

Robots et intelligence des machines

Georges GIRALT

L'exposé qui va suivre se propose de rendre suffisamment compréhensibles les problèmes de la robotique et de ses applications en les abordants sous trois angles différents :

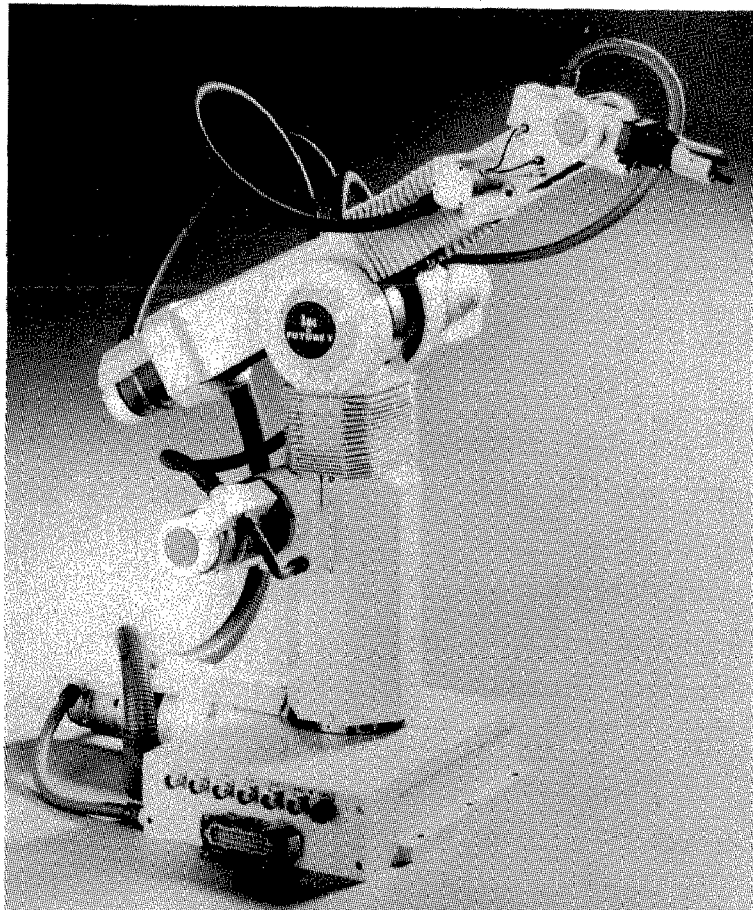
- a. d'où est partie et où en est la robotique
- b. définition et signification des robots de 3ème génération
- c. thèmes de recherche et perspectives pour la décennie qui commence

Perspective historique

Parlons d'abord de la naissance de la robotique industrielle. C'est en 1961 que J.F. Engelberger - père d'un nouveau départ de l'idée robot - a conçu et développé aux USA un premier robot manipulateur industriel. Ces machines se sont progressivement implantées dans l'industrie ; quelque chose de remarquable s'est même produit : à

peine 7 ans après, ce robot est repris en sous-traitance par une firme japonaise et quelques années plus tard ces robots japonais étaient meilleurs que ceux produits aux U.S.A. En France, en 1970, ont commencé les études chez Renault et dans quelques laboratoires.

C'étaient les robots «de 1ère génération» : de simples machines-outil, systèmes mécaniques articulés simulant en quelque sorte le bras et d'une manière très rudimentaire la main de l'homme pour saisir et manipuler des objets, des outils. L'exécution de tous ces mouvements était faite à l'aveugle, c'est-à-dire que la machine pouvait parfaitement prendre un objet qui n'existait pas, serrer la pince qui servait de main, transporter cet "objet" en un lieu où il fallait le déposer. C'est ce fonctionnement purement "mécanique", sans retour d'information sur la tâche en cours qui caractérise la robotique de 1ère génération. (photo n°1)



Dès la fin des années 60 a démarré une autre recherche sur les robots : celle sur les robots dits autonomes parce qu'ils devaient pouvoir se déplacer sans lien ma-

tériel avec support de départ. Il est tout à fait remarquable de constater que le premier robot de ce type étudié en Californie constituait un projet d'avant garde par les concepts qu'il développait. On peut dire que la robotique d'aujourd'hui est faite des descendants de ce robot, SHAKEY, qui était déjà un outil de recherche pour l'intelligence des machines au sens d'une intelligence perceptuelle et des capacités de raisonnement. Bien sûr ceci n'est pas allé très loin pour de nombreuses raisons (développement insuffisant de l'informatique embarquable et des capteurs, connaissances théoriques insuffisantes...) ; ce n'en fut pas moins une tentative extrêmement intéressante et décisive par les concepts qu'elle proposait.

Simultanément, l'effort d'optimisation des mouvements, portant sur la locomotion, se faisait également et cela donnait naissance à des engins beaucoup plus plaisants à regarder et excitants pour l'imagination mais pas nécessairement plus intéressants pour leur fécondité scientifique.

A la fin des années 70 les thèmes de recherche étaient bien posés. Cependant, la recherche dans le domaine des robots mobiles autonomes était au creux de la vague et seul le volet dit Robotique Industrielle Robots "Manipulateurs", connaissait un développement intense dans la plupart des pays. Concernant le volet Robot Mobile Autonome, fer de lance de la recherche en robotique de 3ème génération, qu'il me soit permis de citer le projet HILARE qui démarrait dans mon groupe au Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (LAAS) à Toulouse (1977), car il est aujourd'hui le plus ancien toujours en cours. Ses prédécesseurs ont tout été arrêtés : SHAKEY est un tas de ferraille depuis plus de 15 ans, le MARS ROVER développé par la NASA aux USA n'a jamais vu le jour. (figure n°2)

C'étaient là les prémises et les fondements de la Robotique de 3ème génération.

Robotique de troisième génération

Aujourd'hui il n'y a pas de laboratoire universitaire qui n'entretienne pas un projet de robot, il n'y a pas de pays développé qui ne poursuive pas de projet de robot mobile, plus ou moins «applicatif». On constate même un foisonnement de recherche dans ce domaine et en particulier il existe de grands projets coopératifs qui impliquent plusieurs laboratoires industriels, voire plusieurs pays.

Essayons de comprendre ce qui s'est passé. Robots de 1ère génération : répétition aveugle de mouvements certes programmés mais qui ne s'ajustaient pas au travail à faire. L'exemple le plus parfait est celui du robot de soudure par points dans l'industrie automobile. Il fallait qu'on lui porte le travail pour qu'il puisse exécuter correctement sa tâche.

