

# JOURNÉE RECHERCHE-INDUSTRIE

Paris, 10 mai 2012

## *DOCUMENT DE SYNTHÈSE*

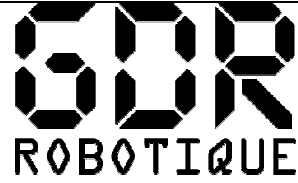
---

*Mise à jour : 18 mars 2013*

# Table des Matières

---

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 3  |
| Robotique chirurgicale, Robotique de réhabilitation.....  | 4  |
| Robotique d'Assistance à la personne (domestique, dépendance, handicap, <i>etc.</i> ) .....                             | 8  |
| Télé-robotique et robotique en milieux hostiles ou difficiles .....   | 13 |
| Robotique en milieux ouverts (terrestre, aérien, marin et sous marin) : intervention, surveillance et exploration ..... | 18 |
| Robotique manufacturière et de logistique .....   | 27 |
| Systèmes de transport intelligents.....   | 35 |
| Propositions pour améliorer les synergies Recherche-Industrie .....   | 39 |
| Annexe 1 : Liste des intervenants .....   | 42 |
| Annexe 2 : Composition du Comité d'Audit.....   | 43 |



Lors des *Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'11)* de La Rochelle en octobre 2011 (<http://jnrr2011.irccyn.ec-nantes.fr/>), le GDR Robotique et son Club des Partenaires ont organisé une table ronde afin de dresser un état des relations Recherche-Industrie en France et proposer des moyens organisationnels permettant de mieux accorder les activités des laboratoires avec les besoins des entreprises.

Pour donner suite à cette table ronde, la journée Recherche-Industrie du 10 mai 2012, qui a rassemblé plus de 80 participants, avait pour objectif d'identifier les attentes des Industriels et de les mettre en regard avec les finalités de la Recherche. La méthode de travail retenue a été de type Audit : pour chaque domaine de la Robotique, des acteurs académiques et industriels ont été invités à décrire brièvement leurs prospectives de recherche pour les uns, leurs besoins et objectifs de R&D pour les autres.

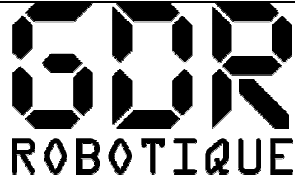
Ces confrontations ont été faites devant un comité *ad hoc* constitué de représentants de laboratoires, d'entreprises et de "facilitateurs" concernés par les problèmes d'innovation, qui a eu pour mission de rédiger ensuite un document de synthèse identifiant notamment les domaines à fort potentiel de transfert, dégagant des ambitions communes et des structurations possibles, et faisant des recommandations à destination des organismes et pouvoirs publics. C'est l'objet du présent document.

Les domaines considérés ici correspondent à des secteurs d'activités utilisant déjà des robots ou des composants de la robotique (on n'y trouvera donc pas certaines thématiques de recherche très amont qui n'ont pas encore diffusé vers des applications industrielles) :

- Robotique chirurgicale, Robotique de réhabilitation ;
- Robotique d'assistance à la personne (domestique, dépendance, handicap, etc.) ;
- Télé-robotique et robotique en milieux hostiles ou difficiles ;
- Robotique en milieux ouverts (terrestre, aérien, marin et sous-marin) : intervention, surveillance, exploration ;
- Robotique manufacturière et de logistique ;
- Systèmes de transport intelligents.

Les six chapitres qui suivent donnent, pour chacun de ces domaines, une présentation générale, son positionnement international, ses principaux acteurs, son potentiel industriel et son potentiel recherche. Un dernier chapitre rassemble quelques pistes pour améliorer les synergies Recherche-Industrie.

La liste des 56 intervenants de cette journée est donnée en Annexe 1. Leurs présentations sont en ligne sur le site du GDR ([http://www.gdr-robotique.org/journee\\_10\\_05\\_2012.html](http://www.gdr-robotique.org/journee_10_05_2012.html)). On trouvera en Annexe 2 la composition du comité d'Audit.



## 1.1 Présentation générale du domaine

La robotique chirurgicale se définit comme la robotique d'assistance au médecin pour la préparation et la réalisation du geste médical ou chirurgical. Elle recouvre un large éventail de systèmes robotiques très différents : robots d'intervention télémanipulés, robots de positionnement d'instruments ou d'ancillaires, microrobots chirurgicaux, systèmes de comanipulation, systèmes robotisés d'imagerie ou de radiothérapie, systèmes d'exploration endoluminale, simulateurs avec interfaces à retour d'effort, *etc.* Un système robotique médical ou chirurgical ne se limite pas au robot lui-même, mais inclut le plus souvent un logiciel de planification pré-opératoire, un logiciel de supervision et de commande du dispositif robotique, ainsi qu'une interface homme machine.

La robotique de réhabilitation se définit comme la robotique d'aide aux exercices de réhabilitation de personnes ayant subi un traumatisme. Elle recouvre des dispositifs de sollicitation mécanique de différentes parties du corps, mais aussi de sollicitation de processus cognitifs ou des différents sens de la personne. Le système robotique ne se réduit pas au dispositif mécanique et à son actionnement, mais inclut le plus souvent un logiciel de programmation des exercices et un logiciel de supervision enregistrant différents signaux biophysiques. Les systèmes de réhabilitation sont également proches des systèmes d'entraînement des athlètes que l'on peut inclure dans le domaine.

Les robots médicaux, chirurgicaux ou de réhabilitation ont différentes particularités par rapport à d'autres systèmes robotiques :

- Ils doivent fonctionner au contact de l'homme en toute sécurité ;
- Ils doivent respecter des normes de fabrication et de conception particulières ;
- Ils doivent montrer un bénéfice pour le patient ou l'utilisateur.

Ces particularités génèrent des barrières difficiles à franchir en plus de la complexité inhérente de la robotique, qui sont : une conception spécifique du dispositif robotique pour gérer la sécurité, des compétences de fabrication et réglementaires particulières, une interaction très étroite avec le milieu médical et la mise en œuvre d'essais complexes.

## 1.2 Positionnement international, forces et faiblesses

La France possède aujourd'hui des laboratoires académiques de réputation internationale et un ensemble de PME innovantes de petite taille. Ce tissu académique et industriel pourrait être plus développé étant donné les enjeux, les besoins et le potentiel d'innovation du domaine.

La principale entreprise du domaine de la robotique médicale est américaine. Il s'agit d'Intuitive Surgical qui a en une dizaine d'années atteint une capitalisation boursière extraordinaire en raison d'une situation de monopole avec le robot Da Vinci de chirurgie mini-invasive et grâce à un

portefeuille de brevets très développé. L'exemple d'Intuitive Surgical excite aujourd'hui l'imagination dans le monde entier.

Une faiblesse française est la taille très réduites des PME, ainsi que le peu de financements disponibles pour l'investissement à risque, surtout en regard des Etats-Unis où se trouvent aujourd'hui de nombreuses entreprises de la robotique médicale.

### 1.3 Les principaux acteurs du domaine (laboratoires et entreprises)

Les principaux laboratoires de recherche en robotique médicale sont regroupés dans un réseau qui a été sélectionné dans le cadre des Investissements d'avenir à la fois comme Equipement d'excellence (Equipex) : Robotex (<http://equipex-robotex.fr>) et comme Laboratoire d'excellence (Labex) : CAMI (<http://www.cami-labex.fr>). Il s'agit des laboratoires :

- ISIR à Paris ;
- LIRMM à Montpellier ;
- ICube (anciennement LSIT) à Strasbourg ;
- TIMC à Grenoble.

Il s'agit de laboratoires mixtes entre le CNRS et les universités ou écoles du site qui ont la particularité d'être implantés en tout ou en partie au sein de CHU avec des équipes de recherche mixtes comprenant des chercheurs et des médecins.

Il faut y ajouter également des équipes de recherche qui travaillent dans le domaine de l'assistance au geste médical ou chirurgical sans concevoir de robots, mais en réalisant des systèmes informatiques, ou qui travaillent dans le domaine de la microrobotique biomédicale. On citera :

- LATIM à Brest ;
- LTSI à Rennes ;
- Equipes Shaman et Lagadic à l'INRIA,
- FEMTO-ST à Besançon, *etc.*

On peut estimer le nombre de chercheurs permanents et non permanents dans les laboratoires à une bonne centaine de personnes.

Les entreprises françaises du domaine sont principalement des PME innovantes qui sont pour une grande part issue des laboratoires académiques cités précédemment :

- Axilum Robotics ;
- Endocontrol ;
- Haption ;
- ISIS ;
- Koelis ;
- Medtech ;
- Praxim ;
- Robosoft ;
- SurgiQual Institute, *etc.*

mais également des filiales de grands groupes internationaux des technologies médicales :

- GE HealthCare – France ;
- Siemens HealthCare – France, *etc.*

On peut citer notamment la société BA Systèmes qui a développé un imageur médical robotisé en collaboration avec GE Healthcare et a créé l'activité BA Healthcare consacrée à la fabrication de robots mobiles pour les applications médicales.

Pour ce qui est de la robotique de réhabilitation que ce soit pour le membre supérieur ou inférieur, les acteurs sont moins nombreux qu'en robotique médicale et sont eux aussi confrontés à une avance concurrentielle notamment américaine (par exemple les robots InMotion d'Interactive Motion Tech.) ou suisse (Armeo et Lokomat d'Hocoma). On peut mentionner quelques laboratoires actifs dans le domaine (ISIR, CEA, INRIA Sophia-Antipolis, LIRMM, *etc.*) et des industriels : Assistmov (plate-forme de perturbation posturale), Haption (robot à câble ICEA, exosquelette ABLE), RB3D (évolution de l'exosquelette Hercule vers des applications médicales), Tecnalia, *etc.*

L'innovation dans ce domaine est le fruit d'un processus de recherche translationnelle consistant en allers-retours avec la recherche clinique pour valider et faire évoluer les solutions techniques. Au-delà naturellement des CHU, les partenariats avec les centres de rééducation et les centres d'expertise nationaux, notamment le CEN Rob, sont aussi indispensables.

#### **1.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, les points durs et défis**

La robotique médicale, encore plus que d'autres disciplines de la robotique, est confrontée à un temps de cycle des projets très long lié à la nécessité impérieuse de non seulement réaliser un voire plusieurs prototypes, mais également de les tester et valider *in vivo*. Les investissements sont considérables et les procédures d'homologation longues et complexes. Ainsi, peu de robots médicaux franchissent le pas du laboratoire pour tenter l'aventure industrielle et encore moins sont des succès commerciaux.

Cependant, les enjeux en termes d'innovation industrielle sont majeurs étant donné l'importance croissante du marché de la robotique médicale, en raison de la demande constante de l'amélioration de la qualité de soins, du vieillissement de la population et de la réduction du nombre de médecins. L'attente du public (et des médias qui survendent parfois ces nouvelles technologies) est très grande. Ce marché est globalisé avec essentiellement des PME.

On peut relever quelques points durs et défis :

- Le respect de la réglementation ;
- La sécurité des dispositifs ;
- La compatibilité avec l'environnement médical ;
- L'interopérabilité avec d'autres dispositifs ;
- La miniaturisation au service de procédures le moins invasives possibles ;
- La preuve du bénéfice pour le patient ;
- La codification et le remboursement des actes robotisés ;
- La mondialisation ;
- *etc.*

#### **1.5 Potentiel recherche : les avancées et perspectives de recherche**

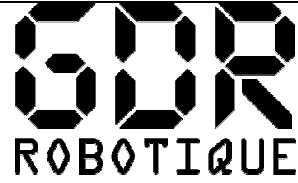
La tendance actuelle est aux systèmes dédiés. Ils peuvent être considérés comme des outils de chirurgie dotés d'un actionnement et d'une intelligence car souvent connectés à un ordinateur. Rentrent dans cette catégorie tous les robots porte-aiguille, les robots-guides pour la chirurgie orthopédique, les robots pour la chirurgie transluminale ou trocar unique, les cathéters actifs, les stabilisateurs cardiaques actifs ou encore les robots autonomes de type capsules ingérables.

Les robots industriels se cantonnent dans des tâches où ils ne sont pas au contact du patient (robots embarquant des imageurs, des lasers, des sources radioactives, des sondes US, etc.).

Parmi les défis d'actualité, on peut citer :

- la modélisation des déformations de tissus mous et des interactions instruments / organes ;
- La réalité augmentée en présence de mouvements physiologiques ;
- L'intégration des différentes modalités d'imagerie médicale (IRM, échographie, tomographie à rayons X, fluoroscopie, etc.) pour le guidage temps réel per-opératoire et la planification ;
- le contrôle des interactions instrument / tissus grâce à la téléopération à retour d'effort ou à la comanipulation ;
- la conception de robots compatibles IRM ou CT pour la radiologie interventionnelle ;
- la conception de robots compacts portés par le patient ou d'instruments "intelligents" pour l'assistance aux gestes en chirurgie laparoscopique ou orthopédique ;
- la conception de systèmes robotisés dextres pour l'endoscopie ou la micro-endoscopie ;
- la conception de solutions mécatroniques innovantes à base de robots reconfigurables pour la chirurgie à trocart unique, la chirurgie par les voies naturelles et les thérapies ciblées ;
- l'actionnement de structures mécaniques de taille centimétrique, voire millimétrique ;
- la microrobotique avec le développement de flottilles de microsystèmes (microrobots ou micro-usines) mobiles allant traiter ou délivrer un médicament localement ;
- etc.

Le domaine de l'assistance à la personne ou des gérontechnologies (personnes handicapées ou personnes âgées ayant des troubles physiques sensoriels et moteurs et/ou des troubles cognitifs) est également très actif et très prometteur. L'objectif est d'améliorer sa qualité de vie et son autonomie et favoriser son maintien à domicile. On voit par exemple apparaître des systèmes d'aide adaptés à la morphologie de la personne comme les exosquelettes ou les prothèses actives, ou encore des cannes intelligentes pour prévenir la chute de personnes âgées. Une des spécificités dans ce domaine est que les structures doivent être pouvoir interagir de façon sûre et simplifiée avec l'homme et doivent pour certaines posséder de grandes capacités de déplacement et de manipulation en milieu fortement encombré. Enfin, les robots sociaux possédant des capacités cognitives pour l'interaction avec les patients font aujourd'hui l'objet de beaucoup de travaux.



