

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

COMMUNICATION VISUELLE PAR SIGNALEMENT
LUMINEUX AVEC UN ROBOT MOBILE

Mémoire de maîtrise en sciences appliquées
Spécialité : génie informatique

Minh Tuan VU

RÉSUMÉ

Concevoir un robot mobile autonome pouvant opérer dans des environnements courants est un défi de taille. Il demande au robot de faire face à une variété de situations dans des conditions dynamiques et imprévisibles, et ce avec des moyens limités pour la perception, le traitement et l'action. Le robot est aussi sujet à devoir interagir avec d'autres intervenants, humains, robotiques ou autres. À cette fin, la communication s'avère une capacité intéressante pour interagir avec les autres et pour obtenir des informations venant contrer certaines des limitations du robot.

La communication avec les robots s'effectue habituellement par lien électronique. Cette façon de faire permet de transmettre une grande quantité de données, mais ne donne pas en soi des indications importantes sur le contexte des informations transmises (comme par exemple la position relative de l'interlocuteur). Une autre possibilité, une communication par voie visuelle est une nouvelle approche, technologiquement réalisable, qui permet de fournir des informations additionnelles aux messages échangés. Le présent mémoire décrit un mécanisme de communication par signalement lumineux qui fut développé dans le but d'étudier les avantages et les inconvénients de la communication visuelle comme moyen d'interaction entre un robot et son entourage. La validation pratique du mécanisme avec un robot Pioneer I est aussi présentée dans le cadre d'expériences demandant au robot d'interagir avec un intervenant humain.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier mon superviseur de maîtrise M. François Michaud pour m'avoir donné la chance de travailler dans le domaine de la robotique mobile et de m'avoir fourni les outils techniques nécessaires à la réalisation de mon projet. De plus, je suis très reconnaissant de son encadrement dans ma formation de chercheur.

Je voudrais aussi remercier les techniciens M. Yvon Turcotte et M. Serge Caron pour leur aide dans la conception électrique du dispositif lumineux et de son interface avec le robot. Je les remercie aussi de leur assistance pour la maintenance du robot.

Également, je voudrais remercier M. Serge Bérubé de m'avoir fourni l'emplacement et les équipements nécessaires pour faire mes expériences.

De même, je voudrais souligner la contribution de Vu Thi Thu Giang pour le support technique dans la réalisation de ce document.

Finalement, je tiens à remercier les membres du groupe de recherche LABORIUS, ainsi que les professeurs et amis qui ont contribué à mon projet par leurs opinions et leurs commentaires.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
2	Concepts fondamentaux en robotique mobile	3
3	Concepts rattachés à la communication.....	7
3.1	Rôles de la communication.....	7
3.2	Types de communication	8
3.2.1	Communication par lien télépathique.....	9
3.2.2	Communication par langage externe	10
3.3	L'étude de la communication visuelle.....	14
4	Description de l'approche de la communication visuelle par signaux lumineux avec un robot mobile.....	16
4.1	Description du robot utilisé pour la communication visuelle.....	16
4.2	Description de l'architecture de contrôle.....	18
4.3	Description du mécanisme de communication	21
5	Expérimentations	25
5.1	Performances de communication.....	25
5.2	Gestion des buts par communication de motifs	27
5.2.1	Description des mécanisme de contrôle du robot	27
5.2.2	Résultats.....	34
5.3	Jeu de passe.....	43
5.3.1	Contexte du jeu de passe.....	44
5.3.2	Description des mécanismes de contrôle du robot	46
5.3.3	Résultats.....	50
5.4	Discussion.....	53
6	Conclusion	56
	Bibliographie	58

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Éléments d'un robot mobile autonome	3
Figure 2.2	Approche comportementale avec arbitration par priorité	5
Figure 3.1	Communication par lien télépathique	9
Figure 3.2	Communication par langage externe.....	10
Figure 4.1	Robot Pioneer I équipé d'un dispositif de signalement (à côté de la caméra), et un lampe de poche utilisée par l'intervenant humain	17
Figure 4.2	Interface électrique entre le robot et le dispositif de signalement.....	18
Figure 4.3	Architecture de contrôle utilisée	19
Figure 4.4	Module <i>Cognition</i> et les comportements <i>Écouter</i> et <i>Parler</i>	22
Figure 4.5	Diagramme d'états du protocole de communication pour le signaleur.....	23
Figure 4.6	Diagramme d'états du protocole de communication pour le récepteur	24
Figure 5.1	Limites de la perception du dispositif de signalement lumineux	26
Figure 5.2	Hiérarchie de priorité des comportements pour l'expérience de gestion des buts par communication de motifs	29
Figure 5.3	Correspondance entre l'activation et l'énergie d'un motif.....	32
Figure 5.4	Les facteurs d'influence du motif <i>Détresse</i>	33
Figure 5.5	Facteurs d'influence des motifs <i>Recherche</i> , <i>Proche-mur</i> , <i>Poursuite</i> et <i>Errer</i>	34
Figure 5.6	Enclos utilisé pour les expériences.....	35
Figure 5.7	Niveaux d'énergie des motifs pour le test 1	37
Figure 5.8	Niveaux d'énergie des motifs pour le test 2.....	39
Figure 5.9	Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3.....	40
Figure 5.10	Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3, entre la 140 ^e à 145 ^e secondes	40
Figure 5.11	Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3, entre la 250 ^e à 255 ^e secondes	41
Figure 5.12	Jeu de la balle entre le robot et l'intervenant humain	43
Figure 5.13	Diagramme des modes de fonctionnement du robot pour le jeu de passe	45
Figure 5.14	Stratégie générale pour la passe, illustrée pour une passe vers la droite du passeur	46
Figure 5.15	Fonctionnement du comportement <i>Passer</i>	47
Figure 5.16	Représentation schématique des déplacements réalisés par chaque comportement	48

Figure 5.17	Hiérarchie de priorité des comportements	50
Figure 5.18	Réception spontanée.....	51
Figure 5.19	Réception synchronisée	52
Figure 5.20	Trajectoire normale de réception de passe en présence d'un obstacle.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Taux de reconnaissances de codes	27
Tableau 5.1	Les conditions de recommandations Désirabilités de comportements par le module <i>Besoins</i>	30
Tableau 5.2	Conditions de recommandations Indésirabilité de comportements par le module <i>Besoins</i>	31
Tableau 5.1	Taux de reconnaissance des codes pour sept tests	42

1 INTRODUCTION

Concevoir un robot mobile autonome est un défi de taille, spécialement lorsqu'il doit opérer dans des environnements courants non adaptés à ses capacités. Par exemple, les édifices à bureaux et les marchés publics sont riches en situations dynamiques et imprévisibles. Les objets, les surfaces de roulement ainsi que les intervenants y sont très variés, créant ainsi des conditions d'opération complexes dans lesquelles le robot doit travailler.

La complexité de ces conditions est augmentée par les limitations inhérentes au robot aux niveaux de sa perception, de ses actions, du traitement et de la prise de décisions. Les senseurs sont bruités, imprécis et ne retournent qu'une mesure partielle de l'état de l'environnement, donnant une perception incomplète du monde par le robot. Les actionneurs sont aussi sujets à des imprécisions et on ne peut garantir leurs effets. Les microprocesseurs et les différents circuits électroniques (mémoire, convertisseurs analogiques-numériques, etc.) imposent des limites sur la complexité et la rapidité du traitement des informations. L'impossibilité du robot d'acquérir toutes les connaissances de l'environnement demande que les mécanismes de décision doivent exploiter le mieux possible les capacités du robot afin de combler le manque d'information.

Ainsi, à lui seul, un robot ne pourrait arriver à gérer tous les problèmes engendrés par ces limitations. Une manière d'en diminuer l'impact est de donner au robot la capacité de communiquer avec son entourage. Il pourrait ainsi obtenir des informations supplémentaires sur l'environnement, demander de l'assistance lors d'une impasse, transmettre des données utiles aux autres ou même leur formuler des requêtes. Les êtres vivants utilisent plusieurs moyens pour communiquer, comme par exemple les sons, les gestes, les touchers, les expressions faciales. Le choix dépend de la nature de l'information à échanger et des capacités (intellectuelles) des organismes impliqués. Les robots quant à eux utilisent principalement des moyens électroniques (comme par exemple des systèmes RF¹ (Mataric 1995, Balch 1994, Billard 1997)) pour se communiquer des informations. La technologie des télécommunications permet ainsi d'échanger de grande quantité de données. Par contre, ces

¹ RF (radio frequency): communication par onde radio avec une bande de fréquence donnée.

modes de communication ne fournissent aucune indication sur le contexte sous-jacent aux messages communiqués (comme par exemple la position de l'interlocuteur ou encore des références à des objets dans l'environnement). Ce type d'information doit être obtenu par d'autres systèmes et transmis par voie électronique, ce qui demande un échange de plus de données et un plus grand temps de traitement.

La communication avec un robot mobile serait améliorée si le moyen de communication était riche en information et moins exigeant en traitement. Une communication visuelle est une nouvelle approche, technologiquement réalisable, qui permet d'échanger des messages tout en fournissant des indications importantes sur le contexte des informations transmises. Le travail de recherche présenté dans ce mémoire consiste à valider une telle approche avec un dispositif de signalement lumineux installé sur un robot mobile ayant à interagir avec un intervenant humain.

Le mémoire est présenté en cinq chapitres. Le chapitre 2 présente les concepts fondamentaux en robotique mobile afin de mettre en évidence les problématiques sous-jacentes à ce domaine de recherche. Le chapitre 3 poursuit en présentant les concepts rattachés au processus de communication, et justifie le choix de la communication visuelle dans le contexte de robotique mobile. Le chapitre 4 décrit ensuite l'approche développée pour la communication par signalement lumineux. Le matériel, l'architecture de contrôle et le mécanisme de communication y sont présentés. Le chapitre 5 présente deux scénarios d'expérimentations avec un intervenant humain pour valider l'approche. Le premier consiste à formuler des requêtes au robot, et le second consiste à l'envoi d'une balle entre le robot et l'intervenant. Ceci est suivi d'une discussion sur les résultats obtenus, les avantages et les inconvénients de l'approche.

2 CONCEPTS FONDAMENTAUX EN ROBOTIQUE MOBILE

La robotique mobile est un domaine portant sur l'étude et le développement de robots qui ont la capacité de se déplacer et qui peuvent effectuer des tâches dans le monde réel. Elle peut s'avérer très utile dans différents champs d'application comme le transport de matériel dans les industries, ou des repas aux patients dans les hôpitaux, ou encore la distribution du courrier dans un édifice à bureaux. La robotique mobile peut aussi servir dans les milieux hostiles ou difficilement accessibles par l'humain, comme pour désamorcer une bombe, l'exploration spatiale ou sous-marine, le déminage, etc. Bien sûr, un robot mobile pourrait aussi servir à assister l'humain dans ses tâches courantes, comme passer l'aspirateur, tondre le gazon, ou encore tout simplement le divertir.

Peu importe le champs d'application, un robot mobile autonome est composé de trois groupes d'éléments : des senseurs, des actionneurs et d'un système de traitement. La figure 2.1, expliquée dans les paragraphes qui suivent, illustre ces éléments.

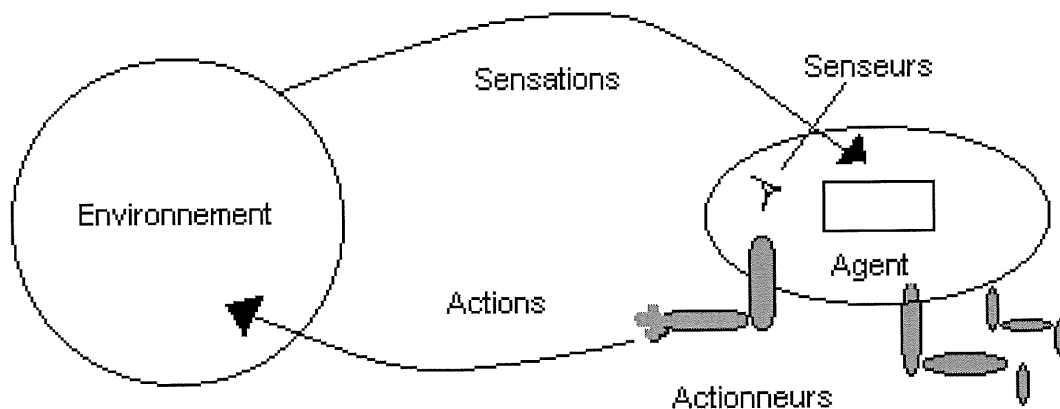


Figure 2.1 Éléments d'un robot mobile autonome

- **Senseurs** : les senseurs sont des dispositifs utilisés pour capter des informations sur l'environnement. Un sonar retournant une mesure de proximité face à un objet, une caméra retournant des informations visuelles ou un microphone mesurant des signaux acoustiques en sont des exemples.
- **Actionneurs** : les actionneurs sont des pièces électromécaniques ou électroniques qui permettent au robot de produire des actions. Par exemple, des moteurs munis de roues assurent le déplacement du robot, un manipulateur lui permet de prendre des objets, et un haut-parleur sert à générer des signaux acoustiques.
- **Système de traitement** : le système de traitement vient établir le lien entre les senseurs et les actionneurs. Cette interface est réalisée à deux niveaux : au niveau matériel à partir d'un circuit à microprocesseur, et au niveau logiciel par un programme indiquant comment les informations issues des senseurs doivent être traitées pour contrôler les actionneurs. L'« intelligence » du robot, c'est-à-dire les mécanismes de décision requis pour générer des comportements intelligents, font parties du système de traitement.

Le choix des composantes pour ces trois éléments dépend des besoins de la tâche à réaliser ainsi que de la technologie disponible. Des robots puissants d'une grande complexité peuvent maintenant être conçus dans des dimensions et des coûts raisonnables. Actuellement la plus grande difficulté consiste à développer les mécanismes logiciels du système de traitement, permettant au robot d'agir de manière autonome dans son environnement d'opération. La téléopération² permet de contourner cette difficulté, mais l'objectif de concevoir des robots mobiles autonomes anime toujours les recherches en intelligence artificielle.

La programmation du système de traitement se fait suivant les principes d'une architecture de contrôle. Cette architecture indique comment les modules nécessaires pour la prise de décision doivent interagir entre eux pour générer des comportements intelligents. En robotique mobile, deux grandes stratégies sont utilisées pour définir ces interactions : les approches comportementales et les approches délibératives.

² Téléopération signifie que le contrôle est fait à distance, souvent par un humain.

Les approches comportementales, issues des travaux de Brooks (Brooks 1986), sont composées de modules indépendants, nommés comportements, qui établissent des liens entre les senseurs et les actionneurs. Un comportement vient donner une sorte de compétence au robot en lui indiquant comment répondre aux situations rencontrées dans l'environnement. Comme exemple de comportements, un module peut servir à éviter les obstacles, un autre pour diriger le robot à un endroit donné, pour suivre les murs ou encore pour simplement faire avancer le robot. Les comportements agissent en parallèle et émettent les commandes correspondantes en fonction de ce qui est perçu ou des buts du robot. Selon les approches, un mécanisme d'arbitration sert à déterminer les commandes qui sont envoyées aux actionneurs du robot. Une façon simple est de hiérarchiser les comportements et de donner le contrôle à celui qui a la plus haute priorité. L'arbitration par priorité fut proposée par Brooks et est appelée en anglais *Subsumption*. La figure 2.2 illustre le principe. Le comportement 1 pourrait en être un pour éviter les obstacles, le second pour se diriger vers une cible, le troisième pour suivre les murs et le quatrième pour faire avancer le robot. En absence d'obstacle, de cible ou de mur, le robot ne ferait qu'avancer. À la rencontre d'un mur, il avancerait en suivant le mur. La perception d'une cible permettrait de l'orienter vers celle-ci. Par contre, en présence d'obstacle, ces comportements seraient interrompus pour permettre au robot d'éviter une collision.

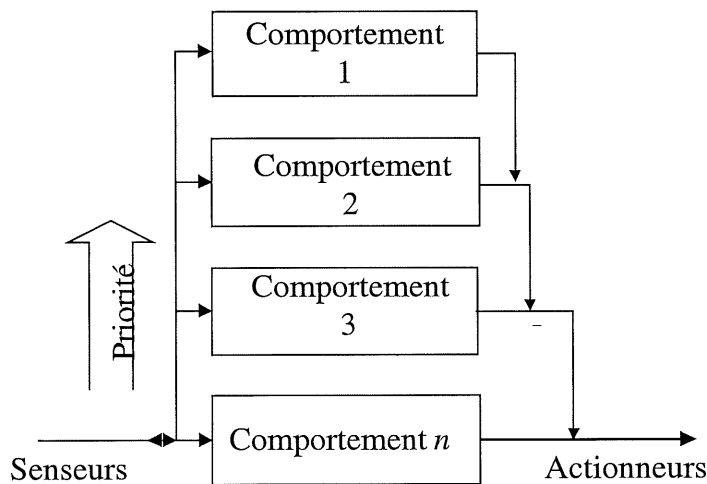


Figure 2.2 Approche comportementale avec arbitration par priorité

Remarquez que l'occurrence simultanée de toutes ces conditions n'est pas prise en considération lors de la conception de ces comportements. Chaque comportement répond à des conditions indépendantes et c'est le mécanisme d'arbitration qui gère comment les situations perçues sont traitées. L'introduction de l'approche comportementale démontra en fait la possibilité de faire émerger une fonctionnalité à partir de l'interaction de modules comportementaux et de l'environnement. Cette capacité s'avère essentielle pour permettre au robot de s'adapter aux situations continuellement changeantes de l'environnement.

