

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉPLOIEMENT DE PASSERELLES POUR L'INTÉGRATION DU RÉSEAU
CAPILLAIRE DANS LE RÉSEAU CELLULAIRE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR
FRANÇOISE REBECCA

AVRIL 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je remercie ma mère Rose-Marie Medena ainsi que mes frères Jean Maxo Cesar et Isaac Rebecca qui m'ont constamment encouragé et qui n'ont jamais cessé de croire en ma réussite.

Un grand merci à mon directeur de projet, monsieur Wessam Ajib pour son support. Ma profonde gratitude à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et aider de près comme de loin durant mes études à l'Université du Québec À Montréal (UQAM), en particulier Naomie Bousseau, Rev. Martha Mercec, Tamara Rosenberg, Nick Perna August, Beno August, Manon Demers Wise, Ulrich Matchi AÏVODJI, Steve Ataky, Mlika Zoubeir, Chantal Delorme, Bryan Coutu.

Je remercie également, tous mes collègues du laboratoire TRIME qui ont rendu l'atmosphère de travail agréable.

Françoise Rebecca

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
RÉSUMÉ	vii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	4
1.1 Mise en contexte	4
1.2 Motivation	5
1.3 Problématique	8
1.4 Méthodologie et contribution	10
1.5 Organisation de l'ouvrage	11
CHAPITRE II	
COMMUNICATION ENTRE MACHINES : GÉNÉRALITÉS	13
2.1 Introduction	13
2.2 Communication dans le réseau M2M	13
2.2.1 Communication capillaire	14
2.2.2 Communication cellulaire	14
2.2.3 La communication entre machines : domaines d'application	15
2.2.4 Protocole de communication utilisé dans les communications entre machines	17
CHAPITRE III	
ÉTAT DE L'ART	21
3.1 Introduction	21
3.2 L'intégration des machines dans les réseaux cellulaires	21
3.3 Les différentes méthodes et techniques présentées	22
3.3.1 Sélection de passerelles	22

3.3.2	Groupement	23
3.3.3	Emplacement de passerelle	24
3.4	Approches	26
3.4.1	Algorithme des Colonies d'abeilles artificielles (ABC) et l'algorithme des essaims particuliers (PSO)	27
3.5	Discussion	31
CHAPITRE IV		
MODÈLE DU SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME		32
4.1	Architecture du modèle de système	32
4.2	Modèle de communication	33
4.3	Formulation du problème	34
CHAPITRE V		
SOLUTION		38
5.1	Algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC)	39
5.1.1	Présentation des étapes de l'algorithme	40
5.1.2	Stratégie d'emplacement des passerelles	41
CHAPITRE VI		
ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS		44
6.1	Introduction	44
6.2	Simulations	44
6.2.1	Environnement considéré	45
6.2.2	Sélection optimale des passerelles utilisant l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles	45
6.2.3	Scénario d'exemple	46
6.2.4	Résultats	47
CHAPITRE VII		
CONCLUSION		50
RÉFÉRENCES		52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Différence entre usagers cellulaires et machines	6
2.1 Communication directe ou via une passerelle entre les machines et la station de base.	15
2.2 Domaines d'application de la communication entre machines . . .	16
2.3 Protocoles de communication de longue portée à faible puissance. LM et LD est mis pour la communication en liaison montante et liaison descendante respectivement.	19
2.4 Comparaison entre CoAP et MQTT (Pereira et Aguiar, 2014). . .	20
6.1 Paramètres de la simulation	45
6.2 Liste des machines faisant partie de la solution.	46
6.3 Résultats statistiques de la moyenne, la déviation standard du pourcentage de machines utilisé comme passerelles, la solution dans le meilleur et le pire des cas.	48
6.4 Pourcentage de coût moyen en %, fitness (coût) totale des solutions dans le meilleur cas et le pire cas pour chaque ensemble.	49

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Exemple de communication entre machines.	7
1.2 Étapes de la résolution du problème.	11
2.1 Passerelle reliant les communications M2M capillaires et cellulaires (Chen <i>et al.</i> , 2014).	14
2.2 Comparaison de la consommation d'énergie normalisée pour chaque protocole (Pothuganti et Chitneni, 2014).	18
4.1 Architecture du modèle du système	33
6.1 Un scénario du problème (Dabibi <i>et al.</i> , 2016).	47

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, il est largement accepté que l'intégration de la nouvelle technologie des communications machine-à-machine dans les réseaux mobiles est un sujet de recherche très important. Toutefois, la connexion d'un grand nombre de machines au réseau cellulaire peut affecter négativement les performances de ce dernier en ayant un impact négatif sur la qualité de service offerte aux utilisateurs du réseau cellulaire et sur les ressources disponibles. En effet, la demande de signalisation très fréquente générée par les machines et envoyée à la station de base peut produire une congestion qui résulterait à une dégradation ou même à un arrêt de service dans le réseau cellulaire ainsi que dans la communication entre machines.

Notre travail de recherche se focalise sur les mécanismes permettant la couverture maximum de machines utilisant un réseau cellulaire sans pour autant dégrader la qualité de service des usagers cellulaires. Cette couverture doit également permettre aux machines de pouvoir communiquer en dépensant le minimum d'énergie possible dans la transmission.

La réalisation de notre projet consiste à intégrer le réseau capillaire dans le réseau cellulaire pour une communication efficace entre les machines. Il est crucial de déterminer de façon efficace l'emplacement des passerelles pour la formation de réseaux capillaires à faible coût. De ce fait, nous essayons de répondre à la question : y a-t-il un moyen de trouver efficacement l'emplacement d'un nombre minimal de passerelles qui soit capable de servir toutes les machines du réseau à un faible coût ? L'utilisation d'une approche basée sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC) nous a permis de répondre à cette question.

Le résultat de nos simulations nous montre que l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles peut être utilisé pour sélectionner efficacement les emplacements des passerelles et pour minimiser le coût dans la communication entre machines.

Mots clés : Communication entre machines, réseau capillaire, emplacement de passerelles, couverture par ensembles.

ABSTRACT

Nowadays, it is widely accepted that integrating the new technology of machine-to-machine communications with cellular networks is a hot research topic towards 5G. However, connecting a large number of machines to the cellular network may affect negatively the performance of the latter by impacting the quality of service seen by cellular users and available resources. Indeed, frequent signaling generated by the machines and sent to the base station can produce congestion which would deteriorate or even stop the service in the cellular network as well as in the machine type communication.

Our research work focuses on the mechanisms allowing a maximum coverage for the machines using a cellular network without negatively affecting the quality of service of cellular users. This coverage must also allow the machines to be able to communicate by spending the least energy possible in the transmission. We will try to answer the following question : is there a gateways placement that is efficient to cover all the machines at minimal cost ? The use of an approach based on the artificial bee colony algorithm help us to answer this question.

The results of our simulations show that the artificial bee colony algorithm (ABC) can be used for an efficient gateways placement selection process and minimize the communication cost between machines.

Index Terms : machine type communication, capillary network, gateway location, set covering.

ACRONYMES

ETSI	Institut européen des normes de télécommunications (European Telecommunication Standards Institut)
3GPP	Projet de partenariat de troisième génération (Third Generation Partnership Project en anglais)
LTE	Évolution à long terme (Long Term Evolution)
M2M	Machine à Machine (Machine-to-Machine)
Wi-Fi	Fidélité sans fil (Wireless fidelity)
GPS	Système de positionnement global (Global Positioning System)
2G, 3G, 4G	deuxième, troisième, quatrième génération de technologies cellulaires. (2nd, 3rd, 4th generation cellular technology.)
IoT	Internet des objets (Internet of things)
LoRa	Longue portée (Long Range)
CoAP	Applications contraintes (Constrained Application)
UDP	Protocole de datagramme utilisateur (User Datagram Protocol)

TCP	Protocole de contrôle de transmission (Transmission Control Protocol)
HTTP	Protocole de transfert hypertexte (Hypertext Transfer Protocol)
MQTT	Transport par télémétrie des messages en file d'attente (Message Queuing Telemetry Transport)
RACH	Canal à accès aléatoire (Random Access Channel)
TTAMA	Agrégation à deux niveaux pour des applications à cibles multiples (Two-tier Aggregation for Multi-target Applications)
EANOC	Clustering axé sur le voisinage et sensible à l'énergie (Energy Aware Neighbor Oriented Clustering)
MAC	Contrôle d'accès moyen (Medium Access Control)
SIM	Modules d'identité d'abonné (Subscriber Identity Module)
DDR4	4ème génération de taux de données double (Double Data Rate 4th generation)

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La communication entre machines apporte un nouvel air dans la technologie de communication, où un grand nombre de «dispositifs intelligents» peuvent communiquer entre eux de manière autonome et prendre des décisions sans qu'aucune intervention humaine directe soit nécessaire (Igarashi *et al.*, 2012). Ces machines sont exploitables utilement dans le domaine de la santé, le domaine militaire, le trafic routier, la navigation pour ne citer que ceux-là. En outre, la communication entre machines a également pour avantages de faciliter l'implantation et le déploiement de l'Internet des objets ainsi que l'accès à des informations inaccessibles autrefois.

Vu l'importance de la communication entre machines dans notre quotidien et notre futur, il devient impératif d'assurer une couverture globale aux machines de manière à tirer le maximum de profit. Pour ce faire, une solution considérable est l'utilisation des réseaux cellulaires. En effet, ayant déjà connu un essor prodigieux dans les services mobiles, les réseaux cellulaires offrent une couverture globale. Cette couverture permet ainsi une connexion à grande échelle indépendante du facteur de temps et du lieu. L'atteinte d'un niveau important de performance dans la communication entre machines utilisant le réseau cellulaire dépend de différentes

ressources comme : la mémoire, la puissance de calcul et l'énergie disponible. Il est donc crucial de mettre en place un bon moyen de communication dans le réseau de machines afin de pouvoir obtenir efficacement les avantages offerts par cette nouvelle technologie.

1.2 Motivation

Le nombre de machines connectées à l'Internet ou à d'autres réseaux augmente de façon exponentielle. Selon une enquête menée par (Chen *et al.*, 2014) plus de 50 milliards de machines seraient connectées vers l'année 2020. Prendre en charge toutes ces machines dans le réseau cellulaire sera très coûteux surtout en terme de ressources radio.

Pour bénéficier des avantages offerts par les réseaux cellulaires, les machines doivent s'adapter à l'architecture déjà établie de ces réseaux, ce qui soulève un grand défi. Pour avoir une idée concrète des attentes de la communication entre machines au réseau cellulaire, les auteurs (Xia *et al.*, 2018) établissent un parallèle entre les exigences dans la communication d'un usager cellulaire avec le réseau cellulaire (ce type de communication est dite humain-à-humain) et la communication entre machines dans le réseau cellulaire (tableau 1.1). L'une des remarques faites par ces auteurs est que les dispositifs impliqués dans la communication humain-à-humain ont toujours à peu près les mêmes exigences tandis que les machines peuvent avoir diverses exigences que ce soit en termes de qualité de service, communication en liaison montante, de coût énergétique, etc. Il est devenu important que le réseau cellulaire puisse prendre en charge un grand nombre de machines limitées en termes de ressources et ayant divers exigences sans pour autant mettre en jeu la qualité de service offerte aux usagers cellulaires.

