



## Le futur de la Robotique

L'effort de guerre durant la période 1940-45 a conduit à une accélération sans précédent des développements technologiques, particulièrement aux Etats-Unis, dont nous sommes toujours redevables.

Nous en sommes redevables, car c'est à ce moment-là et juste après la guerre qu'une panoplie d'outils et de composants sans cesse améliorés ont permis de concevoir des machines de plus en plus sophistiquées, diversifiées et fiables.

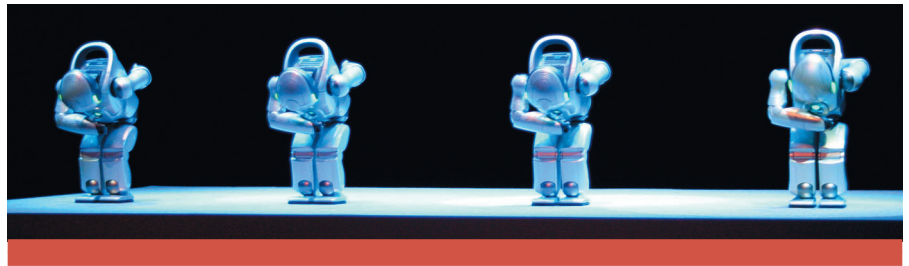
Parmi ces machines nouvelles, les robots ont été considérés à cette époque de deux points de vue :

- d'une part et principalement, comme un outil de **l'automatisation de tâches** jusque là manuelles, et, partant, source de profit dans l'industrie. Cette dernière motivation explique le succès de la robotique industrielle dont l'épanouissement s'est produit dans les années 1980 avec une sorte d'achèvement dans les innovations majeures autour de 1990.

- d'autre part comme le point de départ d'une machine du futur largement évoquée par la science-fiction, qui trouverait son accomplissement dans une **sorte d'homme artificiel**. Cette vision était celle d'une catégorie de chercheurs dotés d'une double motivation : relever un défi scientifique, et aussi essayer de satisfaire un rêve humain apparemment universel : disposer d'esclaves lui ôtant efficacement tout souci dans l'exécution de ses tâches quotidiennes ou professionnelles. On sait qu'aujourd'hui, un demi-siècle après les premières tentatives, que ce rêve doit être très réduit dans ses ambitions mais qu'il peut être partiellement réalisé.

### La problématique d'aujourd'hui

Rappelons qu'on entend approximativement par robot une machine matérielle qui



peut agir intelligemment sur son environnement physique.

Après les robots dits industriels qui sont à poste fixe et qui peuvent donc se comporter de manière satisfaisante en quasi-aveugle, puisqu'on a la possibilité de préparer cet environnement à l'avance, (qu'il soit statique ou obéisse à une dynamique identifiée donc modélisée), le robot d'aujourd'hui doit être **mobile**, car, après son utilisation dans le cadre de la **production**, on veut l'utiliser, pour résumer, dans celui des services au sens le plus large.

Cette première qualification, la mobilité, soulève déjà toute une classe de problèmes : comment se déplacer ? pour aller où ? L'environnement à chaque instant est changeant et les seules applications intéressantes sont celles où cet environnement n'est pas connu avec tous les détails qu'on engrangeait à l'avance pour un robot à poste fixe . La mobilité réussie dans un contexte environnemental non ou peu aménagé exige des capacités d'identification permanente du terrain, d'identification d'un but, de détection et contournement des obstacles etc... au delà du moyen de locomotion et de propulsion qu'il faut sélectionner.

Autrement dit, on ne peut pas faire de robot mobile sillonnant la campagne par exemple sans lui associer, d'un côté des moyens adéquats de progression, et de l'autre, impérativement, un système de perception et un système de compréhension de l'environnement

lui permettant de choisir sa route en fonction de ses moyens de locomotion. On voit aisément que le problème posé par le robot mobile n'a rien à voir avec celui du robot à poste fixe. Et ce problème n'a pour l'instant que des solutions peu efficaces et très limitées (on parle ici des robots terrestres ; dans l'eau ou l'air ou l'espace, l'homogénéité tridimensionnelle du milieu rend les choses beaucoup plus aisées de ce point de vue. Mais le problème revient si le but dépasse le seul objectif de se déplacer en sachant où l'on est, lorsqu'on veut exécuter des actions sur l'environnement une fois arrivé à pied d'œuvre).

