
Robots RP-6 en milieux hospitaliers

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet européen IWARD, « *Intelligent Robot Swarm for Attendance, Recognition, Cleaning and Delivery* ». IWARD est un projet de recherche du programme de travail "Advanced Robotics" qui fait parti des activités de la société des Technologies de l'Information (IST). Il a été financé par la Commission européenne dans le sixième programme-cadre FP6 de 2007 à 2009.

Le Consortium IWARD est composé de 10 partenaires de 7 pays européens présenté ci-dessous:

- Allemagne: Fraunhofer IAO, Stuttgart (coordinateur)
- Angleterre:
 - o Université de Warwick Coventry,
 - o Université de Cardiff
 - o Université de Newcastle upon Tyne
- Espagne:
 - o Instituto Gerontológico Matia, San Sebastian
 - o Fundación Fatronik-Tecnia, San Sebastian
- France: École Nationale Supérieure des Mines de St-Étienne
- Irlande: Dublin City University
- Italie: Université de Naples Federico II
- Turquie: Université de Sakarya

Robots RP-6 en milieux hospitaliers

IWARD s'appuie sur des études et des expériences de projets antérieurs sur le développement de solutions robotiques en milieux hospitaliers. Le robot médical équivalant le plus connu et disponible dans le commerce [Thacker 05] est RP-6 (Remote Presence 6) développé par InTouch Health Inc, Santa Barbara, États-Unis (voir Figure 1). Ce robot, mesurant environ 1,60 m de hauteur, est équipé d'un système de visioconférence et est capable de transporter des charges légères. Il est déployé avec succès dans plus de 35 hôpitaux du monde entier, parmi lesquels des institutions prestigieuses comme l'hôpital Johns Hopkins à Baltimore, l'Hôpital de l'Université de Californie à Los Angeles, Detroit Medical Center de Londres et l'hôpital St. Mary.

Diverses études de l'acceptation [Harris 05] ont montré des résultats très positifs. L'hôpital Johns Hopkins a réalisé des études détaillées d'acceptation à la fois chez les patients et chez les médecins. Ces résultats ont été très encourageants et ont tracé les objectifs à suivre pour le projet IWARD.



Figure 1 : Le robot Remote Presence 6

1.2. Le projet IWARD

Un robot IWARD est donc composé d'une plate-forme de base simple à faible coût qui peut s'enrichir par le biais de modules fonctionnels. Cela permettrait à un groupe de robots d'effectuer une multitude de tâches logistiques en milieux hospitaliers et de s'adapter aux changements de demandes.

Les caractéristiques et les spécificités de la plateforme robotique développée dans le cadre du projet IWARD sont données dans le tableau suivant :

Caractéristiques et spécifications de la plate-forme	
Longueur (m)	0,65
Largeur (m)	0,6
Hauteur (m)	0,6 à 1,25
Poids (kg)	6
Vitesse de rotation (deg/s)	20
Ouverture angulaire (deg)	10
Poids de charge (kg)	20
Précision (mm)	10
Résolution (mm)	2
Durée (heures)	2
Consommations énergétiques de base (W)	250

Tableau 1: Spécifications mécaniques de la plate-forme de base



Figure 2 : Famille des robots IWARD

La Figure 2, illustre les trois robots développés dans le cadre du projet IWARD. On distingue clairement les tiroirs jaunes qui sont des modules fonctionnels amovibles offrant aux robots des fonctionnalités supplémentaires et donc la possibilité d'exécuter une multitude de tâches différentes par un même robot.

1.3. Les groupes de travail du projet IWARD

Afin de diviser la charge de travail au sein du projet, le consortium IWARD a été divisé en plusieurs groupes de travail (GT), et chaque groupe était responsable de développer un aspect spécifique du projet.

Groupe de travail « Exigences et spécifications »

La coordination de ce groupe de travail était confiée à l'Université de Cardiff. Les principaux objectifs de ce GT étaient de :

- définir les exigences et les spécifications nécessaires pour le développement des robots de service capable de superviser et de mener des activités au jour le jour en milieux hospitaliers;
- poser les fondations d'un système robotique qui a pour but de faciliter la participation, la reconnaissance, le soutien et la communication avec les utilisateurs.

Ce groupe de travail avait aussi comme rôle d'établir les scénarios d'usage des robots comme l'assistance aux activités de nettoyage, le guidage des patients, la consultation à distance et le transport des médicaments.

Nous donnons ici deux exemples d'exigences identifiées :

- la capacité de surveiller les services hospitaliers, de reconnaître les patients ou objets qui nécessitent une attention particulière
- la capacité de fournir des informations complètes et immédiates sur la localisation des patients concernés, ainsi que des photos, vidéos ou audios des patients et de leur

environnement, de communiquer des informations au personnel médical compétent ou à d'autres robots.

