans un contexte toujours plus réaliste imposant l'utilisation de systèmes à la pointe de la technologie et, en corollaire, un taux d'obsolescence rapide. Cette part croissante de la technologie dans la recherche ne va pas sans poser des problèmes de structure et de fonctionnement dans les laboratoires.

La structuration de la recherche : Durant ces quinze dernières années, la communauté scientifique robotique –tout comme, par ailleurs, la communauté automatique– a été amenée à se poser un certain nombre de questions de fond sur son identité, son organisation, ses objectifs et les moyens nécessaires à mettre en œuvre pour les atteindre. Cette réflexion a été initiée par les constats suivants :

- La robotique est, par nature, pluridisciplinaire et ne peut être rattachée à un domaine scientifique unique bien identifié. Si la pluridisciplinarité représente un atout important, elle pose aussi aux organismes un problème au niveau de la définition et de la clarification de leur politique scientifique, traditionnellement organisée en thèmes scientifiques verticaux.
- Certaines disciplines fondamentales (mathématiques, mécanique, ou automatique), qui trouvaient dans la robotique un domaine applicatif permettant de financer leurs recherches, ont depuis investi d'autres domaines "porteurs" apparus avec l'avènement des STICs et le développement explosif d'Internet.
- La lourdeur de la mise en œuvre et la complexité des expérimentations –nécessaires au traitement des problèmes nouveaux– induit des difficultés de fond :
- L'activité de veille technologique concernant les nouveaux composants prend du temps et est peu valorisable, pour un chercheur, en terme de publications et d'évolution de carrière. Cette activité est cruciale car les technologies utilisées dans les plate-formes robotiques sont en constante évolution. Il faut être vigilant dans les technologies "de base" : mécanique, électronique (carte d'E/S, capteurs,...), informatique (OS, temps, outils logiciels,...) mais également sur les méthodes et outils utilisées par d'autres communautés (par exemple les micros-cartes et micro-os développés dans le domaine des réseaux de capteurs peuvent être utilisés dans les flottes de micro-robots). Cette veille technologique, qui peut

bénéficier à des projets non robotiques de l'INRIA, ne peut être assuré intégralement par des chercheurs focalisés sur leur axes de recherche et doit bénéficier d'un support d'ingénieurs.

- Le travail expérimental sur les plate-formes va dans le même sens. Le confier à des doctorants va (trop) souvent à l'encontre de leur intérêt devant les commissions de sélection pour les métiers de la recherche. De plus, l'intégration de ces travaux dans une politique pérenne de développement et de maintenance des moyens expérimentaux, par nature à plus long terme que la durée d'une thèse, pose de réelles difficultés au niveau des équipes de recherche.
- La production de logiciel, plus que jamais considérée comme un indicateur de la santé et de la qualité de la recherche d'une équipe ou d'un institut, avec le biais que cela tend à introduire au niveau du recrutement de personnels techniques, ne constitue pas le coeur de la recherche en robotique et par suite la dessert à deux niveaux : celui de son évaluation et celui du recrutement des personnels dont elle a vraiment besoin.
- La frilosité des industriels nationaux et leur difficulté à se projeter dans des projets à long terme laissent craindre, dans les années à venir, une perte importante de compétences comme cela s'est produit il y a quelques années pour la robotique manufacturière et la machine outil. Au Japon, à titre de comparaison, le projet de robot humanoïde a été développé en interne, par HONDA pendant 10 ans par une équipe d'une dizaine d'ingénieurs et cela, dans le plus grand secret et sur fond propre. La plate-forme ministérielle *HRP Humanoid Robot Project*⁴ aura coûté au Japon entre 250 et 300 millions de dollars.

Ces difficultés ont conduit la communauté française à se structurer avec la création des *Journées Nationales de la Recherche en Robotique* qui ont lieu tous les deux ans (l'INRIA jouant à cet égard un rôle moteur), le lancement du Programme Interdisciplinaire de Recherche du CNRS *Robea*⁵ regroupant les principaux acteurs de la recherche (CNRS, INRIA, INSERM...), dont une suite via un GDR où sont fortement impliqués les équipes de l'INRIA est actuellement en cours d'étude, et la possibilité pour les jeunes chercheurs en robotique de se fédérer en association (AJCR⁶).

Ceci a contribué à permettre à la France de maintenir une recherche de bonne tenue, reconnue comme telle au niveau international comme l'attestent les prix reçus par des chercheurs français, leur présence en terme de publications, et leur place assez large dans l'organisation de la recherche sur ce thème.

Une structuration de même type a été adoptée au Japon et, dans une optique plus "lobbyiste", au niveau européen avec le réseau EURON⁷ qui impliquent de nombreux laboratoires. Un peu curieusement, ou parce que cela est moins utile pour les chercheurs de ce pays, les USA ne disposent pas d'un tel réseau.

Les thèmes de recherche selon les continents : Le World Technology Evaluation Center (WTEC)⁸ a établi un tableau indiquant les axes majeurs de recherche aux USA, en Europe, et au Japon/Corée (table 1). Pour l'Europe, il nous semble que la place de la manipulation est plutôt sous-évaluée, à l'inverse de celle de la recherche en robotique de service.

Les chercheurs en robotique américains, soucieux de l'évolution de la robotique industrielle dans leur pays, ont lancé un cri d'alarme dans le rapport du WTEC, qui semble avoir été entendu si l'on se réfère à l'augmentation significative des financements récents en robotique des universités américaines : 48% d'augmentation pour le Robotics Institute de CMU et au moins 50% dans d'autres Universités comme CalTech, GeorgiaTech et le

⁴www.meti.go.jp

⁵www.laas.fr/robeca/eng.html

⁶www.ajcr.free.fr

⁷www.euron.org

⁸Le WTEC, www.wtec.org, est une "non-profit research corporation" qui établit des rapports de prospective pour les agences fédérales américaines. Elle a établi en 2005 pour la NASA, la NSF, le NIBIB et le NIH un rapport intitulé "Assessment of International Research and Development in Robotics", www.wtec.org/robotics.

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

TAB. 1 – Les axes de recherche selon les continents d'après le WTEC

Virginia Institute of Technology⁹.

2.2 L'impact sur la société

L'impact de la robotique dans la société s'est traduit dans les années 80-90 principalement par l'introduction des robots dans les moyens de production. Tout comme le taylorisme, elle a profondément bouleversé le rapport de l'homme avec l'outil de production. La robotisation de l'industrie manufacturière fut, durant cette période, une des mesures majeures prises par les pays industrialisés pour accroître leur productivité face à la montée en puissance des pays émergents. En même temps, l'image de la robotique dans l'esprit de la population n'a cessé de se dégrader : présentée comme un moyen d'améliorer les conditions de travail (dans les fonderies, par exemple) elle a plutôt été perçue, en France en particulier, comme une cause de chômage et d'augmentation des cadences. Cette perception a depuis évolué vers une meilleure acceptation, en relation avec la diversification de l'utilisation des robots.

2.2.1 La robotique industrielle dans le monde

Les chiffres de cette section sont tirés des rapports World Robotics 2003, 2004 et 2005, réalisés par la Commission pour l'Europe des Nations-Unis (UNECE)¹⁰ en collaboration avec l'International Federation of Robotics (IFR)¹¹.

En terme d'utilisation, la robotique manufacturière a connu une croissance forte ces cinq dernières années. En France le nombre de robots installés est de l'ordre de 35 000 unités (61% du parc dans l'industrie automobile, 14% dans l'industrie chimique, les industries les moins utilisatrices étant celles de la production électrique, avec 4%, et de l'alimentaire, avec 3%) et les ventes annuelles sont de l'ordre de 3500 à 4000 unités.

Le nombre de robots par tranche de 10 000 employés est de 308 pour le Japon, 86 pour l'UE, 135 pour l'Allemagne, 67 pour la France, Finlande, Espagne, 36 pour le Royaume-Uni, et 58 pour les USA. Il est prévu à l'horizon 2007 que 33% du parc robotique sera installé en Europe, 34% au Japon et seulement 15% au USA.

⁹source : USA Today, Associated Press, 4/8/2004

¹⁰www.unece.org

¹¹www.ifr.org

Les entreprises de plus de mille employés utilisent 70% du parc, alors que celles de moins de 300 employés ne possèdent que 17% de ce parc. L'évolution du coût moyen d'un robot passe de l'indice 100 en 1990 à 21 en 2002. En 2002, 95% du parc était constitué de robots coûtant plus de 30 000 euros, et 63% de ce parc valait à l'unité entre 30 000 et 60 000 euros. Les fabricants majeurs sont européens (ABB et KUKA, avec près de 40% du marché) et le japonais Fanuc, numéro 1 mondial avec 1800 salariés dont 1300 sont dans des laboratoires de recherche de la société.

Si une majorité d'installations concernent des applications de positionnement en boucle ouverte programmées par apprentissage ou via des moyens de CAO (peinture, soudage avec 42% des applications, ...), un nombre significatif d'installations impliquent une commande en boucle fermée utilisant des capteurs extéroceptifs. Ces capteurs peuvent être de simples capteurs binaires permettant la détection de présence d'un objet, des capteurs de distance, et de plus en plus fréquemment des capteurs plus évolués (capteurs de vision 2D ou 3D et, dans une moindre mesure, capteurs de force). Une part importante du chiffre d'affaire des industriels de la robotique provient d'une activité de service pour adapter un système robotique standard à une application spécifique. C'est en particulier le cas pour les systèmes évolués impliquant une capacité de perception. Les principaux moyens de communication avec les armoires de commande sont des liaisons série (parallèle dans le meilleur des cas) où des liaisons Internet, peu appropriées aux contraintes du temps réel. Par ailleurs, il demeure difficile d'intervenir au niveau de la commande de base du robot. Ce manque d'ouverture, discutable techniquement, a une raison historique liée à la récupération et adaptation de la technologie des armoires de commande des automates. On peut aussi y voir un intérêt économique pour les constructeurs, ne serait-ce que pour préserver leur activité de service.

La composante logicielle, dans le coût d'un système robotisé manufacturier, est en forte augmentation : CAO pour la modélisation de l'environnement et la planification de trajectoires, et logiciel de contrôle/commande des déplacements du robot. S'il est difficile d'évaluer précisément la répartition des coûts entre les sous-systèmes mécanique, commande, et logiciel amont, il est certain que le prix de la partie purement mécanique devient de plus en plus marginal (une partie des coûts de la mécanique étant reportée en amont sur des coûts de logiciels de conception optimale). La diminution du coût des composants informatiques a joué sur le coût de la commande, mais dans une proportion bien moindre que pour les PC en raison d'une demande de fiabilité beaucoup plus grande. Elle a cependant été compensée par l'accroissement en puissance de calcul. A l'opposé, le logiciel amont, quasiment inexistant jusque dans les années 1990, est devenu un composant indispensable, avec un coût loin d'être négligeable. De façon générale, la baisse des coûts est accompagnée d'une augmentation sensible des performances.

L'atteinte d'une certaine maturité de la robotique manufacturière n'implique cependant pas que toute recherche dans ce domaine de la robotique soit superflue (voir la partie Prospective dédiée à ce sujet plus loin dans le document).

Pour ce qui concerne la robotique mobile, le démarrage industriel n'a pas encore eu lieu. Les applications à grande échelle de ce type de robotique sont encore en état de gestation et en devenir (transports automatisés, par exemple), à la remorque d'applications de pointe (robotique spatiale, sous-marine) et du développement de familles de drones robotisés utilisés à des fins civiles ou militaires. Mais la situation pourrait rapidement évoluer, notamment via l'essor d'une robotique mobile "grand public" (aspirateur, robot ludique) issue de la recherche passée et sa vulgarisation (à travers des manifestations de type E=M6).

L'ensemble des études récentes convergent pour indiquer que le marché de la robotique est appelé à un fort développement dans la prochaine décennie. Cette perspective optimiste repose d'abord sur le fait, qu'après quelques années difficiles, la robotique industrielle a connu au cours de ces cinq dernières années une croissance soutenue (19% de croissance en 2003). Cependant, le fort développement prévu repose principalement sur une perspective d'explosion de la robotique de service (évoquée ultérieurement). Par exemple, certaines projections

indiquent qu'à l'horizon 2010 le marché de la robotique de service excédera celui de la robotique industrielle.

Concernant la répartition géographique mondiale, les entreprises industrielles américaines sont globalement en retrait par rapport aux entreprises japonaises et européennes, grosses sociétés et start-ups confondues. En dépit d'un certain "leadership" américain au niveau de la recherche (aidé par la puissante structure universitaire, l'existence de programmes robotiques spatiaux et militaires ambitieux, et les mécanismes de financement institutionnels) les nouvelles technologies de la robotique, même lorsqu'elles ont été initiées aux USA, semblent moins exploitées industriellement qu'en Europe et dans les pays asiatiques (en Corée la robotique est considérée comme l'un des 10 instruments majeurs de croissance et fait partie des 23 domaines privilégiés du *21st Century Frontier Science Programme*¹²).

