



HAL
open science

Intégration d'un nouveau modèle de communication entre acteurs dans une architecture de simulation multi agent (application à deux cas d'étude du Sénégal)

Madoune Robert Seye

► To cite this version:

Madoune Robert Seye. Intégration d'un nouveau modèle de communication entre acteurs dans une architecture de simulation multi agent (application à deux cas d'étude du Sénégal). Modélisation et simulation. Sorbonne Université; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2022. Français. NNT : 2022SORUS222 . tel-03850723

HAL Id: tel-03850723

<https://theses.hal.science/tel-03850723>

Submitted on 14 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sorbonne Université
Université Cheikh Anta Diop de Dakar

EDITE - EDM I

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : INFORMATIQUE

Présentée par :

Madoune Robert SEYE

Titre :

Intégration d'un nouveau modèle de communication entre acteurs dans une architecture de simulation multi agent (application à deux cas d'étude du Sénégal)

Mémoire Soutenu le 30 Juin 2022 devant le jury composé de :

Président :	M Bamba	GUEYE	Professeur Titulaire	UCAD, Dakar
Rapporteurs :	M. Ousmane	THIARE	Professeur Titulaire	UGB, Saint-Louis
	M. Jean Pierre	MULLER	Professeur Titulaire	CIRAD, France
Examineur :	M. Youssou	FAYE	Maitre de conférences	UASZ, Ziguinchor
	M. Mathieu	LATAPY	HDR	SU France
	Mme Camille	JAHEL	Chargée de recherche	Cirad, France
Directeur de thèse :	M. Moussa	DIALLO	Professeur Titulaire	UCAD, Dakar
Co-directeur de thèse :	M. Christophe	CAMBIER	HDR	SU, France

DÉDICACE

Je dédie ce travail à mon père le Professeur SEYDINA ISSA LAYE SEYE.

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Mes remerciements vont à l'encontre de mon directeur de thèse, le professeur Moussa DIALLO et de mon co-directeur de thèse, le professeur Christophe CAMBIER. Ils ont bien voulu être mes directeurs de thèse et ont beaucoup contribué à la réalisation de ce travail. Je ne cesserai de leur dire merci beaucoup pour leur engagement, leur disponibilité, leur patience et leur judicieux conseil.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu montrer leur disponibilité pour examiner ce travail : M. Cheikh Ahmadou Bamba GUEYE, le président du jury. M. Ousmane Thiare et M. Jean Pierre Muller les rapporteurs de ce travail; M. Youssou Dieng, M. Mathieu LATAPY et Mme Camille JAHEL les examinateurs.

Mes remerciements à toute l'équipe '*RDNOV group*', plus particulièrement Abdoulaye KAMA, Bassirou NGOM et Monsieur DRAME.

Mes remerciements à tout le personnel du CRENT, les trois pôles réunis.

À mes très chère mère Boudiane Traoré et Binta DIatta pour la place importante que vous occupez dans ma vie. Je ne cesserai de prier pour que le Seigneur vous accorde tous les biens sur terre.

À ma famille SEYE adorée, Alassane, Raby, Fama, Mamy et « badiene », je vous aime tous.

À ma chère épouse Mame Lena Kanoute SEYE qui a toujours été là pour moi, je te remercie du fond du cœur.

Un énorme bisou à ma fille KANY MARIE ANNA SEYE.

RÉSUMÉ

Au Sénégal, les secteurs de la pêche et de l'agro-pastoralisme constituent une part importante de l'économie en relation avec les recettes en devises (exportations) et les besoins vitaux de la population. La zone sylvo-pastorale située dans la région du Ferlo a un rôle de premier plan dans le transport du bétail, tandis que la pêche est une activité incontournable sur les plans économique, social et culturel. Bien que l'importance de ces deux secteurs soit connue, ils sont confrontés à un même problème: les réseaux cellulaires sénégalais (GSM) ne couvrent pas des distances supérieures à 7 ~ km des côtes et il y existe de nombreuses zones blanches. Les zones blanches représentent des étendues géographiques qui ne sont pas couvertes par les opérateurs de réseau mobile. Pour y remédier, nous proposons un système de communication à faible coût qui permet différents services tels que des messages texte courts et des messages vocaux. Il s'agit d'un réseau pour la communication entre des parties prenantes sélectionnées sur la base d'une transmission LoRa dans les bandes ISM pour les zones sans couverture cellulaire. Le système a pour nom COWSHED. Il vise à collecter diverses informations puis à les diffuser dans le réseau. Cependant, en raison de la grande distance qui sépare les différents utilisateurs du réseau et du manque d'équipement central pour tous les interconnecter, ce réseau doit être vu comme tolérant aux délais avec une architecture ad hoc.

Nous supposons qu'il s'agit d'un réseau mobile ad hoc clairsemé et connecté par intermittence où une communication fiable et une connectivité de bout en bout ne sont pas toujours disponibles pour la transmission de messages. Dans cette thèse, nous proposons et décrivons d'abord un modèle de réseau de communication. Ce modèle permet d'assurer et d'optimiser la disponibilité du canal, la réutilisation des fréquences et un bon acheminement des informations pour assurer les diffusions. Nous avons une approche multi-agents qui est motivée par l'architecture de notre réseau qui n'est pas figée et fortement dépendante des mouvements des nœuds. De plus, la formation des clusters et l'élection des chefs de clusters reposent sur la connaissance de l'environnement de chaque nœud. Celle-ci se fait grâce aux interactions entre le nœud et ses voisins à sa portée.

Ensuite, un modèle de régression linéaire estimant la perte de trajet est proposé pour les zones urbaines et rurales au moyen de tests empiriques selon l'indicateur de force du signal reçu (RSSI). Enfin, nous considérons différents cas d'utilisation et scénarios qui permettent une meilleure gestion des ressources et une meilleure prise de décision en matière de collecte de ressources et de gestion des urgences dans les zones sylvo-pastorale et maritime.

ABSTRACT

In Senegal, fishing and agro-pastoral sectors constitute a major part of the economy according to foreign exchange earnings (exports) and vital needs of population. The Sylvo-pastoral hosted by Ferlo's region has a prominent role according to livestock trans-humance while fishing is an activity of economic, social and cultural importance. Although the importance of the two sectors is known, they face a similar problem. Senegalese GSM cellular networks do not cover distance upper than 7~ km from coasts and there are lots of white spots in the Sylvo-pastoral areas located in the Ferlo's region.

White spot areas depict geographic locations which are not covered by mobile network operators. Therefore, we propose a low-cost communication system that enables different services like short message text, voice messages. This mesh-based proof-of-concept network is designed for communication between selected stakeholders based on LoRa transmission within ISM bands for areas without cellular coverage. The system is named COWSHED, it aims at collecting various information and disseminate that into the network. However, due to the large distance that separate different users of the network, and the lack of central equipment to interconnect all the users, this network has to be seen as a Delay tolerant network with an ad hoc architecture.

We assume that it is a sparse and intermittently connected mobile adhoc network where reliable communication and end-to-end connectivity is not always available for message transmission. In this thesis we first propose and describe a communication network model. This model makes it possible to ensure and optimize the availability of the channel, the reuse of frequencies and a good routing of information to ensure broadcasts. We have a multi-agent approach which is motivated by the architecture of our network which is not fixed and highly dependent on the movements of the nodes. In addition, the formation of clusters and the election of cluster heads is based on the knowledge of the environment of each node. That knowledge is made thanks to interactions between the node and its neighbors within its reach. Then, a Linear regression model for path loss estimation is proposed for both urban and rural areas by means of empirical tests according to the Received Signal Strength Indicator (RSSI). Furthermore, we consider different use cases and scenarios that enable better management of resources and decision making in relation to ressources collection and emergency management in sylvo-pastoral and fishing areas.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS	x
1 Introduction Generale	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Enjeux de la thèse et contributions	3
1.3 Plan du manuscrit	5
2 Etat de l'art	7
2.1 Introduction	7
2.2 IoT et transmission LPWAN	7
2.2.1 Architecture	7
2.2.2 Composants	9
2.2.3 Outils de communication	9
2.3 Réseaux tolérants aux délais: algorithme de clusterisation et routage	10
2.3.1 Definition DTN	10
2.3.2 Principe du "Store and Forward"	11
2.3.3 Les réseaux auto-organisables	12
2.3.4 Clustérisation et métriques pour réseaux auto-organisables	12
2.4 Agents et systèmes multi-agents	15
2.4.1 Definition	15
2.4.2 Agent	15
2.4.3 Environnement	17
2.4.4 Capteurs et effecteurs chez un agent	19
2.4.5 L'objectif chez un agent	19
2.4.6 La communication chez un agent	20
2.4.7 Systèmes multi-agents	20
2.5 Synthèse	21
3 Modèle d'atténuation et analyse de portée LoRa	23
3.1 Introduction	23
3.2 Configuration de mesure	23
3.3 Modèle de régression linéaire	24
3.3.1 Application zone urbaine	25
3.3.2 Application zone rurale	31
3.3.3 Application zone maritime	35
3.4 Analyse résultats et proposition modèle basé sur la couverture	40

3.5	Synthèse	42
4	COWSHeD : Mise en oeuvre d'un outil de communication en zones blanches	43
4.1	Introduction	43
4.2	Architecture de communication	44
4.3	Des services à valeurs ajoutées de COWSHeD	47
4.3.1	Service de Géolocalisation	49
4.3.2	Service de Messagerie vocal	50
4.3.3	Service de transmission d'information pour la collecte de lait	52
4.4	Synthèse	53
5	GAMMETA: Une approche multi-agents pour la modélisation d'un système de communication en zones blanches	55
5.1	Introduction	55
5.2	Clusterisation et notion d'oracle	56
5.3	Construction modèle	57
5.4	Analyse expérimentale	63
5.4.1	Implémentation	63
5.4.2	Métriques d'évaluation	66
5.4.3	Analyse et évaluation des résultats	67
5.5	Intégration environnement pastoral ou marin	71
5.5.1	Routage	74
5.5.2	Gestion des Fenêtres de transmission	75
5.5.3	Modèle de Gestion de l'espace et des ressources	81
5.6	Synthèse	84
6	Conclusion	87
6.1	Bilan	87
6.2	Discussions et Perspectives	88
7	Bibliographie	91