Groupe de travail « Robotique et plateforme de base »

Ce groupe de travail, coordonné par l'Université de Newcastle, était responsable de la conception et de la réalisation d'un prototype de plate-forme de robot mobile ayant des capacités de navigation en milieu hospitalier à un niveau approprié de sécurité et d'intégrité.

En premier lieu, des plates-formes de base ont été conçues. Ces plates-formes doivent être capables d'accueillir des modules amovibles munis d'un système de détection d'obstacles intégré permettant d'éviter toute collision avec un quelconque obstacle. Le groupe de travail a également mis l'accent sur le développement de l'architecture de la plate-forme de systèmes embarqués permettant d'inclure la fonctionnalité «*plug and play*» (branche et fonctionne) afin de faciliter l'interchangeabilité des fonctionnalités modulaires.

Groupe de travail « Modularisation »

La coordination de ce GT était confiée à l'université de DCU. Le principal objectif était de développer des modules interchangeables permettant au robot d'effectuer diverses activités en milieux hospitaliers. Les fonctionnalités ciblées sont le nettoyage, la livraison, l'orientation, le guidage, la surveillance de lieux, la surveillance des patients et la consultation à distance. Des modules ont été conçus pour être insérés à la plateforme de base par des liaisons mécaniques souples. La connectivité de la couche physique avec les modules était assurée par un système de «*bus*» comme l'USB (*Universal Serial Bus*) ou Ethernet. Cela permet de faciliter le raccordement de modules supplémentaires ainsi que le retrait de ces composants.

Ce groupe de travail avait aussi comme rôle le développement des méthodes de fusion et d'intégration du système sensoriel du robot avec ceux des modules. Pour cela une sélection de capteurs disponibles sur le marché (vision, proximité, son, température, CO, CO₂, O₂, fumée, humidité) devait être identifiée afin d'être intégré au modules adéquats.

Groupe de travail « Interface Homme – Robot » (HRI)

La coordination de ce groupe de travail était assurée par l'Université de Warwick. Son principal objectif était de développer différents interfaces, notamment entre les utilisateurs finaux et un robot ou bien entre les utilisateurs et le système robotique (l'équipe ou essaim de robots).

Les solutions fournies doivent assurer une simplicité d'utilisation et une certaine souplesse afin de répondre aux besoins d'un large éventail de population ciblée. Cette flexibilité est obtenue grâce à une approche modulaire qui peut s'adapter à l'environnement, à l'utilisateur et aux modules disponibles sur le robot actuel. Ces composants d'interaction doivent permettre aux infirmiers, professionnels de santé et patients de s'adresser aux robots afin de commander et d'effectuer diverses activités en milieux hospitaliers.

Divers types d'interactions entre les robots et les utilisateurs ont été testées notamment l'interaction vocale en demandant l'exécution de nouvelles tâches vocalement.

Un composant assurant l'interaction entre l' « équipe des robots » et les utilisateurs a été conçu pour permettre aux utilisateurs d'émettre de nouvelles tâches et de gérer les tâches en cours. Vu que la gestion est assurée par un système distribué et coopératif, ce composant joue le rôle d'intermédiaire entre les humains et les robots.

Tous ces composants faisaient partie d'une étude d'acceptation afin d'évaluer les attentes des utilisateurs finaux et de proposer de futures améliorations du système proposé.

Groupe de travail « Plate-forme logicielle »

La coordination de ce groupe de travail était confiée à notre partenaire Fatronik. L'objectif était de concevoir et d'implémenter une plate-forme logicielle commune à tous les robots. Cette plateforme comprend une couche de communication « *peer to peer* » pour assurer la communication entre les différentes entités de l'essaim des robots. Cette couche est essentielle pour la prise de décision distribuée, fondée sur des algorithmes de négociation.

Groupe de travail intelligence en essaim « swarm »

La coordination de ce groupe de travail a été confiée à l'Ecole des Mines de Saint Etienne. Son objectif principal était de développer des stratégies d'exploitation de l'essaim de robots. Ces stratégies permettraient de répartir les tâches parmi le groupe des robots afin d'effectuer efficacement, de façon continue, les activités requises dans le domaine des soins.

Plus précisément, ce GT développe des stratégies d'optimisation pour la localisation et la configuration de l'ensemble du système robotique, des stratégies centralisées pour la planification de tâches et leur affectation afin de mieux répondre aux besoins des soins au fil du temps, et des stratégies de contrôle utilisant des méthodes de négociations conduisant à des décisions rapides et appropriées.

Groupe de travail « Évaluation et diffusion »

La coordination de ce groupe de travail a été confiée à l'université de Sakarya. Son objectif principal était d'identifier les domaines de recherches pouvant fournir une preuve que ce concept de système peut être utile à la communauté, notamment par la définition des critères d'évaluation et des scénarios de test d'un tel système robotique. Le deuxième objectif était de sensibiliser le public en démontrant l'intérêt scientifique de ce projet et ses résultats, ensuite, d'établir des accords commerciaux afin d'assurer l'introduction d'une telle technologie sur le marché.

