



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

FACULTÉ DE GÉNIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE

LOCALISATION D'AGENTS MOBILES PHYSIQUES

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées

Jonathan BISSON

SHERBROOKE (QUÉBEC)

AVRIL 2003

Résumé

Une fonctionnalité intéressante pour des robots opérant au sein d'un groupe est d'arriver à déterminer la position des autres robots du groupe. L'objectif du projet est de concevoir un dispositif permettant à des robots de se localiser sans utiliser de balises ou de références extérieures, dans un rayon de 5 à 10 mètres. Ce dispositif doit permettre aux robots de se reconnaître et de se localiser directement les uns par rapport aux autres, être peu dispendieux, facile à installer sur à peu près n'importe quels robots et être le plus indépendant possible du nombre d'agents physiques mobiles à localiser.

L'approche retenue consiste à utiliser plusieurs récepteurs sur un même agent mobile pour détecter une onde transmise par un autre agent mobile. L'information recueillie, qui est liée au temps d'arrivée de l'onde, est ensuite utilisée pour déterminer la position du transmetteur par rapport aux récepteurs. Deux approches sont étudiées: la première, utilisant des ondes électromagnétiques, s'est avérée difficile à mettre en œuvre alors que la seconde, utilisant des ondes ultrasoniques, a donné des résultats extrêmement encourageants. Le système ultrasonique permet la localisation dans un rayon de 8,1 m avec une erreur absolue moyenne de 3,75 mm sur la distance et de 1,84 degrés sur l'angle. Le dispositif a permis à deux robots de se déplacer avec succès dans une configuration meneur-suiveur.

Remerciements

L'auteur tient à remercier les personnes suivantes:

- ◆ François Michaud, directeur de maîtrise et professeur agrégé au Département de génie électrique et de génie informatique, pour son soutien, ses commentaires, ses idées et son incroyable disponibilité.
- ◆ LABORIUS, le laboratoire de robotique mobile et système intelligent, pour avoir fourni les infrastructures nécessaires à la conception, la réalisation et le déverminage des prototypes électroniques.
- ◆ Dominic Létourneau, professionnel de recherche LABORIUS, pour ses commentaires et pour l'aide apportée à la réalisation des expérimentations.
- ◆ Serge Caron, technicien au Département de génie électrique et de génie informatique, pour la rapidité de fabrication des PCB et de commande de pièces.
- ◆ Mario Leblanc, professeur agrégé au Département de génie électrique et de génie informatique, pour l'aide apportée sur les expérimentations reliées au prototype électromagnétique.
- ◆ Catherine, ma conjointe, pour sa présence et son soutien.
- ◆ Toutes les personnes que j'ai oubliées et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Ce projet fut réalisé grâce au CRSNG, au FCI et au programme de Chaire de recherche du Canada.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Approches actuelles de localisation d'agents physiques mobiles.....	3
2.1. Localisation en robotique mobile.....	3
2.1.1. Localisation par rapport à une carte.....	3
2.1.2. Localisation par rapport à des balises.....	4
2.1.3. Localisation par rapport à d'autres robots.....	7
2.2. Localisation dans des domaines autres que la robotique.....	10
2.2.1. Localisation grande échelle.....	10
2.2.2. Localisation petite échelle.....	12
3. Mise en œuvre et évaluation des technologies pour la localisation.....	15
3.1. Théorie d'opération.....	17
3.1.1. Détermination de la position par les temps de vol.....	20
3.1.2. Détermination de la position par les différences de temps de vol.....	22
3.1.3. Détermination de l'orientation.....	23
3.2. Prototype utilisant des ondes électromagnétiques (RF).....	25
3.2.1. Description du système.....	27
3.2.2. Résultats expérimentaux.....	29
3.3. Prototype utilisant des ondes ultrasoniques.....	34
3.3.1. Simulations.....	36
3.3.2. Choix des émetteurs-récepteurs et de la fréquence d'opération.....	51
3.3.3. Description du système de localisation ultrasonique.....	55
3.3.4. Caractérisation du système.....	61
3.3.5. Expérimentation sur des robots.....	74
4. Discussion.....	81
4.1. Prototype RF.....	81
4.2. Prototype ultrasonique.....	81
5. Conclusion.....	88
Annexe A Ajout d'un récepteur pour la détermination de la vitesse du son.....	90
Annexe B Puissance de transmission ultrasonique vs rayon d'opération.....	92
Annexe C Fiches techniques des capteurs ultrasoniques.....	95
Annexe D Interférence entre le système ultrasonique et les sonars.....	98
Bibliographie.....	100

Liste des figures

Figure 3.1 Configuration généralement utilisée pour les capteurs.....	18
Figure 3.2 Configuration proposée pour les capteurs.....	19
Figure 3.3 Position des transmetteurs-récepteurs pour l'utilisation des temps de vol.....	20
Figure 3.4 Détermination de l'orientation par l'échange d'informations.....	24
Figure 3.5 Détermination de l'orientation en utilisant deux transmetteurs sur chaque agent...	25
Figure 3.6 Schéma du prototype électromagnétique.....	27
Figure 3.7 Réponse du AD8302.....	28
Figure 3.8 Tension de sortie du récepteur lorsque la puissance d'entrée est de -20 dBm.....	30
Figure 3.9 Tension de sortie du récepteur lorsque la puissance d'entrée est de -65 dBm.....	31
Figure 3.10 Résultats expérimentaux intérieurs.....	32
Figure 3.11 Résultats expérimentaux extérieurs.....	33
Figure 3.12 Résultats expérimentaux intérieurs sans déphaseur.....	34
Figure 3.13 Erreur sur la distance introduite par une variation de température.....	35
Figure 3.14 Distance d en fonction de (x, y)	37
Figure 3.15 Angle θ en fonction de (x, y)	37
Figure 3.16 Distance d en fonction de (x, y) avec erreur sur les d_{ij}	39
Figure 3.17 Angle θ en fonction de (x, y) avec erreur sur les d_{ij}	39
Figure 3.18 Erreur sur d en fonction de (x, y)	40
Figure 3.19 Erreur sur θ en fonction de (x, y)	40
Figure 3.20 Détermination de la distance avec la loi des sinus.....	42
Figure 3.21 Erreur sur d déterminée à l'aide de d_{AD} et θ	43
Figure 3.22 Erreur sur d déterminée en utilisant d_{AD} , d_{BD} , d_{CD} et θ	43
Figure 3.23 Erreur entre d et d_{AD}	44
Figure 3.24 Erreur entre la distance d et la moyenne des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD}	44
Figure 3.25 Erreur sur la distance d liée à la moyenne des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD}	45
Figure 3.26 Erreur sur d lorsque le transmetteur est 300 mm au-dessus des récepteurs.....	49
Figure 3.27 Erreur sur θ lorsque le transmetteur est 300 mm au-dessus des récepteurs.....	49
Figure 3.28 Disposition de plusieurs émetteurs-récepteurs pour couvrir 360 degrés.....	53
Figure 3.29 Utilisation d'un cône réflecteur au-dessus d'un émetteur-récepteur.....	53
Figure 3.30 Schéma-bloc du système de localisation ultrasonique.....	55
Figure 3.31 Schéma d'interaction entre le contrôleur et une carte d'émetteur-récepteur.....	56
Figure 3.32 Schéma simplifié de la carte d'émetteur-récepteur.....	56
Figure 3.33 Schéma de l'interaction entre le contrôleur et le module RF.....	58
Figure 3.34 Représentation des trois récepteurs et du transmetteur.....	61
Figure 3.35 Emplacement des composants sur la plaque de réception.....	63
Figure 3.36 Effet du contrôleur sur l'amplitude du signal.....	64
Figure 3.37 Méthodologie de caractérisation.....	67
Figure 3.38 Photo du montage de caractérisation.....	67
Figure 3.39 Erreur sur d en fonction de la position (x, y)	69
Figure 3.40 Erreur sur d en fonction de la distance.....	69
Figure 3.41 Erreur sur d en fonction de l'angle.....	70
Figure 3.42 Erreur sur θ en fonction de la position (x, y)	70
Figure 3.43 Erreur sur θ en fonction de la distance.....	71

Figure 3.44 Erreur sur θ en fonction de l'angle.....	71
Figure 3.45 Système de test sur les robots.....	75
Figure 3.46 Photo du système sur les robots.....	75
Figure 3.47 Distance d en fonction du temps (consigne de 750 mm).....	76
Figure 3.48 Effet du faible taux de rafraîchissement du laser.....	76
Figure 3.49 Erreur sur la distance d (consigne de 750 mm).....	78
Figure 3.50 Angle θ en fonction du temps (consigne de 0 degré).....	78
Figure 3.51 Erreur sur l'angle θ (consigne de 0°).....	78
Figure 4.1 Robot suivant une personne à l'aide du dispositif ultrasonique.....	87

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Statistique sur l'erreur des résultats obtenues par le système d'équations.....	41
Tableau 3.2 Erreur sur la distance d en fonction de l'erreur ajoutée.....	47
Tableau 3.3 Erreur sur l'angle θ en fonction de l'erreur ajoutée.....	48
Tableau 3.4 Erreur sur la distance d en fonction de la distance r entre les récepteurs et l'origine.....	50
Tableau 3.5 Erreur sur l'angle θ en fonction de la distance r entre les récepteurs et l'origine.....	50
Tableau 3.6 Erreur expérimentale sur la distance d pour différentes positions de récepteurs.....	72
Tableau 3.7 Erreur expérimentale sur l'angle θ pour différentes positions de récepteurs....	73
Tableau 3.8 Erreur sur la distance d lors des expérimentations sur les robots.....	79
Tableau 3.9 Erreur sur l'angle θ lors de l'expérimentation sur les robots.....	80

1. INTRODUCTION

Il existe plusieurs avantages à faire travailler des robots mobiles en groupe plutôt qu'individuellement [ARKIN, 1998]: l'exploitation du parallélisme relié à l'équipe permet d'agir simultanément à plusieurs endroits, d'exécuter plus efficacement différentes tâches, dont certaines ne pouvant être effectuées par un seul robot. Plusieurs robots peuvent partager un capteur ou encore mettre en commun l'information obtenue par les capteurs de tous les robots. De plus, la redondance augmente la fiabilité du système.

Par contre, la présence de plusieurs robots dans un même environnement occasionne des interférences pouvant amener des blocages ou des collisions. Il est donc important que les robots arrivent à se percevoir efficacement. Une fonctionnalité intéressante pour des robots opérant au sein d'un groupe est d'arriver à déterminer la position des autres. Il existe des approches de contrôle de groupes de robots qui, à partir des actions des robots dans l'environnement, arrivent à réaliser une tâche commune sans avoir besoin de se localiser mutuellement [BECKERS et coll., 1994]. Toutefois, la localisation est requise pour des tâches où ils doivent coordonner leurs actions. Par exemple, il est possible que des robots cheminent ensemble, en formation quelconque, vers une même destination. De tels convois peuvent être utilisés entre autres pour le transport de matériel ou le déminage. La localisation permet également aux robots d'identifier les membres de son équipe et de les différencier de l'environnement. La localisation est aussi nécessaire pour mettre en place un système de capteurs distribués: en connaissant la position de chaque robot d'un groupe, il est alors possible d'utiliser les informations obtenues par leurs capteurs respectifs afin de cartographier l'environnement dans lequel ils évoluent et ce, avec une plus grande rapidité et une plus grande précision que si un seul robot était utilisé.

La plupart des approches actuelles pour la localisation de robots ou d'agents physiques se basent sur des connaissances de l'environnement, tirées de balises ou de cartes. Les robots se localisent donc par rapport à l'environnement et peuvent ensuite transmettre leur position pour que les autres membres du groupe puissent la connaître. Cette façon de faire, qualifiée de localisation globale, nécessite de modifier ou de modéliser l'environnement dans lequel le

groupe de robots évolue. Cette tâche peut être difficile et coûteuse si le groupe doit se déplacer dans un environnement vaste ou non limité. De plus, si cet environnement est dynamique, c'est-à-dire que plusieurs éléments peuvent être déplacés et plusieurs personnes ou robots peuvent y circuler, il devient difficile pour les robots de s'y localiser.

D'autres approches cherchent plutôt à utiliser une localisation dite locale, c'est-à-dire que chaque robot est en mesure de percevoir les positions relatives des autres robots en proximité. Il est alors plus facile de travailler dans des environnements inconnus ou dynamiques. Cependant, tout le problème repose sur la capacité de percevoir les autres agents dans l'environnement. Dans cette optique, l'objectif du présent projet est de concevoir un système permettant à des robots de se localiser sans utiliser de balises ou de références globales extérieures. Ce système doit permettre aux robots de se reconnaître et de se localiser les uns par rapport aux autres de façon locale, être peu dispendieux, facile à installer sur à peu près n'importe quels robots et être le plus indépendant possible du nombre d'agents physiques mobiles à localiser. Le dispositif doit avoir un rayon d'opération de 5 à 10 mètres.

Le présent ouvrage présente une approche de localisation et deux mises en œuvres de cette approche utilisant des technologies différentes, soit les ondes électromagnétiques et les ondes ultrasoniques. Cette dernière est celle qui donne les meilleurs résultats. Dans cet ouvrage, la section 2 décrit les approches actuelles de localisation. La section 3 présente la mise en œuvre et l'évaluation des technologies étudiées dans le projet. La section 4 poursuit avec une discussion sur les résultats obtenus, pour ensuite conclure à la section 5.

2. APPROCHES ACTUELLES DE LOCALISATION D'AGENTS PHYSIQUES MOBILES

Cette section présente une revue des approches portant tout d'abord sur la localisation dans le domaine de la robotique mobile, suivie de la localisation d'agents dans d'autres domaines. Même si le projet a pour objectif de développer une approche locale, les approches mentionnées dans cette section portent sur la localisation d'agents en général, de façon à faire le tour de tous les dispositifs et les technologies envisageables.

2.1. Localisation en robotique mobile

Plusieurs approches de localisation sont utilisées en robotique mobile. Elles ont été classées ici en trois catégories: localisation par rapport à une carte, localisation par rapport à des balises et localisation par rapport à d'autres robots. Même si les systèmes des deux premières catégories se localisent par rapport à l'environnement, il est possible pour des robots utilisant ces systèmes de connaître la position des autres robots du groupe en échangeant de l'information. Les sections suivantes présentent une description générale de chacune des catégories ainsi que des exemples de système.

2.1.1. Localisation par rapport à une carte

Il est possible pour des robots d'utiliser des caméras ou encore des dispositifs donnant la distance des objets à proximité, par exemple des sonars ou des lasers, pour se localiser sur une carte à l'aide de différents algorithmes. Les caméras sont utilisées pour identifier dans l'environnement toutes sortes de repères. Ces repères peuvent être des objets de couleurs spécifiques, des contours, des lumières, des symboles, etc. La précision de la localisation dépend du type de repère et du type de caméra utilisée. L'utilisation de senseurs de proximité retournant la distance des objets environnants demande une carte de l'environnement la plus exacte possible puisque le robot essaie de trouver dans la carte l'endroit où il se trouve en fonction de la proximité des objets qui l'entourent. Un tel système peut, par l'échange d'information entre robots, permettre à chacun des robots d'un groupe de connaître la position

des autres robots du groupe puisque tous les robots se localisent par rapport au même système de coordonnées.

Un exemple de système utilisant une carte pour faire de la localisation est décrit dans [DULIMARTA et coll., 1997]. Ce système utilise des caméras pour repérer les lumières du plafond ainsi que les numéros de locaux de façon à connaître sa position. Puisqu'il n'est pas possible de différencier les lumières les unes des autres, elles sont utilisées pour se localiser de façon relative par rapport à la dernière lumière rencontrée. Les numéros de locaux sont utilisés pour localiser le robot de façon absolue, puisque tous les locaux ont un numéro unique. Cette approche a l'avantage de ne pas être trop perturbée par un environnement dynamique: même si des objets sont déplacés ou des personnes circulent dans l'environnement, il est toujours possible de se repérer puisque les repères ne sont pas affectés.

2.1.2. Localisation par rapport à des balises

Des robots peuvent aussi se localiser par rapport à des balises placées dans l'environnement. Les robots peuvent détecter les balises ou être détectés par les balises. Ces systèmes peuvent utiliser des ondes ultrasoniques, lumineuses, radio ou autres, ou tout simplement des balises visuelles. La précision de la localisation dépend du type de balise. Par exemple, des balises ultrasoniques peuvent donner une position (x, y) précise alors que des balises visuelles peuvent servir à identifier des points importants de l'environnement sans pour autant aider à déterminer précisément la position (x, y) . De telles approches peuvent, par l'échange d'information entre robots, permettre à chacun des robots d'un groupe de connaître la position des autres robots puisqu'ils se localisent tous par rapport au même système de repères.

Plusieurs systèmes utilisent des balises ultrasoniques situées dans l'environnement pour localiser les robots. Le principe de base consiste à déterminer la distance entre l'agent mobile et chacune des balises en mesurant le temps de vol d'une onde ultrasonique. Le système de la compagnie *IS Robotics Inc.* [EVERETT, 1995], conçu pour leur robots *Genghis*, utilise deux transmetteurs ultrasoniques placés dans l'environnement à des positions précises et qui émettent tour à tour une onde ultrasonique. Un récepteur placé sur chacun de robots et un lien de communication RF sont utilisés pour déterminer les temps de vols entre le robot et chacune

des balises. Un des problèmes reliés aux ultrasons est l'angle d'opération des émetteurs-récepteurs ultrasoniques. Pour régler ce problème, le récepteur est à la verticale avec un cône placé au-dessus, pointant vers le centre du récepteur. De cette façon, les signaux arrivant de toutes les directions sont réfléchis vers le récepteur. Les robots peuvent donc détecter les signaux émis par les balises peu importe leur orientation. Une fois les temps de vols connus, il est possible de déterminer la position (en deux dimensions) du robot puisque les balises sont positionnées en périphérie de l'air de jeux: si les balises étaient placées dans l'air de jeux, une de plus serait nécessaire pour résoudre une ambiguïté de 180°. Ce système a une précision de 13 mm sur une surface de 9 m par 9 m. Le système présenté dans [WU et coll., 2001] utilise trois transmetteurs dans l'environnement et deux récepteurs sur un robot. Cette façon de faire permet de déterminer l'orientation du robot en plus de sa position (la localisation en trois dimensions est même possible, mais avec des contraintes très précises). Les équations développées exigent toutefois que les transmetteurs soient placés aux sommets d'un triangle isocèle et le problème de l'angle d'opération des émetteurs-récepteurs n'est pas abordé. Les résultats d'expérimentations présentés étant très limités (seulement deux points de mesures et quatre orientations différentes), il est difficile de chiffrer la précision du système pour la comparer avec les autres approches. Un autre système utilisant des balises pour la localisation en trois dimensions est présenté dans [FIGUEROA et coll., 1994b]. Ce système utilise un transmetteur sur l'agent mobile et cinq récepteurs dans l'environnement. Pour garantir une solution au système d'équations, certaines contraintes existent pour le positionnement des récepteurs. La position de ces derniers reste toutefois assez flexible. Le cinquième récepteur permet de déterminer la vitesse du son en plus de la position (x,y,z) du transmetteur, ce qui rend le système plus robuste à des variations de conditions environnementales. Encore une fois, le problème de l'angle d'opération des émetteurs-récepteurs n'est pas abordé. L'erreur du système est inférieure à 2,54 mm dans un volume d'opération de 6 m³.

De telles balises ultrasoniques sont dites actives puisqu'elles transmettent un signal. Il est également possible d'utiliser des balises passives, dont la position est connue, avec un système ultrasonique. Le système présenté dans [BEOM et coll., 1995] utilise un sonar rotatif et deux balises cylindriques de diamètre différent. La forme des balises permet de les différencier de l'environnement, généralement constitué d'objets plus carrés. En observant les données

recueillies par le sonar lorsque le robot se déplace, les balises ressortent clairement comme des points alors que les murs et autres objets sont perdus dans des nuages de points. Contrairement au système de *IS Robotics Inc.* qui permet d'obtenir la position immédiatement après la mise sous tension, cette approche nécessite que le robot se déplace et prenne plusieurs mesures pour obtenir sa position. Le système présente donc une dépendance à l'odométrie. Avec une distance entre les balises de 2,704 m, une précision de 3 cm sur la position (x,y) et de 2° sur l'orientation est obtenue lors d'un déplacement en ligne droite.

Une autre approche est celle de [BARFOOT et coll., 2001] qui exploite un système de localisation utilisant trois balises lumineuses. Les robots sont équipés de photodétecteurs sur une base rotative pouvant détecter les balises. Connaissant la direction dans laquelle se trouve chacune des balises ainsi que la position de ces dernières, chaque robot peut connaître sa position et son orientation par rapport aux balises. La précision du système est de ± 15 cm. Une mesure de position peut être obtenue en deux secondes, période durant laquelle le robot doit rester immobile. Les robots utilisent un système classique d'odométrie et réajustent leur position avec les balises après avoir parcouru une certaine distance. Le système permet de positionner les robots selon différentes configurations de formations, de diriger les robots vers un endroit précis ou encore de former un convoi de robots qui se déplacent les uns derrière les autres (avec la précision mentionnée plus haut et le désavantage de devoir s'arrêter pour réajuster la position).

Comme exemple de balises visuelles, [MICHAUD et coll., 2000] utilise des symboles que le robot est entraîné à reconnaître à l'aide d'une caméra. Des symboles sont placés, par exemple à proximité d'une station de recharge ou d'un ascenseur, de façon à ce que le robot reconnaisse des endroits où il doit effectuer certaines tâches. Le robot n'a alors aucune idée où se trouve l'ascenseur par rapport à la station de recharge, puisqu'il n'a pas de carte de son environnement. Toutefois, il est en mesure de savoir qu'il est à proximité de la station de recharge ou de l'ascenseur lorsqu'il reconnaît les symboles correspondants.

Les systèmes décrits ci-dessus utilisent tous des balises qui sont détectées par les robots. Il est également possible d'utiliser des balises pour détecter les robots. C'est ce qui est fait par différentes équipes pour la compétition *RoboCup* [STONE et coll., 2001]. Par exemple, dans

une catégorie de compétition, une caméra est placée au-dessus de l'aire de jeux et les robots sont identifiés par des repères de couleurs sur chacun d'eux. La caméra est reliée à un système qui détermine, à l'aide des images reçues, la position et l'orientation de chaque robot ainsi que la position du ballon.

2.1.3. Localisation par rapport à d'autres robots

Les approches mentionnées jusqu'à présent sont globales, c'est-à-dire qu'elles localisent un robot par rapport à son environnement ou par rapport à des balises placées dans son environnement. Certaines approches se démarquent et rejoignent davantage les objectifs du projet par le fait qu'elles n'utilisent pas de carte ou de balises. Les robots sont plutôt localisés de façon locale et relative par rapport à d'autres robots, sans passer par des références absolues de l'environnement. Ce type de localisation devient intéressant, voire indispensable, lorsqu'un groupe de robots doit se déplacer dans un environnement ouvert¹ ou encore dans un environnement qui ne peut être adapté ou modifié.

Un système combinant caméra couleur et laser est décrit dans [FREDSLUND et coll., 2001]. Chaque robot est équipé d'une caméra, d'un dispositif laser et est identifié par une référence de couleurs différentes. La caméra sert à détecter un robot et donner la direction dans laquelle il se trouve, alors que son dispositif laser est utilisé pour connaître la distance avec un autre robot. Le système est utilisé pour des déplacements en formations basés seulement sur les capteurs des robots: aucune donnée sur la position n'est échangée entre les robots. Chaque robot connaît seulement le code de couleurs du robot qu'il doit suivre ainsi que la position relative qu'il doit garder par rapport à ce dernier.

Une autre approche, décrite dans [FOX et coll., 1999], utilise aussi un dispositif laser ainsi qu'une caméra couleur pour obtenir des informations sur l'environnement et se localiser par rapport à une carte. Cette approche se démarque par le fait que les robots peuvent se reconnaître et échanger des informations sur leur position et leur environnement. La reconnaissance des robots se fait à l'aide de la caméra et d'un repère de couleur placé sur chaque robot. Lorsqu'un des robots en détecte un autre, il utilise son dispositif laser pour

¹ Environnement inconnu ou fortement dynamique.

obtenir avec précision la position relative et l'orientation de ce robot par rapport à sa propre position. L'échange de données entre les robots peut alors réduire de beaucoup l'incertitude sur la position de chacun par rapport à la carte.

D'autres types de caméra peuvent également être utilisés pour la localisation. Dans [DAS et coll., 2001], chaque robot est équipé d'une caméra omnidirectionnelle et d'un cylindre de couleur qui permet l'identification. Les images de la caméra permettent d'obtenir la direction dans laquelle se trouvent les autres robots. La position de chacun est déduite à partir de ces directions. Le système permet les déplacements en formations et les changements de formation lorsqu'il y a des obstacles.

Des repères de couleurs sont largement utilisés pour identifier les robots, mais il existe aussi d'autres approches comme *SIFT (Scale Invariant Feature Transform)* [LOWE, 1999] pour y arriver. Cette méthode peut être utilisée pour la reconnaissance d'objet à partir de caractéristiques visuelles indépendantes de l'échelle, des translations, des rotations ainsi que de la luminosité. Cette approche est utilisée pour la localisation par rapport à l'environnement [SE et coll., 2001] et pourrait également être utilisée pour l'identification de robot.

Un autre exemple est décrit dans [PREMVUTI et coll., 1996]. Chaque robot est équipé d'un laser rotatif, qui tourne à une vitesse constante connue, ainsi que de plusieurs photodiodes disposées de façon uniforme tout autour du robot. Puisque la vitesse de rotation des lasers est connue, la distance séparant deux robots peut être déterminée par la vitesse linéaire que le laser du premier projette sur la série de photodiodes du second. Plus la distance est grande, plus la vitesse linéaire détectée est grande. De plus, la photodiode qui se situe au centre de la projection du laser sur le second robot donne la direction dans laquelle se trouve le laser rotatif, qui est en fait la direction dans laquelle se trouve le premier robot. Enfin, lorsqu'il y a plusieurs robots et que deux lasers se croisent, il est possible de différencier les deux lasers. Il est toutefois difficile de savoir à quel robot correspond quelle projection. L'article porte sur des résultats de simulations et ne mentionne donc ni la précision, ni la portée du système.

Le projet *SWARM*² utilise lui aussi un système infrarouge qui permet non seulement la propagation d'information entre les robots, mais également la localisation (distance, direction et orientation) les uns par rapport aux autres. Chaque robot est équipé de plusieurs capteurs infrarouges distribués de façon à couvrir 360 degrés autour du robot. L'information transmise se propage d'un robot à l'autre pour rejoindre les robots qui sont hors de portée de celui qui transmet le message initial. Plusieurs comportements reliés à la localisation ont été mis en œuvre tels que: *Orienting* (garder la même orientation qu'un des robots), *Orbit* (un robot se déplace autour d'un robot de référence), *Bonding* (maintien de la position relativement à un autre robot), *Clustering* (les robots se déplacent tous vers un point donné), *Shape-Formation* (formation de différentes formes), *Following* (suivez le guide), etc. L'objectif de ce projet est toutefois relié plus à la programmation d'un groupe de robots distribués qu'à la localisation précise. L'information disponible sur le projet ne traite pas de la précision ni de la portée de la localisation.

Une autre approche, décrite dans [ARAI et coll., 2000], utilise huit modules couvrant chacun 45° autour du robot. Ces modules sont constitués d'un système de communication infrarouge ainsi que d'un émetteur-récepteur ultrasonique. Chaque robot a un numéro d'identification (ID) unique qu'il transmet avec le système infrarouge. Lorsqu'il reçoit un ID qui n'est pas le sien, il peut identifier la direction dans laquelle se trouve le robot correspondant à cet ID. Lorsqu'il reçoit son propre ID, il vient de détecter un obstacle sur lequel son message a été réfléchi. Dans ces deux cas, l'émetteur-récepteur ultrasonique est ensuite utilisé de façon à déterminer la distance du robot ou de l'obstacle par le temps de vol d'un signal ultrasonique. Une synchronisation entre les robots assure que les ultrasons transmis par les différents robots n'interfèrent pas. Le système a une portée très restreinte de 1 m.

Une autre approche qui se démarque est celle utilisée sur les *Millibots* [NAVARRO-SERMENT et coll., 1999]. Il s'agit d'un système utilisant des ultrasons pour connaître la distance entre les robots. L'utilisation d'un cône en aluminium, comme pour le système à deux balises ultrasoniques de *IS Robotics Inc.* mentionné précédemment, rend les transcepteurs³ omnidirectionnels. Le système des *Millibots* utilise des robots immobiles, dont la position est

² http://www.irobot.com/rd/p07_Swarm.asp

³ Selon l'office de la langue française (http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt_bdl2.html), un transcepteur est un dispositif intégrant à la fois un transmetteur et un récepteur.

connue, pour remplacer les balises. En connaissant la position des trois robots balises ainsi que les distances les séparant d'un quatrième robot, il est possible de connaître la position de ce dernier. Le système a une résolution entre 4 mm [NAVARRO-SERMENT et coll., 1999] et 8 mm [NAVARRO-SERMENT et coll., 2002] sur une portée de 3 m. L'orientation du robot ne peut être connue directement avec ce système. De plus, un minimum de quatre robots est requis pour pouvoir effectuer la localisation et les positions initiales des trois robots balises doivent être connues. Les robots balises ne sont pas nécessairement toujours les mêmes: si le groupe doit se déplacer sur de grandes distances, les robots les plus à l'avant devront à un certain moment s'immobiliser et servir de balises afin de permettre aux robots balises précédents de rejoindre le groupe (selon un principe qualifié de *leap-frogging*). Les simulations sur ce type de déplacement ont montré que l'erreur sur la position était de beaucoup inférieure à celle obtenue avec les méthodes classiques d'odométries (*dead reckoning*).

2.2. Localisation dans des domaines autres que la robotique

Plusieurs applications autres que celles en robotique mobile ont recourt à des techniques de localisation. Cette section décrit quelques-unes de ces techniques, catégorisées selon leur portée: grande échelle pour couvrir de grandes distances, et petite échelle pour la localisation sur de plus courtes distances.

2.2.1. Localisation grande échelle

De nos jours, la majorité des problèmes de localisation à grande échelle sont résolus par l'utilisation du système GPS (*Global Positioning System*), allant des applications militaires aux systèmes de contrôle aérien, en passant par les randonnées en plein air. Ce système, conçu par et pour l'armée américaine, utilise un groupe de 24 satellites en orbite autour de la Terre. Ces satellites sont tous synchronisés et émettent des signaux à intervalle régulier. Un récepteur GPS peut se localiser n'importe où sur la Terre pourvu qu'il soit en contact avec au moins quatre des 24 satellites. Le récepteur utilise le temps de vol d'un signal émis par chaque satellite pour déterminer la distance qui le sépare de ces satellites.

Le GPS est très peu utilisé en robotique mobile à cause de sa faible précision (1 m dans le meilleur des cas) ainsi que du fait que les ondes radio du système GPS pénètrent difficilement à l'intérieur des édifices [DUDEK et coll., 2000]. Le GPS est toutefois adapté à des applications de robotique extérieure. Par exemple un caddie de golf automatisé de la compagnie *GolfPro International* [SCHRAFT et coll., 2000], l'*Intelecady*, utilise un récepteur GPS pour connaître sa position sur le terrain. Une carte lui indique l'emplacement de chaque trou ainsi que les zones où il ne peut aller (vert, ruisseau, etc.). Le golfeur porte sur lui une balise qui lui permet d'envoyer des commandes au caddie et qui permet à ce dernier de connaître la position du golfeur (probablement par un autre récepteur GPS, mais la documentation ne donne pas de précision sur ce point).