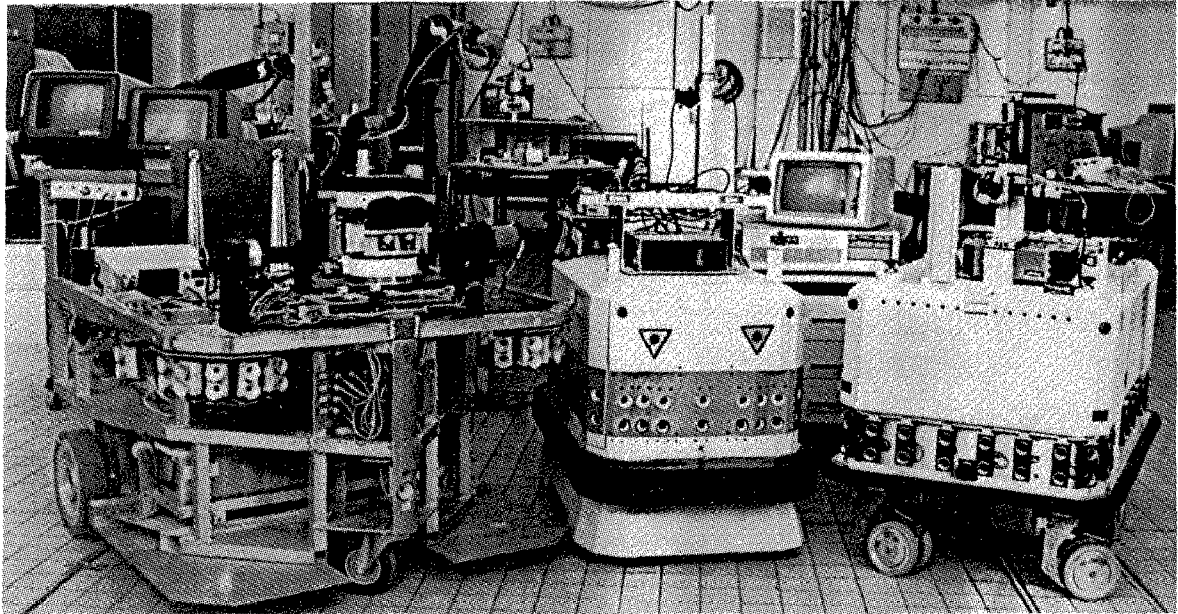


figure n°2

Au robot de 3ème génération on fixe pour objectif deux autres fonctions humaines (autres que celles mécaniques du bras et de la main) ; une capacité à percevoir et une capacité à raisonner sur la tâche à accomplir. Cela offre maintenant la possibilité de relâcher totalement ou partiellement toutes les contraintes de préparation du travail. Quelques exemples existent qui ne sont pas de la science-fiction : ainsi des robots peuvent cueillir des fruits !

Définition de la robotique de 3ème génération : machines avec capacité de raisonner sur la tâche à accomplir et de mettre en oeuvre des relations intelligentes pour son exécution entre perception et action.

Ce sont des systèmes hautement complexes de traitement du signal et de l'information.

Tout cela engendre une amélioration très importante de la relation entre

l'homme et la machine. On est en présence d'un outil beaucoup plus facile à utiliser car il s'adapte presque automatiquement à la tâche à accomplir.

Dans le langage de la robotique on les définit comme des machines qui peuvent être programmées au niveau de la tâche. Cela a un sens profond et exige des capacités de perception de l'état de la tâche et entraîne nécessairement que l'exécution soit guidée par des capteurs.

Le mot **programmation** nous écarte d'une manière décisive de toute idée de robot jouet, robot entité androïde, robot science-fiction. C'est une **machine** que l'on va programmer mais à un niveau beaucoup plus grand d'abstraction.

Au lieu de la programmer seulement pour bouger de tant de centimètres, on de tant de degrés, on va la programmer, par exemple, pour saisir un objet. L'objet est défini sans dire où il se trouve et, grâce aux capteurs, la machine «voit» où est l'objet et sait générer la commande pour le saisir automatiquement. Ceci exige une certaine capacité de raisonnement et permet de maîtriser les imprécisions et les incertitudes.

Tout cela ouvre des possibilités nouvelles dans un vaste domaine d'application. Deux grandes catégories sont à considérer :

- des environnements de travail structurés -on dit aussi "*coopératifs*" par rapport au robot- tels par exemple des ateliers de fabrication ; de bons exemples sont certaines tâches pour les robots d'assemblage, robots de service (surveillance des usines, peut être un jour de nos habitations, robots de nettoyage industriel, déjà commercialisés quoique très chers).

- des environnements de travail moins structurés -on dit aussi "*non coopératifs*" par rapport au robot -il en va ainsi des robots agricoles comme de certaines réalisations passionnantes telles que les robots de protection civile destinés à intervenir par exemple en cas de catastrophe naturelle ou incendie ou encore des robots d'exploration planétaire (Lune, Mars).

Bien sûr cette dernière catégorie de robots dont je viens de parler n'a rien à voir avec ceux qu'on vous montre dans des films ou dans certains reportages qui ne sont que des concepts de science-fiction, des jouets, des gadgets...

Les robots mobiles autonomes sauf à inclure cette idée de gadget que je viens

d'évoquer, représentaient une part de rêve très importante pour beaucoup de gens et nombreux sont ceux qui ont été à la *rencontre du mythe* de l'androïde. Il en reste quelques uns de très sérieux : une équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT) a carrément dit : *nous développons des "Insectes Artificiels"* (notons que IA signifie aussi Intelligence Artificielle), des "*créatures*". Ce n'est pas le cas du plus grand nombre d'équipes de recherche, en tout cas pas en France ni dans mon laboratoire où l'on s'efforce d'aller à la *réalité*.

La réalité, se sont des machines, des outils, des prolongements de l'homme. Ceci ouvre une problématique scientifique qui me paraît plus riche que le mythe et débouche sur un vaste ensemble d'applications concrètes et nouvelles. Je vous en donne une liste non exhaustive pour vous montrer le nombre d'applications possibles dans cette perspective de travail :

- ateliers flexibles, chantiers, nettoyage industriel, mines, services, agriculture, fond des océans, protection civile, surveillance, espace.

Cette liste exclut toutefois une application à laquelle je ne crois personnellement pas, du moins pour l'instant : ce sont les robots domestiques à usage général. Les robots que nous sommes capables de faire aujourd'hui qui pourraient accomplir des tâches assez générales telles que nettoyage et surveillance coûtent horriblement cher ; un jour on pourra recourir à leurs services mais après l'an 2000 ! (je prends sans doute des risques en disant cela).

Les principaux thèmes de recherche

Quels sont précisément les principaux thèmes de recherche si je considère cette robotique de 3ème génération avec tous les problèmes de mouvement, de perception, de raisonnement que cela implique, quels sont les grands volets ? Trois grands volets de recherche sont à considérer :

- la maîtrise d'architectures efficaces pour la manipulation et la locomotion automatique,
- la faculté de percevoir et de modéliser l'environnement,
- la mise au point des structures et des processus de raisonnement, de décision et de contrôle d'exécution.

La fonction "manipulation"

Commençant par la manipulation, je vais à nouveau frôler la frontière qui sépare le mythe de la réalité. Au niveau de la manipulation qu'est-ce qui est intéressant ? Ce dont nous disposons aujourd'hui n'est pas du tout satisfaisant. Il existe dans l'industrie énormément d'organes de saisie, (on les désigne sous le nom de préhenseurs). Ils sont peu satisfaisants. Les chercheurs partout s'efforcent d'augmenter les qualités de manipulation de ces organes terminaux du bras appelés à jouer le rôle de notre main. Cela bien sûr conduit à penser à la dextérité ce qui nous ramène inmanquablement au mythe.