Groupe de travail « Gestion du projet »

La coordination du projet était assurée par l'institut IAO. Ils avaient pour rôle de coordonner la mise en œuvre du plan du travail, d'organiser les réunions, d'établir les rapports sur l'état d'avancement du projet, de les soumettre à la commission européenne, de s'assurer de la qualité des résultats du projet, de fournir des ressources humaines, financières, techniques et comptables pour le volet managérial du projet.

1.4. Les réalisations clés du projet IWARD

A l'issue du projet, en février 2010, la commission européenne a validé le travail de ce consortium. Durant les trois années 2006 – 2009 le consortium a développé une équipe de trois robots de service. La conception modulaire permet d'équiper individuellement chaque robot avec plusieurs modules amovibles.

Les différentes fonctionnalités fournies par les quatre modules amovibles sont:

1. La livraison des médicaments dans un box fermant à clé,
2. Le nettoyage régulier de grandes surfaces prédéfinies, ou le nettoyage de déversements marqués devant être rapidement retirés
3. L'orientation et le guide des patients vers des lieux spécifiques en utilisant la technologie RFID pour mesurer la distance entre le robot et le patient.
4. La surveillance des conditions environnementales (température, humidité).

La consultation virtuelle et la surveillance des locaux sont assurées par l'écran et l'appareil vidéo qui font partie de la plateforme de base.

Un module fonctionnel inséré dans une fente de robot, est automatiquement alimenté par les batteries du robot grâce à un connecteur d'alimentation standard. Une fois sous tension, l'ordinateur embarqué du module démarre et exécute automatiquement le programme de connectivité « plug-and-play ». Ce programme établit un lien avec l'ordinateur du robot via une connexion Ethernet standard et démarre une session de communication avec le composant gestionnaire de matériel en cours d'exécution sur le robot. Le gestionnaire de matériel enregistre le module inséré, et, par conséquent, la connaissance partagée du système de robot est mise à jour. Cela signifie qu'à tout moment l'ensemble du système IWARD est conscient des modules disponibles sur des robots, ce qui rend possible l'exécution des missions.

Les trois robots utilisent un système à deux roues motrices différentielles, sont équipés d'une carte mère et de microprocesseurs de haute performance. Pour faciliter la navigation et la localisation, les trois robots incorporent un anneau de capteurs ultrasons, des capteurs de détection de collision infrarouge et un scanner laser.

La matrice de capteurs et d'interface du contrôleur a été conçue et construite à Newcastle suivant le cahier des charges fourni par Fatronik. Cette matrice comprend des capteurs ultrasons (*Senscomp série 600*) qui se sont avérés être beaucoup plus robustes et tolérants à l'interférence quand plusieurs robots sont exploités. De plus un scanner laser de haute précision de la gamme *Hokoyu finder ULG-04DX*, a été installé sur chacun des robots. Les données laser sont fusionnées avec les données du sonar pour améliorer les algorithmes d'évitement de collision et les algorithmes de localisation utilisant plan composite en format *bmp*.

Le système de gestion de l'alimentation et le contrôle des états des batteries a été mis au point par l'Université de Newcastle. Ce système se compose d'un microcontrôleur *ARM7 AT91SAM7S256*, d'un *Olimex SAM7-MT256* et d'un onduleur *PowerStream (Uninterruptible Power Supply)* qui permet d'effectuer un transfert d'énergie sans faille en s'alimentant de courant du secteur lorsque le robot est branché et ne pas épuiser l'énergie stockée à l'intérieur des batteries. Ce procédé permet de prolonger la durée de vie des batteries et d'augmenter la disponibilité des robots. Un tel dispositif permettra aussi d'effectuer des tests sur la

plateforme logicielle durant la période de recharge sans risquer de se faire vider les batteries de bord.

Afin d'améliorer l'efficacité du système robotique, des batteries amovibles ont été conçues et développées. Ces batteries ressemblent aux box de modules. Elles sont interchangeables entre les robots du même type, et sont branchées sur les fentes prévues pour les modules fonctionnels. Ces batteries servent généralement de source d'énergie d'appoint.

Le système de navigation conçu et mis en œuvre par Fatronik pour le projet IWARD suit une architecture classique. Ses principaux modules sont : la navigation locale, la localisation et le plan du chemin. Les deux derniers modules fonctionnent avec une carte géométrique de l'environnement où les caractéristiques statiques de l'environnement sont fournies sous format bitmap.

La coopération est fondamentale dans IWARD et l'aspect coopératif est présent dans toutes les couches et tous les composants du système. Tous les robots IWARD partagent leurs perceptions et les informations recueillies avec la communauté des robots IWARD. Les missions sont réparties grâce à un système de décisions distribué. De cette façon, les décisions sont prises par le système robotique de manière autonome et sont transparentes à l'utilisateur.