La deuxième catégorie de problèmes provient du fait, qu'excepté pour l'observation ou la surveillance, un robot qui ne peut que se promener dans la campagne présente peu d'intérêt. Il faut donc qu'il atteigne l'endroit ad hoc et y travaille. C'est une autre classe de compréhension de l'environnement et de compréhension des tâches, qui doit conduire à la possibilité d'utilisation d'outils (qui doivent donc être adéquats) pour exécuter les tâches qu'on lui aura demandées de faire. Cette classe de problèmes n'est pas mieux résolue que la première évoquée ci-dessus (on prend l'exemple d'un robot envoyé dans la campagne mais ceci s'applique partout dès lors qu'une description complète de l'environnement n'est ou ne peut être fournie au robot à l'avance. C'est le cas général.)

## Les solutions d'aujourd'hui face à un besoin

Rappelons tout d'abord que le but de l'utilisateur c'est avant tout de résoudre son problème, c'est-à-dire d'arriver à exécuter les tâches qu'il lui faut réaliser. Pour cela il est décidé à prendre tout moyen qui conduit au succès, en particulier des machines qu'on nommera, ou non, robot mais qui devront le satisfaire. Par ailleurs, l'utilisateur a un besoin identifié donc particulier. Il ne fera pas appel à une machine réputée "universelle" mais à celle qui va le tirer du mauvais pas dans la ou les quelques situations qui le préoccupent.

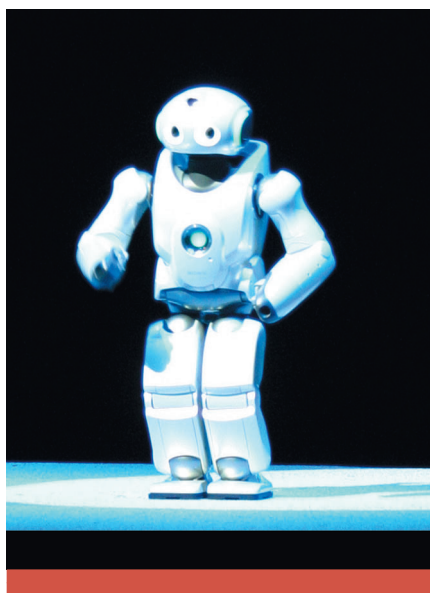
Ainsi, pour un problème connu (la récupération d'un objet dangereux dans une ville connue, l'intervention dans une centrale nucléaire déterminée etc...) on imagine des machines particulières dont la morphologie, le mode de locomotion, l'outillage, les dimensions etc...satisfont les contraintes impératives d'un cahier de charges particulier. On aura un robot dédié, peu ou pas adapté, à faire quelque chose d'autre que ce pour quoi on l'a construit dans un environnement lui aussi largement déterminé à l'avance.

Par ailleurs on ne pourra pas le rendre totalement autonome si, comme c'est toujours le cas dans la réalité, des éléments ou situations imprévues se présentent durant ses déplacements ou durant l'exécution de sa tâche. On devra alors le piloter ou le guider soit en permanence, soit par intervalles pour qu'il donne satisfaction. C'est le principe de la **téléopération** qui va soulever de nouveaux problèmes car le pilote humain doit se rendre compte à distance de la situation pour affecter la commande adéquate.

En conséquence, la conception d'un robot par le besoin immédiat, toujours particulier, incite à faire des machines spéciales (qu'on peut quand même nommer "robots") à l'opposé des principes qui peuvent guider la conception d'un robot relativement généraliste ou un peu universel. Comme on ne sait pas encore bien faire un robot universel, tout pousse au plan économique à n'en pas concevoir puisque rien à ce jour ne peut garantir son utilité et son efficacité et que tout garantit un coût exorbitant.

## Les solutions de demain

Les robots spécialisés précédents, il faut le noter, ont tous les mêmes fonctionnalités : la locomotion, la manipulation, la perception, la communication avec l'homme... Mais, d'une part, leur conformation physique ne leur permet que des actions physiques limitées dans des environnements contraints (cette capacité s'appelle la dextérité), et, d'autre part, leur "cerveau" ne leur permet aussi que des actions mentales elles aussi fort limitées et insuffisantes puisque l'homme doit les guider pour l'essentiel.