Les modules comportementaux traitent les informations sur une courte échelle de temps, agissant un peu comme des réflexes. Un robot a toutefois besoin d'avoir plus que des réflexes pour augmenter son niveau d'intelligence. Les approches délibératives, quant à elles, cherchent à fournir des habiletés de raisonnement à un robot afin de lui permettre d'exploiter des connaissances de plus haut niveau sur son environnement. Un algorithme de planification qui dicte les actions à prendre à partir d'une carte interne afin que le robot se rende à un endroit précis en est un exemple. Bien qu'il soit difficile d'obtenir des connaissances complètes sur des environnements dynamiques et imprévisibles, il est possible d'effectuer des raisonnements sur différents aspects du robot comme par exemple la gestion de ses buts, l'information acquise ou communiquée par d'autres, d'où l'utilité des approches délibératives.

Donc, les approches comportementales sont propices à des environnements dynamiques et imprévisibles en raison de leur capacité à faire émerger une fonctionnalité. Par contre, pour des environnements stables et modélisables, les approches délibératives sont privilégiées pour apporter, en outre, la capacité de planifier les activités du robot. Les deux approches sont donc complémentaires et devraient être combinées. Bien qu'il n'existe pas encore de consensus sur la façon de combiner les approches comportementales et les approches délibératives (Arkin 1998), le principe de base consiste à reconfigurer les modules comportementaux selon des raisonnements effectués à plus haut niveau. Il reste encore beaucoup d'aspects à cerner sur la nature de ce couplage, et les expérimentations variées réalisées par les recherches dans ce domaine permettront de mieux comprendre ces principes.

3 CONCEPTS RATTACHÉS À LA COMMUNICATION

Dans l'introduction, il fut mentionné que la communication d'informations est utile afin d'atténuer les limitations inhérentes au robot. La communication est pour nous, humains, le moyen de transmettre des informations par le biais de langages écrits et oraux, de gestes, de regards, de touchers. Chez les animaux, la communication sert à avertir ses semblables du danger, à trouver un partenaire, à indiquer les sources de nourriture. Autant chez les animaux que chez les humains, la raison d'être de la communication est toujours la même : interagir avec les êtres de notre entourage. La même chose est vraie pour les robots. La communication peut donc prendre différentes formes et affecter de diverses façons le comportement du robot. Afin de mettre en évidence ces aspects, le présent chapitre décrit les caractéristiques de la communication, ses formes ainsi que son rôle en robotique mobile.

3.1 Rôles de la communication

En intelligence artificielle, la communication se définit comme étant l'échange intentionnel d'information par la génération et la perception de signes établis selon une convention (Russell et Norvig 1995). Cette définition est correcte au niveau du processus de communication, mais ne met pas en évidence l'impact des informations communiquées sur les interlocuteurs.

Les recherches en psychologie humaine ou animale mettent davantage d'emphase sur l'influence de la communication sur l'interlocuteur. Ruesch et Bateson (Sathré 1977) donnent une définition qui représente deux caractéristiques fondamentales de la communication : « La communication ne réfère pas seulement à la transmission des messages explicites, intentionnels et verbaux ... Le concept de la communication doit inclure les énoncés qui stipulent que les gens s'influencent les uns et les autres ». Cette définition est basée sur la prémisse que les événements et les actions possèdent des aspects communicatifs, à la condition qu'ils soient perçus par les humains. Ceci implique que les informations influencent celui qui les reçoit. Selon McFarland (McFarland 1992), la communication se définit comme suit : « Un animal A est dit avoir une communication avec un animal B lorsque

le comportement de A manipule les appareils sensitifs de B de manière à changer le comportement de B ». Ces deux définitions mettent en relief l'influence d'un interlocuteur sur un autre.

La communication viendrait en fait répondre à différents types de besoins (Adler 1991) : physiques, sociaux, d'identité et pratiques. Les besoins physiques sont ceux de survie comme manger, boire et se loger, ainsi que pour la procréation de l'espèce. Les animaux signalent leur désir de s'accoupler par des cris, par des déploiements de couleurs ou autres. Ils communiquent aussi à leurs semblables l'emplacement de nourriture. Il existe en fait une multitude d'exemples propres à chaque espèce. Les besoins sociaux, eux, englobent les besoins d'appartenance, de pouvoir et d'affection. Dans les meutes de loups, les jeunes courageux défient le chef du groupe par des combats, pour s'approprier son titre. L'engagement du combat se fait par la communication au travers de différentes gestes. Quant au besoin d'identité permet de définir qui nous sommes à travers l'expression de sentiments, d'émotions et d'états. Enfin, les besoins pratiques servent à répondre aux nécessités de la vie de tous les jours, comme par exemple un client demandant des informations sur un produit ou un service à un vendeur.

De la même façon, les échanges avec les robots pourront servir à transmettre des informations à l'interlocuteur et l'influencer dans ses actes, dans le but de satisfaire des besoins. L'acte de communication permet plus précisément de fournir des informations sur l'environnement, de formuler des requêtes et de donner des commandes, de formuler des engagements et de partager les expériences et les sentiments (Russell et Norvig 1995). Bien sûr, la décision de passer à l'action est régie par les règles de décisions internes indiquant comment traiter les informations reçues. La décision de ne pas passer à l'action est alors elle-même considérée comme une action.

3.2 Types de communication

La communication peut se faire de différentes manières et par différents moyens physiques. Au niveau des agents intelligents, il y a deux grandes types de communication (Russell et

Norvig 1995) : la communication par lien « télépathique » et la communication par langage externe.

3.2.1 Communication par lien télépathique

La communication télépathique est caractérisée par un accès à la base de connaissances (BC) du robot interlocuteur. Le robot utilise une interface, à travers une syntaxe du type *Dire*(*Base de connaissance, Proposition*) et *Demander*(*Base de connaissance, Proposition*), lui permettant de communiquer avec un autre robot. La figure 3.1 illustre le principe. Un agent A peut communiquer à un agent B une proposition P en utilisant *Dire*($BC_B, \langle P \rangle$), causant l'ajout de cette proposition dans les bases de connaissances des deux robots. La communication s'effectue en accédant directement aux bases de connaissances des robots. Cette communication nécessite que les robots partagent une même représentation interne et demande la synchronisation au niveau des symboles utilisés pour représenter les connaissances.

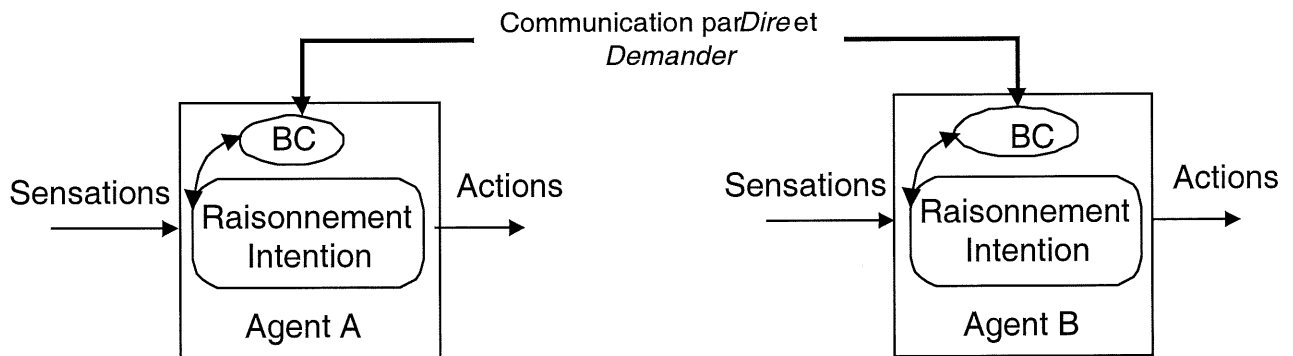


Figure 3.1 Communication par lien télépathique

Ce type de communication est mis en œuvre par des moyens électroniques comme les réseaux téléinformatiques et la transmission par ondes radio. Ces moyens de communication ont comme avantages un grand débit et une bonne portée de transmission. De plus, le mouvement des robots n'influence pas la communication. Toutefois, la perception de l'environnement n'est pas partagée, et même deux robots côte-à-côte ont besoin d'un autre

dispositif pour indiquer leur proximité mutuelle. Certaines recherches réalisées utilisent même la communication radio pour transmettre la position des robots obtenus par la triangulation (Mataric 1995, Parker 1992). Une telle configuration demande d'ajouter des dispositifs à l'environnement, et ne fonctionne alors que dans un certain périmètre. Un robot mobile ayant à opérer dans des environnements courants a besoin de moyens plus « naturels » et moins contraignants.

3.2.2 Communication par langage externe

À l'opposé de la communication par lien télépathique, la communication par langage externe ne requiert pas une représentation interne commune entre les robots. La communication s'effectue via un langage, sans accéder directement aux bases de connaissances des robots (Russell et Norvig 1995). Un robot prend des actions qui produisent les messages, que l'autre robot perçoit et interprète selon le langage partagé. La communication par langage externe est celle que les robots perçoivent par le biais des senseurs et génèrent par le biais des actionneurs. Tel qu'illustré à la figure 3.2, l'agent A communique à l'agent B avec l'aide d'actionneurs (par exemple un haut-parleur) et l'agent B perçoit ces manifestations avec ses senseurs et les interprète. De cette façon, chaque robot peut posséder une représentation interne différente et le langage sert de base commune pour la génération et l'interprétation des messages.

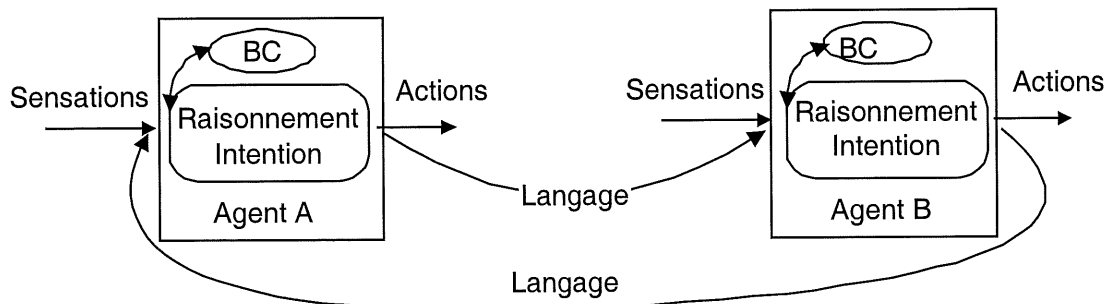


Figure 3.2 Communication par langage externe

Le processus de génération d'un message par les actionneurs et de sa perception par les senseurs repose sur deux aspects : le moyen physique utilisé pour communiquer et la structure du langage. Le moyen physique consiste en des capacités physiologiques pour produire les messages et pour les capter. Chez l'humain, ils peuvent être sonores (paroles), tactiles (le toucher) ou visuels (l'écriture, l'expression faciale, les gestes). La structure du langage définit les règles d'organisation et d'interprétation des messages. Les différentes langues, le sémaphore et le morse en sont des exemples.

Il existe en fait deux catégories de communication par langage externe (Adler 1991) : la communication verbale et la communication non-verbale.

- Communication non-verbale. La communication non-verbale n'a pas de structure ni de signification évidente. Les gestes, les postures et les regards en sont des exemples. Possiblement issue d'un acte inconscient, la communication non-verbale est issue d'interprétations reliées à la culture, aux principes et aux croyances des interlocuteurs. Il n'y a pas de début ou de fin avec ce genre d'échange, et le récepteur peut recevoir plusieurs sources de messages simultanément.
- Communication verbale. Cette communication se base sur un langage. La parole, l'écriture et les signes font partie de cette catégorie. La communication verbale est un acte conscient qui a un début et une fin, et l'interlocuteur doit généralement attendre que l'autre cesse de communiquer avant de pouvoir répondre. Le message provient habituellement d'une source précise vers une destination précise. Les messages sont généralement compréhensibles et clairs, menant à une interprétation commune.

Selon les espèces animales, on retrouve aussi différentes manières de communiquer, parfois similaires à l'humain, mais d'une complexité moindre. Par exemple comme communication non-verbale, le loup qui perd un combat baisse la tête et la queue devant le gagnant, le singe exprime son agressivité par des agitations alors que le coyote délimite son territoire par l'urine (Tinbergen 1967). Comme communication verbale, les lucioles (Carlson 1985, Buck 1988, Vencl 1994) utilisent comme moyens physiques l'émission lumineuse. Pour faire la cour, le mâle envoie des clignotements à une fréquence donnée pour signaler son désir pour

une partenaire. Cette dernière accepte l'intention du mâle par une synchronisation de ses clignotements sur les siens. De même, la danse des abeilles (McFarland 1992) indique la direction et la distance de la source alimentaire. L'abeille ouvrière danse en décrivant des cercles autour de cette source et permet ainsi aux autres de trouver son emplacement. Lorsque la source de nourriture est située plus loin de la ruche, une autre danse plus complexe est exécutée. Ces exemples démontrent bien que les animaux utilisent des langages beaucoup moins évolués que ceux de l'humain. En fait, l'évolution du langage chez l'humain s'expliquerait par le besoin de compenser pour un odorat moins développé que pour d'autres espèces animales (Russell et Norvig 1995).

La communication par langage externe est aussi utilisée en robotique mobile, mais moins fréquemment car elle est plus difficile à mettre en œuvre. Au lieu de parler de communication non-verbale et verbale, la communication est caractérisée comme étant implicite ou explicite (Balch et Arkin 1994), ou encore comme étant indirecte ou directe (Mataric 1995). Une communication implicite n'implique pas un acte délibératif et se base sur l'observation des autres et des changements de l'environnement. Un peu de la même façon, la communication indirecte est issue de l'observation du comportement des autres agents. Une communication explicite fait référence à un acte délibéré de communication, et la communication est directe lorsque le but est de transmettre de l'information. Donc les liens existent entre ce qui est caractérisé comme des communications non-verbales, implicites ou indirectes, ainsi qu'entre des communications verbales, explicites et directes.

Comme chez les humains et les animaux, les mêmes moyens physiques peuvent être utilisés en robotique :

- Sonore. Les approches actuelles sont principalement orientées vers la communication par langage naturel pour une interface personne-machine, mais non inter-robots.
- Tactile. La communication tactile est utilisée dans les situations où les contacts physiques se produisent entre les interlocuteurs. Les robots fourmis, conçus par le groupe de Bay (Bay 1995, Stillwell 1994, Unsal 1994), sont de petits robots homogènes qui ont la fonction de transporter collectivement des boîtes. Ils glissent leur palette sous la boîte et la lèvent pour porter la boîte au-dessus d'eux. La communication entre ces robots se fait

alors par le vecteur de force exercée sur la boîte. Le robot meneur se dirige dans une direction donnée, créant une force dans la direction du mouvement. Les autres robots, tous équipés de senseurs de force sur leur palette, détectent alors ce vecteur. Des modèles dynamiques servent ensuite à déduire des paramètres comme la force, l'angle et l'inertie résultants des actions des robots et servent d'organes pour interpréter les informations. Ils ajustent ainsi leur vitesse et leur direction pour maintenir le même rythme de déplacement que le meneur. Cette façon de communiquer est non-verbale et un seul robot communique les informations aux autres. En plus des capteurs de pression, des interrupteurs de contact sont aussi utilisés. En utilisant un protocole de communication basée sur les contacts entre robots, Werger et Mataric (Werger et Mataric 1996) ont démontré qu'il était possible de former des chaînes de robots facilitant la recherche d'objets.