Le système de pilotage prend en compte la gestion de l'autonomie d'énergie des robots et leur rechargement grâce un système intelligent de gestion d'énergie capable de prévoir l'autonomie restante d'un robot.

L'interface homme-robot prend en compte l'ambiguïté de la dualité des interactions possibles. D'une part, les utilisateurs interagissent avec un robot spécifique pour accomplir une tâche, d'autre part, un robot pourrait être un membre quelconque de l'équipe, agissant comme une interface explicite entre équipe de robots et l'utilisateur.

1.5. Conclusion

Inspiré des orientations de recherche du sixième programme cadre de la robotique avancée, le projet IWARD vise un système robotique avec les caractéristiques suivantes :

- Ensemble de robots coordonnés pouvant offrir une valeur ajoutée à l'exécution des missions;
- Plate-forme robotique unifiée, basée sur des composants fiables et permettant la reproduction à bas prix;
- Répartition de travail flexible, extensibilité des fonctionnalités du robot, partage des connaissances ont été des points clé pour la polyvalence prévue par ce programme cadre;
- Environnement hospitalier choisi comme espace de fonctionnement pour le système robotique, offrant des capacités d'actions visées par le sixième programme cadre européen;
- Sécurité, robustesse et conformité aux normes d'éthique ont été les principales caractéristiques pour l'acceptation dans un milieu hospitalier, offrant ainsi des capacités d'actions visées par le programme cadre européen.

Chapitre 2.

Revue de littérature

2.1. Robotique en essaim

Un essaim de robots est un groupe de robots travaillant ensemble pour exécuter une tâche commune comme la lutte contre les incendies forestiers, ou le sauvetage en mer.



Figure 3 : Seaswarm, le robot nettoyeur de déchets pétroliers par Senseable de MIT

Le but de cette approche est d'étudier la conception d'un ensemble de robots et de faire émerger le comportement collectif souhaité, à travers les interactions entre robots «inter-robots» et entre les robots et l'environnement. Les études sur les robots en essaim s'inspirent souvent des comportements observés des insectes sociaux, et dénommée « intelligence en essaim ».

La robotique en essaim est issue de la bio-inspiration et dans la majorité des études dans ce domaine, les mêmes mécanismes biologiques au sein d'une collective sont adaptés sur des mécanismes de collectivités de robots. Dans certains exemples, les robots communiquent en déposant des signaux dans l'environnement, ce qui fait penser à la *stigmergie* utilisée par les insectes sociaux [Beckers 94],[Agassounon 04].



Figure 4 : Le comportement collectif des fourmis d'Argentine (*Linepithema humile*) formant un pont vivant a servi de source d'inspiration au développement de techniques d'intelligence en essaim. Photo par Guy Theraulaz, CNRS Toulouse

Beni et Wang étaient les premiers à utiliser le terme « intelligence en essaim » (*Swarm Intelligence*) dans leur article [Beni 89], pour décrire le comportement d'un groupe de robots coopérant, en se déplaçant et opérant de façon asynchrone et non séquentielle. A l'époque, ils proposaient une alternative à la terminologie de robotique cellulaire. En 2005 Beni a révisé sa définition initiale [Beni 05] en prenant en comptes les différentes extensions possibles.

D'après [Beni 05] un essaim est un groupe d'entités de plus d'une centaine, mais très inférieur au nombre d'Avogadro (10^{23}) ce qui nécessiterait dans ce cas des approches statiques pour résoudre le problème. Ces entités de comportement simpliste, sont quasi identiques et donc le contrôle de ces entités est décentralisé. Bien évidemment, ces entités opèrent en mode asynchrone ce qui leur confère des comportements temporellement indépendants où chaque entité profite de ses facultés de perception pour prendre ses décisions et entreprendre les actions conséquentes. Ces robots sont dotés d'une « aptitude à générer des schémas ordonnés de façon imprévisible, schémas sur lesquels une analyse est faite par chaque robot pour optimiser si besoin ses actions en vue d'atteindre un objectif collectif fixé à l'avance »

Plusieurs applications de robots en essaim ont été répertoriées, ces champs d'applications peuvent être divisés en plusieurs catégories :

A- L'exploration :

Dans cette application, les robots en essaim sont introduits dans un environnement inconnu. Ensuite l'essaim utilisera ses capacités collectives pour découvrir l'espace qui l'entoure. Zlot et al. ont utilisé la coordination par enchères pour attribuer les différentes zones aux différents membres de l'essaim [Zlot 06].

B- La couverture :

L'essaim est utilisé pour couvrir une zone géographique ou bien effectuer des passages par tous les points qui constituent cette zone. Ce problème est rencontré dans les applications comme les aspirateurs ou bien pour les tondeuses à gazon. Correll et al. comparent différentes méthodes de couverture comme l'échange d'information topologique par radio, la recherche aléatoire et des formes de couverture auto-organisées [Correll 08].