Le GPS a eu plusieurs prédécesseurs basés sur des balises terrestres plutôt que des satellites. Le premier système du genre a été le système *Loran* (pour *Long range navigation*) [EVERETT, 1995], conçu au MIT durant la deuxième guerre mondiale. Il s'agit en fait de deux balises transmettant un signal RF. Les balises étaient espacées de 650 km, et la différence entre le temps d'arrivée des deux ondes donnait la position. La précision, dans le meilleur des cas, était de 1,5 km. Ce système a été remplacé au début des années 1980 par *Loran C*, qui a une portée de 1600 km et une précision maximale de 100 m.

Le système *Kaman* [EVERETT, 1995] représente en quelque sorte une version réduite du système *Loran*. Il utilise lui aussi des balises RF, mais mesure la différence de phase entre le signal transmis par la balise *maître* et les signaux transmis par deux balises *esclaves*. Le système a une portée de 100 km carrés et une précision, dans le meilleur des cas, de 3,8 cm. La précision dans le cas général est de ± 1 m sur un véhicule se déplaçant à 45 km/h.

Les systèmes *GPS*, *Loran* et *Kaman* utilisent des ondes radio transmises spécifiquement dans le but de permettre la localisation. Il est également possible de se localiser à partir d'ondes radio transmises dans un tout autre but. En effet, un système utilisant les ondes radio de la bande FM pour la localisation a été conçu [ZHAO, 1997]. Ce système nécessite la mise en place d'un récepteur fixe à une position connue et a une précision de 20 m.

2.2.2. Localisation petite échelle

La compagnie *Precision Technology* a conçu un système de localisation RF pour l'industrie de la course automobile [EVERETT, 1995]. Il s'agit d'un émetteur RF, installé sur l'automobile à localiser, qui émet une onde sinusoïdale continue. La comparaison de la phase de ce signal, reçu par trois antennes, avec un signal de fréquence identique permet de connaître le changement dans la position du véhicule par rapport à chaque récepteur. La précision obtenue est environ de 10 cm. Comme le véhicule émet une onde continue, cette approche est difficilement envisageable pour localiser plusieurs véhicules à la fois.

La compagnie *AT&T* [WARD et coll., 1997] a mis au point un système pour localiser les employés à l'intérieur d'un édifice. L'objectif n'est pas de surveiller les déplacements des employés, mais plutôt de leur permettre d'avoir accès à certains services peu importe l'endroit où il se trouve dans l'édifice. En connaissant la position d'un employé, il est possible par exemple de transférer les appels téléphoniques vers le téléphone le plus proche, ou encore d'afficher le contenu de son écran d'ordinateur de bureau sur l'écran le plus proche de sa position. Chaque employé doit avoir sur lui un dispositif, de seulement 8 cm de long, avec un numéro d'identification unique qui transmet en temps voulu une onde ultrasonique. Des capteurs ultrasoniques installés dans les plafonds captent alors le signal et peuvent connaître le temps qu'il a fallu à l'onde ultrasonique pour voyager. En combinant l'information de plusieurs capteurs, il est possible de connaître la position du dispositif. La précision du système est de 3 cm sur les 900 m² de l'immeuble. Il faut mentionner qu'un nombre impressionnant de capteurs doit être installé dans les plafonds, de façon à s'assurer qu'au moins trois capteurs détectent les signaux ultrasoniques transmis.

Le projet *Cricket* [PRIYANTHA et coll, 2000], qui a comme objectif la localisation de nœuds mobiles (humain ou objet) à l'intérieur d'un immeuble, utilise également les ondes radio et ultrasoniques pour la localisation. La précision obtenue par ce système (autour de 1 m) est inférieure à celle du système de *AT&T*, mais l'infrastructure nécessaire est également moins importante et le système est entièrement décentralisé. Le système utilise des balises qui transmettent simultanément des ondes radio et ultrasoniques. Un nœud peut se localiser par rapport à une balise en calculant la différence de temps entre l'arrivée du signal RF et celle du

signal ultrasonique. Aucune synchronisation n'est utilisée par les balises et des algorithmes pour limiter les interférences RF et ultrasonique sont utilisés. Le système a été conçu pour être peu dispendieux: chaque balise et nœud coûtent moins de 10 \$ (US).

Il est possible d'utiliser l'information sur l'amplitude du signal fourni par les cartes réseau pour la localisation de personne utilisant un ordinateur portable à l'intérieur d'un immeuble. Cette approche est utilisée dans [BAHL et coll, 2000] et [LADD et coll., 2002]. Comme l'amplitude du signal est fonction du parcours de l'onde et des obstacles rencontrés, la relation de la distance en fonction de l'amplitude n'est pas linéaire. Plusieurs données tests doivent être prises afin de pouvoir associer l'amplitude d'un signal reçu à différents endroits donnés avec l'emplacement du transmetteur. L'approche a l'avantage de ne pas nécessiter l'achat de matériel (si un réseau sans fil est en place) mais a une précision entre 1,5 m et 3 m.

Un autre système pour la localisation à l'intérieur d'immeuble est le système *3D-iD* de la compagnie *PinPoint* [WERB et coll, 1998]. Ce système utilise le temps de vol de l'onde radio pour évaluer la distance séparant une balise d'un objet ou d'une personne à localiser. Pour éviter de devoir synchroniser la balise avec le dispositif à localiser, comme dans le cas du système GPS, le système utilise deux fréquences porteuses. La balise transmet un signal de référence modulé avec la première fréquence tandis que le dispositif mobile retransmet avec la seconde fréquence le signal de référence reçu. La balise peut donc déterminer la distance en comparant le signal reçu au signal de référence original. Le coût des dispositifs mobiles est faible puisqu'il ne s'agit que d'une boucle de retour: le signal reçu n'a pas besoin d'être démodulé. Le système a une précision d'environ 1 m.

Le projet *SCOWR* [BULUSU et coll, 2000] a comme objectif de permettre la localisation de petits dispositifs dans un environnement extérieur et ce, contrairement au GPS, à faible coût. Le système utilise des balises RF courtes portées qui transmettent des messages à intervalles réguliers. Un dispositif peut évaluer sa position comme étant celle du centre de masse des balises dont il reçoit les messages. La précision obtenue lors de tests avec quatre balises sur une surface de 10 m par 10 m est autour de 2 m.

La compagnie *Gettig*⁴ propose pour sa part un caddie de golf automatisé qui suit le golfeur à partir d'un dispositif à sa ceinture. Lorsque le golfeur veut que le caddie le suive, il active son dispositif, et le caddie se dirige vers le golfeur en restant à une distance constante peu importe le terrain. La façon dont le caddie localise le golfeur n'est pas mentionnée. Comparativement au système *Intelecady* décrit à la section 2.2.1, le système de *Gettig* présente une fonctionnalité moins grande.

Un autre domaine dans lequel la localisation est présente est celui des AHS (*Automated Highway System*). Une des applications est le convoi routier intelligent, qui permet à plusieurs véhicules de se suivre sans l'interaction de leur conducteur. Pour se faire, chaque véhicule doit être capable de connaître très précisément plusieurs paramètres concernant les autres véhicules, entre autres leurs positions. Ces applications rejoignent un peu celles du domaine de la robotique mobile qui nécessitent le déplacement en formation. Dans le cas des AHS, il s'agit de la formation suiveur en ligne droite. Différentes approches sont alors utilisées pour la localisation des véhicules. Dans [HASKARA et coll., 1997], un radar ainsi qu'un réflecteur radar sont utilisés pour déterminer la distance et la position latérale du véhicule précédent. [TAN, 1998] décrit un système utilisant aussi un radar pour trouver la distance, mais utilise des marqueurs magnétiques dans la voie de circulation pour connaître la position latérale du véhicule. [SETO et coll., 1998] présente un système utilisant un radar laser à trois faisceaux pour déterminer la distance ainsi que la position latérale du véhicule précédent. [MIO, 1995] propose l'utilisation d'une caméra infrarouge ainsi que de deux transmetteurs infrarouges pour trouver la distance et la position latérale du véhicule précédent.

Cette dernière section démontre qu'il y a un besoin pour la localisation de personne dans l'environnement, mais que ce besoin nécessite une moins grande précision qu'en robotique mobile. En effet la plupart des systèmes de localisation de personne ont une précision de l'ordre du mètre, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'information de localisation est beaucoup moins cruciale pour un humain que pour un robot. Il y a également un parallèle à faire entre les convois routiers intelligents et le déplacement de robots en formation. Le dispositif du projet pourrait donc éventuellement être utilisé dans des applications autres que la robotique mobile.

⁴ <http://www.gettig.com/Shedda.html>

3. MISE EN ŒUVRE ET ÉVALUATION DES TECHNOLOGIES POUR LA LOCALISATION

Le choix du dispositif, de la technologie et de l'approche à utiliser pour la localisation d'agents physiques est influencé par plusieurs facteurs. Premièrement, le coût est un facteur important puisque le taux de rafraîchissement désiré nécessite que le dispositif soit dédié entièrement à la localisation (à l'exception peut-être des capteurs lasers les plus complexes comme les *SICK*⁵). Les dispositifs lasers ainsi que les radars commerciaux sont beaucoup trop dispendieux. Les caméras numériques omnidirectionnelles ou avec mouvement (*Pan-Tilt-Zoom*) sont plus abordables, mais restent tout de même dispendieuses puisqu'il faut considérer également la puissance de calcul nécessaire au traitement de l'image. Les sonars sont les dispositifs les plus abordables sur le marché, alors que les technologies ultrasoniques, infrarouges et ondes radio (RF) restent accessibles pour la conception d'un dispositif spécifique au projet. Le second facteur est la nécessité de fonctionner dans un environnement ouvert, c'est-à-dire dans un environnement dont les caractéristiques peuvent changer. Les approches utilisant des cartes de l'environnement ne sont donc pas envisageables, et les systèmes basés sur la vision ainsi que les systèmes infrarouges peuvent être affectés grandement par la luminosité variée. Un troisième facteur important est relié à la capacité de différencier un robot d'un objet quelconque. Les dispositifs commerciaux donnant la distance (capteur laser, radar, sonar) n'ont pas cette capacité puisqu'ils ne font qu'indiquer la distance de l'objet le plus près, que ce soit un robot ou un autre objet. Les caméras ont cette fonctionnalité par la reconnaissance de couleurs et de formes, qui nécessite cependant d'ajouter sur chaque robot un repère de couleurs visible sur 360 degrés. Les repères de couleurs ne sont toutefois pas une solution infaillible, puisqu'il est possible qu'un objet de l'environnement ayant les mêmes caractéristiques de couleurs qu'un repère soit identifié faussement comme un robot. L'angle de couverture du dispositif est le quatrième élément important puisque le système doit couvrir 360 degrés. La plupart des dispositifs mentionnés plus haut ne sont pas omnidirectionnels et doivent donc être utilisés en groupe ou montés sur des pièces mobiles. La principale conséquence des pièces mobiles est que les 360 degrés ne sont pas couverts simultanément.

⁵ <http://www.sickoptical.com/>

Puisqu'aucun dispositif sur le marché ne répond à toutes ces exigences, la conception d'un dispositif spécifiquement pour le projet est inévitable. L'objectif du projet est de concevoir un système permettant à des robots de se localiser mutuellement sans utiliser de balises ou de références extérieures. Ce système doit donc permettre aux robots de se reconnaître et de se localiser les uns par rapport aux autres de façon locale, avec un taux de rafraîchissement égal ou supérieur à 1 Hz (ce qui est adéquat pour des robots qui se déplacent à des vitesses de l'ordre de 750 mm/s). La localisation doit inclure la position (x,y) et idéalement l'orientation, mais cette dernière peut être déduite à partir d'échange d'information sur les déplacements des robots. La principale application envisagée pour le projet est le déplacement en formation meneur-suiveur, mais plusieurs autres configurations et applications seront possibles selon les caractéristiques du dispositif. La portée du dispositif doit être de plus de cinq mètres, la précision sur la distance d'au moins 50 cm et celle sur l'angle d'au moins 15 degrés. Ces spécifications peuvent être considérées comme les spécifications minimales pour que le système soit utile dans le déplacement en formation. Le système doit être peu dispendieux, facile à installer sur à peu près n'importe quel robot, voire même un humain, et être le plus indépendant possible du nombre d'agents physiques mobiles à localiser.

Comme soulevé précédemment, une caractéristique du dispositif qui peut être très intéressante est l'omnidirectionnalité, puisqu'elle permet à un agent de se localiser par rapport à plusieurs autres agents à la fois. En effet, un dispositif non-omnidirectionnel nécessite généralement qu'un robot se localise par rapport à un robot donné, que l'on peut appeler robot référence. L'angle d'opération peut être petit et le dispositif doit donc identifier et suivre son robot référence. Si une situation nécessite le changement du robot référence, le dispositif doit alors chercher le nouveau robot référence. Pendant cette dernière opération, qui peut durer quelques secondes lorsque le dispositif utilise des pièces mobiles, le robot devra se fier à son système d'odométrie (s'il en a un). Un dispositif omnidirectionnel (en deux dimensions dans le plan horizontal) permet donc une plus grande flexibilité pour le déplacement en formation, mais permet également d'autres applications de positionnement plus générales. Par exemple dans une application où les robots se déplacent de façon aléatoire, il est possible que certains robots soient hors de portée ou hors de vue du dispositif des autres robots. La localisation par rapport à un certain robot n'est donc pas toujours possible. Si les robots peuvent se localiser

par rapport à n'importe quel autre robot, la portée du système sera plus grande que celle du dispositif. Avec un lien de communication adéquat, un groupe de robots éparpillés sur plusieurs dizaines de mètres pourraient alors se localiser indirectement, par rapport à un des robots du groupe ou encore par rapport à un repère de coordonnées commun, pourvu que la distance maximale séparant chaque robot de son plus proche voisin soit inférieure à la portée du dispositif de localisation. Un dispositif omnidirectionnel aurait donc un plus grand champ d'applications qu'un dispositif non-omnidirectionnel.

Une technologie intéressante pour le dispositif est celle des ondes radio (RF). Cette technologie est attirante principalement par son omnidirectionnalité naturelle qui simplifie la conception du système. La faisabilité de cette dernière approche reste toutefois incertaine, principalement à cause de la difficulté de modéliser la propagation des ondes radio dans un environnement intérieur [BULUSU et coll, 2000] [WERB et coll, 1998] [PRIYANTHA et coll, 2000] [BAHL et coll, 2000]. De plus, les systèmes mentionnés dans la section 2.2 utilisant uniquement les ondes radio ont tous une précision trop faible pour les objectifs du projet. L'autre technologie intéressante est celle des ultrasons puisqu'un système ultrasonique est relativement facile à concevoir à faible coût. La distance séparant deux robots peut être obtenue avec une précision de quelques centimètres. Le désavantage des ultrasons est le faible champ d'opération angulaire, mais différentes astuces peuvent être utilisées pour augmenter ce champ d'opération angulaire et même rendre le système omnidirectionnel. Deux prototypes ont donc été conçus, un pour étudier l'approche RF et l'autre pour étudier l'approche ultrasonique. Mais avant de présenter ces prototypes, la théorie d'opération générale est expliquée puisqu'elle est la même pour les deux prototypes.

3.1. Théorie d'opération

La localisation d'un agent mobile implique généralement la détermination de sa position et de son orientation. L'approche proposée permet d'obtenir la position $((x,y)$ ou (d,θ)) de façon directe, mais l'orientation doit être déterminée de façon indirecte. Pour cette raison, l'emploi du terme localisation dans le texte qui suit implique seulement la détermination de la position et non de l'orientation de l'agent. La section 3.1.3 traite de la détermination de l'orientation, mais cette dernière n'est pas réalisée dans le présent projet.

L'objectif de ce projet étant la localisation sans système de coordonnées absolues, chaque agent mobile est le centre de son propre système de coordonnées et localise les autres agents par rapport à lui-même. Les techniques proposées peuvent toutefois être utilisées avec un repère de coordonnées absolues ou des agents balises dans l'environnement.

L'approche de localisation proposée consiste à émettre un signal et à utiliser l'information recueillie par plusieurs récepteurs situés sur un agent afin de déterminer la position d'origine du signal. Plusieurs systèmes utilisent un principe semblable en disposant les capteurs dans l'environnement [EVERETT, 1995] [WARD et coll., 1997]. La figure 3.1 montre la configuration généralement utilisée avec trois récepteurs situés dans l'environnement et un transmetteur situé sur un agent. L'agent est représenté par un cercle plein et les trois cercles pointillés, centrés respectivement sur chacun des récepteurs, représentent la position possible de l'agent par rapport à chacun des capteurs. L'agent se trouve à l'intersection des ces trois cercles.

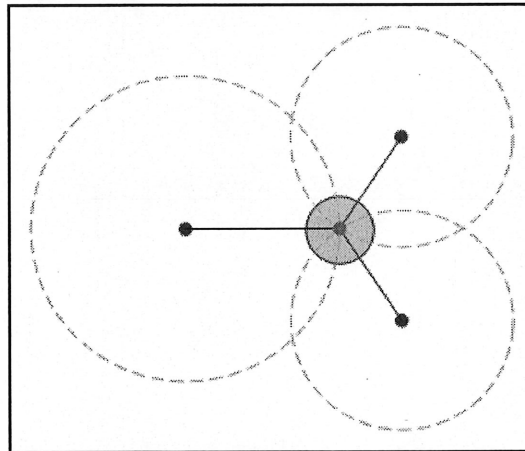


Figure 3.1 Configuration généralement utilisée pour les capteurs

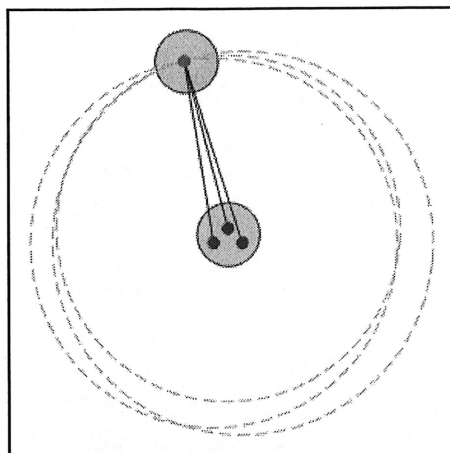


Figure 3.2 Configuration proposée pour les capteurs

Pour permettre la localisation de façon locale, l'approche proposée consiste à placer des transmetteurs et des récepteurs sur chacun des agents mobiles. La figure 3.2 montre la configuration proposée avec trois récepteurs situés sur un agent et un transmetteur situé sur un autre agent. L'agent à localiser active son émetteur et les autres agents recueillent l'information avec leurs récepteurs. Chacun des agents peut localiser l'agent qui émet sans l'aide des autres: le système est fonctionnel pour deux agents et plus. L'échange d'information peut toutefois permettre d'augmenter la précision de la localisation et permettre de déterminer l'orientation. Il est à noter que la figure 3.2 montre seulement la moitié du système: chaque agent est équipé d'un transmetteur et de trois récepteurs.

Deux principes peuvent être utilisés pour trouver la position d'un transmetteur à partir des données recueillies par plusieurs récepteurs. Le premier est l'utilisation des temps de vol et le second est l'utilisation des différences de temps de vol. Le développement de ces principes est fait pour la localisation en deux dimensions. Le développement pour la localisation en trois dimensions, qui nécessite l'ajout d'un récepteur, suit le même raisonnement que ceux présentés dans chacune des sous-sections.

3.1.1. Détermination de la position par les temps de vol

S'il est possible de synchroniser⁶ précisément le transmetteur et les récepteurs, il est possible de connaître le temps nécessaire pour que l'onde atteigne chacun des récepteurs. La vitesse de l'onde étant connue, ces temps de vol permettent d'obtenir les distances entre chacun des récepteurs et le transmetteur. Connaissant la position de chacun de ces récepteurs, la position du transmetteur peut alors être connue en utilisant le développement des équations de distance. Pour la localisation en deux dimensions, ce développement nécessite l'utilisation de trois récepteurs.

Supposons les points A , B et C dont la position est connue par rapport à l'origine O , et le point D dont la position est inconnue. Les points A , B et C représentent des récepteurs et le point D représente un transmetteur à localiser. La figure 3.3 représente les trois récepteurs et le transmetteur.

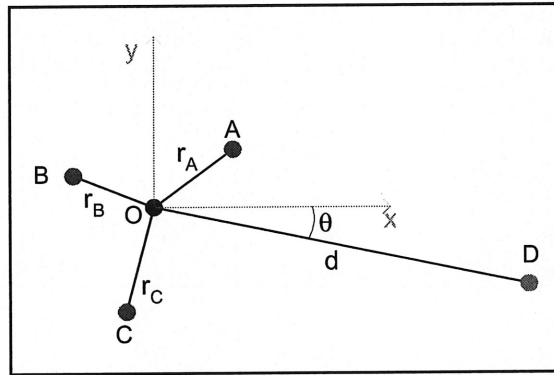


Figure 3.3 Position des transmetteurs-récepteurs pour l'utilisation des temps de vol

Les distances entre chacun des points de réception (A , B et C) et le point de transmission (D) peuvent s'écrire comme suit:

$$d_{AD}^2 = (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 \quad (3.1)$$

$$d_{BD}^2 = (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 \quad (3.2)$$

$$d_{CD}^2 = (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 \quad (3.3)$$

⁶ Synchroniser le transmetteur et les récepteurs signifie être capable d'informer les récepteurs du temps exact de départ de l'onde de façon à pouvoir calculer les temps de vol. La précision nécessaire sur l'exactitude du temps de départ est fonction de la vitesse de propagation de l'onde.

où d_{ij} est la distance entre les points i et j , x_i est l'abscisse du point i et y_i est l'ordonnée du point i . Le développement de ces équations pour obtenir $(x_D, y_D) = f(d_{AD}, d_{BD}, d_{CD})$ débute par le développement des carrés:

$$d_{AD}^2 = x_D^2 - 2x_D x_A + x_A^2 + y_D^2 - 2y_D y_A + y_A^2 \quad (3.4)$$

$$d_{BD}^2 = x_D^2 - 2x_D x_B + x_B^2 + y_D^2 - 2y_D y_B + y_B^2 \quad (3.5)$$

$$d_{CD}^2 = x_D^2 - 2x_D x_C + x_C^2 + y_D^2 - 2y_D y_C + y_C^2 \quad (3.6)$$

Ensuite, deux soustractions permettent d'obtenir les équations (3.7) et (3.8).

$$d_{AD}^2 - d_{BD}^2 = x_A^2 - 2x_D x_A + 2x_D x_B - x_B^2 + y_A^2 - 2y_D y_A + 2y_D y_B - y_B^2 \quad (3.7)$$

$$d_{AD}^2 - d_{CD}^2 = x_A^2 - 2x_D x_A + 2x_D x_C - x_C^2 + y_A^2 - 2y_D y_A + 2y_D y_C - y_C^2 \quad (3.8)$$

Ces équations s'écrivent sous une forme matricielle comme en (3.9).

$$\begin{bmatrix} 2(x_B - x_A) & 2(y_B - y_A) \\ 2(x_C - x_A) & 2(y_C - y_A) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{AD}^2 - d_{BD}^2 + x_B^2 - x_A^2 + y_B^2 - y_A^2 \\ d_{AD}^2 - d_{CD}^2 + x_C^2 - x_A^2 + y_C^2 - y_A^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Ce système peut être développé pour obtenir $y_D = f(d_{AD}, d_{BD}, d_{CD})$ et $x_D = f(d_{AD}, d_{BD}, d_{CD})$ de la façon suivante:

$$d_{AD}^2 - d_{BD}^2 = 2x_D \Delta x_{AB} + 2y_D \Delta y_{AB} + k_{AB} \quad (3.10)$$

$$d_{AD}^2 - d_{CD}^2 = 2x_D \Delta x_{AC} + 2y_D \Delta y_{AC} + k_{AC} \quad (3.11)$$

$$\text{où } k_{AB} = x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2$$

$$k_{AC} = x_A^2 + y_A^2 - x_C^2 - y_C^2$$

$$\Delta x_{AB} = x_B - x_A$$

$$\Delta y_{AB} = y_B - y_A$$

$$\Delta x_{AC} = x_C - x_A$$

$$\Delta y_{AC} = y_C - y_A$$

$$x_D = \frac{d_{AD}^2 - d_{BD}^2 - 2 y_D \Delta y_{AB} - k_{AB}}{2 \Delta x_{AB}} \quad (3.12)$$

$$y_D = \frac{d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - 2 x_D \Delta x_{AC} - k_{AC}}{2 \Delta y_{AC}} \quad (3.13)$$

À partir de ces équations, y_D peut être isolé comme suit:

$$y_D = \frac{d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - k_{AC}}{2 \Delta y_{AC}} - \frac{x_D \Delta x_{AC}}{\Delta y_{AC}} \quad (3.14)$$

$$y_D = \frac{d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - k_{AC}}{2 \Delta y_{AC}} - \frac{\Delta x_{AC}}{\Delta y_{AC}} * \frac{d_{AD}^2 - d_{BD}^2 - 2 y_D \Delta y_{AB} - k_{AB}}{2 \Delta x_{AB}} \quad (3.15)$$

$$y_D = \frac{\Delta x_{AB} (d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - k_{AC}) - \Delta x_{AC} (d_{AD}^2 - d_{BD}^2 - k_{AB}) - 2 y_D \Delta y_{AB} \Delta x_{AC}}{2 \Delta y_{AC} \Delta x_{AB}} \quad (3.16)$$

$$y_D (2 \Delta y_{AC} \Delta x_{AB} + 2 \Delta y_{AB} \Delta x_{AC}) = \Delta x_{AB} (d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - k_{AC}) - \Delta x_{AC} (d_{AD}^2 - d_{BD}^2 - k_{AB}) \quad (3.17)$$

$$y_D = \frac{\Delta x_{AB} (d_{AD}^2 - d_{CD}^2 - k_{AC}) - \Delta x_{AC} (d_{AD}^2 - d_{BD}^2 - k_{AB})}{2 \Delta y_{AC} \Delta x_{AB} + 2 \Delta y_{AB} \Delta x_{AC}} \quad (3.18)$$

Une fois y_D trouvé, x_D est obtenue avec l'équation (3.12).

3.1.2. Détermination de la position par les différences de temps de vol

Si l'émetteur ne peut être synchronisé précisément avec les récepteurs, il est alors impossible de connaître les temps de vol. Dans ce cas, les différences de temps de vol peuvent être utilisées [MAHAJAN et coll., 2001]. Le développement des équations de distance nécessite alors l'utilisation d'un récepteur de plus que dans le développement utilisant le temps de vol.

Supposons les quatre points A , B , C et E représentant les récepteurs, et le point D représentant le transmetteur. Les différences de temps d'arrivées peuvent s'écrire comme suit:

$$\Delta t_{AB} = t_B - t_A \quad (3.19)$$

$$\Delta t_{AC} = t_C - t_A \quad (3.20)$$

$$\Delta t_{AE} = t_E - t_A \quad (3.21)$$

À partir de ces différences de temps d'arrivée, les équations de distances peuvent être réécrites comme suit:

$$d_{AD}^2 = (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 \quad (3.22)$$

$$(d_{AD} + v \Delta t_{AB})^2 = (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 \quad (3.23)$$

$$(d_{AD} + v \Delta t_{AC})^2 = (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 \quad (3.24)$$

$$(d_{AD} + v \Delta t_{AE})^2 = (x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2 \quad (3.25)$$

où d_{ij} = distance entre les points i et j
 x_i = abscisse du point i
 y_i = ordonnée du point i

En remplaçant d_{AD}^2 dans les trois dernières équations par sa valeur dans l'équation (3.22), un système d'équations à trois inconnues est obtenu tel que décrit par (3.26).

$$\begin{bmatrix} 2(x_A - x_B) & 2(y_A - y_B) & -2v \Delta t_{AB} \\ 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) & -2v \Delta t_{AC} \\ 2(x_A - x_E) & 2(y_A - y_E) & -2v \Delta t_{AE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ d_{AD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^2 \Delta t_{AB}^2 + x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 \\ v^2 \Delta t_{AC}^2 + x_A^2 + y_A^2 - x_C^2 - y_C^2 \\ v^2 \Delta t_{AE}^2 + x_A^2 + y_A^2 - x_E^2 - y_E^2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir la position du transmetteur.

3.1.3. Détermination de l'orientation

En plus de la position de l'agent mobile, il est également intéressant de connaître son orientation. Même si elles ne sont pas réalisées dans le présent projet, les trois techniques possibles pour déterminer l'orientation des agents sont brièvement décrites.

La première méthode est l'utilisation de plusieurs données de localisations successives afin de déterminer la direction de déplacement d'un agent. En supposant que l'agent se déplace en direction avant, la direction de déplacement correspond à l'orientation du robot. Cette méthode est la plus simple, mais fonctionne seulement si les agents sont en mouvement.

La seconde méthode consiste à échanger des données entre les agents: un agent mobile connaissant sa position relative par rapport à un autre agent ainsi que la position relative de cet autre agent par rapport à lui peut déterminer l'orientation de cet agent par rapport à la sienne. La figure 3.4 représente un exemple de cette méthode où les angles θ_1 et θ_2 représentent les angles relatifs entre chacun des agents et l'angle θ_3 représente l'orientation du second agent par rapport au premier. Dans le cas présenté à la figure 3.4, $\theta_3 = \theta_1 + \theta_2 - 180$.

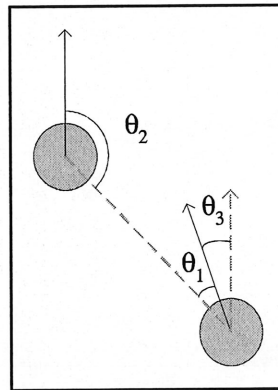


Figure 3.4 Détermination de l'orientation par l'échange d'informations

Cette technique peut toutefois devenir assez lourde puisque la quantité d'information à échanger pour un groupe de n agents, si chaque agent doit connaître la position et l'orientation de chacun des autres, est égale à $n(n-1)$. De plus, puisque les informations échangées proviendront de plusieurs mesures prises à des temps différents, la mesure d'orientation risque d'être moins précise que celle de position lorsque les agents sont en mouvement.

La troisième technique nécessite la présence d'au moins deux transmetteurs ultrasoniques sur chaque agent mobile. Deux émissions ultrasoniques successives permettent d'obtenir la position de deux points connus sur l'agent à localiser. La position de ces deux points par rapport à l'agent étant connue, il est possible de connaître la position et l'orientation de cet

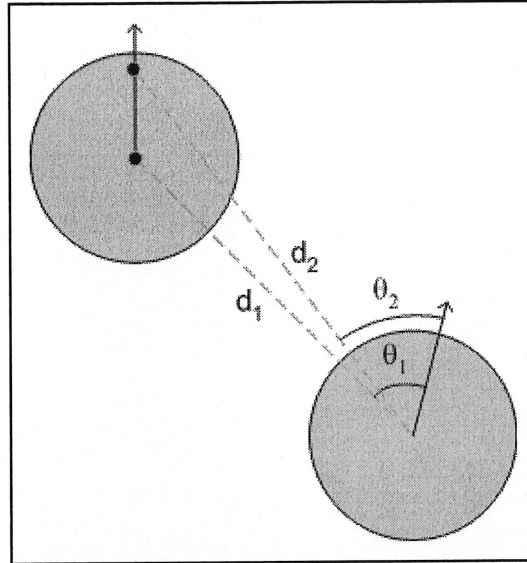


Figure 3.5 Détermination de l'orientation en utilisant deux transmetteurs sur chaque agent. La figure 3.5 représente un exemple où deux transmetteurs permettent d'obtenir les positions de deux points sur un agent.