- Visuelle. Certains chercheurs s'intéressent à la communication visuelle pour les robots mobiles, mais les approches développées jusqu'à maintenant n'ont été validées que sous forme de simulation. Wang (Wang 1994) propose une approche utilisant un protocole à faible largeur de bande dont les messages sont affichés, qui peuvent être sous différentes formes, par un dispositif sur le robot pour que ceux du voisinage puissent les percevoir (Arkin 1998). Cette communication est un mécanisme décentralisé et elle est considérée comme un moyen naturel d'interagir entre robots mobiles autonomes (Wang 1994). Murciano et Millan (Murciano et Millan 1997) présentent une approche utilisant des dispositifs lumineux pour transmettre des informations entre robots. L'objectif est de permettre aux robots de localiser des objets et de permettre à ceux qui les voient de transmettre l'information aux autres. Un robot qui perçoit un objet émet une lumière avec la plus haute longueur d'onde possible soit 4 (classée de 0 à 4) et les robots qui reçoivent cette lumière émettent à leur tour mais cette fois avec une longueur d'onde inférieure soit 3. Le prochain qui perçoit le robot émettant 3 émettra à son tour 2, et ainsi de suite. Ainsi, une chaîne de robots indiquant le trajet à suivre pour se rendre aux objets sera construite. Enfin, Balch et Arkin (Balch et Arkin 1994) expliquent comment une caméra conique et des signaux lumineux permettraient de discriminer entre des cibles, des obstacles et d'autres robots. Le robot serait muni d'une caméra conique et de deux lumières, tandis qu'une cible serait munie d'une seule lumière. Cependant, aucune réalisation pratique de ce mécanisme n'est présentée. Avec des environnements simulés,

les limites du champ de vision, la capacité du positionnement du robot mobile et l'effet des conditions d'éclairage, du temps d'interprétation et de la dynamique de l'environnement ne peuvent pas être prises adéquatement en considération.

3.3 L'étude de la communication visuelle

L'objet d'étude du présent travail de recherche est la communication visuelle pour communiquer avec des robots mobiles. Les progrès technologiques au niveau des systèmes de vision permettent maintenant aux robots de reconnaître des couleurs et d'identifier les contours des formes dans l'image. Un dispositif de signalisation simple, basé sur le clignotement d'une lumière de couleur selon un protocole de communication, s'avère un moyen simple et peu coûteux pour communiquer de l'information de façon visuelle.

Toutefois, cette communication visuelle comporte d'importantes restrictions : transmission à faible débit, portée restreinte, occlusion possible et influence du mouvement du robot. Mais les recherches sur les stratégies de communication démontrent que la simplicité est souhaitable (Balch et Arkin 1994). Ainsi, un faible débit de transmission n'est pas une contrainte importante lorsque les échanges sont faits par des messages riches en information. Un faible débit de transmission peut même s'avérer un avantage en demandant moins de traitement. De plus, la proximité requise des interlocuteurs aide à établir un contexte des échanges apportant des informations additionnelles à celles communiquées. Les agents peuvent en fait percevoir les états non communiqués et qui caractérisent la situation dans laquelle ils se trouvent. En voici des exemples :

- La communication visuelle permet à un robot de percevoir la position relative de son interlocuteur à partir du signal visuel. Ceci n'est pas possible pour la communication via des moyens électroniques, et des systèmes de positionnement (comme le GPS ou la triangulation par onde radio) sont alors requis pour obtenir la position des autres dans l'environnement.
- La communication visuelle peut aussi s'avérer très utile pour discriminer les objets et les autres agents. Par exemple, mettre une couleur sur un robot est une méthode couramment

utilisée pour s'identifier entre eux (Veloso 1998 et Asada 1998). Toutefois, il y a possibilité de confusion lorsque d'autres objets de la même couleur sont présents dans l'environnement. La couleur d'un objet ou d'un robot est de plus entièrement dépendante des conditions d'éclairage de l'environnement. La discrimination de l'identité des autres agents est limitée au nombre de couleurs ou de combinaison de couleurs qui peuvent être détectées par le système de vision. Utiliser une lumière de couleur comme dispositif de communication permet de discriminer un objet d'un interlocuteur à partir du protocole de communication. Le dispositif s'avère plus robuste aux conditions d'éclairage, car la couleur est générée par une source de lumière. Enfin, l'identité des agents peut être communiquée pour discriminer les intervenants, et ce avec une seule et même couleur.

- Les interférences dans la communication visuelle peuvent être plus facilement identifiables (comme l'obstruction du champs de vision des interlocuteurs). L'interférence radio est plus difficile à détecter et à contrôler.
- S'il connaît le protocole de communication, un intervenant humain peut facilement interpréter ce qui est communiqué par le robot. Il peut lui aussi participer aux échanges en se dotant d'un dispositif de signalement (une lampe de poche ou même un simple carton de couleur). Un tel dispositif est plus simple à trouver et à fabriquer qu'un transmetteur/récepteur radio.

C'est pour ces raisons et pour mieux cerner les avantages et les inconvénients rattachés à un mode de communication visuelle avec un robot mobile que nous avons entrepris les activités de recherche présentées dans ce mémoire.

4 DESCRIPTION DE L'APPROCHE DE LA COMMUNICATION VISUELLE PAR SIGNAUX LUMINEUX AVEC UN ROBOT MOBILE

L'objectif poursuivi dans ce mémoire est donc d'étudier les avantages et les inconvénients de la mise en œuvre d'une approche de communication visuelle par signaux lumineux. Le présent chapitre débute par une description des composantes matérielles et logicielles du robot utilisé pour les expérimentations. Il se poursuit ensuite par une description sommaire de l'architecture de contrôle du robot et du protocole mis en œuvre pour la communication.

4.1 Description du robot utilisé pour la communication visuelle

La figure 4.1 illustre le robot et les dispositifs lumineux utilisés pour la communication visuelle. Ce robot, un Pioneer I manufacturé par la compagnie ActivMedia, est équipé de sept sonars, d'un système de vision *FastTrack* (muni d'une caméra couleur ordinaire, sans les capacités de zoom ou de déplacement), d'un manipulateur et du dispositif lumineux conçu (situé à côté de la caméra). Les sonars retournent des lectures de la proximité des objets sur des distances allant de 10 cm à 5 mètres. Le robot a sept sonars : cinq sont placés en avant du robot et couvrent approximativement une région de 90° (soit 45° à sa gauche et 45° à sa droite); les deux autres sont placés sur les côtés du robot. Le système de vision dispose de trois canaux chacun pouvant être entraînés pour reconnaître une couleur. Le traitement effectué par le système de vision retourne des informations sur la surface et sur la position de la plus grosse région de couleur perçue sur chacun de ces canaux. Le manipulateur, installé à l'avant du robot, peut saisir des objets légers. Des senseurs sont disposés dans sa pince pour indiquer la présence d'un objet. La position de la pince est une autre information disponible. Un bouton-poussoir et un interrupteur sont aussi installés sur le côté droit du manipulateur et servent d'entrées supplémentaires pour modifier l'état du robot. La programmation du robot s'effectue en utilisant le langage L, un dialecte du LISP développé par Brooks (Brooks 1996). Ce langage fonctionne avec MARS, un environnement de travail en temps réel utilisé sur microcontrôleur Motorola 68332 muni d'un méga-octet de RAM. Cet environnement communique avec le contrôleur de base du robot, un 68HC11 responsable de lire les senseurs et de contrôler les actionneurs du robot. Les échanges entre ces deux systèmes s'effectuent à

une fréquence de 2.5 Hz pour les commandes de vitesse, de 10 Hz pour les lectures de senseurs et de 5 Hz pour les commandes de rotation. Le système L est aussi lié au système *FastTrack*, basé lui aussi sur un microcontrôleur 68332. Leurs échanges d'information s'effectuent à une fréquence de 10 Hz.

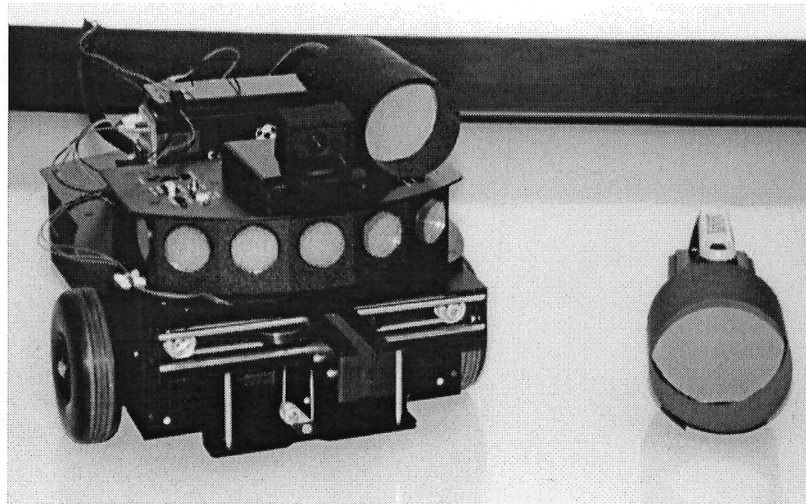


Figure 4.1 Robot Pioneer I équipé d'un dispositif de signalement (à côté de la caméra), et un lampe de poche utilisée par l'intervenant humain

Le dispositif lumineux utilisé est construit à partir d'une ampoule incandescente encapsulée dans un tube noir. Une ampoule incandescente fut préférée à une ampoule halogène afin que d'obtenir le temps d'allumage court et constant. L'ampoule est alimentée par une batterie 12 Volts externe au robot de sorte que sa consommation d'énergie n'affecte pas la durée de « vie » du robot. Un transistor de puissance sert à allumer l'ampoule lorsqu'un 1 logique est placé sur le port digital de sortie. Cette sortie est combinée à un circuit de modulation de largeur de pulse (PWM) contrôlant la puissance d'émission de l'ampoule. La figure 4.2 illustre le circuit utilisé. Un simple carton de couleur est placé devant l'ampoule pour générer la couleur. Le carton de couleur est utilisé car il permet de diffuser la lumière plus opaque du papier transparent de couleur par exemple. Le tube joue l'effet d'un tunnel qui bloque la lumière venant de l'environnement et limite la diffusion de la couleur. Plus le tube est long et

plus la lumière de l'environnement est bloquée, diminuant ainsi son influence sur la couleur émise au travers du carton. Cependant, un tube trop long diminue le champ d'émission de la lumière. Pour le dispositif monté sur le robot, le diamètre du tube est de 8 cm et sa longueur est de 5 cm. Pour la lampe de poche, le diamètre est de 12 cm et la longueur du tube est de 6 cm. L'entraînement pour la couleur s'effectue en plaçant la couleur choisie au centre du champ de la vision de la caméra. Le système de vision traite la région centrale de l'image pour en discriminer une couleur. Expérimentalement, le système de vision reconnaît mieux certaines couleurs selon leur contraste avec l'environnement. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les couleurs rose et orange. L'entraînement a également réussi pour les couleurs bleu et jaune. Pour les expérimentations, un carton de couleur rouge a été utilisé pour le dispositif de signalement du robot, et un carton de couleur jaune est utilisé pour la lampe de poche.

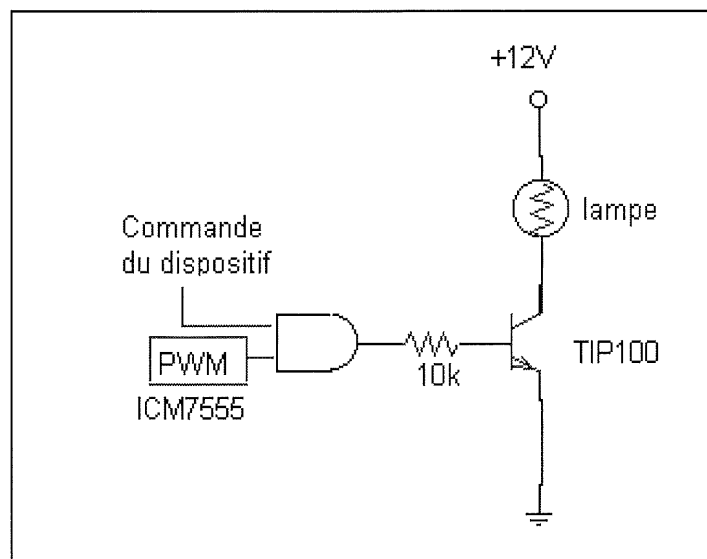


Figure 4.2 Interface électrique entre le robot et le dispositif de signalement

4.2 Description de l'architecture de contrôle

Cette architecture, développée par Michaud (Michaud 1996), fut conçue dans l'objectif d'obtenir une structure générale permettant de combiner différentes propriétés associées à l'intelligence, comme la réactivité, la délibération, la planification et la motivation, tout en

préservant leurs fondements. Une description complète de cette architecture n'est pas requise pour ce mémoire. Seule une description sommaire de ses principes sont présentés. L'architecture, illustrée à la figure 4.3, présente trois niveaux d'abstraction. Elle se base sur l'approche comportementale. Les modules comportementaux constituent les compétences de base du robot.

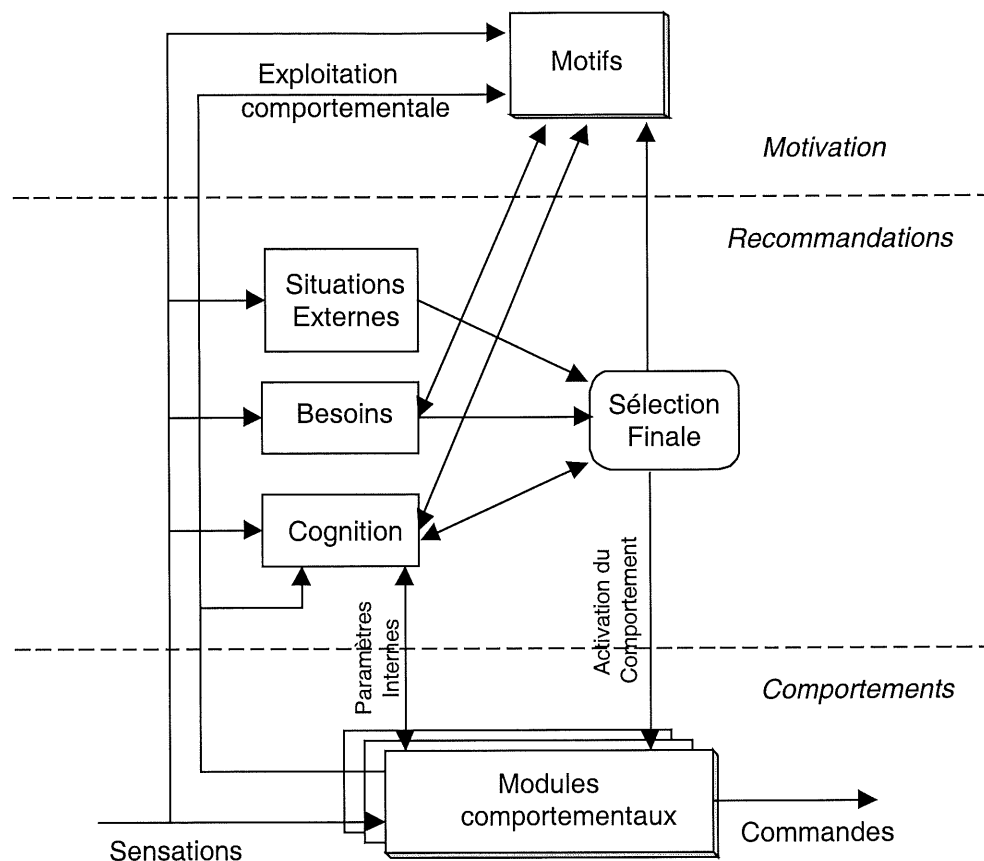


Figure 4.3 Architecture de contrôle utilisée

En fonction du répertoire de comportements disponibles au niveau *Comportements*, les autres modules de l'architecture sont responsables de sélectionner les modules comportementaux appropriés et de les reconfigurer selon les buts du robot et les situations rencontrées. Pour le niveau *Recommandation*, trois modules formulent, en parallèle et de façon indépendante, la recommandation de modules comportementaux selon différentes conditions. Le module *Situation Externe* effectue ces choix directement à partir des sensations. Le module *Besoins*

sélectionne les comportements selon les motifs du robot, corrélés avec certains événements perçus. Le module *Cognition* acquiert ou exploite les connaissances sur l'environnement afin de planifier l'usage des comportements. Ces connaissances peuvent être affectées par les conditions perçues de l'environnement, les motifs du robot ainsi que les recommandations de modules comportementaux via le lien *Paramètres Internes*. Les recommandations issues du module *Cognition* peuvent aussi être influencées par des informations provenant des modules comportementaux. Les recommandations formulées par ces trois modules prennent la forme de mesures de *Désirabilité* et d'*Indésirabilité*, allant de 0 à 100%, concernant l'activation de modules comportementaux. Ces mesures rendent possible la gestion des conflits. L'activation de modules comportementaux est déterminée par le module *Sélection Finale*, qui active un comportement lorsqu'il est plus désirable qu'indésirable.

Le troisième niveau de l'architecture, nommé *Motivation*, est constitué du module *Motifs* qui gère les buts de l'agent et coordonne le bon fonctionnement des autres modules. Les motifs peuvent être affectés par l'environnement, par les recommandations et l'activation des modules comportementaux, par les connaissances sur le monde et par l'exploitation des comportements. L'exploitation des comportements, représentée par le lien *Exploitation comportementale*, fait référence à l'utilisation des comportements dans le temps. Ce lien diffère du lien *Activation du comportement*, qui indique plutôt le niveau de participation possible d'un comportement au contrôle du robot. Un module comportemental est dit exploité lorsqu'il contrôle les actions du robot, selon ses règles comportementales et le mécanisme d'arbitrage des modules comportementaux. Ainsi, pour être exploité, un comportement doit nécessairement être d'abord activé afin de lui permettre d'émettre des commandes en fonction de ses règles comportementales.