La question de fond qui se pose au chercheur ou au concepteur est la suivante : peut-on améliorer la conformation physique et l'autonomie mentale de telle sorte que toutes ces machines puissent être remplacées par une seule (dans la même gamme d'efforts à développer) ou une seule classe ? Cette machine aurait alors un niveau intéressant d'universalité dans les applications de services pour remplacer l'homme.

Comme on l'a dit dans l'introduction, des efforts sont faits dans ce sens depuis l'origine de la robotique par une catégorie de chercheurs sans aboutir. Pourquoi ?

### Problème de locomotion

Si l'on fait l'hypothèse qu'on est essentiellement à la recherche de robots pouvant se déplacer sur la terre, une première grande difficulté bien longtemps minimisée est notre incapacité à faire des véhicules

"tout-terrain". C'est à tort qu'on stigmatise certaines voitures ou des chars de guerre ou d'autres engins à chenilles en tant que véhicules "tout terrain". Aucun véhicule terrestre conçu par l'homme jusqu'ici ne peut atteindre plus de la moitié des terres émergées de la planète. Et c'est bien aussi sur cette seconde moitié qu'on souhaite faire faire des travaux aux robots puisque l'être humain peut en général y accéder. Mais il n'est pas le seul. Force êtres vivants ont cette capacité et ils se déplacent pour l'essentiel à l'aide de pattes comme les araignées, ou par reptation comme les serpents... En conséquence, l'analyse des **locomotions des êtres vivants** se doit d'être faite pour construire des mécanismes capables de les imiter correctement. Ces études, pour la robotique, n'ont commencé qu'il y a quelques années à l'exception de très peu de précurseurs.

On constate, d'une part, que la variété des systèmes locomoteurs est très grande, qu'ils ne sauraient fonctionner sans maîtrise des interactions avec le sol (via de très nombreux capteurs disposés un peu partout sur le système) et que la locomotion est un phénomène dynamique et non cinématique (comme le sont conçus presque tous les systèmes de locomotion artificielle).

On peut penser que d'ici peu de lustres ce problème aura trouvé sa bonne solution, en particulier en ce qui concerne la locomotion humaine qui, au delà de la marche, puis de la course, montre une aptitude à ramper et à faire de l'alpinisme en s'aidant des mains, lesquelles alors deviennent partie prenante dans la locomotion.

Il est clair que si l'on savait faire une machine au système de locomotion aussi performant que celui d'un animal (dans des classes choisies) ou que celui de l'homme, la difficulté d'introduire des robots mobiles n'importe où dans le cadre de services (même à l'intérieur d'une maison il faut pouvoir monter des escaliers...) serait grandement réduite.

### Problème de compréhension de l'environnement

Cette fonctionnalité est une partie de toutes les propriétés qu'on classe dans **l'intelligence** du robot ou encore dans sa

capacité d'**autonomie** comportementale. Supposant le système locomoteur réalisé de façon satisfaisante, le robot doit savoir où il est, vers où il se dirige, et de plus, adapter son déplacement au terrain et aux obstacles (en téléopération c'est l'homme qui sait tout ça et le guide). Voilà un second problème essentiel non résolu correctement dans sa généralité malgré des travaux considérables depuis longtemps. Sa solution fait appel à trois choses : l'existence d'un système de prélèvement d'informations sur l'environnement (informations pertinentes, c'est-à-dire en rapport avec ce que le robot doit faire) ou système de **perception**, la connaissance antérieure de cet environnement qui ne peut se réaliser que par **apprentissage** (ou autoapprentissage), enfin la reconnaissance proprement dite qui va se faire par **comparaison** entre les informations que le robot prélève et celles qu'il a déjà engrangées. Cette dernière phase permet de conclure par une prise de **décision** d'action de déplacement adéquate à la progression vers le but recherché (qui doit donc être lui aussi connu ou identifié).

Tout ceci est faisable actuellement dans des environnements limités connus (par exemple à l'intérieur d'un bâtiment). Mais lancer un robot dans la nature (à supposer que le problème de locomotion soit résolu) n'est pas possible sans grand risque car les références à engranger dans l'apprentissage sont énormes, mal cernées et la reconnaissance peu assurée et assurément longue (on ne fera que quelques pas tous les dix minutes par exemple pour situer un ordre de grandeurs...).