Cette méthode demande moins de transfert d'information que la précédente. Chaque agent doit cependant effectuer deux transmissions successives, ce qui diminue par deux le taux de rafraîchissement des données. Par contre, la distance entre les deux transmetteurs étant petite par rapport aux distances entre les robots, la précision sur la mesure de position doit être très grande pour que la mesure d'orientation soit valable.

3.2. Prototype utilisant des ondes électromagnétiques (RF)

Les ondes électromagnétiques (RF) voyagent dans l'air à une vitesse très proche de 300 000 km/s. À cette vitesse, une onde RF parcourt 1 mm en 3,3 ps. Pour synchroniser le transmetteur avec les récepteurs, il faut être capable d'informer les récepteurs du moment exact où l'onde est transmise. Or pour ce faire, il faudrait utiliser une onde qui voyage plus vite que la lumière de façon à ce qu'elle parvienne au récepteur au moment précis où l'onde est transmise. Puisque cette option est impossible, la méthode des différences de temps de vols doit être utilisée. Cette méthode nécessite au moins quatre récepteurs, soit un de plus que la méthode des temps de vols. Les différences de temps de vols doivent être mesurées avec une très grande précision pour que les résultats du système soient acceptables. Il existe des

circuits intégrés spécialisés⁷ capables de mesurer le temps avec une résolution de 60 ps, qui correspond à un peu moins de 20 mm. Cette résolution est insuffisante puisque les récepteurs, placés sur un robot, seront très près les uns des autres: avec une distance de 200 mm entre les récepteurs, la différence maximale de temps d'arrivée entre deux récepteurs est autour de 660 ps, soit seulement onze fois la résolution de 60 ps.

Il existe toutefois une façon détournée de mesurer la différence des temps d'arrivées en contournant le problème relié à la résolution temporelle de l'ordre du ps. Il s'agit de mesurer la différence de phase entre les signaux reçus par les différentes antennes. La synchronisation peut alors être faite par un lien de communication RF: un message RF est transmis par un agent et indique qu'une onde est transmise. Lorsque les autres agents reçoivent ce message, ils mesurent la différence de phase entre leurs antennes. Contrairement à la méthode de mesure des différences de temps, qui permet de transmettre l'onde sur une période de temps très courte, la mesure de la différence de phase nécessite la transmission d'une onde sur une plus grande période de temps. Ce point est la cause de la principale incertitude sur la mise en œuvre de cette approche: l'onde reçue par les différentes antennes est une sommation de plusieurs ondes ayant suivi des parcours différents⁸. Ce phénomène, appelé propagation multiparcours, est plus important dans un environnement intérieur puisque les obstacles y sont plus nombreux. La propagation multiparcours affecte l'amplitude et la phase de l'onde.

La mesure de la différence de phase est amplement utilisée pour déterminer l'angle d'arrivée d'une onde RF dans plusieurs applications. Cette technique, souvent qualifiée de *RDF (Radio Direction Finding)* ou *DOA (Direction of Arrival)*, est généralement utilisée dans des environnements extérieurs. Il est toutefois difficile de prédire l'effet de la propagation multiparcours dans l'application présente, qui est caractérisée par un fonctionnement en proximité sans obstruction de la ligne de vue. Puisque la propagation des ondes radio est influencée par un très grand nombre de facteurs et qu'il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs, l'expérimentation dans les conditions spécifiques du projet est la méthode à privilégier pour déterminer si le système est viable ou non [ANDREYANOV et coll., 1994], [RAZSKAZOVSKII et coll., 1999] [ANDREANOV et coll., 1994]. La première étape

⁷ http://www.acam.de/Content/F1_e.htm

⁸ <http://www.sss-mag.com/indoor.html>

est donc de concevoir un circuit permettant de mesurer la différence de phase entre plusieurs antennes de façon à déterminer si cette approche est viable dans les conditions spécifiques du projet (proximité et ligne de vue).

3.2.1. Description du système

Le circuit de détection de phase est conçu autour d'un circuit intégré de la compagnie *Analog Device*: le AD8302 mesure la différence de phase entre deux canaux et donne une tension analogique correspondante au déphasage. Sa plage dynamique sans ambiguïté de signe est de 180 degrés. La position des antennes doit être choisie pour maximiser l'utilisation de cette plage dynamique. Avec une distance entre les antennes égale au quart de la longueur d'onde, la différence de phase entre les antennes varie de -90 degrés à 90 degrés lorsque le transmetteur se déplace sur un cercle autour des antennes. La fréquence d'opération doit donc être choisie en fonction de la distance désirée entre les antennes. Une fréquence de 433,92 MHz a une longueur d'onde d'environ 690 mm, ce qui implique que les antennes doivent être espacées de 172 mm (soit 690 divisé par 4). Cette distance se prête bien à l'installation du dispositif sur un robot mobile. De plus, des émetteurs-récepteurs pour cette fréquence sont disponibles sur le marché à faible coût, ce qui évite la conception du transmetteur et du récepteur pour le lien RF requis. La figure 3.6 illustre le système utilisé pour les tests.

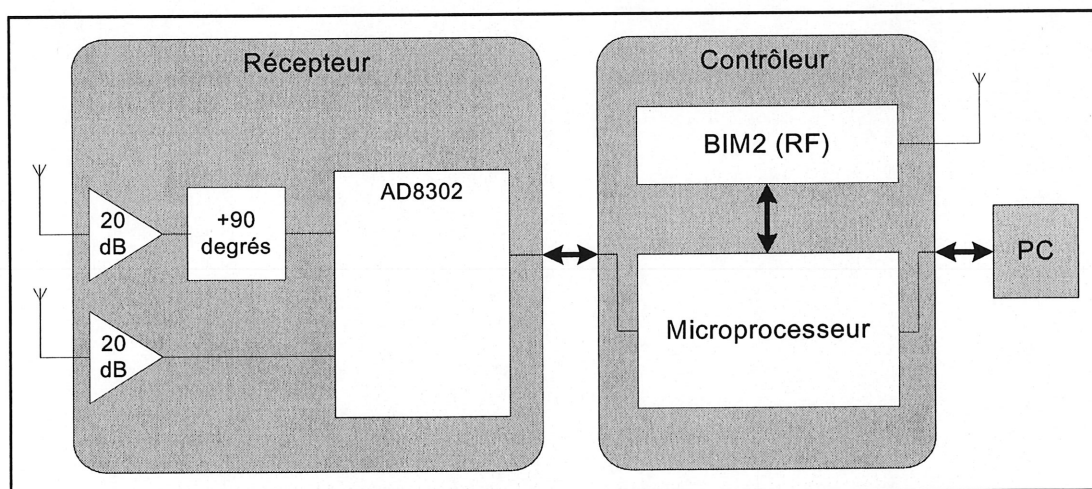


Figure 3.6 Schéma du prototype électromagnétique

Le récepteur a deux antennes quart d'onde ($\lambda/4$) fabriquées avec un fil et un connecteur SMA. Chacune de ces antennes a un plan de masse plein de rayon $\lambda/14$ et douze fils radiaux fixés sur ce plan de façon à obtenir un plan de masse de rayon $\lambda/4$. La taille du plan de masse peut avoir une influence sur les propagations multiparcours puisqu'il bloque les ondes provenant de certaines directions. Le plan de masse doit donc être le plus grand possible, mais en pratique il est difficile de le faire plus grand que $\lambda/4$ en raison de l'encombrement. Les signaux reçus par ces antennes sont amplifiés de 20 dB pour s'assurer d'avoir un niveau de signal acceptable à l'entrée du AD8302. L'amplification est faite avec deux blocs de gains (MSA-2543) en cascade. Chacun de ces blocs a un gain de 13 dB. Un filtre SAW⁹ passe-bande très étroit et centré sur la fréquence utilisée est présent avant et après les deux blocs d'amplifications. Ces filtres introduisent une atténuation typique de 3 dB. Le gain résultant de l'étage d'amplification comprenant les deux filtres et les deux blocs de gain est donc de 20 dB. Le AD8302 peut accepter des signaux de 0 dBm à -60 dBm. Avec une puissance de transmission de 0 dBm et un rayon d'opération de 10 m pour le dispositif, la puissance du signal ne devrait pas être un problème. Un des deux signaux doit être déphasé de 90 degrés par rapport à l'autre pour que le AD8302 opère dans une plage sans ambiguïté de signe. La figure 3.7, qui est tirée de la fiche technique du AD8302, montre la réponse du circuit intégré en fonction de la différence de phase entre les deux signaux.

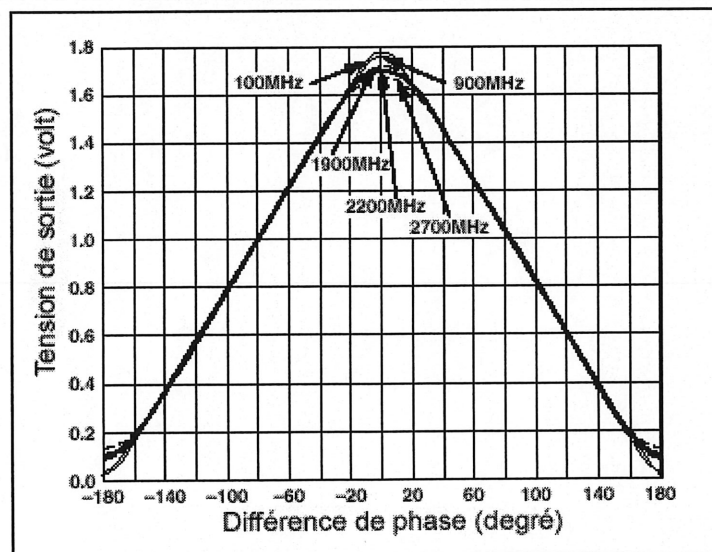


Figure 3.7 Réponse du AD8302

⁹ Surface Acoustic Wave

Si la différence de phase entre les signaux à l'entrée du circuit intégré varie entre ± 90 degrés, la sortie varie entre 0,9 et 1,8 volt. Il y a toutefois une ambiguïté de signe: un déphasage de -90 degrés donnera la même tension de sortie qu'un déphasage de 90 degrés. En déphasant un des signaux de 90 degrés, la phase à l'entrée du circuit intégré varie entre 0 et 180 degrés et la tension de sortie varie donc de 0 à $1,8$ volt sans ambiguïté de signe.

Même si, à la fréquence utilisée, le récepteur aurait pu être fabriqué sur un substrat d'usage général comme le FR4, un substrat spécial a été utilisé. Ce substrat, le GML 1032 de la compagnie *GIL Technologies*, permet entre autres de diminuer la taille des traces de 50 ohms et de diminuer les pertes d'insertion. Le contrôleur a pour sa part été fabriqué sur du FR4 puisque le seul signal à $433,92$ MHz est celui qui relie le BIM2 à l'antenne.

Le contrôleur est constitué d'un microprocesseur et d'un module hybride BIM2 de la compagnie *Radiometrix* pour la communication RF qui est utilisé comme lien de communication entre les systèmes, mais également comme source du signal RF à localiser. Sa puissance de transmission est de 10 dBm, mais elle est atténuée de 10 dB par un réseau d'atténuation comme suggéré dans une note d'application de *Radiometrix*¹⁰. La tension de sortie du récepteur est reliée au convertisseur analogique numérique du microprocesseur. Ce dernier est un PIC16F877 de la compagnie *Microchip* fonctionnant à 20 MHz (5 MIPS). Le microprocesseur transfère les résultats de la conversion à un ordinateur via un port RS-232.

3.2.2. Résultats expérimentaux

La première étape est la validation du fonctionnement du récepteur. Elle consiste à injecter des signaux déphasés directement dans le circuit, c'est-à-dire par les connecteurs où se fixent normalement les antennes, et observer la tension de sortie du AD8302. Idéalement, les signaux injectés devraient provenir de la même source et un de ces signaux devrait passer par un déphaseur ajustable de façon à connaître la différence de phase entre les signaux à l'entrée. Toutefois, puisque certains des instruments nécessaires ne sont pas disponibles à l'université, deux générateurs de fonctions indépendants ont été utilisés pour obtenir deux signaux déphasés. Cette approche rend difficile l'observation directe de la relation entre la différence

¹⁰ <http://www.radiometrix.com/html/products/apnt4.html>

de phase des signaux d'entrées et la tension de sortie puisqu'il est difficile de connaître à un instant donné la différence de phase entre les deux générateurs de fonctions. Toutefois, puisque les générateurs de fonction sont indépendants, ils ne sont pas exactement à la même fréquence. Cette différence de fréquences crée un déphasage instantané variant entre -180 à 180 degrés. La sortie du circuit devrait donc donner une onde triangulaire variant entre 0 et 1,8 volt dont la fréquence est égale à la différence des fréquences des deux générateurs de fonctions. Le circuit peut donc être validé de cette façon, même si le déphasage instantané à l'entrée du circuit n'est pas connu. La figure 3.8 montre la tension de sortie du circuit en fonction du temps lorsque les signaux des deux générateurs de fonctions sont injectés dans le circuit avec une puissance de -20 dBm.

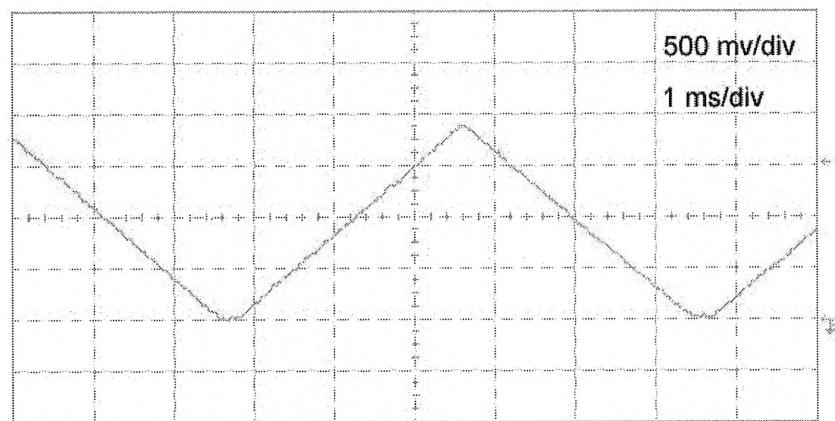


Figure 3.8 Tension de sortie du récepteur lorsque la puissance d'entrée est de -20 dBm

Comme prévu, l'onde varie de 0 à 1,8 volt et est presque triangulaire. La période de cette onde indique que la différence de fréquence entre les deux générateurs de fonctions est d'environ 160 Hz. En théorie, l'onde devrait être parfaitement triangulaire. Les sommets arrondis de l'onde sur la figure 3.8 peuvent également être observés sur la figure 3.7 qui fait partie de la fiche technique du AD8302. Le circuit de détection de phase fonctionne donc correctement. La variation de la puissance du signal d'entrée permet d'observer que les sommets de l'onde s'arrondissent et l'amplitude de l'onde diminue lorsque la puissance du signal d'entrée est inférieure à -55 dBm. La figure 3.9 montre la sortie du circuit de détection de phase lorsque la puissance des deux sources est de -65 dBm. En diminuant la puissance de -20 dBm à -65 dBm, la tension crête-à-crête est passée de 1,8 Vpp à 1,5 Vpp. Il faut noter que la fréquence d'au moins un des deux générateurs de fonctions dérive avec le temps. C'est ce

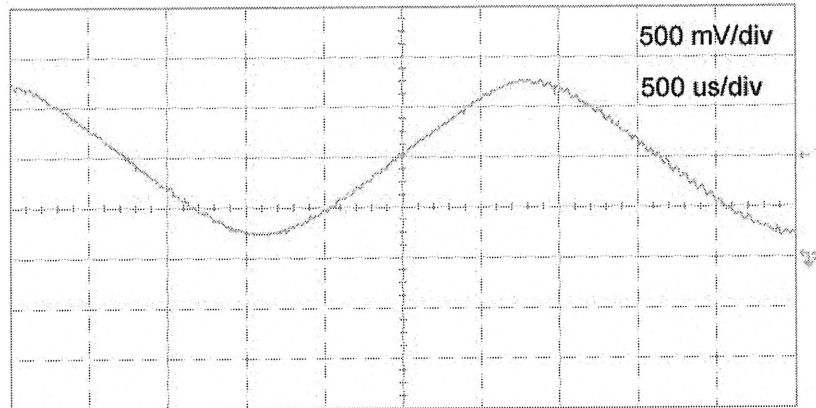


Figure 3.9 Tension de sortie du récepteur lorsque la puissance d'entrée est de -65 dBm qui explique la variation de la fréquence du signal de sortie. La variation de la fréquence des signaux d'entrées a permis d'observer que la largeur de bande du circuit était très étroite.

Une fois le circuit validé avec des signaux idéaux, il faut le valider dans la situation d'opération réelle. Le premier test quantitatif, effectué à l'intérieur, utilise deux contrôleurs et un récepteur. Le contrôleur I, utilisé comme source de signal, est relié à un ordinateur et est placé à 4 mètres du récepteur relié au contrôleur II. Aucun obstacle n'obstrue la ligne de vue entre le contrôleur I et le récepteur. Le contrôleur I émet un message RF indiquant au contrôleur II d'effectuer une mesure de phase. Dès la réception du message, le contrôleur II effectue quatre lectures successives de la tension de sortie du récepteur et transfère la moyenne de ces quatre lectures à l'ordinateur via le lien RF et le contrôleur I. Pour chaque point de mesure, dix mesures sont effectuées à un rythme de une par seconde. Une rotation de 15 degrés du récepteur est ensuite effectuée et dix autres mesures sont prises, jusqu'à ce que le récepteur ait effectué une rotation de 360 degrés. Lors de la prise de mesures, les mouvements dans l'environnement sont limités au maximum.

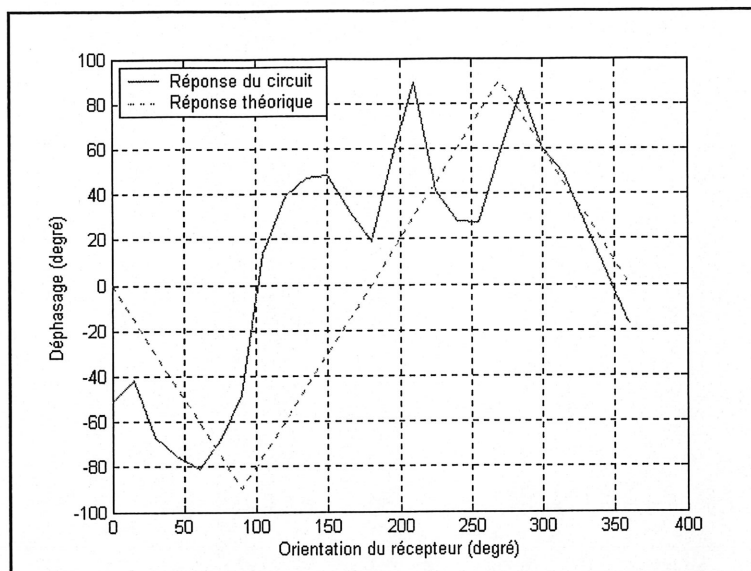


Figure 3.10 Résultats expérimentaux intérieurs

La figure 3.10 montre la courbe théorique ainsi que la moyenne des dix mesures expérimentales prises pour chaque point de mesure. La correspondance entre la courbe expérimentale et la courbe théorique est difficile à établir. Les données de chaque point de mesure sont très stables, dans la mesure où rien ne bouge dans l'environnement. La variation de phase entre ± 90 degrés montre que la puissance du signal n'est pas un problème à cette distance. Si tel avait été le cas, le déphasage n'aurait pas atteint les deux extrémités de la plage dynamique comme le montre la figure 3.9. La courbe expérimentale semble démontrer que la propagation multiparcours pose un grand problème pour la mesure de la différence de phase dans un environnement intérieur.

Le même test a été effectué dans un environnement extérieur où le phénomène de propagation multiparcours est moins important. Les résultats sont présentés à la figure 3.11. La courbe expérimentale est beaucoup plus proche de la courbe théorique comparativement aux résultats des tests intérieurs. Encore une fois, la puissance du signal n'est pas un problème. Toutefois, les résultats ne permettent pas d'obtenir une mesure de phase assez précise pour que l'approche de localisation proposée soit valable.

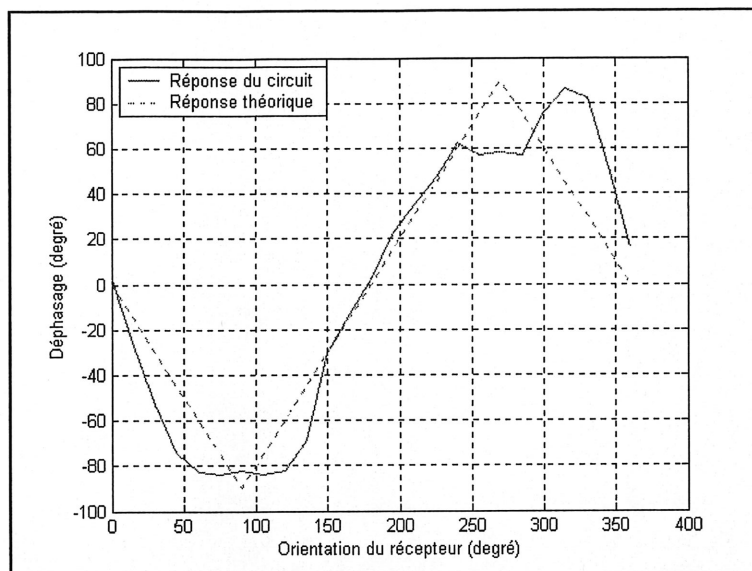


Figure 3.11 Résultats expérimentaux extérieurs

Le graphique 3.12 présente d'autres mesures prises dans un environnement intérieur, mais cette fois-ci le déphaseur du récepteur a été retiré de façon à s'assurer qu'il n'introduisait pas d'erreur¹¹. Sans ce déphaseur, il y a une ambiguïté de signe sur la phase. Le graphique présente donc la tension de sortie du récepteur plutôt que le déphasage. Les trois séries de données ont été prises une à la suite de l'autre dans les mêmes conditions de tests, toujours en limitant le mouvement dans l'environnement. Lors de la troisième série, il y avait un peu plus de mouvement dans l'environnement que lors des deux premières séries. Les trois séries de données montrent qu'il n'est pas possible d'obtenir des données fiables sur la différence de phase entre deux antennes dans les conditions spécifiques de l'application. Suite à ces résultats, des tests ont été effectués en variant la distance entre le transmetteur et les récepteurs de façon à vérifier l'effet de la variation de la puissance du signal RF. La diminution de l'amplitude du signal de sortie observée au laboratoire lorsque la puissance du signal d'entrée diminue (voir figure 3.9) a été observée avec ces tests. La variation de la puissance n'a toutefois pas amélioré les résultats. Les résultats obtenus montrent donc que la mesure de la différence de phase entre deux antennes en présence de propagation multiparcours est extrêmement dépendante de l'environnement.

¹¹ Les tests au laboratoire ont été faits avec une variation de phase de 360 degrés alors qu'avec les antennes, la variation de phase est de seulement 180 degrés. Le déphaseur, s'il n'est pas exactement de 90 degrés, peut introduire une erreur qui n'aurait pu être observée avec le montage de laboratoire utilisé.

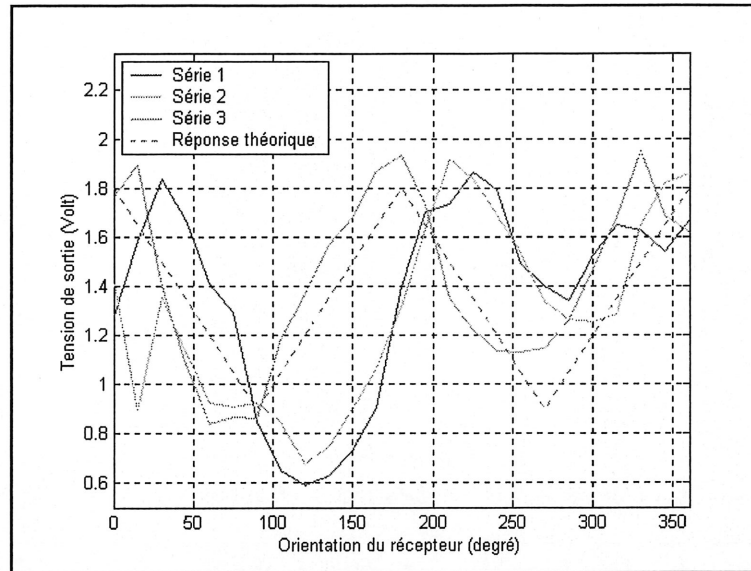


Figure 3.12 Résultats expérimentaux intérieurs sans déphaseur

3.3. Prototype utilisant des ondes ultrasoniques

Les ondes ultrasoniques voyagent à une vitesse beaucoup plus lente que les ondes électromagnétiques. La vitesse du son dans l'air varie avec la température, la pression atmosphérique et le degré d'humidité. Toutefois, l'effet des deux derniers facteurs reste négligeable par rapport à celui de la température¹². La vitesse du son dans l'air en fonction de la température peut être décrite par l'équation 3.27:

$$v(T) = 331,3176 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (3.27)$$

$$\text{avec } v(T) \text{ en } \frac{m}{s}$$

$$\text{et } T \text{ en } ^\circ C$$

À 20 °C, la vitesse du son dans l'air est d'environ 343 m/s. À cette vitesse, il est envisageable de transmettre un court signal et de détecter son temps d'arrivée avec une assez grande précision pour évaluer la distance parcourue par l'onde. La détection du temps d'arrivée permet, contrairement à l'approche de détection de phase utilisée pour le prototype RF, d'éviter les problèmes de réflexions puisque la première détection de signal est celle de la

¹² <http://www.massa.com/fundamentals.htm>

distance la plus courte entre le transmetteur et le récepteur. Les réflexions du signal sont captées par la suite et sont tout simplement ignorées.

De façon à limiter le nombre de transmetteurs-récepteurs ultrasoniques et à augmenter la précision sur la distance, la méthode du temps de vol doit être utilisée. Cette méthode nécessite une synchronisation entre le transmetteur (qui se trouve sur un agent mobile) et les récepteurs (qui se trouvent sur un autre agent mobile). Puisque la vitesse du son est de beaucoup inférieure à la vitesse des ondes électromagnétiques (343 m/s vs 300 000 000 m/s) un lien RF peut être utilisé pour indiquer le temps de départ de l'onde ultrasonique. De cette façon, trois récepteurs ultrasoniques utilisés avec un lien RF permettent de déterminer la position du transmetteur. Chaque agent doit donc être équipé d'au moins trois récepteurs et d'un transmetteur ultrasonique.

Toutefois, comme mentionné plus haut, la vitesse du son varie avec la température. Si les conditions environnementales sont stables, la vitesse du son peut être considérée constante et être fixée à l'aide d'équations ou de résultats expérimentaux. Si les conditions environnementales varient et que la vitesse du son est considérée constante, les distances déterminées à partir des temps de vol seront moins précises. La figure 3.13 présente l'erreur introduite sur les distances mesurées par temps de vol lorsque la température varie. Cette figure suppose que la vitesse du son a été calculée à 22,5 °C. Les simulations de la section 3.3.1 aident à déterminer si cette erreur a un effet significatif sur les résultats.

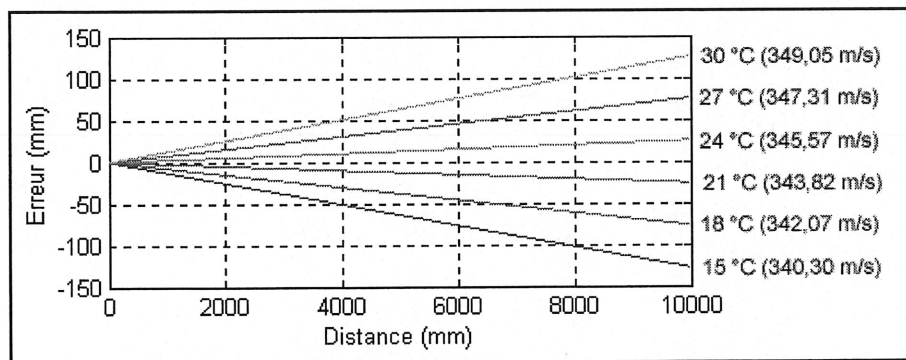


Figure 3.13 Erreur sur la distance introduite par une variation de température

Si l'effet est significatif, il est possible d'utiliser un capteur de température pour corriger la vitesse du son. L'équation 3.27 peut alors servir pour déterminer la vitesse du son. L'approche de localisation proposée offre deux autres possibilités pour corriger la vitesse du son. La première consiste à mesurer périodiquement la vitesse du son à l'aide d'un transmetteur et d'un récepteur d'un même agent si leur position le permet: puisque les positions des transmetteurs-récepteurs sur l'agent sont connues, il suffit de mesurer le temps de vol entre le transmetteur et un des récepteurs du même agent pour connaître la vitesse du son. Cette option est un avantage important puisqu'elle immunise le système contre les variations de la vitesse du son sans nécessiter l'ajout de matériel au système. L'autre option possible consiste à utiliser un récepteur de plus que le nombre nécessaire pour faire la localisation, comme proposé dans [FIGUEROA et coll., 1994a] et [MAHAJAN et coll., 2001]. Ce récepteur supplémentaire ajoute une équation au système et permet donc d'ajouter une variable inconnue, soit la vitesse du son (voir annexe A). Si la correction de la vitesse du son s'avère nécessaire, l'option la plus intéressante reste le calcul du temps de vol entre un transmetteur et un récepteur de l'agent puisqu'aucune modification matérielle n'est nécessaire.