Les mécanismes utilisés dans ces modules dépendent des capacités du robots et du rôle qu'il doit jouer dans son environnement. Pour les expériences décrites dans ce mémoire, l'arbitrage par priorité (*Subsumption*) est utilisée, et des mesures discrètes (0 ou 100) pour la *Désirabilité*, l'*Indésirabilité*, l'activation et l'exploitation des comportements sont utilisées. Les mécanismes de contrôle du robot plus spécifiques aux expérimentations sont décrits au chapitre 5.

4.3 Description du mécanisme de communication

La figure 4.4 illustre la façon dont la communication visuelle est implantée dans l'architecture de contrôle. La communication est réalisée en activant et désactivant le dispositif lumineux formant des séquences de signaux formant un code. Le module *Cognition* gère la communication en se servant de deux comportements : *Écouter* et *Parler*. Le comportement *Écouter* est responsable du positionnement du robot en face de son interlocuteur à partir du signal lumineux. De plus, il perçoit et traduit les signaux lumineux en codes composés de signaux court (0.1 à 0.8 sec) représenté par [·], et long (0.9 à 2.4 sec) représenté par [-], séparés de silences (0.1 à 1.4 sec). Au début de chaque code, une période de latence de 3 secondes est accordée pour détecter le début du signal suivant. Une fois les trois secondes écoulées, ceci indique la fin du code transmis et l'information est acheminée du comportement *Écouter* au module *Cognition*. Le comportement *Parler* active le dispositif lumineux pour générer un signal et le désactive pour produire un silence, pendant un temps correspondant au code à transmettre.

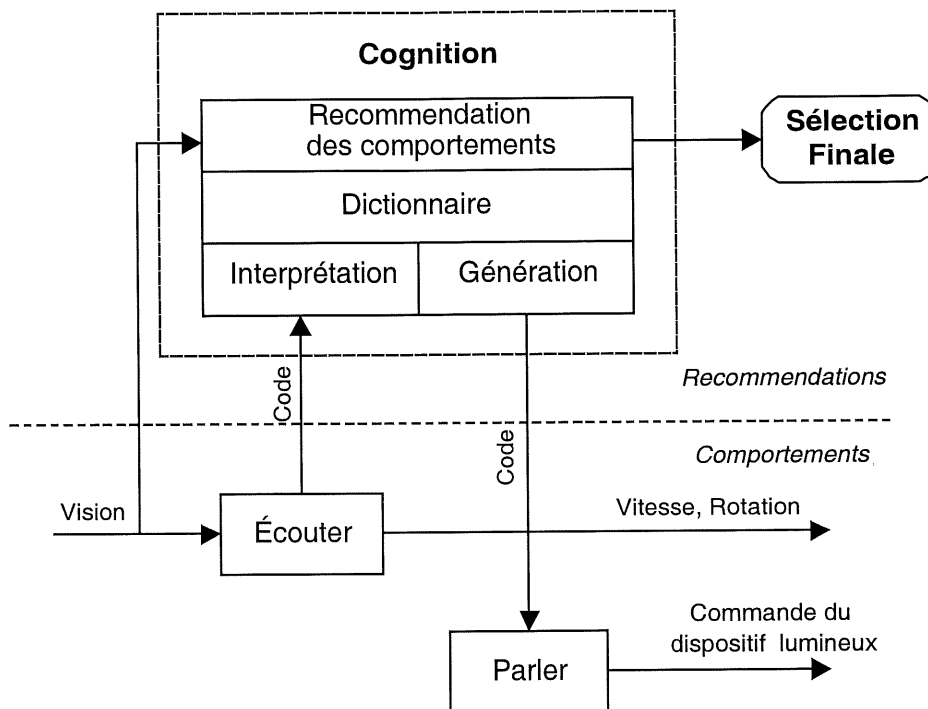


Figure 4.4 Module *Cognition* et les comportements *Écouter* et *Parler*

Le module *Cognition* est conçu pour interpréter et générer les messages codés selon le protocole de communication suivant : il code l'information à transmettre en se servant du dictionnaire et donne le code au comportement *Parler* qu'il recommande en lui attribuant une *Désirabilité* de 100%; le récepteur essaie de décoder le code émis en se servant du même dictionnaire, et il détermine comment ce message peut l'influencer. D'autre part, le module *Cognition* a aussi la responsabilité de déterminer quand le robot peut recevoir des messages en recommandant l'activation du comportement *Écouter*. D'une façon plus formelle, le protocole de communication est illustré aux figures 4.5 et 4.6 et comporte les étapes suivantes :

- 1) **Demande de communication.** Le signaleur indique son intention de communiquer en émettant un code d'intention [-] à toutes les 7 secondes. Le module *Cognition* recommande l'activation (par une *Désirabilité* maximale) du comportement *Parler* et lui transmet ce code à toutes les 7 secondes.

- 2) **Acceptation de la communication.** Quand le récepteur perçoit un signal, le module *Cognition* recommande l'activation du comportement *Écouter* pour que celui-ci puisse recevoir la séquence de signaux et positionner le robot en face au signal. Après l'interprétation du code reçu, si le code d'intention [-] est reconnu, alors un code d'acceptation (le même que le code d'intention) est transmis au signaleur (comme expliqué à l'étape 1).
- 3) **Communication du message.** Quand le signaleur reçoit le code d'acceptation, le module *Cognition* fournit un après l'autre les codes propres au message. Le récepteur les décode, les interprète et détermine comment ces informations peuvent l'influencer.
- 4) **Fin de la communication.** Le récepteur termine la communication lorsqu'une des conditions suivantes survient : un code de fin de communication [. -] est reçu, un code ne peut être interprété comme un message; ou il ne perçoit aucun signal pendant 10 secondes. Le récepteur peut aussi décider de terminer une communication en transmettant le code de fin de communication au signaleur. Lorsque la fin de communication a lieu, le signaleur et le récepteur désactivent leurs comportements *Écouter* et *Parler*, par une recommandation de *Désirabilité* nulle pour ces comportements venant du module *Cognition*.

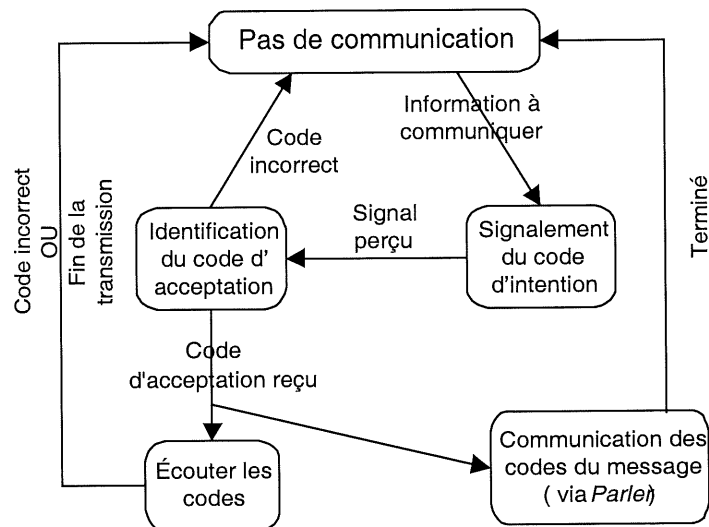


Figure 4.5 Diagramme d'états du protocole de communication pour le signaleur

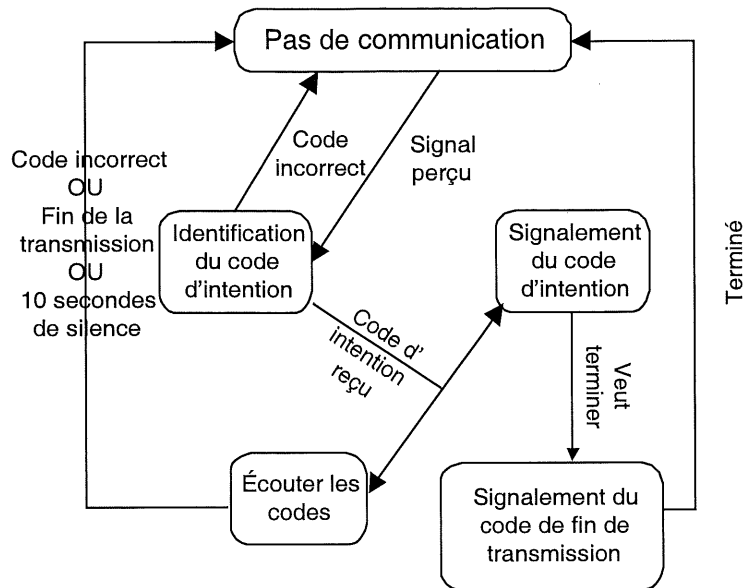


Figure 4.6 Diagramme d'états du protocole de communication pour le récepteur

Enfin, il peut arriver que le robot perçoive un objet ayant la même couleur que celle utilisée pour la communication. Le protocole de communication permet de discriminer cet objet d'un interlocuteur légitime : lorsque la couleur de l'objet est perçue d'une façon constante pendant plus de 2.4 secondes, l'algorithme rejette alors le signal et indique un code incorrect. Puisque l'objet se trouve alors encore dans le champs de vision du robot et pour éviter de rester bloqué devant l'objet à essayer d'en interpréter un code, le module *Cognition* ignore alors tous signaux lumineux de couleur pendant 7 secondes, le temps que le robot s'éloigne de l'objet.

5 EXPÉRIMENTATIONS

Une fois l'approche de communication visuelle par signaux lumineux conçue, il restait à étudier en les performances et à exploiter la méthode dans des situations concrètes. Ce chapitre débute en établissant les limites du dispositif de signalement lumineux, du système de vision et des mécanismes de traitement. Ensuite, les résultats de deux expériences sont présentés. Puisque nous n'avons qu'un seul robot Pioneer I à notre disposition, les interactions avec le robot s'effectuent avec un intervenant humain. La première expérience porte sur la communication de motifs pour la gestion des buts du robot. La seconde consiste à une mise en œuvre d'un jeu de passe entre un robot et un humain.

5.1 Performances de communication

Puisque le robot utilise une caméra fixe sans zoom, son champ de vision est assez limité. Par rapport au robot, la lampe de poche munie du filtre de couleur de 12 cm de diamètre se détecte jusqu'à une distance de 3 mètres lorsqu'elle se trouve directement en face du robot et dans une pièce éclairée par des lumières au néon. Lorsque la pièce est plus sombre (sans lumière), cette visibilité atteint 3.3 mètres. Le champ de vision de la caméra va de 45 degrés à gauche, 45 degrés à droite. Cependant, pour voir la lampe de poche au complet, ce champ est diminué de 45 à 30 degrés. À cause du tube de 6 cm de long entourant la lampe de poche, la visibilité est plus restreinte. En effet, lumière diffusée ne couvre pas plus de 100 degrés. Tandis qu'une lampe sans tube peut couvrir un champ de 180 degrés. Afin d'assurer une meilleure visibilité de la lampe, l'utilisateur doit pointer celle-ci directement vers le robot. La figure 5.1 illustre les limites de visibilité de la lampe.

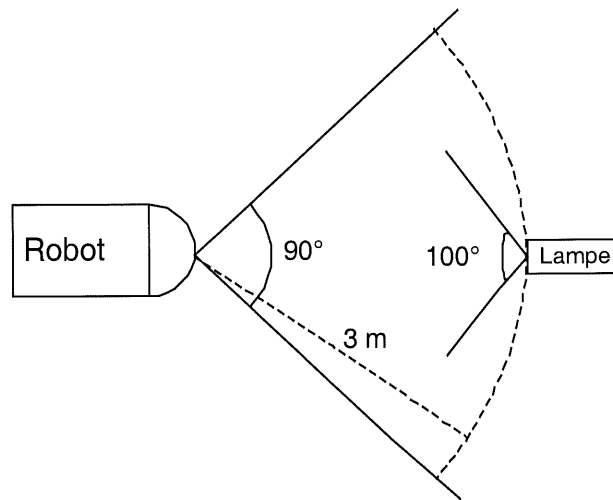


Figure 5.1 Limites de la perception du dispositif de signalage lumineux

Les performances de communication sont aussi influencées par les systèmes de traitement du robot. Le noyau temps réel utilisé pour la programmation ne permet pas d'accéder à l'horloge interne du microprocesseur, ce qui nous force à utiliser comme référence la fréquence d'exécution des processus. La distribution des tâches au microcontrôleur s'effectue selon une stratégie de type « round-robin » : à tour de rôle, chaque processus s'exécute pendant un temps donné avant de retourner le contrôle aux autres processus. En fonction du nombre de processus à exécuter, il est toutefois possible que la fréquence souhaitée pour l'exécution de chaque processus ne puisse être respectée. Les signaux et les codes courts sont les moins sensibles à ces influences, comme le démontre le tableau 5.1 indiquant les performances de reconnaissance de quatre codes. Vingt-et-un tests ont été réalisés pour chacun des codes, et la moyenne de ces résultats est donnée dans le tableau. L'intervenant humain était placé directement en face du robot, à une distance d'un mètre. Un autre facteur affectant ces performances est l'inexactitude de la durée des signaux émis par l'intervenant : les intervalles pour générer les signaux sont en effet sujets à des variations. Pour minimiser l'impact de ce facteur, nous avons augmenté l'intervalle de tolérance des signaux longs (0.9 à 2.4 sec) par rapport à celui des signaux courts (0.1-0.8 sec). Il s'avéra plus facile pour un intervenant de produire un signal court qu'un signal long. Cependant, somme toute, les performances sont satisfaisantes.

TABLEAU 5.1 TAUX DE RECONNAISSANCE DE CODES

Codes	Taux de reconnaissance
[- -]	81%
[. . -]	81%
[. . . .]	84%
[. .]	100%

5.2 Gestion des buts par communication de motifs

Cette expérience consiste à donner au robot plusieurs tâches à exécuter et à lui laisser décider quand réaliser ces tâches en fonction des situations rencontrées et des requêtes formulées par un intervenant humain (Michaud et Vu 1999). Le robot cherche à réaliser ces tâches tout en étant en mesure de se déplacer adéquatement dans son environnement. Des motifs sont utilisés pour représenter ses buts. L'objectif de l'expérience ne porte pas tant sur le mécanisme de gestion des buts par les motifs, mais plutôt en quoi la communication visuelle de motifs peut être bénéfique.

5.2.1 Description des mécanisme de contrôle du robot

Le contrôle du robot, dérivé selon les principes de fonctionnement de l'architecture de Michaud (Michaud 1999), est réalisé en utilisant des buts. Chacun de ces buts est associé à un ou plusieurs motifs dans le module *Motifs*. Un motif est une variable interne du robot qui détermine dans quel état se trouve le robot. Ces motifs permettent de coordonner les interactions entre les différents modules et servent à évaluer la réactivité des comportements en observant ses états internes. Dans les expériences, le robot poursuit les cinq buts ci-dessous. Les motifs associés au buts sont présentés entre parenthèse.

- 1) Sortir d'une situation problématique (*Détresse*). Ce but veille à sortir le robot d'une situation problématique, par exemple, être incapable de se dégager d'un coin.
- 2) Errer (*Errer*). Ce but permet tout simplement au robot de parcourir l'environnement sans destination précise. Ce but est utile pour explorer l'environnement.
- 3) Suivre les murs (*Proche-mur*). Ce but consiste à déplacer le robot en suivant les murs.
- 4) Suivre un objet de couleur (*Poursuite*). Ce but permet au robot de suivre un autre agent identifié par une couleur spécifique.
- 5) Rechercher des objets et les ramener à un endroit donné (*Recherche*). Ce but permet au robot de chercher une petite boîte de couleur rose, pour ensuite la transporter et la déposer près de la région indiquée par la couleur verte.

Pour réaliser ces buts, douze comportements sont utilisés:

- *Avancer*. Ce comportement fait déplacer le robot vers l'avant à une vitesse constante de 300mm/sec.
- *Tourner-aléatoirement*. Ce comportement permet au robot d'explorer l'environnement en effectuant des rotations de valeurs aléatoires à des intervalles aléatoires.
- *Suivre-couleur*. Ce comportement permet de suivre une cible de couleur en mouvement et en maintenant une distance fixe.
- *Diriger-maison*. Ce comportement oriente le robot vers une zone verte.
- *Chercher-boîte*. Ce comportement dirige le robot vers les objets de couleur rose.
- *Longer-mur*. Ce comportement permet au robot de suivre les murs en restant à une distance donnée, en se servant des sonars de côtés.
- *Agripper*. Ce comportement permet de saisir un objet avec le manipulateur.
- *Déposer*. Ce comportement permet de déposer l'objet saisi par le manipulateur.
- *Éviter-obstacles*. Ce comportement modifie la vitesse et la direction du robot afin de ne pas entrer en collision avec un obstacle à proximité détecté par les sonars avant.
- *Débloquer*. Ce comportement fait effectuer de petites rotations au robot afin de le sortir le robot d'une impasse.
- *Écouter*. Ce comportement reçoit les signaux visuels envoyé par l'interlocuteur.
- *Parler*. Ce comportement émet les signaux visuels à un interlocuteur.