2.2.2 La place de l'industrie robotique française

Le programme ARA des années 1980 avait la vocation de doper durablement l'industrie française de la robotique en permettant de compenser, au moins partiellement, le désengagement déjà fortement amorcé des industriels français de la machine outil du marché de la production de masse (au profit des machines spéciales). Les industriels français constructeurs de robots, comme Renault ou Acma, partaient sur de bonnes bases avec des produits de qualité au moins aussi bonne que celle des produits concurrents. Cependant leur politique de développement, en relation avec le ralentissement de leur besoin d'équipement et un contexte social défavorable, n'a pas permis de préserver cet avantage. Alors que des constructeurs comme Fanuc et GMF mettaient en place des équipes importantes avec de gros budgets pour élaborer leurs gammes de robots, les industriels français avaient des équipes réduites sans perspectives d'avenir soutenues. Le résultat de cette politique fut la disparition totale de la production en masse de robots en France, pendant que Fanuc devenait le premier constructeur après avoir absorbé GMF. Pour la partie commande l'histoire se répéta à l'identique avec NUM, qui bénéficiait pourtant d'une bonne opportunité pour investir un marché dans la continuité de son activité principale centrée sur la commande de machine-outils. Cette entreprise a maintenant un rôle de revendeur.

Il est clair que la disparition des gros constructeurs français a eu des conséquences importantes, dont celle de renforcer la défiance des institutions nationales vis-à-vis de cette activité et la réduction des moyens accordés à l'enseignement et la recherche en robotique.

Faute d'avoir une envergure suffisante pour attaquer le marché de la robotique manufacturière, les PME françaises ont adopté deux types d'approche :

1. certaines PME se sont intéressées au marché de la péri-robotique comme, par exemple, les outils de programmation (ALEPH) ou les contrôleurs de robots et les capteurs d'effort (AICO). Mais ces sociétés n'ont pas réussi à faire fructifier leur avance technologique pour assurer leur pérennité. Un autre exemple est AKR qui a bénéficié pendant plusieurs années d'un brevet de l'ONERA sur un capteur d'effort multi-axes performant, sans jamais l'utiliser. Des américains, comme JR3 et Lord, de tailles comparables et avec une technologie similaire à celles d'AKR, possèdent maintenant ce marché, qui a depuis largement dépassé le cadre de la robotique.
2. d'autres PME se sont orientées vers le développement de robots spécifiques comme, par exemple, les robots destinés aux laboratoires (SCEMI, AID –disparus depuis–), la réalisation de prototypes (ROBOSOFT¹³, SINTERS¹⁴), la robotique d'intervention –pour le déminage, par exemple– ou sous-marine (CYBERNETIX, ECA¹⁵).

¹²source : WTEC , The Chosun Ilbo (english.chosun.com)

¹³www.robosoft.fr

¹⁴www.sinters.fr

¹⁵www.eca.fr

Seules certaines PME développant des robots spécifiques ont survécu. Il faut cependant noter que des technologies issues de la robotique continue à être exploitée par des sociétés françaises dans d'autres cadres (par exemple le système ACT d'Aleph Technologies). Toutefois la taille des PME, ne leur permet pas d'avoir une assise financière suffisante pour pouvoir lancer des projets à long terme. Pour créer ou conserver des liens avec elles les projets doivent faire preuve d'un grand pragmatisme, qui n'est guère compatible avec leurs perspectives à long terme. Les choses sont cependant en train d'évoluer très rapidement depuis plus d'un an avec un regain d'intérêt des gros industriels pour la robotique (Sagem, Dassault, Thalès).

2.2.3 L'image de la robotique

L'opinion publique vis-à-vis de la robotique a évolué : le robot n'a généralement plus l'image exclusivement négative du concurrent de l'homme sur le marché du travail. Il est au contraire souvent intégré dans une vision de progrès au même titre qu'Internet ou les systèmes d'information et de communication. Cette évolution est certainement liée à l'élargissement des applications de la robotique vers des domaines où les robots ne sont pas perçus comme des concurrents (robotique ludique, de service, d'exploration spatiale). Même des applications psychologiquement difficiles, comme la chirurgie robotisée, commencent à jouir d'un bon niveau d'acceptation auprès des patients. Dans certains pays, comme le Japon, dont le fond culturel est plus propice au développement de ce type de machine que dans les pays occidentaux, la robotique tend même à acquérir une véritable dimension sociale.

Cette meilleure acceptation ouvre la voie de la robotique "grand public", laissant penser que les techniques issues de la robotique sont amenées à jouer un rôle important d'assistance à l'homme dans les années à venir. C'est déjà le cas pour les applications les plus simples comme les robot-aspirateurs (le *Roomba* de I-Robot¹⁶ a été vendu à 1.5 million d'exemplaires) ou les robot-tondeuses de gazon. La volonté politique existe d'ores et déjà comme le montre, par exemple, l'objectif affiché par le gouvernement sud-coréen d'avoir un robot par foyer à l'horizon 2015-2020¹⁷ où la priorité donnée par le gouvernement bavarois à la robotique et le soutien prioritaire à la robotique de 9.8 millions d'Euros accordé par le Ministère Fédéral allemand de la recherche et de l'Enseignement (BMBF)¹⁸. On retrouve cette volonté politique au niveau européen : ainsi le dernier Call du FP6 comportait un appel sur la robotique avancée, ce qui n'était pas arrivé depuis une dizaine d'années et la robotique sera un thème important du FP7. Au niveau national l'ANR a lancé un appel sur les Systèmes Interactifs et la Robotique et des instituts tels le CEMAGREF, qui avait décidé il y a cinq ans d'arrêter leurs activités en robotique, décident à présent de s'y réimpliquer. Il est appréciable que l'INRIA, avec sa politique scientifique moins dirigiste, n'ait pas suivi ce même chemin tortueux.

Les acteurs économiques ont d'ailleurs bien identifié à la fois cette volonté politique ainsi que les bénéfices économiques offerts par la robotique comme le montre, par exemple, l'offre Microsoft d'une plate-forme logicielle pour la robotique, le *Microsoft Robotic Studio*¹⁹ déjà adoptée par Robotsoft.

On retient aussi de ces premiers succès que le développement de la robotique grand public se fait en parallèle, et non au détriment, du développement de la robotique à vocation professionnelle. En effet les acteurs, comme les composants, sont différents, même si de nombreux composants "de masse" utilisés pour la robotique grand public ont comme lointains ancêtres des prototypes développés pour la robotique à vocation professionnelle. Quant à la partie logicielle, il est prévisible que l'interaction avec les humains et la faible structuration des lieux où seront amenés à évoluer les robots grand public conduisent, à terme, à des différences importantes.

Finalement, on ne peut que s'inquiéter de la quasi-absence actuelle d'industriels français dans le domaine de

¹⁶www.irobot.com

¹⁷source : BE Corée numéro 36 du 13/9/2006

¹⁸source : BE Allemagne, 2006

¹⁹<http://msdn.microsoft.com/robotics/>

la robotique grand public (tout au plus peut-on mentionner le partenariat établi entre GSF et Robosoft²⁰ il y a quelques années, mais qui n'a pas connu de suite).

2.2.4 Enseignement

La robotique est généralement bien perçue par les étudiants de par son aspect ludique et ouvert, et elle est présente dans de nombreux cursus. Cette discipline permet d'illustrer un grand nombre de concepts, y compris les plus difficiles théoriquement. Cette possibilité pourrait cependant être mieux exploitée en accroissant les transferts entre les chercheurs de la discipline et les enseignants.

L'enseignement de la robotique peut maintenant s'appuyer sur des dispositifs expérimentaux peu coûteux (robot mobile Kepera, Lego MindStorm) qui, mis à disposition des étudiants, leur permettent de se familiariser avec du matériel mécanique et électronique, d'aborder l'informatique temps-réel et les problèmes des systèmes embarqués, avec une ouverture suffisante pour illustrer des concepts très variés. A notre sens ce type de plate-forme peut compléter, voire partiellement se substituer à des maquettes pédagogiques beaucoup plus coûteuses, et surtout d'une maintenance difficile. A la limite, le matériel fourni aux étudiants pourrait être remplacé d'une année sur l'autre.

3 Partie II : Prospective 2005-2015

Cette section présente les problématiques de recherche actuellement à l'étude dans les laboratoires, en anticipation des applications de la robotique dans les dix prochaines années. Elle s'appuie sur les sources suivantes :

- le site web du CNRS²¹
- le document de prospective réalisé en avril 2004 par le réseau d'excellence *Euron* regroupant une partie de la communauté scientifique européenne en robotique²²,
- des recommandations du groupe EUROP (European Robotics Platform)²³, reprenant partiellement les recommandations d'*Euron*, qui ont servi de base à l'appel d'offre IST "Advanced Robotics" proposé dans le cadre du 6ème PCRD. Il convient de noter qu'EUROP est un consortium très orienté vers l'industrie (il a l'appui de 40 industriels européens de la robotique dont le CEA, Robosoft, Sagem et Thalès) et que les recommandations du groupe sont principalement le fruit d'industriels du domaine regroupés au sein de l'association EUnited Robotics (European Robotics Association)²⁴
- les conclusions de la conférence ROBOBUSINESS qui s'est tenue Cambridge en Mai 2005²⁵
- les thèmes des sessions des conférences majeures en robotique ICRA (organisé pour la première en dehors des USA en 1992 conjointement par l'INRIA et des partenaires italiens), IROS (organisé 2 fois en France et à chaque fois par l'INRIA) et l'Int. Symp. on Robotics Research des deux dernières années, ainsi que de conférences plus spécialisées dans le domaine de la vision (ICCV et ECCV), de l'automatique (CDC), et de la mécanique (ARK, CK, IFToMM World Congress, qui sera organisé pour la première fois en France par l'INRIA en 2007).

²⁰www.robosoft.fr

²¹www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosrob/accueil/index.html

²²www.cas.kth.se/euron/euron-deliverables/ka1-3-Roadmap.pdf

²³www.robotics-platform.eu.com

²⁴www.eu-nited-robotics.net

²⁵www.roboevent.com/

- l’*Assessment of International Research and Development in Robotics* du *World Technology Evaluation Center* (WTEC)²⁶
- la synthèse sur l’*Intelligent Service Robotics in USA* réalisée par la société EVOLUTION ROBOTICS²⁷
- les documents de prospective de l’UNECE²⁸ et de l’IFR²⁹

Cet exercice de prospective est bâti sur un premier scénario allant des applications vers la recherche (prospective ”bottom-up”), suivi d’un second scénario allant de la recherche vers les applications (prospective ”top-down”).

3.1 Prospective ”bottom-up”

Il s’agit de présenter des applications porteuses pour la robotique, en commençant par celles à court terme et en allant vers le plus long terme. La liste présentée ne prétend pas être exhaustive. Une motivation de la présentation de cette liste est de montrer que l’industrie française, qui n’a pas réussi à s’imposer au début du développement de la robotique, dispose d’une deuxième chance réelle de remporter des marchés importants.

3.1.1 Robotique manufacturière

Comme pour la robotique de service, une plus grande interaction avec l’homme est prévisible. A moyen terme les ”défis” concernent la perception (vision 3D et force), l’intégration de la perception dans le contrôle, la conception, la sécurité de fonctionnement et, enfin, la maîtrise des coûts.

Il s’agit d’aller vers une robotique mieux adaptée aux tâches à accomplir et plus accessible (en terme de coût et de facilité d’utilisation). Quelques exemples sont donnés dans les paragraphes suivants.

Robotique ”low cost”

La technologie actuelle permet de produire des robots très peu coûteux, pour effectuer des tâches relativement simples tel que des opérations de pick-and-place. Une approche intéressante consiste à simplifier à l’extrême la mécanique et la commande en s’appuyant sur le paradigme des *robots binaires* munis d’actionneurs fonctionnant en tout ou rien et d’une commande réduite à l’utilisation du port parallèle d’un PC relié directement à l’alimentation des actionneurs. Un empilement approprié d’actionneurs de ce type permet au robot d’atteindre un nombre discret, mais très dense de poses. Un tel robot présente l’avantage d’être très rapide, de correspondre à des besoins effectifs et d’avoir un coût dérisoire, aussi bien en terme de construction que de maintenance. Deux sujets de recherche sous-jacents sont i)trouver la géométrie du robot pour que les poses atteignables soient denses dans un espace de travail donné, et ii)concevoir des algorithmes rapides pour déterminer les transitions permettant à l’effecteur d’atteindre une position terminale donnée, ou d’en être très proche.

Machine-outil

Des robots ont été intégrés très tôt dans le domaine de la machine-outil, comme échangeurs d’outils ou de pièces, sans modifier la structure de la machine elle même. Le passage à l’UGV (Usinage Grande Vitesse), voire l’UTGV, conduit à une convergence entre les problèmes de la machine-outil et de la robotique. Cette convergence se traduit par exemple par des architectures mécaniques proches des robots parallèles et la nécessité de prendre

²⁶www.wtec.org/robotics

²⁷teamster.usc.edu/~iera05/roadmap04/USA.pdf

²⁸www.unece.org

²⁹www.ifr.org

en compte les effets dynamiques au niveau de la commande. En terme de problématique de recherche, il s'agit de gérer le passage entre le monde linéaire de la machine-outil classique et celui, non linéaire, de la robotique, et de repenser l'ensemble des composantes du système, en partant de la CAO jusqu'à la commande. Cette remise à plat complète de la chaîne, de la conception à l'utilisation des machines, concerne un marché de taille très conséquente. Peut-être une opportunité majeure pour l'industrie française de trouver une place en dehors des machines spéciales...