## **Problème de manipulation ou d'exécution de tâche**

On suppose maintenant que les deux problèmes précédents sont résolus. On a donc une machine qui peut "se promener" convenablement un peu partout où on le souhaite et en particulier dans la nature. C'est déjà un très grand succès mais les applications restent limitées à celles compatibles avec une sorte de plate-forme qui peut se déplacer. On souhaite aussi que le robot fasse des travaux, des modifications d'environnement dans des endroits déterminés (ramener un objet, faire un trou, couper un tuyau, planter un arbuste etc...)

La réalisation de toute tâche suppose la présence d'outils convenables utilisés habilement, c'est-à-dire dans une succession de gestes aux spécifications précises en termes de position, orientation et force. Les gestes ne peuvent s'obtenir que par des structures articulées qui évoquent des bras. Ces bras doivent être liés au bon outil pendant son usage et un travail peut exiger la succession de plusieurs outils. Ainsi, la structure qui permet de faire face à une grande variété de tâches est celle de bras se terminant par quelque chose qui permet de saisir convenablement n'importe quel outil ou objet (dans une certaine gamme de dimensions et de poids), une pince sophistiquée qui évoque donc une main humaine.

Mais l'exécution des gestes ad hoc par un système bras-main suppose la reconnaissance locale de l'environnement dont l'identification du point d'appui de l'outil ainsi que l'appréciation de toutes les distances et orientations pour un bon

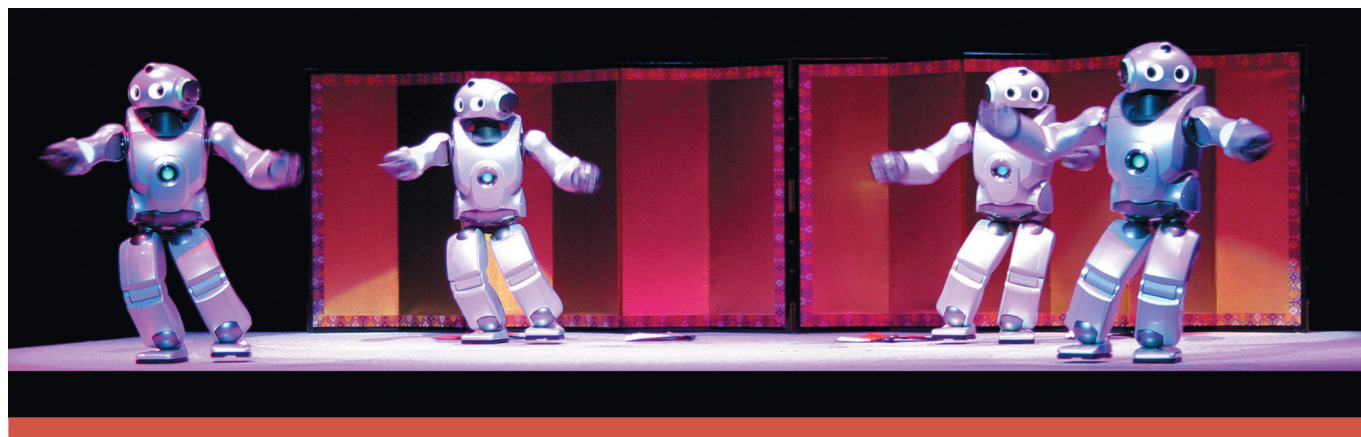
positionnement de cet outil. De plus, l'outil n'agissant que par l'application de forces, un contrôle de la force d'appui est nécessaire pour une utilisation réussie aussi bien que l'identification des instants de démarrage et d'arrêt de la manœuvre. Par ailleurs, le plus souvent, l'objet sur lequel on agit doit être maintenu correctement ce qui oblige à penser à la présence d'au moins deux systèmes bras-main à vocation identique ou complémentaire.