Je pense à deux mains presque anthropomorphiques, mais elles n'ont que trois ou quatre doigts. Ce sont réalisations japonaises : les japonais ont en particulier un véritable génie pour la mécanique. Cependant si remarquables que soient ces réalisations, elles ont le défaut de ne pas posséder nos capacités tactiles, donc de ne pas disposer de ces retours d'information tellement importants qui constituent la dextérité réelle. Ainsi une réalisation américaine, également fonctionnelle, est certes de la très belle mécanique, mais elle n'est seulement que de la mécanique. Tout cela bute sur une frontière qu'on essaie d'ouvrir en abordant les problèmes de la dextérité. En France qu'avons nous ? pas grand chose qui ressemble à une main anthropomorphe mais en fait des préhenseurs à deux ou trois "*doigts*" beaucoup plus proches d'un intérêt industriel immédiat.

Insistons que, pour l'instant, ce qui fonctionne dans les applications industrielles ne ressemble en rien à des mains. Voici par exemple un robot d'assemblage de cartes électroniques et le "préhenseur", qui doit travailler très vite, n'a rien d'anthropomorphe.

La fonction «locomotion».

Où en est-on actuellement ? Sur sol plat, on a recours à des systèmes à roues (combinaisons de roues motrices et roues folles) , sur sol accidenté on peut penser à une large gamme de solutions : chenilles, rouleaux, pattes.

J'espère vous montrer à la fin de l'exposé des réalisations modernes correspondant à ces principes, un robot célèbre à rouleaux, même un à chenilles. Je voudrais insister sur le fait que dans les applications réelles, ce que l'on va faire effectivement,

c'est développer les concepts mixtes les mieux adaptés au type de terrain sur lequel devra se mouvoir le robot. Ce n'est pas pareil de progresser sur des sables "mouvants", tels qu'on les trouvera sur Mars, de monter un escalier ou de passer sur des décombres après un tremblement de terre ou une explosion.

Pour s'en tenir à la locomotion et rester à la frontière du mythe et de la réalité, considérons les réalisations de la **figure n°3** qui illustrent la mécanisation de la marche bipède et hexapode. Copier l'homme, cela tente tout le monde, mais ça ne marche pas ; la machine de la figure est un montage un peu bricolé de laboratoire qui n'a jamais marché et qui ne marchera jamais. Faut-il en déduire que la locomotion bipède ne peut pas être réalisée par une machine ? Assurément pas, bien au contraire, elle sera certainement réalisée un jour mais pour l'instant on est loin du compte et on peut s'estimer heureux dans ces systèmes de locomotion à pattes d'avoir des réussites (USA, Japon ...) : un robot à six pattes (hexapode) parfaitement capable de monter un escalier. Lorsqu'on se fixe sur la locomotion bipède il faut reprendre les études à zéro. Les travaux les plus remarquables dans ce domaine a été conduit aux Etats-Unis, au Carnegy Mellon. Marc Raibert est parti d'une recherche de base sur l'équilibre de la marche, sur une seule jambe, puis sur deux jambes, travail remarquable qui a demandé de très gros efforts mais qui est encore loin de pouvoir être transposé dans une machine opérationnelle : ce robot tient quelques secondes debout puis il tombe. (figure n°3)

Venons-en aux deux autres grandes fonctions : celle de la perception de l'environnement, et celle du raisonnement.

La fonction "percevoir l'environnement de travail"

Cette fonction est absolument nécessaire pour déterminer quel est l'état de la tâche, c'est-à-dire pour pouvoir effectivement travailler d'une manière autonome avec une capacité décisionnelle. Pour y parvenir, il faut dans des degrés très divers :

- être capable de localiser où l'on est et où est l'objet à manipuler, que l'on veut toucher, sur lequel on veut appuyer,
- être capable d'analyser et de reconnaître les choses de l'environnement, (c'est très difficile),

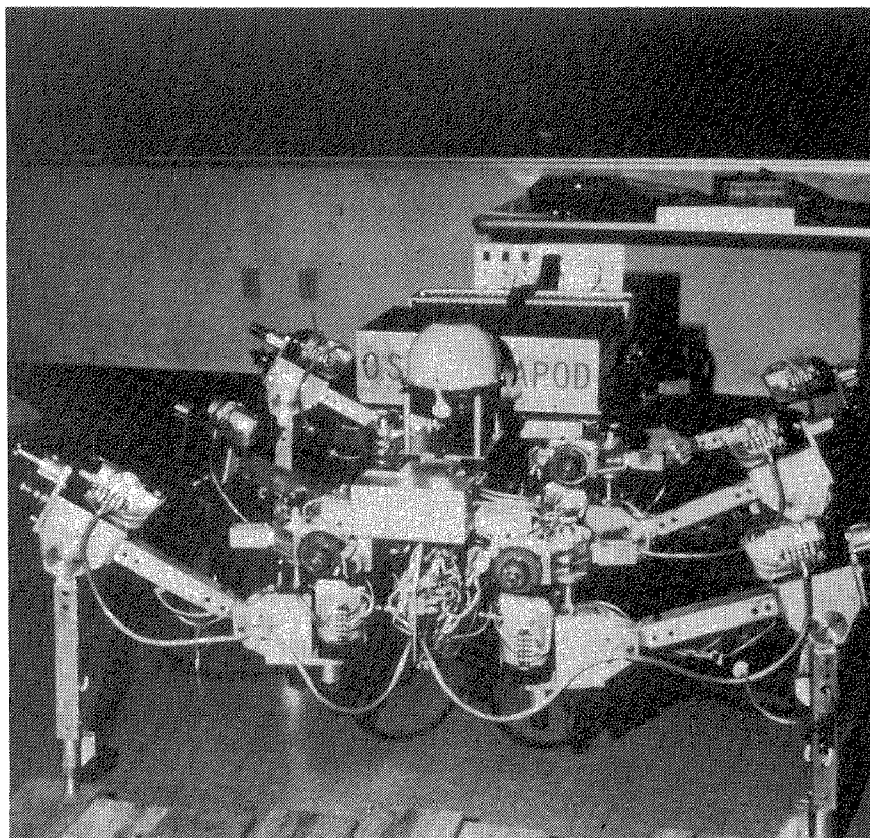
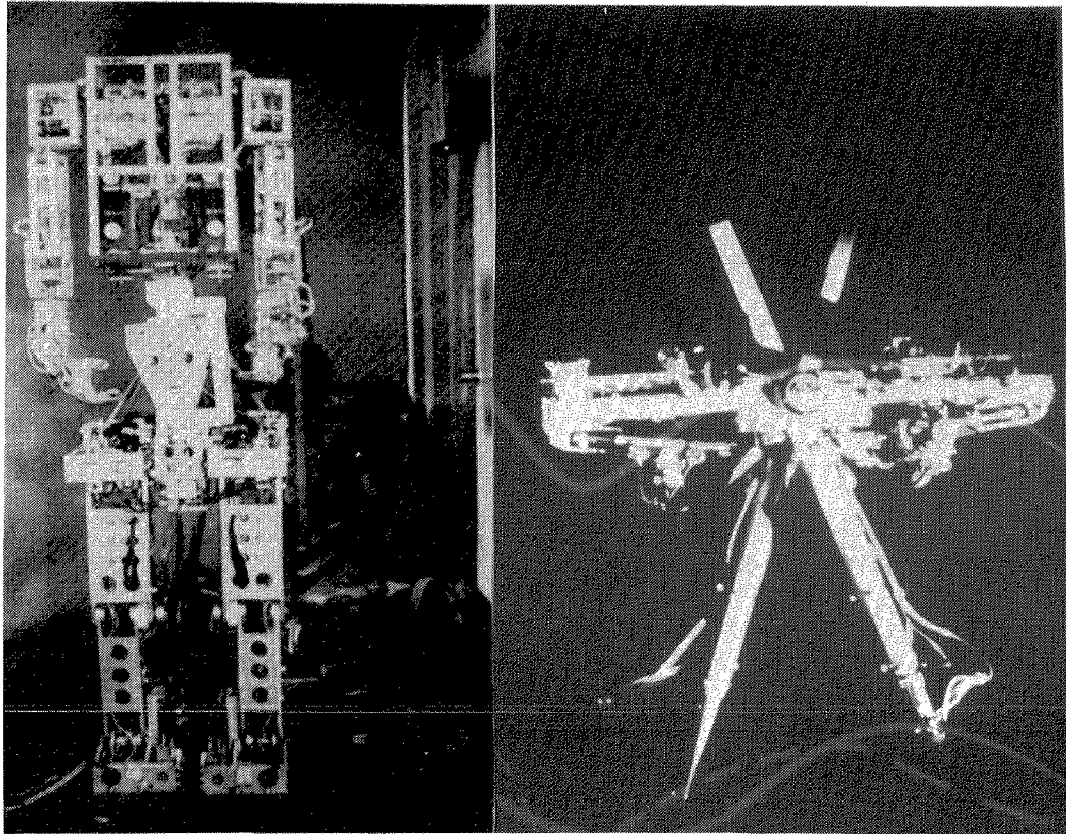