Middleware de commande

Le rapprochement entre robot et machine-outil, et la diversification des structures mécaniques, des capteurs et des actionneurs, permettent d'imaginer le développement d'un contrôleur "universel". Celui-ci adapterait son comportement en fonction d'une description de la structure mécanique, et les capteurs et actionneurs seraient "plug and play". S'ajouteraient des fonctions automatiques de calibration et de prise en compte de données sensorielles. Un tel middleware de commande permettrait une certaine standardisation de la programmation robotique, avec un effet positif pour la dissémination de la robotique vers les PME, réticentes à embaucher du personnel très spécialisé dans l'utilisation d'un type de robot donné. Cette standardisation aurait aussi comme effet bénéfique de prolonger la durée de vie des robots souvent abandonnés en raison de composants hors d'usage dans la commande, alors que leur mécanique est encore fonctionnelle. Un environnement de programmation de ce type permettrait une mise en œuvre accélérée de nouveaux matériels robotiques et un temps de formation réduit pour les opérateurs. La standardisation et le contrôleur universel auraient aussi une influence sur l'ouverture du logiciel amont. Actuellement chaque constructeur de robot fournit des logiciels amont propriétaires utilisables pour ses seuls produits.

La standardisation en robotique est cependant un objectif difficile à atteindre, le milieu étant beaucoup moins structuré que dans des domaines comme Internet.

Calibration et métrologie

Une préoccupation croissante des utilisateurs est de pouvoir maîtriser les dérives des performances des robots dues à leur vieillissement. De plus en plus de systèmes utilisent des capteurs de métrologie pour assurer une qualité de production constante, optimiser la durée d'utilisation des outils et compenser la dérive de la mécanique ou des capteurs. Si cette approche est relativement bien maîtrisée pour les structures simples (robot cartésien par exemple), elle l'est beaucoup moins pour les structures mécaniques complexes. Le traitement de ces problèmes, pour assurer une qualité quasi-constante de la sortie du système, passe par la mise au point des techniques dédiées d'identification en ligne et d'ajustement des paramètres en boucle fermée.

Robotique de laboratoire

La recherche exhaustive de composés chimiques actifs a conduit à une certaine automatisation des tâches de manipulation d'échantillons, autrefois réalisées manuellement. Ces opérations sont pour le moment réalisées par des robots de type pick-and-place rapides et précis, mais il est prévisible, qu'à l'instar de la robotique manufacturière, les robots de laboratoire évolueront vers la réalisation d'opérations plus complexes, nécessitant de la perception par exemple.

3.1.2 Robotique de surveillance et d'intervention

Nous avons regroupé dans cette section, les applications de robotique mobile permettant de surveiller ou d'intervenir sur des sites en se substituant à l'homme.

Robotique d'observation et de préventions des risques

La prévention des risques, qu'ils soient naturels ou liés à l'activité humaine, est un enjeu important dans le développement des sociétés futures. Les robots, qu'ils soient terrestres, sous-marins, ou aériens, sont appelés à jouer le rôle de vecteur pour la collecte d'informations dans des missions de surveillance. Déjà intensément utilisés par les militaires (voir plus loin), leurs applications civiles ne font que commencer. On peut citer des projets de drones aériens en cours sur la prévention à la pollution dans le domaine maritime, la prévention des incendies. Dans le domaine sous-marin, on peut citer un projet développé actuellement par l'Ifremer visant à réaliser et exploiter en méditerranée un réseau de stations benthiques pour l'évaluation des risques sismiques. Il est clair que la prévention des catastrophes naturelles a pris une importance accrue depuis le tsunami qui a frappé l'Asie du Sud Est. Dans ce type d'application, l'autonomie et la coopération entre engins ouvrent des problématiques de recherche nouvelles comme par exemple, la robotique collaborative.

Robotique de sauvetage

Des événements tragiques récents, comme celui des attentats terroristes du 11 Septembre 2001 ou le tremblement de terre de Kobe, ont montré les limitations et insuffisances des moyens de secours conventionnels et robotisés. Lors de la première tragédie, l'existence d'un centre permanent de secours robotisés a permis la mise en œuvre très rapide de moyens robotiques mobiles, avec cependant des résultats pour le moins mitigés. Certains robots sont très rapidement tombés en panne, en raison de l'atmosphère très hostile. D'autres, télé-opérés via un câble se sont retrouvés coincés dans les décombres. De plus, les informations (principalement visuelles) retransmises par les robots se sont avérées très difficilement exploitables dans un environnement où la poussière gommait les reliefs et les couleurs.

Ces problèmes soulignent la nécessité de recherches pour concevoir des dispositifs robotisés plus adaptés à la réalité des situations de crise, facilement déployables, et au fonctionnement robuste.

Robotique en milieu hostile

Ce sujet, bien que déjà "ancien", reste d'actualité.

La robotique sous-marine civile poursuit son bonhomme de chemin avec des instituts de recherche spécialisés, comme l'IFREMER en France, et des entreprises comme la COMEX³⁰ et ECA³¹. Après avoir été largement dominé par des applications de type intervention sur des structures par des robots téléopérés, la tendance est, aujourd'hui, d'aller vers une plus grande autonomie (un engin autonome japonais a récemment effectué une mission sur plus d'une centaine de kilomètres). On peut citer l'émergence de sociétés de taille plus modeste très proche de la recherche et faisant du "service" (par exemple, SEEBYTE³² issue de Herriott Watt University et faisant de la surveillance de pipelines). L'intervention sur les épaves suite à des accidents maritimes, ainsi que l'exploitation de ressources sous-marines, pourraient amplifier l'usage de ces engins autonomes.

³⁰ www.comex.fr

³¹ www.eca.fr

³² www.seebyte.com/contenthome.htm

Dans le nucléaire, le vieillissement du parc français va certainement être la source d'interventions robotisées. Mais les recherches sur ce thème restent très discrètes, même si l'on peut penser que l'installation d'ITER pourrait conduire à des développements importants.

La robotique spatiale se dirige vers des engins d'observation à la fois plus robustes et plus autonomes sur des périodes d'activité plus longues, et dotés de fonctions plus nombreuses. Pour ce qui concerne l'exploration spatiale lointaine, le niveau de fiabilité requis et les contraintes sur les composants spatiaux tendent à favoriser les solutions un peu anciennes mais éprouvées (conception mécanique mise à part). L'exploration spatiale "proche" (disons jusqu'à la Lune) pourrait être à l'origine d'une recherche plus avancée, dans l'optique de réduire la présence humaine aux tâches pour lesquelles elle reste indispensable. Le cas de l'ISS, maintenue seulement en activité par les cargos russes automatisés, montre l'intérêt des solutions entièrement robotiques.

La recherche publique dans ce type de domaine est rendu un peu difficile de par la variabilité des décisions politiques dont dépendent les programmes spatiaux, ainsi que les places réservées à certains laboratoires et industriels.

3.1.3 Robotique de défense

La robotique de défense est en plein essor. L'usage de drones devient habituel sur les champs de bataille, même si nombre d'entre eux ont montré une certaine fragilité. Des robot-soldats ont été utilisés durant la guerre en Afghanistan dans le but de limiter les pertes humaines. Ce fut un succès mitigé, le concept de plate-formes mobiles armées relativement grosses et téléopérées ayant été partiellement invalidé par des défenseurs sachant exploiter les vulnérabilités des engins. La DARPA et le DOD (à travers le "Joint Robotics Program"³³ auquel est associée la France) ayant engagé de grands moyens dans ce domaine, les faiblesses des systèmes actuels seront vraisemblablement corrigées. Cette agence explore par ailleurs diverses autres voies : exo-squelette pour amplifier les performances physiques et sensorielles des soldats (programme EHPA³⁴), uniformes instrumentés permettant de localiser en permanence le soldat et de surveiller son état de santé, voire de procéder aux premiers soins (marché confié au MIT), robots d'évacuation des blessés, divers systèmes mobiles robotiques autonomes pour les milieux aériens, terrestres, ou sous-marins, ... La DARPA a aussi profité de compétences externes en organisant le "Grand Challenge"³⁵, une course-concours au cours de laquelle des véhicules terrestres doivent parcourir en mode autonome complet, sur un terrain non-préalablement balisé (constitué de portions de routes et de désert), plus de 175 milles en moins de 10 heures. L'édition 2005, remportée par Stanford, a montré que l'utilisation de techniques robotiques éprouvées permettait d'obtenir une navigation autonome relativement rapide en environnement difficile.

En France, la DGA a retrouvé une activité dans le domaine, en particulier autour des plate-formes mobiles et des drones. On peut citer à titre d'exemple le projet fédérateur BOA (Bulle Opérationnelle Aéroterrestre)³⁶ qui à l'échéance 2015-2030 vise à déployer un système complet faisant coopérer robot terrestre et aérien. Le niveau de confidentialité de ces études ne permet évidemment pas d'en connaître le contenu dans le détail.

3.1.4 Robotique de chantiers

Des tentatives ont été déjà faites pour une automatisation accrue des engins de chantier, que le caractère hautement non structuré de l'environnement et les conditions naturelles adverses rendent difficile. L'applica-

³³www.jointrobotics.com

³⁴www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/ehpa.html

³⁵www.grandchallenge.org et son équivalent en Europe www.elrob2006.org/

³⁶www.ixarm.com

tion de techniques robotiques devrait toutefois permettre d'améliorer l'efficacité des engins et d'en assurer le maniement à distance lorsque les conditions d'utilisation sont dangereuses ou climatiquement peu confortables.

La plus grande structuration des environnements portuaires devrait aussi faciliter la robotisation des opérations de chargement/déchargement et de réparation de navires.

A long terme, la construction de bâtiments pourra également être partiellement robotisée, depuis le montage du gros œuvre jusqu'à la mise en place de structures actives anti-telluriques, en passant par la conception d'éléments structurants actifs dans les vides sanitaires et les locaux de service pour renforcer la rigidité des immeubles, contribuer à la lutte contre l'incendie, et/ou favoriser l'évacuation des occupants en cas de nécessité.

3.1.5 Robotique de service

Un robot de service est défini comme *un robot qui opère de manière autonome ou semi-autonome pour fournir des services utiles au bien-être des humains ou au bon fonctionnement d'équipements, en excluant les opérations manufacturières* (IFR). La dénomination de robotique de service est donc très large. Il y a vingt ans, elle suffisait du fait que les applications et le marché de ce type de robotique étaient pratiquement inexistantes. La multiplication actuelle des applications non-manufacturières, dont tout porte à penser qu'elle s'amplifiera à un rythme accéléré, appelle à définir différentes catégories de robotique de service.

La notion de service aux humains recouvre aussi bien l'assistance aux personnes âgées, que les robots guide, les robots d'accompagnement, et les robots de surveillance. On peut aussi mentionner les services autour de l'environnement humain, à usage professionnel ou privé : nettoyage de surface et assistance à la maintenance d'équipement.

En milieu professionnel, à court et moyen terme, il y a déjà un marché potentiellement très conséquent pour de la robotique de service d'automatisation, dite aussi *de service professionnelle*. Citons comme exemple le tri postal (suite aux attaques à l'anthrax le service postal américain a mis en place plus de 1000 robots pour le tri des colis et estime qu'à terme 80 000 robots devraient être utilisés pour ses besoins propres), la construction, la logistique ou l'inspection. Il s'agit d'un marché de niches que les PME peuvent investir.

A côté de ce type de robotique de service, la *robotique grand public* touche, selon les cas, des populations importantes (nettoyage domestique, robots ludiques), ou plus réduites (assistance aux malades, entraînement sportif).

L'organisation japonaise *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO) a lancé un plan de 30 millions de dollars³⁷, arrivé à échéance en 2005, pour le développement de la "next generation of practical robots" et dont les résultats ont été des prototypes montrés lors de l'exposition internationale de Aichi³⁸ : robots de surveillance, de transport de poubelles, chaise roulante "intelligente", de nettoyage, robot réceptionniste et robot "childcare".

Pour 2005, le nombre de robots de service estimé par le WTEC est donné dans les tableaux 2 et 3. A l'horizon 2025, la Japan Robot Association (JARA³⁹) estime que la robotique de service représentera 80% du marché de la robotique, marché qui serait très largement dominé par la robotique médicale et la robotique d'assistance grand public. Il est toutefois possible que ces estimations soient biaisées par le contexte culturel japonais. On note aussi l'entrée en force sur ce marché de nouveaux acteurs qui, ayant abandonné leurs activités en robotique manufacturière, se concentrent sur la robotique de service : Fujitsu (robotique personnelle⁴⁰), Sony⁴¹ (robots

³⁷www.omg.org/docs/robotics/05-01-04.pdf

³⁸www.expo2005.or.jp

³⁹www.jara.jp/e/

⁴⁰www.automation.fujitsu.com/en/

⁴¹www.sony.net

Catégorie	Nombre	Valeur (millions de \$)
terrain (agriculture, forêt, mines)	885	117
nettoyage/maintenance	3370	68
inspection	185	21
construction	3030	195
médical	2440	352
sécurité, défense	1010	76
sous-marin	4785	1467
robot de laboratoire	3060	37
autres	2295	110
Total	21060	2443

TAB. 2 – Estimation de la robotique de service dans l’industrie par le WTEC

Catégorie	Nombre	Valeur (millions de \$)
domestique	607 000	217
ludique	691 490	1125
robot d’assistance	260	2
autres	205	7
Total	1 298 955	1351

TAB. 3 – Estimation de la robotique grand public par le WTEC

ludiques), Samsung (robotique grand public⁴²). Les constructeurs européens n’ont pour le moment pas pris ce tournant.