LISTE DES FIGURES

1.1	Couverture 2G des opérateurs du Sénégal	1
1.2	Zones sans couverture réseau au Sénégal	2
1.3	Embarcations de pêche artisanale à Saint Louis, Sénégal.	2
2.1	Architecture Internet des Objets	8
2.2	Composants d'un système IoT	8
2.3	Exemple de structure de cluster	13
2.4	Liste de classification de techniques de clustering	13
2.5	Un agent interagit avec son environnement grâce à ses capteurs et ses effecteurs	15
2.6	Quelques environnements de tâches avec leurs propriétés	17
2.7	Structure type d'un système multi-agents	20
3.1	Architecture de communication pour tests de portée	24
3.2	Station de Base Immeuble Kebe	25
3.3	Emplacement Phare des Mammelles et Monument	27
3.4	Distribution géographique 4 Stations de Bases	28
3.5	Distribution géographique des paquets recus des 4 Stations de Bases	28
3.6	Distribution géographique des paquets reçus du Phare des Mammelles en terme de puissance	29
3.7	Distribution géographique des paquets reçus du Monument en terme de puissance	29
3.8	RSSI en fonction du PER.	31
3.9	Perte de trajet pour Phare des Mamelles.	31
3.10	Perte de trajet pour Monument.	31
3.11	Relais Mobile dans un Pick up	32
3.12	Vue en drone de Namarel	32
3.13	Village dans le Ferlo à 12Km de Namarel	33
3.14	Village dans le Ferlo à 7Km de Namarel	33
3.15	PER en fonction de la distance	34
3.16	RSSI en fonction de la Distance	34
3.17	Path Loss pour la station en zone rurale.	35
3.18	2G RSSI sur l'application "inViu OpenCellID"	36
3.19	2G RSSI sur l'application Network Cell Info Lite	37
3.20	RSSI 2G durant tests	38
3.21	Relay Mobile dans la pirogue	38
3.22	RSSI supérieur à $-95dBm$	39
3.23	Path Loss en zone maritime	40

3.24	Couverture à -110dBm	41
3.25	Couverture à -120dBm	41
4.1	COWShED: Architecture de communication	44
4.2	Prototype de communication basée sur le Bluetooth	45
4.3	Prototype de communication basée sur le WiFi	45
4.4	Un éleveur utilisant le système Cowshed	46
4.5	Marchés et flux de bétail sur pied	48
4.6	Le bassin de collecte du lait de la Laiterie du Berger	51
4.7	Stratégies des éleveurs collectés en saison sèche	52
4.8	Architecture communication Collecte	53
5.1	Comparaison des stratégies de transmission	58
5.2	Le "Process Overview" de notre modèle.	59
5.3	Simulation GAMMETA et K-means personnalisé	66
5.4	Le nombre moyen de clusters par algorithme	67
5.5	le nombre moyen de nœuds gérés par un chef de cluster	69
5.6	Diagramme de classes du modèle d'intégration	71
5.7	Exemple d'intersection de domaines de représentation de différents modèles	73
5.8	La performance en fonction du niveau de connaissance du réseau.	74
5.9	Tableau récapitulatif des algorithmes proposés	75
5.10	Calculateur de Time on air.)	77
5.11	Intervalle entre deux mises à jour de localisation	77
5.12	Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster (temps d'occupation du canal : 2000ms).	79
5.13	Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster(temps d'occupation du canal : 700ms).	80
5.14	Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster.(temps d'occupation du canal : 300ms)	80
5.15	Distance des campements par rapport au forage	81
5.16	Carroyage de mailles de 4km ²	82
5.17	Environnement de simulation pour la collecte de lait	83
5.18	Bourse de la laiterie après 10 ans de simulation avec communication . . .	84
5.19	Bourse de la laiterie après 10 ans de simulation sans communication . . .	84
6.1	Utilisation des principes de réseau opportuniste pour la diffusion de l'information	89

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Evaluation performance en zone Urbaine	30
3.2	Evaluation performance en zone Rurale	35
3.3	Evaluation performance en zone maritime	39
4.1	Performance Evaluation	47
5.1	Nombre de noeuds par cluster	70

1 Introduction Generale

1.1 Contexte et problématique

Au Sénégal, comme dans de nombreux autres pays du continent africain, la plupart des activités économiques s'effectuent en zones pastorales ainsi que sur les secteurs de pêche de toute la bordure côtière (600.000 actifs et 4% du PIB).

La transhumance se fait dans des zones très vastes, spécialement dans la zone sylvo-pastorale localisée dans le Ferlo Figure 1.1. Ces régions reculées ont la particularité d'avoir une densité de population très faible. Raison pour laquelle les opérateurs de télécommunications ne voient pas l'intérêt d'y investir pour couvrir toute la zone. Par conséquent, une bonne partie du Ferlo n'est pas couverte par les réseaux de communication terrestre. À titre d'exemple, comme on peut le voir sur les figures Figure 1.1 et Figure 1.2 qui montrent les couvertures 2G et les zones blanches au Sénégal, on constate qu'une grande partie du Ferlo reste une zone blanche, donc une zone sans couverture radio (GSM, 3G, 4G etc).

De ce fait, les éleveurs dans ces vastes zones blanches n'ont aucun moyen de communiquer entre eux. Ce qui constitue un vrai problème pour eux et rend très difficile la dissémination d'informations sur les états des points d'eau, les risques sanitaires etc. De plus, ces éleveurs subissent une recrudescence des vols de bétail [71] . Un système de communication adapté permettrait de connaître les zones sûres, mais aussi de lancer des alertes en cas de vol. Dans ce contexte, l'Etat du Sénégal souhaite s'orienter vers les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) pour trouver une solution à ces vols de bétails.

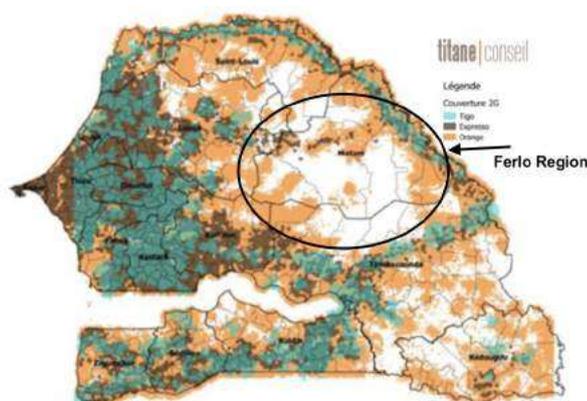


Figure 1.1: Couverture 2G des opérateurs du Sénégal

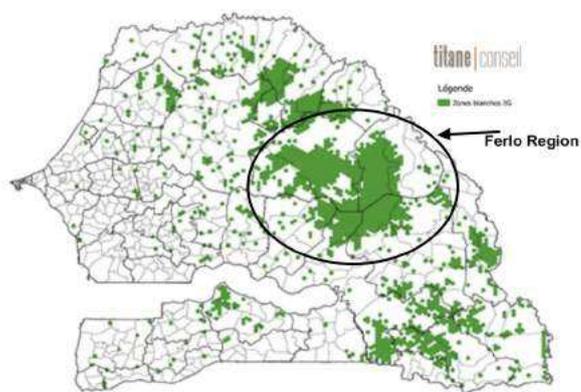


Figure 1.2: Zones sans couverture réseau au Sénégal



Figure 1.3: Embarcations de pêche artisanale à Saint Louis, Sénégal.

Le secteur halieutique constitue un pan majeur de l'économie, tant au niveau de la rentrée de devises (exportations) que sur le plan alimentaire des populations. L'effort de pêche au Sénégal concerne principalement la pêche artisanale, constituée d'une flotte de 20.000 pirogues de tailles variables. Cependant, les conditions sociales et humaines y sont difficiles avec notamment le problème de la sécurité en mer (une centaine de morts par an).

Bien qu'il n'existe pas, à ce jour, de système de suivi de la distribution spatiale de l'effort de pêche artisanale, on sait qu'au Sénégal une grande partie de l'activité se réalise à plus de 10km des côtes; c'est-à-dire hors de la zone de couverture des opérateurs de télécommunications.

Les embarcations de pêche artisanale sont habituellement constituées d'une coque en bois de conception locale, sur laquelle est adapté un moteur hors-bord pouvant aller jusqu'à 60 chevaux. Ces pirogues, largement décorées Figure 1.3 Photo : T. Brochier, sont emblématiques du Sénégal, mais leur intégration dans le paysage de la pêche de demain reposera sur leur capacité de modernisation. En effet, à l'heure actuelle, l'électronique embarquée est au mieux constituée des téléphones portables de l'équipage et d'un GPS « main » du capitaine. Contrairement aux navires industriels, ces embarcations ne sont pas équipées des systèmes habituels de communication, et sont donc sans moyens de communication dès qu'elles sortent du réseau GSM (10 km des côtes). Pourtant, les pêcheurs Sénégalais s'aventurent jusqu'à 100 km des côtes, ce qui pose un problème très sérieux de sécurité. En outre, les systèmes de positionnement marin centralisés classiques (VMS ou AIS) ne sont pas embarqués pour des raisons financières.

Les pêcheurs qui s'aventurent au-delà de 10 km des côtes se retrouvent donc en zones blanches et n'ont aucun moyen de communiquer ni entre eux, ni avec la terre. Ces conditions rendent d'autant plus dangereuses les éventuelles conséquences d'une avarie moteur ou d'un chavirement, car il n'est plus possible d'appeler à l'aide. En cas de non retour d'une pirogue, le comité de pêcheurs alerte l'aviation qui peut mener des recherches en mer, mais avec de faibles indications sur le secteur de recherche, et parfois trop tard. De plus, la courantologie dans la zone du Sénégal tend à entraîner vers le large tout objet dérivant, en particulier durant la saison d'upwelling (saison froide) qui est aussi la période où les pêcheurs s'aventurent le plus et le plus loin des côtes.

Un système de communication adapté permettrait aux pêcheurs d'être en mesure de prévenir dans un premier temps les autres pêcheurs aux alentours d'une éventuelle avarie, mais aussi de collaborer dans leurs activités (pêche collective, échange d'informations etc.). Il leur serait aussi possible de lancer des alertes en cas d'observation de pêche illégale, la surveillance collective étant un point clé du processus de cogestion en œuvre au Sénégal.

1.2 Enjeux de la thèse et contributions

Afin d'apporter des réponses aux problèmes soulignés plus tôt, le projet de thèse se donne deux objectifs majeurs :

- 1- Le développement d'un système de communication et géolocalisation à bas coût, lié pour partie aux technologies récentes de communication par ondes électromagnétiques (LoRa).