Selon (Fan *et al.*, 2014), plusieurs standards ont été proposés pour la coexistence des deux technologies. Ils ont présenté par exemple les standards proposés

Tableau 1.1 Différence entre usagers cellulaires et machines

Usagers du réseau cellulaire	Communication entre machines
Les paquets de données circulent en liaison descendante	Les paquets de rapport périodique représentent une grande proportion du trafic total en liaison montante
Le rôle principal de la liaison montante est de transmettre des informations de contrôle et d'assurer l'information de retour (dit Feedback)	La liaison descendante transmet occasionnellement une chaîne d'information ou autres information de contrôle
Les usagers cellulaires exigent un débit de données très élevé	La taille moyenne des paquets par transmission est très petite. Par contre, le volume global du trafic peut être très important
Une cellule peut contenir au plus plusieurs centaines d'usagers cellulaires	Le nombre de machines par cellule peut être au moins des dizaines de milliers
Les exigences de services des usagers cellulaires sont similaires	Les exigences de services peuvent varier d'une machine à une autre

par l'ETSI (European Telecommunication Standards Institut) qui se focalisent sur les services et les exigences opérationnelles pour des solutions et une architecture de bout-en-bout dans la communication entre machines. Le 3GPP (Third Generation Partnership Project) quant à lui considère l'optimisation de l'accès et le réseau d'infrastructure de base. Enfin, L'IETF-CORE (Internet Engineering Task Force Constrained RESTful Environment), pour ne citer que ceux-là, se focalise sur le développement des services web embarqués pour les applications machines/internet des objets. Comme illustré dans la Figure 1.1, l'architecture fonctionnelle du réseau de machines comprend trois parties principales : la première partie est le domaine de machines et passerelles, la deuxième partie fait référence au domaine réseau (ETSI, 2013), et enfin la troisième est le domaine d'application. Le domaine de machines et passerelles comprend les éléments interconnectés tels que : les machines, les passerelles et le réseau de communication qui les interconnecte (par exemple un réseau basé sur Zigbee). Dans le domaine

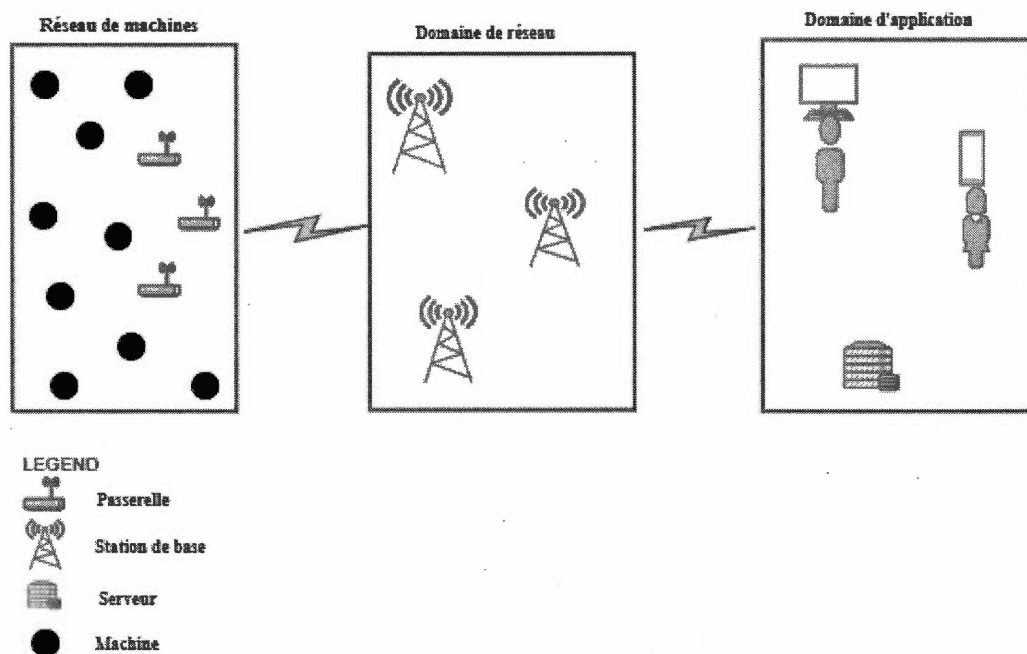


Figure 1.1 Exemple de communication entre machines.

réseau, on a le réseau d'accès (par exemple LTE) avec toutes les propriétés caractéristiques essentielles pour la communication de longue portée.

Cependant, le moyen de communication utilisé peut être un obstacle pour les deux technologies. Prenons par exemple le fait que, dans un environnement donné, des milliers de machines essaient d'établir une connexion avec la station de base : le risque de congestion est évident. De plus, les machines risquent de consommer beaucoup d'énergie selon leur distance par rapport à la station de base. On peut en déduire que, plus le nombre de machines accédant à la station de base est élevé, plus le risque de congestion est grand. Également, on peut en déduire que plus la distance entre les machines et la station de base est importante, plus l'énergie nécessaire pour la communication est importante.

1.3 Problématique

La communication entre machines permettrait aux opérateurs de réseaux mobiles de réaliser des profits importants, si un grand nombre de machines peut être efficacement pris en charge par les réseaux cellulaires (Dawy *et al.*, 2017). Car en raison de son infrastructure globale déjà établie, le réseau cellulaire représente le candidat idéal pour la mise en place des applications de la technologie de communication entre machines. Cependant, avec l'accroissement exponentiel des machines connectées il devient de plus en plus difficile de maintenir un certain niveau de performance dans le réseau cellulaire qui a été principalement conçu pour la communication humain-à-humain.

Quatre raisons intrinsèques sont responsables de l'incohérence entre le réseau de machines et le réseau cellulaire :

1. La taille des paquets de données : la taille des paquets de données varie d'une machine à une autre, ce qui a un impact sur l'utilisation des ressources radio du réseau cellulaire.
2. Les exigences : les exigences des machines en terme de performance et de qualité de service ne sont pas les mêmes que celles des usagers du réseau cellulaire.
3. Le nombre de machines : le nombre important de machines voulant accéder simultanément à la station de base représente une menace pour le réseau cellulaire.
4. La limitation de ressources : les capteurs utilisés dans les machines sont alimentés par des batteries. Ils ont de faible puissance de calcul et une insuffisance de mémoire.

Ces faits sont critiques non seulement pour le réseau cellulaire mais aussi pour le réseau de machines qui doit pouvoir de son côté s'adapter à l'architecture du

réseau cellulaire déjà établie. Les machines sont contraintes en terme de ressources énergétique, c'est la raison pour laquelle, lors du déploiement d'un réseau de machines, il est essentiel de considérer l'aspect énergétique.

Les machines consomment de l'énergie de deux manières : soit en communiquant, soit en faisant des calculs. La principale source de consommation énergétique est la communication (Iyengar et Brooks, 2016). Le niveau d'énergie dépensée dans la transmission est influencé par divers facteurs comme le moyen de communication utilisé dans le réseau, la distance entre l'émetteur et le récepteur, la collision entre les paquets, l'interférence, etc. Vu que les machines ont des contraintes sévères en termes de ressources, prolonger la durée de vie du réseau devient crucial. Un des moyens de communication souvent utilisé dans le réseau de machines est la communication entre machines proches pour envoyer de l'information à la station de base. L'inconvénient est que certaines machines se vident de leur énergie disponible plus rapidement que d'autres. On peut prendre par exemple la machine la plus proche de la station de base que toutes les autres machines du réseau auront tendance à solliciter. De ce fait, augmenter la durée de vie de tels réseaux devient complexe car, la durée de vie du réseau est relative à l'énergie disponible dans chacune des machines.

La communication entre machines a besoin non seulement d'une couverture étendue mais aussi d'un support de mobilité, une faible latence et une plus longue durée de vie des batteries des machines. La station de base à elle seule ne pourra donc pas répondre aux besoins des usagers de la communication humain-à-humain si l'on ajoute en plus toutes ces machines. Car l'accès multiple et simultané des machines à la station de base peut causer un délai intolérable, une perte de paquets, une probabilité élevée de collision et même une dégradation de performance ou une interruption de service dans la communication entre machines et dans la communication des usagers cellulaires (Lien *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2012).

Cependant, l'utilisation d'un certain nombre de passerelles de manière distribuée en collaboration avec la station de base peut garantir une couverture plus efficace aux machines.

Selon (Novo et al, 2015), le concept de réseau capillaire a été conçu pour permettre aux réseaux de capteurs sans fil de se connecter efficacement aux réseaux cellulaires au moyen de passerelles. Cette technique est très bénéfique dans la mesure où les machines sont associées à la bonne passerelle, en occurrence la passerelle la plus proche.

Dans le cadre de notre projet, on se focalise sur l'intégration du réseau capillaire aux réseaux cellulaires qui est un moyen de faciliter la coexistence des technologies de réseaux cellulaires et de communication entre machines. Notre objectif consiste à sélectionner le minimum de passerelles qui maximise la couverture des machines à un faible coût. L'emplacement optimal des passerelles offre les avantages suivants : diminuer la distance de communication entre les machines et la station de base, limiter le nombre de requêtes d'accès à la station de base, utilisation efficace des ressources radio du réseau cellulaire par les machines, etc.

1.4 Méthodologie et contribution

L'utilisation de passerelles par les machines pour accéder à un service distant représente une solution bénéfique, cela leur permet de dépenser le moins d'énergie possible dans la transmission. L'utilisation de passerelles par les machines pour communiquer avec la station de base est aussi bénéfique pour les réseaux cellulaires car l'utilisation de passerelles minimise la charge de la station de base lors de communication entre machines. Nous définissons, dans le cadre de ce projet, premièrement l'environnement d'études, et puis nous formulons le problème d'emplacement de passerelles. Ensuite, présentons l'algorithme méta heuristique utilisé pour résoudre le problème.

La figure 1.2 nous présente les différentes étapes qui mènent à la résolution du problème. La première étape fait référence aux machines déployées dans la zone considérée parmi lesquelles nous allons déterminer les passerelles. Dans la deuxième étape, nous formulons mathématiquement notre problème qui se trouve être un problème de couverture par ensembles. L'approche utilisée pour résoudre le problème est présentée à l'étape trois.

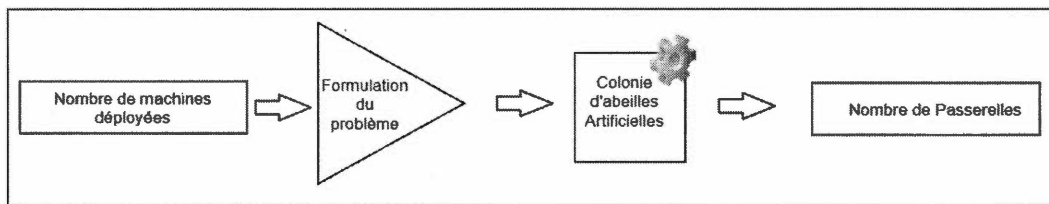


Figure 1.2 Étapes de la résolution du problème.

La principale contribution de notre projet de recherche est l'utilisation d'un algorithme méta heuristique pour déterminer l'emplacement efficace des passerelles. Notre but est de former des réseaux capillaires qui seront ensuite intégrés dans le réseau cellulaire afin de minimiser le nombre d'accès simultanés des machines à la station de base. Pourquoi l'utilisation de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles ? L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles est parmi les algorithmes les plus largement étudiés et appliqués jusqu'à présent pour résoudre les problèmes du monde réel. On peut l'utiliser pour l'optimisation dans des environnements dynamiques et incertains (Karaboga *et al.*, 2014). Enfin à la dernière étape on a le nombre de passerelles retourné par l'algorithme, il représente la solution.

1.5 Organisation de l'ouvrage

Le reste du document est organisé de la manière suivante. Une vue d'ensemble sur le réseau de machines est donnée au chapitre 2. Le chapitre 3 présente une revue

de littérature de quelques méthodes et techniques utilisées dans la communication entre machines. Le modèle de système utilisé pour la réalisation de ce projet et la formulation du problème sont présentés au chapitre 4. La solution est présentée au chapitre 5. Le chapitre 6 présente les résultats de simulation. Enfin, le chapitre 7 conclut le mémoire.