Pour les experts du WTEC et d’EUROP les défis de la robotique de service concernent, à des degrés divers selon la nature de l’application, les actionneurs, la mobilité en environnement mal connu, les possibilités de reconnaissance et de manipulation d’objets quelconques, la perception (en particulier la vision) pour la navigation, l’autonomie énergétique (le robot humanoïde ASIMO de Honda⁴³ possède une autonomie d’à peine 15 minutes) et l’interaction avec les humains. Un des acteurs de la robotique de service, P. Pirjanian (PDG de EVOLUTION ROBOTICS) insiste sur l’importance de développer des standards tant au niveau matériel que logiciel. Quant aux experts d’EUROP ils mentionnent de plus l’importance d’une infrastructure de support spécifique.

Robotique grand public

Les exemples les plus simples (et sans doute les plus immédiats) de robotique grand public sont les aspirateurs et les tondeuses à gazon.

Le succès du robot aspirateur *Roomba* de I-Robot⁴⁴ vendu à 200 \$ l’unité l’atteste : moyennant un coût raisonnable ce type de produit rencontre un succès immédiat (plus de 1.5 millions de robots vendu à ce jour).

⁴²www.samsung.com

⁴³world.honda.com/ASIMO/

⁴⁴www.irobot.com

Les sociétés Kärcher⁴⁵ et Samsung⁴⁶ viennent d'ailleurs de développer des robots du même type. Le rôle de la recherche de pointe dans le développement de ce type de produit demande cependant à être précisé. Pour la plate-forme elle-même, seules sont utilisées des technologies éprouvées du ressort de la production de masse. La partie programmation est plus intéressante. Il s'agit de développer des stratégies en terme d'efficacité, de robustesse de fonctionnement, de discrétion vis-à-vis de l'environnement humain, et de gestion de l'énergie. Les perspectives de recherche s'ouvrent encore plus si on considère une flotte de robots dont le comportement collectif doit être coordonné (peut être selon des modèles biologiques).

Les experts comptent aussi sur le développement croissant de jouets robotisés, à l'image du chien *AIBO*. Il convient cependant de reconnaître que, même au Japon, l'engouement au départ très fort pour ce type de robot (plus pour les adultes que pour les enfants, d'ailleurs) est retombé. La discrétion actuelle des constructeurs peut laisser présager le développement de nouveaux jouets beaucoup plus performants, et plus attractifs pour les enfants avec des interfaces spécialement étudiées dans ce but.

Robotique d'assistance

Dans ce domaine le pays le plus engagé est le Japon qui, confronté à une perspective de fort vieillissement de sa population, et bénéficiant d'une acceptation culturelle des robots bien plus large que dans d'autres pays, s'est lancé dans une politique volontariste. L'objectif ultime est la réalisation d'un robot infirmier humanoïde qui pourrait assister la personne dans sa vie quotidienne, surveiller sa santé, et appeler des services d'urgence en cas de besoin.

D'autres études, moins ambitieuses mais dont les objectifs sont atteignables à plus court terme, sont aussi menées dans le but d'assister des personnes à mobilité réduite ou handicapées moteur, tel le programme MASTER du CEA⁴⁷ axé sur le développement d'une station de travail robotisée pour la réinsertion des personnes handicapées.

La recherche sous-jacente à ce type d'application est éminemment pluridisciplinaire avec comme mots-clés : commande de mécaniques complexes, commande référencée capteurs, modélisation de l'environnement, interface homme-machine, informatique embarquée, sécurité,... Elle implique également une forte interaction avec les milieux médicaux et diverses spécialités de la santé.

Robots humanoïdes

Le Japon est aussi le pays où la recherche est la plus active dans ce domaine. Une illustration bien connue (de par sa médiatisation) de cet état de fait est le développement du robot ASIMO de Honda⁴⁸. La qualité déjà impressionnante des mécaniques et le côté spectaculaire de leur fonctionnement ne doivent cependant pas cacher qu'au delà de la vitrine technologique et les applications immédiates dans le domaine du ludique, les applications de ce type de machine sont encore très restreintes. De nombreuses avancées restent à faire, que ce soit au niveau de la commande ou de l'intégration des autres aspects de la robotique autonome. Le problème énergétique est également très sensible (ASIMO a une autonomie de fonctionnement de 10 à 15 minutes), et l'acceptation sociétale est une autre composante du problème, jusqu'à présent très peu étudiée. Une mission récente au Japon (2004) a souligné la qualité matérielle et le potentiel des plate-formes japonaises, mais aussi le manque de *contenu* en terme de programmation. Les efforts financiers européens et américains sur les humanoïdes restent jusqu'à présent très limités.

⁴⁵www.karcher.fr/aspirateur_nettoyeur/aspirateur_robot.htm

⁴⁶www.samsung.com

⁴⁷www-list.cea.fr/fr/programmes/systemes_interactifs/systemes_interactifs.htm#2

⁴⁸world.honda.com/ASIMO/

Il reste que la robotique humanoïde est un sujet très riche pour la recherche, et que les progrès rapides obtenus récemment illustrent bien l'importance des plates-formes expérimentales pour la stimuler. L'avance acquise par le Japon est le résultat d'un investissement industriel conséquent, en interaction étroite avec les laboratoires de recherches, portant sur la réalisation de plates-formes technologiques. Toutefois, le prix d'une plate-forme de type ASIMO, sa complexité et la difficulté de sa maintenance, ne permettent pas à chaque laboratoire de disposer d'un tel robot. A cet égard, l'action conjointe du LAAS et du LIRMM autour du robot HRP2 avec mise à disposition de ce matériel pour la communauté paraît être une très bonne initiative, des expérimentations ayant d'ailleurs déjà commencées, en particulier au LIRMM.

3.1.6 Robotique médicale

La robotique médicale n'est pas inconnue du grand public en raison de la médiatisation de certaines de ses multiples facettes.

Robotique interventionnelle

La chirurgie interventionnelle fait appel à des robots devant être particulièrement précis et fiables. Leur utilisation en chirurgie orthopédique connaît déjà un succès d'estime (en Europe, le robot *Caspar* a été vendu à plus de 50 exemplaires –mais il n'est plus commercialisé– et le robot *Robodoc* de ISS⁴⁹ en 28 exemplaires avec plus de 6000 opérations à ce jour). Encore récemment, une tendance était de développer des systèmes à vocation généraliste, complexes et (très) chers, à l'instar du robot *Da Vinci* d'INTUITIVE SURGICAL⁵⁰ (USA). Le tableau suivant résume, pour l'année 2002, quelques coûts en euros liés à l'acquisition, la maintenance, et l'utilisation de ces robots. Cependant, de par leur coût et leur complexité, ces systèmes sont voués à une diffusion et un usage

Robot	Coût d'acquisition	Coût de maintenance	Coût par intervention
Da Vinci	1 125 365	120 000	1500-2000
Aesop	50 000	inclus	?
Caspar	533 572	inclus	300-600
Robodoc	600 000-900 000	inclus	450-600

relativement confidentiels (Intuitive Surgical aurait vendu une vingtaine de robots en 2004, pour un total de 286 unités vendues). On peut aussi y voir le défaut des approches généralistes et sophistiquées qui ne constituent pas toujours la réponse la mieux adaptée à des besoins spécifiques.

Une autre tendance est de développer des systèmes spécialisés plus simples, plus petits, et moins coûteux. Par exemple, afin de s'affranchir du problème du mouvement respiratoire le robot peut être fixé directement *sur* le patient, ceci imposant bien sûr de miniaturiser le système. Une illustration de cette tendance est le *Spine Assist* de MAZOR⁵¹, dont le coût est de l'ordre de 50 à 100 fois moindre que le Da Vinci.

Ce type d'approche est cependant limité au traitement de pathologies quasi-externes. Une suite logique serait de pousser plus avant la miniaturisation pour permettre au robot d'opérer *in situ*. Le soucis de réduire l'étendue des incisions pourrait même conduire à envisager de "décomposer" le robot en unités fonctionnelles séparées qui s'assembleraient sur site, ceci rendant les perspectives de recherche encore plus vastes. Dans un autre registre, des robots de "monitoring" résidant dans l'organisme seront utilisés pour repérer et surveiller l'évolution dans le

⁴⁹www.robodoc.com/eng/

⁵⁰www.intuitivesurgical.com

⁵¹www.mazorst.com

temps d'une possible pathologie, en association avec un système d'alarme et/ou le déclenchement d'un traitement thérapeutique.

Robotique de suppléance

Un aspect moins médiatisé de la robotique médicale concerne les thérapies de rééducation robotisées qui permettent à un patient de recouvrer plus rapidement l'intégralité des fonctionnalités de ses membres. L'efficacité clinique de ce type de thérapie a déjà été prouvée⁵², et elle concerne une grande population de patients. Elle ne fait appel qu'à des composants matériels relativement standardisés, tout en posant des problèmes de recherche intéressants liés à la détermination d'une stratégie optimale de rééducation en fonction des réponses du patient aux sollicitations de la machine, et la restitution aux praticiens d'un maximum d'informations pour guider cette stratégie.

Robotique pour le handicap

Des actions pour l'aide aux handicapés moteur, allant du fauteuil roulant automatisé à la rééducation fonctionnelle des membres paralysés, ont très tôt motivé les chercheurs en robotique. Ce domaine souffre cependant d'un déficit de financement (industriel et institutionnel) chronique, faute d'un marché suffisamment conséquent, mais aussi en raison des difficultés à mettre en place des collaborations durables entre le monde académique et les professionnels du domaine. Des progrès encourageants ont cependant été réalisés au cours de ces dernières années, accompagnés d'une diversification des moyens mis en œuvre et des actions de recherche. Sont par exemple apparus des développements à la frontière de la robotique avec l'instrumentation de prothèses, comme l'illustre la *C-leg* de Ottobock⁵³, les téléthèses, offrant des dispositifs permettant à un grand handicapé d'agir sur son environnement (via le pilotage d'un robot mobile ou d'un manipulateur), et les orthèses, étroitement liées au développement d'exo-squelettes (voir la section consacrée à la robotique de défense). Au delà des aspects de robotique avancée, le problème récurrent du stockage de l'énergie freine fortement les développements dans ce domaine.

3.1.7 Véhicules intelligents

La maîtrise du développement et de la gestion du trafic routier, tant dans le domaine urbain qu'en zones interurbaines, fait partie des problèmes cruciaux auxquels se trouvent confrontés la majorité des pays industrialisés. Même si un véhicule individuel ou collectif n'est pas à proprement parler un robot, les problématiques qu'il recouvre sont très proches de celles rencontrées en robotique. Déjà de nombreux pays (États Unis, Japon, Hollande, Allemagne...) ont mis en place des programmes de recherche appliquée importants dans ce domaine. De nouvelles fonctionnalités issues de la robotique vont permettre d'accroître la sécurité (assistance au conducteur, "cruise control intelligent", ...), un objectif prioritaire de certains gouvernements, de diminuer les nuisances (pollution, bruit, engorgement des centres villes...), d'optimiser l'adéquation des moyens de transports vis à vis de la demande et des infrastructures (véhicules électriques en libre service en milieu urbain, conduite automatique en "train" de véhicules sur les autoroutes) ou même de faire du véhicule lui-même le centre d'un système d'information (navigation par satellite, recherche intelligente d'itinéraires en fonction des conditions de

⁵²voir par exemple les résultats de la plate-forme Caren de Motek, www.motek.com

⁵³www.ottobock.com

circulation,...). De larges programmes de Recherche et Développement ont d'ailleurs été lancés dans le monde sur ce thème ces 15 dernières années (USA, Japon, Europe en particulier et plus récemment Australie et Corée).

3.1.8 Réalité virtuelle et jeux

La plupart des experts prévoient que la robotique occupera une part croissante dans les jeux et la réalité virtuelle. Par exemple, les plate-formes mobiles robotisées utilisées dans les simulateurs de vol trouveront de plus en plus leur place dans les parcs d'attraction. Il n'est cependant pas acquis que la recherche puisse beaucoup bénéficier de cette expansion car les constructeurs de simulateurs ont traditionnellement peu de contact avec les laboratoires (à l'exception, peut-être, du canadien CAE⁵⁴ qui a amorcé une collaboration contractuelle limitée avec des laboratoires nationaux). Des contributions de la recherche portant sur les questions de fiabilité et de sécurité sont toutefois envisageables.

Le marché de la simulation et de la réalité virtuelle connaît une forte expansion. Les applications concernées sont principalement focalisées sur le retour visuel mais, comme pour les simulateurs de vol (bien qu'avec des priorités inverses), la modélisation fine du mouvement des objets doit être intégrée pour obtenir un bon niveau de réalisme. Ce marché a maintenant bien débordé les seuls simulateurs de vol, avec les simulateurs de conduite de véhicules routiers, de tremblement de terre, d'arrachage d'arbre, d'équitation, . . . La recherche peut apporter des contributions dans ce domaine en termes de conception de nouvelles structures mécaniques, de modélisation des interactions avec l'environnement, et de commande.

3.1.9 Micro et nanorobotique

Les applications de la robotique dans les domaines que nous avons évoqués précédemment font d'ores et déjà partie de notre présent. Parallèlement se dessinent de nouveaux domaines prometteurs d'application des recherches sur les matériaux et la micro-mécanique.

MEMS

Les MEMS et les nanotechnologies sont à l'ordre du jour, en particulier au États-Unis (avec la NNI, National Nanotechnology Initiative⁵⁵ qui permet de financer et fédérer la recherche) et au Japon (pour le moment plus axé sur les matériaux). Les perspectives d'application s'inscrivent cependant sur le long terme, les travaux actuels portant plutôt sur les moyens de fabrication et les matériaux de base, dont on a une connaissance encore très partielle.