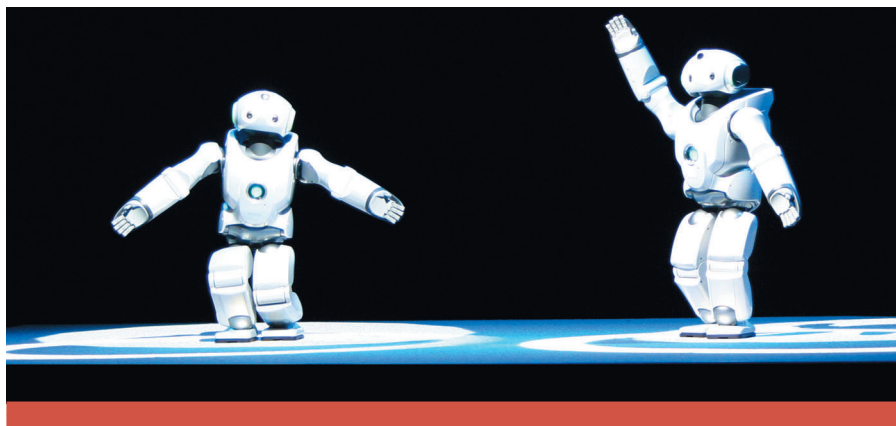
Ainsi, le problème de la manipulation ne saurait être détaché de celui de la locomotion et la nécessaire compréhension de l'environnement pour agir présente une difficulté conceptuelle et de mise en œuvre certainement supérieure à celle nécessaire à la locomotion.

## **Problème de communication**

On suppose maintenant que l'on dispose d'une plate-forme mobile surmontée par un système bras-main répondant de manière satisfaisante aux nécessités exposées dans les paragraphes précédents. On ne sait pas comment elle se présente vraiment sinon que le système à des pattes et des bras avec main et qu'elle comprend un environnement un peu quelconque de manière à se déplacer et à agir en fonction de desiderata possible d'un utilisateur potentiel. Il est probable qu'on ne puisse pas utiliser cette machine de manière satisfaisante sans des travaux complémentaires.

En effet, il faut savoir comment les desiderata de l'homme vont lui être transmis pour qu'elle les comprenne, et, d'autre part, il faut savoir quelles actions la machine est





capable d'exécuter de manière autonome une fois reçue l'instruction de commande. On comprend qu'une instruction globale comme : "scier la grosse branche du pommier situé dans le coin du champ" doit engendrer un nombre extrêmement élevé et successif d'actions plus "simples", du style "avancer vers..." ou "tourner à gauche" ou "saisir la scie" etc. qui, elles-mêmes se décomposent en action "élémentaires" qui relèvent de petits gestes ou variations coordonnées des articulations de la machine.

Ainsi, il est presque certain que le robot ne pourra directement comprendre une commande d'action trop globale comme celle citée ci-dessus (comprendre signifiant : pouvant exécuter l'action), et, qu'à l'opposé, une commande à un niveau trop "élémentaire" conduira à une exécution de l'action globale en des temps prohibitifs et très éprouvants pour l'opérateur. (c'est un peu ce qui se passe en téléopération spatiale).

Il y a donc lieu tout d'abord de pouvoir **communiquer** avec l'opérateur sous une forme de dialogue, ensuite, de choisir soigneusement le **niveau de complexité** d'une action qu'on commande, enfin d'**apprendre** au robot à devenir de plus en plus compétent.

Là encore, la littérature sur ces sujets est abondante, mais son utilisation réelle et performante pose encore bien des défis.

## Les robots humanoïdes

En analysant rapidement ce qui précède, on constate qu'en l'absence de toute volonté délibérée, on exige du robot des fonctionnalités caractéristiques de l'être humain, tant dans sa morphologie générale que dans ses

capacités de réflexion et d'obéissance à des instructions. Pour la morphologie, seuls les singes parmi les animaux ont des sortes de mains ; et en ce qui concerne l'obéissance à des instructions, le dressage des animaux montre bien ses limites. C'est probablement pourquoi une tendance de la robotique est de s'orienter vers la création d'humanoïdes.

Mais une autre raison semble motiver la recherche sur ces robots. C'est que l'opérateur du robot cherche en ce dernier un assistant ou un partenaire qui lui ressemble du point de vue de la dextérité (capacité morphologique et cinématique à faire les mêmes actions que l'homme) et du point de vue de son comportement ou de ses réactions physiques et mentales, même si l'opérateur accepte dans les deux cas une limitation certaine par rapport à lui-même.