## 2.1 Présentation générale du domaine

La robotique d'assistance à la personne couvre une pluralité de contextes (handicap, maladie, vieillissement, vie courante) et d'usages (surveillance, entretien et tous autres actes de la vie courante) à domicile ou dans des structures d'accueil communes.

L'enjeu sociétal majeur sous-tendant les travaux de la robotique d'assistance est d'une part d'améliorer les conditions de vie aux personnes souffrant d'un handicap psychomoteur ou affaiblies par le vieillissement mais aussi d'autre part d'apporter une prise en charge de travaux de la vie courante à tous (robotique domestique).

La **robotique d'assistance domestique** se développe sur un marché grand public de masse avec de multiples applications : aspirateurs, tondeuses à gazon, laveurs de vitre, nettoyage de piscine, auto laveuses, téléprésence et gardiennage domestique, jouets, robots de compagnie, *etc.*

La **robotique d'assistance au handicap et aux personnes âgées** se développe par une prescription professionnelle : aussi bien par le corps médical, qui y trouve des opportunités pour l'entretien physique et cognitif, le suivi thérapeutique et la surveillance des patients que par des organismes privés (notamment assurance / mutuelle) qui peuvent y puiser de nouveaux services à intégrer dans les contrats d'assurance, augurant même de la prévention en sus de la réhabilitation post-traumatique. Ces équipements seront souvent associés à des plates-formes de services à distance qui pourront exploiter les données fournies par l'équipement et si besoin agir pour la sauvegarde des personnes suite aux informations reçues.

Parmi les équipements identifiés à ce jour pour l'assistance physique, on peut citer :

- Des équipements robotisés simples et mono-tâches (par exemple pour les aides au repas) ;
- Des stations robotisées d'assistance ;
- Les orthèses des membres supérieurs ou inférieurs ;
- Les prothèses intelligentes des membres supérieurs ou inférieurs ;
- Les déambulateurs intelligents ;
- Les fauteuils intelligents (dotés de fonctions d'assistance à la conduite, de bras de manipulation, *etc.*) ;
- Voire des exosquelettes complets des membres inférieurs.

Pour l'assistance multitâche (physique et cognitive) à la personne dépendante, on trouve en majorité des systèmes robotisés mobiles (plates-formes à roue ou semi humanoïdes et plates-formes humanoïdes). Ces systèmes peuvent avoir de multiples fonctions de base qui sont configurées suivant les besoins de la personne :

- La surveillance et le lever de doute ;
- La stimulation cognitive ;
- La socialisation *via* des outils de jeux, d'accès à distance audio-vidéo aux proches, agenda, courses, *etc.* ;
- L'actimétrie (recueil de données sur l'état du patient et de son évolution, lié à un acte de télémédecine, études épidémiologiques, info sur la vie quotidienne) ;
- La consultation de télémédecine ;
- L'assistance *via* la manipulation et le transport d'objet (avec une option bras embarqué suivant le type de système), *etc.*

Dans ce cadre l'assistance se définit en fait suivant deux axes :

- Le soutien physique avec des tâches comme déplacer un objet, aider à la réalisation d'un mouvement, accéder à une information, *etc.* ;
- Le soutien psychologique comme par exemple mettre de l'empathie dans un robot, du réconfort, de l'attention ou de la prévention.

Le premier axe correspond aux travaux des équipes robotiques assistées par des spécialistes de la médecine ou de la biologie. Le second nécessite des études sur les émotions, la personnalité, la communication verbale et non verbale. Ces données sont hors des champs habituels de la robotique, ce qui nécessite une collaboration avec des spécialistes des sciences humaines

## 2.2 Positionnement international, forces et faiblesses

D'une manière générale, les **atouts** de la France dans le domaine de la **robotique d'assistance au handicap et aux personnes âgées** sont le niveau de la recherche académique et le potentiel de financement de l'aide sociale à l'équipement et aux services associés, ce dernier point étant commun à l'Europe.

Le marché est encore au stade du développement initial et la France peut être bien positionnée si elle sait résoudre ses faiblesses (ci-dessous). Les Etats-Unis et l'Allemagne, le Japon et la Corée sont très dynamiques sur ces sujets

Les **faiblesses** sont un manque réel d'exploitation des travaux académiques pour aller vers des produits dans l'industrie et le manque d'industriels sur le segment : les acteurs présents sont des petites entreprises qui ne disposent pas des moyens d'industrialisation nécessaires au développement du marché. Par ailleurs, l'écosystème français voit se développer très peu d'expérimentations en vraie grandeur, qui permettraient de valider des applications, même avec des fonctionnalités limitées mais qui fourniraient aux industriels l'occasion de déployer des systèmes, de travailler sur l'industrialisation et de baser leurs développements sur de réels retours de terrain, en même temps que favorisant la visibilité internationale des acteurs.

Le domaine de la **robotique d'assistance domestique** dispose également d'atouts *via* sa recherche académique (avec des briques sur la technologie de navigation, la perception, l'interaction homme-robot) qui ne sont pas exploités par manque de présence d'industriels de taille critique pour ces marchés grand public. On peut noter cependant que certains industriels d'équipements domestiques sont en veille très active sur ces sujets et seraient intéressés à franchir le pas *via* des projets communs avec des organismes de recherche **appliquée** prêts à s'engager sur des résultats robustes et quasi industriels. Les Etats Unis et la Corée sont les leaders sur ce domaine.

La comparaison par pays sur les domaines applicatifs est assez difficile si l'on veut une comparaison au niveau recherche mais une synthèse des positions relatives de différents pays sur le développement des briques technologiques nécessaires à ce domaine, réalisée dans le cadre de l'étude PIPAME<sup>1</sup> sur la robotique personnelle et de service, donne un éclairage sur la position de la France.

## 2.3 Principaux acteurs du domaine

Les principaux acteurs du domaine cités ci-dessous sont des sociétés ou organismes qui participent actuellement à des développements d'équipements *via* des projets ANR et FUI. D'autres acteurs, notamment au niveau des sociétés de services (Assurance, Service à la personne, Service télécom, etc.), sont en veille active sur ce domaine.

**Industriels :** Gostai, Aldebaran, Robosoft, Voxler, Robopec, AssistMov, DRK, Robopolis, etc. On peut noter que ces sociétés sont essentiellement des PME d'innovation qui ne sont pas dans une phase "produit".

**Services, Exploitants:** Covea-Tech, Orange, La Poste, Kerpape, Approche, etc.

**Laboratoires de recherche :** ISIR-UPMC, LIRMM, LTCI (Telecom ParisTech), LabSTICC, INRIA avec plusieurs équipes de recherche sur Rennes, Sophia-Antipolis, Grenoble, Bordeaux, ENSTA-ParisTech, LAAS, GIPSA, CEA LIST, etc.

On peut citer également 2 organisations particulièrement actives dans ce domaine : le Centre National de Référence CNR Santé à domicile et autonomie et le CEN Rob (centres d'expertise de la CNSA).

Sur l'aspect robotique d'assistance domestique, le nombre d'acteurs industriels en France est quasi nul à ce jour.

## 2.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, points durs et défis

Ce domaine exploite de multiples technologies qui nécessitent des travaux de développement pour les robustifier et permettre un usage opérationnel par des utilisateurs finaux ; on peut résumer dans le tableau ci-dessous les priorités suivant les différents axes présentés précédemment :

|                               | Domestique | Assistance Physique | Assistance cognitive | Assistance compagnon |
|-------------------------------|------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Navigation                    | +++        | ++                  | ++                   | +++                  |
| Logiciels haut niveau         |            |                     |                      |                      |
| Perception et capteurs        | ++         | ++                  |                      | ++                   |
| Mécatronique (hors humanoïde) |            | ++                  |                      | +                    |
| Interaction homme-robot       | +          | ++                  | +++                  | +++                  |

<sup>1</sup> DGCIS, Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France, rapport PIPAME, 2012 <http://www.industrie.gouv.fr/p3e/etudes-prospectives/robotique/robotique.pdf>

|                                   |    |    |     |     |
|-----------------------------------|----|----|-----|-----|
| <b>Application cognitive</b>      | +  |    | +++ | +++ |
| <b>Communication</b>              |    | +  | +   | +   |
| <b>Énergie</b>                    | ++ | ++ |     | +   |
| <b>Techno robotique humanoïde</b> |    | ++ |     | ++  |

De manière plus précise, on identifie les principaux enjeux suivants en termes d'innovation industrielle :

- L'Acceptabilité d'un robot auprès des personnes :
  - Une "juste" interaction psychologique avec la personne (le robot doit rester une "machine" et ne doit pas chercher à remplacer une fonction humaine totale tout en apportant l'aide attendue) ;
  - Un design s'intégrant bien dans le lieu de vie.
- La Sécurité :
  - Comment garantir l'intégrité physique d'une personne notamment d'une personne affaiblie ;
  - Sécurité vis-à-vis des biens et de l'environnement ;
  - Stratégies d'urgence, tant mécatroniques que logicielles ou manuelles ;
  - Réglementation et normalisation.
- L'Énergie :
  - La robotique ne peut se développer à grande échelle que si les capacités énergétiques sont en lien avec l'usage. Rapport temps d'utilisation sur temps de charge à diminuer + stratégie d'énergie autonome.
- La collaboration homme-robot et l'interaction :
  - Perception de l'humain, anticipation des trajectoires pour éviter les chocs, positionnement pertinent dans l'espace pour effectuer une action le plus efficacement possible (servir un verre d'eau, etc. de l'autre côté de la table) ;
  - Expressive : interaction sociale et interaction émotionnelle entre humaine et robot ;
  - Audition active (réaction / mouvement suivant contexte sonore).
- Enjeux composants et algorithmique de navigation et de perception :
  - Pour le suivi des personnes, pour la reconnaissance de visages, pour le traitement du son, poursuite de travaux plus fondamentaux pour accroître la précision de traitement des robots ;
  - La navigation dans un environnement structuré évolutif et le suivi de personne.
- Perception :
  - Approche multi-sensorielle avec couplage son et image, pour renforcer l'impact des deux (regarder vers la source sonore) ;
  - Détection d'un bruit spécifique (sonnette par exemple), la séparation des sons, la localisation de l'émetteur, la détection des émotions ;
  - Détecter un mouvement brusque et l'interpréter comme par exemple une chute (besoin d'apprentissage et de décisionnel pour une personne donnée) ;
  - Dotation du robot en capacités d'auto-apprentissage (acoustique du local, caractéristiques spectrales des sources, auto-localisation des sons).

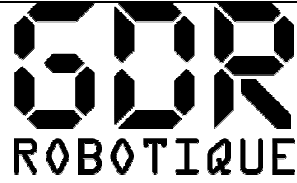
Au niveau industriel, en compléments des enjeux de développement cités ci-dessus, les verrous à lever pour favoriser la filière française sont :

- Améliorer les liens entre la recherche académique et l'industrie pour aider à lever les enjeux ci-dessus ;
- Favoriser le développement de PME de taille moyenne avec des structures financières solides pour l'industrialisation à moyen terme ;
- Favoriser la mise en place de programmes de recherche liés à l'acceptabilité et l'interaction sous des formes plus psychologiques et sciences sociales en collaboration avec les chercheurs de ce domaine ;
- Lever les verrous sur l'acceptabilité et l'utilisabilité en réalisant des expérimentations à grande échelle et en travaillant avec des spécialistes des sciences humaines et des comités d'éthiques ;
- Mettre en place des expérimentations à grande échelle afin de permettre l'industrialisation de systèmes en petite ou moyenne présérie.

## **2.5 Potentiel recherche : les avancées et perspectives de recherche**

Parmi les enjeux cités dans le chapitre précédent, des axes nécessitent plus particulièrement pour certains des recherches plus fondamentales et des collaborations étroites avec des industriels *via* des thèses en commun et des projets de recherche partenariale aidés

- Recherches liées à l'acceptabilité et l'interaction homme-robot en collaboration avec les chercheurs des sciences humaines ;
- Collaboration homme-robot (fonction d'assistance à distance) ;
- Perception (suivant les différents sujets cités) avec des algorithmes utilisant des capteurs bas coût (caméra, kinect ou équivalent, micro, laser bas coût, *etc.*) ;
- Navigation dans un environnement structuré évolutif et fonction de suivi de personnes.



### 3.1 Présentation générale du domaine

La télé-opération ou "opération à distance" au sens le plus général est un ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action en temps réel (observation, manipulation) à distance grâce à des retours sensoriels. Elle trouve son origine dans la nécessité apparue dans les années 50 de pouvoir manipuler des matières radioactives en toute sécurité. Les premières recherches ont consisté en l'étude de systèmes permettant de transposer les capacités de manipulation d'un opérateur humain au travers d'une cloison (manipulateur de parois).

Ces systèmes, à l'origine entièrement mécaniques, ont ensuite évolué vers des systèmes électromécaniques qui étaient cependant d'une efficacité très réduite comparée à celle des opérateurs humains, notamment pour réaliser des opérations au contact direct de l'environnement. En règle générale, cette forme de télé-opération est de dix à plusieurs centaines de fois plus lente que les opérations directes. Les opérations à distance sont extrêmement coûteuses et fastidieuses à cause de cet effet et ont été la cible continuelle d'améliorations techniques. Beaucoup de recherches, d'efforts de développement ont mis l'accent dans ces deux dernières décennies sur l'amélioration de l'efficacité du travail à distance. Ces efforts ont inclus l'élaboration de nouveaux bras maîtres, de postes de contrôle, d'algorithmes de contrôle, *etc.* Dans les années 1960 et début des années 1970, avec l'avènement de l'électronique numérique, l'intégration de diverses formes d'assistance à la télé-opération s'aidant du développement de la robotique a permis des progrès particulièrement importants. Cette intégration de la robotique avec la télé-opération est devenue le fondement de ce que l'on appelle maintenant "la télé-robotique".

Depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui, la télé-robotique a été un domaine actif de recherche et développement dans de nombreux domaines différents, dont le nucléaire, l'espace, et les applications militaires. Contrairement à la robotisation de la fabrication, les opérations à distance dans des environnements dangereux et non-structurés nécessitent l'homme dans la boucle de régulation pour faire face à la complexité des opérations et pour en assurer la sécurité.

Le développement ces dernières années de techniques de couplage du maître et de l'esclave avec un retour d'effort, d'assistance à la planification des mouvements, de recalage du bras maître dans l'environnement de travail ou d'aide à l'exécution des tâches par intégration d'informations de capteurs extéroceptifs a permis progressivement de faire évoluer les systèmes de télé-opération principalement en dehors du domaine nucléaire.

La télé-robotique concerne aujourd'hui de nombreux autres domaines comme :

- **L'off-shore** : installation de puits, maintenance, production, réparation ;
- **Le sous-marin** : exploration, prospection, déminage ;

- **Le terrestre** : inspection, sécurité civile et militaire (dont déminage) ;
- **L'aéronautique** : drones ;

Ces trois derniers domaines adressent très souvent les problématiques sécurité et militaire, traités plus en détail dans le chapitre suivant.

- **La santé** : télé-chirurgie, télé-échographie, décrits au paragraphe "robotique chirurgicale, robotique de réhabilitation";
- **Le spatial** : exploration principalement ;
- **Les travaux publics** : excavation, surveillance d'ouvrages d'art ;
- **La micromanipulation** pour la biologie, l'assemblage de micro-nanocomposants ou les instruments scientifiques.

Si les travaux de recherche visent à donner de plus en plus d'autonomie aux systèmes relevant de ce domaine, les produits ou prototypes actuellement disponibles, à de rares exceptions près et sur des gammes d'actions très bien définies, requièrent tous une interaction avec un opérateur humain. Cette interaction plus ou moins importante, tire parti généralement du retour sensoriel visuel seul :

- Dans le cas de la **Télé-opération Assistée par Ordinateur**, le retour visuel peut être complété par du retour d'effort, un retour tactile ou encore par l'utilisation de réalité augmentée ;
- Dans le cas de la **Télé-Programmation**, l'opérateur programme en ligne des tâches à effectuer et le robot exécute automatiquement ce programme ;
- Dans le cas de la **Commande Supervisée**, le robot dispose d'une grande autonomie décisionnelle, l'opérateur ne réalisant que la surveillance du bon fonctionnement.

Il est à noter que la robotique mobile militaire (notamment en France et aux Etats-Unis) développe des concepts **d'Autonomie Ajustable** consistant à créer un ensemble quasi continu de modes de fonctionnement, allant de la télécommande à l'autonomie supervisée (par exemple, la classification PACT est très utilisée dans le domaine des engins aériens sans pilotes à bord). L'objectif est de gérer au mieux le partage des tâches entre l'opérateur et le robot, en fonction des objectifs de la mission, de sa complexité et de la maturité technique, pour que le système Homme-Robot fournisse toujours la meilleure performance.

### 3.2 Positionnement international, forces et faiblesses

La France occupe une place importante au plan international dans le domaine de la télé-robotique, en particulier grâce au CEA qui a joué un rôle de pionnier (sous l'impulsion de Jean Vertut notamment) et ce, dès le début des années 70. Toujours en France, la DGA a financé depuis la décennie 1990 une exploration approfondie de la téléopération de véhicules lourds et rapides (travaux de l'ETAS, projet nEUROn, etc.), qui a conduit à l'élaboration de différents principes et concepts "d'assistance à la téléopération" (faiblement diffusés du fait de la nature des applications ciblées).

Les autres grands acteurs du domaine sont essentiellement les USA, le Canada et le Japon, les USA dont les recherches dans ce domaine ont été motivées au début des années 80 par les programmes spatiaux puis militaires et de maintenance des centrales nucléaires. Le Canada à travers l'Agence Spatiale Canadienne a toujours eu, depuis sa création en 1989, des programmes de recherche en télé-robotique. Elle collabore sur ces sujets avec l'ESA (European Space Agency). La télémédecine y constitue un domaine d'application plus récent mais particulièrement actif depuis plusieurs années. Le Japon a également toujours entretenu des travaux de recherche en télé-robotique initialement

pour les applications spatiales et plus récemment le médical. En Europe, l'Allemagne avec le DLR notamment est l'autre acteur majeur en télé-robotique.

### 3.3 Les principaux acteurs du domaine (laboratoires et entreprises)

La France compte nombre d'acteurs industriels de premier plan dans ce domaine, notamment soutenus par une forte présence sur les secteurs nucléaire et off-shore. Cette spécificité a permis le développement d'une démarche unique au monde, au stade industriel, de télé-opération basée sur l'emploi de bras maître et de contrôle commande générique (contrôleur TAO du CEA LIST).

Parmi les acteurs industriels Français de renommée internationale, on peut citer :

- **ECA**: présent sur les deux secteurs, avec un poids fort sur le sous-marin, ECA développe également des systèmes qui s'apparentent à des télé-robots pour le démantèlement nucléaire ;
- **Cybernetix** : présent également sur les deux secteurs, Cybernetix déploie des systèmes télé-robotiques, à retour d'effort ou non, principalement pour le démantèlement, et notamment à l'international (Japon par exemple). Elle produit également des ROV, principalement pour l'offshore ;
- **AREVA Mécachimie** : cette société fournit des systèmes télé-robotiques à retour d'effort basé sur des robots de la gamme Staubli, pour des applications de maintenance (La Hague) ;
- **Getinge - La Calhène** : fournisseur de télé-manipulateur à l'origine, dans le monde entier, cette société est aujourd'hui en charge de l'industrialisation du premier système télé-robotique pour la production ;
- **Haption** : conçoit, réalise et commercialise des interfaces haptiques et des bras maître pour la télé-robotique (seul industriel au monde à fournir des bras maîtres à retour d'effort indépendamment du système complet) ;
- **Bertin Technologies** : propose des systèmes téléopérés aériens de surveillance.

Au-delà, on voit se créer ces dernières années un nombre important de petites entreprises développant des technologies de mini-drones télé-opérés pour le travail aérien (surveillance, prise de vue, etc.) comme Delta-drone, Fly-n-sens, Infotron, etc.

La France compte également plusieurs acteurs majeurs de la télé-robotique. De par son fort historique nucléaire tout d'abord, avec le CEA LIST qui a amené au stade industriel les concepts de télé-robotique, avec une démarche unique au monde. A ce titre, il pilote deux projets de norme :

- Le projet ISO : ISO-TC85-SC2-WG 24 "Remote handling devices for radioactive materials" ;
- et son pendant AFNOR (PWI 16660).

La problématique de télé-robotique est transverse aux différentes applications et c'est tout naturellement que des acteurs de chacun des groupes de travail se retrouvent cités ici : **CEA LIST, ISIR, LIRMM, IRCCYN**.

Par ailleurs, avec les interfaces apportées par les tablettes et smartphones, le domaine ludique propose de nouveaux modèles de contrôle qui se rapprochent de la télé-opération. On peut citer par exemple les drones en tous genres contrôlés par smartphone.

Au-delà des fournisseurs, la France compte plusieurs utilisateurs de la technologie qui sont des moteurs de l'innovation dans ce domaine, comme par exemple **AREVA, Bouygues TP, EDF, RTE, IFREMER...**

### 3.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, les points durs et défis

Si l'enjeu principal de protéger l'humain des risques liés à une tâche ou un environnement donné justifie l'utilisation des systèmes télé-robotiques, les coûts et la complexité de ces systèmes en limitent encore l'usage et constituent donc un premier verrou.

Les principaux domaines où sont déployés les technologies de télé-robotique restent l'offshore, le médical (quasi exclusivement adressé par la société "Intuitive Surgical", aux USA, qui diffuse le Da Vinci), le nucléaire, la sécurité civile et le domaine militaire (qui fait une utilisation croissante, notamment aux USA, de petits robots mobiles porteurs de charges utiles diverses), et le spatial dans une moindre mesure (en matière de nombre de robots déployés). De nouvelles applications comme le génie civil, la téléchirurgie longue distance ou la télé-échographie, restent encore au stade de démonstrateurs, principalement pour des raisons de maturité technologique (notamment sûreté de fonctionnement), mais également pour des questions de coûts global. Des applications très spécifiques comme la manipulation en forge ou fonderie représentent des niches d'intérêt pour ces évolutions technologiques (à ce jour, "Andromat", en Allemagne, est la seule société réellement représentée sur ce marché).

Le cercle vicieux du coût de possession élevé, dû à une faible diffusion, due elle-même à un coût élevé, doit être brisé pour permettre à ces technologies de trouver de nouveaux débouchés. L'utilisation d'interfaces de plus faibles coûts, comme les interfaces haptiques (par exemple le bras maître à structure parallèle de Force Dimension du système d'Hansen Medical), ou tablettes est une voie prometteuse dans ce sens.

D'autres verrous freinent la diffusion de ces systèmes :

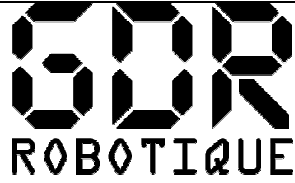
- Sécurité et performances : principalement dans la difficulté de perception de la tâche et de l'environnement, qui peut amener à des situations dangereuses ou d'une productivité au mieux hasardeuse ;
- Capacités de franchissement faibles pour les bases mobiles, limitées également par les ratios poids / volume de travail importants des manipulateurs embarqués ;
- Mobilité et autonomie trop faibles, notamment pour le travail en bâtiments (escaliers, etc.) ;
- Formalisation d'une meilleure répartition des tâches entre l'homme et le robot, passant notamment par le développement de fonctions adaptées d'assistance à la téléopération.

### 3.5 Potentiel recherche : les avancées et perspectives de recherche

La télé-robotique a atteint un haut niveau de maturité mais, comme déjà mentionné, les systèmes de télé-opération sont encore d'une efficacité très réduite comparée à celle des opérateurs humains, notamment dans les opérations au contact avec l'environnement. Les recherches dans ce domaine sont à ce jour tournées vers le gain en performances (productivité), sûreté, facilité d'usage et intuitivité. On cherche aujourd'hui des solutions pour :

- Les assistances à l'opérateur, qu'elles soient basées sur l'utilisation de modèles CAO (reconstruit ou non) ou basées capteurs (vision, lidar, radar, US, etc.) ;
- Les compléments au retour visuel, autre que le retour d'effort, avec l'usage de la réalité augmentée pour introduire des représentations des perturbations par exemple. La conception d'interfaces multi-modales adaptées aux besoins de la télé-opération constitue encore un enjeu pour augmenter la pénétration des techniques de télé-opération.

La détection des intentions des télé-opérateurs, la télé-opération intuitive constituent des problématiques peu explorées. Au-delà, les questions de partage d'autorité entre les systèmes intelligents télé-opérés et les télé-opérateurs sont tout à fait centrales pour maîtriser la sûreté de fonctionnement de ces systèmes.



## Robotique en milieux ouverts (terrestre, aérien, marin et sous marin) : intervention, surveillance et exploration

Y. Chardard, V. Creuze, R. Millet, J. Morillon, B. Patin, F. Plumet

### 4.1 Présentation générale du domaine

Ce domaine couvre une large variété d'applications (surveillance, intervention, exploration et exploitation) dans des champs d'activités civiles (agriculture, sécurité civile, sécurité privée, travaux publics, environnement, industrie, archéologie, *etc.*) et des champs d'activité militaire, avec des systèmes robotisés intervenant au niveau terrestre, aérien et naval (marin et sous marin). Les activités les plus développées en France actuellement sont liées à la Défense et à la Sécurité mais le potentiel de développement des activités civiles est important.

Si les premières réalisations (hors du domaine du jouet) ont d'abord porté sur des tâches en milieux ouverts (agriculture par exemple), des développements récents et très actifs s'intéressent aussi aux milieux confinés (exploration de bâtiments par exemple).

On notera que certaines applications de surveillance et d'intervention, par exemple dans l'offshore, le nucléaire et d'autres milieux à risque, sont proches de celles de la robotique en milieux hostiles ou difficiles (§ 3). Le domaine est donc vaste et couvre de nombreux types de vecteurs que l'on peut classifier pas sous-domaines de la manière suivante :

#### **Vecteurs terrestres**

De toutes tailles, du minirobot au robot lourd et l'adaptation d'engins pilotés à la conduite automatique ou pilotés à distance (engins agricoles, travaux publics, forestiers, miniers, engins militaires). Les types de locomotion de ces plates-formes couvrent également un large spectre, du plus classique (roues / chenilles, mais également jambes / pattes) au plus spécifique (structures articulées, ventouses, crochets, *etc.*). Cette diversité découle directement de la variabilité et de la complexité du déplacement terrestre, aucune des solutions existantes ne constituant une réponse universelle.

#### **Vecteurs aériens**

- Microdrones à voilure fixe et à voilure tournante, à aile battante ;
- Minidrones Tactiques à voilure fixe ou tournante, rapides ou lents ;
- Drones MALE : moyenne altitude (5/10000 m) et grande autonomie (20/40h) ;
- Drones HALE : haute altitude (>20000m) et grande autonomie ;
- Drones de combats (ou UCAV) : le futur ?
- Ballons dirigeables.

A noter également l'existence de "vecteurs intermédiaires", difficilement classables tels que les "boules" d'observation (caméras à lancer, avec en sus une capacité réduite de mobilité terrestre permettant d'ajuster leur position une fois atterries).