C- La localisation d'une cible :

Une multitude d'applications utilisent les essaims de robots pour trouver une cible. Les méthodes diffèrent selon la nature de la cible, sa localisation ainsi que son environnement. Hayes et al. présentent une applications où un essaim de robots est utilisé pour localiser une source d'odeur [Hayes 02]. De même, les essaims de robots aussi utilisés dans les sauvetages en mer pour localiser un naufragé.

D- La manipulation collective :

L'avantage essentiel d'un essaim de robots est le collectif, où l'ensemble de robots coopèrent pour exécuter une tâche impossible pour un seul robot. Dans la littérature on peut trouver plusieurs exemples où un essaim de robots s'entraide pour effectuer une manipulation physique comme le transport. Nous citons les applications suivantes : le transport collectif d'un objet [Kube 00], le transport d'une agrégation d'objets [Martinoli 99], le transport d'une ségrégation d'objets [Wilson 04] et l'extraction de tiges de leurs emplacements [Ijspeert 01].

E- Le fourragement :

Certains prétendent que les méthodes de colonies de fourmis et des insectes sociaux étaient les précurseurs des méthodes d'intelligence en essaim et de la robotique en essaim plus particulièrement. Le lien entre ces méthodes est bien perceptible, dans les travaux sur le fourragement, où un essaim est appelé à localiser des cibles et à les rassembler en un seul point. Cette application fait penser aux fourmis cherchant leur nourriture et la ramenant à la niche. [Krieger 00] et [Rybski 07] ont comparé différents types de communications appliquées dans une telle situation.

2.2. Discordances entre les caractéristiques des robots en essaim et les spécificités des robots IWARD

2.2.1. Principes de la robotique en essaim

Mark Millonas s'est inspiré des algorithmes des colonies des fourmis pour proposer cinq principes qui caractérisent l'intelligence par essaim [Millonas 93], qui sont également valables pour la robotique en essaim :

Le principe de proximité : les robots/entités doivent pouvoir interagir avec leur environnement, répondre aux signaux/stimuli émis d'autres membres du groupe ou de l'environnement même. Cela implique que les robots doivent avoir une certaine faculté de calcul et de prise de décision, afin de répondre à ces signaux et de favoriser l'action qui sera la plus bénéfique pour le groupe.

Le principe de qualité : la notion de prise de décision, sous entend un objectif recherché et des critères de qualité à respecter. Dans le cas de l'intelligence en essaim ce serait un critère de qualité pour l'essaim (choix et qualité de la source de nourriture dans le cas de recherche de nourriture par un essaim).

Le principe de réponse diversifiée : Afin de mieux faire face aux différents aléas et aux changements environnementaux, l'essaim doit pouvoir diversifier ses réponses et inspecter un ensemble de possibilités.

Le principe de stabilité : Afin de minimiser la perte d'énergie et d'effort, l'essaim doit éviter les basculements systématiques d'un état à un autre, suite à des changements mineurs. Certaines précautions évitant le basculement doivent être mises en place. Ce principe complète le principe précédent.

Le principe d'adaptabilité : L'essaim doit pouvoir changer son mode de fonctionnement, pour s'adapter avec une nouvelle situation dans le cas où le mode de fonctionnement actuel n'est plus satisfaisant.

On Résume les propriétés et caractéristiques des robots en essaim par:

- des unités simples à reproduire, interchangeable, voire même jetables.
- des unités redondantes, dans certains cas quasi-identiques, ce qui permet au système d'être plus fiable face à des perturbations et diverses pannes.
- ces unités possèdent des facultés d'adaptation avec l'environnement.
- ces unités sont dotées de capacités de calcul pouvant résoudre des problèmes complexes.

2.2.2. Caractéristiques du projet IWARD et exigences de la logistique hospitalière.

Le but du projet IWARD est de développer un système de robots mobiles de taille moyenne qui peuvent être équipés de modules additionnels, reliés par un système de communication sans faille, coordonné par des stratégies distribuées/ hybrides pour atteindre les comportements collectifs souhaités, et capable d'effectuer différents types de missions en même temps dans le contexte de l'hôpital afin d'optimiser des indicateurs de performances importants. Les technologies « Plug and play » sont élaborées afin que les modules puissent être facilement insérés et retirés des robots de base par des infirmières ne possédant pas la moindre connaissance de la robotique et des modules.

Partant d'une étude préliminaire des besoins des hôpitaux et des spécifications, le projet IWARD a choisi de cibler six scénarios : (i) la livraison des médicaments, des notes, des films de rayons X et des objets personnels, (ii) le nettoyage régulier ou non planifié lors de déversements, des chambres des patients (iii) la guide des patients et des visiteurs à l'intérieur d'un hôpital, (iv) la surveillance des patients et des intrus, (v) la consultation virtuelle, (vi) la surveillance environnementale.