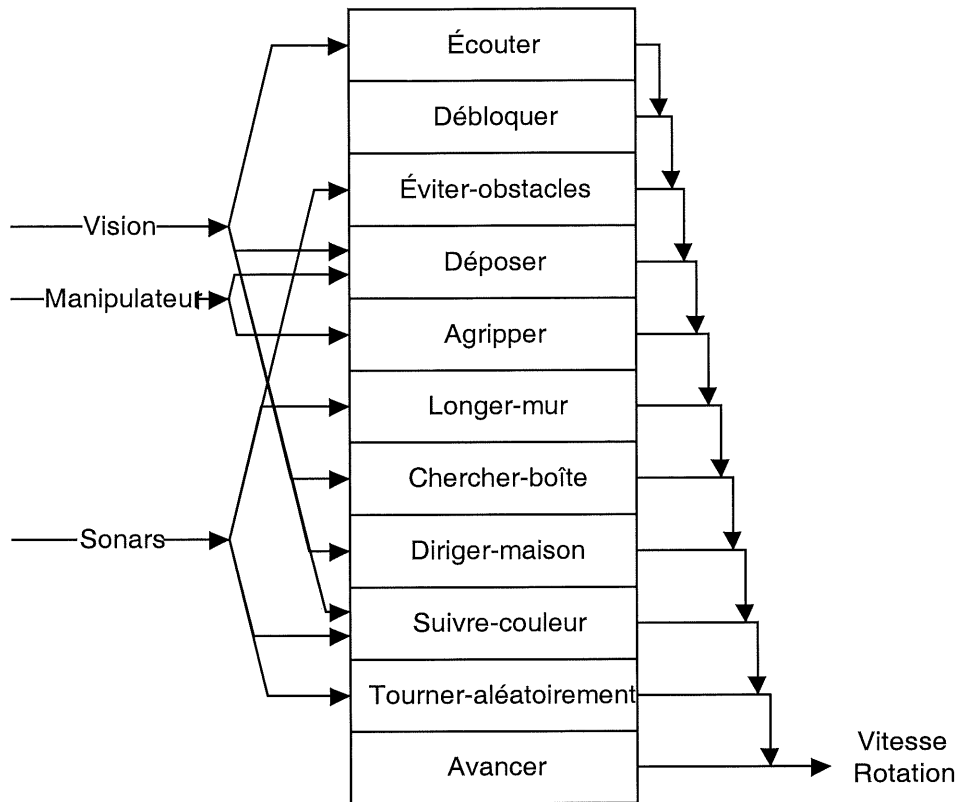


Figure 5.2 Hiérarchie de priorité des comportements pour l'expérience de gestion des buts par communication de motifs

La figure 5.2 illustre la hiérarchie de priorité des comportements utilisée avec les senseurs et les commandes associées. Notez que le comportement *Écouter* a la plus haute priorité, bloquant ainsi toute activité lorsqu'un signal lumineux est détecté. Dans ce cas, *Écouter* est assuré d'avoir le contrôle du robot s'il est activé. *Parler* n'est pas représenté sur cette figure car ce comportement n'émet aucune commande de vitesse ou de rotation. Notez aussi que le contrôle du manipulateur s'effectue par les commandes directes sans passer par la hiérarchie de priorité des comportements.

L'activation de ces comportements s'effectue principalement par les recommandations de *Désirabilité* ou d'*Indésirabilité* formulées par les modules *Situation Externe* et *Besoins*. Les

comportements *Avancer* et *Éviter-obstacles* sont recommandés par le module *Situation Externe* selon la proximité des obstacles. Comme mentionné à la section 4.3, les deux comportements *Écouter* et *Parler* sont recommandés par le module *Cognition*. Pour les autres comportements, les recommandations de *Désirabilité* et *d'Indésirabilité* sont réalisées par le module *Besoins*, selon les conditions explicitées aux tableaux 5.2 et 5.3. En l'occurrence de ces conditions, la *Désirabilité* ou l'*Indésirabilité* d'un comportement est fixée à 100%. Sinon, ces valeurs sont nulles.

TABLEAU 5.2 LES CONDITIONS DE RECOMMANDATIONS DÉsirABILITÉS DE COMPORTEMENTS PAR LE MODULE *BESOINS*

Comportements	Conditions
<i>Tourner-aléatoirement</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Errer</i> OU • Niveau d'énergie du motif <i>Détresse</i> > 30%
<i>Suivre-couleur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Poursuite</i>
<i>Longer-mur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Proche-mur</i>
<i>Débloquer</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau d'énergie du motif <i>Détresse</i> > 70%
<i>Diriger-maison</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Recherche</i> ET • Possession d'un bloc par le robot
<i>Agripper</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Recherche</i> ET • Bloc en avant et tout près du robot
<i>Déposer</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Recherche</i> ET • Possession du bloc par le robot ET • Région verte à proximité
<i>Chercher-boîte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Recherche</i> ET • Pas de possession du bloc par le robot

TABLEAU 5.3 CONDITIONS DE RECOMMANDATIONS INDÉSIRABILITÉS DE COMPORTEMENTS PAR LE MODULE *BESOINS*

Comportements	Conditions
<i>Tourner-aléatoirement</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Proche-mur</i>
<i>Suivre-couleur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Proche-mur</i> OU • Activation du motif <i>Errer</i>
<i>Longer-mur</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Poursuite</i>
<i>Diriger-maison</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Poursuite</i> OU • Activation du motif <i>Proche-mur</i> OU • Activation du motif <i>Errer</i>
<i>Agripper</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Poursuite</i> OU • Activation du motif <i>Proche-mur</i> OU • Activation du motif <i>Errer</i>
<i>Chercher-boîte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Activation du motif <i>Poursuite</i> OU • Activation du motif <i>Proche-mur</i>

Comme le montre ces tableaux, des motifs sont utilisés pour recommander l'utilisation des modules comportementaux. Un motif est une variable interne de contrôle qui analyse l'état du robot par rapport à ses buts. Le niveau d'activation des motifs est utilisé par les autres modules de l'architecture pour affecter le comportement général du robot. Un motif m est caractérisé par un niveau d'énergie E et par une fonction de correspondance $M(E)$ qui est utilisé pour déterminer le niveau d'activation du motif selon l'équation (5-1). Le niveau d'activation et le niveau d'énergie ont une valeur pouvant aller de 0 à 100%. Le niveau d'énergie d'un motif peut être affecté par différents facteurs : les sensations, l'exploitation des comportements associés au motif, l'activation des autres motifs, l'information communiquée et le temps. Il est déterminé par la contribution de n facteurs f pondérés par les poids p selon l'équation (5-2).

$$A_m = M(E_m) \quad (5-1)$$

$$E_m = \sum_{i=1}^n p_i * f_i \quad (5-2)$$

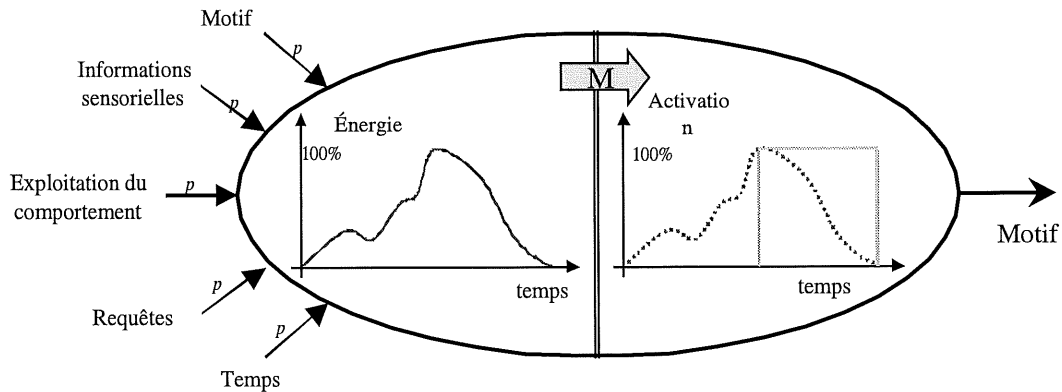


Figure 5.3 Correspondance entre l'activation et l'énergie d'un motif

Pour les motifs qui gèrent les conditions et les buts critiques nécessitant d'être considérés rapidement lorsqu'ils surviennent, la correspondance entre le niveau d'énergie et le niveau d'activation est dite *directe*, c'est-à-dire $A_m = E_m$. L'effet sur les recommandations se détermine par des seuils, et les conflits possibles entre les motifs sont gérés par des connexions inhibitrices entre ces derniers. Cependant, ce mécanisme demande un ajustement approprié des seuils et du poids des facteurs d'influence sur le motif afin d'éviter de créer des boucles ou des oscillations dans les recommandations des comportements. Une autre façon de faire consiste à utiliser une fonction de correspondance dite *indirecte*, en évaluant le niveau d'activation d'un motif à partir du niveau de plusieurs motifs. On peut recourir à plusieurs. Celle que nous avons utilisée consiste à assigner un niveau d'activation maximal au motif qui a le plus haut niveau d'énergie parmi un groupe de motifs. Tous les autres ont alors un niveau d'activation nul jusqu'à ce que le niveau d'énergie du motif actif retombe à zéro. Notez que dans notre mise en œuvre, la mise à jour des motifs s'effectue à toutes les 0.1 seconde.

Pour nos expériences, un seul motif est utilisé pour le but nommé *Détresse*. Ce motif examine si le robot est en mesure de se déplacer adéquatement dans l'environnement. Par exemple, l'exploitation du comportement *Éviter-obstacles* sur de longues périodes est un signe de difficulté. La figure 5.3.1 illustre les facteurs d'influence de ce motif. La fonction de correspondance utilisée est de type *directe*, et les comportements requis pour faire sortir le robot d'impasse sont recommandés via le module *Besoins*.

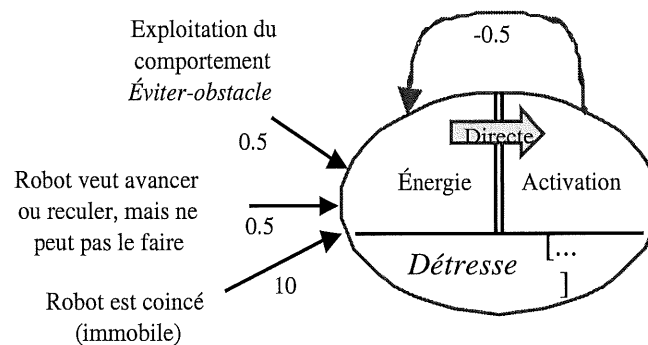


Figure 5.4 Les facteurs d'influence du motif *Détresse*

Les buts 2 à 5 (voir 5.2.1) sont représentés respectivement par quatre motifs, contrôlés par une fonction de correspondance *indirecte* de façon à ce qu'un seul de ces motifs soit priorisé en tout temps. La figure 5.5 illustre les facteurs d'influence de ces motifs. Puisque l'objectif de l'expérience est de valider des motifs pour la communication visuelle, les poids des facteurs ont été fixés empiriquement et uniformément, sans être optimisés. Un poids de faible valeur (comme 0.01 et 0.05) est utilisé lorsque l'occurrence du facteur doit être observée pour une longue période consécutive de temps. Un poids de grande valeur est utilisé pour des événements discrets comme la réception d'une requête d'un interlocuteur. Notez aussi le facteur de -0.05 qui permet de décroître l'énergie du motif lorsqu'il est activé afin de permettre éventuellement à d'autres motifs de devenir actifs.

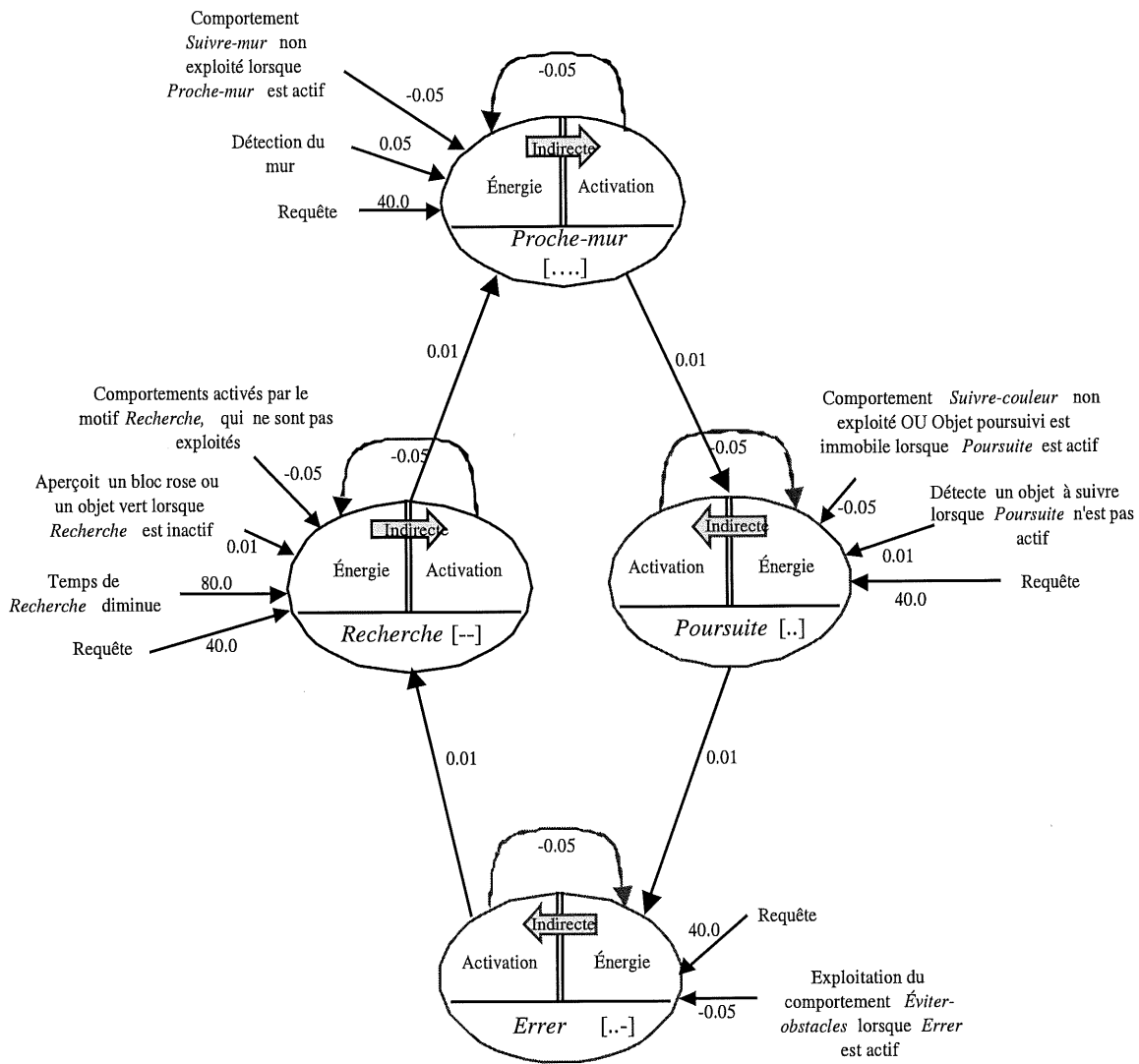


Figure 5.5 Facteurs d'influence des motifs *Recherche*, *Proche-mur*, *Poursuite* et *Errer*

5.2.2 Résultats

Comme mentionné précédemment, les messages communiqués dans cette expérience sont basés sur les motifs. Deux types de communication sont validés : le robot communique son état à l'interlocuteur, ou l'interlocuteur demande au robot de réaliser un des buts 2, 3, 4 ou 5. Pour le premier type, un état utile à communiquer est l'occurrence d'un haut niveau

d'activation du motif *Détresse*, signifiant que le robot a essayé sans succès de sortir d'une impasse. Pour obtenir de l'aide, le robot communique alors le code [. . .] associé à cet état. Lors des tests, le blocage intentionnel des roues du robot par l'intervenant humain était le moyen utilisé pour créer une situation d'impasse. Pour le deuxième type de communication, l'interlocuteur communique le motif associé au but désiré selon les codes suivants : *Errer* [. . -], *Proche-mur* [. . . .], *Poursuite* [. .], *Recherche* [- -].

Les expériences ont été effectuées dans un enclos carré de 3.6 mètres de côté installé dans une pièce fermée, comme le montre la figure 5.6. Le robot est appelé à manœuvrer dans cet enclos pour réaliser ses tâches, tout en interagissant avec l'intervenant humain qui lui communique les requêtes sous forme de motifs. L'intervenant humain l'interpelle en se plaçant face de lui en lui communiquant le code d'intention [-]. Une fois la communication établie, il communique les motifs suivis du code de fin de communication [-.]. Les quatre motifs sont communiqués dans tous les tests, mais la répétition d'un motif, la séquence des motifs transmis, les intervalles de temps entre les motifs et la durée totale du test peuvent différer d'un test à l'autre.