### **Vecteurs marins**

Ils sont réalisés sur des bases d'embarcations semi-rigides, de dériveurs, de catamarans ou de vedettes de petite taille (en général < 10m) pour des applications de surveillance, d'intervention, de mesure de l'environnement, *etc.* Plusieurs systèmes motorisés sont industrialisés (Inspector d'ECA, Basil d'ACSA, RSV de Géocean, Catarob de Subsea Tech, *etc.*) et l'on voit depuis quelques années émerger des prototypes académiques d'USV (Unmanned Surface Vehicles) à propulsion vélique (Vaimos de l'ENSTA Bretagne/IFREMER, Iboat de l'ISAE, ASAROME de l'ISIR/EMN) ou encore mus par la houle. Ces véhicules notamment destinés à l'échantillonnage de la couche de surface et à l'étude du climat permettent d'effectuer des missions très longues car ils fabriquent leur propre énergie. Leur faible taille permet une mesure sans perturbation du milieu, ce qui en fait des outils complémentaires des gros navires océanographiques.

### **Vecteurs sous-marins**

Il existe différents types de vecteurs dédiés à la lutte anti sous-marine, la recherche d'objets et d'information, l'exploration en grande profondeur, l'exploitation et la maintenance en grande profondeur (pétrole off-shore, éoliennes, hydroliennes, câbles sous marin, *etc.*), la surveillance des ports, l'inspection de coques ou de structures immergées (pipeline, barrage). On distingue les véhicules télé-opérés par câble (ROV : Remotely Operated Vehicle) et les engins sans câble (AUV : Autonomous Underwater Vehicle), les premiers dominant encore aujourd'hui largement la catégorie à plus de 90%.

Ces systèmes robotiques font appel à de multiples technologies : mécatronique, localisation, navigation, autonomie, perception acoustique, vision artificielle, analyse décisionnelle, commande / assistance au pilotage et interaction homme-robot, communication, énergie, électro-location, cartographie, *etc.* Certaines de ces tâches sont rendues plus complexes du fait des spécificités et de la variabilité du milieu d'utilisation (par exemple les communications, la localisation et la perception en milieu sous-marin).

## **4.2 Positionnement international, forces et faiblesse**

### **Atouts**

La France a un bon positionnement médian au niveau européen en termes de recherche et développement qui dépend cependant du sous-domaine et des applications visées.

Au niveau international, les États-Unis dominent largement les pays européens et extra-européens (Japon, Corée et autres pays asiatiques, Russie, Canada) avec une réserve sur le Canada et la Russie pour les sous-domaines aérien et sous-marin.

Au niveau industriel, la force de la France est d'avoir de multiples acteurs (dont des grandes entreprises) sur les sous-domaines aérien et naval. Pour les applications militaires, la France a cependant raté le rendez-vous industriel des mini-drones de la fin des années 1990, les utilisateurs opérationnels et prescripteurs n'ayant alors pas cru dans l'intérêt et le développement exponentiel des applications (à ce jour, le marché militaire est largement dominé par les États-Unis et Israël). Le positionnement sur le terrestre est plus sensible compte tenu du profil des acteurs (majoritairement des PME ou de petites équipes au sein de grands groupes) Et de même que pour le domaine militaire, on peut craindre que la France, malgré la reconnaissance internationale de sa technologie, réitère l'échec industriel des drones : les utilisateurs et prescripteurs nationaux restent en effet pour le moins prudents vis-à-vis d'une exploitation opérationnelle étendue des robots terrestres, et ne soutiennent donc que faiblement leurs industriels au-delà de contrats d'études exploratoires.

Un atout est également la qualité de la recherche académique qui est reconnue au niveau international et l'aide au développement apportée par la DGA, l'ANR et la DGCIS sur la partie prospective de ce domaine en général (le budget plus important en Europe à égalité avec le Royaume-Uni).

### **Faiblesses**

Sur le plan militaire, la faiblesse, en contrepartie, est le manque de programmes d'acquisition, seuls à même de passer à des étapes industrielles (notamment au niveau terrestre) et de générer des revenus stabilisant les entreprises concernées. Il est en effet à noter que sur ces technologies émergentes, la plupart des pays favorisent des stratégies d'acquisition dites "domestiques" (elles achètent à leurs industriels nationaux), sauf quand l'offre nationale n'est pas au rendez-vous du fait d'un transfert industriel peu anticipé et faiblement soutenu.

## **4.3 Principaux acteurs du domaine**

Les principaux acteurs du domaine sont des sociétés ou organismes qui participent actuellement à des développements d'équipement *via* des projets ANR et FUI, ou encore à des études exploratoires de la DGA (projets de type ASTRID, RAPID ou PEA).

### **Industriels :**

Terrestre : BVS, ECA, Effidence, EOS Innovation, Magellium, Robopec, Robosoft, Thales Optronics, Nexter Robotics, *etc.* Hormis Thales et Nexter, on peut noter que ces sociétés sont en majorité des PME d'innovation.

Aérien : Bertin, DASSAULT AVIATION, EADS-Surveycopter, Fly-n-Sense, Flying Robots, Infotron, Parrot, Sagem, Sirehna-DCNS, THALES TSA, *etc.* Les grandes entreprises couvrent toutes les catégories du mini au maxi-drone, les PME étant plutôt sur les domaines du mini et du microdrone.

Marin et sous-marin : Syrehna-DCNS, CYBERNETIX, ECA, SUBSEA TECH, ALCEN-ACSA, TECNALIA, CGGVeritas, *etc.*

### **Services, Exploitants :**

Ministères de l'Intérieur et de la Défense. IFREMER et EDF sur les sous marins, sociétés TECHNIP, SAIPEM, SUBSEA 7, SBM sur l'offshore, exploitants de drones aériens pour spectacles, traitement agricole, inspection d'ouvrages, *etc.* Pas d'exploitation industrielle ou de services sur le domaine terrestre (domaine restant exploratoire hormis dans l'armement et la sécurité)

### **Laboratoires de recherche :**

ISIR-UPMC, CEMAGREF, Heudyasic, IRCCyN, ISM, ONERA, LAAS, Institut PASCAL, LabSTICC, LIRMM, ISAE, I3S, INRIA (Rennes, Sophia-Antipolis, Grenoble), IFREMER, CEA LIST, *etc.*

On pourra trouver une liste complète à travers les inscriptions des laboratoires sur le site du GDR robotique. Plus particulièrement, un inventaire détaillé des laboratoires français impliqués dans la recherche robotique marine et sous-marine est disponible sur le site du GDR à la rubrique Documents Publics, GT2, année 2012 (une mise à jour sera disponible en 2013).

## **4.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, les points durs et défis**

Les principaux enjeux en termes d'innovation se situent sur :

- la mécatronique avec une complexité plus ou moins grande suivant le type de vecteur ;

- la navigation / perception en milieu ouvert sans GPS ou avec une hybridation sécuritaire avec le GPS (pouvoir s'en passer si absent) ;
- l'énergie : sur ce point, les systèmes robotiques bénéficient progressivement des retombées du domaine de l'automobile ;
- les communications : là aussi, les systèmes robotiques bénéficient progressivement des retombées du domaine des télécom avec des possibilités d'équipement pratiquement "sur étagère". Mais l'indisponibilité croissante de bandes spectrales adaptées (avec les portées et donc les puissances nécessaires aux applications de robotique d'intervention) rend impossible l'exploitation de ces solutions. La mise à disposition de fréquences par les pouvoirs publics serait un élément fondamental de progression des applications opérationnelles de ces systèmes robotisés ainsi que de réduction de leur coût ;
- les systèmes décisionnels et sûrs permettant d'introduire de réelles capacités d'autonomie ou de semi-autonomie ;
- Le développement de flottilles d'engins aériens, marins ou sous-marins.

Sur ce dernier point, les besoins des industriels peuvent être différents suivant l'application concernée. Par exemple une application civile dans l'agriculture ou le BTP aura besoin d'autonomie afin d'apporter un gain de productivité. Une application de surveillance / exploration civile aura besoin de semi-autonomie afin d'apporter un gain de productivité tout en gardant l'homme dans la boucle d'action. Concernant les applications Défense, le niveau décisionnel des systèmes dépasse largement les enjeux industriels de par son interaction forte avec l'éthique et les régimes de responsabilités, l'homme restant obligatoirement dans la boucle de décision à moyen terme.

#### **Vecteur terrestre :**

Dans le domaine terrestre, on retrouve les enjeux cités précédemment en mettant en avant les technologies de navigation / perception citées et l'aspect mécatronique. Cependant les enjeux en mécatronique sont très différents suivant les applications visées. Par exemple, ils sont très importants pour un vecteur terrestre rapide se déplaçant en environnement ouvert sur tout type de terrain. On peut notamment citer sur ce point le besoin de "perception active" couplé avec le système mécatronique. Les enjeux sur le décisionnel sont plus à moyen terme tout en mettant une priorité dans un premier temps sur la sûreté des systèmes.

De façon générale, le milieu est par nature complexe et implique une cohabitation étroite avec les Humains, volontaire ou subie. Ces éléments nécessitent des efforts conséquents sur la sécurité d'emploi et la fiabilité, mais aussi sur l'acceptation par l'Homme de cette omniprésence de la machine robotisée. Il n'est pas certain que les perspectives de retour sur investissement à court terme suffisent à motiver le secteur industriel à investir suffisamment pour traiter correctement ces aspects. Cela induit une spirale négative dans laquelle des matériels qui doivent être forcément bas coût, sont proposés avec un niveau insuffisant de performances ou de robustesse, ce qui induit une réaction négative des utilisateurs potentiels, donc freine la demande et tire d'autant plus l'offre vers le bas.

La reconnaissance de solutions robotisées passera d'abord par la création d'un socle technologique solide (des plates-formes robustes, des modes d'interaction Homme-Robot pertinents, une véritable réponse aux besoins des utilisateurs, etc.). Une approche "Techno-Push", c'est-à-dire uniquement fondée sur un attrait des utilisateurs potentiels pour la nouveauté technologique, n'est pas viable pour des usages omniprésents dans la vie quotidienne ou censée répondre au cœur de métier des

utilisateurs. La crédibilité de la Solution Robotique passe obligatoirement par une intégration du savoir-faire robotique dans un système acceptable au sens décrit précédemment (robuste, fiable, sécurisé, utile, etc.). Or, le tissu actuel des acteurs du domaine (voir § 4.4) est majoritairement constitué de laboratoires ou de PME innovantes qui cherchent à valoriser des thématiques prospectives indépendamment de leur intégration dans un ensemble technologique globalement cohérent.

Ces remarques s'appliquent à ce domaine de la robotique terrestre en milieux ouverts mais également d'une manière plus générale à des applications déjà bien identifiées et dont l'intérêt commercial est confirmé (assistance aux personnes, surveillance, etc.). Or, il reste vraisemblablement un potentiel applicatif énorme pour la Robotique dont il convient de poursuivre l'identification. Aucune analyse de marché, aussi sérieuse et approfondie soit-elle, ne peut fournir cette analyse avec un degré de certitude suffisant pour convaincre prescripteurs et investisseurs ; par contre, les start-up ont indirectement cette capacité à "tâter le marché" en lui proposant tel ou tel produit, et ainsi contribuer à alimenter une étude de marché à grande échelle (en plus de sensibiliser les utilisateurs potentiels). Il apparaît ainsi opportun de favoriser la création massive de start-up innovantes, en leur apportant ensuite le soutien qui leur permettra de se reconfigurer à effort réduit en cas d'impasse sur la piste explorée.

### **Vecteurs aérien**

Les enjeux à considérer dépendent pour beaucoup du segment considéré. Il n'est pas nécessaire de prendre compte au premier abord la consommation électrique d'une carte électronique sur un avion de ligne alors qu'il est essentiel de la considérer pour le transistor supplémentaire d'un microdrone.

Dans le contexte de l'aéronautique, les enjeux sont le plus souvent liés à la problématique de décision dans les systèmes complexes. Cela ne signifie pas que les développements en mécanique ou sur les fonctions capteurs n'intéressent pas les industriels, mais simplement que le marché est très segmenté et que la plupart du temps, les parties capteurs et actionneurs sont livrées à un ensemble de sous-traitants plus ou moins importants. Dans le contexte de l'avion de combat, par exemple, la société THALES TSA est un sous-traitant majeur. On constatera que tous les enjeux engagent la capacité à mixer des engins artificiels et les décisions qu'ils peuvent prendre avec des humains soit en contrôle (quel que soit son niveau), soit en coopération :

- avions dans un contexte de combat sans pilote à bord ;
- avions dans le contexte civil où l'on diminuerait l'exigence sur le nombre de pilotes ;
- intégration dans le contexte fortement automatisé du prochain ATM ;
- aide aux opérations dans le contexte civil des avions de ligne ou d'affaire ;
- mise en place d'une décision en ligne dans les avions sans pilote à bord.

Beaucoup de travaux dans le domaine de la décision ont atteint un haut niveau de maturité mais n'arrivent pas à passer chez les industriels majeurs. Cela est dû pour beaucoup à la difficulté d'intégration de ces technologies qui ne répondent à aucun standard en termes d'interface, ce qui est maintenant la condition *sine qua non* de création d'un marché. Le risque fort est que ce standard soit imposé par d'autres pays ou régions, ce qui entraînerait la disparition ou la difficulté d'exister d'une industrie nationale proprement robotique de service. En outre, l'utilisation par les grands industriels de ces standards serait liée à des produits non maîtrisés en France.

## **Vecteur marin et sous marin**

Les acteurs industriels de ce vecteur ont historiquement axé leurs développements sur des véhicules, souvent de plusieurs tonnes, pour des missions d'intervention ou de surveillance, dans un contexte civil ou de défense.

Le développement continu en matière de miniaturisation de capteurs, d'informatique embarquée, de systèmes de communication, ouvre toutefois la voie vers des dispositifs plus légers, et donc plus facilement déployables, permettant une dissémination plus large. Par ailleurs, le contexte général, en particulier au niveau européen, tend à faire émerger des domaines d'exploitation nouveaux présentant un fort enjeu sociétal : gestion et protection de la ressource halieutique, détection de polluants, observation et monitoring de paramètres physico-chimique liés aux sciences du climat et à la dynamique des océans, sur des échelles spatiales et temporelles importantes (voir par exemple le programme européen GMES *Global Monitoring for Environment and Security* ou les programmes de surveillance des Aires Marines Protégées).