2- Un couplage entre un modèle de communication et un modèle de simulation selon une architecture à base d'agents afin d'obtenir une représentation de l'espace étudié et la dynamique des acteurs. Ces modèles sont définis ci-dessous et intègrent les sous-modèles suivants :

Le modèle de communication : Pour sa mise en place, nous nous appuyons sur les nouvelles technologies de communication par ondes électromagnétiques et de miniaturisation des systèmes de géolocalisation par satellite. Les solutions ayant recours aux communications satellitaires sont écartées car le pouvoir d'achat des populations en ces zones reculées est très faible. Nos recherches s'orientent donc vers une solution à bas coût pour l'utilisateur. Le modèle de communication comprend :

- Un sous-modèle de clusterisation : en tirant parti des bandes de fréquences libres à longue portée (ISM), l'idée est de mettre en oeuvre un réseau ad hoc et très longue portée pour la communication directe entre pêcheurs en mer ou entre éleveurs dans les zones blanches. Ce sous-modèle permettra de mettre en place un certain nombre de règles permettant à tous les utilisateurs de communiquer en réduisant au maximum les collisions dans les communications. Ce réseau est assimilable à un réseau auto-organisé. Les réseaux auto-organisés fonctionnent indépendamment, sans configuration, sans intervention et sans besoin d'infrastructure fixe. Ils rassemblent plusieurs types de réseaux tels que les réseaux ad hoc (MANET), les réseaux de capteurs (Sensor Networks) et les réseaux de véhicules (VANET). Ces réseaux sont constitués de nœuds mobiles ou non mobiles qui peuvent communiquer directement entre eux s'ils sont situés à portée radio. La portée des nœuds étant relativement limitée, le déploiement d'un réseau à grande échelle nécessite que le réseau soit multi-saut (les nœuds intermédiaires jouent le rôle de relais). Avec l'état imprévisible des liens et les changements continus de topologie, les réseaux auto-organisés soulèvent de nombreuses questions, notamment celle qui concerne le routage dynamique.

- Un sous-modèle de stockage : pour une meilleure analyse de l'effet de la communication sur les déplacements, il est important de prévoir un espace de stockage pour avoir les itinéraires suivis par les pêcheurs ou pasteurs durant leurs activités. Cependant, le stockage se fera en fonction des déplacements. En effet, les déplacements lors de la recherche d'une ressource sont différents de ceux lorsque cette ressource est trouvée. Des intervalles de stockage sont à définir pour une meilleure gestion de l'espace de stockage.

Au-delà de l'aspect technique de ce modèle de communication, il y a un aspect social à prendre en compte. Nous avons donc pensé à la nécessité de mettre à disposition un outil qui facilitera l'accès à la technologie aux populations sur place.

- Un modèle de langage simplifié : Le modèle doit pouvoir traduire certains actes de langage entre humains, et nous devons proposer par exemple une interface adaptée sur un téléphone. Cette opération sera réalisée en collaboration avec des chercheurs en sociologie ou en sciences du langage de manière à faire communiquer des populations qui ont parfois un accès limité à l'écriture.

- Modèle et architecture multi-agents : Il apparaît de nombreuses analogies entre les questions liées aux défis scientifiques et techniques qui émergent dans le domaine du pastoralisme et celui des pêcheries artisanales (l'espace, la temporalité, le risque, le partage d'informations, les ressources etc.). Ces ressemblances ou même parfois ces différences vont favoriser une démarche générique dans nos questionnements sur ces deux domaines. En effet, les pirogues se meuvent dans un espace physique marin avec

des contraintes mécaniques, mais le mouvement de ces pirogues est la résultante des intentions des capitaines qui peuvent se combiner avec les positions des autres pirogues si des interactions utiles sont recherchées. Les animaux également s'organisent de manière autonome sous forme de troupeaux auprès desquels les bergers peuvent ou non exercer leur contrôle. Certains événements ou connaissances sur le milieu (abondances des ressources ou vols de bétail) vont contraindre les pasteurs à s'organiser. Le fait d'ajouter un modèle de communication à ce système va forcément produire des changements. En identifiant et en caractérisant ces modèles, nous avons créé un espace virtuel de simulation dans lequel est représenté l'espace marin ou l'espace pastoral. Ces espaces sont constitués d'agents mobiles associés à leurs relais mobiles permettant la transmission d'informations et leurs ressources. Nous pourrions alors tester des scénarios et nous chercherons à identifier de nouvelles pratiques.

1.3 Plan du manuscrit

Après cette brève description des objectifs de la thèse, cette section présente le plan de la thèse.

Ce mémoire de thèse est organisé en 6 chapitres. Cette introduction a permis d'illustrer la problématique des zones blanches en milieu rural et maritime et le besoin d'abord de mettre en oeuvre un système de communication adapté permettant l'échange d'informations entre acteurs. Ensuite, elle a aussi mis en avant le besoin de créer un modèle de réseau auto-organisable en vue d'assurer et d'optimiser la disponibilité du canal, la réutilisation des fréquences et un bon routage des informations pour assurer des diffusions.

Le second chapitre porte sur un état de l'art sur l'internet des objets et les transmissions LPWAN, les DTN ou réseaux tolérants aux délais en présentant la technique de clusterisation, largement connue et utilisée dans les réseaux auto-organisables. Aussi, nous présentons les notions fondamentales et importantes à la bonne compréhension du travail effectué en terme de modélisation. Par ailleurs, nous définissons les termes tels que la modélisation, les systèmes complexes, les systèmes multi-agents.

Dans le troisième chapitre nous évaluons la fiabilité des dispositifs de transmission. L'objectif est de créer un modèle d'atténuation de canal grâce à l'exploitation des données de tests de portée en zone rurale, urbaine et maritime. Les modèles obtenus permettent d'estimer la perte de chemin avec la technologie de transmission LoRa.

Dans le quatrième chapitre nous présentons le système de communication de bout en bout. Cette communication se fait via des boîtiers relais qui échangent des informations avec le protocole de transmission *LoRa*. Nous y présentons l'architecture de déploiement, les composantes du système et les différents services développés dans l'outil tel que la géolocalisation, la messagerie texte et audio.

Le chapitre 5 présente notre proposition de modèle nommé GAMMETA (An aGent-based Approach for Modeling a coMmunication nEtworK in whiTe Areas) qui est une approche multi-agents pour la modélisation d'un système de communication en zones blanches. GAMMETA est un modèle multi-agent qui décrit la structuration en cluster du réseau en utilisant des métriques adaptées à notre contexte. Les performances de ce modèle sont comparées à celles d'un algorithme de clustérisation très connu (K-Means).

L'algorithme de K-Means a cependant été modifié pour l'adapter aux besoins de nos tests. Nous présentons également un cas d'application du modèle dans une architecture de simulation multi-agents en zone pastorale.

Le dernier chapitre présente un bilan des travaux de recherche décrits dans cette thèse et donne des perspectives possibles afin de guider les travaux futurs.

2 Etat de l'art

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous faisons un état de l'art sur les domaines et technologies présentés dans nos travaux et dont la compréhension facilitera la suite du travail. Il s'agit en l'occurrence de l'Internet des Objets avec les LPWANs (Low Power Wide Area Networks), les concepts de réseaux tolérants aux délais où les notions de routage et de clustérian sont abordés, et enfin la modélisation multi-agent.

2.2 IoT et transmission LPWAN

L'Internet des Objets tend à prendre une place considérable dans nos vies et promet de révolutionner notre façon de vivre et de travailler. Par conséquent, d'ici 2024, le secteur de l'IoT devrait générer un chiffre d'affaire de 4,3 billions de dollars [17]. Cela implique le développement de nombreux services à valeur ajoutée tels que la fabrication d'appareils, la connectivité ... L'Internet des Objets, ou IoT (Internet of Things), est un scénario dans lequel les objets, les animaux et les personnes se voient attribuer des identifiants uniques. Cela permet de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter les données provenant de ces entités. Ce concept est donc l'expansion du réseau internet à des objets du monde physique[5][4].

En fonction de nos besoins, le choix du canal de transmission de données à utiliser dépend de plusieurs facteurs tels que la distance, le coût, la consommation d'énergie et la quantité de données à transférer. Pour mettre en réseau des capteurs, il existe aujourd'hui de nombreuses technologies. Cela va des équipements proches des collecteurs où la solution filaire, le blue-tooth ou le Zig-bee sont utilisés jusqu'aux réseaux longue portée, le câblage n'étant pas envisageable dans ce dernier cas, les réseaux mobiles sont très souvent utilisés: SMS 3G ou 4G[5] [62].

2.2.1 Architecture

En fonction de la façon dont les objets connectés sont utilisés, il y a un certain nombre de procédures qui reviennent souvent et de celles-ci est tirée une architecture comme le montre la Figure 2.1.

- Capter : consiste en la transformation d'une grandeur physique analogique en un signal numérique.
- Concentrer et stocker : permet de faire la phase d'acquisition et de sauvegarde des données.

- Présenter : consiste en la restitution des informations d'une façon compréhensible par l'homme ce qui permet à ce dernier d'avoir des informations sur ses objets connectés et d'agir en conséquence [3].