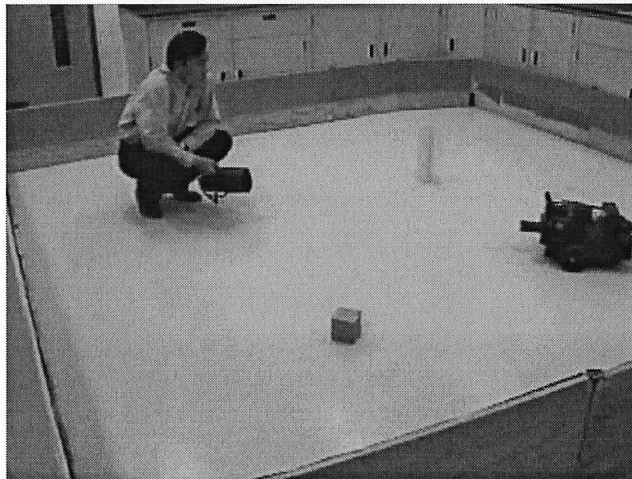


Figure 5.6 Enclos utilisé pour les expériences

L'analyse des résultats s'est effectuée à partir des données recueillies lors des tests ainsi que par l'observation des enregistrements vidéo. Comme données, les niveaux d'énergie des

motifs ont été mémorisés afin d'obtenir la trace des niveaux d'énergie des motifs. Bien que les motifs soient mis à jour à toutes les 0.1 seconde, leurs niveaux furent mémorisés à toutes les secondes à cause des limitations de mémoire et pour minimiser l'impact de la prise de données sur le traitement temps réel du robot. Les enregistrements vidéo permettent d'observer les comportements du robot ainsi que de noter les changements de but suites aux requêtes formulées par l'intervenant humain.

Plus de 25 tests ont été réalisés, et trois tests sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

Test 1

La séquence des motifs communiqués est *Recherche*, *Poursuite* (2 fois), *Errer* et *Proche-mur*. L'expérience dura approximativement huit minutes. L'intervenant bloqua les roues du robot à la fin du test.

Sans l'influence de requêtes provenant de l'intervenant humain, le robot accomplit ses buts périodiquement selon les situations rencontrées. Par exemple, lorsque le robot détecte fréquemment les murs, l'énergie du motif *Proche-mur* augmente et le motif prend éventuellement le contrôle du robot; ce motif reste ensuite actif durant un temps proportionnel à la capacité du robot à suivre les murs. Les requêtes communiquées par l'interlocuteur ont une influence différente sur les buts du robot selon le niveau d'énergie des motifs. La figure 5.7 illustre les niveaux d'énergie des motifs pour ce test. L'axe vertical des graphiques indique le niveau d'énergie et l'axe horizontal, le temps en seconde. Une requête communiquée est reconnaissable sur le graphique par une transition brusque du niveau d'énergie d'une valeur de 40% comme mentionné plus tôt à la figure 5.5. Le motif initialement actif est *Poursuite*. La première communication survient aux alentours de la 25^e sec quand l'interlocuteur communique le code du motif *Recherche*. Cette communication fait augmenter le niveau d'énergie de ce motif de 40%. Comme le niveau d'énergie du motif *Poursuite* n'a pas encore atteint 0 au moment de la communication, le robot continue avec ce but. Ce motif demeure actif encore plus longtemps, puisque l'interlocuteur communiqua deux fois le motif *Poursuite* aux alentours de la 95^e sec et de la 135^e sec. Durant ce temps, le robot détecte aussi des murs, augmentant du même coup le niveau d'énergie du motif *Proche-mur*.

Le niveau d'énergie du motif *Erreur* augmente aussi en raison de l'effet d'excitation provenant de l'activation du motif *Poursuite*. Quand le niveau d'énergie du motif *Poursuite* atteint 0 aux alentours de la 210^e sec, le motif *Recherche* devient actif car son niveau d'énergie est le plus élevé (grâce à la requête de l'interlocuteur communiquée juste quelques secondes plus tôt). Immédiatement après, l'interlocuteur formule une requête pour *Erreur*, mais le robot est déjà engagé dans son but de recherche. L'interlocuteur formule aussi une requête pour *Proche-mur* à la 310^e sec, et le motif devient actif peu longtemps après. Cette préférence est causée par la requête précédente, mais aussi par l'effet des situations passées. Si le test avait continué sans d'autres requêtes de la part de l'intervenant humain, *Erreur* aurait été le prochain motif actif. Toutefois, vers la 400^e seconde, le robot rencontre des difficultés comme l'indique le niveau d'énergie du motif *Détresse*. Lorsque celui-ci dépasse 70%, le robot essaie de se sortir d'impasse à l'aide du comportement *Débloquer*, mais sans succès. Une fois le niveau d'énergie de *Détresse* supérieur 90%, le robot communique son code de détresse [. . .] afin de demander de l'aide.

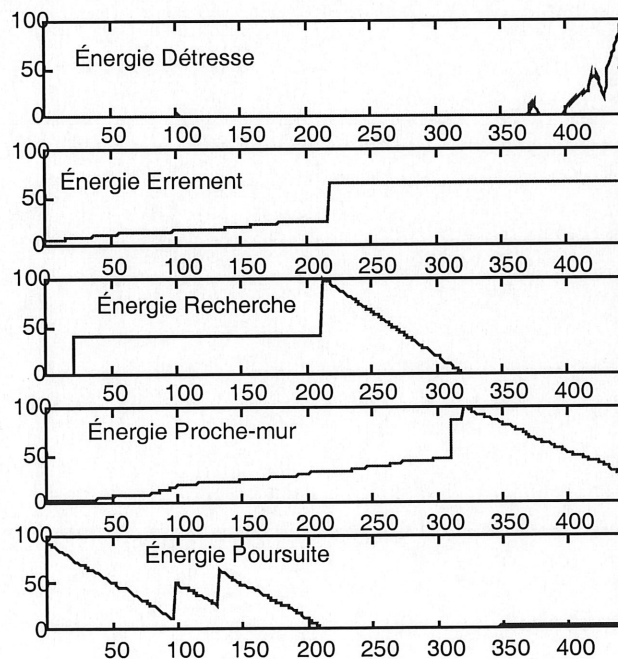


Figure 5.7 Niveaux d'énergie des motifs pour le test 1

Test 2

Les requêtes pour ce test furent formulées selon la séquence suivante : *Recherche*, *Poursuite*, *Errer* (2 fois) et *Proche-mur*. L'intervenant humain bloqua les roues du robot à la fin du test. L'expérience dura huit minutes.

La figure 5.8 montre les résultats obtenus avec *Proche-mur* comme premier motif actif. Le robot reçoit la première requête pour *Recherche* aux alentours de la 50^e sec, et une autre pour *Poursuite* à la 125^e sec. Quand le niveau d'énergie de *Proche-mur* atteint 0, *Poursuite* devient le motif actif, son niveau d'énergie étant le plus élevé en raison de l'influence de l'excitation du motif actif *Proche-mur*. Deux requêtes sont faites pour *Errer* aux alentours de la 200^e sec et de la 235^e sec et ce motif devient actif à la 255^e sec. Une requête pour *Proche-mur* est faite aux alentours de la 345^e sec et il devient à son tour actif à la 450^e sec. Il faut noter que la requête pour *Recherche* ne fut jamais réalisée en raison des influences entre les motifs, des conditions perçues de l'environnement et des requêtes faites pour prioriser les autres buts. Cependant, le niveau d'énergie du motif *Recherche* aurait été en bonne position pour devenir actif si le test avait duré plus longtemps. La même situation de détresse que pour le test 1 fut aussi observée à la fin de ce test.

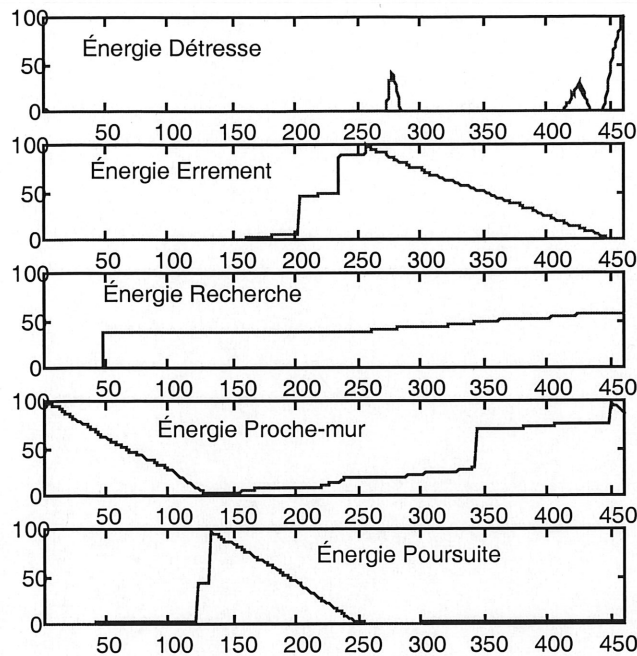


Figure 5.8 Niveaux d'énergie des motifs pour le test 2

Test 3

Lors de ce test, les motifs furent communiqués rapidement selon la séquence suivante : *Recherche*, *Poursuite*, *Errer* et *Proche-mur*. Aucun motif ne fut communiqué plus qu'une fois. L'intervenant bloqua les roues du robot à la fin du test. L'expérience dura six minutes.

La figure 5.9 illustre la trace des niveaux d'énergie des motifs pour le test 3. La première requête s'est faite aux alentours de la 40^e seconde, mais le robot continue d'exécuter son but initial de suivre les murs puisque l'énergie du motif actif n'a pas encore atteint 0. Le robot reçoit une deuxième requête formulée pour le motif *Poursuite* aux alentours de la 110^e seconde et ce motif deviendra actif à la 144^e seconde en raison de son niveau d'énergie un peu plus élevé que celui du motif *Recherche*. La figure 5.10 permet, à plus grande échelle, de distinguer cette différence entre ces deux niveaux d'énergie. Ensuite, le robot reçoit des requêtes pour les motifs *Errer* et *Proche-mur*, respectivement aux alentours de la 180^e seconde et précisément à la 254^e seconde. Et c'est aussi à ce moment que l'énergie du motif actif tombe à 0. La figure 5.11 montre en détail ce qui s'est passé, soit qu'au moment où l'énergie de *Poursuite* tombe à zéro, l'énergie du motif *Errer* fut la plus grande. Avoir fait la

requête pour *Proche-mur* une seconde plus tôt, c'est ce motif qui aurait pris le contrôle du robot. Enfin, le test 3 se termine aussi par la transmission de l'état de détresse du robot.

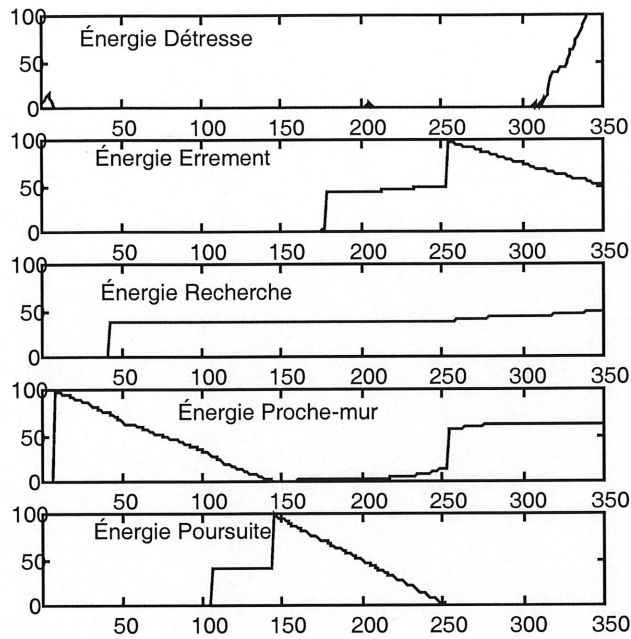


Figure 5.9 Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3

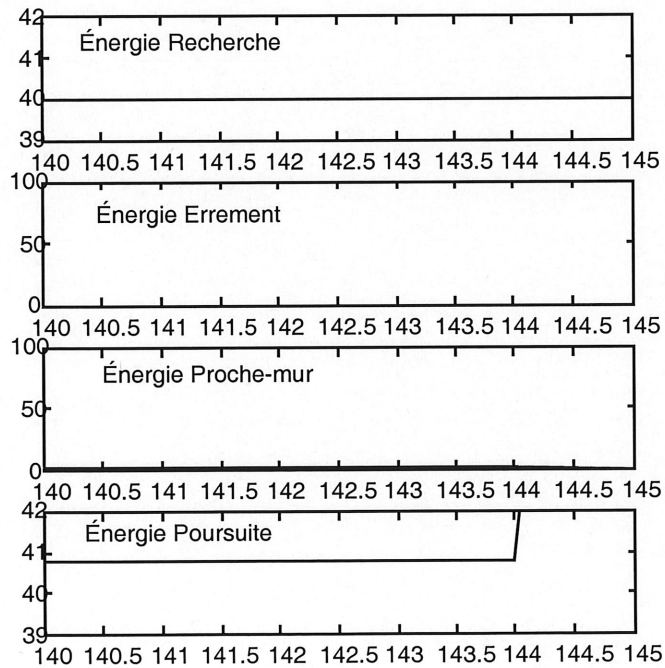


Figure 5.10 Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3, entre la 140^e à 145^e secondes

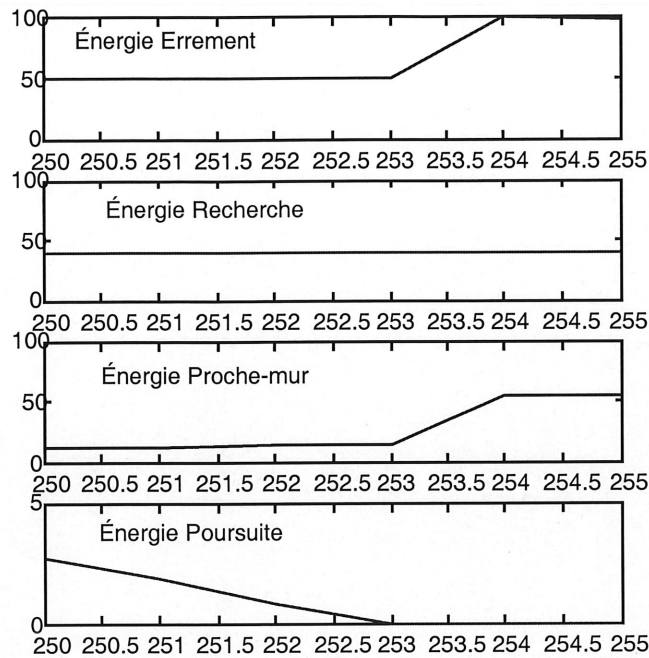


Figure 5.11 Niveaux d'énergie des motifs pour le test 3, entre la 250^e à 255^e secondes

Observations

Dans l'ensemble, les performances du système de communication furent très bonnes, comme l'indiquent les taux de reconnaissance du tableau 5.4. Sept tests ont été réalisées pour évaluer les performances de la réception des codes. Sur les quatre-vingts codes transmis lors de ces tests (comprenant les codes des motifs, d'intention [-] et de fin de communication [. -]), seulement trois erreurs furent observées : deux surviennent sur le code du motif *Recherche* [-] et l'autre sur l'engagement de la communication. Comme mentionné plus tôt, les codes de longue durée donnent de moins bonnes performances de réception. Concernant l'erreur survenue pour le code d'intention, le robot n'avait alors pas une bonne visibilité, à ce moment là, de la lampe de l'intervenant humain.

TABLEAU 5.4 TAUX DE RECONNAISSANCE DES CODES POUR SEPT TESTS

Code	Nombre de fois transmis	Taux de reconnaissance
Intention [-]	25	96%
Fin de transmission [. -]	18	100%
<i>Errer</i> [. . -]	10	100%
<i>Proche-mur</i> [. . . .]	6	100%
<i>Poursuite</i> [. .]	13	100%
<i>Recherche</i> [- -]	8	75%

Le positionnement du robot face à la lampe de l'intervenant humain n'est pas toujours exact, car le robot réagit parfois lentement à la perception de la lampe. L'ajustement de la position du robot se fait par des rotations de 3 ou 5 degrés à toutes les 0.1 seconde, et la surcharge du processeur ne permet pas de garantir cette période. Cette surcharge survient lorsque le programme possède une grande quantité de codes. Par conséquent, le processeur ne peut plus garantir la fréquence minimale 0.1 seconde à chaque processus (voir description du matériel au chapitre 4). Alors, le robot n'a pas toujours le temps de bien corriger son angle pour se positionner directement en face de l'intervenant. Même si cet ajustement incomplet ne permet pas au robot d'être directement en face de la lampe, il assure quand même une bonne visibilité de la lampe.