3.3.1. Simulations

Pour valider la théorie d'opération, des simulations ont été faites avec le logiciel Matlab. Les simulations se font sur un plan cartésien discrétisé. Trois récepteurs (A , B et C) sont positionnés autour de l'origine de la même façon qu'ils seront positionnés sur l'agent mobile, c'est-à-dire répartis de façon uniforme sur un cercle de rayon r centré à l'origine. Pour chaque point (x, y) du plan discrétisé, la distance d_{ij} séparant ce point de chacun des récepteurs est déterminée à l'aide de ces coordonnées et de celles des récepteurs. À partir des distances calculées et du système d'équations (3.9), la position du point (x_D, y_D) est calculée. Le résultat étant sous la forme cartésienne, les points obtenus sont ensuite exprimés en coordonnées polaires pour obtenir une distance d et un angle θ . Le choix de la distance r entre les récepteurs et l'origine est un compromis entre l'encombrement du système (limite supérieure) et la précision désirée (limite inférieure). Intuitivement, plus r est grand, plus la précision sera grande puisque la différence entre les temps d'arrivées aura une plage dynamique plus grande. Comme il est difficile de manipuler le système d'équations (3.9) pour arriver à cette conclusion, la simulation est utilisée pour valider cette idée. Le placement symétrique des

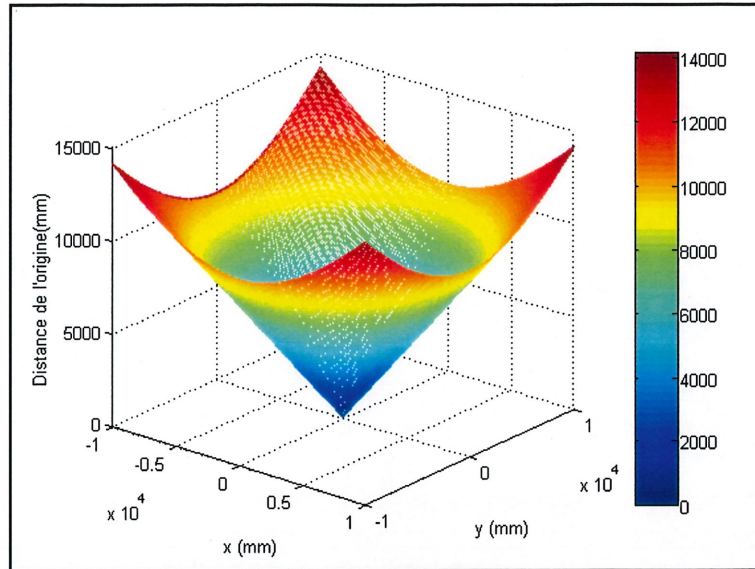


Figure 3.14 Distance d en fonction de (x, y)

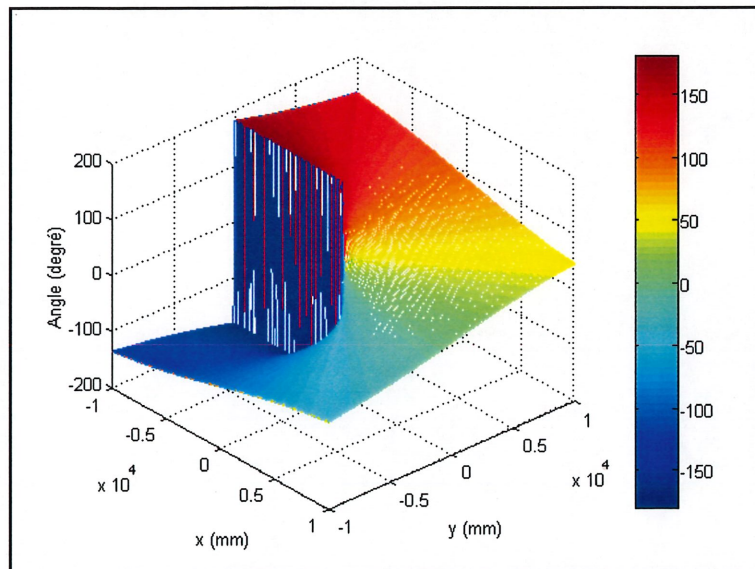


Figure 3.15 Angle θ en fonction de (x, y)

récepteurs est préférable à un placement asymétrique de façon à maximiser la distance entre chaque récepteur. Pour la première simulation, les récepteurs A , B et C sont placés à 100 mm de l'origine et à des angles respectifs de 30° , 150° et 270° . Cette configuration est réaliste dans le cas de l'installation du système sur un agent mobile. Les résultats de cette simulation sont comparés par la suite à ceux obtenus en changeant la position des récepteurs. Les figures 3.14 et 3.15 montrent les résultats de simulation pour un plan de 20 m par 20 m avec trois récepteurs positionnés à $(100 \text{ mm}, 30^\circ)$, $(100 \text{ mm}, 150^\circ)$ et $(100 \text{ mm}, 270^\circ)$.

Évidemment, ces graphiques sont idéaux puisque les données de distance d_{ij} sont exactes. Il faut ajouter une erreur sur ces distances pour vérifier l'effet sur la précision de la position obtenue. Cette erreur sur la distance correspond en réalité à une erreur sur la mesure du temps de vol de l'onde. La correspondance entre l'erreur en distance et celle en temps pour une vitesse du son donnée se fait à l'aide de l'équation (3.28). La vitesse du son utilisée pour cette correspondance dans les simulations est celle à 20°C, soit 343 m/s.

$$d = vt \quad (3.28)$$

Il y a deux types d'erreurs possibles associées à la méthode de détermination des temps de vol. Le premier type d'erreur est une erreur commune aux trois récepteurs et est appelée erreur absolue. Cette erreur peut être reliée à l'atténuation de l'onde avec la distance (qui diminue la précision sur le temps d'arrivée - voir section 3.3.3), à une erreur de synchronisation entre le transmetteur et le récepteur ou encore à une erreur entre la vitesse du son utilisée et la vitesse du son réelle. Le second type d'erreur, appelé erreur relative, est différent pour les trois récepteurs. Cette erreur peut être reliée à des différences entre les circuits de réception des différents récepteurs ou encore à l'atténuation de l'onde lorsqu'un obstacle (un autre récepteur par exemple) est présent dans la ligne de vue d'un seul des récepteurs. À chacun des points (x,y) du plan discrétisé est donc associé une erreur absolue ($ErrAbs(x,y)$) et trois erreurs relatives ($ErrRel_A(x,y)$, $ErrRel_B(x,y)$ et $ErrRel_C(x,y)$). L'erreur ajoutée est aléatoire et est comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale donnée. Les distances séparant le transmetteur D des trois récepteurs pour un point (x,y) donné peuvent donc s'écrire comme suit:

$$\tilde{d}_{AD}(x,y) = d_{AD}(x,y) + ErrAbs(x,y) + ErrRel_A(x,y) \quad (3.29)$$

$$\tilde{d}_{BD}(x,y) = d_{BD}(x,y) + ErrAbs(x,y) + ErrRel_B(x,y) \quad (3.30)$$

$$\tilde{d}_{CD}(x,y) = d_{CD}(x,y) + ErrAbs(x,y) + ErrRel_C(x,y) \quad (3.31)$$

$$\text{où } \begin{aligned} -ErrAbs_{max} &\leq ErrAbs(x,y) \leq ErrAbs_{max} \\ -ErrRel_{max} &\leq ErrRel_i(x,y) \leq ErrRel_{max} \end{aligned}$$

Les graphiques 3.16 et 3.17 montrent les résultats avec une erreur absolue maximale ($ErrAbs_{max}$) de 20 mm (qui correspond à un temps d'environ 58 μ s) et une erreur relative maximale ($ErrRel_{max}$) de 10 mm (qui correspond à un temps d'environ 29 μ s). Ces valeurs maximales d'erreur sont des approximations des erreurs réelles du système.

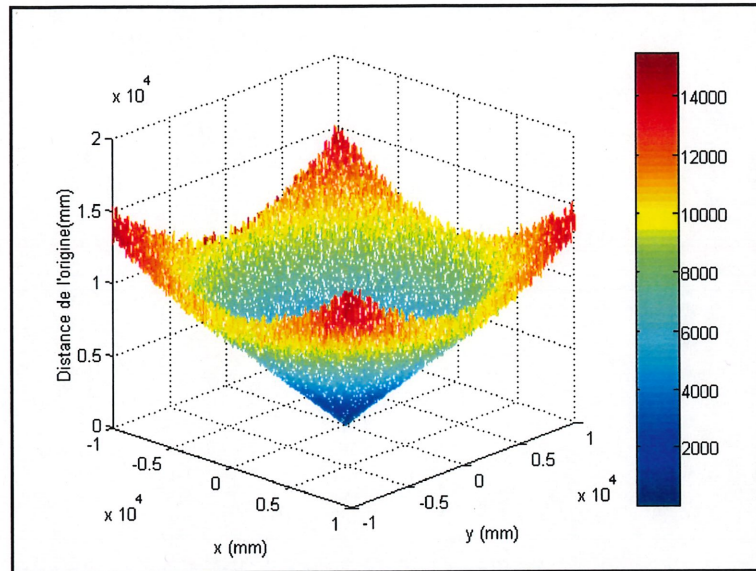


Figure 3.16 Distance d en fonction de (x, y) avec erreur sur les d_{ij}

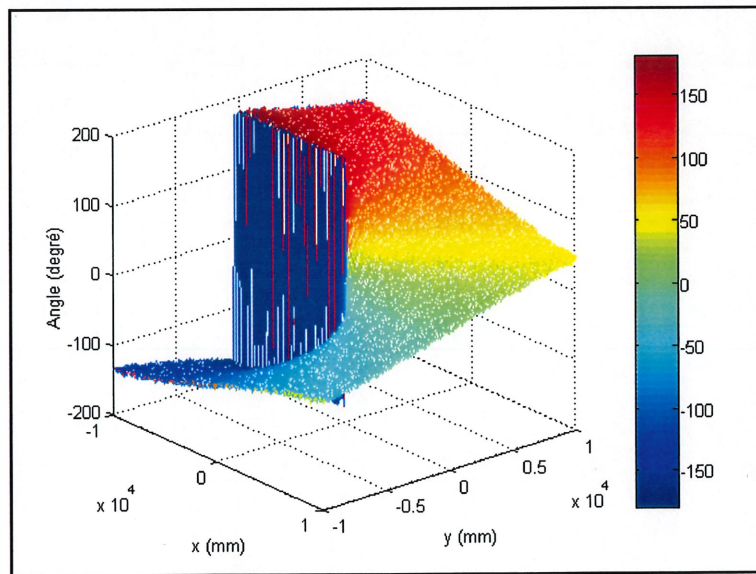


Figure 3.17 Angle θ en fonction de (x, y) avec erreur sur les d_{ij}

L'erreur sur la distance d et l'erreur sur l'angle θ en fonction de la position sont représentées respectivement aux figures 3.18 et 3.19. La figure 3.18 montre que l'erreur sur d augmente avec la distance entre le transmetteur et l'origine et qu'elle atteint des valeurs supérieures à 500 mm au delà de 5000 mm. La figure 3.19 montre que l'erreur sur θ semble indépendante de la distance, qu'elle est répartie également sur toute la surface simulée et qu'elle est comprise entre ± 8 degrés.

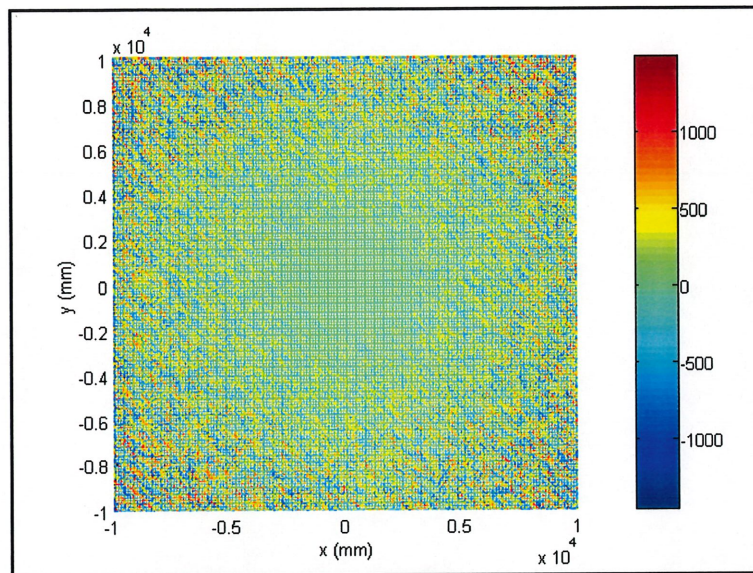


Figure 3.18 Erreur sur d en fonction de (x, y)

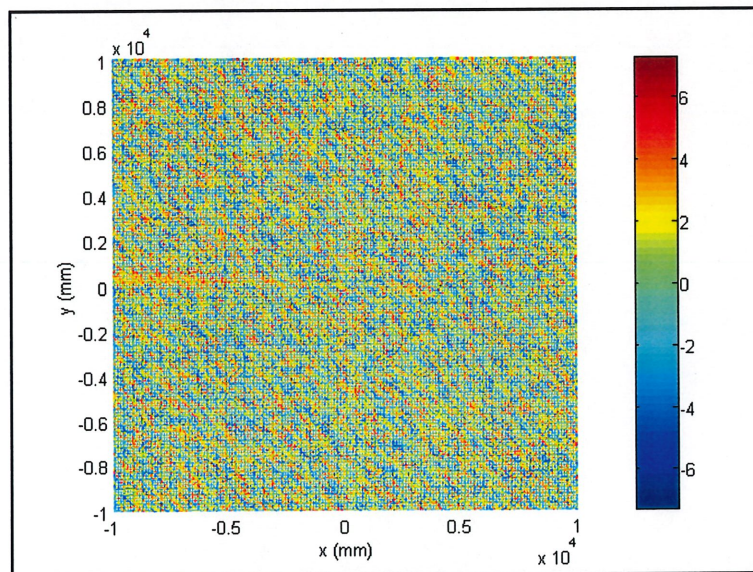


Figure 3.19 Erreur sur θ en fonction de (x, y)

TABLEAU 3.1 STATISTIQUE SUR L'ERREUR DES RÉSULTATS OBTENUES PAR LE SYSTÈME D'ÉQUATIONS

	<i>Erreur sur d (mm)</i>	<i>Erreur sur θ (degré)</i>
Erreur moyenne	-9,18	0,02
Erreur absolue moyenne	297,02	2,21
Erreur minimum	-1454,7	-7,28
Erreur maximum	1481	7,26
Écart-type	385,87	2,7

Le tableau 3.1 donne des informations statistiques sur les erreurs observées pour d et θ sur toute la surface de simulation (soit 20 m par 20 m). La précision sur θ est assez grande, mais celle sur d diminue rapidement avec la distance entre le transmetteur et l'origine. Afin d'améliorer les performances, trois autres moyens peuvent être utilisés pour déterminer d . Le plus simple est de placer un des récepteurs directement à l'origine. De cette façon, ce récepteur donnerait directement la distance d entre l'émetteur et l'origine. Puisque cette distance a une erreur maximale estimée de 30 mm (erreur absolue + erreur relative pour un récepteur), la précision sur la distance est donc beaucoup plus grande que celle obtenue avec le système d'équations.

S'il n'est pas possible de placer un récepteur à l'origine, la deuxième approche consiste à utiliser la loi des sinus avec l'angle θ obtenu du système d'équations et les distances d_{ij} obtenues directement des récepteurs. Prenons par exemple le triangle formé par le récepteur A , l'origine O et le transmetteur D qui peut se trouver dans une des trois régions montrées à la figure 3.20. Les segments AD et OA sont connus, l'angle AOD peut être calculé à partir de l'angle OD obtenu par les équations et la distance OD (qui correspond à d) est à déterminer. La première étape est de calculer l'angle AOD selon la région dans laquelle se trouve le point D par rapport au point A et à l'origine O .

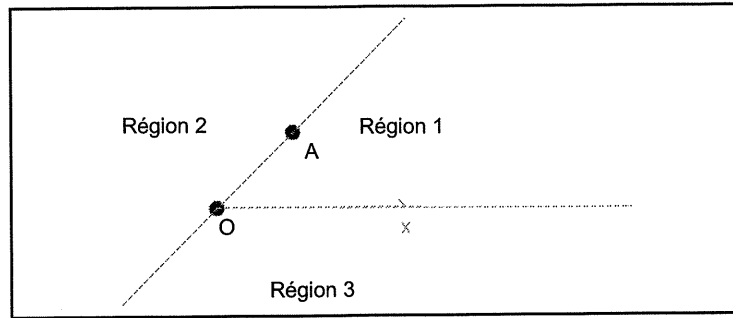


Figure 3.20 Détermination de la distance avec la loi des sinus

$$\begin{aligned} \text{Région 1} : 0 \leq \sphericalangle OD < \sphericalangle OA \\ \sphericalangle AOD = \sphericalangle OA - \sphericalangle OD \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Région 2} : \sphericalangle AO \leq \sphericalangle OD < \sphericalangle OA + \pi \\ \sphericalangle AOD = \sphericalangle OD - \sphericalangle OA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Région 3} : \sphericalangle AO + \pi \leq \sphericalangle OD < 2\pi \\ \sphericalangle AOD = 2\pi - \sphericalangle OD + \sphericalangle OA \end{aligned}$$

Une fois l'angle AOD trouvé, des identités trigonométriques sont utilisées pour estimer la distance du segment OD :

$$\sin(\sphericalangle ODA) = \frac{\overline{OA} \sin(\sphericalangle DOA)}{\overline{AD}} \quad (3.32)$$

$$\sphericalangle OAD = \pi - \sphericalangle ODA - \sphericalangle DOA \quad (3.33)$$

$$\overline{OD} = \frac{\overline{OA} \sin(\sphericalangle OAD)}{\sin(\sphericalangle ODA)} \quad (3.34)$$

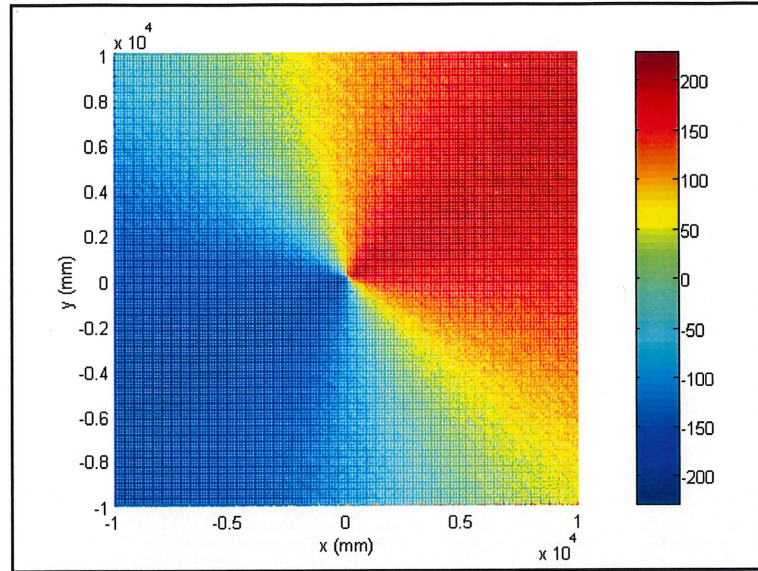


Figure 3.21 Erreur sur d déterminée à l'aide de d_{AD} et θ

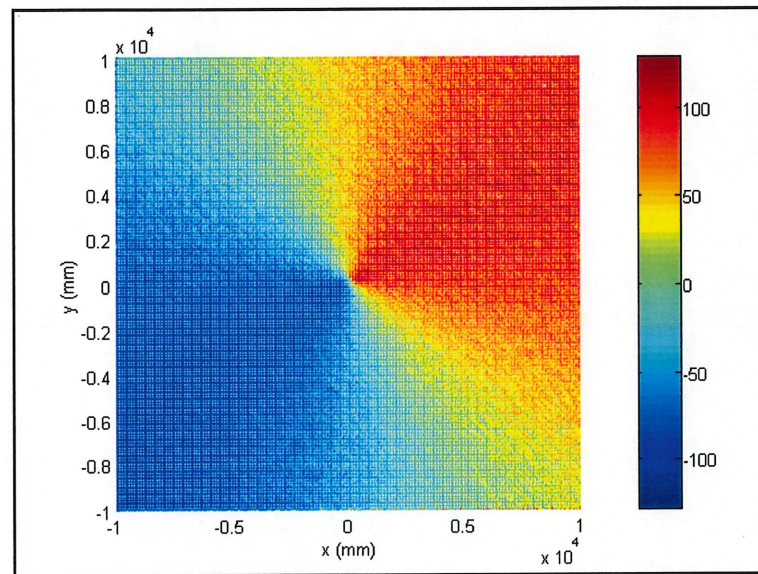


Figure 3.22 Erreur sur d déterminée en utilisant d_{AD} , d_{BD} , d_{CD} et θ

La figure 3.21 montre l'erreur entre la longueur réelle du segment OD (c'est-à-dire d) et celle trouvée en utilisant la distance obtenue du récepteur A et l'angle θ obtenu avec le système d'équations. Une erreur maximale de 250 mm est observée, ce qui est plus acceptable que l'erreur de 1500 mm obtenue par le système d'équations (3.9). De la même façon, les récepteurs B et C permettent d'obtenir deux autres estimés de la distance. La figure 3.22

montre la moyenne de ces trois estimés, qui permet encore une fois de diminuer l'erreur maximale à 125 mm.

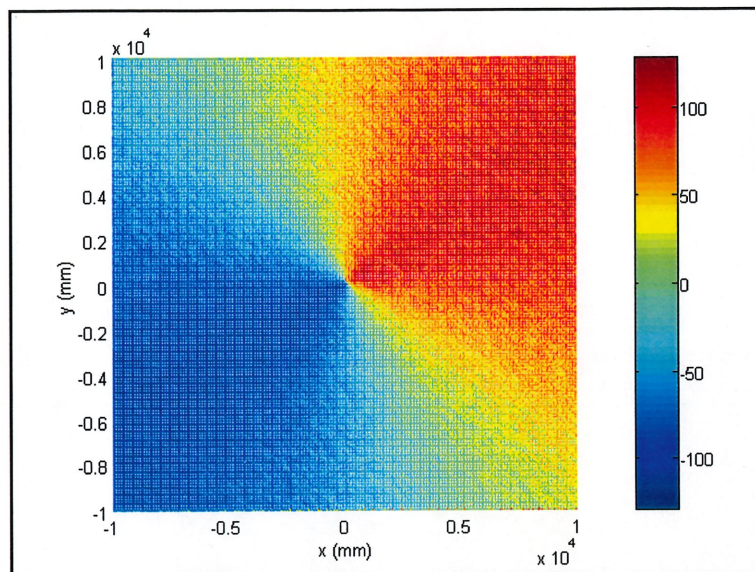


Figure 3.23 Erreur entre d et d_{AD}

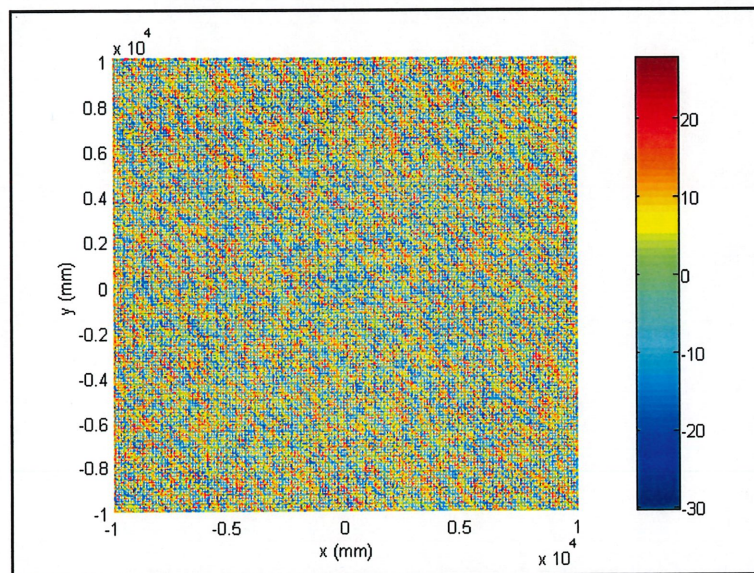


Figure 3.24 Erreur entre la distance d et la moyenne des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD}

La troisième façon pour déterminer la distance d est d'utiliser directement la distance obtenue par un des récepteurs même s'il n'est pas à l'origine, plutôt que d'utiliser le système d'équation (3.9). Comme les transmetteurs sont très près de l'origine, l'erreur résultante sur la position est

faible par rapport à l'erreur sur la distance obtenue avec l'équation. Par exemple, la figure 3.23 montre l'erreur entre d et d_{AD} . Cette erreur est du même ordre que celle obtenue par la méthode précédente. Les distances d_{BD} et d_{CD} peuvent être utilisées pour améliorer ce résultat en calculant la moyenne des trois distances. La figure 3.24 représente l'erreur entre la distance d et la moyenne des trois distances obtenues directement des récepteurs. L'erreur maximale obtenue est de 30 mm et est répartie de façon uniforme sur la surface d'opération, contrairement aux méthodes précédentes.

Pour minimiser l'erreur, c'est donc la méthode des moyennes des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD} qui doit être utilisée pour déterminer la distance d entre l'émetteur et l'origine. La figure 3.25 montre une vue latérale de l'erreur entre la distance d et la moyenne des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD} lorsque les erreurs relatives et absolue sont nuls. La figure permet d'observer que cette approximation introduit une erreur qui est plus importante à proximité de l'origine, mais cette erreur reste acceptable puisqu'elle est inférieure à 15 mm. Cette méthode est toutefois dépendante de la position des récepteurs: plus ces derniers sont éloignés de l'origine, plus l'erreur résultante est grande.

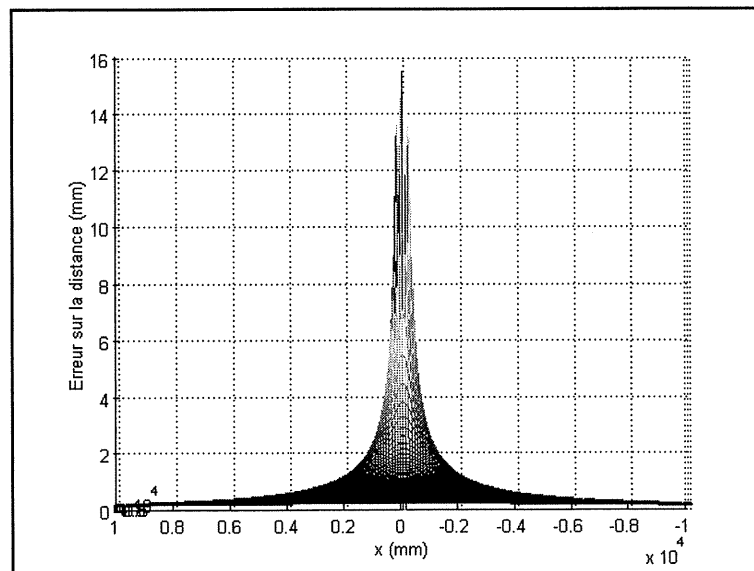


Figure 3.25 Erreur sur la distance d reliée à la moyenne des distances d_{AD} , d_{BD} et d_{CD}

Le système de localisation proposé utilise donc les équations suivantes pour déterminer d et θ :

$$d = \frac{d_{AD} + d_{BD} + d_{CD}}{3} \quad (3.35)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_D}{x_D}\right) \quad (3.36)$$

avec (x_D, y_D) déterminés par le système d'équations (3.9)

Les simulations pour les figures 3.16 à 3.24 ont été réalisées avec une erreur absolue de 20 mm (58 μ s) et une erreur relative de 10 mm (29 μ s). Ces erreurs sont des évaluations des erreurs réelles. De façon à vérifier l'effet de chacun des types d'erreur sur la précision des résultats, d'autres simulations sont réalisées en variant les deux types d'erreurs entre 0 et 30 mm (0 et 87 μ s). Cet intervalle représente une prévision des erreurs du système. Les tableaux 3.2 et 3.3 montrent les résultats de simulations pour différentes valeurs d'erreur relative et absolue. Les résultats ont été calculés à partir de cinq simulations consécutives pour chacune des combinaisons d'erreurs. Le tableau 3.2 démontre que la précision sur d dépend des deux types d'erreurs tandis que le tableau 3.3 démontre que la précision sur θ dépend principalement de l'erreur relative. Ces conclusions permettent de déterminer qu'une erreur entre la vitesse du son réelle et la vitesse du son utilisée dans le système affectera seulement le résultat de distance et non celui d'angle.

TABLEAU 3.2 ERREUR SUR LA DISTANCE d EN FONCTION DE L'ERREUR AJOUTÉE

<i>Erreur absolue (mm)</i>	<i>Erreur relative (mm)</i>	<i>Erreur sur d (mm)</i>				
		<i>Moyenne</i>	<i>Moyenne absolue</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Écart-type</i>
0	0	0,43	0,43	0	15,47	0,47
10	0	0,43	5,01	-9,82	25,23	5,79
10	10	0,43	5,58	-19,05	28,26	6,68
10	20	0,43	7,15	-28,41	32,15	8,82
10	30	0,19	9,33	-37,14	39,17	11,54
20	0	0,39	10,01	-19,79	33,13	11,56
20	10	0,4	10,27	-28,44	35,91	12,01
20	20	0,44	11,13	-38,36	38,37	13,36
20	30	0,47	12,49	-47,23	54,58	15,27
30	0	0,49	14,97	-29,8	42,6	17,3
30	10	0,39	15,2	-38,15	44,78	17,66
30	20	0,44	15,72	-48,48	50,93	18,54
30	30	0,39	16,64	-57,25	58,88	19,96

TABLEAU 3.3 ERREUR SUR L'ANGLE θ EN FONCTION DE L'ERREUR AJOUTÉE

<i>Erreur absolue (mm)</i>	<i>Erreur relative (mm)</i>	<i>Erreur sur θ (degré)</i>				
		<i>Moyenne</i>	<i>Moyenne absolue</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Écart-type</i>
0	0	4,63E-015	1,84E-013	-1,24E-012	1,25E-012	2,46E-013
10	0	1,15E-005	2,84E-004	-0,23	0,28	2,60E-003
10	10	0,01	2,21	-7,39	7,52	2,7
10	20	0,09	4,45	-14,99	15,11	5,43
10	30	0,19	6,7	-22,85	22,95	8,18
20	0	2,51E-005	5,70E-004	-0,46	0,54	5,20E-003
20	10	0,03	2,22	-7,43	7,4	2,71
20	20	0,05	4,45	-14,77	15,12	5,43
20	30	0,14	6,7	-23,91	22,89	8,18
30	0	-5,57E-007	8,66E-004	-0,86	0,78	8,40E-003
30	10	0,02	2,22	-7,3	7,44	2,71
30	20	0,09	4,44	-14,94	15,24	5,42
30	30	0,15	6,69	-23,08	25,45	8,17

Ces simulations supposent que le transmetteur et les récepteurs sont à la même position horizontale, c'est-à-dire à la même hauteur. En pratique, il est possible que le transmetteur ne soit pas à la même hauteur que les récepteurs. Si la hauteur relative du transmetteur par rapport aux récepteurs est connue, les distances obtenues de chacun des récepteurs peuvent être corrigées en utilisant la loi de Pythagore. Si la hauteur n'est pas connue ou est variable, la localisation en trois dimensions est possible en ajoutant un récepteur au système. Il est tout de même intéressant de vérifier la validité des résultats si le système de localisation deux dimensions est utilisé avec une différence de hauteur entre le transmetteur et les récepteurs. La figure 3.26 montre l'erreur sur la distance d calculée en utilisant l'équation 3.35 lorsque le transmetteur est à 300 mm au-dessus des récepteurs et qu'aucune erreur n'est ajoutée aux données. L'erreur sur d est non négligeable, mais elle reste toutefois acceptable. La figure 3.27, qui montre l'erreur sur l'angle θ dans les mêmes conditions, indique que la hauteur du transmetteur a peu d'effet sur la précision de l'angle obtenue par le système d'équations.