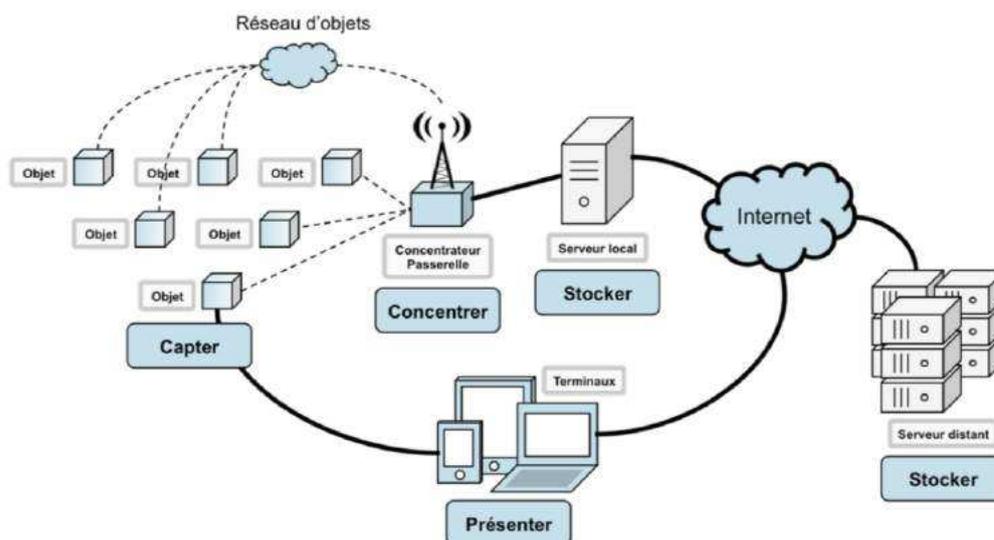


Figure 2.1: Architecture Internet des Objets

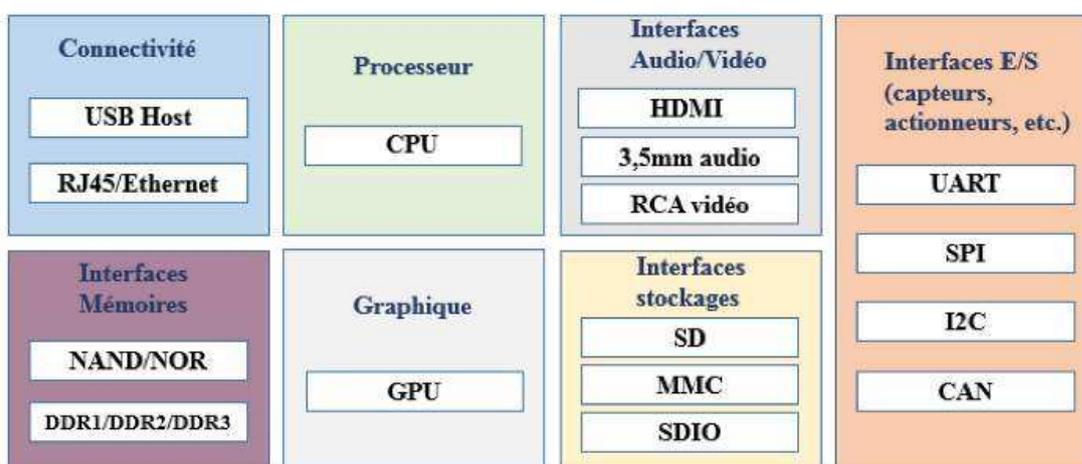


Figure 2.2: Composants d'un système IoT

2.2.2 Composants

Un système IoT est composé d'un certain nombre de composants matériels pour faciliter divers utilitaires du système tels que la détection, l'identification, l'activation, la communication et la gestion.

La Figure 2.2 présente les différents composants qui constituent un système IoT. Ce dernier est basé sur un appareil qui fournit des activités de détection, d'actionnement, de contrôle et de surveillance. Les appareils peuvent échanger des données entre eux et entre les applications connectées, ou collecter des données d'autres appareils [8]. Ils peuvent traiter les données soit en local, soit les envoyer aux serveurs centralisés ou à des applications 'backend' du 'cloud' pour le traitement. Certaines tâches peuvent s'effectuer en local au sein de l'infrastructure IoT en fonction des contraintes temporelles et d'espace lié à la mémoire, la capacité de traitement, la latence, la vitesse de communication et le délai. Un appareil IoT peut être composé de plusieurs interfaces pour les communications filaires et sans fil avec d'autres appareils. Il s'agit notamment des interfaces d'E/S pour les capteurs, des interfaces pour la connectivité Internet, des interfaces de mémoire et de stockage et des interfaces audio/vidéo[45]. Les systèmes IoT peuvent également être de type varié, par exemple, des capteurs portables, des montres intelligentes, des lumières LED, des automobiles et des machines industrielles [65].

2.2.3 Outils de communication

Les progrès récents liés aux nouvelles technologies des systèmes micro-électromécaniques, des communications sans fil et de l'électronique numérique ont permis de donner naissance aux nœuds capteurs sans fil. Ces derniers multifonctionnels, de petite taille, à faible coût de consommation et peu coûteux, communiquent sur des portées courtes [9]. Les nœuds capteurs sans fil sont constitués de composants de détection, de traitement de données et de communication, ils coopèrent entre eux pour former une infrastructure de communication, dans le but d'accomplir une tâche commune, qui s'appelle Réseaux de Capteurs Sans Fil ('Wireless Network Sensors', WSN)[10].

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil sont des réseaux ad hoc particuliers qui se caractérisent par leur contrainte d'énergie et leur puissance limitées. Ils sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs, qui sont des micro-capteurs capables de recueillir et de transmettre des données d'une manière autonome.

Parmi les réseaux longue portée, il existe également des réseaux étendus à faible puissance (LPWAN). Ils se positionnent comme un véritable concurrent car avec un faible débit, ils parviennent à atteindre de longues distances (ils ont une très grande portée de communication) tout en utilisant les bandes libres ISM (industriel, scientifique et médical) et en même temps ils ont une consommation très réduite en termes d'énergie. LPWAN (Low Power Wide Area Network) a été conçu pour connecter des applications du domaine M2M / IoT (Internet of Things) [66] [80]. Dans un passé récent, ce sont les réseaux mobiles (notamment 2G) qui supportaient ce type d'application, mais de nos jours, les LPWAN sont la forme dominante de technologie réseau pour un grand nombre d'applications M2M / IoT.

La plupart des réseaux LPWAN fonctionnent dans les bandes ISM sans licence à 169, 433, 868/915 MHz et 2,4 GHz selon la région d'exploitation. Certains des candidats LPWAN les plus prononcés sont SigFox, LoRa, Weightless et Ingenu [6]. Ils ont une longue durée de vie de la batterie et sont peu coûteux. La couverture est également l'une des mesures de performance les plus critiques pour les réseaux étendus à faible puissance (LPWAN). Parmi les principales applications prévues pour le LPWAN, il y a les systèmes de transport automobiles et intelligents (gestion de flotte, communication véhicule-infrastructure, trafic intelligent, informations routières en temps réel vers le véhicule, alertes et rapports de sécurité et d'incident,) et divers cas de comptage intelligent (par exemple, surveillance de la consommation d'électricité, d'eau et de gaz, compteurs médicaux et alertes) [66] - [63] [80][58].

Ainsi, des stations de base LoRa ont été déployées à Oulu (Finlande) [62] et Rennes (France) [63] pour évaluer leurs performances de couverture en fonction du Received Signal Strength Indicator (RSSI). Une étude récente montre que LoRa peut être un lien fiable pour les applications de télédétection à faible coût [80].

Il est cependant important de noter que l'augmentation rapide des communications de type machine (MTC, Machine Type Communication) pose un défi aux opérateurs cellulaires pour prendre en charge les communications M2M sans entraver la qualité de service existante pour les communications interhumaines (H2H, human 2 human) déjà établies[64]. LTE-M est l'un des candidats pour prendre en charge les communications M2M dans les réseaux cellulaires à évolution à long terme (LTE). De plus, le narrow band IoT, plus communément appelé NB-IoT se met aussi en position pour le futur de l'IoT. Il s'agit plus concrètement d'un standard de communication LPWAN (Low Power Wide Area Network – réseau basse consommation longue portée, en français) dont la principale mission consiste à faciliter la communication d'importants volumes de données sur une très grande distance[25].

D'un point de vue plus technique, le NB-IoT fonctionne sur l'ancien réseau GSM (bande de fréquence de 200 kHz), avec le réseau LTE ou bien au sein d'un réseau indépendant. Il permet d'avoir des débits de 20 à 250Kbit/s en download ou upload avec une latence inférieure à 10 secondes environ.

Le Narrowband IoT se distingue du LTE-M par le fait de ne pas reposer sur le protocole IP, mais sur l'échange de messages. De fait, le NB-IoT se révèle plus adapté à la communication de grands volumes de données, en particulier dans le sens descendant (dans des bandes passantes de 200 kHz), à un rythme plus lent que le LTE-M (dans des bandes passantes de 1,4 KHz) [64] [25] [43].

2.3 Réseaux tolérants aux délais: algorithme de clusterisation et routage

2.3.1 Définition DTN

DTN signifie Delay Tolerant Network, ce qui se traduit par réseaux tolérants aux délais. Le concept des DTN fut introduit par Kevin Fall en 2002. Il avait comme cible les réseaux interplanétaires. En effet, lorsque la distance qui sépare l'émetteur du récepteur est grande,

elle devient directement la cause d'un quelconque délai [50]. De manière générale on dit que la technologie d'internet se base sur des protocoles dits conversationnels. C'est-à-dire qu'il y a communication répétée dans les deux sens de circulation entre l'émetteur et le récepteur afin de s'assurer que le message a été correctement transmis [15]. Cependant dans certains environnements ou dans certains contextes ces hypothèses ne se vérifient pas. Deux situations en particulier rendent le principe d'internet inadapté :

- Les délais sont tellement élevés qu'attendre un acquittement puis renvoyer le message s'il n'a pas été reçu peut prendre jusqu'à des heures.
- La connexion n'est pas continue et si le message n'a pas pu être transmis dans les temps il faut attendre la prochaine opportunité de transmission.

Un relais ne peut donc se contenter de router les paquets. Il doit aussi pouvoir les stocker, et les transmettre seulement quand une opportunité de connexion apparaît. C'est pourquoi les DTN fonctionnent sur une logique dites de « Store and Forward » similaire à celle utilisée par les services postaux : les données sont transmises d'une zone de stockage à une autre. Les données transmises sont un bloc complet de données compréhensibles isolément et non un fragment de message [49].

2.3.2 Principe du "Store and Forward"

Les méthodes de store and forward sont utilisées dans la vie de tous les jours. On peut par exemple citer l'acheminement d'un courrier, d'un e-mail, d'un message vocal, etc. Pour cela, l'utilisation d'espace de stockage s'avère nécessaire. Les espaces de stockage présents sur les nœuds réseaux conservent les données indéfiniment. Ils sont dits à stockage persistant, en opposition avec les mémoires à court terme. Les routeurs utilisés sur Internet sont basés sur des mémoires à court terme pour mettre en file d'attente les paquets entrants pendant la consultation de la table de routage et le transfert de ces données sur un port de sortie libre [11].

A l'inverse, les réseaux DTN utilisent des espaces de stockage plus importants (disque dur). En effet, pour les raisons ci-dessous, l'utilisation de stockage persistant est indispensable :

- Le lien de communication de la source vers la destination peut être indisponible pour une durée.
- Un nœud du réseau peut émettre ou recevoir des données plus rapidement ou de manière plus fiable que les autres nœuds du réseau.
- Un message transmis doit être retransmis en cas d'erreur sur le réseau ou si les informations ne sont pas acceptées pour être transférées.

Tout ou une partie des données (en provenance d'une application) est déplacé d'un espace de stockage d'un nœud du réseau vers l'espace de stockage du nœud suivant tout au long d'un chemin qui permettra éventuellement de joindre le destinataire [15]. Lors du transfert de données (ou d'une portion de ces données) depuis un nœud du réseau vers le suivant, la taille du message est annoncée de manière à réserver l'espace de stockage nécessaire et la bande passante pour le transfert.