Enfin, d'autres tests ont été réalisés en faisant émettre au robot le code du motif actif. L'étude détaillée de la communication du motif actif par le robot à d'autres intervenants n'est pas abordée, mais ces tests ont démontré que la communication de l'état du robot peut être plus élaborée que la simple communication d'un état de détresse.

5.3 Jeu de passe

Cette seconde expérience consiste en un jeu de passe, avec une balle orange, entre le robot et l'intervenant humain. Cette problématique fut inspirée par la compétition RoboCup (Veloso 1998 et Asada 1998), une compétition de robot-soccer. Dans la catégorie des robots du même type que le Pioneer I, très peu de stratégies de groupe sont élaborées, et celles qui le sont se basent sur des couleurs passives, (c'est-à-dire sans l'utilisation d'une source de lumière pour projeter la couleur). Ces couleurs passives servent à identifier les robots. De plus, la communication est souvent réalisée par radio. Des problèmes d'interférence par les ondes radio ainsi qu'avec la couleur des vêtements de l'audience et les conditions d'éclairage sont très fréquents, ce qui justifie le faible nombre d'équipes qui tentent d'élaborer de telles stratégies. La communication par signaux lumineux pourrait être forte utile dans un tel contexte. Toutefois, puisque nous ne disposons pas d'un second robot pour reproduire une telle expérience, la validation se limite ici à la communication entre deux agents, un robot et l'autre, l'humain. Nous nous sommes donc contentés de valider l'utilité de la communication pour effectuer une passe entre un robot et un intervenant humain.



Figure 5.12 Jeu de la balle entre le robot et l'intervenant humain

5.3.1 Contexte du jeu de passe

Le contexte d'expérimentation est le suivant :

- Le robot se trouve dans l'enclos d'expérimentation, comme montré à la figure 5.12.
- Lorsque le robot n'est pas en possession de la balle, il la cherche. Lorsqu'il la trouve, il la prend avec son manipulateur. Ce mode est qualifié de *Recherche*.
- Lorsque le robot est en possession de la balle, il continue à se déplacer dans l'enclos et signale son intention de communiquer avec un intervenant humain pour lui faire une passe. Lorsque l'intervenant humain entre en communication avec lui, le robot lui indique dans quelle direction la passe sera faite. Ce mode est qualifié de *Passeur*.
- Lorsque le robot reçoit l'indication que l'interlocuteur humain veut lui faire une passe, le robot se dirige dans la direction communiquée par le passeur pour recevoir la passe. Ce mode est qualifié de *Receveur*.

Les modes du robot changent selon le diagramme d'états présentés à la figure 5.13. En ce qui concerne la transition faisant référence à la trajectoire pour la réception de la balle, ce point est expliqué plus loin à la section 5.3.2.

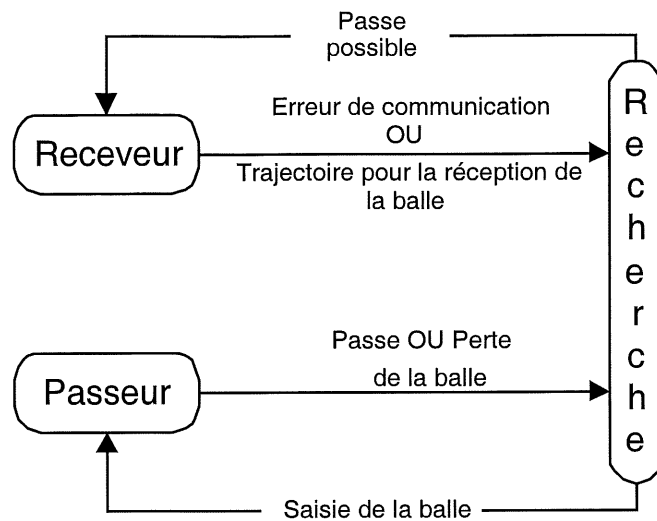


Figure 5.23 Diagramme des modes de fonctionnement du robot pour le jeu de passe

Le protocole de communication utilisé pour le jeu de passe est similaire à celui de la communication des motifs. La seule différence se situe au niveau du code de fin de communication qui n'est nécessaire ici pour terminer la communication. Une fois la direction de passe communiquée, la communication se termine. Au niveau des messages, des codes simples sont utilisés pour indiquer de se diriger vers la gauche [.] ou vers la droite [-] du passeur. Le choix de ces codes se base sur leur bonne reconnaissance. En fonction des résultats présentés au tableau 5.4, ces codes furent choisis de façon à assurer un excellent taux de reconnaissance.

La stratégie générale pour la passe se déroule de la façon illustrée à la figure 5.14. Le passeur oriente la balle dans la direction choisie avec un angle θ , qui est fixé à 50° pour nos tests. Le receveur, approximativement en face du passeur, se dirigera dans un angle de 90° selon la direction communiquée pour intercepter la balle. Si le passeur désire passer à sa droite, alors le message transmis est [-] (code pour indiquer la droite) et le receveur doit alors tourner vers la gauche. La distance d entre les interlocuteurs, telle que perçue par les trois sonars en avant du robot, permet au receveur de calculer la distance p à parcourir par simple trigonométrie.

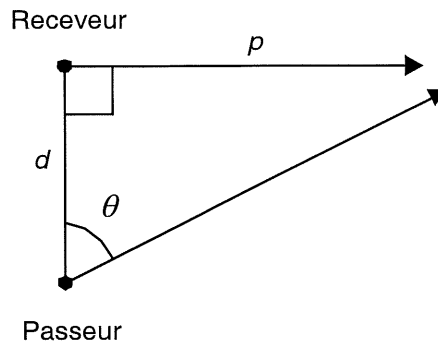


Figure 5.14 Stratégie générale pour la passe, illustrée pour une passe vers la droite du passeur

5.3.2 Description des mécanismes de contrôle du robot

Cinq modules comportementaux sont utilisés pour permettre au robot d'effectuer ces opérations de passe et de réception, en plus des deux comportements *Écouter* et *Parler*. *Avancer* et *Éviter-obstacles* sont les mêmes que ceux décrits à la section 5.2.1. Les nouveaux comportements sont *Recevoir*, *Passer* et *Suivre-balle*.

Voici une description des nouveaux comportements conçus pour ces expériences:

- **Recevoir** : ce comportement place le robot pour qu'il puisse recevoir une passe dans la direction communiquée. Dès que cette direction est connue, le comportement exécute la séquence suivante :
 - calcule la distance à parcourir à partir de la distance entre lui et le passeur selon l'équation (5-3);

$$p = d * \tan 50^\circ \quad (5-3)$$

- oriente le robot dans la direction d'interception de 90°;
- ouvre le manipulateur;

- déplace le robot vers l'avant sur une distance p à une vitesse de 500mm/s;
 - oriente de nouveau le robot en effectuant une rotation inverse de $90^\circ + 50^\circ$ pour faire face au passeur. La rotation de 90° dans le sens inverse permet d'annuler le premier 90° . L'addition du 50° rend le robot face au passeur du fait que celui-ci tourne aussi de 50° .
- **Passer** : le robot n'ayant pas de dispositif pour lancer la balle, ce comportement permet de pousser la balle dans la direction voulue une fois que celle-ci fut transmise. Les opérations suivantes sont réalisées :
 - détermine la direction de la passe en prenant le côté le plus dégagé en fonction des mesures des sonars de côté;
 - attend 5 secondes pour laisser au receveur le temps de se diriger dans la direction de passe;
 - orienter le robot dans la direction communiquée;
 - ouvre le manipulateur;
 - pousse la balle à une vitesse de 500mm/s pendant une seconde;
 - arrête le robot pendant 5 secondes.

La figure 5.15 illustre le processus de passe. Ce comportement permet au robot de déplacer la balle par inertie sur une distance allant jusqu'à 1.8 mètre dans la direction de la poussée.

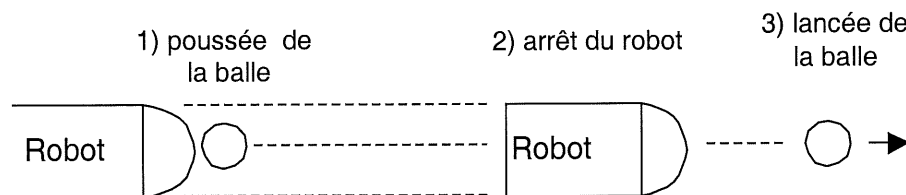


Figure 5.35 Fonctionnement du comportement *Passer*

- **Suivre-balle** : ce comportement est utilisé pour chercher la balle et la saisir par le manipulateur. Il exécute les opérations suivantes :
 - ouvre le manipulateur;
 - lorsque la balle n'est pas dans le champ de vision du robot, il déplace le robot à une vitesse de 300mm/s et l'arrête à toutes les 9 secondes pour faire un balayage d'environ 150° au côté le plus dégagé. Le but de cette manœuvre est de favoriser la perception de la balle en examinant dans différentes directions;
 - lorsque la balle est visible, il oriente le robot vers la balle et la saisit lorsqu'elle se apparaît dans le manipulateur.

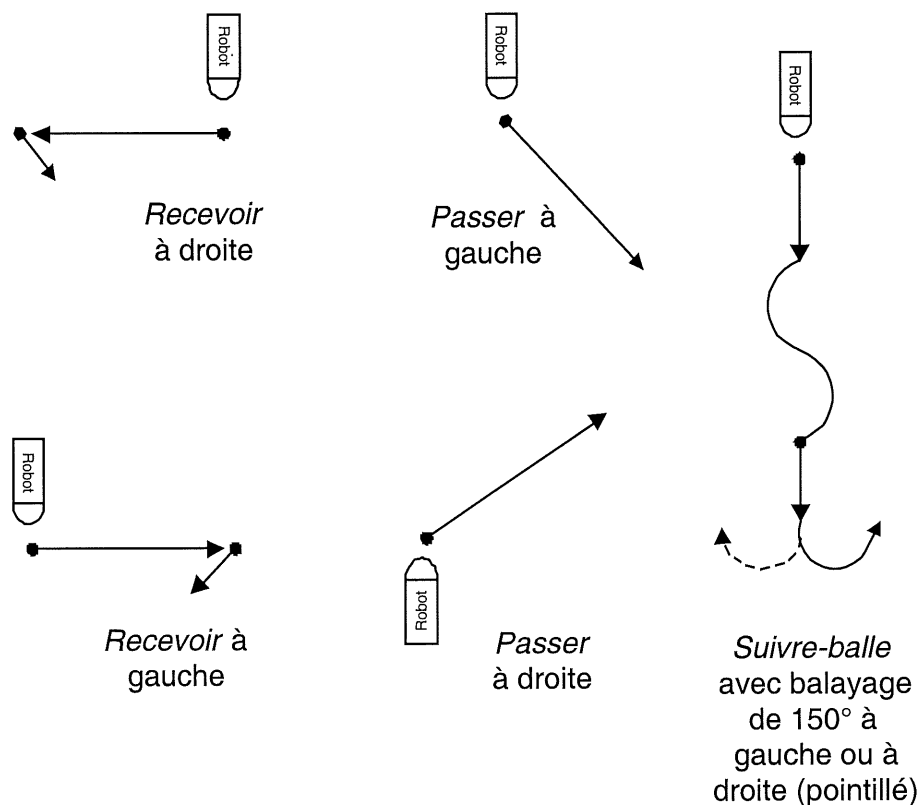


Figure 5.16 Représentation schématique des déplacements réalisés par chaque comportement

La figure 5.16 montre les déplacements réalisés par ces comportements pour une direction donnée. Le déplacement du comportement *Suivre-balle* correspond à la situation qui se présente lorsque le robot cherche la balle.

L'activation des comportements *Avancer*, *Éviter-obstacles*, *Écouter* et *Parler* s'effectue de la même façon que lors des expériences de communication des motifs. Les comportements *Avancer* et *Éviter-obstacles* sont recommandés par le module *Situation Externe* selon la proximité des obstacles et les deux comportements *Écouter* et *Parler* sont recommandés par le module *Cognition*. L'activation des comportements *Suivre-balle*, *Passer* et *Recevoir* s'effectue par le module *Cognition*. Les conditions d'activation de ces trois nouveaux comportements sont simples. Le comportement *Suivre-balle* est recommandé quand le robot n'a pas de balle dans son manipulateur. Le comportement *Passer* exige que la balle soit dans le manipulateur du robot et que la direction de passe soit déjà communiquée au receveur. Le comportement *Recevoir*, quant à lui, demande que la balle ne soit pas dans le manipulateur du robot et que la direction de réception soit reçue du passeur. Il est donc impossible que les comportements *Recevoir* et *Passer* soient activés en même temps en raison des conditions d'exclusivité de la possession de la balle.

La figure 5.17 montre la hiérarchie de priorité utilisée avec ces comportements et le comportement *Écouter*. Le comportement *Suivre-balle* est le moins prioritaire des trois nouveaux comportements afin d'empêcher le robot de suivre la balle lorsqu'il effectue une passe ou lorsqu'il effectue la trajectoire pour recevoir une passe. La priorité entre les comportements *Passer* et *Recevoir* est sans importance, car les deux comportements ne sont jamais activés en même temps. Notez que le comportement *Recevoir* reçoit l'information de la direction à prendre pour recevoir la passe par le module *Cognition* et le comportement *Passer* lui indique dans quelle direction la passe sera effectuée.

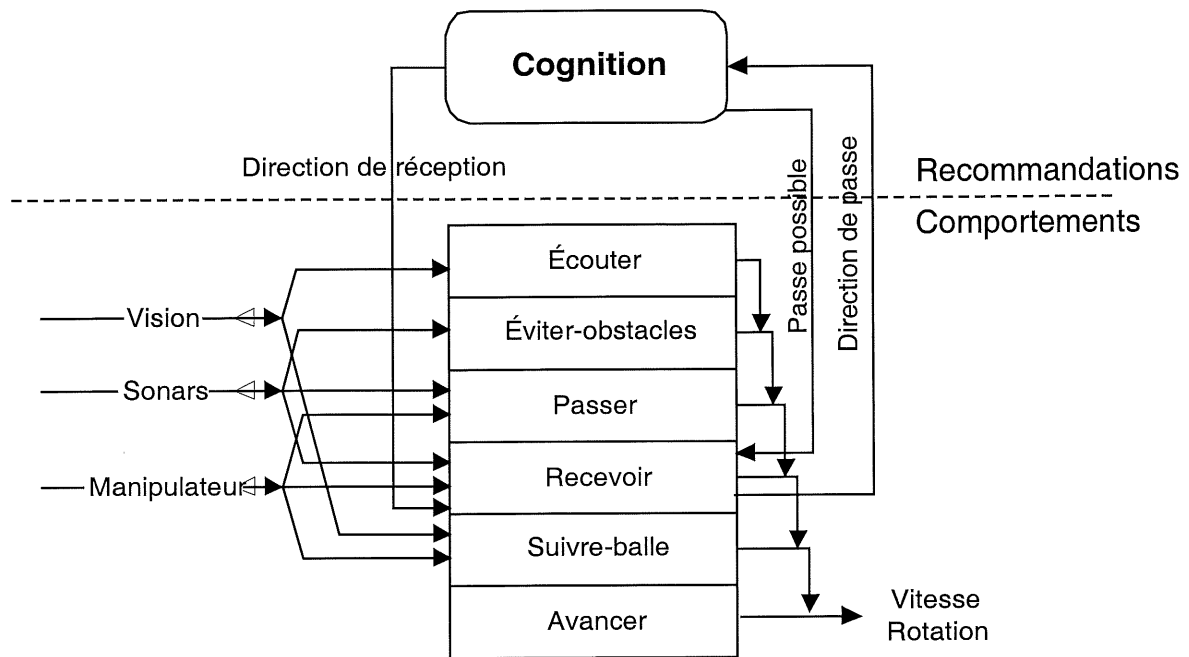


Figure 5.17 Hiérarchie de priorité des comportements

5.3.3 Résultats

Au niveau des performances de communication, la réception des codes est excellente : 100% des codes communiqués furent bien reçus lors des tests. Ce résultat n'a rien de surprenant puisque les codes utilisés pour indiquer la direction de la passe (soit [.] pour gauche et [-] pour droite) sont courts et plus faciles à reconnaître que les codes avec des signaux longs.

Au niveau du jeu de balle, les comportements s'exécutent tel que souhaité. Plus de cinquante passes furent échangées avec le robot. Toutefois, certaines situations se sont avérées problématiques. Tout d'abord, lorsque le passeur n'arrive pas à pousser la balle suffisamment loin, il arrive qu'il saisisse la balle de nouveau. En effet, une fois la passe complétée, le passeur revient en mode de recherche et peut alors reprendre possession de la balle.

Pour le receveur, un des problèmes consiste à se synchroniser avec le passeur pour intercepter la balle. Le problème survient principalement lorsque le robot est en mode de réception (l'intervenant humain, n'a tant qu'à lui, habituellement pas de problème à capter la balle).

Deux stratégies de réception ont été testées : la réception spontanée et la réception synchronisée.