figure n°3

- il faut enfin utiliser la perception pour pouvoir contrôler l'exécution du mouvement, donc pour avoir des boucles réactives qui maîtriseront les actions en fonction de la tâche en cours d'accomplissement.

Pour cette fonction nous disposons aujourd'hui de moyens instrumentaux importants, que je n'énumérerai pas en totalité dans le détail :

- il y a des **moyens technologiques** : caméras, radars etc...

- il y a des **moyens algorithmiques, informatiques et mathématiques** qui permettent de faire la stéréovision, vision à deux yeux pour l'homme alors que dans le monde des robots il est préférable de disposer de trois "yeux". Les systèmes actuels les plus efficaces sont donc tri-caméras : cela permet d'avoir des traitements informatiques beaucoup plus rapides et beaucoup moins sujets à l'erreur.

Dans ce domaine de la perception nous avons un grand thème de recherche scientifique que l'on appelle la **fusion multisensorielle**.

Qu'est-ce que cela signifie ? Nous ne sommes pas obligés de ne donner que des yeux à la machine, nous pouvons recourir aux ultra-sons, (les chauve-souris, les dauphins utilisent les ultra-sons comme moyen de percevoir l'environnement), nous pouvons disposer d'un radar, ou si le radar ordinaire ne convient pas l'équiper d'un radar laser, susceptible de donner une mesure de profondeur directement par le retour d'écho comme pour un radar électromagnétique normal. Donc, si on a tous ces capteurs différents, il faut pouvoir intégrer toutes ces informations et de la manière la plus consistante possible par rapport aux propriétés de chaque capteur et par rapport aux propriétés de ce que l'on regarde. La fusion multisensorielle constitue un des problèmes clé à résoudre aujourd'hui en robotique.

Cela entraîne deux grandes catégories d'opérations :

- d'abord faire ce que dans le jargon de l'informatique et de l'automatique, on appelle les filtrages numériques ; les paramètres descriptifs tels que les distances vont être mesurés par plusieurs systèmes à la fois. On aura donc plusieurs estimations de la même valeur.

- il faut ensuite combiner ces résultats, ce qui se fait très bien, et sans vouloir faire trop de jargon, de manière optimale en utilisant des filtres statistiques.

- il est important de noter qu'il faut également, raisonner sur les entités et les attributs utilisés pour modéliser l'environnement et sur les propriétés physiques de chaque capteur, c'est-à-dire raisonner qualitativement sur les *entités perceptives* en prenant en compte le fait qu'elles sont obtenues par des moyens physiques différents (une caméra, un émetteur récepteur ultra sonore, un télémètre laser, un radar ...). Prenons un exemple en analysant le cas d'un robot qui va mesurer une vue en coupe de son environnement. Il va donc s'intéresser à l'espace vide et aux obstacles, essayer de comprendre l'espace en déterminant où il y a de l'espace vide et où il y a des obstacles pour pouvoir se déplacer. Pour cela il suffit d'un laser qui balaie horizontalement la scène, qui vous donne une vue en coupe de là où il y a des couloirs de passage et là où il y a des obstacles.

Imaginez que vous voulez avoir quand même le plan de votre salle et que ce soit le robot lui-même qui effectue cette modélisation de l'environnement, fasse la carte de la salle. Ce que l'on a ce sont des points de mesure laser. Ensuite on extrait l'information pour créer finalement le modèle, ici par exemple des segments de ligne droite dans une vue polygonale de la scène. A partir de cette première perception faisons que le robot se déplace (**figure n°4**).

Il va acquérir de nouvelles mesures et se trouver devant le grand problème clé de la fusion multisensorielle car il doit essayer de superposer les informations nouvelles qu'il vient d'obtenir aux informations anciennes pour créer le modèle le plus cohérent de l'ensemble. Etape par étape il va finalement effectivement obtenir un modèle de son environnement constitué par un plan du lieu. Dans l'exemple particulier que je vous présente il va procéder en 7 étapes, pour tourner autour d'une caisse dont il ne connaissait rien auparavant et il va très précisément déterminer sa position par rapport au reste de l'environnement tel qu'il vient de le percevoir et modéliser. A chaque étape il a *dû raisonner pour décider* si oui ou non les signaux complémentaires qu'il a recueilli correspondaient à telle ou telle partie de ce qu'il avait acquis au préalable, puis a eu recours à du filtrage numérique pour estimer au mieux les paramètres. En résumé il doit raisonner à chaque étape puis il doit passer au calcul, au filtrage numérique. Le plus difficile c'est la partie qualitative, le raisonnement, la correspondance qu'il doit faire entre ce qu'il perçoit et le modèle qu'il a déjà acquis.