2.2.3. Les différences entre les robots IWARD et les robots en essaim

Les principales caractéristiques de la robotique en essaim classique ne s'accordent pas avec les exigences de la logistique hospitalière considérées dans le cadre du projet IWARD. Nous montrons dans le tableau ci-dessous les différences entre le concept classique et les exigences adoptées.

Robots en Essaim	Exigences de robots de service en milieu hospitaliers
Travail collectif sur une seule tâche.	Variétés de missions simultanées la livraison, le nettoyage...
Nombre important de robots "physiques" relativement simple.	Nombre limité de robots « physiques ».
Le comportement collectif souhaité est issu des interactions inter-robots et les interactions avec l'environnement.	Les robots doivent se coordonner en respectant les exigences du milieu hospitalier.
Utilisation uniquement d'une communication locale.	Des communications sans faille (sans échec) sont une nécessité.
Tâches demandant une miniaturisation extrême.	Besoins de robots de taille moyenne.
Tâches demandant une conception à prix extrêmement réduit.	Des robots à prix raisonnables.

Tableau 2: Différences entre les robots en essaim et les robots IWARD

Cette analyse dévoile des inadéquations importantes entre le concept classique des robots en essaim et les spécificités des robots de services pour la logistique hospitalière. Ceci nous amène à implémenter notre propre concept de groupe de robots qui répond mieux aux exigences de l'assistance robotique en milieu hospitalier. Cependant nous nous inspirons des techniques de coordination par enchères souvent utilisées par les robots en essaim pour le pilotage en temps réel de notre système robotique.

2.3. Problèmes de localisation

Les problèmes de localisation ont été largement étudiés. De nombreux chercheurs se sont intéressés aux problèmes de localisation des usines et de configuration des réseaux de distribution au niveau domestique ou global. Alfred Weber était parmi les premiers, à étudier les effets de l'emplacement des usines entre les clients et les fournisseurs de matières premières sur les coûts de transport de marchandises [Weber 1909]. Nous donnons ci-après les principaux modèles de location des sites étudiés.

2.3.1. Le modèle P-median

Hakimi était l'un des premiers à formuler un problème de localisation [Hakimi 64] comme un programme linéaire. Il a introduit le modèle P-Median sur l'ouverture de P usines parmi un ensemble J de sites candidats, afin de minimiser le coût total de transport entre les usines et les clients. Les demandes (clients) ont été regroupées par zones de demande I . Soit μ_i le volume de demande du client i et d_{ij} le coût unitaire de transport entre le site j et le client i . Les variables de décisions sont X_j et Y_{ij} où :

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si le site } j \text{ est choisi} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le client } i \text{ est affecté à l'usine } j \\ 0, & \text{si non} \end{cases}$$

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \mu_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2-1)$$

Sous contraintes:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2-2)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (2-3)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-4)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-5)$$

La fonction objectif (2-1) minimise les coûts de transport entre les usines et les clients. Les contraintes (2-2) garantissent l'affectation de chaque client à une usine. La contrainte (2-3) limite le nombre des usines à ouvrir. Les contraintes (2-4) assurent que les clients seront affectés à une usine choisie et les contraintes (2-5) sont les contraintes d'intégrité des variables de décisions.

En introduisant le problème, [Hakimi 64] a initialement proposé de résoudre le problème par simple énumération exhaustive. Comme le problème a été prouvé NP difficile [Garey 79], des méthodes dédiées par séparation et évaluation (*Branch and Bound*) ont été proposées ([Maranzana 64], [Efroymson 66], [Jarvinen 72], ...). D'autres chercheurs ont proposé des méthodes basées sur des heuristiques. On trouve des heuristiques simples telles que les heuristiques de permutation ([Teitz 68], [Densham 92]). Des heuristiques plus sophistiquées et plus performantes ont également été proposées à l'aide de la relaxation Lagrangienne, la génération de colonnes, la recherche tabou ou les algorithmes génétiques ([Galvao 93], [Beasley 93], ...). Une étude de ces heuristiques peut être trouvée dans le livre « Network and Discret Location » [Daskin 95].

2.3.2. Le modèle P-center

Le modèle P-Center est une extension du problème P-Median. Dans ce modèle le but est de minimiser la distance maximale entre les clients et les centres de distribution (usines) au lieu de minimiser la somme des couts de transport. Ce modèle est souvent utilisé pour localiser les ambulances ou bien des centres de soins afin de répondre aux besoins urgents dans les plus brefs délais. Les variables de décision sont celles du modèle P-Median, plus une nouvelle variable réelle W qui représente la distance maximale entre les sites choisis et les clients.

$$\text{Minimize } W \quad (2-6)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2-7)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq P \quad (2-8)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-9)$$

$$\sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij} \leq W \quad \forall i \in I \quad (2-10)$$

$$W \geq 0; X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-11)$$

La fonction objective (2-6) a pour but de minimiser la distance maximale. Les contraintes (2-7), (2-8) et (2-9) sont les même que (2-2), (2-3) et (2-4). Les contraintes (2-10) permettent de déterminer la distance maximale entre les sites choisis et les clients.