Dans le domaine marin, on retrouve les enjeux cités précédemment en mettant en avant les technologies de perception / navigation. Un point essentiel concerne la prévention des abordages et la sécurité qui pour l'instant, en l'absence de législation définissant les règles à suivre et les responsabilités de chacun, constitue un frein dans l'industrialisation de systèmes complètement autonomes (en dehors des utilisations militaires). Sur l'aspect sous-marin, les problématiques de perception / navigation diffèrent complètement du terrestre et de l'aérien, ou même du marin, que ce soit pour les applications autonomes ou semi-autonomes. La perception et la localisation sont rendues difficiles notamment par l'impossibilité d'utiliser des ondes électromagnétiques sous la mer, par la variabilité de la vitesse de propagation du son en fonction de la pression et de la température (réfraction, trajets multiples), par la turbidité (systèmes de vision artificielle). Les défis à relever concernent l'amélioration de la précision des déplacements et de la localisation des véhicules, la perception et la modélisation de l'environnement (avec l'émergence de nouveaux systèmes acoustiques ou laser à haute résolution), la mise en place de flottilles d'engins sous-marins permettant d'accélérer l'exploration d'une zone ou de percevoir simultanément les aspects temporels et spatiaux d'un phénomène et enfin, l'autonomie décisionnelle du véhicule (pour diminuer les risques de perte). Sur ce dernier point, on notera le contexte particulier du milieu d'évolution : grande variabilité des conditions d'exploitation (surtout en surface), zones géographiques à couvrir très larges, missions pouvant être étendues à plusieurs jours voire plusieurs mois.

Concernant les applications offshores, il est important de noter que l'industrialisation de robots sous-marins plus autonomes ne pourra se faire qu'en partenariat / concertation avec les industries pétrolières étant donné leurs très fortes réticences (justifiées par les coûts élevés d'immobilisation des installations) à abandonner des systèmes plus rudimentaires, mais dont les performances sont garanties. L'industrie pétrolière et l'armée sont les principaux utilisateurs de robots sous-marins. On peut penser aussi que l'essor actuel des fermes d'éoliennes offshores et d'hydroliennes fournira, au cours de la prochaine décennie, des débouchés industriels nombreux pour les technologies sous-marines robotisées et automatisées de maintenance.

## **4.5 Potentiel recherche : les avancées et prospective de recherche**

Là encore il est nécessaire de distinguer les domaines.

## Aérien

Dans ce cadre, il existe un syndicat français regroupant la majorité des industriels institutionnels du domaine (GIFAS : Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales). Pour l'instant, les TPE et PME de la robotique (mini et microdrones) y sont très peu représentées, ce qui se traduit par l'absence d'un groupe spécifique de cette problématique, mais le GIFAS est très certainement le bon moyen de fédérer l'activité de recherche issue du monde industriel.

Dans le contexte de l'aéronautique, une partie de la recherche se fait au niveau européen. L'action actuelle la plus marquante reste le JTI Clean Sky (un PPP entre la Commission européenne et l'industrie aéronautique visant à réduire l'impact du transport aérien sur l'environnement). Il est à remarquer que la problématique de la décision n'y est pour l'instant pas incluse en tant que telle mais est répartie dans les différents domaines concernés (par exemple : ATM, opérateurs de drones, etc.).

Au niveau français, il existe depuis longtemps l'ONERA. Du point de vue des opérations, l'ENAC représente la partie recherche de la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile). Il est à noter que cette école est à l'origine de l'OS / framework embarqué PAPAZZI.

Au vu des enjeux précisés plus haut, voici une liste des actions de recherche. On constatera qu'il n'y a pas de demande de ce secteur sur des aspects plus systèmes dans la mesure où des industriels majeurs (par exemple Dassault Systèmes) font déjà de la recherche dans le domaine des outils de conception et de modélisation et que, pour les aspects proprement plate-forme, la recherche et le développement se font le plus souvent en interne ou de façon très ciblée directement de l'industriel à l'organisation concernée.

- Ce qui touche à la perception / action : les méthodes d'asservissement visuel sont maintenant à un niveau de maturation permettant d'envisager leurs déploiements dans des avions. On commence à quitter le domaine de la faisabilité pour attaquer le domaine du prototype dans des cadres applicatifs (par exemple l'atterrissage). Il reste néanmoins à introduire de nouvelles modalités et, notamment, la prise en compte de l'imagerie radar.
- Ce qui touche à la décision : le problème porte maintenant sur la collaboration entre les différentes technologies décisionnelles. Outre les objectifs de standardisation, il s'agit d'agencer ces technologies pour implémenter des boucles de décision - aux trois niveaux engin, groupe, dispositif - qui soient cohérentes. Dans ce cadre, il est nécessaire de valoriser le travail déjà fait et d'amener à la création de filières technologiques. Il est nécessaire de considérer que l'insertion de la boucle décisionnelle dans le milieu social constitué d'humains est un point fondamental dans cette mise en place des technologies.
- Ce qui touche à la conception des systèmes décisionnels : actuellement, une des premières difficultés d'acceptation des technologies décisionnelles est l'absence de définition de la complexité des technologies, de leur déterminisme, ainsi que l'absence d'auto-évaluation permettant de basculer vers des solutions tierces. Cela constitue l'un des points durs qui pour l'instant est peu considéré et n'intéresse d'ailleurs pas réellement la communauté au sens large (on peut souligner les travaux en cours au LAAS sur le sujet).

## Terrestre

On retrouve, à un niveau plus prospectif, les besoins en navigation / perception en milieu ouvert et notamment des notions de perception active citées précédemment au niveau des enjeux industriels. Les travaux de recherche sur les systèmes décisionnels et la capacité de décision en assistance à

l'homme pour améliorer la productivité / efficacité et la sûreté des systèmes sont également une priorité.

Comme déjà indiqué, l'environnement terrestre se caractérise par une grande complexité intrinsèque (notamment vis-à-vis de la mobilité) et une proximité omniprésente de l'Homme et du Robot (imposant Sécurité, Fiabilité, Acceptabilité, etc.).

De nombreux challenges relèvent du domaine académique, mais demeurent insuffisamment ou pas traités car "passés de mode" ou jugés de peu d'intérêt scientifique : la navigation sûre en milieu naturel non structuré (et notamment l'évitement des obstacles de tous types) constitue l'exemple le plus représentatif, mais il en existe bien d'autres. Ainsi, le SLAM qui a alimenté la communauté R&D pendant de nombreuses années est en train de subir le même abandon, alors qu'un fonctionnement réellement robuste et crédible en situations représentatives est loin d'être garanti.

La maturité atteinte est souvent insuffisante pour convaincre les industriels de prendre le relais et réaliser le transfert correspondant. Ce constat n'est pas propre à la Robotique mais, du fait du caractère très appliqué de ce domaine, on pourrait souhaiter que le monde académique ait les possibilités d'accompagner sa production un pas plus loin...

### **Marin et sous marin**

Les perspectives de recherche en robotique navale concernent tout d'abord les modes de propulsion (vent, houle) et les lois de commande associées. Les voiles deviennent rigides, segmentées. Les navires doivent pouvoir résister à de très mauvaises conditions au cours d'une mission longue. En marge de la robotique, un effort de recherche important concerne également la technologie des capteurs physico-chimiques embarqués dans la mesure où ce sont eux qui limitent la durée de la mission (nettoyage et recalibrage nécessaires). Enfin, le défi le plus important concerne la détection et l'évitement (garanti) des obstacles et des autres navires (dont les déplacements sont imprévisibles). Cette détection est rendue plus difficile par le fait que les USV sont souvent bas sur l'eau, ce qui réduit leur champ de perception, particulièrement lorsque la mer est formée. L'existence d'un défi transatlantique (Microtransat) stimule actuellement les équipes de recherche internationales et devrait permettre dans les années qui viennent de voir réaliser la traversée de l'Atlantique à la voile en totale autonomie. La France est un des leaders dans ce domaine.

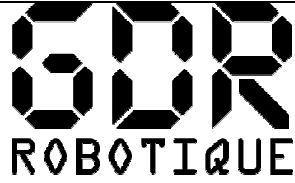
En robotique sous-marine, parmi les défis importants, on trouve toujours la perception de l'environnement (avec l'émergence de nouvelles méthodes telles que l'électro-location) et la localisation (SLAM, suivi et mosaïking de paroi, cartographie par AUV). Bien qu'étudiés depuis plusieurs années, ces problèmes n'ont toujours pas trouvé de solutions fiables du fait de la faible densité d'informations fournies par les capteurs et de la difficulté à trouver des amers fiables.

La caractérisation automatique des cibles (essentiellement l'identification des mines mais aussi la détection de nageurs de combat) est, elle aussi, toujours un problème d'actualité. Les résultats progressent notamment du fait des progrès technologiques dans les dispositifs de perception et notamment par l'utilisation de sonars d'imagerie dynamique 2D ou 3D (baptisés "caméras acoustiques"), mais la détection n'est pas encore totalement fiable et les fabricants de mines adaptent leurs matériels pour contourner les méthodes développées. Ce sujet de recherche représente aussi un enjeu industriel important dans la mesure où la France est leader mondial pour les robots chasseurs de mines (ECA) et que la guerre des mines est une des principales applications des robots sous-marins dans le milieu militaire.

L'autonomie décisionnelle est également un sujet essentiel, avec pour objectif de renforcer la sécurité des missions et du matériel. En lien avec l'autonomie et la fiabilisation des véhicules, l'adaptativité de la commande demeure aussi un thème de recherche d'actualité compte-tenu de la variabilité de l'environnement, de la reconfigurabilité des matériels (ajouts de capteurs), et de la modification volontaire ou non de la masse (emport/largage d'échantillon) ou de la traînée (traînée parasite, câble, plastique, algue, etc.). L'émergence de véhicules hybrides (AUV se transformant en ROV/AUV en reconfigurant leurs actionneurs sur site) va poser d'intéressants problèmes de commande dans les phases de transition. Les mini-ROV (moins de 30kg) posent également des problèmes de commande intéressants en raison d'un rapport poids/puissance inhabituel.

Enfin, la gestion d'une flottille de véhicules, baptisée "meute", est un sujet important particulièrement en ce qui concerne la gestion des communications et le positionnement. Les solutions de communication sous-marine par acoustique se révèlent incompatibles avec la vitesse et la "zéro latence" imposées par la dynamique et la quantité d'informations transitant par la meute. Ces développements nécessitent donc des avancées sur les solutions haut débit de type optique par exemple. Actuellement au stade de la simulation en France, il faudrait arriver au stade des expérimentations pour rattraper les équipes internationales. La mise en œuvre de flottille reste néanmoins très lourde et, hormis IFREMER et certains industriels du domaine militaire (Thalès, DCNS), aucun laboratoire ou organisme français ne dispose actuellement des moyens matériels nécessaires. Des collaborations industrielles et un soutien financier étatique ou européen sont souhaitables si l'on souhaite réaliser des expérimentations de ce type.

Il est intéressant de noter qu'en collaboration avec les laboratoires, plusieurs industriels poursuivent des travaux de recherche très innovants et parfois très audacieux dans les domaines de la navigation en meute, du positionnement, de la conception mécanique (Thalès, CGGVeritas, ACSA, Tecnia, Subsea Tech, etc.). La collaboration entre les laboratoires et les industriels doit cependant être renforcée. Cela constitue un des objectifs de l'axe "robotique marine et sous-marine" créé en 2012 au sein du GT2 du GDR Robotique.



## 5.1 Présentation générale du domaine

Dans beaucoup de secteurs industriels, la production est aujourd'hui largement automatisée. Les progrès réalisés par les technologies, lors du dernier siècle, déchargent l'homme des tâches répétitives et pénibles.

Le robot est un instrument polyvalent et flexible qui rend les installations plus adaptables à la demande. Les robots industriels se classent principalement dans les types suivants :



Poly-articulé



Scara



Parallèle



Mobile (AGV)

Au départ utilisé par les lignes de production de l'industrie automobile, le robot rencontre aujourd'hui un vif succès dans de nombreux secteurs industriels, où la compétitivité de la production est une condition de succès essentielle. De fait, les ventes mondiales de robots ont doublé depuis 1990, pour se rapprocher de la barre du million d'unités commercialisées annuellement. Avec la diversification des applications, le secteur automobile ne représente plus désormais que 40 % des ventes en Europe.

L'augmentation des volumes commercialisés se conjuguant avec la concurrence des constructeurs et l'évolution des technologies, le coût des robots a baissé de moitié depuis 1990 en France alors que, dans le même temps, les coûts de la main-d'œuvre y augmentaient de 40 % (données SYMOP<sup>2</sup>).

Du point de vue fonctionnel, si la manutention reste encore la principale tâche confiée au robot, la voie est désormais largement ouverte aux utilisations à plus forte valeur ajoutée, telle que la robotisation des procédés de production, comme par exemple : le soudage, l'assemblage, la peinture, l'usinage et le parachèvement. Inversement, la recherche de nouveaux débouchés pour les robots manufacturiers a permis l'apparition de robots à programmation intuitive, peu coûteux (parce que moins performants), dédié aux PME. A titre d'exemple, on citera le robot Universal Robot qui conquiert depuis deux ans de nombreux marchés.

<sup>2</sup> Syndicat des entreprises de technologies de production, <http://www.symop.com/fr/>

Cependant bon nombre de tâches restent encore complexes et continuent de requérir les facilités gestuelles de l'être humain. Ainsi, de nouveaux types d'applications se développent désormais pour lesquelles l'homme travaille en coopération étroite avec le robot. Les concepts de robots sans barrières qui facilitent grandement l'efficacité opérationnelle des installations font partie de cette logique de coopération homme / machine. Les développements réalisés par les grands constructeurs et l'évolution des réglementations sont tels que l'on peut désormais prévoir l'élargissement de la diffusion de ces robots sur le marché européen, où ils devraient favoriser l'apparition de nouveaux usages en production.