CHAPITRE II

COMMUNICATION ENTRE MACHINES : GÉNÉRALITÉS

2.1 Introduction

Les systèmes de communication entre machines sont typiquement composés de machines équipées de capteurs ou d'actionneurs, organisées en réseau et dont les ressources sont accessibles par des applications locales et distantes (Amadeo *et al.*, 2016). Les machines peuvent avoir des contraintes d'énergie, de calcul, de stockage et de bande passante (Antón-Haro *et al.*, 2013). Pour communiquer localement, les machines utilisent des technologies de faible puissance telles que ZigBee, Bluetooth, etc.

2.2 Communication dans le réseau M2M

Selon (Aijaz *et al.*, 2014), les machines peuvent communiquer de trois manières : (i) en établissant une communication point à point ; (ii) en communiquant directement avec la station de base, ou (iii) en utilisant les services d'une passerelle. Selon le moyen de communication utilisé, on parle alors de communication capillaire ou de communication cellulaire.

2.2.1 Communication capillaire

Un réseau capillaire peut être vu comme un réseau servant d'extension au réseau cellulaire utilisant des technologies de faible puissance (figure 2.1) avec un nombre suffisant de passerelles installées dans le but de fournir un service local satisfaisant aux machines, leur permettant d'utiliser efficacement les ressources du réseau cellulaire afin d'obtenir une connectivité globale (Novo *et al.*, 2015).

La communication capillaire peut être établie entre deux ou plusieurs machines directement ou du moins entre deux ou plusieurs machines par le biais d'une passerelle.

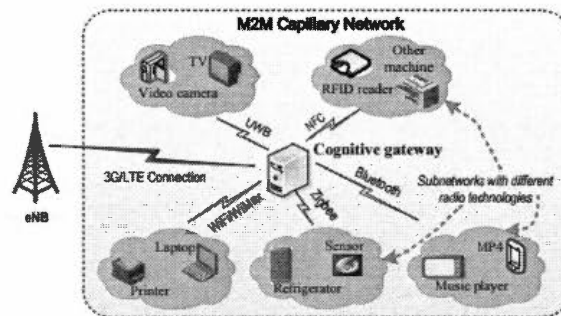


Figure 2.1 Passerelle reliant les communications M2M capillaires et cellulaires (Chen *et al.*, 2014).

2.2.2 Communication cellulaire

Pour une communication de longue portée dans le réseau de machines, le réseau cellulaire représente le candidat idéal à cause de l'infrastructure globale des réseaux cellulaires déjà établie. Cela importe que les machines soient équipées d'une carte SIM (Subscriber Identity Module) pour pouvoir accéder à la station de base. Les ressources radio du réseau cellulaire peuvent être partagées entre les

usagers cellulaires et les machines. Dans ce cas, les machines peuvent communiquer directement avec la station de base sans aucun intermédiaire.

Le tableau 2.1 nous présente un parallèle entre la communication directe avec la station de base et la communication via une passerelle. Il nous présente aussi les avantages de l'utilisation de passerelles dans la communication entre les machines avec la station de base.

Tableau 2.1 Communication directe ou via une passerelle entre les machines et la station de base.

Communication directe avec la station de base	Communication via une passerelle
Le coût peut être élevé si toutes les machines ont besoin d'une interface cellulaire pour communiquer.	Communication à faible coût pour les machines.
Réduction de la qualité de service à cause du nombre de connexions simultanées.	Diminution du nombre de demande de connexion simultanée à la station de base.
Mauvaise utilisation des ressources à cause de la taille réduit des paquets de données qu'envoie les machines.	Agrège les données ce qui permet une bonne utilisation du canal de transmission et des ressources.
Augmente la consommation énergétique des machines suivant la distance de transmission.	Faible consommation énergétique.

2.2.3 La communication entre machines : domaines d'application

Comme le montre le tableau 2.2 la communication entre machines trouve son application dans divers domaines :

1. Santé : l'utilisation de la communication entre machines dans le domaine de la santé permet entre autres de faire des diagnostics à distance sans

contrarier les patients dans leurs activités. Elle contribue ainsi à la prévention de certaines maladies.

2. Environnement intelligent : l'environnement intelligent permet de contrôler un espace donné comme par exemple sa maison, son lieu de travail même sans être physiquement présent. Par exemple augmenter ou diminuer la température de la maison avant d'y arriver, allumer ou éteindre une ampoule en sortant, etc.
3. Transport intelligent : dans le transport intelligent, l'utilisation de la communication entre machines nous permet de suivre le parcours d'une marchandise de son point de départ jusqu'à sa destination. Cela permet de faire des prévisions sur l'arrivée d'un colis donné.
4. Sécurité publique : l'un des cas d'utilisation de la communication entre machines dans la sécurité publique est le déclenchement d'alarmes dans le cas de vandalisme ou la protection des infrastructures publiques comme les routes, les ponts, etc.

Tableau 2.2 Domaines d'application de la communication entre machines

Santé	Environnement intelligent	Transport intelligent	Sécurité
Collection de données	Éclairage intelligent	Stationnement intelligent	Surveillance à distance
Suivi et surveillance	Installations industrielles intelligentes	Estimation du temps de trajet	Suivi personnel
Identification et authentification	Maisons intelligentes	Comptage intelligent	Protection des infrastructures publiques

2.2.4 Protocole de communication utilisé dans les communications entre machines

Selon (Pereira et Aguiar, 2014), les protocoles d'application jouent un rôle fondamental dans l'efficacité de la communication entre machines, car ils permettent d'implémenter la communication entre les entités du réseau de machines.

Différents types de protocoles ont été proposés dans la littérature pour maintenir la communication entre machines. Ils présentent chacun des particularités selon la portée de communication, la consommation énergétique, la bande passante, etc. Pour chacun des types de communication existants, il est bon de choisir le protocole de communication le mieux adapté pour relier les machines.

1. Communication point-à-point

Dans la communication point-à-point, plusieurs protocoles de communication peuvent être utilisés (figure 2.2). Un exemple peut être les réseaux locaux sans fil 802.11 (le WiFi) ; ce genre de réseaux permet de connecter un certain nombre de stations, chacune équipée d'une carte d'interface réseau sans fil (Abdel-Latif *et al.*, 2009). Chaque station peut communiquer directement avec toutes les autres stations activées sans fil. Elles peuvent partager des fichiers mais ne peuvent pas accéder aux réseaux câblés.

On peut également utiliser la technologie de communication Zigbee qui est conçue autour d'une faible consommation d'énergie permettant aux batteries de durer plus longtemps. Le protocole ZigBee utilise une suite de technologies pour permettre l'établissement des réseaux auto-organisés capable de gérer différents modèles de trafic de données (Shafiullah et Sagar, 2015).

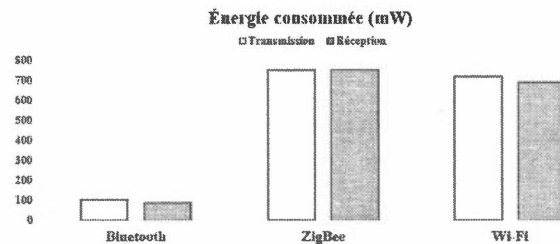


Figure 2.2 Comparaison de la consommation d'énergie normalisée pour chaque protocole (Pothuganti et Chitneni, 2014).

Enfin, Bluetooth est une technologie de liaison sans fil hyperfréquence à haute vitesse et faible consommation d'énergie conçue pour connecter l'équipement avec peu ou pas de travail de la part de l'utilisateur. Bluetooth ne nécessite pas de positionnement en visibilité directe des unités connectées. Elle est populaire grâce à la petite taille des équipements Bluetooth et grâce à son faible coût. La technologie de Bluetooth est une norme de technologie sans fil ouverte pour l'échange de données sur de courtes distances depuis des appareils fixes et mobiles. Elle peut connecter plusieurs appareils et surmonte les problèmes de synchronisation (Sarkar *et al.*, 2016).

2. Communication directe entre les machines et la station de base

Pour une communication directe entre les machines et la station de base, il est important d'utiliser des protocoles de communication de longue portée à faible consommation énergétique (tableau 2.3). On peut utiliser par exemple Sigfox (Centenaro *et al.*, 2016), Lora (Augustin *et al.*, 2016), Narrowband-IoT (Ratasuk *et al.*, 2016), etc.

Sigfox est un protocole de communication de longue portée compatible avec Bluetooth, GPS, 2G/3G/4G et Wifi. Il permet une faible consommation énergétique et un faible coût de connectivité. Il en est de même pour Lora qui est conçu pour interconnecter les objets alimentés par des batteries sur

de longues distances. Le protocole Narrowband-IoT quand à lui est une technologie cellulaire émergente qui offrira une couverture améliorée pour un grand nombre de dispositifs à faible débit et à faible coût ayant une faible consommation énergétique dans les applications tolérantes au délai (Lin *et al.*, 2016).

Tableau 2.3 Protocoles de communication de longue portée à faible puissance. LM et LD est mis pour la communication en liaison montante et liaison descendante respectivement.

	LoRA		Sigfox		NB-IoT release 13	
	LM	LD	LM	LD	LM	LD
Spectre [MHz]	863 - 870	863 - 870	868,1 - 868,3	869,425 - 869,625	832 - 862	791 - 821
Puissance Tx [dBm]	14	14 - 27	14	27	23	37
Modulation	Étalement de spectre (classe A)	Étalement de spectre (classe A)	DBPSK	GFSK	GMSK	SC-FDMA
Bande passante [kHz]	125	125	0,1	0,6	180	180
Charge utile maximale [octets]	51	51	12	8	128	85

3. Communication avec la station de base via une passerelle

Un troisième moyen de communication entre les machines est d'utiliser les services d'une passerelle pour atteindre la station de base. Utilisant ce moyen de communication, les protocoles suivants peuvent être utilisés (tableau 2.4). CoAP (Constrained Application Protocol) est un protocole de transfert web conçu spécialement pour le déploiement de l'Internet des objets (Shelby *et al.*, 2014). Il fonctionne en mode non connecté en utilisant le protocole UDP (User Datagram Protocol) à la place du protocole TCP (Transmission Control Protocol). L'utilisation du protocole UDP est recommandée dans les réseaux où les nœuds ont des contraintes en termes de délai ou de ressources énergétiques. Les commandes du protocole CoAP sont inspirés des commandes du protocole HTTP, en l'occurrence GET, POST, PUT et DELETE. Il permet un support de livraison fiable et un contrôle de congestion

simple. Son architecture est basée sur une méthode de requête/réponse (en anglais request/response) (Raymor *et al.*, 2018; Shelby *et al.*, 2014).

Le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) est aussi utilisé pour les objets connectés mais contrairement au protocole CoAP, il fonctionne en mode connecté utilisant le protocole TCP. L'architecture du protocole MQTT est basée sur la publication et l'abonnement (Thangavel *et al.*, 2014).

Tableau 2.4 Comparaison entre CoAP et MQTT (Pereira et Aguiar, 2014).

	CoAP	MQTT
Modèle de communication	Demande / Réponse Ou Publier / S'abonner	Publier / S'abonner
RESTful	Oui	Non
Protocole de couche transport	UDP	TCP
En tête	4 octets	2 octets
Nombre de types de messages	4	16
Messagerie	Asynchrone et Synchrones	Asynchrone
Intermédiaires	Oui	Oui (MQTT-S)

Dans le chapitre qui suit nous présentons une revue de littérature des problèmes liés à l'intégration du réseau de machines dans les réseaux cellulaires. Ensuite nous avons présenté les différentes approches existantes permettant de gérer ces problèmes.