Il y a encore un problème plus difficile : reconnaître un objet générique, une chaise par exemple qui n'est définie à l'exclusion de ses dimensions que par des propriétés fonctionnelles et de structure. Il s'agit d'un problème aujourd'hui très ouvert

que l'on ne sait traiter que dans des conditions particulières. Aucun robot aujourd'hui en fonctionnement ne pourrait courir le risque de faire un tel travail : cela demande en particulier des temps de calcul extrêmement importants. La fonctionnalité dont on sait

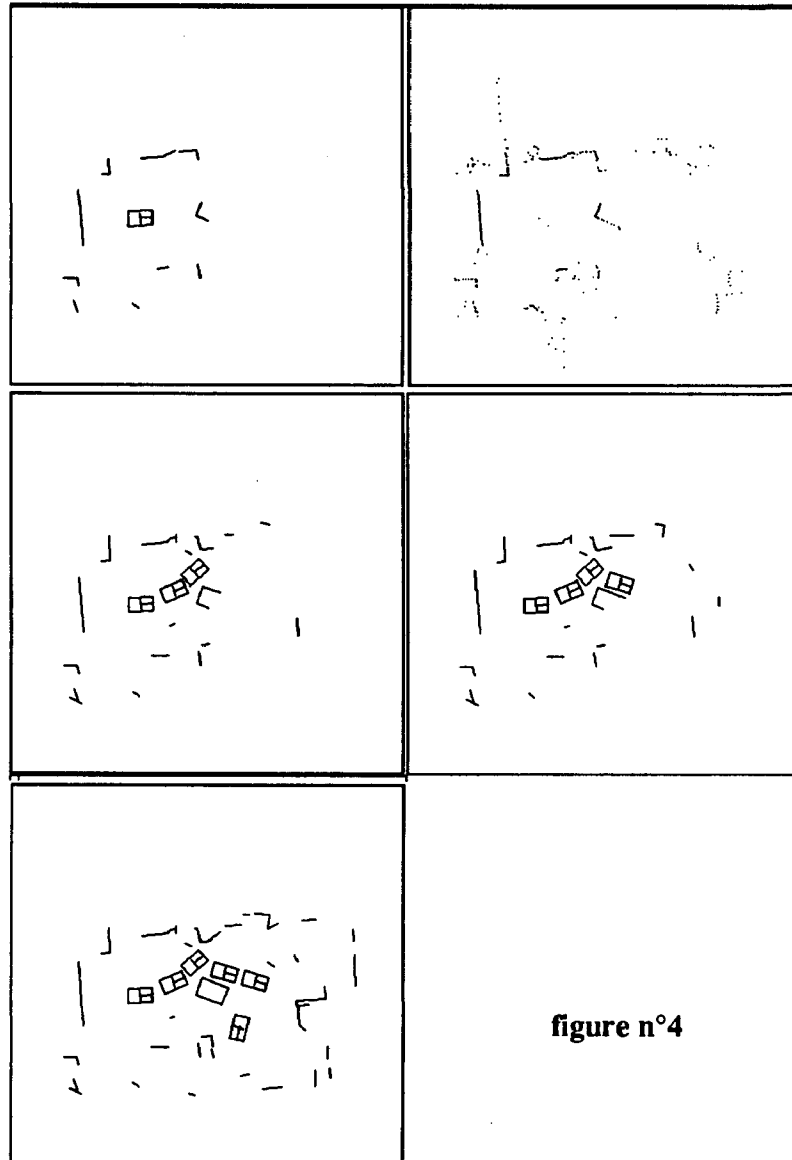


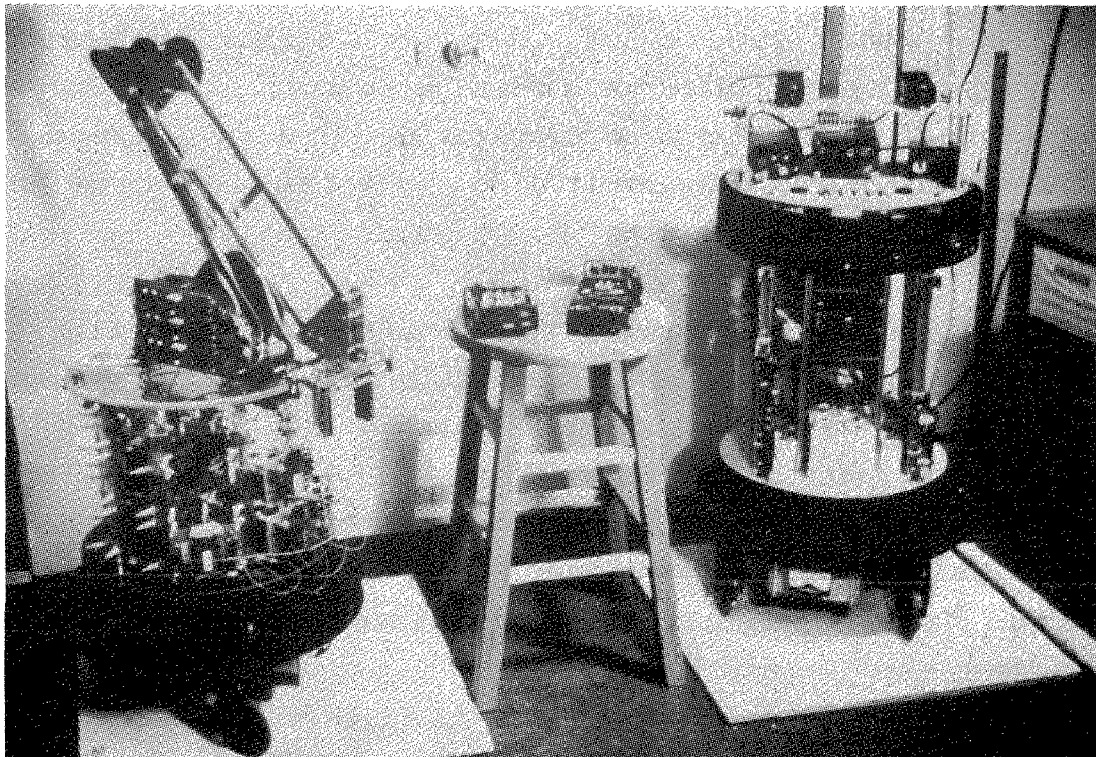
figure n°4

aujourd'hui doter un robot se limite à des capacités de modéliser l'espace autour du robot et identifier des objets spécifiques pour lesquels on a des descripteurs numériques préalables qui ont été donnés soit dans un contexte industriel, soit dans le contexte d'un travail en milieu libre.

Je vais passer au dernier point, celui du contrôle.

La fonction "raisonnement, décision et contrôle d'exécution"

Il existe deux grandes approches pour ce problème. Au début de mon exposé j'ai évoqué "la rencontre du mythe", bien représentée par les "créatures" du MIT. Comme vous pouvez le voir (**photo n°5**) ces robots ne sont pas non plus des petits hommes verts avec des antennes, ils ressemblent curieusement d'une certaine manière à Hilare sauf les plus petits.



Deux d'entre eux vraiment minuscules ont des capacités de fonctionnement vraiment extrêmement réduites, les deux autres sont des réalisations plus ambitieuses ; il s'agit de Allen et Seymour (R. Brooks donne des prénoms à tous ses robots!). Essayons de définir l'approche évolutionniste et , il parle non seulement "d'insectes artificiels" mais aussi "d'êtres-robots". Il commence par définir et construire des niveaux de "comportement" élémentaires, à partir de là il construit une hiérarchie de ces "comportements" avec des possibilités d'inhibition et d'activation d'un comportement sur l'autre.