Enfin, l'année 2011 a vu l'apparition de la cobotique en industrie (pour robotique collaborative) qui permet de mettre à disposition de l'opérateur, un bras articulé multipliant les efforts à réaliser tout en laissant à l'opérateur le pilotage du procédé, alliant ainsi flexibilité et protection des travailleurs.

## 5.2 Positionnement international, forces et faiblesses

Les PME / PMI françaises restent clairement sous équipées en robots manufacturiers vis-à-vis des entreprises étrangères (notamment l'Allemagne et l'Italie). En effet, là où l'Allemagne dispose de ~145 milliers de robots installés, l'Italie en compte 65 et la France 33. Cette sous-automatisation grève la compétitivité de nos entreprises. De plus, notre pays se prive de la création d'emplois à forte valeur ajoutée qui accompagne généralement la mutation des entreprises suite à l'intégration de cellules robotisées. Ce constat unanime est régulièrement réaffirmé par l'IFR<sup>3</sup>.

## 5.3 Les principaux acteurs du domaine (laboratoires et entreprises)

Les principaux acteurs du domaine sont :

- Industriels : de grosses entreprises étrangères comme ABB, KUKA, FANUC, ADEPT, YASKAWA, REIS, *etc.* En France : STAUBLI, SEPRO ROBOTIQUE, BALYO, BA SYSTEMS, RB3D, ALCI, *etc.*
- Académiques ou assimilés : CETIM, TECNALIA, CEA LIST, Institut Pascal, IRCCYN, LIRMM, FEMTO-ST. En Allemagne : Fraunhofer (IPA, IPK), *etc.*

## 5.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, les points durs et défis

Les PMI / PME offrent un potentiel important de développement pour les robots manufacturiers. Les enjeux en termes d'innovation industrielle se situent à différents niveaux et d'une manière générale, on peut isoler les thématiques suivantes :

- La collaboration homme-robot : en assistance au geste (cobotique), en interaction intermittente (concept du co-worker) et *via* un exosquelette ;
- La robotique comme outil de production plus flexible comprenant des robots facilement déplaçables et reconfigurables (pour les petites séries des PME / PMI) alliant précision, répétabilité et facilité d'utilisation, capables d'intégrer les contraintes métier comme l'usinage (pour des pièces de grandes dimensions), le micro-assemblage (pour des pièces de petites dimensions), voire le micro-usinage ;
- La robotique mobile (AGV) équipée des moyens précédents (collaboration, usinage, manutention par bras), pour des opérations de logistiques plus avancées et permettant de se repérer facilement dans un contexte industriel hybride (homme – machine).

---

<sup>3</sup> IFR: International Federation of Robotics ([www.ifr.org](http://www.ifr.org)). Voir notamment le sommaire du rapport annuel 2012 sur [http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive\\_Summary\\_WR\\_2012.pdf](http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive_Summary_WR_2012.pdf)

## Collaboration homme-robot

La mise en place de poste de travail collaboratif (homme-robot ou cobot), permet d'augmenter la flexibilité, la polyvalence, voire la précision de l'outil de fabrication. Ceci favorise les gains de productivité (réduction du coût de la main d'œuvre) tout en maîtrisant la sécurité dans les différentes phases d'utilisation (exploitation, réglage, entretien) et la réduction des surfaces au sol (espace de sécurité demandé plus restreint).

Cela améliore les conditions de santé au travail, l'ergonomie des postes étant facilitée par la prise en charge par le robot (ou cobot) des manipulations répétitives ou pénibles. Ces conséquences ont des répercussions à plusieurs niveaux : gains de production, diminution des arrêts de travail, diminution de la pénibilité, augmentation de l'intérêt attribué au travail par l'opérateur, flexibilité dans le choix de l'opérateur (accès à de nouvelles tâches pour le personnel féminin ou vieillissant). La reconnaissance de la pénibilité de certains travaux va encourager le développement de solutions de ce type et permettra par ailleurs un gain de productivité considérable par la requalification de certains postes sur lequel les industriels connaissent des difficultés de recrutement, de coûts de formation, sans pour autant avoir les moyens, dans un contexte de compétition mondiale, de valoriser ces postes.

Enfin ce peut être un frein à la délocalisation (*cf.* à ce propos l'initiative Robocalisez<sup>4</sup>) : effectuer certaines tâches par ce type de robots dans les PME / PMI permettrait d'éviter la délocalisation des entreprises françaises vers les pays à bas coût de main d'œuvre, voire possiblement la relocalisation de productions. Les solutions robotisées permettent une stabilisation du processus (reproductibilité) et ont un impact majeur sur la qualité de production en imposant une haute maîtrise des procédés. Cela est particulièrement intéressant pour le micro-assemblage robotisé pour lequel seul le geste robotisé est à même d'atteindre les précisions micrométriques requises. Ce niveau est d'autant plus pertinent que les robots mis en place bénéficient d'une plus grande interaction avec l'opérateur et donc d'une plus grande flexibilité à s'intégrer au processus de fabrication des petites PME / PMI.

## Robotique en tant qu'outil de production plus flexible

La mise en place de robots facilement déplaçables (notamment pour les pièces de grandes dimensions) et / ou reconfigurables aisément est une réponse en termes de retour sur investissement pour les PME / PMI qui doivent traiter des petites séries de pièces très diverses (dans le travail demandé), de manière rapide, précise, répétable et avec une qualité suffisante. Le succès de l'intégration des robots dans les petites structures tient cependant à une approche projet multidisciplinaires comprenant la stratégie industrielle, la compréhension mutuelle de la problématique avec l'intégrateur, l'ingénierie des compétences et un modèle économique adapté (voir les résultats du projet européen SMERobot<sup>5</sup>).

Les robots de process offrent de plus l'avantage de pouvoir effectuer certaines opérations directement sur les lignes de fabrication, offrant ainsi un gain en évitant de manipuler, transporter la pièce en dehors de la ligne de fabrication. Les deux cumulés permettraient par exemple d'avoir des cellules d'usinage qui s'adaptent à la pièce selon sa taille, évitant d'avoir recours à des machines de très grandes tailles pour de grandes pièces et dont la rentabilité peut poser problème. Différents

---

<sup>4</sup> Robotcaliser : Robot-iser pour ne pas délo-caliser. Initiative des constructeurs de robots industriels et du SYMOP <http://www.robotcaliser.com/>

<sup>5</sup> Pour plus d'informations voir : [www.smerobot.org](http://www.smerobot.org)

robots travaillant ensemble pourraient aussi permettent de diminuer les temps d'opération (usage par exemple) sur une pièce de grande dimension.

### Robots mobiles

Les enjeux se situent au niveau de solutions de manipulation, de stockage, déstockage de produits plus ou moins volumineux qui peuvent s'adapter à des environnements industriels hybrides (homme-machine), et offrent l'avantage de pouvoir travailler de manière flexible, avec une optimisation des ressources disponibles, un gain de productivité et une optimisation des ressources. Un lien direct avec une augmentation de la sécurité durant ces différentes phases engendre des coûts et arrêts de production minimisés. Si ce type de robots peut être équipé de moyens de collaboration avancés (bras) pour la manipulation et l'usinage, ils cumulent les avantages cités précédemment.

### Points durs et défis

- Au niveau de l'évitement de collisions (et / ou limitation des dommages) entre le bras ou des parties du bras et la ou les personnes à proximité : plus l'opérateur doit travailler près du robot, plus la capacité de détection et de réaction du robot doit être optimisée afin de garantir sa sécurité. Cela passe par la finesse de détection et / ou la prédiction des intentions pour assurer un comportement sûr du robot (arrêt, reprogrammation de trajectoire, absorption de l'énergie). Cette détection doit s'effectuer de manière sûre et fiable (quel que soit le milieu industriel), elle doit aussi s'implémenter aisément sur les systèmes existants et être reconfigurable facilement en fonction des besoins de flexibilité demandée. Il faut développer des technologies de vision et de peau sensible (alliant détection de proximité et de contact), certifiées en tant que composant de sécurité. Il faut aussi concevoir des structures sûres de type "exosquelette" pour aider l'opérateur pendant toutes les phases de manipulation ;
- Assurer la diffusion des nouvelles technologies de la robotique par la structuration de réseaux (CARSAT, INRS, etc.) à même de mieux faire connaître ces solutions. Des actions de démonstration au plus près des bassins d'emploi (*via* les pôles de compétitivité) pourraient aussi être envisagées ;
- Au niveau des robots usineurs, avec création de nouvelles architectures alliant parallèle et polyarticulé, et permettant une meilleure précision d'usinage : permettre la prise en compte des déformations de pièces, les intégrer et limiter les vibrations. Pour augmenter la précision d'usinage, améliorer le pilotage des axes par un asservissement lié au point terminal et non à la détection de position de chaque axe. Pour les pièces de grandes dimensions, avoir des références permettant de situer le (ou les robots) autour de la pièce de manière précise et ainsi continuer un travail d'usinage précédemment commencé à d'autres positions. Communication entre robots ou d'autres machines vis-à-vis des tâches à effectuer ;
- Concernant le micro-assemblage robotisé, le déploiement de solutions de cobotique nécessite l'étude de lois de couplage adaptées aux spécificités des micro-nanomondes (fort gain d'amplification, rapport signaux sur bruit défavorable) ;
- Au niveau des AGV, développer les fonctions de navigation par vision (reconstruction 3D), d'optimisation de la circulation sur les sites, de communication sûre avec les autres robots ou machines quel que soit l'environnement industriel ;
- Assurer le fonctionnement sûr de robots poly-articulés embarqués sur ces robots mobiles. Construire des moyens de localisation, détection à partir de capteurs "bas coût" tout en garantissant une robustesse et une fiabilité de l'information.

## 5.5 Potentiel recherche : les avancées et prospectives de recherche

Plusieurs laboratoires développent des recherches qui contribuent au développement de la robotique manufacturière, en particulier le LIRMM, l'IRCCyN et l'Institut Pascal, auxquels s'ajoutent des structures mixtes recherche / industrie (CEA, Tecnalía, CETIM). Des avancées significatives ont été apportées dans le domaine de la modélisation (flexibilités, couplage robot / process), de l'identification (paramètres dynamiques en particulier), de la commande (commande par vision par exemple) et de la conception (nouvelles architectures cinématiques, conception robuste). Les perspectives de recherche concernent les axes suivants :

### Méthodologie de conception

Le contexte du développement durable impose au concepteur de tenir compte du cycle de vie complet du produit, prenant en considération les coûts liés à la fabrication, à l'utilisation, à la maintenance et au recyclage. La conception de robot devra à l'avenir davantage s'inscrire dans une démarche d'éco-conception. Pour les applications de robotique manufacturière, cette démarche passe par la recherche de solutions moins gourmandes en énergie : recherche de cinématiques intrinsèquement plus rigides et plus légères au stade de la conception préliminaire, équilibrage statique et dynamique des structures, actionneurs moins énergivores, matériaux plus légers, moins coûteux à mettre en œuvre, et plus facilement recyclables. En microrobotique, l'exploitation de modes de transmission de puissance originaux (matériaux actifs, actionnement à distance) nécessite la définition de nouvelles méthodologies de conception et d'optimisation des architectures de robot. En robotique médicale et d'assistance, le cahier des charges ne se limite pas à l'énoncé d'exigences fonctionnelles objectives. La forme et l'apparence du robot jouent un rôle très important. On parle d'acceptabilité : le patient ne devra pas être effrayé par le robot. On doit jouer sur des aspects touchant à la perception et à l'émotionnel. Pour le concepteur, il s'agit de prendre en considération des critères subjectifs, en plus des traditionnels critères objectifs qui évaluent les performances du robot. La difficulté est de savoir comment évaluer de tels critères subjectifs liés au facteur humain, et comment les prendre en compte dans la boucle de conception. Des solutions pourront être trouvées en se tournant vers la communauté des sciences sociales voire des sciences de la vie (psychologie cognitive), mais aussi vers la communauté qui travaille sur les problématiques de "conception orientée-client" et qui s'appuie sur des techniques d'analyse sensorielle pour concevoir un produit adapté. Dans le domaine de la robotique manufacturière, l'approche visant à satisfaire le client peut aussi favoriser l'industrialisation de nouvelles architectures de robots prometteuses, mais qui se heurtent à de fortes réticences d'utilisateurs habitués à des architectures "conventionnelles" de robots.

De façon plus générale, il sera utile de s'appuyer sur des approches de conception multi-objectifs et multi-disciplinaires. De multiples critères doivent être pris en compte au cours de la conception d'un robot. Ces critères relèvent de disciplines différentes, telles que l'étude des matériaux, la mécanique des milieux continus, la théorie des mécanismes, la physique, la cinématique et la dynamique du solide, l'électrotechnique, l'informatique, la commande. La conception multi-objectif permet de fournir un ensemble de solutions dites Pareto-optimale, parmi lesquelles le concepteur pourra choisir plusieurs alternatives qu'il confrontera en fonction de contraintes ou autres critères difficiles à prendre en compte dans le processus de conception. La conception multi-disciplinaire permet de prendre en compte au mieux, dans la boucle de conception, les contraintes et critères liés à chaque discipline, ceux-ci pouvant être conflictuels ou créant des dilemmes. La garantie des performances et la sûreté de fonctionnement passent par une démarche de conception robuste. Celle-ci doit chercher

à minimiser les sensibilités aux erreurs ou aléas de fonctionnement. Le domaine de la conception robuste existe depuis longtemps mais reste encore trop peu appliquée en conception de robots. Or, on sait par expérience que de faibles écarts dans les paramètres géométriques ou de faibles jeux dans les articulations peuvent conduire à des chutes radicales de performances, pouvant même rendre le robot incontrôlable.

Enfin, la conception robotique bio-inspirée va tout naturellement se développer. La nature propose souvent des solutions très intéressantes pour certaines applications. On pense par exemple aux extraordinaires performances dynamiques et de dextérité de certains animaux (nage du poisson, course de certains félins, manœuvrabilité des vers ou encore des trompes d'éléphant, performances de manipulation des fourmis).