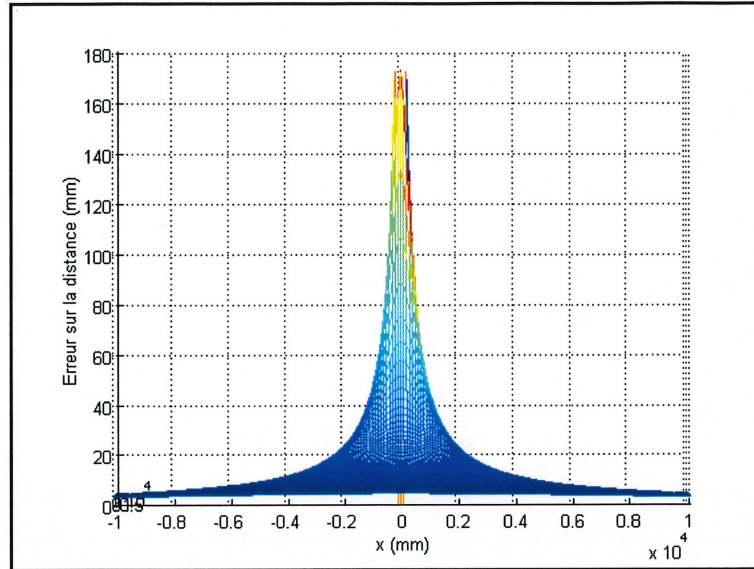


Figure 3.26 Erreur sur d lorsque le transmetteur est 300 mm au-dessus des récepteurs

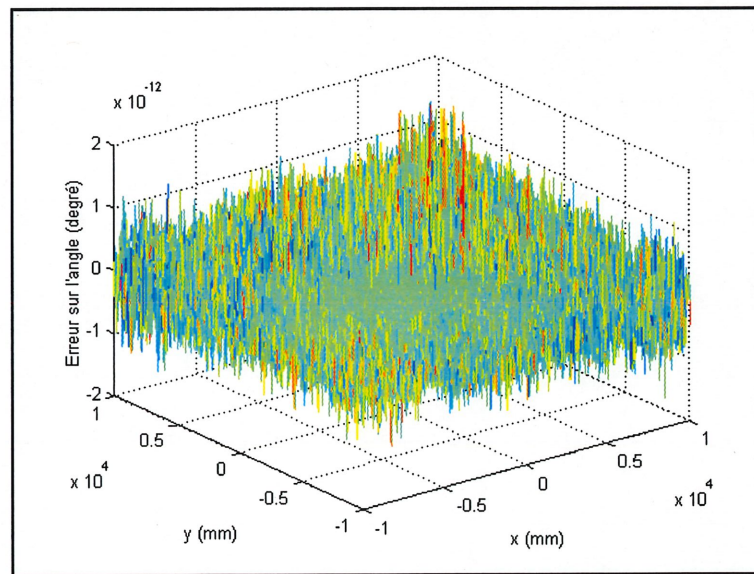


Figure 3.27 Erreur sur θ lorsque le transmetteur est 300 mm au-dessus des récepteurs

Enfin, de façon à déterminer l'effet de la position des récepteurs sur la précision du système, les tableaux 3.4 et 3.5 comparent les résultats de simulations pour différentes positions de récepteurs. Les résultats ont été calculés à partir de cinq simulations consécutives pour chaque position de récepteurs. La symétrie est conservée, c'est-à-dire que les positions angulaires des trois récepteurs sont respectivement de 30, 150 et 270 degrés. Seulement la

distance r entre les récepteurs et l'origine varie. Les erreurs absolues et relatives utilisées pour ces simulations sont les mêmes que celles des premières simulations, soit respectivement de 20 mm (58 μ s) et de 10 mm (29 μ s).

TABLEAU 3.4 ERREUR SUR LA DISTANCE d EN FONCTION DE LA DISTANCE r ENTRE LES RÉCEPTEURS ET L'ORIGINE

r (mm)	Erreur sur d (mm)				
	Moyenne	Moyenne absolue	Min	Max	Écart-type
50	0,09	10,28	-28,96	29,49	12,03
100	0,4	10,27	-28,44	35,91	12,01
150	0,95	10,35	-27,78	44,43	12,08
200	1,74	10,42	-27,64	65,17	12.1378
250	2,68	10,57	-26,77	68,11	12,24
300	3,81	10,86	-26,92	80,69	12,46

TABLEAU 3.5 ERREUR SUR L'ANGLE θ EN FONCTION DE LA DISTANCE r ENTRE LES RÉCEPTEURS ET L'ORIGINE

r (mm)	Erreur sur θ (degré)				
	Moyenne	Moyenne absolue	Min	Max	Écart-type
50	0,08	4,45	-15,09	15,02	5,42
100	0,03	2,22	-7,43	7,4	2,71
150	0,01	1,48	-5,02	4,94	1,8
200	0,01	1,11	-3,69	3,97	1,35
250	-3,13E-004	0,89	-3,16	2,95	1,08
300	4,10E-003	0,74	-2,7	2,82	0,9

Le tableau 3.4 permet d'observer que la position des récepteurs a peu d'effet sur la précision de la distance obtenue. La légère augmentation de l'erreur maximale est due à la méthode de détermination de la distance (équation (3.35)) qui introduit une erreur plus grande en proximité lorsque la distance entre les récepteurs est plus grande (voir figure 3.25). Le tableau 3.5 permet pour sa part d'observer que la distance entre les récepteurs affecte grandement la précision sur l'angle. Il est donc avantageux de placer les récepteurs le plus loin possible les uns des autres.

Comme mentionné précédemment, ces simulations se rattachent à la méthode des temps de vol. Cette méthode a un très grand avantage par rapport à la méthode des différences de temps de vol puisqu'elle permet d'obtenir directement des informations de distance. Comme les simulations précédentes l'ont démontrées, ces informations permettent d'améliorer de beaucoup la précision sur les résultats de distance d . Des simulations préliminaires sur le système d'équations utilisant les différences de temps de vol (voir équation (3.26)) ont permis d'observer que non seulement la précision sur la distance est moins grande, mais que la précision sur l'angle est également moins grande. En effet, il semble y avoir des régions du plan simulé où le système est instable et où les données obtenues sont inutilisables. L'utilisation de récepteurs supplémentaires pourrait probablement améliorer les résultats du système si les différences de temps de vols doivent être utilisées.

3.3.2. Choix des émetteurs-récepteurs et de la fréquence d'opération

Tout d'abord, le terme émetteur-récepteur est utilisé ici dans un sens large qui comprend trois sous-groupes: les émetteurs (ou transmetteurs) qui ne peuvent qu'émettre; les récepteurs qui ne peuvent que recevoir; les transcepteurs qui peuvent émettre et recevoir.

Les émetteurs-récepteurs ultrasoniques fonctionnent généralement sur une plage de fréquences bien précise. La plage de fréquences utilisable varie selon le modèle et est plus ou moins grande selon le type d'émetteur-récepteur: les émetteurs-récepteurs électrostatiques peuvent généralement opérer sur une plus grande plage de fréquences tandis que les émetteurs-récepteurs piézoélectriques ont une largeur de bande plus étroite. Le choix de la fréquence ultrasonique à utiliser est dicté principalement par la disponibilité et le coût des émetteurs-récepteurs. Toutefois, il est intéressant de connaître les différentes caractéristiques affectées par la fréquence.

Les émetteurs-récepteurs ultrasoniques sont disponibles pour des fréquences allant environ de 25 kHz à 250 kHz. Une fréquence plus élevée, qui correspond à une longueur d'onde plus petite, tend à augmenter la précision de la mesure par rapport à celle d'une fréquence plus basse. Par contre, l'atténuation avec la distance d'une onde haute fréquence est plus grande

que l'atténuation d'une onde de plus basse fréquence¹³. L'équation 3.37 présente l'atténuation en fonction de la fréquence.

$$a(f) = \begin{cases} 32,8 * 10^{-6} * f & \text{pour } f < 50 \text{ kHz} \\ 0,07218 * f^{-1,968} & \text{pour } f \geq 50 \text{ kHz} \end{cases} \quad (3.37)$$

avec $a(f)$ en dB/m
et f en Hz

Idéalement, un compromis doit être fait entre la portée et la précision voulue. Par contre, comme mentionné plus haut, le coût et la disponibilité ont un plus grand impact sur le choix des émetteurs-récepteurs et donc sur le choix de la fréquence d'opération.

Les deux types d'émetteurs-récepteurs ont des caractéristiques différentes: les électrostatiques sont généralement plus puissants et plus sensibles, tandis que les piézoélectriques sont généralement plus petits, peuvent être utilisés à des tensions moins élevées et nécessitent un circuit de réception plus simple puisque leur largeur de bande est plus étroite. Pour le projet, ce sont des émetteurs-récepteurs piézoélectriques qui sont utilisés en raison des trois avantages mentionnés. Les piézoélectriques les moins dispendieux fonctionnent à 40 kHz. Pour avoir plus de choix de fréquences, le coût est de 6 à 20 fois plus élevé. Une fréquence de 40 kHz est donc un bon choix pour valider l'approche, mais cette fréquence peut poser problème: la plupart des sonars utilisés en robotique mobile fonctionnent autour de 40 kHz. Il risque donc d'y avoir interférence entre le système de positionnement et les sonars des agents mobiles. Pour utiliser le système sur un robot équipé de sonars, la fréquence d'opération devra être changée. Le changement de la fréquence d'opération nécessite seulement des modifications matérielles reliées aux émetteurs-récepteurs.

Reste maintenant à régler le problème de l'angle d'opération. Chacun des émetteurs-récepteurs doit être omnidirectionnel en deux dimensions, c'est-à-dire couvrir 360 degrés à l'horizontale. La plupart des émetteurs-récepteurs ultrasoniques ont un angle d'opération inférieur à 120 degrés. Une première méthode consiste à utiliser plusieurs émetteurs-récepteurs pour couvrir les 360 degrés. Par exemple, quatre émetteurs-récepteurs couvrant

¹³ <http://www.massa.com/fundamentals.htm>

chacun 90 degrés positionnés adéquatement permettent de couvrir 360 degrés autant pour la transmission que pour la réception. La figure 3.28 illustre cette méthode.

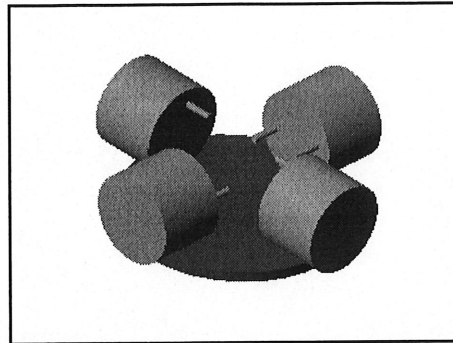


Figure 3.28 Disposition de plusieurs émetteurs-récepteurs pour couvrir 360 degrés

Puisque les caractéristiques verticales sont les mêmes que celles horizontales, l'angle d'opération vertical du système est égal à l'angle d'opération d'un émetteur-récepteur. Cette approche augmente la puissance de transmission et la sensibilité de réception comparativement à une approche qui n'utilise qu'un seul émetteur-récepteur (avec des caractéristiques semblables). Une seconde méthode consiste à utiliser un réflecteur pour répartir l'onde ultrasonique sur 360 degrés, comme utilisé pour les *Millibots* [NAVARRO-SERMENT et coll., 1999] et pour *Genghis* [EVERETT, 1995]. Un réflecteur conique avec une base plane, pointant vers l'émetteur-récepteur, aura pour effet de réfléchir à l'horizontale et dans toutes les directions une onde transmise. De la même façon, une onde arrivant à l'horizontale de n'importe quelle direction sera réfléchiée vers l'émetteur-récepteur. La figure 3.29 illustre un émetteur-récepteur et un réflecteur conique.

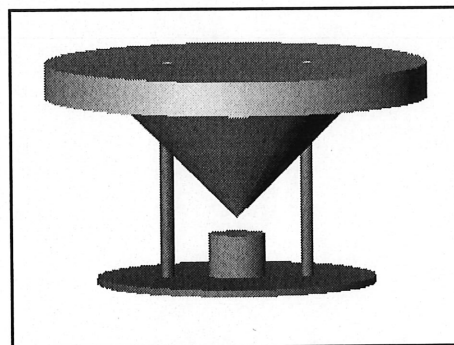


Figure 3.29 Utilisation d'un cône réflecteur au-dessus d'un émetteur-récepteur

La section plane à la base du cône est importante pour orienter l'onde ultrasonique à l'horizontale lorsque l'émetteur-récepteur est utilisé pour la transmission. Sans cette section plane, la plus grande partie du signal continuerait sa route en suivant l'angle du cône. Les dimensions de cette section plane limitent l'angle d'opération verticale. Si l'émetteur-récepteur sous le cône est dédié à la réception, la section plane n'est pas requise et l'angle d'opération vertical est donc plus grand.

Pour limiter le nombre d'émetteur-récepteur et simplifier les circuits électriques, l'option du cône est retenue. Cette technique nécessite une plus grande puissance de transmission puisque l'onde transmise par un seul émetteur doit couvrir 360 degrés. De plus, la réflexion sur les cônes entraîne des pertes et une partie du signal risque de ne pas être réfléchi dans la direction voulue. Si le manque de puissance cause trop de problèmes, l'approche présentée à la figure 3.28 pourra être utilisée.

Les cônes utilisés sont fabriqués en plâtre de paris à partir d'un moule fait sur mesures. La réflexivité d'un cône en plâtre a été comparée avec celle d'un cône en métal de façon à s'assurer que le plâtre était un bon réflecteur pour les ultrasons. La comparaison a été faite sur le niveau du signal de sortie de deux récepteurs placés respectivement sous un réflecteur en plâtre et sous un réflecteur en métal. Aucune différence n'a pu être observée entre la réflexivité du cône en plâtre et celle du cône en métal. Les dimensions du cône ont été fixées en tenant compte de la longueur d'onde à la fréquence utilisée, soit 8,58 mm. Pour la réception, la surface du cône doit être assez grande pour maximiser la puissance du signal dirigé vers le récepteur. Pour la transmission, la surface plane doit être assez large pour diriger la majorité du signal à l'horizontale. L'angle du cône est de 45 degrés, sa hauteur est de 35 mm et la largeur de la surface plane à la base du cône est de 20 mm. Une étude plus poussée pourrait permettre d'optimiser les dimensions des réflecteurs.

3.3.3. Description du système de localisation ultrasonique

Mis à part les émetteurs-récepteurs ultrasoniques, le système est conçu avec des composants d'usage général. L'accent est donc mis sur la fonctionnalité des différentes parties plutôt que sur les détails de la conception électrique. Le système est divisé en trois sous-systèmes: le

contrôleur, le module RF ainsi que les émetteurs-récepteurs ultrasoniques. La figure 3.30 présente le schéma-bloc du système.

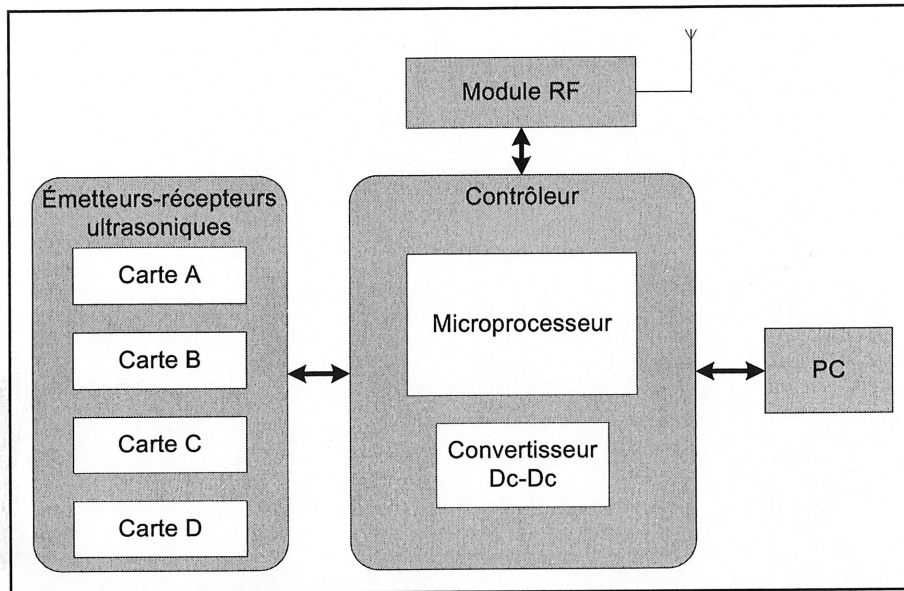


Figure 3.30 Schéma-bloc du système de localisation ultrasonique

Le contrôleur constitue le cœur du système. C'est lui qui gère la synchronisation par le lien RF, qui déclenche la transmission ultrasonique, qui chronomètre les temps de vols que l'onde ultrasonique prend pour atteindre chacun des récepteurs et qui communique ces temps de vols au PC pour que ce dernier puisse calculer la position. Le microprocesseur utilisé est un PIC16F877 avec une horloge de 20 MHz (5 MIPS). Pour bien comprendre l'interaction entre le contrôleur et les différents sous-systèmes, cette interaction est expliquée après la description de chacun de ces sous-systèmes.

Il peut y avoir jusqu'à quatre cartes d'émetteur-récepteur ultrasonique reliées au contrôleur. Chacune des cartes peut servir soit pour la transmission, soit pour la réception, ou encore pour la transmission et la réception selon l'émetteur-récepteur utilisé (émetteur, récepteur ou transcepteur) et les pièces installées sur cette carte. Si des transcepteurs sont utilisés, le système permet donc d'avoir jusqu'à quatre points de transmission différents et quatre points de réception différents. Si ce ne sont pas des transcepteurs qui sont utilisés, trois cartes sont dédiées à la réception et une à la transmission.

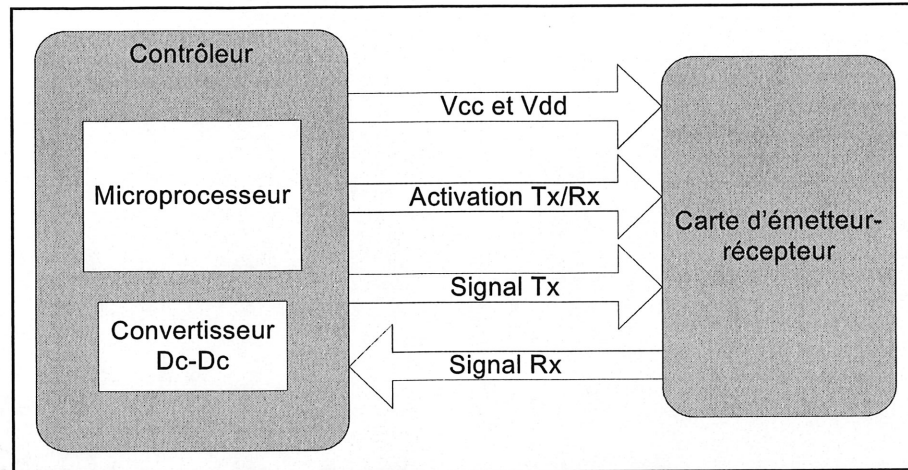


Figure 3.31 Schéma d'interaction entre le contrôleur et une carte d'émetteur-récepteur

La figure 3.31 présente l'interaction entre le contrôleur et une des cartes d'émetteur-récepteur. L'interaction entre le contrôleur et les quatre cartes d'émetteur-récepteur est identique. L'alimentation électrique est fournie par le contrôleur. Le signal Vcc est à 5 volts et le signal Vdd, généré par le convertisseur DC-DC, peut être ajusté entre 12 et 30 volts. Le convertisseur DC-DC est nécessaire pour avoir une puissance de transmission acceptable et indépendante de la tension d'alimentation fournie au contrôleur. La tension Vdd doit tenir compte de la puissance maximale permise par l'émetteur-récepteur utilisé. Un schéma simplifié de la carte d'émetteur-récepteur est présenté à la figure 3.32.

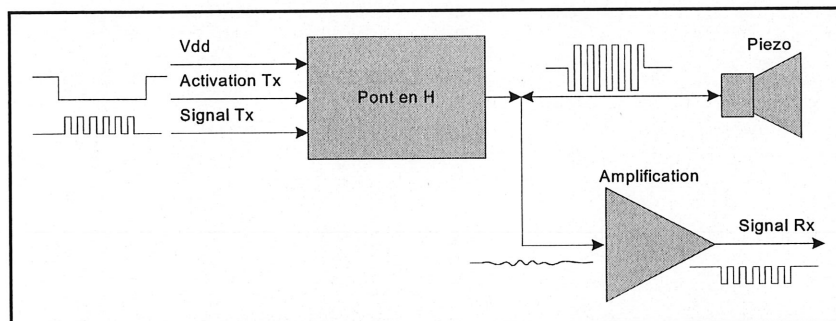


Figure 3.32 Schéma simplifié de la carte d'émetteur-récepteur

Pour transmettre une onde ultrasonique, le signal *Activation Tx* doit être à un niveau logique 0 et le signal *Signal Tx* doit être une onde carrée à la fréquence de résonance du piézoélectrique, soit 40 kHz dans le cas présent. Le pont en H présente alors aux bornes de l'émetteur-récepteur une onde carrée de 40 kHz variant de $-Vdd$ à $+Vdd$. Le système permet donc de

placer aux bornes du piézoélectrique une onde ayant une tension crête-à-crête maximale de 60 volts. Durant la transmission ultrasonique, l'étage d'amplification doit être déconnecté du piézoélectrique pour respecter la contrainte de tension maximale des amplificateurs. Cette déconnexion est effectuée à l'aide d'un transistor MOSFET (absent sur le schéma) contrôlé par le signal *Activation Tx*. Lorsque ce dernier signal est à un niveau logique 1, la sortie du pont en H est en haute impédance et le MOSFET est en conduction ce qui permet à l'étage d'amplification de traiter le signal détecté par le piézoélectrique. L'étage d'amplification est constitué d'un amplificateur avec un gain de 400, suivi d'un comparateur configuré pour détecter un signal supérieur à 250 mV. Le signal *Signal Rx* est donc un signal numérique, et non analogique, indiquant la présence ou non de signal à la sortie du piézoélectrique. Dès que ce dernier signal change d'état, le contrôleur considère qu'une onde ultrasonique a été détectée. Cette façon de détecter les temps d'arrivées a été choisie parce qu'elle est la plus simple et la moins coûteuse. Des convertisseurs analogues numériques auraient également pu être utilisés pour faire une acquisition du signal de chacun des émetteurs-récepteurs sur une période de temps reliée à la durée de vie du signal ultrasonique. Les temps d'arrivées auraient alors pu être déterminés par une corrélation de ces signaux dans le temps. Cette méthode aurait probablement permise une plus grande robustesse au bruit et une moins grande dépendance à la puissance du signal ultrasonique. Toutefois, contrairement à la présente approche, la conception aurait été fortement dépendante de la fréquence d'utilisation et les ressources nécessaires pour la mettre en œuvre (A/D, mémoire, etc) auraient été extrêmement plus coûteuses.

Le module RF, utilisé comme lien de communication et comme méthode de synchronisation entre agents mobiles, est conçu à partir d'un BIM2 (décrit à la section 3.2.1). Le BIM2 utilisé a une fréquence porteuse de 433,92 MHz et utilise la modulation FM pour transmettre et recevoir les données. Pour libérer le plus possible le microprocesseur du contrôleur principal, un microprocesseur PIC16F877 est dédié au lien RF et sert à encoder les données en transmission, à décoder les données en réception ainsi qu'à faire l'interface avec le BIM2.

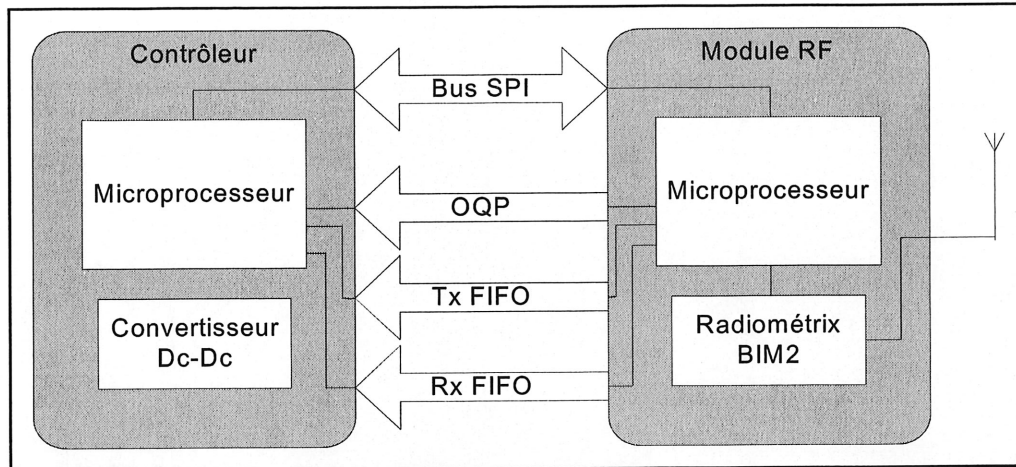


Figure 3.33 Schéma de l'interaction entre le contrôleur et le module RF

La figure 3.33 montre l'interaction entre le contrôleur et le module RF. La communication entre le contrôleur et le module RF se fait par un bus SPI. De plus, trois signaux d'état permettent de vérifier l'état dans lequel se trouve le module RF: le signal *OQP* indique si un échange d'information peut être effectué par le port SPI, le signal *Tx FIFO* indique la présence de données dans le FIFO de transmission, et le signal *Rx FIFO* indique la présence de données dans le FIFO de réception. Comme il est expliqué un peu plus loin dans le texte, ces deux derniers signaux sont importants pour la précision de la synchronisation des différents agents.

Une fois les temps de vol déterminés, le contrôleur les transfère à l'ordinateur par un lien série RS-232. Les calculs ne sont pas effectués sur le microprocesseur pour deux raisons. Premièrement, dans le contexte d'un prototype, il est intéressant de conserver les données brutes de façon à pouvoir effectuer plusieurs traitements sur les mêmes données expérimentales. Deuxièmement, le PIC16F877 n'a pas de multiplicateur ni de diviseur matériel. Le calcul de la position nécessite plusieurs multiplications et divisions (voir équations 3.12 et 3.18) en plus du calcul de la fonction arctangente. Ces calculs risquent donc d'être trop lourds à effectuer sur le microprocesseur utilisé. S'il devient nécessaire de faire les calculs de positionnement de façon embarquée, un autre microprocesseur devrait être utilisé. Par exemple la série PIC18Fxxxx, qui a une empreinte compatible avec le PIC16F877 et qui est deux fois plus rapide (10 MIPS), possède un multiplicateur matériel et permettrait donc de diminuer de beaucoup le temps nécessaire aux calculs.

Maintenant que tous les sous-systèmes ont été décrits, voici les différentes étapes pour effectuer une mesure de positionnement. Premièrement pour la transmission, le contrôleur transfère au module RF un message à transmettre. Ce message comprend un octet de contrôle indiquant qu'il s'agit d'un message de position ainsi qu'un nombre de 8 bits identifiant le contrôleur qui transmet le message. Le module RF attend que le canal de communication soit libre et débute ensuite la transmission. Le contrôleur utilise la ligne d'état *TX FIFO* du module RF pour savoir exactement à quel moment la transmission du message est terminée et pour débiter la transmission ultrasonique à ce moment précis en fournissant au transmetteur les signaux *Activation TX* et *Signal Tx* adéquats. Après avoir transmis un nombre déterminé de cycles du signal ultrasonique, la transmission est arrêtée.

Pour ce qui est de la réception, tous les agents mobiles en proximité de celui qui transmet reçoivent le message RF. Le module RF reçoit le message de positionnement, vérifie sa validité et le place dans le FIFO de réception si le message est valide. À ce moment précis, le signal d'état *Rx FIFO* est utilisé pour avertir le contrôleur qu'un message est présent dans le FIFO de réception. Dès que l'état de *Rx FIFO* change, la valeur d'un compteur interne du contrôleur est sauvegardée pour être utilisée plus tard comme temps de départ de l'onde ultrasonique. Le contrôleur lit le FIFO de réception par le port SPI et vérifie si le message est valide et si c'est un message de positionnement ou non. Dans le cas où c'est un message de positionnement valide, il réajuste son compteur interne en fonction du temps d'arrivée du message (et donc du temps de départ de l'onde ultrasonique) et entre dans une boucle de vérification de l'état des récepteurs. Dès que le signal *Signal Rx* d'un des récepteurs change d'état, et donc qu'un signal ultrasonique est détecté, la valeur du compteur interne est sauvegardée dans un registre associé au récepteur en question et la boucle de vérification continue pour les deux autres récepteurs. Après que les trois récepteurs aient été déclenchés, un message contenant le numéro d'identification du transmetteur, le numéro d'identification du récepteur ainsi que les trois valeurs de compteur représentant les temps de vols de chacun de récepteurs est transmis à l'ordinateur par le lien RS-232. Le numéro d'identification du récepteur est inclus dans le message pour prévoir le cas où ce même message serait retransmis par le lien RF pour informer les autres agents mobiles que tel agent a détecté tel autre agent à telle position par rapport à la sienne. Une fois les données arrivées à l'ordinateur, une

vérification est faite pour détecter des données erronées: si la différence des distances obtenues par deux des récepteurs est supérieure à la distance réelle¹⁴ séparant ces récepteurs, les données sont invalides. Aucune position n'est alors déduite de ces données. La cause d'une telle erreur peut être due à plusieurs choses: la détection prématurée du signal ultrasonique à cause d'un bruit ultrasonique ou d'une vibration mécanique¹⁵; la détection retardée de l'onde causée par un obstacle qui obstrue la ligne de vue; ou encore un bruit induit sur la tension d'alimentation de l'étage d'amplification. Le temps nécessaire pour faire le calcul de positionnement a été mesuré sur trois ordinateurs différents: 138 μ s sur un Pentium II 233 MHz, 22 μ s sur un *Athlon* 1 GHz et 11 μ s sur un *Athlon* 2100 (1,8 GHz). Le code utilisé laisse toutefois place à l'optimisation.

Le compteur interne du microprocesseur est un compteur 16 bits avec une résolution de 400 ns, qui peut donc couvrir une période de temps allant jusqu'à 26,2 ms. Pour une vitesse du son de 343 m/s, ces temps correspondent à une résolution théorique de 0,1372 mm (400 ns fois 343 m/s) et une distance maximale de 9 m. En pratique, la résolution du compteur est autour de 1,372 mm puisque le temps de traitement de la boucle de vérification des récepteurs est environ 10 fois supérieur à la résolution du compteur. Si le compteur déborde avant qu'un des récepteurs n'ait été déclenché, le positionnement est invalide et les données ne sont pas transmises à l'ordinateur.

Enfin, avant de pouvoir effectuer une autre mesure de positionnement, il faut laisser le temps à l'onde ultrasonique de s'atténuer pour éviter qu'une réflexion du signal ultrasonique de la mesure précédente ne soit détectée à la place de la nouvelle onde ultrasonique transmise. L'intervalle de temps entre deux mesures dépend donc de la portée désirée, qui elle affecte la puissance de transmission du signal. La règle utilisée pour déterminer le taux de rafraîchissement maximal des données est la suivante: en supposant que la puissance du signal est ajustée à la puissance minimale nécessaire pour couvrir le rayon d'opération désiré, le temps entre deux émissions ultrasoniques devrait être égal ou supérieur au quadruple du temps nécessaire à l'onde pour parcourir ce rayon. Par exemple, si le rayon d'opération prévu est de 9 mètres, ce qui correspond à 26,2 ms, le temps entre deux transmissions ultrasoniques devrait

¹⁴ La distance réelle entre deux récepteurs doit tenir compte de la distance entre les cônes et les capteurs.