Bien entendu, on peut concevoir des robots un peu monstrueux avec par exemple le système locomoteur d'une araignée et les bras et le torse d'un humanoïde. En fait, toute machine résolvant les quatre classes de problèmes évoqués plus haut peut être un "bon" robot. Mais dans la mesure où les solutions viables à ces problèmes n'ont pas encore été mises en évidence, pourquoi ne pas chercher à les résoudre via des humanoïdes ? On sait qu'en cas de succès le marché est là alors qu'avec des robots un peu "monstrueux" il pourrait se révéler plus tiède.

## Quand verra-t-on des humanoïdes dans la rue ou chez soi ?

Cette question qui paraît totalement naturelle à poser par quelqu'un qui souhaite s'informer est pour les spécialistes une question piège. Eliminons les problèmes de

nature économique qui peuvent accélérer ou ralentir la sortie d'un produit. Limitons-nous à l'aspect scientifique.

Pour tenter de répondre à la question, prenons un exemple. On a la capacité dès aujourd'hui de mettre un humanoïde à un carrefour pour surveiller les feux de circulation et faire les gestes et les pas adéquats afin de réguler le trafic automobile. Il suffit d'analyser le travail demandé pour se rendre compte que tous les ingrédients pour comprendre le trafic et les feux et se mouvoir dans un espace restreint sont maîtrisés. Mais un tel robot ne représente pas encore un avantage économique. Par ailleurs en cas d'accident, un conducteur ne manquera pas d'attribuer au robot la faute. Mais qui endosera la responsabilité ? La législation n'a pas encore pris bien en mains ce type de problème.

De même, on commence à voir apparaître des petits robots pour lesquels le concepteur a insisté sur le côté ludique et convivial (QRIO, ASIMO...). Mais ils ne peuvent pas aller chercher un balai, un chiffon ou une assiette dans un placard...

En partant de ces deux exemples, on pourrait dire que les robots humanoïdes pourraient faire une percée demain matin...

En réalité la prudence s'impose, car, pour produire un humanoïde vraiment utile et accepté il faut faire sauter un certain nombre de verrous situés dans les problèmes précédemment évoqués. Les chercheurs croient toujours qu'ils sont sur le point d'y arriver. Cette croyance est chaque jour plus crédible sans qu'on ait encore franchi le seuil fatidique. C'est un peu comme dans le désert où le mirage de la nappe d'eau recule au fur et à mesure que l'on avance...

Mais par ailleurs deux faits réels sont à prendre en compte : d'une part la recherche et l'intérêt pour les humanoïdes s'avèrent croissants. D'autre part, l'ambition affichée n'est absolument pas de faire un homme artificiel dans toute sa plénitude physique et intellectuelle. L'ambition n'est qu'une imitation d'une certaine compétence physique et mentale de l'homme, suffisante pour rendre de vrais services du quotidien et du profes-

sionnel. L'humanoïde n'est pas fait pour remplacer l'homme mais pour l'assister.

Ainsi, on peut penser qu'on est bien "sur le point" d'assister à une invasion d'humanoïdes, mais le "sur le point" peut aller d'un lustre à quatre ou cinq. On sera de toute façon surpris quand cela arrivera le jour où on ne les attendait plus.

## **Pourquoi les robots humanoïdes semblent-il n'être étudiés qu'au Japon ?**

Si les japonais sont bien des précurseurs en la matière (on peut se rappeler par exemple le robot joueur d'orgues déchiffrant en temps réel une partition "normale" et l'interprétant avec ses mains, réalisé par l'équipe de l'chiro Kato à l'université Waseda de Tokyo et montré à l'exposition universelle de Tsukuba en 1985), et si les sociologues attribuent cette attirance japonaise pour les robots à des facteurs culturels, ils ne sont plus les seuls à ce jour à travailler sur ce sujet sur lequel se penchent des équipes au moins universitaires de tous les pays dits développés.

Si l'on compare le Japon à ce propos aux autres pays développés, deux grands facteurs autres que culturels semblent en faveur d'une avance du Japon. D'une part des industriels et non des moindres (Sony, Honda, NTT et une dizaine d'autres au moins) y consacrent un budget non négligeable dans l'espoir à moyen-long terme d'être les premiers à inonder le marché de produits. Par ailleurs la recherche de base sur le sujet est particulièrement bien financée par les autorités du pays comme le METI et les universités.