Concernant les moyens de fabrication, l'orientation est d'adapter ceux de la micro-électronique classique à la production de MEMS. Cependant, le passage du 2D au 3D s'avère ardu. Par exemple, les techniques classiques par enlèvement de couches très minces sont peu appropriées à une production de structures réellement 3D, en particulier dans la gamme des 100 microns qui intéresse une grande tranche d'applications (dont une partie de la robotique médicale interventionnelle sur site). La descente vers les nanotechnologies est tout aussi délicate, et on est encore loin des structures atomiques actives à la Drexler⁵⁶.

Pour ce qui est des matériaux, quelques technologies prometteuses sont apparues, tel que celles des fullerènes et des nano-tubes de carbone. Malgré un début de maîtrise des techniques de production, du chemin reste à

⁵⁴www.cae.com

⁵⁵www.nano.gov

⁵⁶en.wikipedia.org/wiki/K._Eric_Drexler

parcourir pour bien comprendre et modéliser le comportement de ces nouveaux matériaux, et aussi en apprécier le niveau de toxicité (voir par exemple le projet intégré européen Nanosafe ⁵⁷).

Lorsque ces problèmes auront été maîtrisés, les champs d'application des micro et nano-robots sont immenses. A cette occasion de nouvelles branches de la robotique devront être explorées du fait que les lois physiques œuvrant à cette échelle sont très différentes de celles auxquelles la robotique classique a été confrontée. La recherche en robotique devra alors se rapprocher de la physique, de la chimie, voire de la biologie, et trouver des partenariats en raison d'équipements de production pour le développement de prototypes et leur métrologie hors de portée d'un laboratoire de robotique traditionnel.

Positionneurs

Il existe une demande soutenue de positionneurs de précision dans des domaines applicatifs très variés. Cette tendance devrait se confirmer avec la miniaturisation des objets traités (dans l'industrie électronique, en biologie, pour les MEMS) et le niveau de précision qu'elle induit. Outre les aspects technologiques liés à la fabrication des capteurs et moteurs appropriés, cette miniaturisation ouvre des voies de recherche pour les structures mécaniques avec, en particulier, l'utilisation de structures flexibles, leur calibration (gestion des dérives thermiques et de l'usure des composants mécaniques) et la commande.

3.1.10 Vers une robotique sans robots ?

Nous avons fait remarquer dans le paragraphe "structuration de la recherche" de la section 2.1 que *certaines disciplines fondamentales (mathématiques, mécanique, ou automatique), qui trouvaient dans la robotique un domaine applicatif permettant de financer leurs recherches, ont depuis investi d'autres domaines "porteurs" apparus avec l'avènement des STICs et le développement explosif d'Internet*. On peut observer que ces disciplines reproduisent parfois dans ces nouveaux domaines une interaction entre elles reprenant la même structure qu'en robotique.

Par exemple dans le domaine des sciences de la vie, biomécanique et bio-mathématique (appellation recouvrant généralement l'automatique) se saupoudrent parfois d'un brin d'informatique théorique pour reformer un corpus de questions et méthodes qui font fortement penser à de la *bio-robotique*. Ce terme de bio-robotique peut recouvrir plusieurs sens, il est ici question de l'interaction entre les sciences du vivant et la robotique en tant que corps de connaissances, en tant que science (composite mais à l'unité réelle), plutôt qu'en tant que simple outil technologique.

De la même façon, si l'on considère le développement actuel des systèmes communicants et autres réseaux de capteurs et que l'on introduit en vis-à-vis des actionneurs mécaniques potentiellement répartis, on peut retrouver toute la palette des questions abordées par la robotique telle que présentée au début de la section 2.1. On voit alors émerger en vis-à-vis de *l'informatique ubiquitaire* un potentiel pour une **robotique ubiquitaire** tout aussi féconde en applications.

De fait, il semble qu'il apparaisse un potentiel très fort de développements féconds de la robotique en tant que science vers de nouvelles applications où le "robot" en tant que système intégré monolithique de mécanique, d'électronique, d'informatique se met à disparaître, mais sans diluer pour autant son sens, son unité, ses méthodes, ses forces vives du point de vue de la recherche fondamentale et appliquée. Ceci représente donc une chance d'ouverture de la robotique au-delà de ses problématiques historiques.

⁵⁷ www.nanosafe.org

Une vision économique : Complémentairement aux aspects de recherche évoqués précédemment, les experts d'EUROP exposent une vision axée sur des motivations d'ordre économique, le but affiché étant que l'Europe soit au cœur de la fourniture de la technologie robotique et de la définition des standards. Leur prédiction est que les développements futurs concerneront en premier chef la robotique industrielle, la robotique de service, les questions de sécurité, et le spatial. Pour la robotique industrielle, ils estiment que seulement 15% des applications automatisables le sont actuellement, le déficit se situant en grande partie dans les PME. Sont mentionnés comme domaines particulièrement prometteurs l'alimentaire (de par la nécessité d'une plus grande hygiène) et le recyclage. Concernant la sécurité, ils considèrent que la robotique de défense devrait, à terme, trouver des débouchés civils. Par exemple, dans l'agriculture et dans le domaine de la surveillance (d'installations, des frontières, ...).

3.2 Prospective "top-down"

La section précédente donne une vision de la robotique par domaines applicatifs, en mentionnant au passage quelques éléments sur la nature des recherches accompagnant le développement des applications. Cette approche met déjà en exergue la pluridisciplinarité du domaine et permet de souligner l'importance des aspects d'intégration des divers éléments intervenant dans la conception de produits robotiques opérationnels. Elle montre également une tendance forte de la robotique à quitter les environnements protégés (conçus pour et autour du robot) pour interagir plus directement avec l'homme et partager son espace.

Un des défis majeurs de la robotique du futur est l'augmentation de l'autonomie décisionnelle et opérationnelle des robots, celle-ci impliquant l'automatisation de tâches préalablement du ressort des opérateurs humains (notamment celles relevant de la prise de décisions) et leur coordination avec les fonctions de plus bas niveau (gérées par des boucles de régulation plus classiques). La complexité des problèmes de contrôle sous-jacents se retrouve aussi dans la multiplication des modèles nécessaires pour caractériser le robot (actionneurs, capteurs, mouvements), son environnement (incluant l'homme éventuellement), et les interactions entre les deux, en liaison avec la gestion de l'information issue des données recueillies en ligne par les capteurs et celle des aléas pouvant se produire pendant l'exécution d'une mission.

Ces aspects ouvrent de nouvelles perspectives de recherches dans les disciplines des Sciences de l'Ingénieur et des STICs.

- *modélisation et commande* : l'automatique des systèmes robotisés, donc non linéaire, sera fortement sollicitée en relation avec l'accroissement des vitesses des manipulateurs, la commande de systèmes flexibles, l'automatisation d'engins mobiles (à roues, à pattes, aériens, ou sous-marins), l'utilisation de nouveaux actionneurs, ... Un effort important doit être mené afin d'obtenir des modélisations réalistes et cependant suffisamment simples pour permettre l'analyse et la synthèse de lois de commande. De nombreuses tâches de robotique nécessitent un contrôle fin de l'interaction entre le robot et son environnement local. L'introduction d'informations provenant de capteurs (force, vision, télémétrie...) dans des boucles de régulation pose des problèmes spécifiques (gestion des non-linéarités, satisfaction de conditions d'observabilité, robustesses des propriétés de stabilisation, dérive des mesures) appelant des traitements idoines.
- *perception/représentation de l'environnement* : un travail de recherche important doit être mené pour approfondir la connaissance de la physique des capteurs afin de proposer des modèles plus en accord avec la réalité. Les hypothèses traditionnelles d'erreurs modélisées par des bruits gaussiens centrés et décorrélés

se révèlent insuffisantes dans la plupart des cas. Il est également nécessaire de concevoir des estimateurs robustes avec rejet des mesures aberrantes et permettant de caractériser la qualité de l'information. La coopération et la fusion d'observations provenant de modalités sensorielles différentes sont des voies de recherche prometteuses pour accroître la connaissance sur l'environnement. D'une façon plus générale, la résolution efficace des problèmes d'apprentissage et de gestion de la connaissance sont un point de passage incontournable au développement de l'autonomie décisionnelle en robotique. Le type de fusion (lâche ou serrée) et les diverses approches pour la réaliser (probabiliste, crédibiliste, filtrage particulière, vote) devront être étudiés et évalués comparativement. Enfin, les représentations manipulées dans une application robotique sont multiples et doivent forcément être adaptées au type d'utilisation (planification de tâches, planification de trajectoires, stabilisation par retour d'état,...) tout en conservant une cohérence globale.

- *mécanique* : la commande ne permet pas, loin s'en faut, d'effacer les défauts d'une mauvaise mécanique. Il faut aussi que les structures mécaniques soient bien spécifiées et conçues. Cela implique des travaux sur la synthèse (penser la structure) et la conception optimale (déterminer les éléments dimensionnants pour atteindre des objectifs de performances), ainsi que sur l'automatisation des procédures correspondantes.
- *géométrie* : la modélisation géométrique, le placement de robots, la planification de trajectoire pour les chaînes fermées, ... impliquent la manipulation de variétés souvent définies par des équations algébriques. Les progrès obtenus dans ce domaine au cours des dernières années sont sensibles, mais de nombreuses questions restent ouvertes. Il est par exemple nécessaire de mieux comprendre les relations complexes entre modélisation géométrique, cinématique et dynamique; cela implique de mettre plus à contribution la théorie des singularités et les outils de la géométrie différentielle. La navigation autonome et l'exploration d'environnements à grande échelle offrent également un champ de recherches important (calcul de visibilité, complétude d'une exploration, recalage de cartes locales et globales, positionnement optimal de capteurs...).
- *incertitude, variabilité et imprécision* : Le contrôle de robots autonomes est confronté à la gestion de fortes incertitudes liées souvent à l'impossibilité de spécifier la réalisation d'une tâche de façon complète et déterministe (en environnement mal connu, en raison de l'occurrence d'évènement imprévisibles,...). Le caractère incomplet de la spécification est inévitable et il doit être pris en compte au niveau du modèle d'exécution de la tâche afin de garantir, notamment, la sécurité des personnes interagissant avec le robot. Ce domaine de recherche est encore peu exploré mais crucial pour le développement d'applications où l'homme et le robot partagent un même espace. Parallèlement à ce problème de variabilité d'exécution, il faut également prendre en compte au niveau des algorithmes les imprécisions issues de la mécanique, des réponses des capteurs, etc...On assiste d'ailleurs depuis un à deux ans, à un essor important de la « robotique probabiliste » qui entent apporter des solutions plus robustes reposant sur le cadre formel des probabilités
- *informatique* : l'outil informatique est omniprésent en robotique. Il sert pour les calculs (formels ou numériques) réalisés sur les modèles des mécaniques robotiques (CAO, conception optimale), parfois avec une exigence de certification élevée (par exemple pour vérifier l'absence de singularité géométrique d'un robot médical). Les calculs peuvent aussi être très intensifs et nécessiter une exécution parallélisée. L'informatique intervient également à tous les niveaux de la programmation et de l'exécution des applications robotiques, et du traitement des capteurs. Au niveau commande le plus proche de la machine se posent des problèmes non encore résolus en terme d'architecture distribuée temps réel (communication et réseaux "terrain", outils de spécification et de programmation, code embarqué certifié...).

- *Interaction homme-machine* : C'est un sujet central qui recouvre de nombreuses facettes allant de la simple acceptation par l'homme du robot ou des techniques relevant de la robotique (assistance médicale, fonctions évoluées dans les véhicules personnels...) jusqu'au partage des décisions (illustré, par exemple, par la notion de *Bulle Opérationnelle* en robotique de défense). Cette interaction ira en s'amplifiant dans de nombreuses applications et prendra des formes diverses (parole, retour sensoriel, réalité virtuelle et augmentée...). Il y a là aussi matière à travailler en collaboration avec les ergonomes et les chercheurs en sciences humaines, notamment pour identifier l'impact et le niveau d'acceptation des différentes solutions techniques. Les problèmes de sécurité dans la cohabitation homme/robot sont également sensibles. Concernant ces aspects, il convient cependant de dénoncer le leurre médiatique tendant à faire croire que les robots doués d'une *vraie* intelligence cognitive sont à notre porte.
- *Système cognitifs et modèles biologiques* : cette axe a pour objectif d'améliorer l'interface entre les humains et les systèmes artificiels en s'inspirant des systèmes sensori-moteurs et cognitifs biologiques. Cette interface sera essentielle pour certaines applications (comme par exemple les systèmes de suppléance proposés par le projet DEMAR) et pourrait être aussi un outil utile pour les neurophysiologistes (voir par exemple le projet BACS, Bayesian Approach for Cognitive Systems)

4 Partie III : La robotique à l'INRIA

4.1 Les domaines couverts

Nous présentons ici les projets dont les thématiques de recherche relèvent de la robotique ou qui traitent d'applications dans le domaine. Cette liste ne se prétend pas exhaustive, certains projets non cités menant ponctuellement des recherches ayant trait à la robotique.