¹⁵ Les capteurs piezoélectriques sont sensibles à des chocs mécaniques brusques.

être égal ou supérieur à 104,8 ms. L'expérimentation a permis d'observer que le facteur quatre était suffisant pour éviter la détection de l'onde précédente, mais probablement que ce facteur n'est pas optimal et qu'il pourrait être diminué de façon à augmenter le taux de rafraîchissement. Idéalement cette règle devrait être fixée en tenant compte de l'atténuation du signal ultrasonique et de la puissance d'émission (voir annexe B), mais il est difficile de déterminer la puissance minimale détectable par le circuit de détection.

3.3.4. Caractérisation du système

Pour évaluer les performances du système, des mesures de localisation doivent être faites sur toute la surface d'opération prévue. La caractérisation est effectuée avec un contrôleur sur lequel est connecté seulement un transmetteur (numéro d'émetteur-récepteur 255-400PT16) et un autre contrôleur sur lequel sont connectés trois récepteurs (numéro d'émetteur-récepteur 255-400PT16). La tension Vdd pour le transmetteur est fixée à 30 volts pour avoir la puissance de transmission maximale¹⁶. Pour être certain que la position relative des récepteurs ne change pas durant les tests, les trois cartes de réception et le contrôleur relié à ces cartes sont fixés sur une plaque. Les cartes de réception sont installées à 5 cm au-dessus de la plaque de façon à ce que le contrôleur, qui a une hauteur d'un peu plus de 5 cm, n'obstrue pas la ligne de vue entre les récepteurs et le transmetteur. Pour la même raison, les antennes des modules RF sont placées à l'horizontale. La figure 3.34 montre la position des trois récepteurs et du transmetteur du système, le transmetteur étant placé légèrement au-dessus des récepteurs de façon à ce que ces derniers n'obstruent pas le signal ultrasonique transmis.

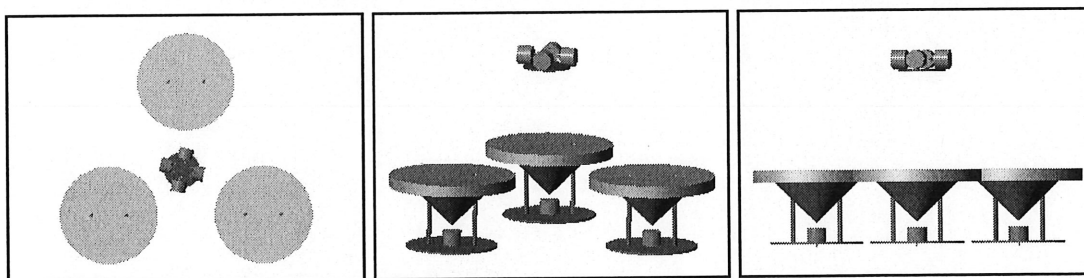


Figure 3.34 Représentation des trois récepteurs et du transmetteur

Le cône de réflexion en transmission a été abandonné puisque des tests préliminaires ont démontré que la puissance du signal n'était pas assez grande pour couvrir la surface désirée

¹⁶ La tension maximale est limitée par le pont en H et le convertisseur DC-DC.

lorsque des réflecteurs étaient utilisés à la transmission et à la réception: au-delà de deux mètres, les données deviennent de moins en moins stables et la précision de moins en moins grande. Comme la combinaison circuit-transmetteur¹⁷ ne permet pas d'augmenter la puissance de transmission, il faut utiliser plusieurs émetteurs-récepteurs pour couvrir les 360 degrés¹⁸ comme mentionné précédemment. Deux autres solutions auraient été possibles pour régler le problème de puissance. La première est l'augmentation de la puissance, soit en utilisant des émetteurs plus puissants (impédance plus faible) ou en augmentant la tension de transmission si les spécifications de l'émetteur-récepteur et du convertisseur DC-DC le permettent. Cette solution n'a pas été retenue puisque le choix des émetteurs-récepteurs est assez restreint et le convertisseur DC-DC fourni actuellement la tension maximale qu'il peut fournir. La seconde solution est l'augmentation du gain de l'étage d'amplification. Cette solution a été rejetée principalement parce que les émetteurs-récepteurs piézoélectriques sont sensibles aux vibrations mécaniques: un coup brusque sur la plaque de réception génère aux bornes des émetteurs-récepteurs des signaux ayant une amplitude assez grande pour dépasser le seuil du comparateur et donc indiquer au contrôleur qu'un signal ultrasonique a été détecté. Cette particularité ne cause pas de problème pour le moment, mais augmenter le gain augmenterait également les risques de problèmes liés à des vibrations mécaniques.

Comme mentionné précédemment, le choix de la distance entre les récepteurs et l'origine est un compromis entre l'encombrement du système (limite supérieure) et la précision désirée (limite inférieure) (voir tableau 3.4 et 3.5). Le placement symétrique est préférable à un placement asymétrique de façon à maximiser la distance entre chaque récepteur. Le centre de la plaque est utilisé comme origine et cette origine joue le rôle de centre de l'agent: la position obtenue par le système sera relative à ce point. Les trois récepteurs utilisent des cônes de réflexion alors que le transmetteur est placé à l'horizontale pointant vers la plaque de réception. Les récepteurs sont placés à 100 mm de l'origine et à des angles respectifs de 30°, 150° et 270°. Cette configuration représente la limite inférieure envisageable. En effet, la simulation a démontré qu'en deçà de 100 mm, la précision sur l'angle diminue énormément. De plus, rapprocher les récepteurs augmente l'obstruction que fait chacun des récepteurs sur

¹⁷ C'est-à-dire qu'avec ce circuit, il n'est pas possible de donner plus de puissance à ce transmetteur. Toutefois, le changement du transmetteur ou du circuit pourrait permettre d'augmenter la puissance de transmission.

¹⁸ L'utilisation de plusieurs transmetteurs nécessite toutefois d'utiliser soit une carte dédiée à la transmission et trois cartes dédiées à la réception, ou encore plusieurs capteurs à la place d'un réflecteur en réception.

les autres. La figure 3.35 montre une représentation de la plaque utilisée avec la position des récepteurs *A*, *B* et *C* ainsi que celle du contrôleur. Le point *O* est l'origine et l'axe *x* correspond à un angle de 0 degré.

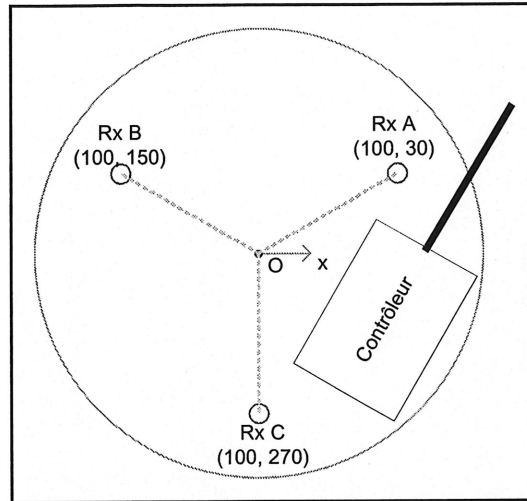


Figure 3.35 Emplacement des composants sur la plaque de réception

Des tests préliminaires ont montré que malgré le fait que le contrôleur soit plus bas que les récepteurs, il affecte l'onde ultrasonique. Par exemple, lorsque le transmetteur se trouve à la coordonnée polaire (5000 mm, 270°), l'amplitude du signal reçu par le récepteur *A* est plus grande lorsque le contrôleur n'est pas sur la plaque. La figure 3.36 présente les signaux à la sortie de l'étage d'amplification pour les récepteurs *A* et *C* sans le contrôleur sur la plaque (a) et avec le contrôleur sur la plaque (b). Ce phénomène s'accroît avec la distance séparant le transmetteur de la plaque de réception, et donc avec l'atténuation du signal ultrasonique. Les tests effectués à faible niveau de signal ont permis d'observer d'autres phénomènes où la propagation des ultrasons ne se fait pas tout à fait comme prévu. La principale conséquence de ces phénomènes est l'augmentation de l'erreur relative sur les mesures de temps de vol et donc la diminution de la précision sur la distance et sur l'angle. Il est donc important que la puissance d'émission du signal ultrasonique soit adaptée au rayon d'opération désiré de façon à ce que la puissance du signal soit assez grande sur toute la surface couverte par le dispositif.

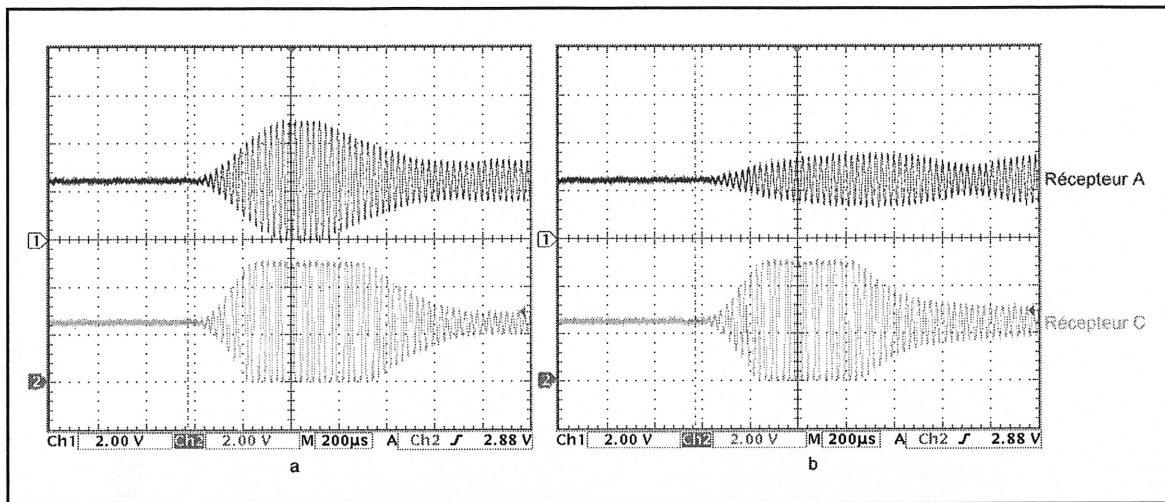


Figure 3.36 Effet du contrôleur sur l'amplitude du signal

Avant de débiter le test, une calibration des récepteurs doit être faite. Elle consiste à soustraire une constante aux temps de vol obtenus par chacun des récepteurs. Cette correction est nécessaire pour corriger trois facteurs. Premièrement, il y a des délais de traitements, par exemple le délai entre le temps où le message de synchronisation RF est reçu et celui où le signal *Rx FIFO* change d'état pour indiquer le départ de l'onde ultrasonique. Ensuite, il y a la distance que l'onde ultrasonique parcourt entre le réflecteur et le récepteur. Cette distance, qui dépend de la forme du réflecteur et de la hauteur de ce dernier au-dessus du récepteur, est difficilement mesurable. Troisièmement, les piézoélectriques commencent à vibrer progressivement lorsqu'ils sont excités par des ondes électriques ou ultrasoniques. Par conséquent, un délai de quelques cycles est présent entre l'excitation et la réponse de l'émetteur-récepteur autant à la transmission qu'à la réception. Même s'ils peuvent varier quelque peu selon différentes conditions, ces trois facteurs sont considérés constants et sont corrigés avec une seule constante de calibration.

Puisque la distance et l'angle entre le transmetteur et l'origine sont déterminés par des équations différentes, la constante de calibration est déterminée en deux étapes. La première minimise l'erreur sur l'angle et la seconde minimise l'erreur sur la distance. La relation entre le temps de vol réel de l'onde ultrasonique et le temps de vol mesuré est représentée par l'équation (3.38).

$$d_{ij} = t_{ij} v = (\tilde{t}_{ij} - k_i) v \quad (3.38)$$

où d_{ij} est la distance séparant le transmetteur j du récepteur i ,
 t_{ij} est le temps de vol réel entre le transmetteur j et le récepteur i ,
 \tilde{t}_{ij} est le temps de vol mesuré par le récepteur i ,
 k_i représente les délais de temps introduits par le système sur le récepteur i .

La constante k_i de chacun des récepteurs est divisée en deux parties comme le montre l'équation (3.39).

$$k_i = ka_i + kd \quad (3.39)$$

où ka_i est reliée à l'erreur sur l'angle et est différente pour chacun des récepteurs,
 kd est reliée à l'erreur sur la distance et est commune à tous les récepteurs.

Lorsque la position du transmetteur est connue, le temps de vol réel entre le transmetteur et le récepteur i peut être calculé à partir des équations représentant la distance entre chacun des points de réception et le point de transmission (équations (3.1), (3.2) et (3.3) respectivement pour le récepteur A , B et C). La forme générale de ces équations est présentée à l'équation (3.40).

$$d_{ij}^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 \quad (3.40)$$

où d_{ij} est la distance séparant le transmetteur j du récepteur i ,
 x_j et y_j sont respectivement l'abscisse et l'ordonnée du transmetteur j ,
 x_i et y_i sont respectivement l'abscisse et l'ordonnée du récepteur i .

En substituant l'équation 3.38 dans l'équation 3.40 et en posant $kd = 0$, la valeur de calibration ka_i peut être isolée comme le montre l'équation 3.42.

$$((\tilde{t}_{ij} - ka_i) v)^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 \quad (3.41)$$

$$ka_i = \tilde{t}_{ij} - \frac{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}{v} \quad (3.42)$$

L'équation (3.40) est l'équation de base pour obtenir le système d'équations (3.9) qui permet d'obtenir le point (x_D, y_D) à partir des distances séparant chacun des récepteurs du

transmetteur. Ce système d'équations est utilisé pour déterminer l'angle d'arrivée de l'onde ultrasonique, mais la distance entre le transmetteur et l'origine est déterminée à partir de la moyenne des temps de vol obtenues par les trois récepteurs. Puisque les simulations ont montré que l'erreur sur l'angle était principalement affectée par l'erreur relative, l'ajout de la constante kd aux constantes ka_i n'affectera pas l'erreur sur l'angle. L'équation (3.43) montre comment les constantes ka_i et kd sont introduites dans l'équation pour obtenir la distance entre l'origine et le transmetteur, et l'équation (3.45) montre comment kd peut être isolée.

$$d = \frac{((\tilde{t}_{AD} - ka_A - kd) + (\tilde{t}_{BD} - ka_B - kd) + (\tilde{t}_{CD} - ka_C - kd))v}{3} \quad (3.43)$$

$$\frac{3d}{v} = (\tilde{t}_{AD} - ka_A) + (\tilde{t}_{BD} - ka_B) + (\tilde{t}_{CD} - ka_C) - 3kd \quad (3.44)$$

$$kd = \frac{(\tilde{t}_{AD} - ka_A) + (\tilde{t}_{BD} - ka_B) + (\tilde{t}_{CD} - ka_C) - \frac{3d}{v}}{3} \quad (3.45)$$

Il est donc possible d'obtenir la valeur de calibration $k_i = ka_i + kd$ pour chacun des trois récepteurs en mesurant leur temps de vol respectif à partir d'un point d'émission connu. Toutefois, pour que cette calibration représente bien le système sur toute sa surface d'opération, plusieurs mesures doivent être prises à partir de plusieurs points d'émissions répartis sur toute cette surface d'opération. La première étape consiste à calculer les ka_i en fixant $kd = 0$ et en utilisant l'équation 3.42. Les différents ka_i obtenus pour un récepteur sont ensuite combinés par la méthode des moindres carrés (avec le logiciel *Matlab*) afin d'obtenir la valeur à utiliser pour chacun des récepteurs. Une fois les ka_i déterminés, l'équation 3.45 est utilisée pour déterminer les kd pour chacun des points de mesure et la méthode des moindres carrés permet de déterminer le kd à utiliser pour la calibration du système.

Les résultats de caractérisation qui suivent utilisent des valeurs de calibration déterminées à partir de l'ensemble des données de caractérisation. Ces valeurs permettent de minimiser l'erreur autant sur la distance que sur l'angle, mais en pratique il n'est pas nécessaire d'utiliser autant de points pour déterminer les constantes de calibration.

Pour la caractérisation, les mesures de positionnement sont effectuées à des intervalles de distance et d'angle choisis de façon à ne pas rendre le test trop fastidieux. L'intervalle de distance est fixé à 200 mm, celui d'angle à 10° et le test est effectué dans un rayon allant de 500 mm à 8100 mm (1443 points de mesure au total). Le rayon maximum d'opération a été choisi en fonction de la valeur de débordement du compteur, qui correspond actuellement à une distance de 9 mètres, et de l'espace disponible pour faire les tests. De plus, de façon à limiter l'espace nécessaire au test, c'est la plaque de réception qui est déplacée et non le transmetteur. À chaque distance de test, le récepteur est tourné sur lui-même de 10° jusqu'à ce qu'il ait effectué un tour complet. Pour chaque distance de test, cette façon de faire est équivalente à déplacer la plaque de réception sur un cercle autour du transmetteur. La figure 3.37 montre la méthodologie de caractérisation et la figure 3.38 montre une photo du montage de caractérisation.

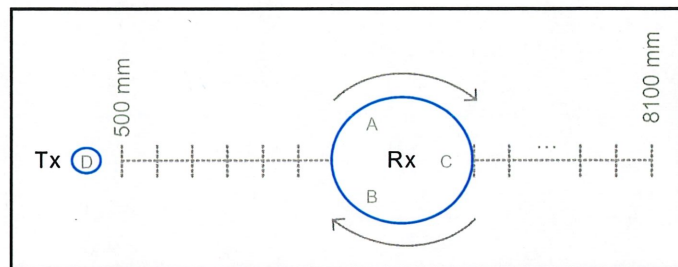


Figure 3.37 Méthodologie de caractérisation



Figure 3.38 Photo du montage de caractérisation

Pour faciliter la manœuvrabilité de la plaque de réception, le contrôleur de réception envoie les données au contrôleur de transmission par le lien RF. Ce dernier achemine ensuite ces données à l'ordinateur par le lien RS-232. À chaque point de mesure, vingt lectures sont effectuées à un rythme de dix lectures par seconde. La moyenne et l'écart-type des trois distances sont calculés pour chacun des points de mesure. Puisque le déplacement du récepteur est effectué de façon manuelle, l'expérimentateur introduit une erreur qui est évaluée inférieure à $\pm 7,5$ mm pour la distance et ± 2 degrés pour l'angle.

Pour ce test, 28 860 mesures ont été prises à 1443 positions différentes. De toutes ces mesures, 41 ont été rejetées parce qu'une des trois distances obtenues n'était pas cohérente avec les deux autres. La différence maximale permise entre deux distances était fixée à la distance entre deux récepteurs, soit 141,4 mm, plus 40 mm. Le 40 mm est ajouté pour tenir compte de la distance parcourue par l'onde entre les émetteurs-récepteurs et les cônes ainsi que pour assouplir un peu la règle de cohérence des distances.

La figure 3.39 montre une vue du dessus de l'erreur sur la distance d en fonction de la position. La moyenne de l'erreur absolue sur toute la surface de test est de 3,75 mm et l'écart-type est de 5,07 mm. La figure 3.39 donne une idée générale du comportement du système, mais il est difficile d'y analyser l'information. La figure 3.40 présente un regroupement des données par distance: c'est-à-dire que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type de l'erreur sont calculés sur 360° pour chaque distance. L'erreur se situe entre -17 mm et 28 mm et l'écart-type indique que les résultats sont assez stables, mais que cette stabilité diminue légèrement avec la distance. L'écart entre l'erreur minimale et maximale augmente également avec la distance. Ces deux dernières observations peuvent être reliées à la diminution de la puissance du signal ultrasonique avec la distance qui peut retarder légèrement la détection du temps d'arrivée de l'onde, et qui rend cette dernière plus sensible à des obstacles rencontrés par l'onde. Les irrégularités de la courbe de moyenne peuvent être attribuées à des erreurs d'expérimentation.

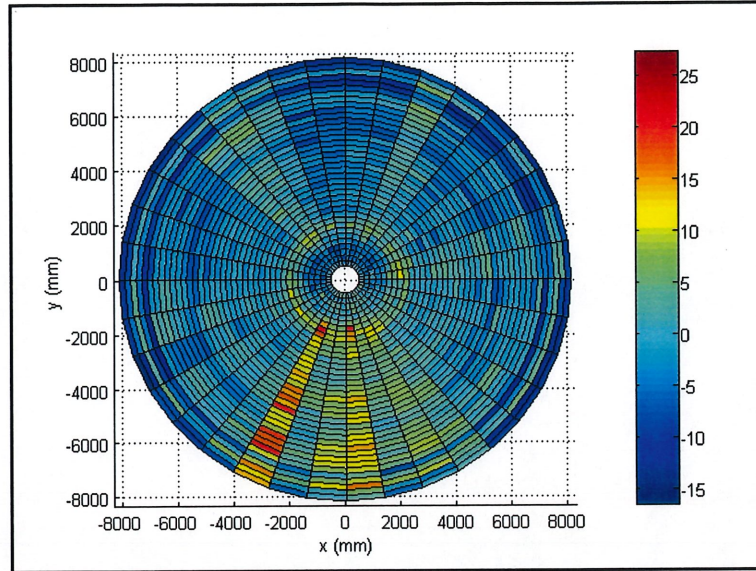


Figure 3.39 Erreur sur d en fonction de la position (x, y)

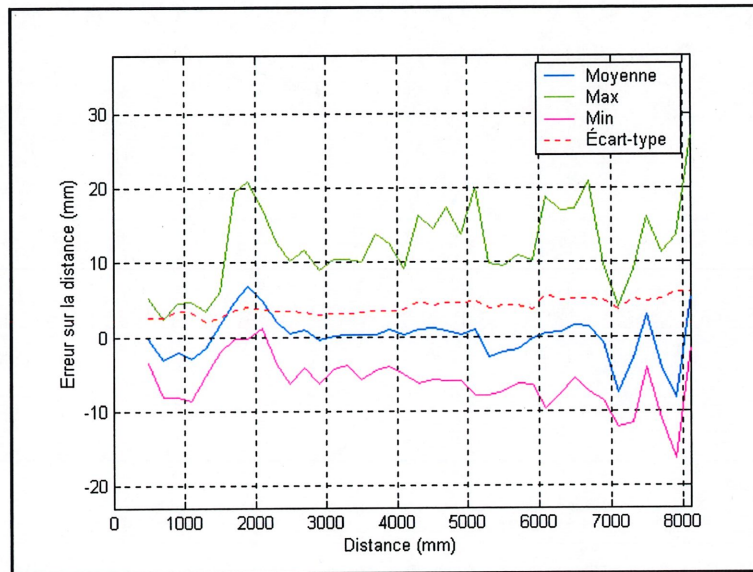


Figure 3.40 Erreur sur d en fonction de la distance

La figure 3.41 montre l'erreur sur la distance d en fonction de l'angle: c'est-à-dire que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type de l'erreur sont calculés avec les données de toutes les distances pour chaque angle. L'écart-type et la différence entre l'erreur maximale et minimale montrent que les données sont assez stables. Il est cependant difficile de faire ressortir une correspondance entre l'angle et l'erreur sur la distance. En théorie, puisque le système est symétrique, l'erreur sur la distance devrait être indépendante de l'angle. En

pratique le système peut ne pas être symétrique puisque l'emplacement du contrôleur peut gêner la propagation de l'onde ultrasonique. Les cônes de réflexions des récepteurs peuvent également gêner la ligne de vue pour les autres récepteurs et ces derniers ne sont probablement pas tous identiques. L'erreur plus grande sur d entre 230 et 300 degrés est probablement causée par cette dissymétrie.

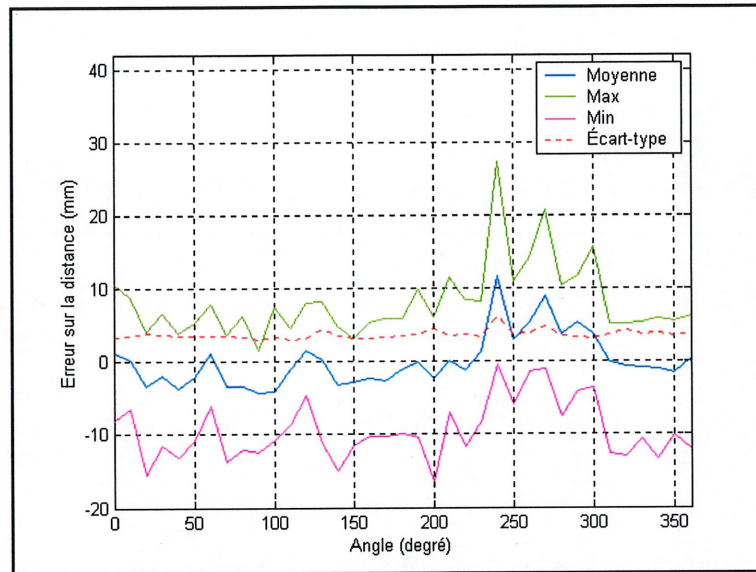


Figure 3.41 Erreur sur d en fonction de l'angle

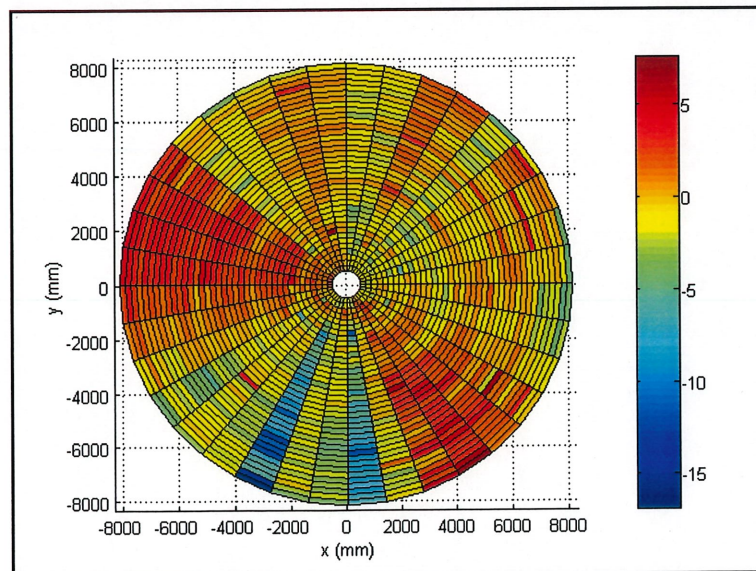


Figure 3.42 Erreur sur θ en fonction de la position (x, y)

La figure 3.42 montre l'erreur sur l'angle θ en fonction de la position. La moyenne de l'erreur absolue sur toute la surface de test est de 1,84 degrés et l'écart-type est de 2,53 degré. La figure 3.42 donne une idée générale du comportement du système, mais il est difficile d'y analyser les données. La figure 3.43 montre l'erreur sur l'angle en fonction de la distance: c'est-à-dire que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type de l'erreur sont calculés sur les données de tous les angles à chaque distance. L'erreur varie entre -17 et 8 degrés. L'écart-type et la différence entre le maximum et le minimum montrent que la stabilité des

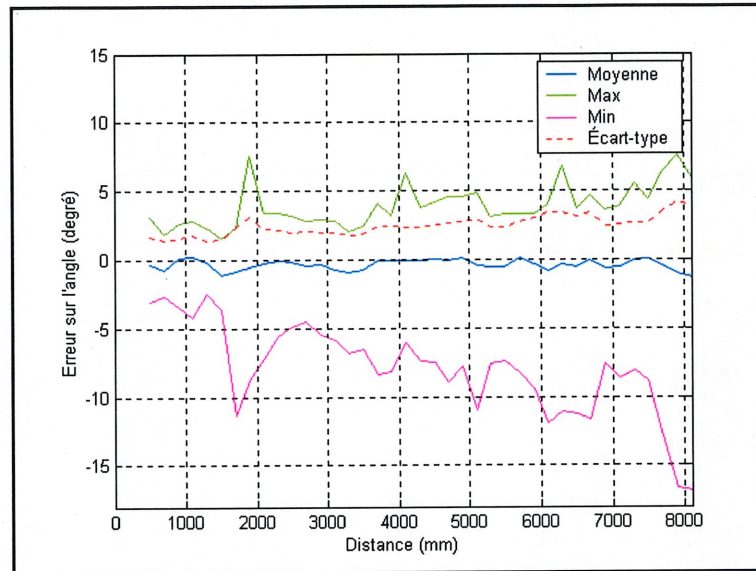


Figure 3.43 Erreur sur θ en fonction de la distance

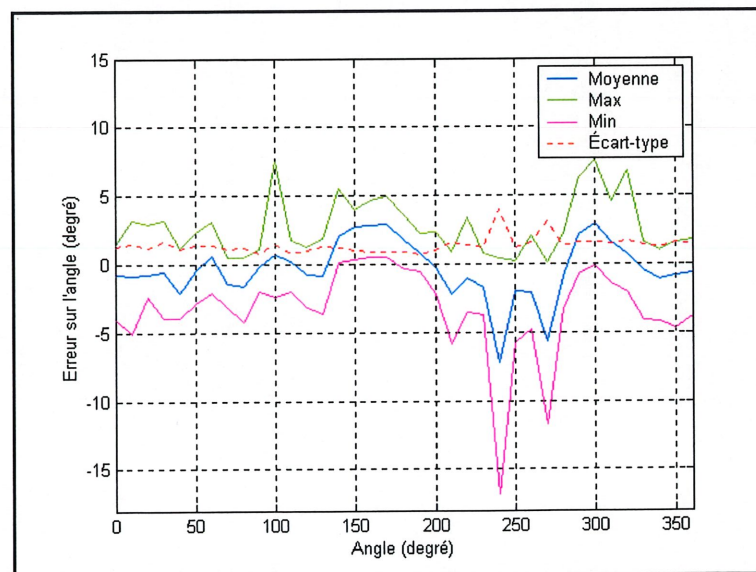


Figure 3.44 Erreur sur θ en fonction de l'angle

données diminue légèrement avec la distance. Ce phénomène est encore une fois relié à l'atténuation de la puissance du signal avec la distance.

La figure 3.44 montre l'erreur sur θ en fonction de l'angle: c'est-à-dire que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type de l'erreur sont calculés sur les données de toutes les distances à chaque angle. Contrairement aux résultats de simulation de la section 3.3.1 qui indiquent que l'erreur sur l'angle est uniformément répartie, cette erreur n'est pas répartie uniformément sur la surface d'opération. La dissymétrie du système ainsi que l'obstruction par les cônes de réception sont des causes possibles de la relation entre l'erreur sur θ et l'angle.

L'expérimentation a été répétée dans les mêmes conditions, mais avec une distance r de 150 mm entre les récepteurs et l'origine: c'est-à-dire que la position respective des trois récepteurs était de (150 mm, 30°), (150 mm, 150°) et (150 mm, 270°). Les tableaux 3.6 et 3.7 présentent la comparaison des résultats des deux expérimentations.