Aux USA, il semble que peu d'industriels s'investissent directement. Par contre de nombreuses universités et instituts sont à la pointe et bien financés pour cela.

En France, les compétences ne manquent pas. Les industriels, peut-être à l'exception du secteur de la défense, trouvent que le sujet donnera des fruits à trop long terme pour investir. Quant à la recherche publique, une douzaine de laboratoires peuvent revendiquer une haute qualification, mais il n'y a pas un sou pour cette recherche qui exige un investissement d'un million d'euros

environ au démarrage pour faire face modestement dans une équipe donnée... Les chercheurs à vocation forte sont donc réduits à l'expatriation...

## **La robotique du futur en dehors de la réalisation d'humanoïdes**

L'objectif de la robotique, nous l'avons dit, c'est l'assistance à l'homme à travers l'exécution de tâches physiques réalisées de manière plus ou moins autonome par des machines. Si l'humanoïde en tant que tel est une grande piste pour progresser vers l'objectif, toute la robotique ne saurait relever de l'humanoïde pris individuellement.

### **Les essaims de robots**

Dans la nature on constate que des groupes d'animaux, particulièrement les insectes, transforment intelligemment leur environnement (dans le but de survivre par la reproduction et individuellement) alors qu'ils n'ont comme cerveau que quelques cellules incapables de produire la moindre réflexion. En fait leur comportement inné est un comportement de groupe guidé de manière réflexe par les interactions entre individus et les interactions avec l'environnement. L'essaim fonctionne à peu près comme un énorme automate adaptatif. Les chercheurs essaient de comprendre ces systèmes et construisent des équipes d'"animats" pour en percer les mystères qui, bien décryptés pourraient être fort utiles à la conduite d'équipes de robots, évolués ou non, s'unissant pour atteindre un objectif non réalisable par un seul individu.

### **La microrobotique**

Par définition, les humanoïdes ou les animaloïdes ont des dimensions compatibles avec ce que l'homme attend d'un autre homme ou d'un animal. Mais des besoins apparaissent aussi de robots très petits capables par exemple d'être introduits sans dommage dans un corps humain et de se diriger dans le réseau sanguin pour apporter tel médicament ou faire telle petite action sans recourir à la chirurgie. Ces microrobots peuvent être aussi intéressants dans les machines informatiques où ils pourraient aller mettre en place de minuscules organes de rechange ou modifier à bon escient les circuits électroniques. Un microrobot peut se fabriquer comme un circuit intégré en taillant dans la masse un rotor et un stator

de moteur, et tous les organes y compris l'outil de manipulation nécessaire à la constitution d'un robot. C'est un domaine qui a pris corps au fur et à mesure de la maîtrise des circuits intégrés et qui est très actif sans qu'on sache bien, là encore, quand la maîtrise du sujet pourra conduire à des produits industriels.

## **Conclusion**

De même que l'on parle pour les temps préhistoriques de l'âge de la pierre, de l'âge du fer, on dit souvent aujourd'hui que nous sommes dans l'âge ou dans l'ère de l'informatique. Je pense qu'on devrait plutôt dire dans l'âge de l'automatisation, car l'informatique n'est qu'un moyen d'automatisation de tâches mentales. Le robot est un moyen d'automatisation de tâches physiques qui, pour y arriver, est obligé de réaliser des tâches mentales.

Cette ère de l'automatisation n'a pas dit son dernier mot, c'est évident. Mais elle change de nature. Par exemple, il y a un demi-siècle, la discipline «automatique» était en émergence et l'automatisation était vue comme la mise en œuvre de processus sans intervention humaine (dans les années 1970 on parlait beaucoup des usines sans homme). Aujourd'hui on a compris que l'automatisation souhaitable englobait pour une bonne part le problème des relations et interactions de l'homme avec des machines ce qui constitue un renversement de tendance et l'émergence d'une problématique nouvelle, bien apparent en ce qui concerne la conception moderne de robots évolués.

En déroulant la courte histoire de l'automatisation, on prend conscience que les robots sont une étape, et que nous allons impérativement passer par le stade des humanoïdes décrits dans cet article. Les signes précurseurs sont sensibles. Mais donner une date de la généralisation de ces machines relève encore du savoir de la défunte Madame Soleil...

**Philippe Coiffet**  
Directeur de  
Recherche au CNRS  
Membre de l'Académie  
des Technologies