La conception robotique bio-inspirée, voire bio-compatible, trouvera aussi des applications dans le domaine de la micro, meso ou nanorobotique. En ce qui concerne la conception de robots modulaires et reconfigurables, de récents résultats ont montré tout l'intérêt de s'inspirer des structures cristallographiques pour proposer un cadre formel de synthèse topologique s'appuyant sur la théorie des groupes réticulaires. Gageons que cette voie prometteuse sera développée dans les années à venir.

### **Architectures robotiques du futur**

Les besoins toujours plus exigeants de la robotique obligent à améliorer constamment les performances des robots. Dans certains cas, des sauts technologiques seront nécessaires. La définition d'une architecture adaptée revêt une importance capitale. Dans le domaine de la robotique manufacturière, l'amélioration des performances doit passer par la recherche d'architectures cinématiques nouvelles. Les progrès sensibles en analyse numérique et calcul formel pour le traitement des équations permettront de manipuler des modèles complexes jusqu'alors interdits. On pense aux architectures de robots parallèles, dont la complexité des modèles géométriques et la difficulté à identifier les singularités freinent encore trop souvent leur déploiement en se limitant à quelques architectures bien maîtrisées. On pense aussi à la mise au point de modèles de raideurs plus réalistes, qui doivent permettre de concevoir des architectures de robots plus légers et donc moins dangereux et plus facilement transportables. Les nouveaux besoins en construction aéronautique et navale demandent de concevoir des architectures pouvant travailler sur de très grandes structures et souvent très encombrées. Les robots actuels, même si de grands progrès ont été faits, ne permettent pas de répondre à ces besoins de manière satisfaisante. Il faut envisager des architectures radicalement différentes : robots hybrides comportant une structure articulée fixée sur une base mobile, robots grimpeurs pouvant se déplacer directement sur les structures, robots à câbles offrant un vaste espace de travail et un encombrement réduit. De nombreux verrous freinent encore le développement de ces technologies émergentes. Plusieurs projets ANR ont démarré récemment sur ces nouvelles solutions. Dans le cadre de la robotique de micro-assemblage, de nouveaux types de robots exploitant des transmissions de puissance par force à distance voient le jour. Ils permettront de manipuler à grande vitesse des nano-composants afin de réaliser de manière fiable des nano-capteurs. Ces robots d'un nouveau type nécessitent des études d'optimisation de leur architecture. Une autre voie intéressante s'ouvre dans le domaine des robots modulaires et reconfigurables. Pour répondre aux besoins croissants d'adaptabilité et de flexibilité, il s'agit d'imaginer des architectures et des éléments de robots pouvant s'adapter facilement (voire automatiquement) à des changements de tâches, de conditions de travail ou d'environnement. Le robot peut changer sa morphologie en fonction de son environnement par le biais de modules

qui peuvent s'assembler de multiples façons. Le robot peut aussi être construit spécifiquement en fonction de l'environnement où il va évoluer à partir de modules standards. La modularité mécatronique ne suffit alors pas: il faut disposer de méthodologies permettant de déterminer les arrangements conduisant aux meilleures performances ou au meilleur ratio coût / performances.

Les architectures de robots hyper-redondants sont encore relativement peu développées mais offrent pourtant des perspectives très intéressantes, tant en robotique manufacturière que médicale. La multiplication d'articulations permet en effet au robot de manœuvrer dans des environnements très encombrés. Les verrous actuels sont liés au coût de développement, à l'encombrement et à la complexité de la commande. On se souvient des projets pionniers d'architectures de type "trompe d'éléphants" des années 80, très vite abandonnés. Le développement de telles architectures passe par la miniaturisation des actionneurs, le recours à des articulations flexibles et la mise en œuvre de systèmes sous-actionnés (voir axe "Constituants technologiques innovants et actionneurs intégrés").

Les architectures existantes d'exosquelettes et plus généralement de systèmes d'assistance aux gestes et mouvements, sont encore lourds et encombrantes, même si des progrès sensibles ont été réalisés ces dernières années (à l'image du projet ABLE du CEA). Des efforts doivent être entrepris pour mieux les adapter au corps humain et tendre vers des architectures de "robots portables" (au sens des vêtements, les anglo-saxons parlent de "wearable robots"). La recherche de meilleures architectures robotiques pour la réalisation de robots humanoïde est également un sujet à développer. Les futures robots "orientés humains" devraient être sûrs et capables d'éviter tout impact avec leur entourage. Par exemple, de nouvelles solutions technologiques à base d'actionneurs antagonistes pour la compliance passive et active pourront aussi être proposées. Enfin, l'étude d'effecteurs intelligents et de mains artificielles passe par la recherche de nouvelles architectures plus performantes.

### **Constituants technologiques innovants**

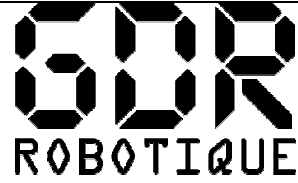
Les constituants technologiques sont les "briques" élémentaires nécessaires à la réalisation des robots : éléments de structure, actionneurs, capteurs, cartes de commandes, articulations, systèmes de transmission des mouvements, éléments de connexion commandables, alimentation électrique (transport ou stockage d'énergie).

Les deux axes précédents mettent clairement en évidence que certaines architectures robotiques du futur ne pourront pas voir le jour si des progrès sensibles ne sont réalisés sur ces constituants. Les améliorations doivent concerner prioritairement :

- la miniaturisation des composants ;
- l'augmentation du rapport puissance / masse des moteurs et actionneurs ;
- l'abaissement de la consommation énergétique, voire la production d'énergie;
- la discrétion acoustique et magnétique des actionneurs ;
- les systèmes d'actionnements intégrés ;
- la recherche de l'utilisation de nouveaux matériaux ;
- les possibilités de communication visant à intégrer le robot dans un ensemble de systèmes ouverts échangeant des informations ;
- les coûts de réalisation.

Concernant les trois premiers points (miniaturisation, augmentation du rapport puissance / masse, consommation énergétique), les moteurs non magnétiques de type piézo-électriques et ultrasoniques sont des solutions intéressantes pour certaines applications (contrôle de vibrations) mais ne sont pas encore prêtes pour un usage à grande échelle. Le recours à des technologies d'actionneurs non électromécaniques (alliages à mémoire de forme, conversion directe de l'énergie chimique en énergie mécanique) sont des voies également intéressantes mais qui souffrent encore de nombreux défauts liés à la réactivité, à la sécurité ou la commande.

Les articulations flexibles sont des solutions intéressantes pour diminuer l'encombrement des articulations passives pour les architectures à boucles fermées. La transmission de puissance par des forces sans contact (électrostatiques, magnétiques) semble être une voie prometteuse pour la manipulation rapide aux échelles micro-nanoscopiques. Pour les applications mettant en œuvre des robots qui doivent travailler en contact avec des personnes (robots d'assistance, robots médicaux), la recherche de nouveaux matériaux revêt une importance encore plus cruciale (matériaux bio-compatibles, stérilisables ou jetables, matériaux doux, peaux artificielles).



### 6.1 Présentation générale du domaine

Les véhicules intelligents sont de fait des robots mobiles destinés au transport des personnes ou des biens. Il y a dans le monde environ un milliard de véhicules terrestres, c'est dire l'importance économique du domaine. L'automatisation partielle ou totale de la conduite constitue sans doute le premier champ d'application de la robotique au niveau économique. Le domaine comprend les véhicules eux-mêmes mais aussi les infrastructures dans lesquelles ils évoluent et les conducteurs avec lesquels ils collaborent. Le domaine a une forte interaction avec les ITS (Intelligent Transportation Systems) notamment grâce aux technologies de l'information et de la communication qui sont communes.

La raréfaction des énergies fossiles, l'insécurité routière, la congestion du trafic par une trop grande densité de voitures transportant souvent un seul passager, sont autant de facteurs qui poussent à l'innovation et au déploiement de nouvelles solutions de mobilité qui seront de plus en plus robotisées.

En ce qui concerne la mobilité des personnes, on distingue en général les cybercars et les navettes robotisées, qui évoluent à basse vitesse dans des sites propres, des véhicules routiers qui circulent sur des voies publiques ouvertes à des vitesses parfois élevées comme sur les autoroutes en interaction avec un conducteur humain. Ainsi, le domaine couvre la conduite automatique des véhicules dans des environnements contraints et dynamiques et l'assistance à la conduite (ADAS – Advanced Driving Assistance Systems) qui met à contribution notamment des technologies robotiques comme la planification de trajectoire et l'évitement d'obstacles.

La communauté française des véhicules intelligents est relativement bien structurée. Les acteurs académiques ou industriels se connaissent et collaborent bien. Les pôles de compétitivité ont amplifié les coopérations. Plusieurs adressent directement la filière automobile et la mobilité - MOVEO, SYSTEMATIC, Véhicule du Futur, Lyon Urban Truck&Bus, ID4car - et favorisent les coopérations au travers du montage de projets ANR, FUI ou européens.

### 6.2 Positionnement international, forces et faiblesses

Concernant l'assistance à la conduite La France avec deux constructeurs et des équipementiers majeurs d'automobiles reste un acteur important sur la scène mondiale. Mais la montée rapide en puissance des pays émergents, en particulier la Chine, le Brésil, l'Inde, etc. menace l'avenir de nos industries. La croissance est faible ou nulle en Europe alors qu'elle est forte dans les pays du BRIC et d'autres tels la Turquie, le Mexique, etc.

Les systèmes de stationnement autonome (Park4U de Valeo) sont l'exemple commercial le plus récent et le plus parlant de robotique automobile. Ils sont nombreux à être mis en œuvre dans les véhicules : AFIL (assistance au suivi de voie), aide au freinage d'urgence, boîte de vitesse robotisée,

ESP, *etc.* sont toutes des fonctions de haut niveau apportant une assistance directe au conducteur, pour améliorer son confort ou sa sécurité, voire l'économie de sa conduite. On peut aussi mentionner les solutions d'assistance au conducteur l'informant sur le trafic, les obstacles de tous types sur son parcours (accident, bouchons, signalisation de dangers temporaires), solutions basées sur la coopération entre véhicules pour gérer et diffuser ces informations.

Concernant la conduite automatique, les expériences menées par les "Google cars" sont réellement précurseurs mais avec des coûts d'équipement prohibitifs à ce jour. Les constructeurs européens ont également des travaux de ce type mais restant au niveau strictement démonstrateur en enceinte privée.

Le transport automatique de personne et de fret (livraison terminal) sur site privé et public est également un domaine possible de développement en France avec des technologies de navigation disponibles associées au fort développement des véhicules électriques urbains (motorisation, batteries, *etc.*), mais les grands constructeurs ne s'intéressent pas à ce domaine qui reste associé à des démonstrations de laboratoires et de petites PME robotiques.

Le transbordement de fret (portuaire et autres) est dans la même situation.

Au plan international les universités américaines sont leaders dans le domaine (MIT, CMU et Stanford University) en particulier depuis les deux importants challenges de la DARPA ("Grand challenge 2005" et "Urban challenge 2007"). Google *via* son projet "Google driverless car" a su tirer profit des savoir-faire issus de ces projets en attirant en son sein les leaders des équipes vainqueurs. Il est à noter que les véhicules autonomes Google (des Toyota Prius modifiées) ont obtenu l'autorisation de circuler librement avec des plaques d'immatriculation particulières et des conditions d'assurance spéciales dans certains états des USA, comme le Nevada depuis juin 2011. Dans cette lignée, certains constructeurs Coréens et Allemands ont fourni à de nombreuses universités de leur pays des véhicules équipés. La Chine est actuellement en train de rattraper son retard dans le domaine en organisant depuis 3 ans un concours annuel de véhicules intelligents.

### **6.3 Les principaux acteurs du domaine (laboratoires et entreprises)**

Concernant l'assistance à la conduite et la conduite automatique de véhicules privés, les acteurs industriels sont présents dans la plate-forme de la filière automobile (<https://www.pfa-auto.fr/>) qui rassemble les constructeurs, les équipementiers, les pôles de compétitivité, les PME, *etc.* D'autres sociétés, en limite du monde strict de l'automobile (Robosoft, Induct, AKKA, *etc.*), ont également des démonstrateurs mais qui restent avant tout des robots évoluant à basse vitesse sur site propre et non des véhicules répondant aux normes de circulation de base (code de la route et certification des véhicules routiers).

Les principaux laboratoires français qui travaillent sur l'ensemble de ces domaines depuis de nombreuses années sont : Heudiasyc, Centre de Robotique de Mines-ParisTech, Institut Pascal, IFSTTAR/LIVIC, INRIA (équipes IMARA, E-motion et Lagadic). Ces laboratoires disposent de moyens expérimentaux, notamment de véhicules instrumentés (voitures équipées en capteurs et actionneurs, Cycabs, Vipalabs, navettes) et d'un accès à des pistes d'essais (comme le circuit du GIAT à Satory, les circuits de l'UTAC ou encore la plate-forme PAVIN située à Clermont-Ferrand sur le campus de l'Université).

Des exploitants (dans le cas du transport public) comme Transdev, Keolis, *etc.*, sont en veille active, notamment sur des expériences de transport automatique sur courte distance comme celle de la Rochelle en 2012 menées par l'INRIA.

#### **6.4 Potentiel industriel : les enjeux en termes d'innovation industrielle, les points durs et défis**

Le principal point dur sociétal, quels que soient les domaines cités ci-dessus, concerne l'évolution de la réglementation pour ces différents types de systèmes. Il devrait faire l'objet d'un large débat pour définir des normes en fonction des différentes utilisations visées (types de véhicules, sites dédiés avec réseau d'infrastructure, performances de mobilité, *etc.*).

L'acceptabilité des utilisateurs, notamment pour l'assistance à la conduite et la conduite automatique, est également un facteur prédominant qui fait l'objet de multiples travaux des constructeurs automobiles. Ceci est vrai à un degré moindre dans le domaine du transport public vu le manque d'intérêt de grands constructeurs et des exploitants.