2.3.3 Les réseaux auto-organisables

Grâce à l'évolution des technologies de communication sans fil, l'utilisation des systèmes d'information a évolué et a notamment exprimé le besoin de mobilité et d'autonomie des utilisateurs. Les réseaux filaires ne pouvant plus offrir une telle possibilité d'utilisation, les réseaux sans fil auto-organisés ont permis de satisfaire partiellement ces nouveaux besoins. En particulier, les applications impliquant deux utilisateurs (e-mail, téléchargement de fichiers, etc.) ou les applications de groupe d'utilisateurs (télé-séminaire, téléconférence, jeux interactifs, etc.) [11][16].

Les réseaux auto-organisés fonctionnent de manière autonome, sans configuration, sans intervention et sans avoir besoin d'une infrastructure fixe. Ils rassemblent plusieurs types de réseaux tels que les réseaux ad hoc (MANET, Mobile Ad hoc Network), les réseaux de capteurs (Sensor Networks) et les réseaux de véhicules (VANET, Vehicular Ad hoc Network). Ces réseaux sont constitués de nœuds mobiles ou non mobiles qui peuvent communiquer directement les uns avec les autres s'ils sont situés à portée radio. La portée des nœuds étant relativement limitée, le déploiement d'un réseau à grande échelle nécessite que le réseau soit multi-hop, c'est-à-dire que les nœuds intermédiaires jouent le rôle de relais. Avec l'état imprévisible des liens et les changements continus de topologie, les réseaux auto-organisés soulèvent de nombreuses questions, notamment en ce qui concerne le routage dynamique. Dans un réseau auto-organisé, chaque nœud est tenu de jouer le rôle de relais et d'être à la fois hôte et routeur afin d'assurer l'acheminement du trafic traversant le réseau. Par conséquent, chaque nœud intermédiaire doit participer à la phase de découverte nécessaire à l'établissement du chemin, au transfert des paquets échangés et à la maintenance de ce chemin[15][11][49]. Cependant, le manque d'infrastructure fixe et d'administration centralisée rend la tâche de maintenance difficile. De plus, compte tenu de la limitation des ressources dans les réseaux auto-organisés, en termes de bande passante et d'énergie, la construction des routes et leur entretien doivent se faire avec un minimum de contrôle du trafic [37].

2.3.4 Clustérisation et métriques pour réseaux auto-organisables

Pour permettre aux protocoles de routage de fonctionner plus efficacement, le clustering est souvent utilisé. Le clustering consiste d'abord à diviser le réseau en un ensemble de nœuds géographiquement proches. Il se présente ensuite comme une solution intéressante pour simplifier et optimiser les fonctions et services du réseau. Plusieurs algorithmes de clustering ont été proposés et évalués. Ces algorithmes ont des caractéristiques différentes et sont conçus pour répondre à certains objectifs en fonction du contexte dans lequel le clustering est déployé (routage, sécurité, économie d'énergie, etc.). Plusieurs études [1][78] se sont intéressées à établir une classification des approches de clustering existantes.

La technique de clustering consiste à organiser les nœuds du réseau en groupes virtuels appelés «clusters». Les nœuds géographiquement voisins sont regroupés dans le même cluster selon certaines règles. Dans un cluster, il existe généralement trois types de nœuds comme le montre la Figure 2.3 : les nœuds «cluster-head», les «Gateway» ou passerelles, et les nœuds «ordinaires» également appelés membres. Dans chaque cluster, un nœud est élu comme chef de groupe, appelé cluster-head, qui a des fonctions supplémentaires

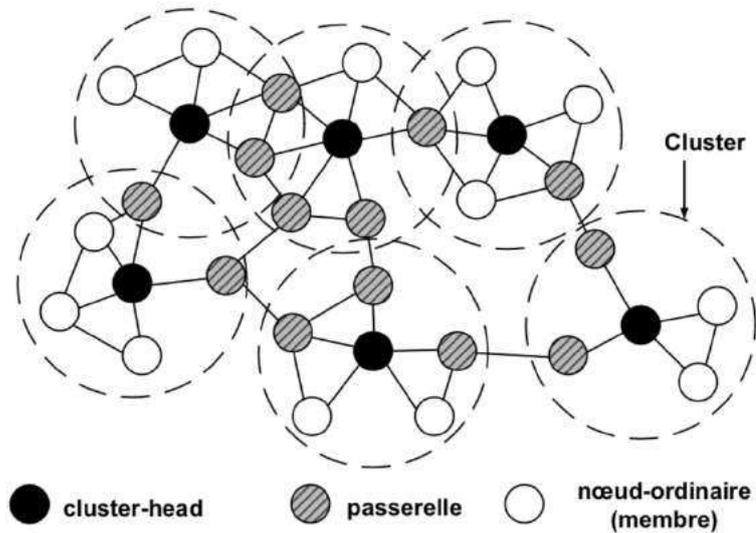


Figure 2.3: Exemple de structure de cluster

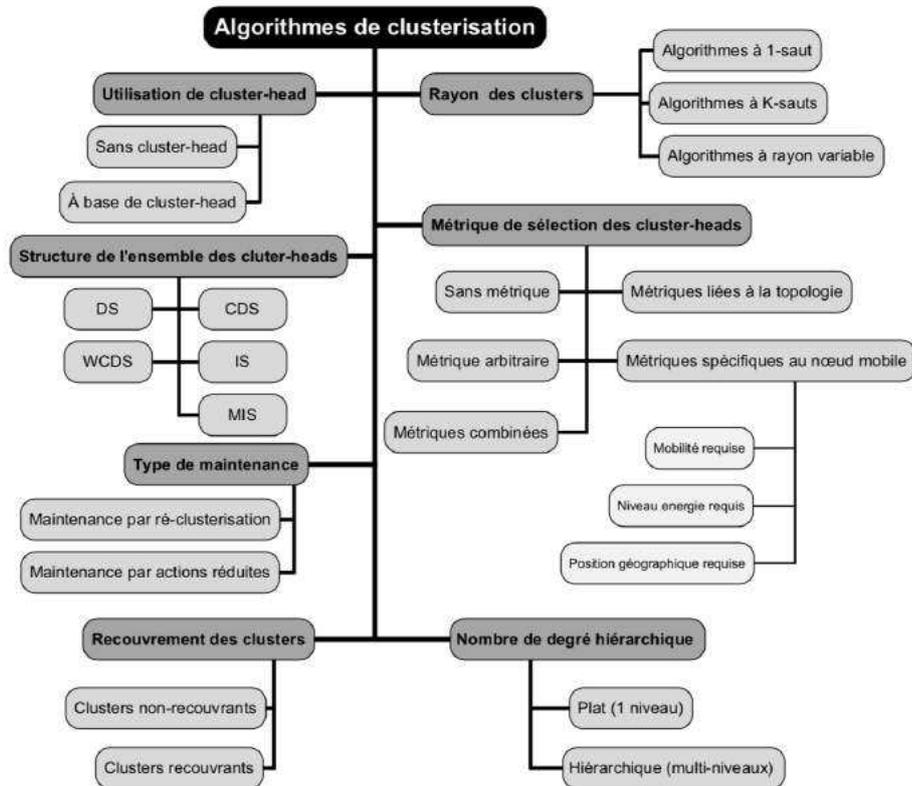


Figure 2.4: Liste de classification de techniques de clustering

(routage, accès au support, etc.). Une passerelle est un nœud non-chef de cluster qui a des liens inter-cluster et peut donc accéder aux clusters voisins et acheminer les données entre eux, tandis qu'un nœud ordinaire est un nœud non-chef de cluster qui n'a pas de liens avec d'autres clusters. Le clustering représente une solution prometteuse pour les réseaux «auto-organisés» avec un grand nombre de nœuds [61]. Cette technique de structuration de réseau présente au moins trois avantages. Premièrement, la structure du cluster permet la réutilisation des ressources réseau [46]. En effet, deux clusters peuvent utiliser la même fréquence ou le même jeu de codes s'ils ne sont pas voisins [38]. Le deuxième avantage est le routage. En effet, tous les chefs de cluster et passerelles de cluster peuvent former une épine dorsale virtuelle pour le routage inter-cluster. Ainsi, la génération et la diffusion des informations de routage peuvent être limitées à cet ensemble de nœuds [60], ce qui évite une diffusion fréquente des informations de routage qui peuvent surcharger le réseau et dégrader considérablement ses performances. Enfin, la structure du cluster rend le réseau plus petit et plus stable aux yeux de chaque nœud du réseau [53]. Lorsqu'un nœud mobile modifie son cluster domestique, seuls les nœuds, appartenant au même cluster du nœud sortant, mettent à jour leurs informations. Les changements locaux n'affectent donc pas l'ensemble du réseau mais seulement une partie. Ainsi, les informations traitées et stockées par chaque nœud seront réduites.

Comme le montre la Figure 2.4, plusieurs classifications des mécanismes de clustering ont été proposées dans la littérature [1] [78]. La classification des approches existantes peut être basée sur plusieurs critères. La première classification évidente est basée sur les critères et les métriques utilisés pour choisir le cluster-head. Dans ce domaine, certains mécanismes de clustering ont choisi des critères simples comme l'identifiant [22], tandis que d'autres approches ont adopté des sélections plus raffinées. Ces sélections combinent certains critères afin de sélectionner les nœuds les plus appropriés pour jouer le rôle de cluster-head [14]. Une autre classification peut prendre en compte le nombre de sauts qui séparent un nœud ordinaire du cluster-head auquel il est attaché. Dans cette classification, il existe deux catégories : les algorithmes à 1 saut et ceux à plusieurs sauts. Ces sauts représentent le rayon du cluster. Le rayon de cluster exprime la valeur maximale qui sépare le chef de cluster de tous ses membres.

Il existe de nombreux algorithmes de clustering à ce jour. L'analyse détaillée de ces algorithmes nous permet de profiter de leurs avantages et d'améliorer leurs limites. La plupart des algorithmes proposent l'utilisation d'une métrique de base qui permet d'élire un cluster-head et invoque parfois d'autres métriques pour rompre les liens. Cependant, certains algorithmes :

- N'utilisent aucune métrique particulière pour structurer le réseau en clusters.
D'autres algorithmes utilisent des métriques. Nous avons distingué quatre types de métriques de base utilisées par les algorithmes proposés.
- La métrique arbitraire qui est une métrique donnée arbitrairement ou aléatoirement à un nœud comme l'identifiant d'un nœud.
- Le deuxième type de métrique concerne les métriques calculées à partir de la topologie du réseau comme la connectivité d'un nœud également appelée degré d'un nœud.