Hakimi a proposé une modélisation de ce problème en 1965 [Hakimi 65], Kariv et al. ont démontré la NP-difficulté [Kariv 79]. Les méthodes de résolution proposées dans la littérature sont similaires à celles du modèle p-médian ([Minieka 70], [Mirchandani 79], [Martinich 88], [Handler 90], [Pullan 08]).

2.3.3. Localisation de sites avec coûts fixes

Cette famille de modèles, intitulés « problème de localisation de sites avec coûts fixes » (*Fixed charge Facility Location Problem*), est caractérisée par la prise en compte des coûts fixes pour l'ouverture d'un site correspondant aux coûts de la construction ou de l'acquisition d'un site. Elle se décline en deux sous-familles : « *Uncapacitated Fixed charge Facility Location Problem (UCFLP)* » (Localisation de sites à capacité illimitée avec coûts fixes) et « *Capacitated Fixed charge Facility Location Problem (CFLP)* » (Localisation de sites à capacité limitée avec coûts fixes).

Localisation de sites à capacité illimitée avec coûts fixes

Le problème *UCFLP* aussi connu sous le nom de « *Uncapacitated Facility Location (UFL)* » a été formulé dans [Cornuéjols 90] comme suit :

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j X_j + \alpha \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \mu_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2-12)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2-13)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-14)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-15)$$

où f_j est le coût fixe d'implantation du site j et α est la coût de transport d'une unité de produit pour une unité de distance.

La fonction objective (2-12) a pour objectif la minimisation des coûts d'implantation des sites et des couts de transport. Le paramètre α est lié à l'amortissement des investissements liés aux coûts fixes et permet donc de comparer les coûts fixes et les coûts de transport qui sont des coûts opérationnels. Les contraintes (2-13), (2-14) et (2-15) sont identiques aux contraintes (2-2), (2-4) et (2-5) du modèle P-Median. Dans ce modèle on a repris toutes les contraintes du

modèle P-Median sauf celle limitant le nombre de sites (2-3) qui est remplacée par des coûts fixes.

ADD [Kuehn 63] et DROP [Feldman 66] sont les deux premières heuristiques pour ce modèle UFL. ADD part d'une configuration vide et ajoute chaque fois un seul nouveau site de manière à réduire le coût total le plus possible. DROP part d'une configuration où tous les sites potentiels sont choisis et retire chaque fois un site permettant une diminution la plus importante possible du coût total.

On trouve aussi dans la littérature différentes méthodes applicables au problème comme la relaxation ([Geoffrion 74], [Galvao 93] et [Daskin 95]), la recherche tabou ([Al-Sultan 99], [Sun 06]), des heuristiques de voisinage ([Hansen 98], [Ghosh 03]).

Localisation de sites à capacité limitée avec coûts fixes

Dans ce modèle CPLP, *Capacitated Plant Location Problem*, les capacités de production / stockage des sites sont considérées en plus des contraintes du modèle UFL. Ce modèle a été formulé pour la première fois par [Balinski 61] comme suit :

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j X_j + \alpha \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \mu_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2-16)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2-17)$$

$$\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} \leq \text{MAX}_j X_j \quad \forall j \in J \quad (2-18)$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-19)$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2-20)$$

où MAX_j est la capacité maximale du site j et les autres notations sont celles du modèle UFL.

Les modèles UFL et CPLP ont la même fonction objectif (2-12) et (2-16). Les contraintes (2-17), (2-19) et (2-20) du CPLP sont équivalentes aux contraintes (2-13), (2-14) et (2-15) du modèle UFL. La seule différence entre ces deux modèles sont les contraintes (2-18) qui limitent la production/ stockage des sites dans le modèle CPLP.

On trouve dans la littérature des méthodes exactes fondées sur la séparation et l'évaluation (Branch and Bound) ([Efroymson 66] et [Spielberg 69]). Sridharan a proposé de résoudre le problème en utilisant la relaxation lagrangienne [Sridharan 95]. Daskin a dressé un état de l'art complet des algorithmes développés pour résoudre le CPLP dans l'ouvrage [Daskin 95].

2.3.4. Les problèmes de recouvrement

Dans le cadre de localisation des services des soins et notamment pour le problème de localisation des ambulances, la notion d'urgence est primordiale par rapport aux coûts de transport. L'objectif principal est de pouvoir satisfaire une demande quelconque en deçà d'une

limite de temps donnée. En présence d'une telle limite de temps, un fournisseur de service en particulier une ambulance ne peut couvrir que les demandes dans un certain rayon afin de respecter le temps de réponse requis.