CHAPITRE III

ÉTAT DE L'ART

3.1 Introduction

De nombreuses techniques et méthodes ont vu le jour dans le but de relever certains défis qui constituent un handicap majeur dans la cohabitation de la communication entre machines avec les réseaux cellulaires. Dans ce chapitre, on présente certaines techniques et méthodes proposées dans la littérature pour une intégration de la communication entre machines aux réseaux cellulaires.

3.2 L'intégration des machines dans les réseaux cellulaires

La présence d'un grand nombre de machines dans les réseaux cellulaires n'est pas sans risque. Pour maintenir les performances du réseau cellulaire, il est important d'aborder le problème de congestion et de surcharge (Ksentini et al., 2012). Car avec une faible probabilité de collision et un délai d'accès aléatoire priorisé, il est possible de supporter efficacement la présence d'un très grand nombre de machines dans le réseau lors de la procédure d'accès à la station de base (Kim et al., 2015). Une technique d'accès multiple pour pallier aux lacunes des propositions actuelles concernant les futures versions de LTE est aussi nécessaire (Ksairi et al., 2017). Pour (Niyato et al., 2014), un modèle de file d'attente analytique peut réduire la consommation énergétique quand les machines passent plus de temps en mode

inactive et leurs performances en termes de débit peuvent s'améliorer. Du point de vue des machines, il est aussi important de considérer l'aspect énergétique. Selon (Miao et al., 2016) un contrôle d'accès moyen efficace en énergie peut aussi maximiser la durée de vie des batteries des machines du réseau si on prend en considération l'impact du groupement, la taille du groupe et la sélection des têtes de groupe. Il en est de même pour (Al-Kaseem et Al-Raweshidy, 2016) qui estiment qu'avec un protocole MAC efficace en énergie, avec ordonnancement de sommeil intelligent basé sur le groupement on peut prolonger la durée de vie du réseau de machines tout en renforçant la connectivité du réseau. Car les protocoles MAC pour la communication entre machines devraient être évolutifs et ils doivent aussi consommer peu d'énergie (Rajandekar et Sikdar, 2015).

3.3 Les différentes méthodes et techniques présentées

3.3.1 Sélection de passerelles

L'utilisation d'une passerelle limite le nombre de requêtes d'accès à la station de base. Elle réduit aussi la quantité d'énergie que nécessite une machine pour accéder à un service interne ou externe du réseau. De ce fait, il est important que la machine soit associée à la meilleure passerelle. La meilleure passerelle dans ce cas, est la passerelle la plus proche de la machine.

Les auteurs de (Bayilmis et Younis, 2012) ont proposé un nouvel algorithme de sélection de passerelle qui prend en compte l'utilisation des technologies de récupération d'énergie. Cet algorithme choisit de façon dynamique le nœud qui sert de passerelle. Afin d'équilibrer la charge, les nœuds changent de rôle en fonction de leur réserve d'énergie. La simulation proposée est effectuée avec OPNET. (Vidanagama *et al.*, 2015) ont étudié une architecture où n'importe quel périphérique pouvant se connecter à l'internet peut agir comme une passerelle pour les communications machine-à-machine. Ils ont utilisé la distance de service comme

métrique pour sélectionner la passerelle M2M appropriée (qui a montré la plus grande disponibilité de service). Les auteurs supposent que la puissance d'émission des dispositifs M2M est ajustée en fonction de la force du signal reçu par les passerelles M2M pour éviter les erreurs de paquets ou les pertes pendant la communication.

Les auteurs de (Kim et Choi, 2010), quant à eux, proposent quatre algorithmes permettant de sélectionner la liste de passerelles disponibles dans un espace géographique donné. La sélection est basée sur la requête venant de certaines applications des communications entre machines. La contribution principale de (Cisse *et al.*, 2017) est un algorithme de sélection de passerelle. L'objectif de cette proposition est d'établir une communication multi-saut entre les différentes têtes de groupe et la station de base. Pour ce problème, les auteurs ont utilisé une métrique hybride qui est la combinaison du nombre de messages d'annonce, de l'énergie résiduelle et de la distance par rapport à la station de base.

3.3.2 Groupement

Le groupement consiste à grouper les machines et à sélectionner certaines d'entre elles comme responsables de groupe. Le choix de ces responsables de groupe peut se baser sur plusieurs critères et parmi ces critères, l'énergie disponible est primordiale.

Dans (Zhang et Miao, 2014) les auteurs proposent une architecture de groupement pour la communication entre machines dans les systèmes cellulaires en adoptant une approche analytique. Leur objectif est de développer des règles pour sélectionner la tête de groupe, de trouver le nombre de groupes optimal dans chaque cellule pour ensuite développer des critères permettant de sélectionner de nouveau des têtes de groupe. Les machines qui utilisent le moins d'énergie dans la communication sont désignées comme têtes de groupe. Les auteurs (Bandyopadhyay et Coyle,

2003) proposent un algorithme distribué qui organise les capteurs dans une hiérarchie de groupes dans le but de minimiser l'énergie totale dépensée dans le système pour la communication. Ils ont utilisé des résultats en géométrie stochastique afin de dériver des valeurs pour les paramètres de l'algorithme.

Les auteurs de (Younis et Fahmy, 2004) ont présenté une approche de groupement hybride distribuée et économe en énergie. Les têtes de groupe sont sélectionnées de manière probabiliste sur la base de leur énergie résiduelle et leur proximité par rapport aux autres nœuds. Les auteurs ont montré qu'avec des limites appropriées sur la densité des nœuds et les plages de transmission, leur approche peut presque de manière asymptotique garantir la connectivité des réseaux de groupe. Les auteurs (Cisse *et al.*, 2016) ont proposé un algorithme de groupement appelé EANOC (Energy Aware Neighbor Oriented Clustering) pour élire les têtes de groupe et améliorer la durée de vie du réseau. L'algorithme EANOC équilibre également la consommation énergétique en faisant changeant de temps à autre le rôle des nœuds.

3.3.3 Emplacement de passerelle

Le réseau de machines consiste en une interconnexion de divers périphériques et de systèmes. De ce fait, il est nécessaire de concevoir l'architecture du réseau de manière à minimiser le coût des communications entre machines tout en satisfaisant les exigences de la qualité de service (Tan *et al.*, 2011). On peut diviser l'emplacement de passerelles en deux classes : emplacement statique et emplacement dynamique. On parle d'emplacement statique quand les passerelles sont installées et que leurs positions ne changent pas pendant toute la durée de vie du réseau tandis que l'emplacement dynamique est caractérisé par le repositionnement des passerelles de manière intelligente pendant le fonctionnement du réseau.

Les auteurs (Gravalos *et al.*, 2016) ont proposé un modèle de Programmation

linéaire en nombres entiers pour l'emplacement de passerelle et l'allocation de périphérique de transmission dans l'internet des objets. Ce modèle minimise le coût global d'installation du réseau, tout en satisfaisant les exigences de qualité de service spécifiques. Dans (Capone *et al.*, 2009), les auteurs ont proposé une solution qui repose sur des modèles de programmation linéaire en nombre entier. Ces modèles permettent d'obtenir des solutions optimales pour des instances de taille raisonnable. L'objectif est d'optimiser la topologie globale du réseau de capteur en sélectionnant correctement le nombre et l'emplacement des routeurs sans fil de manière à minimiser les coûts d'installation et à maximiser la durée de vie du réseau, sous les contraintes selon lesquelles chaque capteur doit être connecté via une connexion multiple au routeur le plus proche et qu'un chemin à saut multiple existe également entre chaque routeur et les nœuds sélectionnés pour le trafic dans le réseau. Les résultats obtenus montrent que les contraintes de couverture et le schéma de routage peuvent avoir un impact considérable sur le coût global du réseau et sur l'efficacité énergétique.

Les auteurs (Muthaiah et Rosenberg, 2008) ont étudié le rôle de l'emplacement des passerelles sur le débit du réseau pour des configurations réalistes des réseaux maillés sans fil en proposant plusieurs heuristiques. L'emplacement des passerelles a pour but d'optimiser le débit. Pour calculer la solution exacte du problème d'emplacement des passerelles et valider leurs heuristiques, ils utilisent un outil qui calcul le maximum de débit réalisable pour un nœud du réseau où la position de la passerelle et la puissance de transmission est donné. Les auteurs (Li *et al.*, 2008) ont étudié le problème d'emplacement de passerelles pour l'optimisation du débit dans un réseau maillé sans fil à saut multiples. Ils ont proposé une méthode de déploiement de passerelles basée sur une grille utilisant une optimisation du débit multicouche. Ils ont prouvé que le débit atteint par leur méthode est un temps constant optimal. Les résultats montrent que leur méthode permet d'obtenir un

meilleur débit que les méthodes de déploiement aléatoire et de déploiement fixe.

Les auteurs (Wong *et al.*, 2004) ont démontré qu'un placement judicieux des passerelles à des emplacements choisis de manière stratégique peut réduire de manière significative les coûts de latence et de communication pour l'agrégation de données, ce qui prolonge la durée de vie du réseau de capteurs et améliore son utilité. Ils ont d'abord présenté un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour un placement optimal des passerelles dans des petits réseaux. Ensuite, ils présentent des approches heuristiques pour établir l'emplacement de passerelle dans des réseaux de taille arbitraire. Les auteurs (Li *et al.*, 2007) ont abordé le problème de la mise en place optimale d'une ou plusieurs passerelles dans les réseaux véhiculaires (1-D, 2-D). Le but est de placer les passerelles de manière à pouvoir minimiser le nombre moyen de sauts des points d'accès aux passerelles. Dans les réseaux de véhiculaires 1-D, ils ont obtenu les résultats analytiques pour un placement optimal des passerelles. Dans les réseaux de véhiculaires 2-D, ils ont développé deux algorithmes, «FOG et FOGA». Ces algorithmes permettent de déterminer le positionnement optimal d'une passerelle dans des réseaux denses. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité des algorithmes. Ils ont également donné quelques résultats analytiques permettant de déterminer l'emplacement optimal de plusieurs passerelles dans des réseaux véhiculaires à deux dimensions et ont discuté de la façon de réduire la consommation totale d'énergie.

3.4 Approches

Les problèmes d'optimisations varient d'un domaine d'étude à un autre. Pour les résoudre on peut avoir recours à des approches classiques telles que la programmation linéaire ou des approches heuristiques comme : les algorithmes génétiques, les stratégies d'évolutions et l'évolution différentielle. Cependant, les approches classiques ne sont pas assez efficaces pour résoudre les problèmes d'optimisations

car elles nécessitent entre autres des conditions prédéfinies telles que la continuité et la différentiabilité de la fonction objective, qui ne sont généralement pas remplies (Rezaee Jordehi et Jasni, 2013). Dans les sections qui suivent, on présente brièvement deux heuristiques très populaires généralement utilisés dans la littérature pour résoudre des problèmes d'optimisation, en l'occurrence on veut parler de l'algorithme des colonies d'abeilles artificielles (ABC) et de l'algorithme des essais particuliers (PSO). On a aussi présenté quelques travaux divers utilisant les algorithmes ABC et PSO.