- D'autres métriques sont plus spécifiques au nœud mobile comme sa mobilité relative et son énergie résiduelle.
- Il existe des algorithmes qui combinent plusieurs métriques pour calculer un poids utilisé dans l'élection du cluster-head.

2.4 Agents et systèmes multi-agents

2.4.1 Définition

Les systèmes multi-agents appartiennent à un domaine de l'intelligence artificielle et ce sont des systèmes que l'on appréhende très différemment de l'ingénierie informatique classique. Les systèmes multi-agents interviennent là où la résolution classique des problèmes grâce à l'informatique a ses limites [56]. Ce domaine est très exploité aujourd'hui grâce aux possibilités qu'il offre dans de nombreux domaines comme les sciences sociales, sciences informatiques, sciences expérimentales ou encore l'industrie. De plus les limites des systèmes informatiques et industrielles actuels sont telles qu'il devient envisageable et même intéressant de développer des systèmes multi-agents pour répondre aux besoins croissants de nombreux domaines plus classiques, que ce soit en termes de temps, d'efficacité ou de productivité.

Ferber définissait les systèmes multi-agents comme des systèmes composés d'un ensemble d'entités, appelés agents, potentiellement organisés, partageant un environnement commun dans lequel ils peuvent interagir [40]. Les systèmes multi-agents sont donc basés sur un certain nombre de principes et concepts avec notamment les agents, l'environnement, les interactions.

2.4.2 Agent

Tout d'abord, voici quelques définitions de ce qu'est un agent, selon différents auteurs:

Selon S. Russell et P. Norvig : « On appelle agent toute entité qui peut être considérée comme percevant son environnement grâce à des capteurs et qui agit sur cet environnement

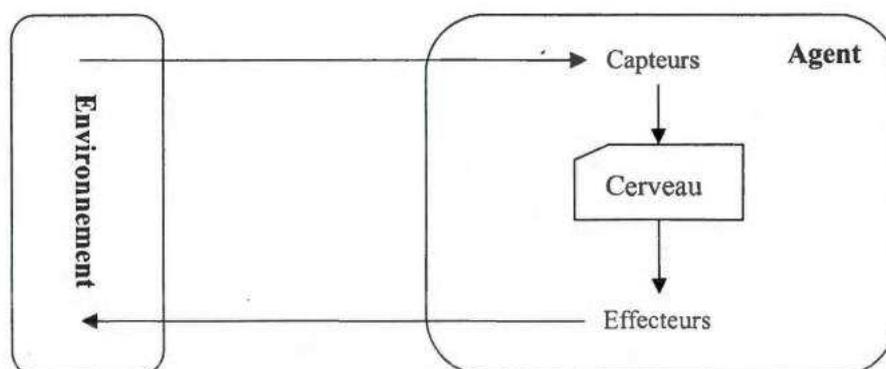


Figure 2.5: Un agent interagit avec son environnement grâce à ses capteurs et ses effecteurs

via des effecteurs. » [67]. Selon M. Wooldridge : un agent est un système informatique situé dans un environnement donné, et qui est capable d'agir de manière autonome dans cet environnement en fonction des objectifs qui lui sont définis [81]. J. Ferber a une définition très détaillée prenant en compte toutes les composantes d'un agent : «On appelle agent une entité physique ou virtuelle :

- a) qui est capable d'agir dans son environnement,
- b) qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- c) qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- d) qui possède des ressources propres,
- e) qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- f) qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- g) qui possède des compétences et des offres de services,
- h) qui peut éventuellement se reproduire,
- i) dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. » [40].

L'ensemble de ces définitions mènent à définir un agent comme étant une entité logicielle ou matérielle située dans un environnement réel ou virtuel. L'agent est capable d'agir dans son environnement, d'être dirigé par ses tendances (objectifs individuel, buts, satisfaction, survie), posséder ses propres ressources, communiquer (directement ou indirectement), avoir une représentation partielle du monde dans lequel il évolue. Son comportement et son autonomie sont la conséquence de ses perceptions, représentations et interactions dans le monde avec les autres agents. Cet agent possède une structure interne que l'on appelle architecture qui peut être soit réactive; on ne considère que les perceptions-actions (ou réponse à des stimuli), soit cognitive; l'agent fait alors preuve de réflexion.

Une définition souple d'un agent pourrait être : Un agent est une entité située dans un environnement, qui peut percevoir cet environnement grâce à des capteurs, qui peut agir sur cet environnement grâce à des effecteurs, et qui a un ou des objectifs comme illustré par la Figure 2.5. Voici quelques exemples d'agents pour illustrer les précédentes définitions :

- Un robot d'exploration internet qui a pour objectif d'indexer du contenu pour un moteur de recherche, en naviguant de site internet en site internet et en analysant le contenu sémantique.
- Un virus biologique dont l'objectif est de se reproduire dans son environnement (un animal ou un être humain) en utilisant les cellules et leurs ressources.

- Un être vivant qui dispose d’yeux, d’oreilles (et d’autres organes sensoriels) comme capteurs, des membres supérieurs et inférieurs comme effecteurs, et qui a pour objectif de survivre et de se reproduire.

Le concept d’agent seul n’est pas suffisant lorsque l’on parle de systèmes multi-agents [47] : il est indissociable de celui d’environnement. En effet, l’ensemble des perceptions et des actions qu’un agent est susceptible de réaliser est entièrement défini par rapport à l’environnement où celui-ci va opérer.

2.4.3 Environnement

L’environnement définit les conditions d’existence des entités qui y sont présentes. Il n’est donc généralement pas possible de parler d’agent sans parler d’environnement car ce dernier représente la modélisation du monde dans lequel évoluent les agents [79].

L’environnement est l’univers dans lequel l’agent évolue et effectue des tâches. Et quand on parle d’environnement, on parle d’environnement de tâches. Ceux-ci sont en fait les problèmes que les agents vont devoir résoudre. O. Bessiere synthétise plusieurs descriptions d’un environnement, qui peut être un espace de déplacement, un ensemble de ressources et de données disponibles, un milieu d’interaction avec ses propres lois, un espace où sont réalisées les actions, etc. En résumé, bien définir l’environnement revient à bien définir le problème, ce qui est primordial avant toute tentative de résolution de problème. L’environnement joue donc un rôle très important en ce qui concerne le comportement d’un agent, selon L. Magnin qui identifie la dualité agent/environnement comme on peut le voir sur la Figure 2.5 avec la partie cerveau qui commande les actions, et la partie agent qui est l’enveloppe physique en contact avec l’environnement [48].

Le nombre d’environnements de tâche possible est très grand, mais il est possible de catégoriser les environnements selon certaines propriétés, au nombre de six telles qu’elles sont présentées par S. Russell et P. Norvig [67]. Ces propriétés jouent un rôle dans le type d’agent qui peut être conçu pour certains ensembles d’environnements.

- Entièrement observable/partiellement observable : Si l’agent a accès à tout instant à tous les états de l’environnement grâce à ses capteurs, alors son environnement de tâche est entièrement observable. Cela est intéressant car l’agent n’a

Environnement de tâche	Observable	Déterministe	Episodique	Statique	Discret	Agents
Partie d’échecs	Entièrement	Stratégique	Séquentiel	Statique	Discret	Multi
Partie d’échecs chronométrée	Entièrement	Stratégique	Séquentiel	Semi-dynamique	Discret	Multi
Livreur de pizzas	Partiellement	Stochastique	Séquentiel	Dynamique	Continu	Multi
Mots-croisés	Entièrement	Déterministe	Séquentiel	Statique	Discret	Mono
Conseiller d’achats sur internet	Partiellement	Stochastique	Episodique	Statique	Discret	Mono

Figure 2.6: Quelques environnements de tâches avec leurs propriétés

pas besoin d'avoir une représentation interne de son environnement. Dans les autres cas, l'environnement de tâche est partiellement observable. Par exemple, l'environnement de tâche d'un robot d'exploration sur Mars est partiellement observable, car l'agent ne peut observer que dans un certain périmètre autour de lui.

- **Déterministe/stochastique** : Quand le prochain état de l'environnement est déterminé par l'action d'un agent et l'état courant de l'environnement, l'environnement est déterministe. Dans les cas où l'on fait exception des actions des autres agents, on dit qu'il est stratégique. Dans tous les autres cas, on dit qu'il est stochastique, et il comprend la notion d'aléatoire.
- **Épisodique/séquentiel** : Dans un environnement épisodique, le comportement de l'agent est découpé en épisodes atomiques. À chaque épisode est associée une action spécifique, et toutes les actions sont indépendantes, n'ont aucune influence entre elles. Dans un environnement séquentiel, les prochaines actions dépendent des actions précédemment réalisées. Les environnements séquentiels sont plus simples du fait que l'agent n'a pas à s'occuper de ce qu'il pourrait se passer après.
- **Statique/dynamique** : Si l'environnement ne change pas pendant que l'agent réfléchit ou agit, c'est un environnement statique, car l'agent n'a pas besoin de continuer d'observer son environnement et n'a pas de contrainte de temps. Au contraire, si l'environnement peut changer pendant la phase de réflexion ou d'action de l'agent, c'est un environnement dynamique car l'agent doit constamment prendre en compte les percepts qui peuvent influencer ses choix d'action. Il se peut que l'on puisse définir un environnement comme semi-dynamique, par exemple quand l'environnement ne change pas en fonction du temps mais quand la performance d'un agent dépend du temps (l'exemple du joueur d'échec avec chronomètre).
- **Discret/continu** : Un environnement est discret quand les états de cet environnement sont distincts, même s'il y en a une infinité. À titre d'exemple, une partie d'échecs est un environnement discret. La manière de gérer le temps ou de considérer les percepts et les actions d'un agent déterminent aussi si l'univers est discret ou continu.
- **Mono-agent/multi-agents** : L'environnement est mono-agent lorsqu'un seul agent évolue dedans, et il est multi-agents lorsqu'il comprend au moins deux agents. Cette propriété de l'environnement est importante dans le cas où il est multi-agents car il va falloir détailler si l'environnement multi-agents est concurrentiel ou s'il est coopératif. Une partie d'échecs est un environnement purement concurrentiel car un seul des deux agents peut atteindre l'état recherché, la victoire, provoquant automatiquement la défaite et donc l'échec de l'autre. Un environnement où les agents évoluent sans s'affronter, comme dans un trafic routier par exemple, est coopératif. Il se peut qu'un environnement coopératif soit concurrentiel en partie, comme un trafic routier dans lequel le nombre de places de stationnement est limité et où les agents peuvent stationner. Dans les environnements multi-agents, on peut voir l'aspect de la communication, qui est alors un comportement rationnel.