TABLEAU 3.6 ERREUR EXPÉRIMENTALE SUR LA DISTANCE d POUR DIFFÉRENTES POSITIONS DE RÉCEPTEURS

r (mm)	Erreur sur d (mm)			
	Moyenne	Moyenne absolue	Maximum absolue	Écart-type
100	-0,01	3,75	27,18	5,03
150	0,04	3,5	25,15	4,61

L'erreur sur la distance d est semblable pour les deux expérimentations. Contrairement aux résultats de simulations effectuées (voir tableau 3.4), l'erreur sur d est légèrement plus faible lorsque les récepteurs sont à 150 mm de l'origine que lorsqu'ils sont à 100 mm. Cette faible différence est attribuée à la réduction de l'obstruction par les réflecteurs des autres récepteurs. En effet, lorsque la distance entre les récepteurs est plus grande, les réflecteurs de ces derniers représentent de moins grands obstacles à la propagation de l'onde ultrasonique puisque l'angle qu'ils occupent par rapport aux autres récepteurs est moins grand.

TABLEAU 3.7 ERREUR EXPÉRIMENTALE SUR L'ANGLE θ POUR DIFFÉRENTES POSITIONS DE RÉCEPTEURS

<i>r (mm)</i>	<i>Erreur sur θ (degré)</i>			
	<i>Moyenne</i>	<i>Moyenne absolue</i>	<i>Maximum absolue</i>	<i>Écart-type</i>
100	-0,42	1,84	16,93	2,53
150	-0,43	1,22	10,48	1,68

L'erreur sur θ est comparable aux résultats de simulations (voir tableau 3.5) et montre que la précision sur θ est plus grande lorsque les récepteurs sont plus loin les uns des autres. Il est donc avantageux de positionner les récepteurs le plus loin possible les uns des autres en fonction des dimensions du robot.

3.3.5. Expérimentation sur des robots

Un des objectifs principaux du projet étant de permettre à des agents mobiles de se déplacer en formation meneur-suiveur, le système doit donc être testé dans ces conditions. Il est facile de valider qualitativement le fonctionnement du système sur des agents mobiles en formation: si les robots se suivent à peu près à la bonne distance et au bon angle en utilisant le dispositif ultrasonique de localisation, le dispositif fonctionne. Il est toutefois plus difficile d'obtenir des mesures quantitatives de la performance du système dans une situation d'opération réelle puisque pour ce faire, la position obtenue par le système doit être comparée à la position réelle du transmetteur par rapport au récepteur. Or, il est difficile d'obtenir ces dernières informations de façon précise et c'est justement pour cette raison que le système à l'étude a été conçu. Il faut donc trouver un autre moyen d'obtenir la position relative d'un agent mobile par rapport à un autre.

Le laboratoire possède un dispositif laser SICK LMS-200 communément appelé scanneur 2D. Ce dispositif permet d'obtenir la distance des objets sur 180 degrés. Il a une résolution angulaire de 0,5 degré et une résolution de distance de $10 \text{ mm} \pm 35 \text{ mm}$. Installé sur le robot suiveur, ce laser permet de valider les résultats obtenus par le système à l'étude. Toutefois, le taux de rafraîchissement des données du laser est inférieur à celui du système ultrasonique en raison du grand nombre de données à transférer et du pilote logiciel utilisé. Ceci entraîne des erreurs lors de la comparaison des mesures obtenues des deux dispositifs.

Les robots utilisés pour l'expérimentation sont deux *Pioneers 2-DX* de la compagnie *ActiveMedia*. Ces robots sont contrôlés à l'aide du logiciel *RobotFlow* qui comprend les modules de base pour le contrôle des déplacements et la lecture des données du laser. Un module a été ajouté pour la lecture des données du système de localisation. Le laser est donc installé sur le robot suiveur et est orienté vers l'avant. La plaque de réception, sur laquelle les récepteurs et un contrôleur sont fixés, est installée sur le laser. Les récepteurs sont positionnés respectivement à $(100 \text{ mm}, 30^\circ)$, $(100 \text{ mm}, 150^\circ)$ et $(100 \text{ mm}, 270^\circ)$. Éloigner davantage les récepteurs permettrait d'augmenter la précision sur l'angle. Toutefois, cette configuration a été choisie pour valider le système dans les pires conditions. Le point central de la plaque de réception, qui sert d'origine pour le positionnement, est environ à 100 mm derrière le point de mesure du laser. Les données de distance et d'angle obtenues du laser sont donc corrigées afin d'être exprimées en fonction du centre du dispositif de localisation. Pour aider à localiser le meneur dans les données retournées par le laser, un prisme à base triangulaire est installé sur le meneur. Le meneur doit être en tout temps l'objet le plus prêt du suiveur dans l'angle d'opération du laser. De cette façon, la position du meneur est trouvée en cherchant dans les données du laser le point le plus près, qui se trouve à être la pointe du prisme. Le transmetteur ultrasonique est installé sur le prisme triangulaire pour qu'il soit à peu près à la même hauteur que les récepteurs. La figure 3.45 illustre le système monté sur les robots et la figure 3.46 présente une photo du montage.

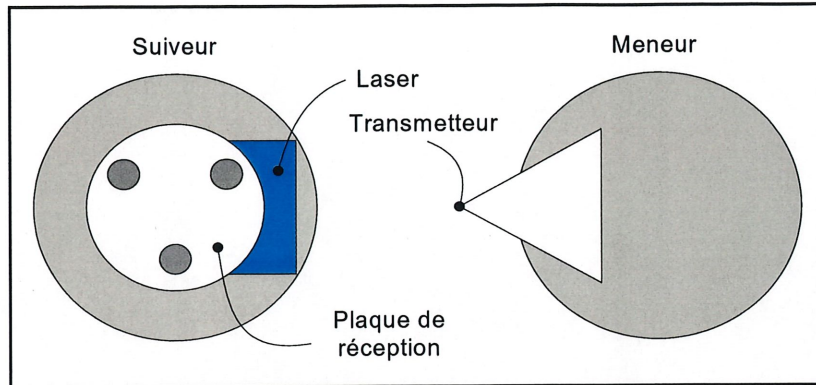


Figure 3.45 Système de test sur les robots

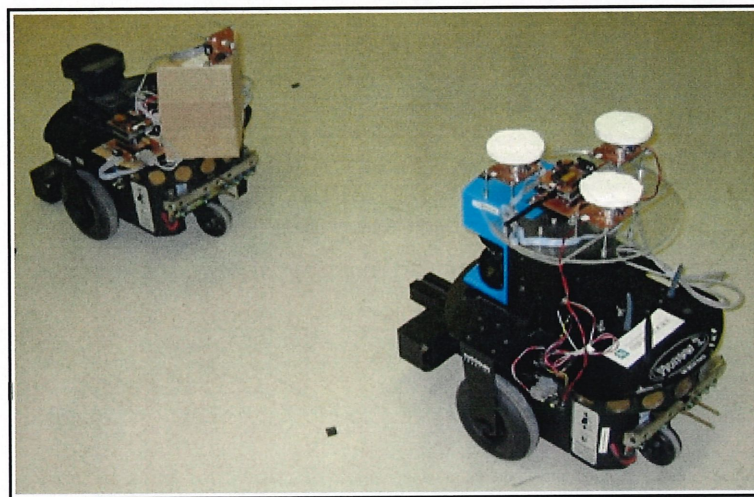


Figure 3.46 Photo du système sur les robots

Le transmetteur ultrasonique utilisé lors des tests de caractérisation (255-400PT16) a été remplacé par un transmetteur moins puissant, mais couvrant un plus grand angle (255-400ST12). Les fiches techniques de ces deux émetteurs-récepteurs se trouvent à l'annexe C. Pour couvrir 360 degrés, quatre de ces transmetteurs doivent être utilisés. Pour le présent test, puisque la configuration se limite à celle du meneur-suiveur en raison du champ d'opération du laser, un seul transmetteur est utilisé. Ce transmetteur est orienté vers l'arrière du robot. La puissance de transmission utilisée, qui est la puissance maximale suggérée pour ce transmetteur, limite le rayon d'opération à environ 4 m (voir annexe B).

Le contrôle effectué est très simple: le meneur est contrôlé à distance par une télécommande virtuelle sur ordinateur tandis que le déplacement du suiveur est asservi, à l'aide du système

ultrasonique, pour que le meneur soit toujours à une distance et un angle donnés par rapport à sa position à lui. La vitesse maximale permise pour le meneur est de 500 mm/s tandis que celle du suiveur est limitée à 300 mm/s. Il est important de mentionner que les sonars des robots sont désactivés pour éviter l'interférence avec le système de localisation ultrasonique (l'explication est donnée à l'annexe D). À chaque donnée valide reçue du système ultrasonique, les positions déterminées par les deux systèmes (ultrasonique et laser) sont inscrites dans un fichier avec la différence entre ces deux positions. Pour chacun de ces points, la totalité des données du laser est également sauvegardée de façon à pouvoir vérifier les données du laser en cas d'erreur importante entre les deux systèmes.

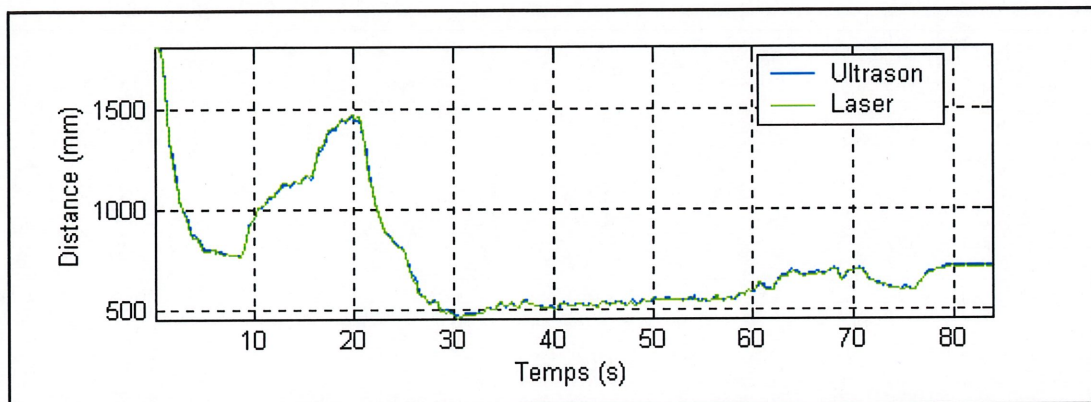


Figure 3.47 Distance d en fonction du temps (consigne de 750 mm)

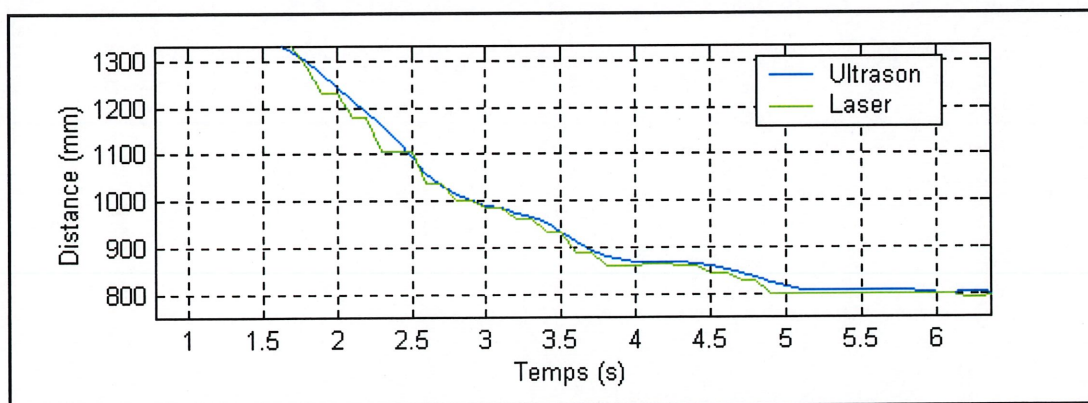


Figure 3.48 Effet du faible taux de rafraîchissement du laser

La figure 3.47 montre la distance déterminée par les deux systèmes avec une consigne de distance de 750 mm et une consigne d'angle de 0 degré pour le suiveur. La grande variation de distance par rapport à la consigne est reliée à l'asservissement du suiveur. Lorsque la

distance est supérieure à 750 mm, c'est parce que le meneur s'éloigne du suiveur alors que lorsque la distance est inférieure à 750 mm, le meneur s'approche du suiveur.

En regardant de plus près les données, l'effet du faible taux de rafraîchissement du laser est bien visible. La figure 3.48 montre l'agrandissement sur l'intervalle de 1 à 6 secondes de la figure 3.47. La courbe du système ultrasonique est lisse alors que celle du laser a des sections en escalier. Le pilote logiciel pour le laser retourne les données les plus récentes. Lorsqu'il n'a pas reçu de nouvelles données, plusieurs lectures successives peuvent retourner le même résultat. L'erreur introduite par ce phénomène est plus importante lorsque la pente de la courbe de distance est grande, c'est-à-dire lorsque la différence de vitesse entre les deux robots est grande. La figure 3.49 présente l'erreur entre les deux courbes. Cette erreur inclut l'erreur implicite au système de test. La moyenne de l'erreur absolue sur la distance est de 6,68 mm, l'écart-type est de 8,72 mm et le maximum de l'erreur absolue est de 55,45 mm.

La figure 3.50 présente l'angle θ retourné par les deux systèmes en fonction du temps. Il est possible de noter que les données d'angle sont moins stables que celles de distance. La figure 3.51 montre l'erreur sur l'angle θ . La moyenne de l'erreur absolue sur l'angle est de $-2,19^\circ$, l'écart-type est de $1,53^\circ$ et l'erreur maximale absolue est de $11,72^\circ$. Les extremums ponctuels sur le graphique d'erreur sur l'angle sont causés par des erreurs relatives ponctuelles. L'effet de ces erreurs ponctuelles n'apparaît pas sur le graphique d'erreur sur la distance puisqu'il est du même ordre ou inférieur au niveau d'erreur. Ces erreurs sur l'angle peuvent être corrigées en effectuant une moyenne sur plusieurs données ou en déterminant une variation instantanée maximale permise sur l'angle. L'erreur moyenne de $-2,19^\circ$ est du même ordre que celle obtenue lors du test de caractérisation (voir la figure 3.44).

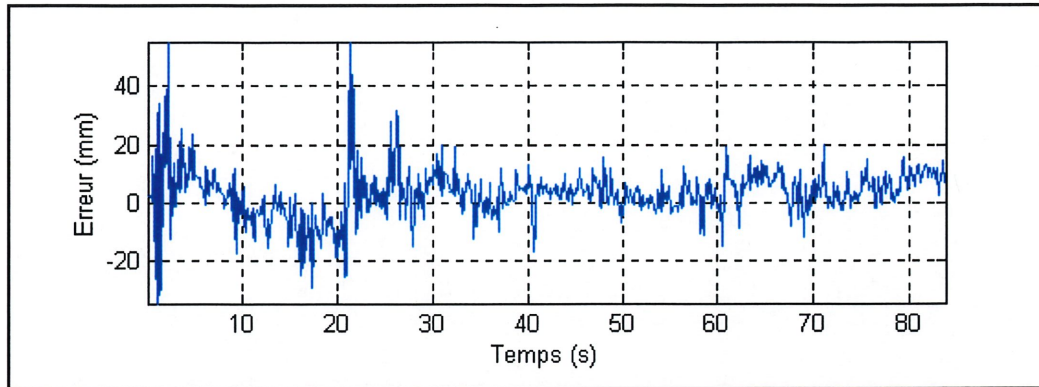


Figure 3.49 Erreur sur la distance d (consigne de 750 mm)

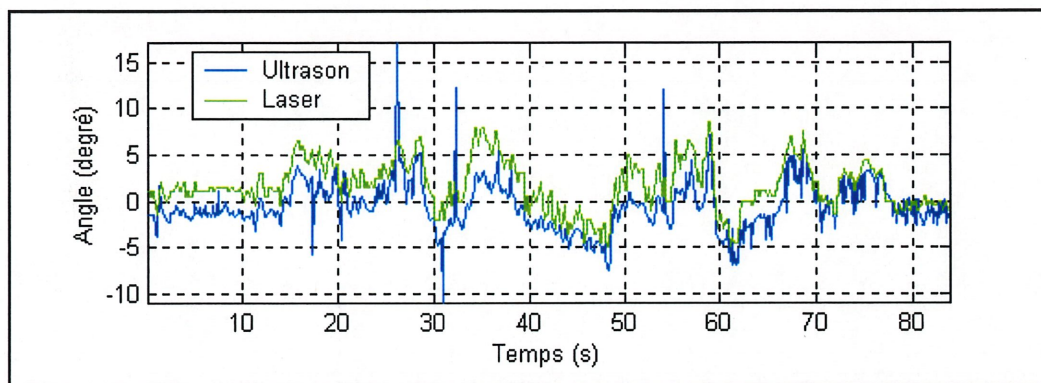


Figure 3.50 Angle θ en fonction du temps (consigne de 0 degré)

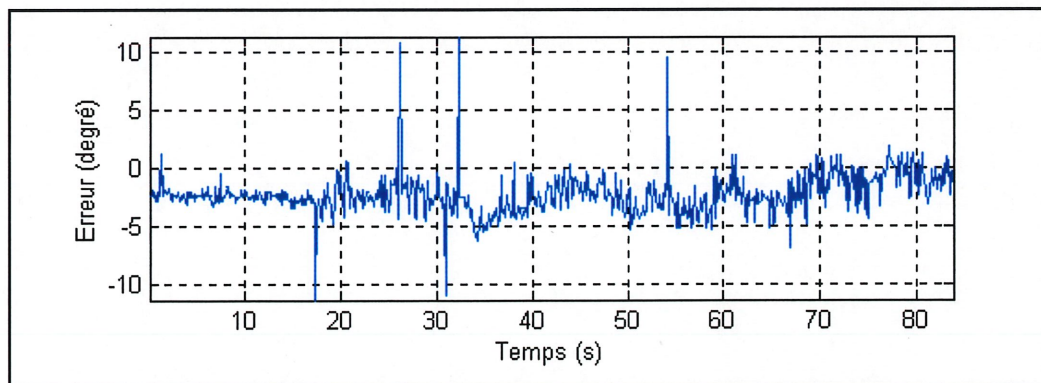


Figure 3.51 Erreur sur l'angle θ (consigne de 0°)

Les tableaux 3.8 et 3.9 présentent les résultats obtenus lors de plusieurs tests en configuration meneur-suiveur avec des consignes différentes. Ces résultats sont du même ordre que ceux obtenus lors des tests de caractérisation (voir figures 3.42 et 3.44) et sont très encourageants.

En effet, ces résultats montrent que le dispositif peut être utilisé avec succès dans des applications de déplacements en formation.

TABLEAU 3.8 ERREUR SUR LA DISTANCE d LORS DES EXPÉRIMENTATIONS SUR LES ROBOTS

<i>Consigne</i>		<i>Erreur sur d (mm)</i>			
		<i>Moyenne</i>	<i>Moyenne absolue</i>	<i>Maximum absolue</i>	<i>Écart-type</i>
750 mm	0°	3,12	6,68	55,45	8,72
750 mm	0°	4,84	8,29	64,72	9,31
1500 mm	0°	2,46	6,67	65,47	9,3
2000 mm	0°	0,83	7,8	80,02	12,74
2500 mm	0°	2,85	9,02	69,89	13,17
1500 mm	30°	1,2	5,51	42,88	7,25
1500 mm	20°	-0,1	4,72	41,74	6,37
1500 mm	10°	-0,25	4,93	41,17	6,91
1500 mm	-10°	6,5	8,54	69,43	10,27
1500 mm	-20°	5,1	7,4	43	8,61
1500 mm	-30°	4,69	7,48	42,1	8,49

TABLEAU 3.9 ERREUR SUR L'ANGLE θ LORS DE L'EXPÉRIMENTATION SUR LES ROBOTS

<i>Consigne</i>		<i>Erreur sur θ (degré)</i>			
		<i>Moyenne</i>	<i>Moyenne absolue</i>	<i>Maximum absolue</i>	<i>Écart-type</i>
750 mm	0°	-2,02	2,19	11,72	1,53
750 mm	0°	-2,1	2,26	11,85	1,59
1500 mm	0°	-2,02	2,2	11,45	1,48
2000 mm	0°	-1,96	2,14	11,36	1,53
2500 mm	0°	-2,16	1,35	10,4	1,35
1500 mm	30°	-1,5	2,09	14,09	2,33
1500 mm	20°	-1,3	1,7	13,52	1,96
1500 mm	10°	-2,03	2,26	12,87	1,72
1500 mm	-10°	-1,75	1,95	11,39	1,6
1500 mm	-20°	-1,78	1,91	12,42	1,67
1500 mm	-30°	-1,22	1,41	12,02	1,59

4. DISCUSSION

Comme deux approches différentes ont été évaluées pour le projet, la discussion est divisée en deux sections. La section 4.1 traite du prototype électromagnétique (RF) alors que la section 4.2 traite du prototype ultrasonique.

4.1. Prototype RF

La différence de phase d'un signal RF entre deux antennes dans un environnement intérieur, et donc en présence de propagation multiparcours, a un comportement chaotique dans les conditions de proximité et de ligne de vue spécifiques au projet. Les résultats expérimentaux montrés ont été obtenus en limitant le plus possible les mouvements dans l'environnement. Observer le comportement du système lorsque les positions du récepteur et du transmetteur sont stables et qu'il y a des mouvements dans l'environnement montre bien l'effet des différents objets sur la propagation des ondes radio: lorsqu'il n'y a pas de mouvement la mesure de phase est stable, mais le moindre mouvement dans l'environnement entraîne une variation de la mesure de phase. Dans un environnement intérieur, le dispositif ressemble plus à un détecteur de mouvement qu'à un système de localisation. Le résultat des tests extérieurs montre que les problèmes reliés à la propagation multiparcours sont moins importants, mais ils sont tout de même présents.

Il existe des méthodes de traitement de données pour aider à déterminer l'angle d'arrivée dans les système *RDF* ou *DOA* en présence de propagation mutliparcours, comme par exemple le système neuro-flou présenté dans [MA et coll., 1999]. Mais compte tenue de l'effet important de l'environnement sur la phase mesurée et de la précision nécessaire pour obtenir des données de positions utiles, il est peu probable que ces méthodes permettent d'obtenir des résultats assez précis pour les objectifs du projet.

4.2. Prototype ultrasonique

Les résultats expérimentaux du prototype ultrasonique sont très encourageants et démontrent que le dispositif amène une solution à des problèmes de localisation dans le domaine de la

robotique mobile. Le premier point fort du dispositif est qu'il permet la localisation d'agent mobile de façon relative sans nécessiter de modification à l'environnement. Le système permettrait donc à plusieurs agents mobiles de localiser les autres agents qui se trouvent en proximité, peu importe l'environnement dans lequel ils évoluent. De plus, le système est immunisé contre les réflexions du signal ultrasonique dans l'environnement: le temps de vol de l'onde est calculé à partir de la première détection du signal ultrasonique, qui correspond au chemin le plus court (c'est-à-dire la ligne droite). Le second point fort du dispositif est sa précision. L'erreur absolue moyenne sur la distance obtenue lors des tests de caractérisation sur une distance de 8,1 mètres ($r = 100$ mm) est de 3,75 mm et l'écart-type est de 5,03 mm, tandis que l'erreur absolue moyenne sur l'angle est de 1,84 degré et l'écart-type est de 2,53 degrés. Cette précision est amplement suffisante pour la plupart des applications en robotique mobile et peut être augmentée en éloignant le plus possible les récepteurs les uns des autres. L'omnidirectionnalité 2D du dispositif, ou encore l'absence de pièce mobile, est également un avantage puisqu'elle évite d'avoir à faire une recherche en plusieurs étapes afin de localiser un agent. Elle permet potentiellement la localisation par rapport à plusieurs agents en même temps, contrairement à un dispositif comme une caméra par exemple, qui doit toujours suivre l'agent à localiser. De plus, le système de localisation est homogène, c'est-à-dire qu'il est constitué de plusieurs dispositifs identiques installés sur plusieurs agents mobiles. Aucun agent d'un groupe n'a de statut spécial parce qu'il est muni d'un dispositif que les autres agents n'ont pas et qui est nécessaire au système. N'importe quel robot du groupe peut quitter le groupe à tout moment sans affecter le fonctionnement du système de localisation. Un autre avantage ressort du fait que les deux parties du système, soit celle sur l'agent à localiser et celle sur l'agent qui localise, sont actives: il est impossible d'identifier un objet de l'environnement à la place d'un agent, comme c'est le cas par exemple lorsque la couleur est utilisée pour identifier les agents. L'identification des agents se fait par un numéro d'identification communiqué par le lien RF. Ce numéro d'identification est présentement représenté sur 8 bits, mais il peut facilement être représenté sur 16 ou 32 bits. Le numéro d'identification peut donc être attribué à un agent de façon permanente, contrairement aux approches qui utilisent la couleur pour l'identification par exemple. Même si l'espace utilisé par le système peut être considéré comme un désavantage, il y a une grande flexibilité sur la position des récepteurs sur l'agent. Les expérimentations ont été effectuées avec les trois

récepteurs placés selon un triangle équilatéral, mais il est possible de les positionner autrement puisque le système d'équations tient compte de la position de chacun des récepteurs. La consommation électrique et le coût du dispositif sont également des avantages: sa consommation est inférieure à 150 mA sur 7,5 volts, ce qui correspond à environ 1,1 watt. La puissance consommée par le dispositif pourrait être réduite en désactivant certains composants lorsqu'ils ne sont pas utilisés, comme par exemple le pont en H utilisé pour la transmission ultrasonique qui consomme à lui seul 25 mA en continue. Le coût du dispositif est présentement autour de 200\$ par agent.

Mais le dispositif a également quelques points faibles. Premièrement, les émetteurs-récepteurs ultrasoniques doivent être installés sur l'agent à des endroits où aucun objet, autre que les émetteurs-récepteurs eux-mêmes, n'obstrue leur champs de vision. Le plus simple est de les installer au-dessus de l'agent. Pour maximiser la précision, les émetteurs-récepteurs doivent être le plus éloignés possible les uns des autres. Les performances du dispositif risquent donc d'être moins intéressantes sur des agents de petites tailles. Deuxièmement, aucun objet ne doit couper la ligne de vue entre le transmetteur et les récepteurs pour que le système fonctionne correctement. Si un objet obstrue partiellement la ligne de vue, le signal ultrasonique sera plus ou moins affaibli selon la taille de l'objet. Dans ce cas, la position déterminée par le système risque d'être moins précise ou encore erronée. Si un objet obstrue complètement la ligne de vue, la distance et la direction déterminées par le système correspondront au chemin le plus court entre le transmetteur et les récepteurs. Un autre désavantage est le taux de rafraîchissement des données qui est acceptable lorsqu'il y a peu d'agents, mais qui diminue lorsque le nombre d'agents augmente. Par exemple, si une mesure peut être prise en 100 ms par un agent, la localisation de deux agents peut se faire une fois par 200 ms alors que s'il y a dix agents chacun sera localisé une fois par seconde. Toutefois, chacun des robots peut se localiser par rapport à tous les autres robots qui l'entourent, c'est-à-dire qu'à chaque 100 ms tous les robots connaîtront leur position respective par rapport au robot qui vient de transmettre le signal ultrasonique. Il est donc possible de fusionner toutes ces informations afin de déterminer la position de chaque robot avec un taux de rafraîchissement plus élevé. Les *Millibots* [NAVARRO-SERMENT et coll., 2002] utilisent un algorithme de ce genre appelé *leap-frogging*, qui consiste à utiliser trois robots balises et à

localiser tous les autres à partir de ces trois balises. Il faut rappeler que ce qui limite le taux de rafraîchissement d'une mesure de localisation, c'est l'atténuation des ultrasons avec la distance parcourue puisqu'avant d'émettre un signal ultrasonique, il faut s'assurer que le signal précédent soit complètement atténué. Pour augmenter le taux de rafraîchissement, il faut diminuer la puissance de transmission, ce qui diminuera la portée d'opération et la vie de l'onde ultrasonique. Il y a donc un compromis à faire entre le taux de rafraîchissement et la portée d'opération désirée. Un autre point faible est relié au fait que le dispositif fonctionne en 2D, c'est-à-dire que les données de distance seront faussées si le transmetteur n'est pas à la même hauteur que les récepteurs. Il est toutefois possible de contourner le problème si la différence de hauteur est connue et constante. Sinon, l'ajout d'un récepteur de plus permettrait la localisation en 3D, mais cette dernière serait limitée par l'angle d'opération verticale des émetteurs-récepteurs. Il est important de rappeler que la précision sur l'angle n'est pas affectée par la différence de hauteurs entre le transmetteur et les récepteurs et que cette différence doit être assez grande pour que l'erreur sur la distance ne puisse être négligée (voir figure 3.26 et 3.27). Le dernier désavantage du système actuel est l'interférence avec la plupart des sonars utilisés en robotique mobile. Pour être utilisé avec des agents munis de sonars, il faudrait donc changer la fréquence d'opération du système de localisation.

Il est intéressant de comparer le système de localisation avec le système des *Millibots* [NAVARRO-SERMENT et coll., 2002], qui est celui qui rejoint le plus les objectifs du projet et qui lui ressemble le plus. Premièrement, les *Millibots* obtiennent une précision de 4 à 8 mm sur une distance de 3 m alors que le dispositif conçu permet d'obtenir une moyenne sur l'erreur absolue de 3,75 mm et $1,84^\circ$ dans un rayon de 8,1 m. La résolution semble du même ordre, mais la portée du dispositif des *Millibots* est beaucoup moins grande. Pour fonctionner, le système des *Millibots* nécessite la présence d'au moins quatre robots puisque trois d'entre eux sont utilisés comme balises. De plus, les positions initiales des robots balises doivent être connues pour que le système fonctionne correctement. Pour le présent projet, le système est fonctionnel avec deux robots ou plus et ne nécessite pas la connaissance des positions initiales. En ce qui concerne la taille du dispositif, celui des *Millibots* est installé sur un robot de 60 mm par 60 mm alors que le dispositif du projet nécessite au moins un cercle de 100 mm de rayon. Il est toutefois possible de diminuer le rayon du cercle, mais dans ce cas la

précision sur l'angle sera moins grande (voir tableau 3.5). Le dispositif des *Millibots* consomme 25 mW alors que le nôtre consomme environ 1100 mW. La consommation électrique peut toutefois être diminuée assez facilement, mais elle sera tout de même supérieure à celle des *Millibots*.

Compte tenu des résultats positifs, il serait intéressant de pousser la recherche plus loin afin de pouvoir utiliser le système sur un groupe de plusieurs robots. Les premières étapes à franchir sont reliées au matériel. Il faut tout d'abord réaliser une étude de faisabilité pour l'utilisation d'une fréquence autre que 40 kHz de façon à éviter l'interférence avec les sonars. Cette première étape est la plus importante puisque le sonar est une méthode de détection d'obstacles simple, peu coûteuse et énormément utilisée en robotique mobile. L'évaluation doit tenir compte de la fréquence des différents sonars généralement utilisés en robotique pour déterminer une nouvelle fréquence d'opération ainsi que du coût des émetteurs-récepteurs pour la fréquence choisie. La seconde étape consiste à faire le choix entre l'utilisation de cônes de réflexion ou l'utilisation de plusieurs émetteurs-récepteurs pour couvrir 360 degrés. Ce choix est fonction de la puissance maximale des émetteurs-récepteurs utilisés, de leur angle d'opération, de leur coût ainsi que de la portée désirée pour le dispositif. Dans le cas où l'utilisation de cônes de réflexions est nécessaire, une étude d'optimisation des dimensions du cône devrait permettre d'optimiser leur taille. Suite au choix de garder ou non les réflecteurs, des modifications aux circuits électriques de réception et de transmission devront peut-être être effectuées. Il est envisageable d'avoir plusieurs versions du dispositif opérant à différentes fréquences et ayant des caractéristiques différentes. Par exemple, une version peu coûteuse ne pouvant être utilisée avec des sonars et utilisant des émetteurs-récepteurs à 40 kHz (peu dispendieux), et une version plus coûteuse utilisant des émetteurs-récepteurs à 25 kHz (dispendieux) et pouvant être utilisée avec des sonars. Il serait également intéressant que le système effectue les calculs de positionnement de façon embarquée plutôt que ce soit fait par l'ordinateur. Comme mentionné précédemment, un changement de microprocesseur est alors nécessaire.