La deuxième approche que je n'hésite pas à appeler "mécaniste et systémique" celle qui est suivie par mon groupe et plus de 95% des chercheurs dans le domaine de la robotique, conduit, elle, à des «*machines intelligentes et programmables*», au

niveau tâche. Si je voulais créer un nouveau terme comme R. Brooks, en parlant "d'êtres-robots" je dirais que ce qui m'intéresse ce sont des "machines orthèse", c'est-à-dire des outils, des machines prolongements et non pas concurrentes de l'homme. Dans cette approche le très grand problème c'est de doter la machine de capacités de planifier, de raisonner sur les tâches et d'en contrôler l'exécution.

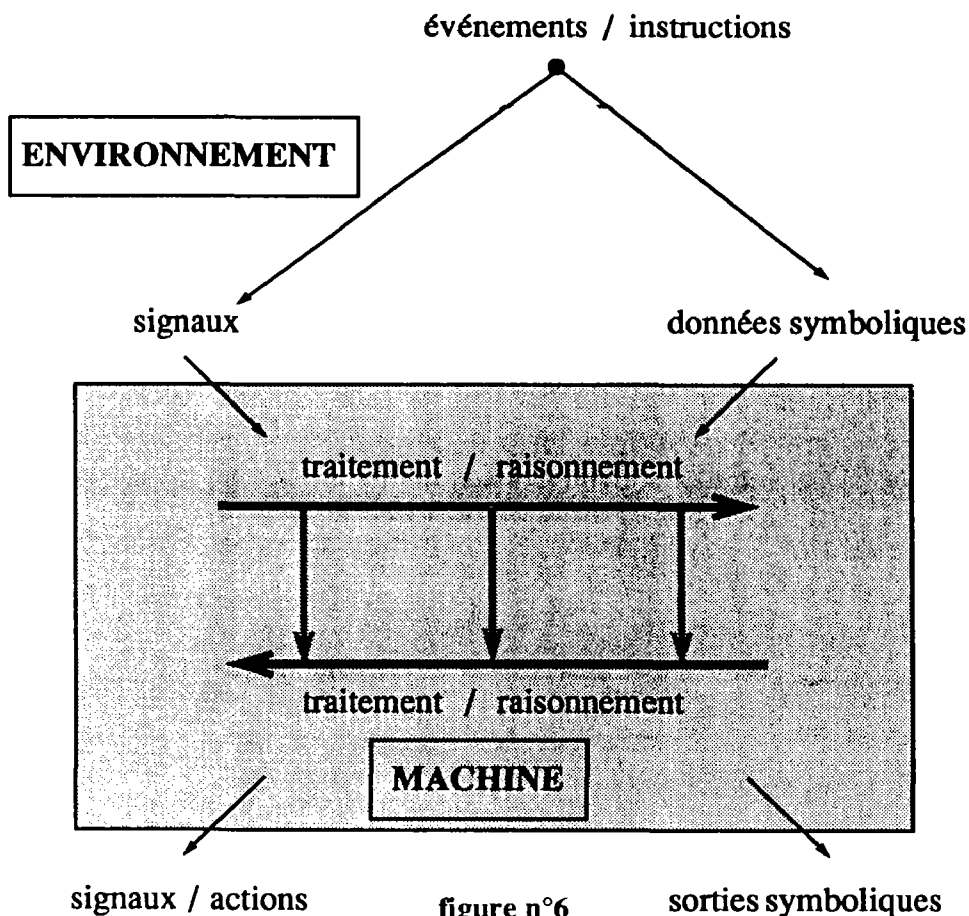
Lorsque je parle d'autonomie opérationnelle et décisionnelle ce qui est visé est juste le niveau suffisant pour exécuter effectivement la classe de la tâche pour laquelle on conçoit la machine. Je ne cherche pas à créer un "insecte artificiel" ou un "être robot", ce que je souhaite obtenir c'est une machine avec des capacités de perception et de raisonnement, juste ce qu'il faut pour que la tâche puisse être exécutée effectivement et efficacement. Il y a des tâches qui ne peuvent pas être exécutées sans un niveau "d'intelligence" c'est-à-dire de raisonnement et de décision, et c'est en cela que se sont des machines programmables niveau tâche.

Nous voulons faire des machines programmables avec des capacités de raisonner, dotées en somme d'une certaine capacité "intellectuelle". Ne risquons-nous pas la critique suivante : "En préconisant des capacités de raisonnement et de décision, vous mettez en place une structure centralisée qui conduit le robot pour chaque événement, par exemple un signal de présence d'obstacle devant lui, à faire remonter cette information à travers les couches multiples de traitement pour que "l'intelligence" lui permette de décider de ce qu'il y a lieu de faire, peut-être s'arrêter, peut-être changer de direction. Et lorsque ces "décisions" arriveront comme des signaux, des ordres au moteur de la machine il sera trop tard et l'obstacle aura déjà été percuté. Vous devez privilégier les comportements -c'est-à-dire les réflexes- mettez donc plutôt en oeuvre des processus réactifs"? Cette réplique est tout à fait pertinente dans ces attendus, mais elle ne s'applique en rien à l'approche que nous préconisons de suivre (c'est tellement vrai que la première chose que nous avons faite dans mon laboratoire a été de doter le robot Hilare de processus réflexes. Ce dont le robot a été capable en premier lieu a été de se déplacer sans se cogner contre les obstacles, de pouvoir longer un mur en étant asservi par des échos ultra sonores à une distance déterminée par rapport à celui-ci).

Quel est donc notre paradigme de cette *machine programmable* ? Il est graphiquement résumé par la **figure n°6**, sous celle-ci apparaissent les niveaux auxquels s'effectuent les "entrées" : réception de signaux, instructions. Apparaissent également les transformations internes dans la machine qui vont du signal valeur purement numérique attachée à la mesure d'un capteur, par exemple distance d'un objet mesurée par un

écho ultra sonore, à des représentations abstraites telles que certaines instructions, par exemple, aller à la porte rouge, des représentations de connaissances par exemple, l'objet est une table blanche.

Symétriquement apparaissent également les transformations qui ont lieu au sein de la machine entre les entrées abstraites, symboliques et les signaux-action que la machine exerce par rapport à son environnement. Des passages, nous disions des boucles de fonctionnement, existent en des niveaux multiples entre les deux processus de traitement que nous venons de voir. Ces passages contiennent bien entendu la boucle réflexe pure (extrémité gauche de la figure) et contiennent également la boucle de raisonnement pure (extrémité droite de la figure). Ceci inclut tout naturellement la mise en oeuvre des processus réactifs rapides de type réflexe, mais également la boucle raisonnement qui seule permet à la machine d'interpréter un ordre exécutable dans le contexte particulier tel que perçu par la machine d'une tâche en cours.



Concrètement, si l'on adopte ce point de vue traduit par ce paradigme : en quoi vont consister réellement ces structures de raisonnement, de décision et de processus

réactifs à mettre en oeuvre ? D'abord il faut considérer l'homme qui commande la machine. Il doit bénéficier d'aide, d'outils qui lui permettent de bien programmer celle-ci. Ces outils, cette aide sont constitués de moyens informatiques importants qui lui permettent de produire un programme niveau tâche, qui soit bien construit et qui corresponde effectivement aux tâches qui doivent être exécutées. Considérons maintenant la machine physique. Celle-ci traduit dans sa structure interne le paradigme que nous avons évoqué précédemment. Le programme produit va pouvoir être reçu, interprété, affiné à travers les boucles de raisonnement symbolique prévues à cet effet.