3.4.1 Algorithme des Colonies d'abeilles artificielles (ABC) et l'algorithme des essais particuliers (PSO)

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles a été introduit par Dervis Karaboga. Cet algorithme simule le comportement d'alimentation d'un essaim d'abeilles. L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles est l'un des algorithmes par essaim le plus largement étudié et appliqué pour résoudre des problèmes du monde réel (Karaboga et al., 2014). On parle de ABC hybride lorsque l'algorithme des colonies d'abeilles artificielles est associé à un autre algorithme en travaillant de concert pour la résolution d'un problème donné. On dit qu'elle est discrète lorsque l'algorithme est modifié de manière à pouvoir résoudre des problèmes discrète/cas combinatoires. Un problème discret consiste à imposer à la variable de décision un ensemble fini de valeurs possibles. L'algorithme des essais particuliers (PSO) quand à lui a été inspiré du comportement des volées d'oiseaux, des bancs des poissons et de la théorie de l'essaimage en particulier (Kennedy, 1995). Cet algorithme est proposé pour la première fois par Kennedy et Eberhart en 1995.

Dans (Karaboga et Ozturk, 2011), l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC), qui est une nouvelle technique d'optimisation simple et robuste, est utilisé pour regrouper les problèmes de classification de référence à des fins de clas-

sification. Les performances de l'algorithme ABC sont comparées à l'algorithme d'optimisation des essaims particuliers (PSO) et à neuf autres techniques largement utilisées par des chercheurs. Les résultats montrent que l'algorithme de la colonie d'abeilles artificielle peut être appliqué avec succès à la mise en cluster aux fins de la classification. Dans (Crawford *et al.*, 2014), l'algorithme Artificial Bee Colony, qui est une nouvelle technique d'optimisation simple et robuste, est utilisé pour regrouper les problèmes de classification de référence à des fins de classification. Les performances de l'algorithme ABC sont comparées à l'algorithme d'optimisation des essaims particuliers (PSO) et à neuf autres techniques largement utilisées par des chercheurs. Les résultats montrent que l'algorithme de la colonie d'abeilles artificielle peut être appliqué avec succès à la mise en cluster aux fins de la classification.

Dans (Van der Merwe et Engelbrecht, 2003), les auteurs ont étudié l'application de l'algorithme des essaims particuliers (PSO) pour la classification de vecteurs de données. Deux approches de l'algorithme PSO ont été testées, à savoir une approche PSO standard et une approche PSO hybride où les populations de l'essaim sontensemencées par le résultat de l'algorithme K-means. Les deux approches de PSO ont été comparées à l'algorithme Kmeans. Les résultats nous montrent que les approches de PSO présentent une meilleure convergence pour réduire les erreurs de quantification et, en général, de plus grandes distances entre les groupes et de plus petites distances entre les membres d'un groupe. Les auteurs (Chen et Ye, 2012) ont proposé un algorithme d'analyse de groupe basé sur l'algorithme d'essaims particuliers (PSO), appelé groupement PSO. Ils adoptent l'optimisation d'essaims particuliers pour rechercher automatiquement le centre des groupes dans l'ensemble de données arbitraire. Les résultats obtenus à l'aide de quatre ensembles de données artificiels montrent que l'algorithme d'essaims particuliers présente de meilleures performances que l'algorithme d'analyse de classification

traditionnel.

Dans (Beasley et Chu, 1996b), les auteurs utilisent l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles dans le but d'optimiser un grand ensemble de fonctions de test numériques sans contrainte. Les résultats produits par l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles sont ensuite comparés aux résultats obtenus par des algorithmes bien connus comme l'algorithme génétique, l'algorithme d'optimisations de particules en essaim, l'algorithme d'évolution différentielle et stratégie d'évolution. Les résultats obtenus dans la comparaison permettent de conclure que les performances de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles sont meilleures ou similaires aux autres algorithmes. Les auteurs de (Pan et al., 2011) proposent un algorithme de colonie d'abeilles artificielles discrète afin de résoudre le problème d'ordonnement de flux en continu avec un critère minimisant la pénalité totale pondérée en termes de précocité et de retard dans les cas de ralenti et de non-ralenti. Les résultats de simulations montrent l'efficacité de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles discrète. Dans (Habbi et al., 2015), les auteurs ont proposé une méthodologie basée sur l'optimisation des colonies d'abeilles artificielles pour l'extraction automatique des systèmes flou Takagi-Sugeno avec une performance améliorée des données. Les résultats obtenus surpassent les autres méthodes de contrôle existantes.

Les auteurs de (Kruekaew et Kimpan, 2014) ont appliqué la colonie d'abeilles artificielles pour optimiser l'ordonnement de machines virtuelles dans les nuages. La principale contribution de cet article consiste à analyser la différence avec l'algorithme d'équilibrage de charge de machine virtuelle et à réduire la durée de traitement des données. Le résultat expérimental montre que la méthode d'algorithme de colonie d'abeilles artificielles proposée donne des résultats plus élevés que toutes les méthodes, et ses performances sont plus importantes en termes d'évolutivité. Dans (Muhammad et al., 2017), les auteurs ont proposé un algo-

rithme de colonie d'abeilles artificielles hybride basé sur une approche de transformation d'ordonnancement efficace. Le but est de trouver un nombre optimal de sous-ensembles disjoints de dispositifs intelligents afin d'augmenter la durée de vie du réseau de capteur sans fil.

Dans (Sun *et al.*, 2016) deux schémas d'allocation de ressources basés sur l'optimisation d'essaims particulaires (PSO) et l'optimisation d'essaims particulaires hybride PSO-GA (PSO - algorithme génétique) sont proposés pour maximiser le débit du système en permettant à deux paires dispositifs D2D (device-to-device) de partager la même ressource de fréquence avec un utilisateur du réseau cellulaire. Les schémas proposés améliorent l'efficacité spectrale et atténuent les interférences entre les paires D2D et les utilisateurs cellulaires. Les résultats montrent que le service des utilisateurs cellulaires et la performance du système peuvent être efficacement garantis en utilisant les schémas proposés.

Les auteurs (Sakamoto *et al.*, 2016) ont implémenté un système de simulation utilisant l'optimisation d'essaims particulière (PSO) afin de résoudre le problème de placement de routeur maillé dans les réseaux WMN. Ils ont examiné quatre méthodes de remplacement pour les routeurs maillés : la méthode de constriction (CM), la méthode de pondération d'inertie aléatoire (RIW), la méthode de Vmax décroissant linéaire (LDVM) et la méthode de mesure de poids d'inertie décroissant de manière linéaire (LDIWM). Les résultats montrent que : le modèle CM converge très rapidement, mais il affiche les performances les plus mauvaises parmi les quatre méthodes de remplacement, le modèle RIW converge rapidement et offre de bonnes performances, le modèle LDVM converge après 170 phases et ses performances sont satisfaisantes et le modèle LDIWM converge après 200 phases. Le LDIWM est une combinaison de RIWM et LDVM.

3.5 Discussion

L'intégration des machines aux réseaux cellulaires soulève de nombreux défis. Des nouvelles techniques et méthodes ne cessent d'apparaître. Cependant, jusqu'à ce jour on ne peut pas affirmer que ces défis soient pleinement relevés. Les problèmes se posent et se poseront encore, car à mesure que le nombre de machines augmente, de nouveaux cas d'utilisation seront identifiés.

Les approches susmentionnées apportent des solutions avantageuses selon le cas d'utilisation considéré, mais ne peuvent en aucun cas être adoptées comme solution unique et universelle pouvant résoudre le problème que les machines rencontrent en intégrant le réseau cellulaire, en raison des exigences qui diffèrent d'un cas d'utilisation à un autre dans la communication entre machines. Vu l'importance des réseaux de machines dans notre quotidien et notre futur, il est crucial de proposer des solutions avantageuses afin de tirer le maximum de profit de la performance des applications de la technologie de communication entre machines.

Dans le cadre de notre projet, on se limite à sélectionner efficacement les machines qui joueront le rôle de passerelles selon leur emplacement et leurs coûts. La solution adoptée est présentée au chapitre cinq. Le chapitre suivant est consacré à l'architecture du modèle que nous utilisons et la représentation mathématique du problème considéré.

CHAPITRE IV

MODÈLE DU SYSTÈME ET FORMULATION DU PROBLÈME

Dans ce chapitre, nous commencerons par définir l'architecture du modèle de système à étudier dans ce projet. Ensuite nous formulerons mathématiquement le problème qui se trouve être un problème de couverture par ensembles.

4.1 Architecture du modèle de système

L'infrastructure du système considéré, tel qu'illustré dans la Figure 4.1, est composée d'une station de base et d'un nombre fini de machines stationnaires. Les machines sont dispersées aléatoirement dans la zone déterminée. Elles sont numérotées par l'ensemble $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ où M est le nombre total de machines.

Les passerelles doivent être méticuleusement choisies parmi les machines de manière à étendre la couverture des autres machines du réseau. Les passerelles sont des machines dédiées qui agissent comme des nœuds de relais par les autres machines. Elles contribuent ainsi à la maximisation de la couverture cellulaire pour les services des machines. On choisit une machine pour jouer le rôle de passerelle en se basant sur son emplacement et son coût. Les machines sélectionnées ne font pas d'acquisition de données comme les autres machines de manière à conserver leur énergie, en d'autres termes une machine joue soit un rôle d'acquisition de données, soit un rôle de passerelle.

Les passerelles sont numérotées par l'ensemble $\mathcal{P} = \{1, 2, \dots, P\}$ avec P le nombre de passerelles. Ce nombre peut varier en fonction du nombre de machines à couvrir et il n'est pas connu à l'avance.

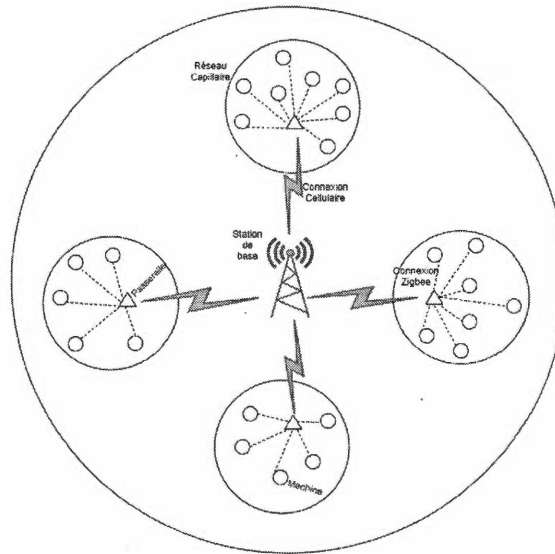


Figure 4.1 Architecture du modèle du système

4.2 Modèle de communication

Selon l'architecture de réseau de machines proposée par l'ETSI, les machines peuvent se connecter aux réseaux cellulaires de deux manières différentes. La première consiste en l'intégration d'une carte SIM (Subscriber Identity Module) aux machines pour qu'elles puissent avoir une connectivité aux réseaux cellulaires. La deuxième manière est d'organiser les machines en créant des réseaux locaux utilisant des technologies de faibles puissances comme par exemple Bluetooth, ZigBee, etc. Ces réseaux peuvent être ensuite connectés aux réseaux cellulaires en utilisant des passerelles (Laya *et al.*, 2014).

Dans le cadre de ce projet, les machines utilisent une passerelle pour communiquer avec la station de base en raison des multiples avantages que présente cette moyen de communication. Les différents avantages sont présentés au chapitre deux. Les passerelles utilisées dans le réseau fonctionnent en mode full-duplex (le canal de communication transporte l'information dans les deux sens) entre le réseau de machines et le réseau cellulaire. C'est un modèle de communication à deux niveaux, qui va des machines aux passerelles et des passerelles vers la station de base. Les machines et les passerelles forment un réseau capillaire utilisant le protocole de communication sans-fil ZigBee. Le protocole ZigBee répond aux besoins des capteurs impliqués dans la communication entre machines car elle fournit une bande passante suffisante pour les besoins de ces derniers. Toutefois ces machines ont besoin de garantir une faible latence et d'avoir une très faible consommation d'énergie lors des transmissions (Kinney *et al.*, 2003). Cependant, dans leur communication avec la station de base, les passerelles utilisent les ressources du réseau cellulaire, en l'occurrence LTE. On suppose que l'effet de canal est modélisé comme un évanouissement à petite échelle suivant une distribution de Rayleigh.