La Figure 2.6 montre des exemples d'applications avec les propriétés qui s'appliquent sur leurs environnements.

Dans notre travail, nous partirons sur un environnement partiellement observable, stochastique, séquentiel, dynamique, discret et multi-agents.

2.4.4 Capteurs et effecteurs chez un agent

Les capteurs sont une caractéristique fondamentale des agents, et notamment pour la notion de perception. Les capteurs sont des mécanismes sensoriels permettant à l'agent de disposer d'un certain type d'informations sur ce qui l'entoure. Voici quelques exemples de capteurs classiques par rapport à des sens connus chez l'être humain : des yeux ou des détecteurs infrarouges pour la vision, des oreilles ou un micro ou des détecteurs de pression de l'air pour l'audition, des détecteurs de pression pour le toucher, des détecteurs d'acidité ou de salinité pour le goût. La fonction d'un capteur est de transformer un phénomène physique en un signal. Ce signal, qui est la forme d'un stimulus (ou de son absence) qui est perçue par un capteur, est ce que l'on appelle un percept [47]. Il est intéressant de noter la différence entre un percept et un stimulus. Le stimulus est le phénomène physique qui peut déclencher un percept, tandis que le percept est l'information perçue suite à la conversion par le capteur.

Les effecteurs sont, à l'instar des capteurs, une autre caractéristique fondamentale des agents[81]. Ils permettent à l'agent d'agir sur son environnement. Selon le niveau de détail utilisé et selon le type d'agent étudié, la définition peut varier. Un effecteur peut être :

- Un outil, une perceuse par exemple.
- Un organe de préhension , comme une pince mécanique.
- Les membres locomoteurs, permettant à l'agent de se déplacer dans son environnement, sont aussi des effecteurs.
- Un morceau de code qui exécute une action menant à la modification de l'environnement.

Mais il est possible de donner une définition générale couvrant tous les types d'effecteurs : un effecteur est un dispositif propre à l'agent, lui permettant l'action, la locomotion ou la préhension dans et sur son environnement.

2.4.5 L'objectif chez un agent

Nous avons vu que les agents sont le moyen de résoudre un problème. Le besoin exprimé est la résolution d'une problématique, ce qui définit un outil permettant de satisfaire ce besoin. Cet outil est l'agent, et il peut donc avoir un ou plusieurs objectifs (ou buts) car c'est ce qui définit sa fonction, sa raison d'exister. Chez un agent, l'objectif est ce qui le pousse à agir. Nous pouvons nous demander ce que ferait un agent sans fonction, sans objectif à satisfaire. Il est possible qu'il ne fasse rien, il est possible qu'il agisse de manière chaotique ou incohérente, mais son comportement ne paraîtrait en rien rationnel pour l'environnement dans lequel il se trouve du fait de son absence de raison d'être.

2.4.6 La communication chez un agent

Chez les agents, la communication est une forme d'interaction . Cette possibilité de communiquer permet l'échange d'informations, et donc de connaissances. La communication rend également possible la coopération entre agents, par exemple quand plusieurs agents ont des objectifs complémentaires. Bien entendu, pour que la communication soit effective chez les agents, il faut qu'ils aient un protocole commun de communication ainsi qu'un canal commun et ce, afin d'assurer la cohérence dans les échanges d'informations

2.4.7 Systèmes multi-agents

Parmi les approches multi-agent, certaines se fondent sur une démarche individus-centrée[48], [40]. En effet, elles considèrent qu'il est possible de modéliser, non seulement les individus et leurs comportements, mais aussi les interactions qui se déroulent entre ces individus. Elle considère ainsi que la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, résulte directement des interactions entre les individus qui composent ce système au niveau microscopique. Ainsi, alors que les modèles classiques modélisent les relations qui existent entre les différentes entités identifiées d'un système à l'aide d'équations mathématiques, l'approche multi-agent modélise directement les interactions engendrées par des comportements individuels. Les systèmes multi-agents sont donc un moyen de comprendre, modéliser et implémenter un très grand nombre de systèmes distribués. Ils peuvent être aussi utilisé comme paradigme de développement pour des logiciels, particulièrement dans des contextes de calcul où le contrôle global n'est pas possible ou pour la représentation de phénomènes réels ou virtuels, en décomposant ces systèmes en entités individuelles pouvant interagir entre elles.

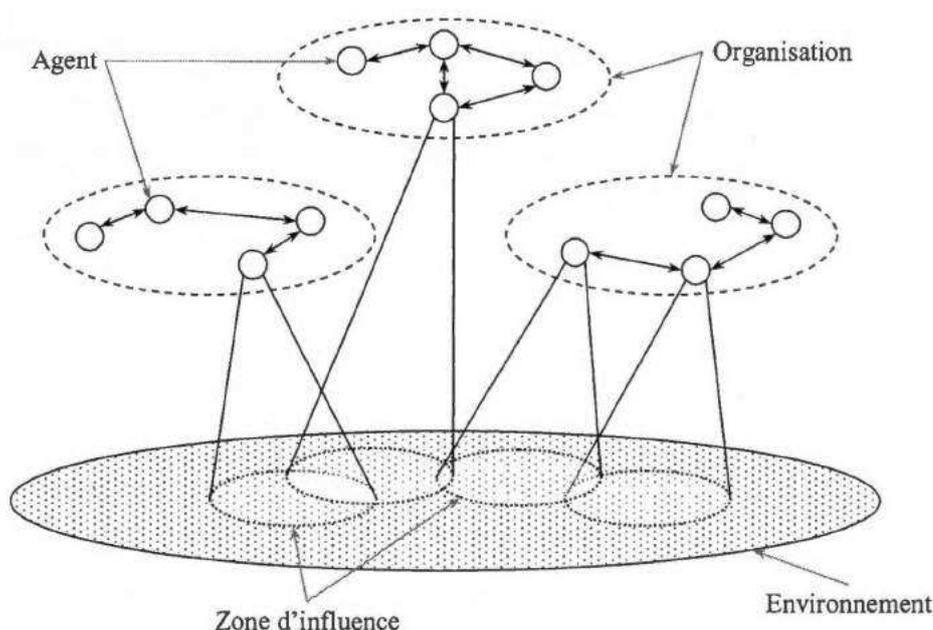


Figure 2.7: Structure type d'un système multi-agents

La simulation multi-agent est utilisée pour l'ingénierie et l'étude des systèmes complexes dans de nombreux domaines (robotique collective, biologie, économie, gestion urbaine, etc.) pourvu que ces derniers puissent être représentés par un ensemble d'entités autonomes en interaction appelées agents. Cependant, ce genre de simulations peut nécessiter une puissance de calcul très importante surtout si l'on augmente la taille de l'environnement et/ou le nombre d'agents.

2.5 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons étudié l'ensemble des concepts liés à l'Internet des Objets. Nous avons vu l'architecture type utilisée dans ce concept ainsi que ses composants. Ensuite nous avons montré les différents outils de communications utilisés et parmi eux les LPWAN (Low Power Wide Area Networks) qui avec une consommation très réduite en termes d'énergie, l'utilisation des bandes ISM et une portée de transmission de plus de 15km se présentent comme une solution très fiable pour notre travail. Nous avons également défini le principe de réseaux tolérants aux délais ainsi que la technique du Store and Forward. Cela nous a mené à parler de la notion de réseaux auto-organisables. Ce type de réseaux fait intervenir la clustérisation qui permet d'organiser un réseau afin d'optimiser certaines de ses ressources. Nous avons donc parlé des métriques utilisés pour la clustérisation dans le contexte de réseaux auto-organisables. Pour finir ce chapitre, nous avons fait un focus sur les agents et les systèmes multi-agents qui appartiennent à un domaine de l'intelligence artificielle et qui offrent de nombreuses possibilités de description de systèmes dans le domaine des sciences sociales, informatiques et expérimentales. Ces différents domaines seront au centre de notre travail de recherche et nous servirons de supports pour nos différentes tâches.

3 Modèle d'atténuation et analyse de portée LoRa

3.1 Introduction

Pour assurer la transmission dans notre système de communication, nous avons porté notre choix sur la technologie LoRa. Dans ce chapitre, nous proposons un modèle d'atténuation de canal adapté à la technologie LoRa grâce à l'analyse de résultats de tests empiriques. L'objectif étant de montrer la pertinence de notre choix d'outils de communication, mais aussi d'avoir un modèle permettant de définir la portée que l'on peut obtenir en fonction de la zone de déploiement (zone urbaine, rurale ou en mer). Nous commencerons par décrire les configurations de mesure d'un point de vue équipement, et la configuration pour les émetteurs et récepteurs. Ensuite, nous présenterons le modèle de régression linéaire que nous utilisons avant de montrer les applications du modèle par zone de déploiement. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus et proposeront un dernier modèle basé sur la couverture.

3.2 Configuration de mesure

Pour mener à bien les tests de mesures, nous partons toujours sur une architecture avec une station d'émission fixe située à un lieu stratégique de notre choix, (ce lieu diffère en fonction de la zone de test) et une station de réception mobile qui fait un parcours prédéfini en vue de collecter les trames d'informations émises par la station fixe. Les informations sont stockées en temps réel dans une base de données. La Figure 3.1 montre l'architecture de communication.