Le plan d'action initial produit par l'opérateur, le programme au niveau tâche est ici transformé en un plan, de séquence d'instructions exécutables par la machine, compte tenu des mécanismes de perception qu'elle met en oeuvre et de l'état réel de la tâche. Il me reste maintenant à exécuter effectivement ce "plan", ce "programme niveau tâche". C'est le rôle du contrôle d'exécution qui va mettre en oeuvre les moyens qui me permettent de confronter le programme à la réalité et, en fonction de celle-ci, d'en assurer une exécution correcte.

Cette dernière fonctionnalité ajoute une dimension de plus à une difficulté déjà très grande ; La mise en oeuvre réelle du paradigme ici évoqué, ce n'est pas un sujet au passé c'est le sujet au présent et au futur.

A vrai dire que signifie raisonner pour une machine ? Quel genre de raisonnement cette machine va-t-elle faire ? Parmi des modes de raisonnement très importants on doit pouvoir effectuer des raisonnements en modes logique, temporel, géométrique... Un de ces modes domine aujourd'hui tous les autres. Bien sûr les tâches accomplies peuvent être très diverses (prendre une caisse quelque part, prendre position à côté d'un objet, ou assembler des objets...), mais il y a un dénominateur commun : dans tous les cas, il y aura nécessité de mouvement, de déplacement.

Il y a une chose à laquelle on ne peut pas échapper, on doit pouvoir raisonner sur l'espace et sur les objets, sur les entités physiques à 3 dimensions, donc on est nécessairement en présence d'un problème de **raisonnement géométrique** et spatial et de contrôle du mouvement. Que ce soit pour des robots mobiles ou pour un bras manipulateur, si on est en présence de ces problèmes d'autonomie décisionnelle et opérationnelle, il faut nécessairement disposer quelque part de moyens informatiques et mathématiques qui permettent de raisonner en géométrie et sur les propriétés de l'espace.

Voyons très rapidement une démonstration de certains problèmes évoqués précédemment (**figure n°7**). Il s'agit de faire exécuter au robot HILARE un mouvement

qui lui permettra de prendre une position déterminée dans un box en fonction de son point de départ et de son point d'arrivée, et des contraintes d'espace et de l'environnement. Le robot doit déterminer seul les manoeuvres à effectuer. Considérons la similitude avec le problème du parking d'une voiture : comme pour une voiture Hilare est un système "non-holonyme", c'est-à-dire -nous le savons bien- que certains mouvements -tels que les mouvements latéraux- sont impossibles. Le système de raisonnement géométrique dont est doté Hilare va effectivement produire automatiquement la série des mouvements et manoeuvres qui lui permettront de passer en marche arrière, rentrer en marche arrière, s'orienter et avancer. Dans cet exemple avant d'exécuter le mouvement il produit un plan d'action qui lui permet d'atteindre l'objectif. Ce n'est qu'ensuite que ce plan est effectivement effectué à travers les autres niveaux fonctionnels de la machine.

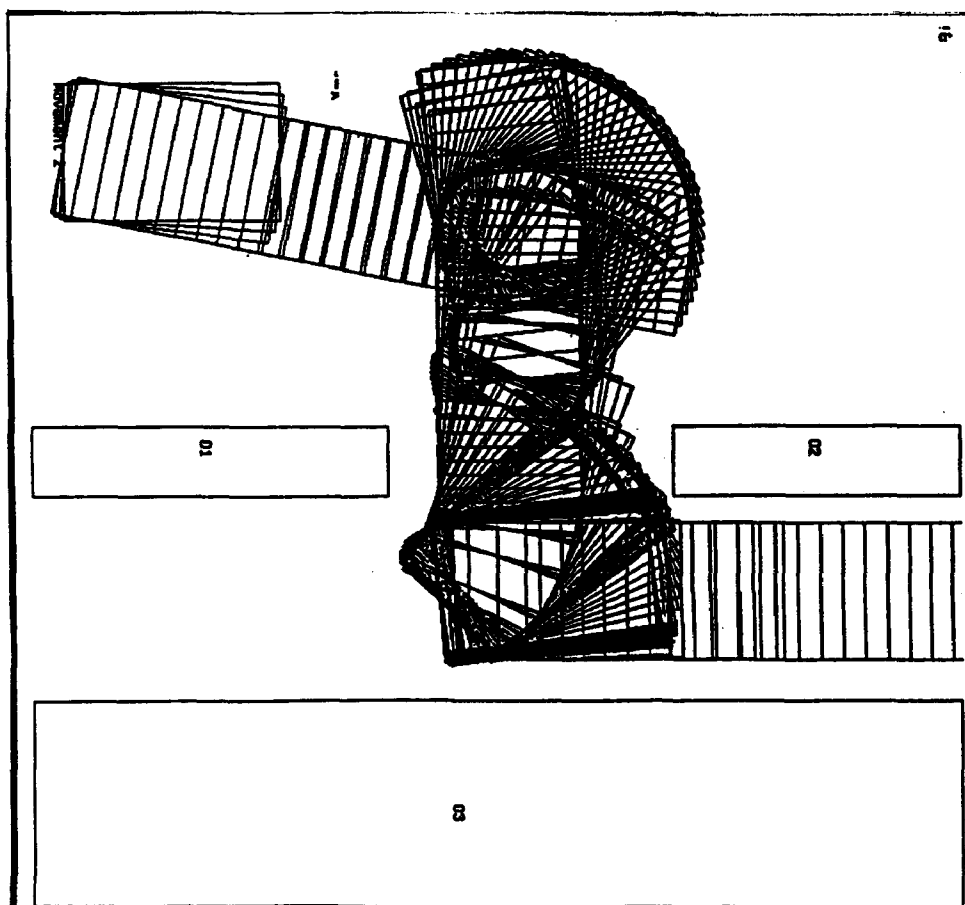


figure n°7

Est-ce que le résultat est satisfaisant dans cet exemple, est-ce que nous avons résolu le problème ? Non pas complètement parce que si vous regardez son "plan"

vous pouvez voir que ce robot n'est pas très intelligent car il fait vraiment beaucoup trop de manoeuvres.