Modélisation et commande :

C'est le domaine qui rassemble le plus de chercheurs de l'INRIA :

- **Coprin (Sophia Antipolis)** : le projet s'intéresse principalement à la modélisation et à la conception de systèmes robotiques complexes, avec la prise en compte des incertitudes.
- **Icare (Sophia Antipolis)** : Un des axes du projet porte sur la commande des systèmes non-linéaires appliquée à des robots de tous types : bras manipulateurs, robots mobiles terrestres, sous-marins et aériens, robots à pattes. Les approches développées ont une portée générique, les robots constituant un support d'expérimentation et de validation privilégié, mais non exclusif. A mi-chemin entre commande et perception, le projet développe également des approches de commande référencées capteur et est à l'origine, avec le projet LAGADIC de Rennes, d'une approche méthodologique en asservissement visuel qui est devenue une référence dans la communauté scientifique internationale.
- **Lagadic (Rennes)** : le projet LAGADIC (ex partie du projet VISTA) s'intéresse à l'asservissement visuel avec un champ d'applications concernant à l'origine essentiellement les robots manipulateurs (médical, vidéo-surveillance,...) et s'élargissant à présent vers la robotique mobile. Les liens entre LAGADIC et ICARE sont étroits, mais les approches sont complémentaires. LAGADIC possède une expertise reconnue sur la modélisation des interactions visuelles et les approches orientées modèle, alors qu'ICARE s'intéresse plus particulièrement à la commande et aux approches orientées données. Un des axes de recherche de LAGADIC est l'application des techniques robotiques d'asservissement visuel et de calcul de pose au domaine de la réalité augmentée.

- **Bipop (Grenoble)** : le projet s'intéresse à la modélisation, la simulation, et la commande des systèmes non réguliers. Ces systèmes interviennent notamment en robotique dans le cas des robots marcheurs ou sauteurs lors des changements d'appuis. Les recherches menées dans BIPOP sont méthodologiques et dépassent le cadre de la robotique. Elles sont appliquées au robot bipède *BIP*, un des deux prototypes de robots humanoïdes construits en France et développé à Grenoble en collaboration avec le Laboratoire de Robotique de Poitiers. Le projet s'intéresse également aux applications biomédicales, en particulier la rééducation des paraplégiques par électrostimulation en collaboration avec le projet DEMAR de Montpellier. Enfin, le projet collabore avec l'industriel Stäubli, constructeur Franco-Suisse de bras manipulateurs, sur l'optimisation de tâches robotiques industrielles en prenant mieux en compte les contraintes dynamiques dans la planification et l'exécution des mouvements (1 brevet déposé, 1 second prévu début 2007).
- **Demar (Montpellier)** : le projet développe des méthodes de modélisation et de commande pour gérer la stimulation électro-fonctionnelle des muscles. Une des applications visées est le retour à la marche pour les personnes paraplégiques. La modélisation des muscles est menée sur la base de travaux issus de l'équipe SOSSO2 à Rocquencourt, et les robots marcheurs sont utilisés pour la conception de lois de commande et comme support de validation.

Perception :

Dans les années 80, la robotique a été un tremplin pour les projets de l'INRIA s'intéressant à la perception (presque exclusivement visuelle), alors au moins aussi nombreux que les projets traitant de modélisation et de commande. L'explosion des champs applicatifs dans le domaine du traitement d'images a conduit plusieurs d'entre eux à réorienter leurs activités vers l'imagerie médicale, l'indexation, ou la réalité virtuelle et augmentée. Les projets ayant encore des activités en robotique sont les suivants :

- **Icare (Sophia Antipolis)** : le projet s'intéresse à la construction de modèles pour la navigation autonome et, de manière plus générale, à la perception active. Les capteurs utilisés sont divers : vision, télémétrie laser, odométrie. Les travaux de recherche portent sur la fusion entre différentes modalités sensorielles et le développement de méthodes robustes pouvant être implémentées en temps réel.
- **Lagadic (Rennes)** : les activités du projet dans le domaine du traitement d'images (hors asservissement visuel) portent sur le recalage de modèles pour le calcul de pose et la navigation des robots en se basant sur des techniques de mémoires visuelles. Les travaux sur ce dernier axe de recherche sont menés en collaboration étroite avec le projet TEXMEX de l'Irisa.
- **Prima (Grenoble)** : ce projet s'intéresse à l'interaction naturelle personne/système dans un contexte d'informatique ambiante. L'analyse visuelle et l'interprétation du geste humain ont une place centrale dans cette problématique. Prima travaille aussi en coopération avec e-Motion sur le tracking visuel appliqué aux piétons et aux véhicules. Une start-up (*Blue Eye Video*) commercialise des produits issues du travail de Prima pour la surveillance par vision.
- **Movi (Grenoble)** : ce projet se concentrait sur les aspects calculatoires et méthodologiques de la vision, plus particulièrement la reconstruction tridimensionnelle à partir de plusieurs vues, le calcul d'invariants visuels, la calibration, la reconnaissance d'objets, l'indexation d'images et de vidéo par leur contenu, l'analyse vidéo et le suivi d'objets rigides et articulés. Dans ce cadre, la robotique est un domaine applicatif parmi d'autres. Le projet MOVI a cependant beaucoup contribué par le passé aux avancées en vision pour la robotique. Des deux successeurs de Movi, **Lear** et **Perception**, le projet Lear est celui dont les préoccupations scientifiques semblent les plus proches de celles associées à la robotique
- **E-Motion (Grenoble)** : Un des axes de recherche du projet e-Motion porte sur la perception multi-

sensorielle et l'analyse de scènes dynamiques complexes (e.g. en milieu routier ou urbain). L'approche appliquée consiste à utiliser des techniques Bayésiennes pour raisonner explicitement sur l'incertitude, en exploitant pour cela des connaissances à priori ou apprises par le système. Un autre volet récent des activités du projet sur ce sujet (réalisé en coopérations avec des neuro-physiologistes), porte sur la modélisation de certaines fonctions perceptives humaines (en particulier la perception des formes par le mouvement, et l'exploitation des indices visuels pour la navigation humaine).

- **Imara (Rocquencourt)** : les activités du projet sont focalisées sur les applications aux véhicules intelligents. Elles concernent la détection d'obstacles et la localisation du véhicule sur la chaussée au moyen de vision et de télémétrie laser. Le projet IMARA étant à vocation technologique et n'ayant pas de chercheur sur poste, les encadrements de recherche sont assurés par les projets E-MOTION, ICARE, ou par le département de robotique de l'École des Mines de Paris.

Planification :

- **e-Motion (Grenoble)** : le projet a pour principal objectif de développer des méthodologies permettant à des systèmes robotisés (robots, véhicules intelligents .) de percevoir, décider, et agir dans des environnements ouverts et dynamiques. L'approche utilisée consiste à combiner des modèles géométriques et probabilistes pour essayer de capturer les différentes facettes du monde réel et de sa complexité. Au cœur de ces travaux, on trouve l'inférence Bayésienne, l'apprentissage, l'étude de systèmes sensori-moteurs biologiques (en coopération avec des neuro-physiologistes), et l'algorithmique du mouvement pour des environnements dynamiques.

Programmation et contrôle d'exécution :

La réalisation de tâches robotiques complexes nécessite le développement d'architectures matérielles et logicielles, ainsi que le développement d'outils permettant de programmer ces architectures et de vérifier que les programmes s'exécutent conformément au comportement désiré.

- **Aoste (Sophia Antipolis et Rocquencourt)** : le projet s'intéresse à la problématique des systèmes embarqués. Il est à l'origine d'outils de programmation synchrone (*Esterel*, *SyncCharts*) et de production de code sur des architectures hétérogènes (*SynDex*). Ces outils sont utilisés notamment dans les véhicules *CyCabs* équipant les URs.
- **Popart (Grenoble)** : le projet développe l'environnement de programmation de tâches robotiques *Orcad*, utilisé sur les plate-formes robotiques de l'UR Rhône-Alpes et des langages de programmation de systèmes temps-réel embarqués (les robots en sont). Il a aussi contribué à *SynDex* pour la tolérance aux fautes.
- **Maia (Nancy)** : orienté Intelligence Artificielle, le projet utilise les concepts d'agents autonomes et de systèmes multi-agents pour la programmation de robots mobiles.

4.2 Quelques réflexions sur l'organisation de l'INRIA

Au cours des ans, les projets de robotique à l'INRIA ont été confrontés aux évolutions de la discipline, en relation avec l'explosion des domaines applicatifs, et à l'évolution de l'Institut en termes d'organisation et de politique scientifique. Une analyse de la situation actuelle est la suivante :

- l’INRIA est naturellement engagé dans un domaine qui relève de l’automatique, de l’informatique et des mathématiques appliquées (donc des compétences de l’Institut), et qui de plus est très riche en problématiques de recherche et en applications (existantes et à venir). Cet engagement demande à être consolidé dans le contexte d’un marché vigoureux connaissant un fort potentiel de croissance, d’une activité soutenue dans les pays industrialisés dotés de structures de recherche bien établies (USA, Japon, Allemagne), avec une rapide montée en puissance d’autres pays (Chine, Corée). A noter que les industriels mondiaux du domaine sont demandeur de la compétence de l’INRIA comme l’atteste, par exemple, que Toyota et Denso ait choisi uniquement des projets de l’INRIA comme partenaire après un tour européen
- les projets de l’INRIA ont, dans ce domaine, une production scientifique dont la qualité est reconnue par la communauté internationale. A titre d’exemple, sur les cinq dernières années, trois des quatre éditeurs associés français d’une des deux revues de référence du domaine (IEEE Trans. on Robotics) étaient de l’INRIA, le quatrième appartenant au CNRS. Autre exemple, les conférences IROS’98 et IROS’2008 ont été ou seront co-organisées par l’INRIA (à Grenoble et à Nice) et des chercheurs de l’INRIA sont quasiment abonnés au ”Best paper Awards” d’une des deux grandes conférences du domaine (ICRA, IEEE Int. Conf on Robotics and Automation)
- la robotique représente une part conséquente de la production scientifique de l’Institut. Il est difficile de mesurer cette part mais une interrogation du fond documentaire de l’INRIA montre que 22% des références contenant le terme INRIA contiennent aussi le mot *robot*.
- la robotique participe activement à la visibilité de l’Institut (sous la forme de films, de manifestations auprès du grand public, de démonstrations auprès des institutionnels et financeurs). Dans la rubrique *Photothèque* du site Web national de l’INRIA⁵⁸, sur les neuf vignettes rafraîchies de façon aléatoire destinées à illustrer les activités de l’INRIA, en moyenne deux proviennent de projets de robotique.

Complétons cette analyse par un souhait et deux questions commentées :

1. La robotique, longtemps mis en avant à l’INRIA, n’apparaît pas dans le découpage en thèmes mis en place en 2004. Une explication partielle tient dans le choix d’une présentation des activités de l’INRIA par disciplines scientifiques. La robotique, par nature pluridisciplinaire, se trouve *de facto* diluée dans les différents thèmes. Dans un objectif de valorisation de ses recherches appliquées, il nous paraît souhaitable que l’INRIA revienne sur, et affine, la lecture transversale de ses programmes scientifiques, et que la robotique apparaisse de nouveau comme un thème fièrement revendiqué par l’institut.
2. La structure de l’INRIA est-elle adaptée à la recherche en robotique, à l’aube d’une période charnière où les applications et les débouchés économiques de la robotique sont en passe de connaître un développement sans précédent ? Le modèle d’organisation de l’INRIA en petites équipes de recherche (les projets INRIA) a fait ses preuves et présente de nombreuses qualités –réactivité et adaptation, pour n’en citer que deux. La structure en petits projets, donc spécialisés, ont permis de produire des spécialistes dans leur domaine, ce qui a fortement contribué à la renommée des chercheurs en robotique de l’INRIA, et donc de l’INRIA lui-même. Par contre, elle empêche d’appréhender tous les champs du domaine, ce qui a toutefois l’avantage d’inciter à des collaborations avec des spécialistes sur des domaines complémentaires.

Cette structuration a aussi ses limites comme les autres modèles d’organisation de la recherche en France, que ce soit celui du CNRS ou des universités. On peut simplement suggérer que le temps est peut-être venu de commencer à réfléchir, pour la recherche en robotique de demain et avec l’ensemble des acteurs intéressés, à d’autres possibilités comme, par exemple, la création d’un institut spécialisé –français, ou mieux même, européen– plus propice, entre autres choses, à la mutualisation des moyens humains et

⁵⁸www.inria.fr/multimedia

matériels et à la réalisation de grands projets finalisés. Cette éventualité ne fait cependant pas l'unanimité au sein des projets, dont certains craignent qu'une super-structure impose une uniformisation des axes de recherche.

Une autre possibilité serait de déterminer dans quel cadre on pourrait favoriser un souhait exprimé par plusieurs projets qui désireraient conjointement faire face à un grand défi, ceci pour une période limitée. Il faut aussi mentionner que les collaborations inter-projets s'intensifient (la réponse commune de LAGADIC et ICARE aux appels d'offre du PEA Tarot (DGA) et du projet PEGASE du FP6 en est une illustration).

3. En particulier, comment aider les projets de robotique à satisfaire leurs besoins en expérimentation ? La section suivante est consacrée à cette question que nous estimons prioritaire.

4.3 La nécessité de l'expérimentation

Cette section tente d'expliquer en quoi la mise en œuvre d'expérimentations de robotique est spécifique et surtout en quoi elle est nécessaire.