Les principaux enjeux sont :

- L'utilisation de capteurs de perception bas coût et de technologies sécuritaires (redondances perception et traitement), intégrés dans les véhicules comme le couplage GNSS par hybridation serrée avec la vision (SLAM) pour améliorer la précision et l'intégrité de la localisation en environnement contraints et complexes ;
- Le développement de moyens de communication et d'algorithmes de traitement pour la coopération véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure (véhicules coopératifs) à un stade industriel et certifié ;
- Le Platooning virtuel sécurisé pour des véhicules privés sur autoroute (à vitesse élevée) ou dans les encombrements (à vitesse réduit) et pour des flottes de véhicules (gestion de parc de véhicules en autopartage) ;
- L'autonomie énergétique (traitée actuellement par les constructeurs automobile pour les véhicules électriques) ;
- La mobilité autonome à basse vitesse pour par exemple procéder à la recharge des batteries ;
- La sécurisation du franchissement des intersections et des zones fréquentées par de nombreux vulnérables ;
- L'aide à la conduite comme le conseil ou la prise d'action pour l'évitement de collision ou de sortie de route.

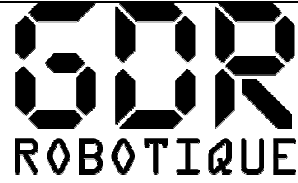
Il faut monter des projets de démonstration opérationnelle à grande échelle de CTS (Central Transportation Services) afin de convaincre des collectivités et de gros industriels de transport du marché et faire évoluer la réglementation sur ce type d'application en site urbain (site semi-propre hors circulation automobile privés)

#### **6.5 Potentiel recherche : les avancées et perspectives de recherche**

Les briques de composants technologiques existent mais demandent avant tout des développements en recherche industrielle (coût, sécurité, *etc.*), industrialisation, *etc.* Des recherches plus fondamentales semblent utiles pour atteindre les niveaux de fiabilité nécessaire à ces systèmes :

- Compréhension des environnements dynamiques peuplés d'humains ;

- Prise de décision, contrôle partagé et navigation en environnement contraint et dynamique, et avec des humains ;
- Coopération multi-acteurs ;
- Sûreté de fonctionnement, *etc.*



**Le constat est ancien et avait été rappelé lors des JNRR'11 :**

- Dans le domaine de la Robotique, de nombreuses applications à vocation industrielle ne peuvent voir le jour qu'avec l'aide de la recherche amont en raison des applications visées impliquant de forts investissements en R&D (par exemple développement de l'intelligence des systèmes, moyens de contrôle embarqués, architecture système, etc.) ;
- Mais les relations Recherche-Industrie ne fonctionnent pas toujours comme elles devraient : la maturité atteinte dans les labos est souvent insuffisante pour convaincre les industriels de prendre le relais et réaliser le transfert correspondant. Inversement, souvent les sujets techniques industriels ne motivent pas les labos car ils ne permettent pas de produire de nouvelles connaissances faisant l'objet de publications ;
- Cela dit, les synergies sont malgré tout plus visibles dans certains secteurs : robotique en milieux ouverts pour le terrestre et l'aérien, systèmes de transport intelligent ;
- Chacun souhaiterait que ces relations s'améliorent afin de transformer les connaissances issues des laboratoires de recherche en valeur ajoutée produite par des entreprises.

**Plusieurs raisons sont invoquées :**

- Les échelles de temps, les motivations et besoins entre industrie et recherche sont différents ;
- Les standards actuels d'évaluation de la recherche : la course à la publication dans des supports de rang A rend difficile l'adaptation des académiques aux besoins réels des industriels en termes d'innovation ;
- La question de la PI et des brevets est difficile à traiter et le transfert industriel associé nécessite souvent un cash qui ne peut pas être pris en charge par les PME ;
- Les accords de consortium sont difficiles à définir et longs à conclure, etc.

... et ce, malgré les efforts de nombreux acteurs à l'interface entre recherche et entreprises. Pourtant, le bon sens et l'analyse de ce qui se fait dans certains pays développés montrent que l'on pourrait faire mieux.

**Plusieurs acteurs et instruments existent et mériteraient d'être renforcés ou mieux utilisés :**

- Les projets de R&D collaborative : ANR, FUI, Europe (programmes cadres), Régions (actions collectives régionales par exemple) pour tous les secteurs, DGCIS et DGA dans certains secteurs, etc., même si le montage de ces projets est lourd et les procédures administratives complexes ;
- Les stages de formation d'Ingénieur, de Master, de Technicien supérieur ;
- Les thèses CIFRE qui permettent d'initialiser des collaborations plus durables ;

- La R&D partenariale portée par les Instituts Carnot (par exemple, le projet CAPME'UP, réunissant le CEA List, l'IFP Energies Nouvelles et le CETIM pour développer la recherche partenariale avec les PME dans le domaine, entre autres, des applications robotisées) ;
- ... ou portée par des Instituts thématiques pluridisciplinaires créés dans le cadre des Investissements d'avenir comme par exemple :
  - l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Jules Verne qui s'intéresse notamment aux solutions robotiques centrées sur l'humain pour la production de structures de grande dimension ;
  - ou l'Institut d'excellence dans le domaine des énergies décarbonées (IEED) VEDECOM (Institut du Véhicule Intelligent Décarboné Communicant et de sa Mobilité), qui rassemble déjà une cinquantaine de partenaires, dont les principaux acteurs de la filière automobile ainsi que les laboratoires académiques du domaine, avec notamment un domaine de recherche sur la cyber-mobilité et les véhicules intelligents ;
- ... ou portée par des acteurs comme CEA Tech, le CETIM, le SYMOP dont le rôle d'interfaces entre recherche académique et recherche technologique mériterait d'être discuté ;
- La possibilité pour les chercheurs et enseignants-chercheurs de travailler pendant une période en entreprise puis de revenir dans leur laboratoire d'origine.

#### **Quelques propositions :**

- Les TPE et PME ont un rôle d'interface central à jouer entre la recherche et le produit. Les initiatives en ce sens sont nombreuses mais individuelles et propres à chacune. Ces organisations, souples et réactives grâce à leur taille, permettent de transformer plus facilement que les grands groupes des résultats de recherche en démonstrateurs robotiques (matériels ou logiciels). Cependant, les TPE et PME souffrent d'un manque de ressources humaines et financières permettant ensuite, à partir du démonstrateur, d'industrialiser un produit industriel vendu sur le marché ;
- Il reste vraisemblablement un potentiel applicatif énorme pour la Robotique dont il convient de poursuivre l'identification. Aucune analyse de marché, aussi sérieuse et approfondie soit-elle, ne peut fournir cette analyse avec un degré de certitude suffisant pour convaincre prescripteurs et investisseurs ; par contre, les start-up ont indirectement cette capacité à "tâter le marché" en lui proposant tel ou tel produit, et ainsi contribuer à alimenter une étude de marché à grande échelle (en plus de sensibiliser les utilisateurs potentiels). Il apparaît donc opportun de favoriser la création de start-up innovantes, en leur apportant ensuite le soutien qui leur permettra de se reconfigurer à effort réduit en cas d'impasse sur la piste explorée. Par ailleurs, dans un second temps, il est crucial d'aider ces TPE à grandir pour atteindre des tailles critiques permettant d'accéder à des marchés plus larges ;
- Dit autrement, la maturité de la technologie appelle, au-delà des programmes de collaboration classiques, à une confrontation franche des systèmes aux différents usages. L'objectif est de pouvoir recueillir, de cet usage, les éléments fondateurs de feuilles de route technologiques propres à faire émerger des applications concrètes, sous des hypothèses consolidées, à la fois de marché et de conformité avec les besoins ;
- Sans une démarche ciblée vers les différents bassins d'emploi (sur la base des Pôles de compétitivité par exemple) ou au niveau national, à l'initiative par exemple du Club des partenaires du GDR Robotique, les éléments nécessaires au calcul du véritable retour sur

investissement ne seront pas recueillis ;

- Relancer les structures de recherche sous contrat (SRC). Ces structures permettent de répondre rapidement à des problématiques de marché pour aboutir, grâce à de la recherche appliquée, à des innovations concrètes en termes de conception de produits mais aussi de nouveaux procédés et d'innovations incrémentales ;
- D'autres modèles, notamment les centres de transfert espagnols (comme Tecalia) ou allemands (comme les Instituts Fraunhofer) sont des alternatives très efficaces pour amener les résultats de recherche au niveau de prototypes industriels : les ingénieurs de ces centres ne sont pas évalués sur leurs publications mais sur le niveau technologique des prototypes réalisés ;
- En complément des centres de transfert, la création de laboratoires communs de recherche expérimentale (Universités, EPIC/EPST et industriels) permettrait de lever en co-développement des verrous technologiques pour répondre à des besoins d'innovation ;
- Inculquer la culture brevets dans les laboratoires et disposer de cellules d'innovation efficaces, ce qui relève des missions des SATT ;
- Intégrer des laboratoires aux grands rendez-vous du secteur lors de salons industriels, à l'instar de ce qui se fait déjà dans le cadre d'INNOROBO au travers du GDR Robotique ;
- Mener une réflexion sur le modèle des futurs PPP (partenariat public privé) européens (comme notamment le PPP Robotics soutenu par euRobotics aisbl) qui visent à imbriquer plus étroitement industrie et recherche ;
- Concernant la valorisation des connaissances, il est fondamental d'impliquer des laboratoires de recherche en sciences de gestion, en économie et en marketing. De grands laboratoires français, mondialement connus, comme le CSI (Centre de Sociologie de l'Innovation, Mines ParisTech), le CRM (Centre de Recherche en Management, Université Toulouse 1), le LGI (Laboratoire Génie Industriel, ECP) travaillent sur ce thème mais leurs résultats scientifiques ne sont pas toujours exploités sur le territoire.



## Annexe 1 : Liste des intervenants

| Domaine   | Industriels   | Académiques  |
|---|---|--|
| Robotique chirurgicale  | C. Arfire (Adept)<br>B. Bouvier (GE Healthcare)   | B. Bayle (ICube, anciennement LSIT)<br>J. Troccaz (TIMC)   |
| Robotique de réhabilitation   | J. Cau (BA Systèmes)<br>S. Grygorowicz (RB3D)   | P. Coignard (Kerpape)<br>A. Roby-Brami (ISIR)  |
| Robotique d'assistance à la personne (domestique, dépendance, handicap, etc.)                     | P. Caton (Covea Tech')<br>E. Lucet (Robosoft)   | M. Chetouani (ISIR)<br>D. Duhaut (LabSTICC)<br>C. Fattal (Propara et CENRob)<br>Y. Grenier (LTCl)<br>J.-P. Merlet (INRIA)<br>L. Saint-Bauzel (ISIR)  |
| Télé-robotique et robotique en milieux hostiles ou difficiles                                     | A. Fidani (Cybernetix)<br>G. Pérolle (Tecnalia)<br>S. Rubrecht (Bouygues TP)<br>V. Toulemonde (AREVA)   | Y. Measson (CEA)<br>V. Padois (ISIR)<br>P.-B. Wieber (INRIA)   |
| Robotique en milieux ouverts (terrestre, aérien, marin et sous-marin) : surveillance, exploration | O. Lefebvre (Magellium)<br>D. Lemaître (EOS Innovation)<br>E. Lucet (Robosoft)<br>J. Morillon (Thales Optronics)<br>V. Rigaud (IFREMER)             | F. Ben Amar (ISIR)<br>M. Berducat (IRSTEA)<br>P. Bessière (Collège de France)<br>P. Bonnifait (Heudyasic)<br>F. Boyer (IRCCyN)<br>C. Debain (IRSTEA)<br>D. Filliat (ENSTA)<br>P. Rives (INRIA)<br>F. Ruffier (ISM)<br>C. Tessier (ONERA) |
| Robotique manufacturière  | N. Armande (PSA)<br>P. Charles (ABB France)<br>D. Hériban (Percipio Robotics)<br>G. Pérolle (Tecnalia)<br>A. Suarez Roos (EADS)<br>H. Turchi (ALCI) | S. Haliyo (ISIR)<br>A. Hejazi (GREAH, Le Havre)<br>P. Ray (Institut Pascal)<br>P. Wenger (IRCCyN)  |
| Robotique de logistique   | G. Caverot (BA Systèmes)<br>N. Riehl (Balyo)  | A. de la Fortelle (ENSMP)<br>Y. Perrot (CEA/LIST)  |
| Véhicules intelligents  | J. Ibanez-Guzman (Renault)  | P. Martinet (IRCCyN)<br>M. Parent (INRIA/Cybercars)<br>A. Spalanzani (INRIA)   |



## Annexe 2 : Composition du Comité d'Audit

|  |   |
|--|---|
| M. de Mathelin (ICube, anciennement LSIIT)<br>E. Dombre (LIRMM)  | Robotique chirurgicale<br>Robotique de réhabilitation |
| F. Hanat (Cap Digital)<br>D. Duhaut (Valoria)<br>R. Hasselvander (CRIIF)<br>R. Millet (Consultant)   | Robotique d'assistance                                |
| P. Bidaud (ISIR)<br>R. Hasselvander (CRIIF)<br>Y. Measson (CEA/LIST)   | Télé-robotique  |
| Y. Chardard (SUBSEA TECH)<br>V. Creuze (LIRMM)<br>R. Millet (Consultant)<br>J. Morillon (Thales Optronics)<br>B. Patin (Dassault Aviation)<br>F. Plumet (ISIR) | Robotique en milieux ouverts                          |
| S. Acoulon (CETIM)<br>G. Caverot (BA Systèmes)<br>Y. Perrot (CEA/LIST)<br>P. Wenger (IRCCyN)   | Robotique manufacturière et de<br>logistique          |
| P. Bonnifait (Heudiasyc)<br>A. Charara (Heudiasyc)<br>C. Laurgeau (Mines ParisTech)<br>R. Millet (Consultant)  | Systèmes de transports intelligents                   |