4.3 Formulation du problème

Dans cette section, on formule le problème qui s'est trouvé être un problème de couverture par ensembles. On vise à optimiser la topologie globale du réseau en sélectionnant correctement le nombre et l'emplacement des passerelles de manière à minimiser les coûts d'installation et à maximiser la durée de vie du réseau, sous les contraintes selon lesquelles chaque machine du réseau doit être connecté à au moins une passerelle, celle la plus proche (pour limiter la consommation d'énergie due au transfert de paquets sur de longue distance). Par conséquent, le cadre d'optimisation prend en compte conjointement le choix/ le positionnement des passerelles ainsi que la conception des réseaux capillaires sans fil qui vont intégrer le réseau cellulaire. Comme entrée du problème on considère l'ensemble

de machines \mathcal{M} et la solution devra déterminer un nombre minimal de machines appartenant à \mathcal{M} pouvant offrir une couverture à toutes les autres machines. Les emplacements des machines qui feront parties de la solution seront considérés comme les emplacements des passerelles.

Le problème peut être représenté sous la forme d'une matrice binaire $\{0,1\}$ comme par exemple $\text{Mat}(\mathcal{M},\mathcal{P})$ ci-dessous. Les lignes de la matrice représentent les machines de l'ensemble \mathcal{M} et les colonnes de la matrice représentent l'ensemble de machines qui jouent le rôle de passerelles \mathcal{P} . L'élément a_{mp} de la ligne m et de la colonne p peut prendre la valeur 1 si la machine m est associée à la passerelle p . Autrement, elle prend la valeur zéro. L'objectif du problème devient donc de trouver une matrice binaire où chaque ligne $m \in \mathcal{M}$ possède au moins un 1. En d'autre terme, il revient à trouver un ensemble de colonnes qui couvre toutes les lignes à un coût minimal.

$$\text{Mat}(\mathcal{M},\mathcal{P}) = \begin{array}{c|cccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \hline m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \implies \begin{array}{c|cccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \hline m_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ m_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ m_3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

L'ensemble de colonnes capable de couvrir la ligne m est représenté par J_m :

$$J_m = \{p \in \mathcal{P} | a_{mp} = 1\}, \quad m = 1, \dots, M \quad (4.1)$$

et on représente par I_p l'ensemble des lignes couvertes par la colonne p

$$I_p = \{m \in \mathcal{M} | a_{mp} = 1\}, \quad p = 1, \dots, P \quad (4.2)$$

Considérant la matrice, le problème peut donc être formulé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser} && Z = \sum_{p=1}^P c_p x_p \\ & \text{sous les contraintes} && \\ & (a) && \sum_{p=1}^P a_{mp} x_p \geq 1, \quad m = 1, \dots, M \\ & (b) && x_p \in \{0, 1\}, \quad p = 1, \dots, P \end{aligned} \quad (4.3)$$

\mathbf{x} représente un vecteur de valeurs binaires dont la taille est inférieure ou égale à M . Puisque nous considérons que les machines ont des capacités identiques et que n'importe quelle machine peut être sélectionnée comme une passerelle si elle a un bon emplacement alors la taille initiale du vecteur \mathbf{x} est M . Un élément x_p du vecteur \mathbf{x} est égal à 1 s'il fait partie de la solution, et 0 sinon. Chaque colonne de la matrice à un coût c_p ($p \in P$) où $c_p > 0$. L'objectif du problème d'optimisation en (4.3) est de trouver un sous-ensemble de colonne qui couvre toutes les lignes. Une ligne est couverte par une colonne si $a_{mp} = 1$ et dont la somme de leur coût $\sum_{p \in P} c_p$ est minimal.

La contrainte (4.3a) assure que chaque machine m est au moins couverte par une passerelle. La variable binaire a_{mp} représente l'association d'une machine m à une passerelle p ($m \in \mathcal{M}$ et $p \in \mathcal{P}$). Elle est égale à 1 si la machine m est associée à la passerelle p et 0 sinon. La contrainte (4.3b) indique que la variable x_p peut avoir une valeur binaire uniquement. Si on considère l'exemple de matrice $Mat(M, P)$ donné ci-dessus, une solution serait $Z = [a_{m1p3}, a_{m1p5}, a_{m2p2}, a_{m3p1}, a_{m3p3}, a_{m4p4}, a_{m5p5}]$.

Chaque machine a un coût distinct c_p . Ce coût est calculé en fonction de la somme des distances entre cette machine et toutes les machines qu'elle peut servir si elle est sélectionnée comme une passerelle. Soit $\mathcal{G}_p = \{1, 2, \dots, G_p\}$ l'ensemble de machines que sert la machine p sélectionnée comme une passerelle et G_p le nombre de machines associées à la passerelle p , alors

$$c_p = \sum_{m=1}^{G_p} d(m, p) \quad (4.4)$$

L'équation (4.4) permet de déterminer le coût d'une passerelle. La variable m fait référence à une machine qui se trouve dans la portée de la passerelle p . Et G_p représente le nombre de machine que sert la passerelle.

Le problème de couverture par ensembles est très connu dans la littérature. Il fait partie des problèmes NP-complets (Slijepcevic et Potkonjak, 2001). Des preuves concernant la complexité du problème de couverture par ensembles sont données dans (Gorbenko et Popov, 2012).

Dans le chapitre suivant, nous démontrons l'utilisation de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles pour résoudre le problème d'emplacement de passerelle pour la formation de réseau capillaire.

CHAPITRE V

SOLUTION

Ce chapitre présente la solution retenue pour résoudre le problème présenté au chapitre trois. Nous avons, dans le cadre de ce projet exploré plusieurs pistes de solutions pour résoudre notre problème de couverture par ensemble. Par exemple, nous avons utilisé dans un premier temps OR-Tool, un solveur très connu. Bien que l'utilisation d'un solveur puisse réussir à donner de bonnes solutions, il se trouve que son utilisation converge généralement lentement et nécessite un temps de calcul important, beaucoup de ressources et demande l'usage d'un certain nombre de paramètres de contrôle. Au chapitre trois, nous avons présenté deux méta heuristiques très populaire dans la résolution de problèmes d'optimisation, il s'agit de : l'algorithme des essaims particulaires et de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles. L'une des principales différences entre ABC et PSO sont les paramètres de contrôle. Les paramètres de contrôle de l'algorithme PSO sont au nombre de trois (facteurs cognitifs et sociaux, poids d'inertie), ils affectent de manière significative son comportement de calcul qui varie suivant leurs réglages et les valeurs limites des vitesses peuvent avoir un effet significatif sur ses performances. La manière de régler les paramètres est de la plus haute importance. L'algorithme ABC quant à lui n'a qu'un seul paramètre de contrôle, la « limit », en dehors de la taille de la colonie et nombre maximal de cycles (Karaboga et Akay, 2009).

En fin de compte, on a opté pour l'utilisation de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles qui est basé sur un processus interactif. Sa facilité d'application et sa robustesse fait de lui un algorithme très populaire (Bansal *et al.*, 2013). Cet algorithme est très simple à mettre en œuvre. Il est appliqué dans différents domaines de l'ingénierie, des sciences et de la gestion pour résoudre des problèmes très complexes (Sharma et Bhambu, 2016).

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles utilisé permet de fournir une sélection efficace des passerelles selon leurs emplacements dans la zone considérée ce qui minimise la distance de communication entre les machines et la station de base. Il permet aussi de limiter le nombre d'accès à la station de base par les machines.

5.1 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC)

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles a été présenté pour la première fois par Dervis Karaboga en 2005. L'algorithme d'optimisation par colonie d'abeilles artificielles simule l'intelligence du comportement de recherche de sources de nourriture d'un essaim d'abeilles autour de la ruche. À chaque découverte de source de nourriture, les informations concernant la position et les ressources de cette source sont partagées. La réalisation de cet algorithme se fait en trois phases : la phase des abeilles employées, la phase des abeilles spectateurs et la phase des abeilles scouts. Les employées se déplacent vers la ruche et se renseignent sur les sources de nourriture et sur leurs positions. Les spectateurs sélectionnent les sources de nourriture en tenant compte des informations reçues des abeilles employées. Les employées dont les sources de nourriture ont été abandonnées deviennent des scouts et cherchent de nouvelles sources de nourriture arbitrairement autour de la ruche et partagent l'information avec les autres. Pour partager les informations trouvées, les abeilles utilisent une danse frétillante comme moyen de communica-

tion dans la zone de danse de la ruche. Le temps et la lueur de la danse dépendent de la quantité de nectar et de la distance de la source de nourriture par rapport à la ruche. La danse frétilante indique que la source de nourriture est à une faible distance par rapport à la ruche.

5.1.1 Présentation des étapes de l'algorithme

Dans l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles, une source de nourriture est caractérisée par sa position, sa distance par rapport à la ruche et la quantité de nectar qu'elle possède. Les abeilles ont pour but de chercher les sources de nourriture qui ont le meilleur nectar et qui sont proches de la ruche.

- *Phase des abeilles employées* : dans cette phase, en fonction des informations que les abeilles employées ont en mémoire concernant la position et la distance et la quantité de nectar des sources de nourriture de la solution initiale, ils cherchent de nouvelles sources de nourriture à leur proximité pour une nouvelle solution. Les informations concernant la nouvelle solution sont ensuite partagées avec les autres abeilles par une danse frétilante qu'elles savent interpréter.
- *Phase des abeilles spectatrices* : dans cette phase, la nouvelle solution provenant de la phase des employées est évalué par rapport à la solution initiale afin de choisir la meilleure source de nourriture. Cette évaluation est basée sur une certaine probabilité en fonction des contraintes (position, distance et nectar de chaque source de nourriture) pour mettre à jour la solution initiale. La mise à jour est faite si et seulement si les nouvelles sources de nourriture sont meilleures que les anciennes, dans le cas contraire les sources de nourriture de solution initiale restent inchangées.
- *Phase des abeilles scouts* : dans la phase de scouts les sources de nourriture de la phase des spectateurs qui ont été abandonnées (au regard de la limite

d'abandon fixée par l'algorithme) sont remplacées par de nouvelles sources de nourriture.

5.1.2 Stratégie d'emplacement des passerelles

Pour un emplacement efficace des passerelles nous avons utilisé l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (artificial bee colony en anglais). Soit $\mathcal{M} = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ un ensemble fini de machines. On cherche à déterminer s'il existe une collection de machines (les mieux positionnée) de taille minimale $\mathcal{P} \subseteq M$ et dont la somme des coûts de chaque machine est minimal. Cette collection doit servir de couverture à toutes les machines de \mathcal{M} . La taille de \mathcal{P} n'est pas connue à l'avance. Elle dépend du nombre de machines à couvrir et des coûts des machines. En d'autre terme la collection de machines ayant le coût le plus faible représente la solution.