Une évolution naturelle de la recherche en robotique est de traiter des systèmes de plus en plus complexes (robot humanoïde, drone aérien...) en enrichissant les modèles utilisés de sorte à ce qu'ils reflètent la physique des systèmes réels de mieux en mieux (prise en compte des dynamiques, des contacts, des frottements, de capacités de perception évolués,...). Elle va de pair avec une évolution des moyens d'analyse et de validation des résultats. En particulier, des efforts importants sont faits pour développer des outils de simulation afin de prendre en compte les interactions entre le robot et son environnement (réalité augmentée, interaction outil-surface déformable,...). Ces outils sont très utiles et offrent un premier niveau de validation pour nourrir la réflexion et l'analyse. Cependant, pour aussi sophistiqués que soient les modèles analytiques sous-jacents, ils ne suffisent pas à capturer la variabilité du monde physique dans toute sa complexité. Pour cette raison, et pour des pans entiers de la robotique, la validation expérimentale reste un complément déterminant, incontournable et irremplaçable. Cela explique, entre autres choses, que des articles présentant des résultats uniquement illustrés par simulations ne soient acceptés pour publication que dans un nombre restreint de cas⁵⁹. Ce sont, par exemple :

- des travaux très prospectifs pour lesquels il n'existe pas encore de dispositifs expérimentaux (robotique moléculaire, travaux de Drexel ou de Feynman⁶⁰,...)
- des travaux impliquant la mise en œuvre de ressources lourdes (robotique sous-marine pour les engins de grande taille) ou des environnements qu'il est très difficile de reconstituer exactement (manipulation en micro-gravité).

La plupart des projets robotiques de l'INRIA, même s'ils utilisent la simulation intensivement (ne serait ce que pour anticiper la mise en place d'une plate-forme expérimentale) et participent activement au développement de simulateurs, produisent des résultats de recherche dont la validation ultime passe par l'expérimentation. Au delà de l'aspect validation de modèles ou de concepts, l'expérimentation apporte aussi de la visibilité tout en crédibilisant les actions de recherche auprès des partenaires industriels. Enfin, les retours d'expériences sur les systèmes physiques mettent en évidence des phénomènes ou comportements non attendus qui alimentent de nouvelles problématiques de recherche.

En résumé, il est indispensable pour un projet de robotique de mener des expérimentations. Sa crédibilité et la qualité de ses recherches en dépendent. Il importe aussi de comprendre qu'avec la complexification des problématiques abordées, ces expérimentations sont de plus en plus lourdes à réaliser et à maintenir.

⁵⁹Un projet estime qu'au contraire que les conférences acceptent trop de papiers ne contenant que des simulations, à la notable exception d'ISER, Int. Symp on Experimental Robotics

⁶⁰www.zyvec.com/nanotech/feynman.html

Ceci étant, on peut se demander :

1. en quoi les expérimentations en robotique sont différentes d'un projet de développement logiciel,
2. si, pour les réaliser, il est possible de n'utiliser que du matériel robotique commercialisé,
3. comment concilier les besoins d'expérimentations locales et la mutualisation des moyens.

Les deux premiers points sont traités dans la sous-section suivante, et le problème de la mutualisation est abordé dans la section 4.3.2.

4.3.1 Les spécificités des expérimentations robotiques

Il peut être tentant d'assimiler un robot à un simple *PC sur roues*. Ramener un système robotisé à sa seule composante informatique, en négligeant la mécanique, les capteurs et l'environnement dans lequel le robot doit évoluer, est cependant extrêmement réducteur. L'analogie entre un robot en interaction avec un environnement complexe et un ordinateur qui ne communique que via les interfaces standardisées et figées que sont le clavier et l'écran est en fait assez superficielle. Elle résiste mal à une analyse un peu poussée –et encore moins à l'expérience– et sous-estime grandement la pluralité des difficultés que sous-tend le fonctionnement d'un robot.

Il est par contre vrai que de plus en plus d'éléments issus du monde des PC sont utilisés pour accélérer la mise en œuvre d'une plate-forme robotique. Par exemple, la pratique pas si lointaine de développer intégralement en interne le matériel électronique et le logiciel de commande est maintenant largement révolue.

Il n'en demeure pas moins vrai que les besoins des chercheurs pour

- tester de nouvelles architectures mécaniques,
- tester de nouvelles fonctionnalités logicielles,
- optimiser la qualité des mesures,
- optimiser les temps de calcul,
- augmenter la maîtrise de la chaîne de composants impliqués dans une expérimentation

sont légitimes et continuent de générer une demande de “confection-sur-mesure” chaque fois que l'utilisation de composants “sur étagère” ne permet pas de répondre à ces besoins de façon satisfaisante.

La mise en œuvre d'expérimentations requiert que chaque composante du système fonctionne correctement, tout d'abord individuellement puis en association avec d'autres dans un système intégré (avec tous les problèmes de connectique que cela sous-tend). La vérification de l'intégrité et des capacités opérationnelles du système peut impliquer une phase d'initialisation, voire de calibration, parfois assez longue (jusqu'à plusieurs minutes dans le cas d'une calibration de la partie mécanique). A cette durée incompressible, correspondant à des opérations qu'il faut souvent répéter à chaque démarrage, s'ajoute le temps de mise en place de l'environnement nécessaire à l'expérimentation. La durée de cette phase peut aller de quelques heures (robotique manufacturière) à plusieurs jours (en robotique sous-marine, par exemple). Le contexte temps-réel des expérimentations complique aussi la mise au point des applications de façon importante. Cela se traduit, par exemple, par l'impossibilité d'utiliser des débogueurs symboliques (DDD) pendant l'exécution et la difficulté de vérifier le contenu des données issues des capteurs et transitant sur les réseaux de terrains. La difficulté d'aboutir à des traitements fiables et temps réel (en robotique une image devient généralement inutile après 40 ms) peut conduire à des dysfonctionnements dont la nature et les conséquences ne sont pas les mêmes pour un logiciel de jeux sur PC et un robot opérant, par exemple, dans un cadre médical.

La recherche de pannes est souvent problématique, soit parce que les phénomènes fautifs ne se produisent pas systématiquement (faux contact, par exemple), soit parce qu'ils sont difficilement localisables parmi l'ensemble des sources possibles (matérielles et logicielles). En pratique, la gestion de l'ensemble de ces opérations implique de pouvoir intervenir sur toutes les composantes du système (mécaniques, électroniques, logicielles),

avec la somme de compétences que cela suppose de disposer. Dans ces conditions, les possibilités d'intervention efficace "à distance" –aussi séduisante que cette solution puisse paraître dans son principe– sont en réalité très réduites et ne peuvent être envisagées que comme complément à des moyens d'intervention "sur site".

L'expérimentation est l'aboutissement d'un travail méthodologique marquant le début d'un cycle d'allers-retours entre analyse expérimentale et production de nouveaux résultats. Ce cycle long passe par des phases d'amélioration de la théorie, de mise en œuvre sur la plate-forme matérielle et logicielle, d'exploitation des résultats expérimentaux, et de retour sur la théorie. De ce fait, l'exploitation d'une expérimentation de robotique peut s'étendre sur plusieurs années, tout en évoluant de façon majeure pendant cette période. Cette caractéristique n'a pas, à notre connaissance, d'équivalent dans le contexte du développement logiciel. Au cours de ce cycle, les phases pendant lesquelles le robot "bouge" effectivement sont concentrées dans le temps, pour bénéficier au maximum du travail préparatoire à l'expérimentation et de la mise en place du contexte expérimental. Le travail d'analyse en bureau suivant une de ces phases prend généralement beaucoup plus de temps –cela se conçoit bien– et peut laisser à un observateur non-averti l'impression que le matériel n'est pas utilisé, ou qu'il est sous-utilisé. Il ne peut pourtant pas en être autrement : la partie émergée de l'iceberg n'est, et ne sera toujours, qu'une petite partie de l'iceberg lui-même.

Concernant l'utilisation de plate-formes robotiques commercialisées les avis divergent selon les projets : certains estiment que l'investissement lourd dans un matériel de qualité dont la maintenance est pratiquement uniquement logicielle est un bon compromis en terme de rentabilité alors que d'autres estiment à l'opposé que le temps et l'énergie dépensés pour adapter de telles plate-formes aux exigences d'un support de recherche évolutif sont rarement rentabilisés. Pour ces derniers la nécessité de pouvoir intervenir à tous les niveaux du système, y compris celui de la mécanique et des boucles de commande bas-niveau, est peu compatible avec les possibilités et les exigences d'un produit industriel. De plus, les coûts d'achat et de mise à niveau régulière de ces plate-formes dépassent souvent les possibilités financières des laboratoires, même les plus fortunés. Enfin, le marché de la robotique de laboratoire étant excessivement fluctuant, le risque que la société ayant développé le produit disparaisse du jour au lendemain n'est pas négligeable. A titre d'exemple, l'entreprise *Nomadic* qui équipait un grand nombre de laboratoires en plate-formes mobiles a déposé le bilan en 2004.

Cette divergence sur les plate-formes commerciales est d'ailleurs tout à fait normale et reflète simplement des préoccupations scientifiques de nature différente.

4.3.2 La mutualisation des moyens expérimentaux

Il est important de distinguer mutualisation des développements et regroupement des moyens expérimentaux. Il est évidemment hautement souhaitable d'éviter les doublons au niveau des développements. A titre d'exemple, les diverses plate-formes robotiques de Sophia (CyCab, Anis, robot parallèle) utilisent des architectures matérielles et logicielles communes (modules au standard Industry Pack, Linux RTAI). Cette mutualisation a pu se faire parce que les différents projets impliqués ont une même culture robotique, et aussi parce qu'ils ont eu la chance de bénéficier pendant plusieurs années des compétences d'un ingénieur exceptionnel (Jean-Jacques Borrelly, décédé en 2003).

Pour autant, il paraît difficile de regrouper les moyens expérimentaux de robotique sur une seule unité de recherche, ou de réaliser l'intégralité des expérimentations avec du matériel appartenant à des partenaires extérieurs. En effet :

- la mise au point d'une expérimentation de robotique nécessite la présence physique des chercheurs sur le site,
- la mise en place d'une expérimentation de robotique est longue et délicate,

- le développement de code destiné à une plate-forme robotique dont on ne maîtrise pas l'évolution est techniquement difficile,
- le développement d'une plate-forme implique des choix matériels étroitement liés aux axes de recherche poursuivis. Par exemple le projet MAIA peut, pour la validation de techniques d'IA, se satisfaire d'un système commercialisé et fermé, alors que le projet ICARE, de par ses activités en automatique, est au contraire amené à intervenir sur les couches basses du système de commande (voir par ailleurs l'annexe consacré au développement autour du Cycab). Il n'y a pas actuellement à l'INRIA de projets dont les besoins et finalités en matière d'expérimentation se recoupent complètement. Le contraire serait d'ailleurs plus préoccupant que souhaitable.

A notre connaissance, il n'existe pas d'équipe de robotique de stature internationale ayant externalisé l'ensemble de ses expérimentations. La solution naturelle, couramment adoptée, consiste à maintenir en interne les moyens permettant de valider les résultats de recherche et, le cas échéant, de valoriser/transférer ces résultats sur les applications en vraie grandeur développées chez des partenaires industriels. Au sein de L'INRIA, cette démarche prévaut également et il est logique qu'elle s'accompagne d'une volonté de mutualiser les développements entre Unités de Recherche. Mais le fait de vouloir mutualiser à tout prix est contre-productif car la mutualisation doit être faite "intelligemment" en fonction du contexte, des besoins et peut prendre plusieurs formes (comme le propose par exemple le service SED) : mutualisation entre projets d'une UR, duplication de plate-formes entre sites géographiquement distincts, utilisation ponctuelle d'une plate-forme sur un site distinct de celui où elle a été développée. Une autre forme plus ambitieuse adoptée par le Joint Robotics Laboratory est le développement d'un système de simulation complet permettant la préparation à distance des expérimentations pour ensuite les réaliser sur site.

4.3.3 La robotique expérimentale à l'INRIA et ailleurs

Cette section passe en revue les structures dédiées aux expérimentations de robotique sur les différents sites de l'INRIA.

Grenoble : l'UR de Grenoble s'est dotée dès sa création d'un service prenant en charge les expérimentations des projets de recherche travaillant en robotique et en vision artificielle. Ce service, initialement nommé *moyens robotiques*, a évolué pour devenir le service SED (*Support Expérimentations et Développements Logiciels*)⁶¹. Il comprend actuellement 8 personnes sur poste avec en équivalent temps plein environ 2.5 ingénieurs consacrés à la robotique. Les missions du SED sont i) de fournir un *support aux plate-formes expérimentales* des douze projets impliqués dans des expérimentations, en intervenant sur les aspects de conception, maintenance et développement des installations, et en participant aux expérimentations elles-mêmes, et ii) de fournir un *support au développement logiciel* pour l'ensemble des projets de l'UR.

Rennes : les activités de développement et de support aux expérimentations robotiques sont prises en charge par Fabien Spindler, Ingénieur de Recherche détaché dans le projet LAGADIC. Il est responsable des différentes plate-formes robotiques du projet LAGADIC (bras manipulateur, Cycab, systèmes pan-tilt de vidéo-surveillance) et de la plate-forme de robotique médicale commune aux projets LAGADIC et VISAGES.

Rocquencourt : les expérimentations en robotique sont réalisées principalement au sein de l'équipe IMARA. Ce projet est atypique en ce qu'il n'emploie pas de chercheur sur poste, mais uniquement du personnel technique,

⁶¹www.inrialpes.fr/sed/

des doctorants et des stagiaires. Le principal projet de Rocquencourt interagissant avec IMARA est le projet AOSTE qui a implémenté la couche basse logicielle des CyCabs en *Synder*.