- Réception spontanée. Le receveur se dirige immédiatement vers la balle après avoir complété sa trajectoire de réception et l'intervenant humain passe la balle avant que le robot n'ait terminé son tracé. La figure 5.18 illustre les étapes de cette stratégie. Lorsque le robot est dans ce mode de réception, seulement 12% des passes furent complétées, c'est-à-dire 3 passes sur 25 arrivèrent à être saisies directement par le robot. Les autres passes ratèrent la cible, aboutissant sur d'autres parties du robot ou ailleurs dans l'enclos.

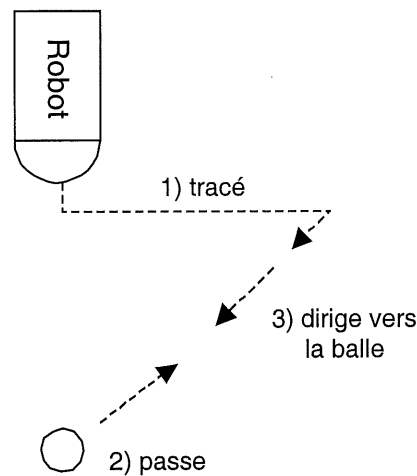


Figure 5.48 Réception spontanée

- Réception synchronisée. Avant de se diriger vers la balle, le receveur attend pendant 3 secondes après avoir complété sa trajectoire. La passe, effectuée par l'intervenant humain, a eu lieu après que le robot ait terminé son tracé. La figure 5.19 illustre les étapes de cette stratégie. Le taux de réussite est meilleur car 52% des passes furent captés par le receveur.

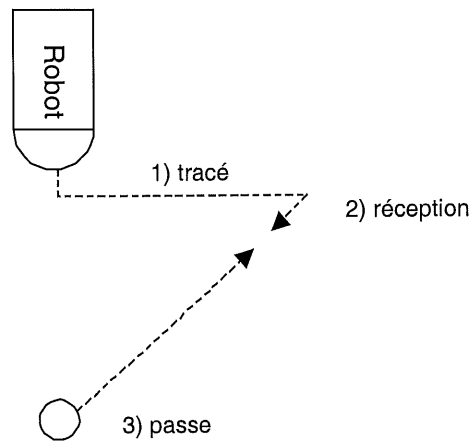


Figure 5.19 Réception synchronisée

La réussite de la réception avec la stratégie synchronisée dépend grandement de la capacité du passeur (intervenant humain) à bien viser le manipulateur du receveur. Avec la stratégie de la réception spontanée, l'intervenant humain doit anticiper la position et le moment où le receveur s'arrêtera, ce qui est plus difficile à réaliser.

Une autre problématique survient lorsque le robot rencontre un obstacle dans sa trajectoire de réception. La figure 5.20 illustre le problème : le robot s'engage dans la direction pour recevoir la passe, mais rencontre un obstacle. Le comportement *Éviter-obstacles*, ayant la plus haute priorité, prend alors le contrôle. Une fois l'obstacle contourné, la trajectoire pour recevoir la passe est reprise mais dans une autre direction. De plus, une fois la trajectoire terminée, il n'est plus possible au robot de s'orienter vers le passeur. Une solution utile pour corriger ce problème serait d'utiliser le système de positionnement interne du robot, basé sur les encodeurs de roues, pour indiquer une position en termes de coordonnées cartésiennes où le robot devrait recevoir la passe. Ceci demande de modifier le comportement *Recevoir*. Par contre, un délai maximal pour l'atteinte de cette position devrait être fixé, car la balle risque d'arriver avant que le receveur ne soit rendu au point d'interception. Dans ce cas, il serait alors inutile pour le receveur de s'y rendre, il devrait plutôt tenter directement de la trouver sans compléter la trajectoire de réception.

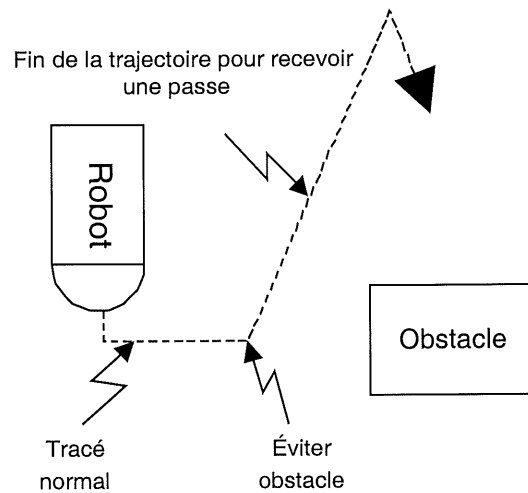


Figure 5.20 Trajectoire normale de réception de passe en présence d'un obstacle

Enfin, une autre difficulté survient lorsque la balle se déplace rapidement. Le comportement *Suivre-balle* oriente le robot vers la balle en fonction de la position de la zone de couleur perçue par le système de vision. Avant que le robot ne puisse répondre aux commandes pour s'orienter vers la balle, une balle en mouvement rapide peut sortir du champ de vision du robot. Une façon de corriger ceci serait d'approximer la trajectoire de la balle à partir de plusieurs lectures sur la position de la balle et de l'aire de la zone de couleur perçue par le système de vision. Ainsi, le robot aurait une indication de la direction à prendre pour rechercher la balle. Une telle stratégie serait implantée dans le comportement *Suivre-balle*.

En conclusion, les résultats démontrent que la communication visuelle peut être utilisée dans un jeu de passe. L'estimation de la position du passeur par le receveur dépend grandement de la qualité de la perception du dispositif lumineux du passeur. Avec le tracé de réception et la direction communiquée, les chances de compléter des passes sont meilleures. Ces résultats mettent aussi en évidence les difficultés à réaliser une simple passe avec un robot. Ainsi, la réception d'une balle, geste bien banale pour un intervenant humain, est une tâche difficile pour un robot.

5.4 Discussion

Les expériences réalisées démontrent que la communication visuelle par signaux lumineux s'avère bénéfique pour interagir avec des robots. Si on tente d'établir un parallèle avec la section 3.1, les informations transmises sont venues satisfaire des besoins physiques (comme la détresse) et des besoins pratiques (comme des requêtes provenant de l'intervenant humain ou encore des informations comme la direction d'une passe).

Les informations communiquées ont aussi servi à pousser les agents à l'action, que ce soit pour prioriser le choix de buts à accomplir ou encore la direction pour recevoir une passe. Ceci démontre bien qu'une communication utile entre les interlocuteurs a eu lieu. Mais l'aspect le plus important découlant de nos recherches, c'est que la communication par signalement lumineux a une double nature, c'est-à-dire qu'elle est à la fois verbale et non-verbale :

- verbale par le protocole de communication et le partage de la signification des codes;
- non-verbale car elle donne directement la position des interlocuteurs l'un par rapport à l'autre. Ils partagent ainsi le même espace perceptuel. Par exemple, pour le jeu de passe, la distance d entre eux est extraite à partir des sonars. Le partage d'un tel contexte ne peut être reproduit par un système de communication radio. Une communication par infrarouge pourrait y arriver avec un excellent débit, mais elle est sujette aux rebondissements des signaux et à l'interférence venant de capteurs de proximité. De plus, elle est invisible pour l'œil humain.

Ces avantages viennent minimiser les inconvénients en termes de largeur de bande de la communication visuelle. Comme mentionné à la section 3.3, une largeur de bande élevée (grande quantité d'information transmise) n'est pas toujours plus bénéfique qu'une plus faible; il est en fait préférable de transmettre une information simple mais significative (Arkin 1998). Les problèmes de portée peuvent être minimisés en équipant les robots de caméras directionnelles avec zoom, repoussant ainsi les limites de portée et de positionnement des robots.

L'architecture de contrôle utilisée (Michaud 1996) permet au robot d'être plus autonome dans son choix de communiquer ou non avec les intervenants du milieu. Le module *Cognition*

recommande la *Désirabilité* des comportements *Écouter* et *Parler* dans les circonstances où il est pertinent de le faire et choisit le message approprié à transmettre. Par exemple, le robot communique son intention d'effectuer une passe seulement lorsqu'il a la balle en sa possession, et sa direction de passe seulement lorsqu'il y a un receveur. La combinaison de l'approche délibérative réalisée par le module *Cognition* et de l'approche comportementale réalisée par ces deux comportements amène son intelligence à un plus haut niveau et une meilleure rapidité de réponse.

Comme conclusion, il ne faut pas croire que le moyen de communication présenté dans ce mémoire est meilleur que la communication par voie électronique, comme la radio par exemple. Il faut plutôt le voir comme complémentaire, apportant des indications simples mais essentielles pour bien établir un contexte perceptuel partagé par les interlocuteurs.

6 CONCLUSION

L'objectif des travaux de recherche présentés dans ce mémoire est d'étudier les avantages et les inconvénients de la communication visuelle pour interagir avec un robot mobile. En utilisant un dispositif lumineux de couleur, une approche de communication basée sur des signaux de courtes et de longues durées fut développée et validée sur un robot mobile. Le robot mobile est en mesure de percevoir ces messages avec l'aide d'une caméra couleur, équipement couramment utilisé sur les robots mobiles. Les expériences démontrent que la communication visuelle s'avère une méthode intéressante et utile pour interagir avec un robot mobile. Bien que le débit de communication soit faible, il fut démontré que la transmission d'informations simples comme des motifs et des directions peuvent créer des dynamiques intéressantes dans les interactions avec le robot.

Cette première réalisation d'un mécanisme de communication visuelle, concept qui n'avait été jusqu'à maintenant traité qu'en simulation, met en évidence la richesse de l'information véhiculée. La transmission contient de l'information en soi, en plus du message lui-même, qui fournit des indications sur la position relative de l'interlocuteur ainsi que sur le partage de l'espace perceptuel des intervenants. L'obtention de ces informations ne demande pas de traitement supplémentaire.

Une telle méthode de communication peut avoir des incidences importantes dans l'établissement de comportements sociaux entre les robots. L'identification des autres robots ainsi que la communication de messages simples sont alors nécessaires. Par contre, l'utilisation de la communication par signaux visuels dans un tel contexte demandera de résoudre les difficultés suivantes :

- Synchronisation du positionnement des robots. Lorsque deux robots sont en mouvement, il peut être difficile de les synchroniser afin qu'ils se stabilisent l'un en avant de l'autre. Avec le mécanisme actuel, le récepteur commence par s'immobiliser pour s'ajuster au signal d'intention du signaleur. Ce dernier continue par contre à se déplacer, et un délai d'environ cinq secondes doit s'écouler avant qu'il puisse identifier qu'un interlocuteur a bien reçu son signal d'intention. Le signaleur risque ainsi de perdre le récepteur de son

champ de vision. Une solution simple consiste à immobiliser le signaleur à chaque fois qu'il veut émettre son signal. Le récepteur pourra alors se positionner en fonction de la position du signal perçu. Les expériences réalisées avec l'intervenant humain ne permettraient pas de prendre ces facteurs en considération.

- Interférence de la communication par plusieurs signaleurs. L'algorithme, qui détecte la présence de la plus grande région de couleur dans l'image, peut avoir de la difficulté à interpréter les messages. Prendre en considération la position et l'aire de la surface de couleur perçue lors de l'établissement de la communication permettrait d'éviter les confusions si plusieurs signaleurs sont détectés par le récepteur. Cette solution serait aussi utile pour la détection d'un objet statique de même couleur que celle utilisée pour le signalement perçu.

D'autres extensions pourraient aussi être développées pour la communication visuelle. Par exemple, un mécanisme pour améliorer la tolérance aux erreurs de communication pourrait être utile. Au lieu de couper la communication lorsqu'une erreur survient, une demande de retransmission pourrait être transmise au signaleur, en imposant un nombre limité de demandes pour éviter de rester bloqué dans ce cycle. Un autre projet intéressant serait d'utiliser le dispositif lumineux pour transmettre des signes issus d'un langage composé d'un alphabet de signes, comme le morse par exemple.

Somme toute, de telles recherches apportent des contributions intéressantes sur les fonctionnalités requises pour la conception de robots mobiles qui doivent interagir avec d'autres intervenants dans des conditions ouvertes et diversifiées, comme elles surviennent dans la vie de tous les jours.

BIBLIOGRAPHIE

Adler, R. B. et Towne, N. (1991), *Communication et Interaction*, Éditions de la Chenelière.

Arkin, R.C. (1998), *Behavior Based Robotics*, MIT Press.

Asada, M., Suzuki, Y., Takahashi, Y., Uchibe, E., Nakamura, M., Mishima, C., Ishizuka, H. et Kato, T. (1998), 'Trackies RoboCup-97 middle-size league world cochampion', *AAAI Magazine*, pp. 71-78.

Balch, T. et Arkin, R. (1994), 'Communication in reactive multiagent robotic system', *Autonomous Robots*, vol. 1, pp. 1-25.

Bay, John S. (1995), 'Design the « Army-Ant » cooperative lifting robot', *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 36-44.

Bekey, G.A. (1997a), 'The future and intelligent machines : Charting the path', *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 12-16.

Bekey, G.A. (1997b), 'Needs for robotics in emerging applications : A research agenda', *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 12-14.

Billard, A. et Dautenhahn, K. (1997), 'Grounding communication in situated social robots', dans *Proceedings TIMR*, Manchester.

Brooks, R.A. (1986), 'A robust layered control system for a mobile robot', *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no 1.

Brooks, R.A.(1996), 'L - User's Manual'. Documentation technique, IS Robotics, Cambridge, Boston.

Brooks, R.A. (1996), 'MARS: Multiple Agency Reactivity System'. Documentation technique, IS Robotics, Cambridge, Boston.

Buck, J. (1988), 'Synchronous rhythmic flashing of fireflies', *The Quarterly Review of Biology*, vol. 63, no 3, pp. 265-289.

Carlson, A. D. et Copeland, J. (1985), 'Flash communications in fireflies', *The Quarterly Review of Biology*, vol. 60, no 4, pp. 415-436.

Dudek, G., Jenkin, M., Milius, E. et Wilkes, D. (1995), 'Experiments in sensing and communication for robot convoy navigation', dans *Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Robots and System (IROS)*, pp. 268-273.

Itoh, Y. et Anzai, Y. (1993), 'Cooperative task planning for autonomous mobile robots', *Systems and Computer in Japan*, vol. 24, no 14.

Mataric, Maja. (1995), 'Issues and approaches in the designing of autonomous agents', *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, no 2-4. pp. 321-331.

Mataric, Maja. (1997), 'Using communication to reduce locality in multi-robot learning', dans *Proceedings AAAI*, pp. 637-642.

Michaud, F. (1996), 'Nouvelle architecture unifiée de contrôle intelligent par sélection intentionnelle de comportements', Thèse de doctorat, Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Sherbrooke.

Michaud, F. et Vu, M.T. (1999), 'Managing robot autonomy and interactivity using motives and visual communication', dans *Proceedings Autonomous Agents*, pp. 160-167.

McFarland, D. (1992), 'The Oxford companion to animal behavior', *Oxford University Press*.

McKerrow, P. J. (1991), *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley.

Murciano, A. et Millan, J. (1997), 'Learning signaling behaviors in cooperative agents', *Adaptative Behavior*, vol. 5, no 1.

Parker, L. (1992), 'Adaptative action selection for cooperative agent teams', dans *Proceedings Second International Conference on Simulation of Adaptative Behaviors*, MIT Press.

Pruski, A. (1996), *Robotique Mobile - La Planification de la Trajectoire*, Édition Hermès.

Russell, S. et Norvig, P. (1995), *Artificial Intelligence A Modern Approach*, Prentice Hall.

Sathré, F.S., Olson, R.W. et Whitney, C.I. (1977), *An Introduction to Interpersonal Communication*, Scott, Foresman and Company.

Stilwell, D. et Bay, J.S. (1993), 'Toward the development of a material transport system using swarms of ant-like robots', dans *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, pp. 766-771.

Stilwell, D. et Bay, J.S. (1994), 'Optimal control for cooperating mobile robots bearing a common load', dans *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, pp. 58-63.

Tinbergen, N. (1967). *La Vie Sociale des Animaux*. Édition Française Payot.

Unsal, C. et Bay, J. (1994), 'Spatial self-organisation in large populations of mobile robots', dans *Proceedings IEEE International Symposium in Intelligent Control*.

Veloso, M., Stone, P. et Han, K. (1998), 'CMUnited-97 RoboCup-97 small-robot world champion team', *AAAI Magazine*, pp. 61-69.

Vencl, F.V., Blasko, B.J. et Carlson, A.D. (1994), 'Flash behavior of female photuris versicolor fireflies (coleoptera : lampyridae) in simulated courtship and predatory dialogues', *Journal of Insects Behavior*, vol. 7, no 6.

Wang, J. (1994), 'On sign-board based inter-robot communication in distributed robotic systems', dans *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego (USA).

Werger, B.B. et Mataric, M. (1996), 'Robotic « food » chains : Externalization of state and program for minimal-agent foraging', dans *Proceedings Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*.