5.1.2.1 Utilisation de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC)

Dans le cadre de notre projet, la ruche représente la station de base, les sources de nourriture représentent les machines. La solution représente l'emplacement des machines qui seront sélectionnées pour servir de passerelle. La sélection est basée sur la distance de ces machines par rapport à la station de base, leurs emplacements (en fonction du nombre de voisin) et leurs coûts. L'algorithme prend en entrée l'ensemble de machines et retourne une liste optimale des emplacements de passerelles. Les éléments important pour l'implémentation de ABC :

- La « *fitness* » : elle représente la qualité de la solution, et elle est calculée de la même manière que la fonction objectif :

$$f_m = \sum_{m'=1}^M c'_m s_{mm'} \quad (5.1)$$

Le $s_{mm'}$ représente la valeur de la colonne m' correspondant à la ligne m et c_m représente le coût de la colonne.

- *Probabilité* : pour le choix probable des sources de nourriture la méthode RWS (roulette wheel selection) est utilisée. C'est une méthode fréquemment utilisée dans les algorithmes génétiques et évolutifs ou dans la modélisation de réseaux complexes (Lipowski et Lipowska, 2012). La probabilité $pr_{m'}$ qu'un élément m' puisse être choisi est calculée de la manière suivante :

$$pr_{m'} = \frac{f_{m'}}{\sum_{m=1}^M f_m} \quad (5.2)$$

La variable $f_{m'}$ représente la fitness d'un élément m' .

- *limit et le nombre d'abeilles* : la limite est la valeur d'un nombre prédéterminé de cycles pour l'abandon des solutions qui ne peuvent être améliorées après un nombre d'essais prédéterminé (Karaboga et Basturk, 2007). Elle est utilisée dans la phase des scouts de l'algorithme. C'est un paramètre de contrôle très important de l'algorithme. Le nombre d'abeilles employées et spectatrices est proportionnel au nombre de machines.

5.1.2.2 Pseudo-code de l'algorithme ABC

Algorithm 1 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles

Entrée : $\mathcal{M} = \{1, 2, 3, \dots, M\}$, Max_{itr} , n , $limit$ **Sortie :** $\mathcal{P} \subseteq M$ **Initialisation :** $n = 50$ tel que $s = \{1, 2, \dots, n\}$, $iteration = 1$, $limit = 50$ 1: **Faire** **Phase employée**2: **Pour** chaque machine de s {3: Calculer la fitness des machines de s en utilisant la formule (5.1)4: Sélectionner de nouvelles machines en se basant sur les informations retenues de s et évaluer leur fitness.5: Mettre à jour s si nécessaire. }6: Partager les informations à propos des machines de s . **Phase des abeilles spectateurs**7: **Pour** chaque machine de s {

8: Appliquer la méthode roulette wheel selection en calculant la probabilité qu'une machine soit choisie comme dans (5.2). }

Phase des abeilles scout9: Abandon des machines qui n'ont pas été retenue dans la solution en se basant sur la $limit$

10: Remplace les machines abandonnées par de nouvelles.

11: Ajouter la solution retenue dans \mathcal{P} .12: $iteration = iteration + 1$

13: Reprendre à partir de l'étape 2.

14: **Tant que** $iteration \neq Max_{itr}$

CHAPITRE VI

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS

6.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons et analysons les résultats des simulations. La communication entre machines est basée sur l'idée que l'utilisation des machines est plus bénéfique, lorsqu'elles sont en réseau et que le réseau devient plus précieux avec l'ajout de plus de machines (Gupta et Hirdesh, 2007). L'utilisation de passerelles joue un rôle important dans la communication entre machines en allouant la bande passante, en minimisant les interférences, en garantissant la qualité de service et en agrégeant le flux de données afin d'éviter que les couches supérieures ne soient submergées (Chen *et al.*, 2014).

Pour les expérimentations, nous avons utilisé le langage de programmation Python. Le programme a été exécuté sur une machine acer avec Intel® Core™ i5-7200 2.5GHz et 8 GB mémoire DDR4 sous Windows 10.

6.2 Simulations

Nous avons simulé une approche basée sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles en vue de répondre à la question : y a-t-il un moyen de trouver l'emplacement optimal d'un nombre minimal de passerelles qui soit capable servir toutes les machines du réseau à un faible coût ?

6.2.1 Environnement considéré

On considère une zone urbaine ayant une station de base avec une portée de 500 m qui utilise une bande passante de 20 MHz et autour de laquelle les machines sont réparties aléatoirement. Chaque machine est représenté par un identifiant qui est généré automatiquement lors du déploiement. La station de base est positionnée au centre de la zone considérée. Chacune des machines a une puissance maximale de transmission de $1mW$ Le reste des paramètres de simulation est donné au tableau 6.1.

Tableau 6.1 Paramètres de la simulation

paramètres	Valeurs
Portée de l'eNodeB	500 m
Portée des passerelles	10 m
Nombre de machines	100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500
Nombre de eNodeB	1
Mode de distribution des machines	Aléatoire
Puissance de transmission maximale des machines	1 mW
Puissance de transmission passerelle	10 mW

6.2.2 Sélection optimale des passerelles utilisant l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles

Intégrer le réseau capillaire dans le réseau cellulaire pour une communication efficace entre les machines exige une sélection méticuleuse de l'emplacement des passerelles dans le but d'offrir une couverture à toutes les machines du réseau à un faible coût. On simule l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles de manière à sélectionner un cordonnateur (qui deviendra passerelle) pour représenter chaque machine se trouvant à sa portée dans le réseau. Le cordonnateur est choisi parmi les machines et chaque machine du réseau est un cordonnateur potentiel. La sé-

lection des machines qui deviendront des cordonnateurs dépend principalement de leurs emplacements et des coûts en découlant. L'emplacement de ces cordonnateurs est considéré comme le meilleur emplacement pour mettre les passerelles. Pour chaque ensemble de machines considéré en entrée, l'algorithme est exécuté 1000 fois. Nous avons considéré une *limit* = 50. La valeur de 50 a été choisi empiriquement en utilisant une méthode similaire à celle utilisée dans (Crawford *et al.*, 2014). Le nombre d'abeilles employées considéré est 50. Le résultat à la sortie représente un vecteur de P machines sélectionnées comme passerelles. Le vecteur contient l'identifiant associés à chaque machine faisant partie de la solution. On peut utiliser ces identifiants pour avoir les informations concernant l'emplacement de ces machines, c'est-à-dire leurs longitudes (x_p) et leurs latitudes (y_p) tel que $p \in \{1, \dots, P\}$ comme le montre le tableau 6.2.

Tableau 6.2 Liste des machines faisant partie de la solution.

1	2	3	...	P
148	25	7	...	30

1	2	3	...	P
(x_1, y_1)	(x_2, y_2)	(x_3, y_3)	...	(x_P, y_P)

6.2.3 Scénario d'exemple

On considère le scénario avec 22 machines à couvrir avec un certain nombre de cercles. Notre objectif est de trouver le meilleur emplacement pour mettre un nombre minimal de passerelles afin de pouvoir servir toutes les machines. On considère la figure 6.1 où les points représentent les machines et les cercles représentent la portée des passerelles, une solution serait de sélectionner les cercles qui couvrent toutes les machines. Une des solutions serait de considérer les trois cercles en traits pleins car ils couvrent respectivement 12, 6, et 4 machines. Cependant, bien que les 22 machines soient couvertes avec cette solution, elle n'est pas la solution optimale. La solution optimale est de sélectionner les deux cercles en pointillés qui couvrent 11 machines chacune.

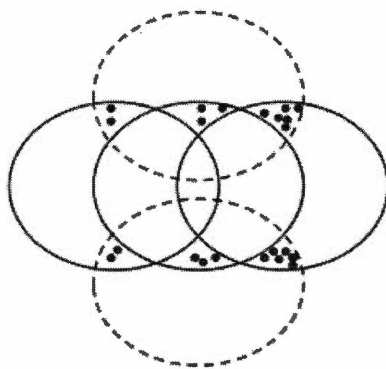


Figure 6.1 Un scénario du problème (Dabibi *et al.*, 2016).

6.2.4 Résultats

Dans cette sous section nous présentons les résultats obtenus lors des simulations de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles, utilisant des ensembles indépendants de données qui résultent d'une distribution aléatoire uniforme dans la zone considérée. La solution retenue est l'emplacement d'un ensemble de passerelles $\mathcal{P} = \{1, 2, 3, \dots, P\}$ qui minimiserait la somme des coût de toutes les liens de communications (distance de communication) entre les machines et les passerelles. Le tableau 6.3 illustre les résultats statistiques de la moyenne, l'écart-type du pourcentage de machines utilisées comme passerelles, la solution obtenue dans le meilleur cas ainsi que la solution obtenue dans le pire cas sur 1000 répétitions.

L'écart-type est donnée comme mesure de dispersion des données. La décrémentation de l'écart-type permet de voir une certaine augmentation de la stabilité de l'algorithme peu importe la taille de l'ensemble de données considérée. L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles trouve une solution efficace à faible coût pour les ensembles de (100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500) machines.

La fréquence de connexion des machines à la station de base est beaucoup plus élevée que celle des utilisateurs impliqués dans la communication humain-à-humain. Suivant le scénario considéré, sans l'utilisation de passerelles, la station de base

aurait à répondre au demande d'accès simultané de (100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500) machines, notre approche réduit le nombre d'accès simultanément à la station de base de (53%, 71%, 78%, 82.5%, 5.4%, 91.6%, 93.8%) en utilisant respectivement pour chaque ensemble de machines (47, 58, 66, 70, 73, 84, 93) passerelles sur les 1000 itérations. La réduction du nombre de demande d'accès simultané au réseau permet d'éviter : la congestion, la perte de paquets, une mauvaise gestion des ressources radio, une interruption de service, etc.

Tableau 6.3 Résultats statistiques de la moyenne, la déviation standard du pourcentage de machines utilisé comme passerelles, la solution dans le meilleur et le pire des cas.

Total	100	200	300	400	500	1000	1500
Pourcentage moyen des machines choisies comme passerelles (%)	72.19	43.13	30.54	23.86	19.64	10.25	7.38
Écart-type	8.66	4.29	2.49	1.80	1.41	0.67	0.42
Nombre de machines dans le meilleur cas	47	58	66	70	73	84	93
Nombre de machines dans le pire cas	99	123	119	116	122	123	130

6.2.4.1 Couverture optimale et fitness

Comme mentionné dans le chapitre 4, la contrainte (4.3a) assure que chaque machine est au moins couverte par une passerelle. Les caractéristiques principales d'une passerelle sont sa position et son coût. La position d'une passerelle dans notre cas fait référence à son emplacement géographique et son coût à son entourage c'est-à-dire au nombre de machines pouvant bénéficier de son service. Le coût se calcule en fonction de la somme des distances entre une passerelle et les

machines qui se trouvent dans sa portée. Cela dit, une machine isolée à moins de chance d'être sélectionnée pour servir de passerelle à d'autres. L'un des facteurs importants dans la solution est la fitness. Elle représente la qualité de la solution. Le tableau 6.4 illustre le pourcentage de coût moyen en %, fitness (coût) totale des solutions dans le meilleur cas et le pire cas pour chaque ensemble. La fitness (coût) totale est la somme des coûts de chaque machine faisant partie de la solution en rapport à un ensemble donné.

Tableau 6.4 Pourcentage de coût moyen en %, fitness (coût) totale des solutions dans le meilleur cas et le pire cas pour chaque ensemble.

Total	100	200	300	400	500	1000	1500
Pourcentage de coût moyen en %	340	488	550	585	610	671	697
Fitness dans le meilleur cas	343	482	548	585	594	664	695
Fitness dans le pire cas	433	683	688	711	753	788	835

CHAPITRE VII

CONCLUSION

La demande de signalisation très fréquente générée par les machines et envoyée à la station de base peut avoir un impact négatif sur la performance du réseau cellulaire.