En ce qui concerne les étapes logicielles, la première est de mettre en place un algorithme de synchronisation prioritaire pour éviter les collisions de messages RF et pour ne pas qu'un

dispositif décide d'activer un transmetteur avant que le signal ultrasonique de la localisation précédente ne soit complètement atténué. La priorité pourrait être fonction du numéro d'identification du dispositif et du temps suivant la dernière transmission RF. Vient ensuite l'étape de l'échange d'informations de position entre les agents pour permettre de déterminer, entre autres, l'orientation des agents (voir section 3.1.3). Cet échange d'information peut se faire par le lien de communication du système de localisation ou encore par un lien de communication quelconque (lien réseau par exemple). Même si les données retournées par le système sont assez stables, l'utilisation d'algorithmes de haut niveau permettrait probablement d'augmenter davantage la précision de la localisation. La dernière étape, qui permettrait d'immuniser le système contre les variations de vitesse du son, consiste à mesurer la vitesse du son à l'aide du système (voir section 3.3).

Les applications possibles du dispositif ne se limitent pas aux déplacements en formations. Le dispositif peut également être utilisé avec un groupe d'agents mobiles qui doivent travailler ensemble pour effectuer certaines tâches. Dans ce cas, le dispositif permet non seulement aux agents d'identifier les autres agents qui sont en proximité, mais il permet également une augmentation de l'efficacité par l'échange d'informations de positions reliées à la tâche à effectuer. Par exemple, un agent qui détecte une station de recharge peut avertir les autres agents que la station est à proximité de sa position présente. Le dispositif peut même être installé à certains endroits dans l'environnement pour indiquer un repère ou pour identifier un objet quelconque, comme une station de recharge par exemple. Une autre application possible est l'utilisation sur un humain (transmetteur seulement) de façon à ce qu'un ou plusieurs agents suivent cet humain. De cette façon, les agents peuvent aider à transporter des charges ou encore garder un objet quelconque (une caméra par exemple) en proximité de l'humain. Des tests qualitatifs ont déjà été effectués en installant le transmetteur à la ceinture d'une personne et les récepteurs sur un robot mobile (voir figure 4.1). Le robot était en mesure de suivre la personne tout comme dans le cas de la formation meneur-suiveur avec deux robots, et ce malgré le fait que la différence de hauteur entre le transmetteur et les récepteurs était d'environ 700 mm.



Figure 4.1 Robot suivant une personne à l'aide du dispositif ultrasonique

5. CONCLUSION

L'objectif du projet est de concevoir un dispositif permettant à des robots de se localiser mutuellement sans utiliser de balises ou de références extérieures. Ce dispositif doit donc permettre aux robots de se reconnaître et de déterminer leur position par rapport aux autres robots de façon locale, être peu dispendieux, facile à installer sur à peu près n'importe quels robots et être le plus indépendant possible du nombre d'agents physiques mobiles à localiser.

L'approche retenue consiste à utiliser plusieurs émetteurs-récepteurs sur un même agent mobile pour détecter une onde transmise par un autre agent mobile. L'information recueillie par chacun de ces émetteurs-récepteurs, qui est relié au temps d'arrivée de l'onde, est ensuite utilisée pour déterminer la position du transmetteur par rapport aux récepteurs. Deux prototypes ont été réalisés: le premier utilisant des ondes électromagnétiques (RF) et le second utilisant des ondes ultrasoniques.

L'usage des ondes électromagnétiques s'avère une option intéressante principalement à cause des antennes omnidirectionnelles. Puisque les ondes RF voyagent à très grande vitesse, la complexité se retrouve alors dans la détermination du temps exact d'arrivée de l'onde sur chacune des antennes de réception. L'approche expérimentée proposait un moyen détourné de déterminer le temps d'arrivée de l'onde. Ce moyen, qui consiste à transmettre un signal RF continu et à mesurer la différence de phase entre plusieurs antennes, présentait toutefois une crainte qui s'est avérée justifiée. Cette crainte concernait la validité des mesures de phases prises dans un environnement intérieur, où les phénomènes de propagation multiparcours sont présents. Les résultats ont démontré que la mesure de la différence de phase d'un signal RF entre deux antennes en présence de propagation multiparcours n'était pas assez précise pour les objectifs du projet et que l'approche proposée n'était donc pas applicable.

L'approche utilisée pour le prototype ultrasonique nécessite un circuit électronique beaucoup plus simple que celle du prototype électromagnétique, principalement à cause de la vitesse du son qui est extrêmement plus lente que celle des ondes radio. Par contre, pour rendre les émetteurs-récepteurs ultrasoniques omnidirectionnels, des réflecteurs doivent être utilisés. Les résultats obtenus avec le prototype ultrasonique sont très encourageants et ont permis de

valider la théorie d'opération. La précision obtenue sur la mesure de localisation et la portée du dispositif répondent adéquatement aux besoins de localisation. Le dispositif a permis à deux robots de se déplacer en formation meneur-suiveur avec des résultats très intéressants. De plus, plusieurs autres applications en robotique mobile sont envisageables pour le dispositif. Ces travaux ont donc démontré qu'il est possible de concevoir à faible coût un dispositif permettant à un agent mobile de détecter et de localiser un autre agent qui se trouve en proximité. Les travaux futurs permettront de valider l'utilisation du dispositif par un groupe d'agents.

ANNEXE A AJOUT D'UN RÉCEPTEUR POUR LA DÉTERMINATION DE LA VITESSE DU SON

Les équations suivantes correspondent au cas où le temps de vol est utilisé (quatre récepteurs), mais un développement semblable peut être fait si c'est la différence de temps de vol qui est utilisée (cinq récepteurs).

$$d_{AD}^2 = t_{AD}^2 v^2 = (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 \quad (\text{A-1})$$

$$d_{BD}^2 = t_{BD}^2 v^2 = (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 \quad (\text{A-2})$$

$$d_{CD}^2 = t_{CD}^2 v^2 = (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 \quad (\text{A-3})$$

$$d_{ED}^2 = t_{ED}^2 v^2 = (x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2 \quad (\text{A-4})$$

où t_{ij} = temps d'arrivée au point i
 x_i = abscisse du point i
 y_i = ordonnée y du point i

En développant, les équations suivantes sont obtenues:

$$t_{AD}^2 v^2 = x_D^2 - 2x_D x_A + x_A^2 + y_D^2 - 2y_D y_A + y_A^2 \quad (\text{A-5})$$

$$t_{BD}^2 v^2 = x_D^2 - 2x_D x_B + x_B^2 + y_D^2 - 2y_D y_B + y_B^2 \quad (\text{A-6})$$

$$t_{CD}^2 v^2 = x_D^2 - 2x_D x_C + x_C^2 + y_D^2 - 2y_D y_C + y_C^2 \quad (\text{A-7})$$

$$t_{ED}^2 v^2 = x_D^2 - 2x_D x_E + x_E^2 + y_D^2 - 2y_D y_E + y_E^2 \quad (\text{A-8})$$

En soustrayant de l'équation (A-5) les équations (A-6) à (A-8), le système est réduit à trois équations.

$$(t_{AD}^2 - t_{BD}^2) v^2 = x_A^2 - 2x_D x_A + 2x_D x_B - x_B^2 + y_A^2 - 2y_D y_A + 2y_D y_B - y_B^2 \quad (\text{A-9})$$

$$(t_{AD}^2 - t_{CD}^2) v^2 = x_A^2 - 2x_D x_A + 2x_D x_C - x_C^2 + y_A^2 - 2y_D y_A + 2y_D y_C - y_C^2 \quad (\text{A-10})$$

$$(t_{AD}^2 - t_{ED}^2) v^2 = x_A^2 - 2x_D x_A + 2x_D x_E - x_E^2 + y_A^2 - 2y_D y_A + 2y_D y_E - y_E^2 \quad (\text{A-11})$$

Ces équations sont ensuite retravaillées de façon à isoler les inconnues et obtenir les équations (A-12) à (A-14).

$$(t_{AD}^2 - t_{BD}^2)v^2 - 2(x_B - x_A)x_D - 2(y_B - y_A)y_D = x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 \quad (\text{A-12})$$

$$(t_{AD}^2 - t_{CD}^2)v^2 - 2(x_C - x_A)x_D - 2(y_C - y_A)y_D = x_A^2 + y_A^2 - x_C^2 - y_C^2 \quad (\text{A-13})$$

$$(t_{AD}^2 - t_{ED}^2)v^2 - 2(x_E - x_A)x_D - 2(y_E - y_A)y_D = x_A^2 + y_A^2 - x_E^2 - y_E^2 \quad (\text{A-14})$$

Ces dernières équations peuvent être représentées sous la forme matricielle comme montre le système d'équations (A-15).

$$\begin{bmatrix} 2(x_A - x_B) & 2(y_A - y_B) & (t_{AD}^2 - t_{BD}^2) \\ 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) & (t_{AD}^2 - t_{CD}^2) \\ 2(x_A - x_E) & 2(y_A - y_E) & (t_{AD}^2 - t_{ED}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ v^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A^2 + y_A^2 - x_B^2 - y_B^2 \\ x_A^2 + y_A^2 - x_C^2 - y_C^2 \\ x_A^2 + y_A^2 - x_E^2 - y_E^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-15})$$

Le système d'équations (A-15) permet d'obtenir la position (x,y) du transmetteur en plus du carré de la vitesse du son, à partir de quatre récepteurs.

ANNEXE B PUISSANCE DE TRANSMISSION ULTRASONIQUE VS RAYON D'OPÉRATION

Les tests de calibrations effectués sur une distance de 8,1 mètres ont donné des résultats satisfaisants sur toute la surface de test. Toutefois, plus la distance augmente, plus l'erreur augmente principalement à cause de l'atténuation du signal ultrasonique. Cette atténuation diminue la précision de la mesure du temps d'arrivée, en particulier lorsqu'il y a des obstacles qui obstruent la ligne de vue (par exemple les cônes de réflexion des autres récepteurs). Il est donc intéressant de pouvoir définir la portée utile du dispositif en fonction de la puissance de transmission de l'onde ultrasonique et donc de la puissance disponible aux récepteurs.

Tout d'abord, l'atténuation d'une onde ultrasonique dans l'air en fonction de la distance est déterminée par l'équation (B-1)¹⁹.

$$a(f) = \begin{cases} 32,8 * 10^{-6} * f & \text{pour } f < 50 \text{ kHz} \\ 0,07218 * f - 1,968 & \text{pour } f \geq 50 \text{ kHz} \end{cases} \quad \text{avec } a(f) = \text{dB/m} \quad \text{et } f = \text{Hz} \quad (\text{B-1})$$

Pour une fréquence de 40 kHz, l'atténuation en fonction de la distance est présentée à la figure B-1.

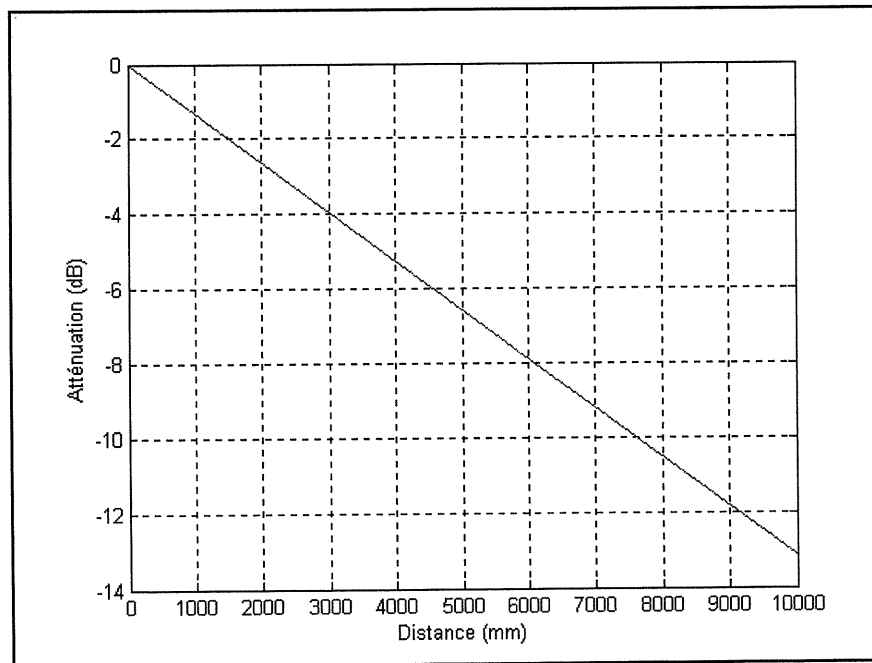


Figure B-1 Atténuation des ultrasons en fonction de la distance

La puissance du signal peut être décrite par les équations (B-2) et (B-3).

¹⁹ <http://www.massa.com/fundamentals.htm>

$$P_{dB} = 10 * \log\left(\frac{P}{P_i}\right) = -A * d \quad (\text{B-2})$$

$$P = P_i * 10^{\left(\frac{-A}{10} * d\right)} \quad (\text{B-3})$$

où P_{db} est la puissance en dB, P_i est la puissance initiale du signal et A est l'atténuation en dB/mètre.

Les calculs de puissance qui suivent sont très approximatifs, mais ils permettent d'avoir une idée de la puissance nécessaire. Le transcepteur 255-400PT16 a été utilisé pour les tests de caractérisation avec une tension V_{dd} de 30 volts. D'après les fiches techniques, ce transcepteur a une impédance de 1 kohms. La puissance de transmission peut être approximée par la formule $P = VI = V^2/R$ en supposant que le transcepteur est idéal et que toute la puissance électrique est transformée en puissance ultrasonique. La puissance de transmission était donc de $30 \times 30 / 1000 = 900$ mWatt. L'émetteur 255-400ST12 est utilisé avec une tension V_{dd} de 15 volts puisque la fiche technique spécifie une puissance maximale de 200 mW. Son impédance est également de 1 kohms. La puissance de transmission est donc de 225 mWatt. Toutefois, l'émetteur 255-400PT16 a un angle d'opération -6dB d'environ 60 degrés alors que celui du 255-400ST12 est d'environ 110 degrés. Pour comparer les deux puissances, il est possible d'approximer la puissance disponible par degré d'opération. Pour le 255-400PT16 on obtient donc $900 \text{ mW} / 60^\circ = 15 \text{ mW}/^\circ$ et pour le 255-400ST12 on obtient $225 \text{ mW} / 110^\circ = 2 \text{ mW}/^\circ$. La puissance disponible par degré d'opération peut également s'appliquer à l'utilisation du cône de réflexion en supposant qu'il n'y a pas de perte de réflexion. La comparaison avec les valeurs obtenues pour les capteurs reste toutefois extrêmement approximative puisque l'émetteur-récepteur a le même angle d'opération vertical que horizontal alors que le cône réfléchit davantage dans le plan horizontal. On obtient pour le 255-400PT16 (avec $V_{dd} = 30$ V et le cône de réflexion) $900 \text{ mW} / 360^\circ = 2.5 \text{ mW}/^\circ$. La puissance de transmission par degré d'opération dans les deux derniers cas est comparable. La figure B-2 montre la puissance disponible par degré d'opération en fonction de la distance pour les trois cas mentionnés plus haut.

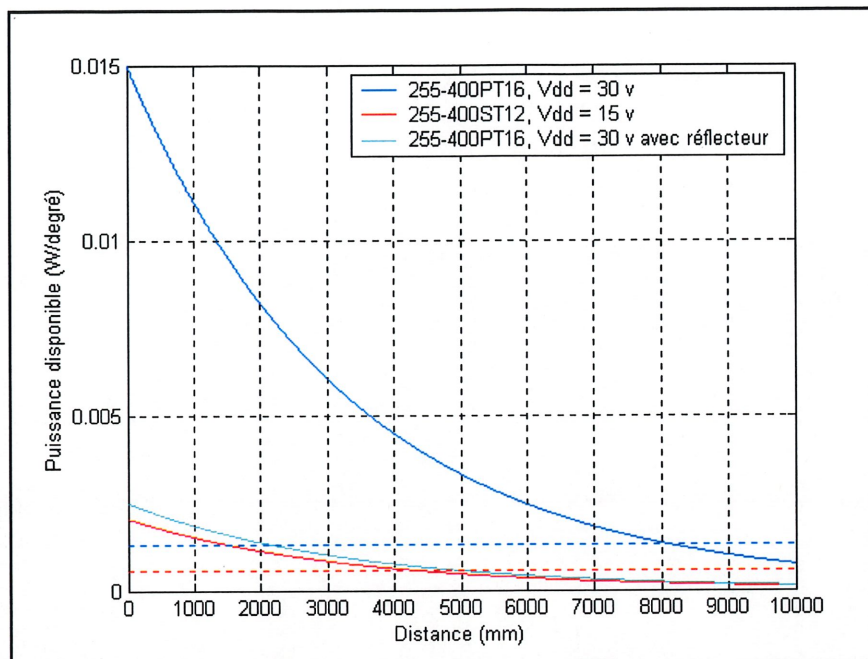


Figure B-2 Puissance disponible en fonction de la distance

La ligne bleue pointillée horizontale correspond à la puissance disponible à 8100 mm avec le transepteur 255-400PT16 et $V_{dd} = 30$ volts, soit $1,3 \text{ mW}/^\circ$. L'expérimentation a démontré qu'avec ce capteur, $V_{dd} = 30$ volts et le cône de réflexion, les données autour de 2 m étaient comparables à celles autour de 8,1 m. Le calcul effectué semble donc être une bonne approximation pour déterminer la puissance de transmission nécessaire.

La ligne rouge pointillée correspond à la puissance à 4,3 m lorsque le transmetteur 255-400ST12 est utilisé, soit $0,56 \text{ mW}/^\circ$. Les expérimentations sur les robots ont démontré qu'à partir de 4,3 m, la plupart des données sont rejetées à cause d'une trop grande différence entre deux des distances²⁰. La puissance de $0,56 \text{ mW}/^\circ$ peut donc être considérée comme la puissance minimale nécessaire au fonctionnement du système. Cette puissance minimale est cependant fonction de la tolérance fixée sur la différence entre les distances obtenues par les différents récepteurs.

²⁰ La différence maximale tolérée entre les distances obtenues des différents récepteurs est égale à la distance linéaire séparant les récepteurs plus 40 mm. Le 40 mm est ajouté pour tenir compte de la distance parcourue par l'onde entre les émetteurs-récepteurs et les cônes ainsi que pour assouplir un peu la règle de cohérence des distances.

Pour l'annexe C voir la copie papier à la Bibliothèque du Frère-Théode
Section Monographie TK 7.5 US B54 2003

ANNEXE C FICHES TECHNIQUES DES CAPTEURS ULTRASONIQUES

MOUSER ELECTRONICS	255-400PT16	Ultrasonic Transducer
-------------------------------	-------------	-----------------------

ANNEXE D INTERFÉRENCE ENTRE LE SYSTÈME ULTRASONIQUE ET LES SONARS

Le système de localisation utilise, tout comme les sonars, le temps de vol d'une onde ultrasonique afin d'obtenir de l'information sur une distance. Si ces deux systèmes utilisent des fréquences avoisinantes et s'ils sont utilisés en même temps, il y aura interférence. L'interférence aura lieu lorsque le système de localisation détectera une onde transmise par un sonar, ou encore lorsque le sonar détectera une onde transmise par le système de localisation. Dans ces deux cas, les données de distances seront faussées.

Plusieurs sonars sur le marché utilisent une fréquence de 40 kHz. Ces sonars sont généralement de courte portée et utilisent des capteurs semblables à ceux utilisés sur le prototype ultrasonique. L'interférence entre ces sonars et le système est inévitable. D'autres sonars, entre autres ceux de la compagnie Polaroid, utilisent une fréquence de 50 kHz. Ces sonars sont généralement de plus grande portée et utilisent donc une plus grande puissance de transmission. La majorité des plates-formes mobiles du laboratoire utilisent des sonars Polaroid. La présence d'interférence entre ces sonars et le système ultrasonique doit être vérifiée puisque la fréquence est légèrement différente. La vérification est faite avec un robot muni du système de localisation et d'un laser. Un autre robot, muni d'un transmetteur du système ultrasonique, s'éloigne du premier robot à vitesse constante. La figure D-1 montre les résultats lorsque les sonars ne sont pas activés. La figure D-2 montre les résultats lorsque les sonars des deux robots sont activés.

Même si la fréquence d'opération n'est pas la même, les sonars Polaroid interfèrent avec le système ultrasonique à cause de la grande puissance de transmission utilisée. L'interférence moins importante en proximité est causée par la hauteur du système de localisation: ce dernier est installé environ 300 mm plus haut que les sonars et la plaque installée sous les récepteurs bloque le signal ultrasonique lorsque deux robots sont près l'un de l'autre.

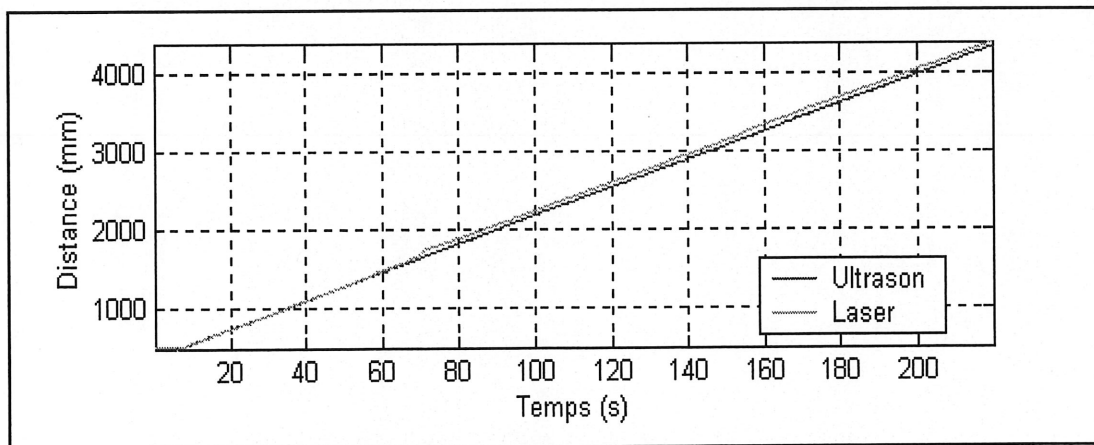


Figure D-1 Distance lorsque les sonars sont désactivés

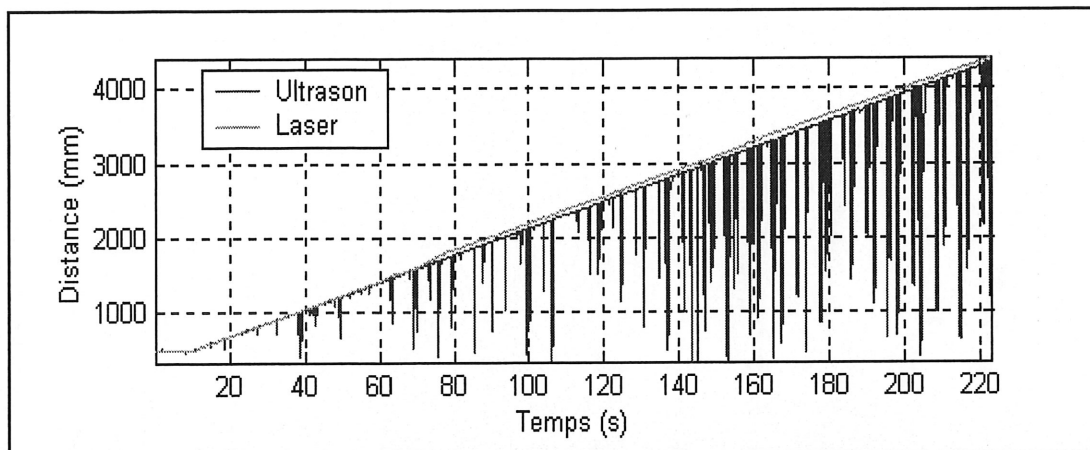


Figure D-2 Distance lorsque les sonars sont activés

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREANOV, B.G., ANDREANOVA, N.I., KAMINSKII, S.R., KOZLOV, O.V. (1994), Experimental investigations of a direction finding system under urban conditions, *Measurement Techniques*, vol. 37, n.4, p. 455-457.
- ANDREYANOV, B.G., ANDREYANOVA, N.I., URETSKII, Y.S., SHERBAKOV, G.I. (1994), Features of the design of a system for finding the direction of moving objects under urban conditions, *Measurement Techniques*, vol. 37, n. 4, p. 445-450.
- ARAI, Y., ASAMA, H., KAETSU, H., ENDO, I. (2000), Distance measurement in multi-robot systems based on time shared scheduling, *Distributed Autonomous Robotic Systems 4*, p. 189-198.
- ARKIN, R.C. (1998), *Behavior-Based Robotics*, 1^{ère} édition, MIT Press, 490 p.
- BAHL, P., PADMANABHAN, V. N. (2000), RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *Proceedings of the IEEE Infocom 2000*, vol. 2, p. 775-784.
- BARFOOT, T.D., EARON, E.J.P., D'ELEUTERIO, G. M. T. (2001), A new breed of explorer: development of a network of mobile robots for space exploration, *Proceedings i-SAIRAS*, 8 p.
- BECKERS, R., HOLLAND, O.E., DENEUBOURG, J.L. (1994), From local actions to global tasks: stigmergy and collective robotics, *Proceedings of Artificial Life IV*, p. 181-189.
- BEOM, H.R., CHO, H.S. (1995), Mobile robot localization using a single rotating sonar and two passives cylindrical beacons, *Robotica*, vol 13, p. 243-253.
- BULUSU, N., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D. (2000), GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, no. 5, p. 28-34.
- DAS, A., FIERRO, R., KUMAR, V., OSTROWSKI, J. SPLETZER, J., TAYLOR, C. (2001), A framework for vision based formation control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13 p.
- DUDEK, G., JENKIN, M. (2000), *Computational Principles of Mobile Robotics*, 1^{ère} édition, Cambridge University Press, 280 p.
- DULIMARTA, H.S., JAIN, A.K. (1997), Mobile robot localization in indoor environment, *Pattern Recognition*, vol. 30, n. 1, p. 99-113.
- EVERETT, H.R. (1995), *Sensors for Mobile Robots*, 1^{ère} édition, A K Peters, 528 p.

- FIGUEROA, F., MAHAJAN, A. (1994a), A robust method to determine the coordinates of wave source for 3-D position sensing, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 116, p. 505-511.
- FIGUEROA, F., MAHAJAN, A. (1994b), A robust navigation system for autonomous vehicles using ultrasonics, *Control Engineering and Practice*, vol. 2, n. 1, p. 49-59.
- FOX, D., BURGARD, W., KRUPPA, H., THRUN S. (1999), Collaborative multi-robot localization, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1701, p. 255-262.
- FREDSLUND, J., MATARIC, M.J. (2001), Robot formations using only local sensing and control, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computation Intelligence in Robotics and Automation*, p. 308-313.
- HASKARA, I., HATIPOGLU, C., ÖZGÜNER, U. (1997), Combined decentralized longitudinal and lateral controller design for truck convoys, *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, p. 123-128.
- LADD, A.M., BEKRIS, K.E., MARCEAU, G., RUDYS, A. (2002), Using wireless Ethernet for localization, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 402-408.
- LOWE, D. G. (1999), Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 8 p.
- MA, C.W., TENG, C.C. (1999), Fuzzy neural network approach for 2-D direction finding in multipath environments, *IEE Proceedings Radar, Sonar Navigation*, vol. 146, n. 2, p. 78-83.
- MAHAJAN, A., WALWORTH, M. (2001), 3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no 1, p. 91-94.
- MAHAJAN, A., WALWORTH, M. (2001), 3-D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no 1, p. 91-94.
- MICHAUD, F., LÉTOURNEAU, D., AUDET, J., BÉLANGER, F. (2000), Symbol recognition and artificial emotion for making an autonomous robot attend the AAAI Conference, *Proceedings AAAI Conference*, p. 1140-1141.
- MIO, M., TACHIBANA, A., AOKI, K., NISHIDA, M. (1995), Platoon system based on optical inter-vehicle communication, *Intelligent Transport*, p. 1272-1277.
- NAVARRO-SERMENT, L. E., PAREDIS, C. J. J., KHOSLA, P. K. (1999), A beacon system for the localization of distributed robotic teams, *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*, 6 p.

- NAVARRO-SERMENT, L.E., GRABOWSKI, R., PAREDIS, C.J.J., KHOSLA, P.K. (2002), Millibots, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, p. 31-40.
- PREMVUTI, S., WANG, J. (1996), Relative position localizing system for multiple autonomous mobile robots in distributed robotic system: System design and simulation, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 18, n. 3, p. 319-326.
- PRIYANTHA, N., CHAKRABORTY, A., BALAKRISHNAN, H. (2000), The cricket location support system, *Proceedings ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 12 p.
- RAZSKAZOVSKII, V.B., VELITCHKO, A.F. (1999), Statistical characteristics of direction finding errors at short-distance ground traces, *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 42, n. 4, p. 17-23.
- SCHRAFT, R. D., SCHMIERER, G. (2000), *Service Robots*, 1^{ère} édition, A. K. Peters, 251 p.
- SE, S., LOWE, D., LITTLE, J. (2001), Local and global localization for mobile robots using visual landmarks, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 7 p.
- SETO, Y., INOUE, H. (1999), Development of platoon driving in AHS, *JSAE Review* 20, p. 93-99.
- STONE, P., ASADA, M., BALCH, T. (2001), RoboCup-2000: The fourth robotic soccer world championships, *AI Magazine*, vol. 22, n. 1, p. 11-38.
- TAN, H. S., RAJAMANI, R., ZHANG, W.B. (1998), Demonstration of an automated highway platoon system, *Proceeding of the American Control Conference*, p. 1823-1827.
- WARD, A., JONES, A., HOPPER, A. (1997), A new location technique for the active office, *IEEE Personal Communications*, p. 42-47.
- WARD, A., JONES, A., HOPPER, A. (1997), A new location technique for the active office, *IEEE Personal Communications*, vol. 4, n. 5, p. 42-47.
- WERB, J., LANZL, C. (1998), Designing a positioning system for finding things and people indoors, *IEEE Spectrum*, vol. 53, no. 9, p. 71-78.
- WU, C-J., TSAI, C-C. (2001), Localization of an autonomous mobile robot based on ultrasonic sensory information, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 30, n. 3, p. 267-277.
- ZHAO, Y. (1997), *Vehicule Location and Navigation Systems*, 1^{ère} édition, Artech House, 345 p.