Nancy : Le seul projet Nancéen ayant des activités en robotique expérimentale est le projet MAIA, sans que la robotique constitue le domaine applicatif privilégié du projet. L'utilisation d'une plate-forme commerciale a permis qu'un membre de l'équipe, Alexis Scheuer, actuellement en disponibilité, en assure le support expérimental. Le CyCab de Nancy a cependant connu de nombreux dysfonctionnements, et l'absence de personnel technique dédié semble avoir participé à un certain désengagement de la part des chercheurs susceptibles d'utiliser cette plate-forme. Les activités autour du CyCab ont repris récemment dans le cadre du projet *Predit : MobiVIP*, avec le recrutement d'un Postdoc. Cette personne ayant par la suite obtenu un poste de MdC à Lille, le problème de la pérennité de ces activités se pose de nouveau.

Sophia Antipolis : les projets de Sophia ont pour politique de développer et maintenir en interne des moyens expérimentaux crédibles, et de transférer des résultats de recherche validés expérimentalement chez des industriels (Alcatel, Ifremer, PSA, ECA, Paulstra, CMW, pour n'en citer que quelques uns). Malheureusement, depuis le décès de Jean-Jacques Borrelly (Ingénieur de Recherche) en janvier 2003, l'UR de Sophia n'a plus de personnel sur poste affecté aux expérimentations robotiques. Cette situation est d'autant plus difficile que la demande en expérimentations a augmenté sensiblement depuis le début 2005 : thèses et transferts en cours vers des industriels nécessitant des validations expérimentales, projets nationaux s'appuyant sur des *CyCabs*, développement d'un prototype de robot à câbles. Depuis deux ans et demi, la gestion de nos moyens robotiques a principalement été assurée sur de courtes périodes par des membres de l'équipe DREAM et par des Ingénieurs Associés dont le temps a été entièrement consacré à la mise au point de démonstrateurs au détriment d'un travail de fond portant sur l'évolution et la maintenance des plate-formes robotiques. Le manque de personnel de support a pour conséquence l'obsolescence informatique du robot mobile ANIS, l'arrêt des expérimentations de la robotique mobile d'extérieur, et un retard dans la fabrication du robot à câbles. Le recrutement d'un ingénieur DREAM sur le thème des systèmes embarqués pourrait contribuer à résorber une partie de ces problèmes, à condition que cette personne ait aussi des compétences en électronique et le goût de travailler sur des matériels robotiques.

La robotique expérimentale au CNRS : Les laboratoires de robotique du CNRS sont aussi confrontés aux problèmes d'organisation que pose l'évolution du domaine, bien que d'une autre manière en raison de leur mode de fonctionnement différent de celui de l'INRIA. Ceux jouissant d'une bonne notoriété sont, de façon générale, de "gros" laboratoires (LAAS, LASMEA, LRP...) disposant de moyens humains importants en termes de personnels sur poste (chercheurs et ITA). Notons le cas particulier du LIRMM (1.5 ingénieurs pour 25 permanents) où les doctorants assuraient jusqu'à présent une grosse partie des développements matériels. Nos collègues du LIRMM nous ont cependant indiqué qu'ils se trouvaient confrontés à de grandes difficultés pour trouver des doctorants ayant les compétences requises. Pour notre part nous avons deux objections à cette approche :

- un développement matériel pour la robotique peut occuper jusqu'à 50% du temps d'une thèse et n'est absolument pas valorisé même au sein des Commissions de Spécialistes
- l'utilisation de doctorant ne permet pas d'assurer la pérennité d'une plate-forme qui servira de support pendant un temps long (une dizaine d'années) pour un projet

Les liens étroits avec les Universités et les écoles d'ingénieurs locales contribuent à un flux important de stagiaires et de doctorants participant à la mise en œuvre d'expérimentations. La taille et la vocation universaliste du CNRS vont également de pair avec des moyens et des compétences qui n'existent pas à l'INRIA (en

mécanique, par exemple) ainsi qu'un plus grand nombre de techniciens de la recherche offrant une palette de compétences plus variée. Enfin, il convient de signaler que l'accès à des "ressources communes" (atelier de mécanique, ou de CAO électronique, laboratoire de prototypage du CNRS) facilite grandement la réalisation de prototypes.

Au dessus des structures locales que sont les laboratoires, le CNRS a ces dernières années mis en œuvre (avec plus ou moins de succès) une politique de soutien à la robotique se traduisant par des actions au niveau national auxquelles l'INRIA s'est parfois associé. Un exemple est le programme *Robea*⁶², mis en place en 2001, seize ans après la terminaison du programme fondateur Ara (Automatisation et robotique avancées). Ce programme soutient chaque année une dizaine de nouveaux projets et implique 250 équipes distribuées sur une centaine de laboratoires. Sur les trois années (2001-2003) d'appel à participation du programme, 32 projets ont été financés pour un montant de 4.5 millions d'Euros. Ce chiffre fournit un élément de comparaison intéressant. Au Japon le montant global du soutien public à la robotique (hors salaires) a été de l'ordre de 60 millions d'Euros pour la seule année 2004 alors qu'en Corée ce montant s'établit à 80 millions d'Euros⁶³. Une mission récente⁶⁴ dans ce pays mettait en évidence que le ratio des soutiens des pouvoirs publics que la France et le Japon accordaient à la recherche civile est de 1/50, alors que celui du PIB par habitant est de 1.3 (et 1 pour le PIB par habitant à parité de pouvoir d'achat).

Une suite à *Robea* était prévue sous la forme du *Réseau Thématique Pluridisciplinaire RTP 17 : Robotique Autonome et Communicante*⁶⁵. Malheureusement, suite aux réformes structurelles du CNRS, et malgré la réponse forte des laboratoires à l'appel d'offre, ce réseau n'a pas été financé. Par contre l'ANR a lancé en 2006 un appel sur les Systèmes Interactifs et la Robotique.

La robotique expérimentale à l'étranger : Il est difficile de comparer la situation française avec celle des laboratoires étrangers en raison des différences dans le système éducatifs et dans la valorisation des développements expérimentaux. Nous nous contenterons de mentionner deux cas : USA et Japon :

- USA : les laboratoires procèdent généralement de la même logique que le LIRMM mais dans un autre contexte : doctorat plus long, présence importante d'étudiants de Master et moins longue pérennité des plate-formes. Un exemple typique (et pourtant infructueux) a été le robot DANTE censé explorer un cratère de volcan dont le développement a été assuré par une équipe de 45 personnes dont plus des 2/3 étaient des étudiants, encadré par des ingénieurs embauchés pour la durée du projet,
- Japon : les développements expérimentaux sont totalement assurés par les étudiants, cette activité étant totalement insérée dans le cursus normal d'une thèse. Par conséquent la durée de vie d'une plate-forme excède rarement celle d'une thèse même si des éléments (principalement matériels) sont parfois réutilisés pour élaborer les plate-formes suivantes

En Europe on notera une formation initiale plus importante des étudiants dans des domaines nécessaires aux expérimentations. Par exemple le programme Bachelor of Science Robotics du département cybernétique de l'Université de Reading⁶⁶, qui compte 17 modules obligatoires, inclut 5 modules (hors informatique) directement reliés aux expérimentations (electronic circuits, digital circuit design, measurements, engineering applications, cybernetics project).

⁶²www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosrob/accueil/laboratoires/index.html

⁶³source : WTEC

⁶⁴B. Espiau et F. Pierrot (LIRMM) participaient à cette mission dont le rapport est disponible à www.bulletins-electroniques.com/japon/rapports/SMM04_097

⁶⁵www2.cnrs.fr/presse/communique/382.htm

⁶⁶www.cyber.reading.ac.uk/prospective_students/undergraduate.htm

4.4 Évolution de la robotique à l'INRIA

Dans la version nationale de ce document de prospective pour le plan stratégique nous n'avons pas, faute de place, désiré entrer dans des considérations techniques très pointues, qui sont plus précisément présentées dans les **fiches de synthèses** établies par les projets. De plus, cette partie du document peut se décliner dans une version locale à une UR où sont indiquées des évolutions propres à l'UR concernée (mais qui peuvent bien sûr impliquer des projets de différentes UR), accompagnée de **propositions** pratiques. Ainsi le document de Sophia présente des propositions selon quatre axes (thématiques de recherche, expérimentations, valorisation et transfert et enseignement), accompagnées d'un volet "Collaboration" qui propose la création de réseaux de recherche au niveau régional (collaboration accrue avec le LIRMM) et international (laboratoires de l'arc méditerranéen compris entre Barcelone et Naples).

Nous nous en tiendrons donc ici à des considérations générales.

L'explosion du nombre d'applications robotiques, existantes ou en devenir, montre que le domaine est en plein essor. L'augmentation importante du financement des laboratoires de robotique aux États-Unis est aussi un indicateur de cette tendance : 48% d'augmentation pour le Robotics Institute de CMU et au moins 50% dans d'autres Universités comme CalTech, GeorgiaTech et le Virginia Institute of Technology⁶⁷. Le phénomène est similaire au Japon.

Devant les bouleversements du domaine de la robotique il est légitime de se poser la question, non pas du bien-fondé, mais de la façon de soutenir des projets essentiellement dédiés à la robotique à l'INRIA, sachant que la taille et la croissance de l'Institut, selon toute projection vraisemblable ou même optimiste, ne permettront pas de couvrir l'ensemble des thématiques du domaine. Cette réflexion doit également tenir compte du fait qu'un certain nombre de projets, sans se réclamer explicitement de la robotique, ont des thématiques de recherche relevant partiellement de ce domaine. Il importe que ces projets puissent bénéficier d'une expertise de base que les projets ayant des compétences reconnues dans le domaine sont à même de fournir pour peu que la pérennité de ces compétences soit encouragée.

Il nous semble tout d'abord souhaitable que l'INRIA maintienne un coeur d'activités "généralistes" autour des fondements de la robotique, avant de se focaliser sur, mais sans exclure non plus, le développement d'applications finalisées. Avec le recul, il apparaît que la reconnaissance internationale des contributions de l'INRIA en robotique est fondée en bonne partie sur des avancées méthodologiques et/ou théoriques dans des disciplines des Sciences de l'Ingénieur dont les problématiques de recherche ne se réduisent pas à des questions de robotique. Cette position n'est pas en contradiction avec la volonté d'appliquer le résultat de nos recherches à des domaines précis, ou de traiter des applications spécifiques susceptibles d'apporter de nouvelles thématiques de recherche. Il s'agit plutôt de maintenir et cultiver un savoir-faire intéressant l'ensemble des constituants de la robotique, depuis les aspects bas-niveau jusqu'aux couches applicatives. C'est une déclinaison de l'idée plus générale selon laquelle une solide base est le pré-requis à toute construction de qualité. Les fiches de synthèse proposées par les projets décrivent plus précisément les **thématiques de recherche** qu'ils semblent nécessaire d'aborder à la fois à l'horizon du plan stratégique et au delà. Nous invitons donc le lecteur à s'y reporter.

Les recherches en robotique ont aussi pour vocation de déboucher sur des **transferts industriels**. Les projets de robotique de l'INRIA sont très actifs sur ce volet. Il est très difficile de chiffrer l'ampleur de cette activité mais l'on peut mentionner, par exemple, que pour 2005 les projets affichent une dizaine de contrats conclus directement avec des industriels, sans passer par des réponses à des appels d'offre.

Pour ce qui concerne l'**enseignement** citons en préambule les propos des experts d'EUROP : *Actuellement les compétences en robotique sont enseignées de manière sectorielle, mécanique, génie électrique, informatique. Mais pour développer un système robotisé il ne suffit pas d'être expert dans un domaine mais d'en maîtriser*

⁶⁷source : USA Today, Associated Press, 4/8/2004

les divers aspects. Il est donc essentiel d'avoir une solide culture générale sans toutefois que soit pénalisée la profondeur de l'enseignement car les problèmes à traiter sont difficiles. Il est donc essentiel de former une nouvelle génération d'ingénieurs ayant une largeur de vue suffisante. Les projets sont évidemment d'accord avec ces propos et ont aussi un rôle actif en enseignement, qu'il est évidemment difficile de présenter ici car il est étroitement lié au contexte local.

Une proposition importante des projets concerne l'affichage de la robotique comme élément important de la recherche à l'INRIA. Cette discipline a disparu du découpage thématique et lors des évaluations les projets de robotique se retrouvent distribués dans des thèmes divers (CogB, CogC, SymB, NumA, Bio). **Il semble nécessaire, au vu du développement futur de ce domaine, de procéder à un nouveau découpage qui fera émerger un thème dont l'intitulé inclurait le mot "robotique", éventuellement associé à un autre mot-clé** (système embarqué?). Si ce thème était créé, COPRIN, E-MOTION, ICARE, LAGADIC ont d'ores et déjà annoncé qu'il le rejoindrait et l'on peut penser que plusieurs autres projets pourraient les imiter. La création d'un tel thème rendrait plus juste l'évaluation des projets robotique (dont la partie robotique de l'activité est souvent mal ou pas évaluée en raison de l'absence de reviewer compétent dans un panel forcément en nombre limité) et permettrait d'afficher un message vers l'extérieur de l'INRIA plus lisible sur la robotique. En parallèle il paraît urgent d'organiser une session INRIA-Industrie sur ce domaine.