Dans ce travail de recherche nous avons utilisé une approche basée sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles pour résoudre le problème de déploiement efficace des passerelles qui revient à sélectionner méticuleusement les meilleures machines, selon leurs emplacements, à jouer le rôle de passerelles en vue de former des réseaux capillaires à faible coût. Un déploiement efficace de passerelles peut non seulement maintenir la performance du réseau cellulaire en évitant la congestion, tout en servant un nombre important de machines, mais aussi, il peut prolonger la durée de vie des machines en diminuant l'énergie que celles-ci dépensent dans la transmission sur de longue distance. De plus, l'utilisation de passerelles par les machines pour communiquer avec la station de base diminue le coût que résulterait l'utilisation d'une carte SIM pour chaque machine individuellement dans leur communication directe avec la station de base.

Le résultat de nos simulations nous montre que l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles peut être utilisé pour une sélection efficace de l'emplacement des passerelles et pour minimiser le coût dans la communication entre machines.

Nous prévoyons, dans le future d'utiliser ce modèle pour déployer des passerelles

mobiles et ensuite comparer la performance de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC) à d'autres algorithmes d'optimisation existant.

RÉFÉRENCES

- Abdel-Latif, K., Eissa, M., Ali, A., Malik, O. et Masoud, M. (2009). Laboratory investigation of using wi-fi protocol for transmission line differential protection. *IEEE transactions on power delivery*, 24(3), 1087–1094.
- Aijaz, A., Tshangini, M., Nakhai, M. R., Chu, X. et Aghvami, A. H. (2014). Energy-efficient uplink resource allocation in lte networks with m2m/h2h co-existence under statistical qos guarantees. *IEEE Trans. on Commun*, 62(7), 2353–2365.
- Amadeo, M., Briante, O., Campolo, C., Molinaro, A. et Ruggeri, G. (2016). Information-centric networking for m2m communications : Design and deployment. *Computer Communications*, 89, 105–116.
- Antón-Haro, C., Lestable, T., Lin, Y., Nikaein, N., Watteyne, T. et Alonso-Zarate, J. (2013). Machine-to-machine : an emerging communication paradigm. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 24(4), 353–354.
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. et Townsley, W. M. (2016). A study of lora : Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466.
- Bandyopadhyay, S. et Coyle, E. J. (2003). An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. Dans *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, volume 3, 1713–1723. IEEE.
- Bansal, J. C., Sharma, H. et Jadon, S. S. (2013). Artificial bee colony algorithm : a survey. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 5(1-2), 123–159.
- Bayilmis, C. et Younis, M. (2012). Energy-aware gateway selection for increasing the lifetime of wireless body area sensor networks. *Journal of Medical Systems*, 36(3), 1593–1601. <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-010-9620-y>.
Récupéré de <https://doi.org/10.1007/s10916-010-9620-y>

- Capone, A., Cesana, M., De Donno, D. et Filippini, I. (2009). Optimal placement of multiple interconnected gateways in heterogeneous wireless sensor networks. Dans *International Conference on Research in Networking*, 442–455. Springer.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A. et Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands : The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67.
- Chen, C.-Y. et Ye, F. (2012). Particle swarm optimization algorithm and its application to clustering analysis. Dans *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution*, 789–794. IEEE.
- Chen, M., Wan, J., González-Valenzuela, S., Liao, X. et Leung, V. C. (2014). A survey of recent developments in home m2m networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(1), 98–114.
- Cisse, C. S. M., Ahmed, K., Sarr, C. et Gregory, M. A. (2016). Energy efficient hybrid clustering algorithm for wireless sensor network. Dans *2016 26th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, 38–43. <http://dx.doi.org/10.1109/ATNAC.2016.7878779>
- Cisse, C. S. M., Bennis, I., Ayaida, M. et Sarr, C. (2017). Gateway selection technique for efficient multi-hop routing in wireless sensor networks. Dans *2017 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, 1–7. <http://dx.doi.org/10.1109/WINCOM.2017.8238144>
- Crawford, B., Soto, R., Cuesta, R. et Paredes, F. (2014). Application of the artificial bee colony algorithm for solving the set covering problem. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Dabibi, M., Moghaddam, B. et Kazemi, M. (2016). Locating distribution/service centers based on multi objective decision making using set covering and proximity to stock market. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(4), 635–648.
- Dawy, Z., Saad, W., Ghosh, A., Andrews, J. G. et Yaacoub, E. (2017). Toward massive machine type cellular communications. *IEEE Wireless Communications*, 24(1), 120–128.
- ETSI, T. (2013). Machine-to-machine communications (m2m), functional architecture. *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*, 20, 332.
- Fan, Z., Haines, R. et Kulkarni, P. (2014). M2m communications for e-health and smart grid : an industry and standard perspective. *IEEE Wireless Communications*, 21(1), 62–69.

- Gorbenko, A. A. et Popov, V. Y. (2012). The set of parameterized k-covers problem. *Theoretical Computer Science*, 423, 19–24.
- Gravalos, I., Makris, P., Christodoulopoulos, K. et Varvarigos, E. A. (2016). Efficient gateways placement for internet of things with qos constraints. Dans *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–6. IEEE.
- Gupta, S. et Hirdesh, A. (2007). Overview of m2m. *Ankit Hirdesh Papers website* : http://hriday.ankit.googlepages.com/M2M_overview_paper.pdf.
- Igarashi, Y., Ueno, M. et Fujisaki, T. (2012). Proposed node and network models for an m2m internet. Dans *World Telecommunications Congress (WTC), 2012*, 1–6. IEEE.
- Iyengar, S. S. et Brooks, R. R. (2016). *Distributed sensor networks : sensor networking and applications*. CRC press.
- Karaboga, D. et Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108–132.
- Karaboga, D. et Basturk, B. (2007). Artificial bee colony (abc) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. Dans *International fuzzy systems association world congress*, 789–798. Springer.
- Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C. et Karaboga, N. (2014). A comprehensive survey : artificial bee colony (abc) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review*, 42(1), 21–57.
- Karaboga, D. et Ozturk, C. (2011). A novel clustering approach : Artificial bee colony (abc) algorithm. *Applied soft computing*, 11(1), 652–657.
- Kennedy, J. E. (1995). R.(1995) : " particle swarm optimisation. *Neural Networks*.
- Kim, M. et Choi, S. (2010). Effective m2m gateway selection algorithms for geographical region-based query. Dans *Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2010 International Conference on*, 413–414. IEEE.
- Kinney, P. et al. (2003). Zigbee technology : Wireless control that simply works. Dans *Communications design conference*, volume 2, 1–7.
- Laya, A., Alonso, L. et Alonso-Zarate, J. (2014). Is the random access channel of lte and lte-a suitable for m2m communications ? a survey of alternatives. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(1), 4–16.
- Li, F., Wang, Y., Li, X.-Y., Nusairat, A. et Wu, Y. (2008). Gateway placement for throughput optimization in wireless mesh networks. *Mobile Networks and Applications*, 13(1-2), 198–211.

- Li, P., Huang, X., Fang, Y. et Lin, P. (2007). Optimal placement of gateways in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6), 3421–3430.
- Lien, S.-Y., Chen, K.-C. et Lin, Y. (2011). Toward ubiquitous massive accesses in 3gpp machine-to-machine communications. *IEEE Communications Magazine*, 49(4).
- Lin, X., Adhikary, A. et Wang, Y.-P. E. (2016). Random access preamble design and detection for 3gpp narrowband iot systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(6), 640–643.
- Lipowski, A. et Lipowska, D. (2012). Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6), 2193–2196.
- Muthaiah, S. N. et Rosenberg, C. (2008). Single gateway placement in wireless mesh networks. *Proc. ISCN*, 8.
- Novo, O., Beijar, N., Ocaik, M., Kjällman, J., Komu, M. et Kauppinen, T. (2015). Capillary networks-bridging the cellular and iot worlds. Dans *Internet of Things (WF-IoT), 2015 IEEE 2nd World Forum on*, 571–578. IEEE.
- Pereira, C. et Aguiar, A. (2014). Towards efficient mobile m2m communications : survey and open challenges. *Sensors*, 14(10), 19582–19608.
- Pothuganti, K. et Chitneni, A. (2014). A comparative study of wireless protocols : Bluetooth, uwb, zigbee, and wi-fi. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 4(6), 655–662.
- Ratasuk, R., Vejlgaard, B., Mangalvedhe, N. et Ghosh, A. (2016). Nb-iot system for m2m communication. Dans *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 IEEE*, 1–5. IEEE.
- Raymor, B., Silverajan, B., Bormann, C., Hartke, K., Tschofenig, H. et Lemay, S. (2018). Coap (constrained application protocol) over tcp, tls, and websockets.
- Rezaee Jordehi, A. et Jasni, J. (2013). Parameter selection in particle swarm optimisation : a survey. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(4), 527–542.
- Sakamoto, S., Oda, T., Ikeda, M., Barolli, L. et Xhafa Xhafa, F. (2016). Implementation and evaluation of a simulation system based on particle swarm optimisation for node placement problem in wireless mesh networks. *International journal of communication networks and distributed systems*, 17(1), 1–13.

- Sarkar, S. K., Basavaraju, T. et Puttamadappa, C. (2016). *Ad hoc mobile wireless networks : principles, protocols, and applications*. CRC Press.
- Shafiullah, S. et Sagar, R. (2015). Implementation of controller area network (can) and zigbee protocol for industrial process monitoring and control.
- Sharma, S. et Bhambu, P. (2016). Artificial bee colony algorithm : A survey. *International Journal of Computer Applications*, 149(4).
- Shelby, Z., Hartke, K. et Bormann, C. (2014). *The constrained application protocol (CoAP)*. Rapport technique.
- Slijepcevic, S. et Potkonjak, M. (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks. Dans *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, volume 2, 472–476. IEEE.
- Sun, S., Kim, K.-Y., Shin, O.-S. et Shin, Y. (2016). Device-to-device resource allocation in lte-advanced networks by hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 9(5), 945–954.
- Tan, S. K., Sooriyabandara, M. et Fan, Z. (2011). M2m communications in the smart grid : Applications, standards, enabling technologies, and research challenges. *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2011.
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H.-X. et Tan, C. K.-Y. (2014). Performance evaluation of mqtt and coap via a common middleware. Dans *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2014 IEEE Ninth International Conference on*, 1–6. IEEE.
- Van der Merwe, D. et Engelbrecht, A. P. (2003). Data clustering using particle swarm optimization. Dans *The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003. CEC'03.*, volume 1, 215–220. IEEE.
- Vidanagama, V. T. N., Arai, D. et Ogishi, T. (2015). M2m gateway selection scheme for smart wireless devices : An energy consumption perspective. Dans *Information and Telecommunication Technologies (APSITT), 2015 10th Asia-Pacific Symposium on*, 1–3. IEEE.
- Wong, J. L., Jafari, R. et Potkonjak, M. (2004). Gateway placement for latency and energy efficient data aggregation [wireless sensor networks]. Dans *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, 490–497. IEEE.
- Xia, N., Chen, H.-H. et Yang, C.-S. (2018). Radio resource management in machine-to-machine communications—a survey. *IEEE Communications Sur-*

veys & Tutorials, 20(1), 791–828.

Younis, O. et Fahmy, S. (2004). Heed : a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 3(4), 366–379.

Zhang, P. et Miao, G. (2014). Energy-efficient clustering design for m2m communications. Dans *Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014 IEEE Global Conference on*, 163–167. IEEE.

Zheng, K., Hu, F., Wang, W., Xiang, W. et Dohler, M. (2012). Radio resource allocation in lte-advanced cellular networks with m2m communications. *IEEE communications Magazine*, 50(7).