Problème de la couverture totale

Le problème de couverture totale « *Location Set Covering Model (LSCM)* » a été introduit par [Toregas 71]. Ce modèle consiste à déterminer le nombre de fournisseurs de service nécessaire pour couvrir toutes les demandes. Dans le cadre de notre étude, il est envisageable d'utiliser ce modèle pour calculer le nombre de robots à affecter à un service donné, afin de répondre à toutes les demandes urgente reçues.

Le problème de la couverture totale est le suivant :

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j X_j \quad (2-21)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j \in J} b_{ij} X_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2-22)$$

$$X_j \in \{0;1\} \quad \forall j \in J \quad (2-23)$$

où b_{ij} est un paramètre tel que :

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le site } j \text{ peut répondre au besoin de } i \text{ dans l'intervalle de temps requis} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

La fonction objectif (2-21) a pour but de minimiser les coûts d'implantation des fournisseurs de service. Les contraintes (2-22) garantissent la couverture de tous les sites. Les contraintes (2-23) sont des contraintes d'intégrité.

Dans certains cas, un client doit être couvert par plusieurs fournisseurs de services. Alors nous remplaçons la borne inférieure des contraintes (2-22) par le nombre requis de fournisseurs.

Garfinkel et al. ont proposé une méthode basée sur l'algorithme de séparation et évaluation (*Branch and Bound*) [Garfinkel 72], Feo et al. ont proposé d'utiliser la méta-heuristique GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) pour résoudre ce problème [Feo 95]. Beasley et al. ont proposé de résoudre ce problème en utilisant les algorithmes génétiques [Beasley 96] ainsi qu'en utilisant la relaxation lagrangienne [Beasley 90]. Et plus récemment Ricardo et al. ont utilisé les colonies de fourmis pour localiser les antennes de diffusion [Silva 01]

Ce modèle peut être étendu pour couvrir d'autres applications, Daskin, Jones et Lowe l'ont utilisé pour un problème de sélection d'outils dans les ateliers flexibles [Daskin 90], et Desrochers et al. l'ont appliqué sur le problème de gestion de personnels dans les compagnies aériennes [Desrochers 91].

Problème de couverture maximale

Evidemment, le problème de couverture maximale « *Maximal Covering Location Problem (MCLP)* » utilise aussi la notion de couverture. Dans ce modèle le nombre de fournisseurs de service est limité à N et le but est de couvrir le plus de demandes possibles. Church et Revelle étaient les premiers à modéliser formellement ce problème [Church 74]. Afin de modéliser ce problème, nous utilisons les mêmes notations que les modèles précédents, et nous introduisons en plus une nouvelle variable de décision Z_i où :

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{si la zone de demande } i \text{ est couverte} \\ 0 & \text{si aucun fournisseur de service n'est assez proche} \end{cases}$$

Le modèle MCLP peut être formulé de la façon suivante :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \mu_i Z_i \quad (2-24)$$

Sous contraintes :

$$Z_i \leq \sum_{j \in J} b_{ij} X_j \quad \forall i \in I \quad (2-25)$$

$$\sum_{j \in J} X_j \leq N \quad (2-26)$$

$$Z_i, X_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2-27)$$

La fonction objectif (2-24) a pour but de maximiser les zones de demande (clients) qui sont servies (couverts) par un site (fournisseur de service). Les contraintes (2-25) assurent qu'une zone de demande ne peut pas être considérée comme servie (couverte) que si l'un des sites dans le rayon de couverture est ouvert (opérationnel). La contrainte (2-26) limite le nombre de sites opérationnels à N , et les contraintes (2-27) sont des contraintes d'intégrité.

A partir de ce modèle plusieurs modèles ont émergés, essentiellement dans le cadre des problèmes de localisation d'ambulance. Dans un modèle dit de couverture avec solution de secours « *Backup coverage problem* », Hogan et Revelle ont introduit les modèles *BACOP1* et *BACOP2*. Dans ces modèles, une zone de demande est doublement couverte par deux ambulances, afin qu'une ambulance puisse répondre si l'autre est déjà occupée [Hogan 86]. Schilling et al. ont introduit les modèles *FLEET* et *TEAM* où deux types de véhicules (fournisseur de service) existent avec deux rayons de couverture [Schilling 79]. Gendreau et al. ont introduit le modèle double standard « *Double Standard Model (DSM)* » où chaque fournisseur a deux rayons de couverture et le but est de maximiser le nombre de zones de demande doublement couverts [Gendreau 97]. Une extension stochastique du MCLP a été introduite par Daskin [Daskin 83], pour prendre en compte les probabilités d'indisponibilité des fournisseurs de service (ambulance). Ce modèle est connu sous le nom du « *Maximal Expected covering Location Problem (MEXCLP)* ».