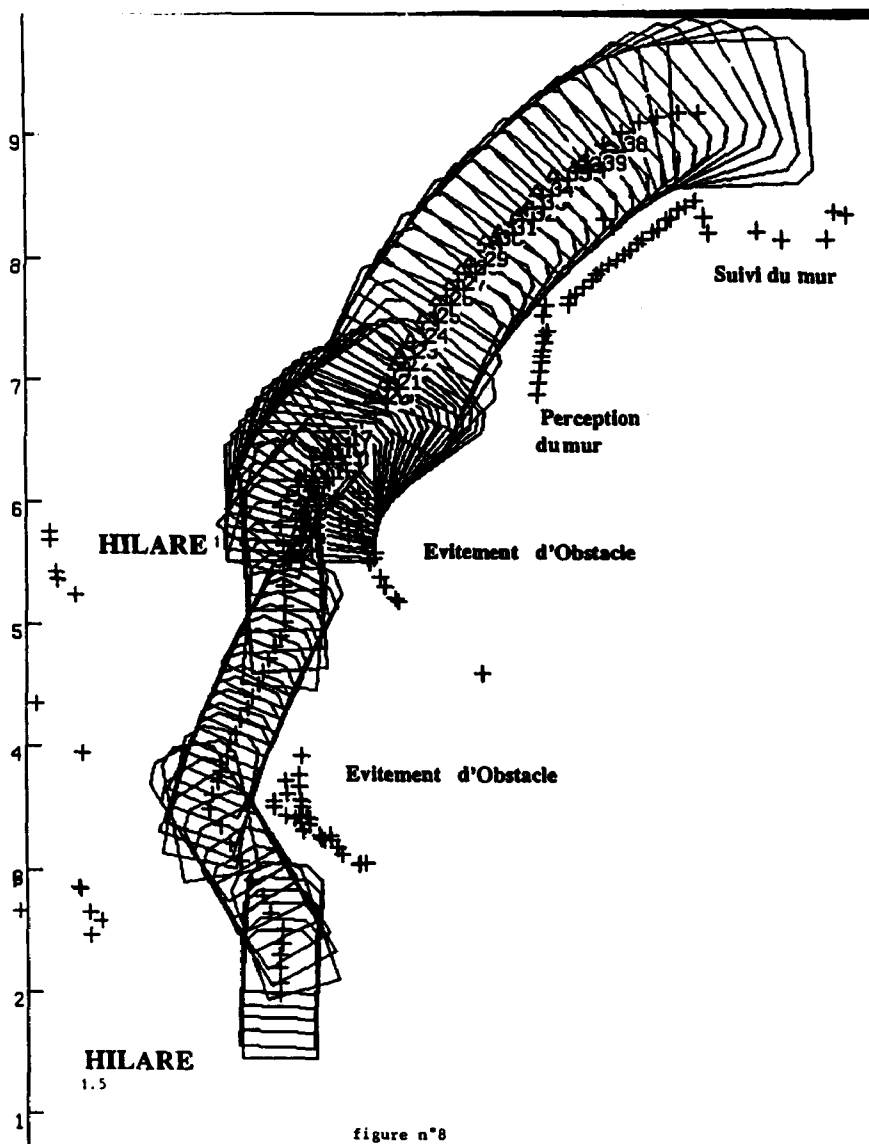
L'un des axes de recherche sur lequel beaucoup d'entre-nous travaillons dans le domaine très difficile de génération de trajectoire dans les espaces contraints, avec des robots possédant des contraintes cinématiques, c'est de pouvoir optimiser le nombre de manoeuvres que fait le robot, tâche que vous et moi avons appris à faire au volant de notre voiture.

Considérons un second exemple (**figure n°8**), voilà deux robots "intelligents", Hilare 1 (un télémètre laser, émetteurs-récepteurs ultra sonore...), Hilare 1.5 (stéréovision 3 caméras, télémètre laser, ultra-son...). La démonstration expérimentale porte sur un exemple compliqué de programmation de niveau tâche. On va demander à Hilare 1 d'aller suivre un mur et de se "garer" dans une place particulière qui lui est désignée comme l'objectif final sans lui dire s'il va rencontrer ou non des obstacles en chemin. Il faudra qu'il se débrouille pour atteindre malgré tout son objectif.

Hilare 1.5 ; on va lui fixer l'objectif de poursuivre le premier robot (sur la figure leur différence de taille permet de les identifier). Les deux machines vont planifier séparément leurs tâches. La deuxième compte tenu de la première qu'elle doit poursuivre. Elle détecte sa cible en utilisant son système de stéréovision. La figure résume graphiquement les différents mouvements effectués à la fois par Hilare 1 et Hilare 1.5, remarquez en particulier le contournement d'obstacles imprévus qui est effectué, comme le suivi de mur, en utilisant les systèmes émetteurs récepteurs ultra-sonores des deux robots.

Conclusion

Arrivés au terme du temps qui m'est imparti, il faut encore m'accorder trois minutes pour conclure. Regardons comment se présente la décennie 90. D'abord les perspectives scientifiques sont absolument excellentes car ces machines "intelligentes", (j'espère qu'à chaque fois que je vous en ai parlé j'ai laissé le sens du mot intelligent au niveau raisonnable), sont réellement un vecteur de recherche essentiel dans un autre thème dont vous entendez beaucoup parler l'Intelligence Artificielle. Ceci est vrai de "*l'être-robot*" du MIT mais cela est très vrai aussi de la "*machine orthèse*" du LAAS, de la *machine programmable* qui est le gros de la recherche de bien des laboratoires en France et dans le monde entier.



Au niveau scientifique cela induit vraiment de grands axes de travail passionnants qui portent sur les modèles de raisonnement logique, temporel, géométrique, sur les structures et les processus de décision en temps réel, sur la fonction manipulation, sur la compréhension de l'espace et de l'environnement... Je suis obligé d'aller vite et ne peux évidemment pas les détailler. Dans cette énumération un seul terme que je n'ai pas utilisé au cours de mon exposé, et je l'ai fait exprès pour éviter une dimension de plus dans la difficulté, c'est le terme apprentissage, qui correspond cependant à une des grandes fonctionnalités auxquelles nous travaillons en robotique avancée.

J'ajoute également un mot rapide sur l'impact socio-économique. Il est, je le crois fermement, très important aujourd'hui et pour la décennie à venir. Dans l'atelier de fabrication où le premier robot manipulateur a commencé sa carrière, mais également et surtout hors de l'atelier dans ce vaste domaine d'activités diverses qui vont de notre environnement naturel, agriculture, gardiennage, nettoyage industriel jusqu'à des applications de très grande envergure pour l'humanité en milieu "hostile", fonds sous-marins, l'intervention en cas de catastrophes naturelles, l'espace.

Sur ce type d'applications j'aurais encore des quantités de transparents à vous montrer : les deux photos présentées sont il me semble de bonnes illustrations. Bien sûr cette recherche sur des robots, pour le domaine non manufacturier représente un véritable laboratoire de la recherche avancée en robotique. Cela a un impact direct sur des applications nouvelles et fait l'objet de grands projets nationaux ou internationaux avec des retombées extrêmement importantes en robotique industrielle. (Je n'ai pas le temps de développer ce point).

Je voudrais dire pour terminer c'est qu'il y a une présence et un dynamisme très important des équipes françaises à travers les grands projets. Je ne peux évidemment pas vous les présenter. Juste un mot pour vous signaler le dernier ; un groupement RISP, Robot d'Intervention sur Site Planétaire (CEA, CNRS, INRIA, ONERA; Président : G. Giralt) qui comprend des laboratoires de Grenoble, Nice, Paris et surtout Toulouse, en relation avec le CNES, étudie le problème de réaliser un robot en vue d'explorer la planète Mars à l'usage des scientifiques.

Georges GIRALT
Directeur de Recherche au CNRS
Président du groupement "Robots
d'intervention sur site planétaire"