En considérant une transmission à vue (line of sight), la portée de communication entre deux antennes LoRa est estimée en théorie à 15 Km. Une étude a démontré que dans certaines situations, elle peut atteindre 30 Km [62]. Pour nos tests, la station de base est constituée d'une carte Arduino UNO, d'un Dragino Shield LoRa [29] et d'un ordinateur. La communication entre l'ordinateur et la carte Arduino s'effectue via un port série. Un programme informatique écrit en Python récupère les données collectées sur le port série et les stockent dans une base de données MySQL locale hébergée par l'ordinateur. Pour chaque paquet transmis, nous sauvegardons son numéro d'identification et l'heure de transmission. Sur la station de base, les métriques suivantes sont configurées :

- facteur d'étalement : 12 (4096 jetons)
- taille du canal : 125 kHz dans la bande ISM 868 MHz

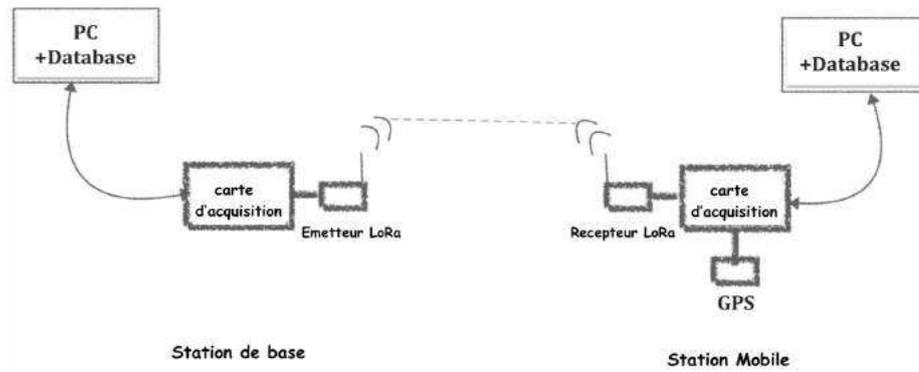


Figure 3.1: Architecture de communication pour tests de portée

- puissance de transmission : 14dBm
- taux de codage : 4/5

La station mobile est constituée d'une carte Arduino UNO, d'un Dragino Shield LoRa [29], d'un module GPS Shield et d'un ordinateur. Pour chaque paquet reçu, les informations suivantes sont enregistrées dans la base de données : identifiant du paquet, RSSI (Received Signal Strength Indicator), position géographique de la station mobile (longitude, latitude) et heure d'arrivée du paquet. IL est important de noter que contrairement aux pays européens où la bande ISM 868MHz est soumise à certaines restrictions en raison de l'accès réglementaire au canal, nous n'avons aucune législation au Sénégal allant dans ce sens au moment des tests. Par conséquent, il est possible d'envoyer des données en continu en utilisant cette fréquence. En fait, l'organisation de l'Union Européenne exige un cycle de service de 1% [24, 31].

3.3 Modèle de régression linéaire

En statistiques, en économétrie et en apprentissage automatique, un modèle de régression linéaire est un modèle qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable, dite expliquée, et une ou plusieurs variables, dites explicatives. On parle aussi de modèle linéaire ou de modèle de régression linéaire. Parmi ces modèles, le plus simple est l'ajustement affine. Celui-ci consiste à rechercher la droite permettant d'expliquer le comportement d'une variable statistique 'y' comme étant une fonction affine d'une autre variable statistique 'x'.

Dans un système de communication sans fil, les pertes survenues entre l'émetteur et le récepteur sont appelées perte de trajet de propagation. La perte de trajet est un facteur majeur dans l'analyse et la conception du système de communication sans fil. De plus, les ondes électromagnétiques ne peuvent généralement pas atteindre directement le récepteur en raison de nombreux obstacles qui bloquent le trajet. Le signal parcouru de l'émetteur au

récepteur sur de nombreux trajets de réflexion est appelé propagation par trajets multiples, ce qui provoque toujours des fluctuations de la phase et de l'amplitude du signal reçu [84].

Dans cette section nous montrons comment le modèle de régression est utilisé afin d'estimer les pertes de trajets. Le modèle est fait en deux parties :

- Pour chaque paquet reçu avec la station mobile en mouvement, l'indicateur de force du signal reçu (RSSI) [51] et le rapport signal sur bruit (SNR) ont été sauvegardés. Nous l'avons utilisé pour calculer la perte de chemin (PL) avec le budget de liaison suivant :

$$PL = |RSSI| + SNR + Ptx + Grx \quad (3.1)$$

"Ptx" est la puissance isotrope rayonnée effective et "Grx" est le gain d'antenne du récepteur.

- Nous avons dérivé la perte de chemin attendue (EPL) des données mesurées à partir de l'ajustement polynomial linéaire. Nous l'avons calculé comme cela se fait dans les systèmes de communications sans fils classique [30] avec :

$$EPL = B + 10n \log_{10}(d/d_0) \quad (3.2)$$

"B" représente la perte de chemin, "n" est l'exposant de perte de chemin, "d" est la distance entre le nœud et la station de base et "d₀" signifie la distance de référence de 1 Km.

Puisqu'il est difficile de modéliser tous les obstacles lorsque les tests sont effectués dans un environnement réel, dans nos résultats, nous considérons la perte de trajet en espace libre comme référence pour mettre en évidence l'effet de l'environnement sur le signal reçu [19].

Nous investiguons dans chaque contexte comment le modèle a été appliqué sur des tests en environnement réel et montrer la pertinence du choix de ces zones.

3.3.1 Application zone urbaine

Les mesures en zones urbaines ont été faites à Dakar (Sénégal). Du fait d'un réel problème de décentralisation, les activités économiques et les infrastructures urbaines au Sénégal sont majoritairement localisées à Dakar, et on note une forte croissance démographique dans la région. En fait, Dakar qui est une péninsule de 83Km², est la région la plus petite et la plus peuplée du Sénégal. En effet, les travailleurs qui habitent dans la banlieue et autour du centre ville de dakar se retrouvent souvent dans un même axe et les routes sont dans le chaos pendant la journée de travail. Il en résulte plusieurs problèmes tels que les embouteillages diurnes et aux heures de pointe, les passagers de bus qui préfèrent utiliser du coup le transport privé même s'il est plus cher, et la pollution de l'air causée par le grand nombre de véhicules anciens. Certains chercheurs travaillent sur différentes thématiques pour améliorer la situation. Par exemple, afin d'améliorer le système de transport, les auteurs de [27] ont proposé un système de communication par GPS et SMS pour les passagers de la société nationale de transport «Dakar Dem Dikk». Ce système



Figure 3.2: Station de Base Immeuble Kebe

d'information permet aux passagers du bus de savoir soit combien d'arrêts il reste pour un bus donné avant d'atteindre un arrêt de bus fixe, soit la distance estimée entre un bus cible et sa position. Néanmoins, le système de suivi est basé sur le réseau cellulaire. On comprend alors que le coût du SMS devient une grande préoccupation afin de surveiller l'ensemble des bus «Dakar Dem Dikk».

Sur ce, en tirant parti des technologies LoRa à Dakar, nous pouvons, en plus de réaliser nos tests, penser à des services qui permettent d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales, et également offrir de nouveaux types de services aux entreprises. Par exemple, aider les parties prenantes à créer un système de surveillance en temps réel pour les panneaux solaires afin de lutter contre les vols de ces panneaux et à programmer leur nettoyage périodique, d'un autre côté, assurer une surveillance des points d'eau en temps réel pour le modèle de prévision et de contrôle des maladies, une protection contre les menaces d'inondations, une surveillance à distance des consommations d'électricité et d'eau, etc.

Ce travail est la première évaluation LoRa à Dakar [36]. Étant donné que la fréquence radio dans les bandes ISM est prise en compte, il est obligatoire d'évaluer l'efficacité et la fiabilité de la communication LoRa dans la ville de Dakar. Ensuite, les technologies IoT et LoRa peuvent être déployées dans la péninsule de Dakar couvrant l'ensemble des points d'intérêt.

Afin d'avoir une bonne visibilité entre la station de base et la station mobile en mouvement, nous devons trouver la meilleure position géographique pour déployer notre station de base LoRa. Étant donné que Dakar est une ville avec presque 4 millions d'habitants [13] et qu'il y a beaucoup de bâtiments d'au moins quatre étages, nous avons sur la base d'une enquête de terrain ciblé 4 positions pour y placer des stations de base pour pouvoir couvrir toute la ville. Ainsi, nous avons considéré les sites suivants à Dakar comme station de base :



Figure 3.3: Emplacement Phare des Mammelles et Monument

- Le sommet du «Phare des Mamelles» qui s'étend jusqu'à 126m.
- L'esplanade du «Monument de la Renaissance» qui mesure 100m et se situe à proximité du «Phare des Mamelles». Le choix du «Monument de la Renaissance» comme station de base est dû au fait qu'il agit comme un masque pour les données provenant du «Phare des Mamelles» par rapport à quelques localisations. La Figure 3.3 illustre la répartition géographique des deux collines où se trouvent le «Monument de la Renaissance» à droite et le «Phare des Mammelles» à gauche. On peut voir que l'emplacement du «Monument de la Renaissance» rompt la ligne de mire du «Phare des mamelles» vers les différents emplacements situés après le site du «Monument de la Renaissance». Le choix de ces deux haut lieux permet de couvrir une grande partie de la ville de Dakar (Mermoz etc.)
- Le site «Virage» qui est le point le plus bas parmi nos quatre balises mesure environ 20m. Le choix de la balise «Virage» est motivé par la nécessité de couvrir la partie nord de la péninsule de Dakar.
- Le bâtiment le plus haut de Dakar, appelé «Immeuble Kebe», qui mesure 75,36 m. La Figure 3.2 montre la station de base LoRa qui est située au sommet du bâtiment «El Hadj Ndiouga Kebe». Ce site a été choisi pour couvrir le centre ville de Dakar ainsi que les alentours du port autonome de Dakar.

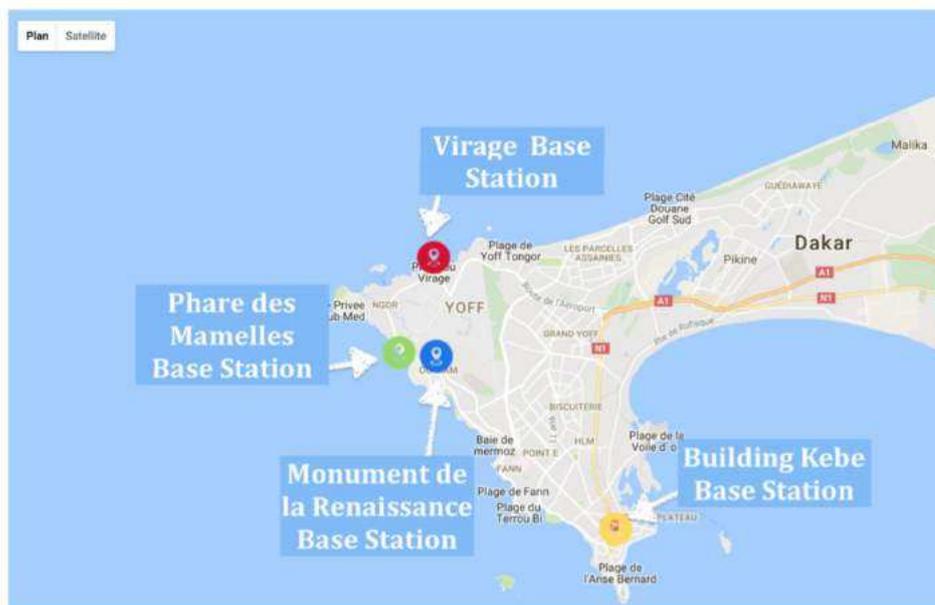


Figure 3.4: Distribution géographique 4 Stations de Bases



Figure 3.5: Distribution géographique des paquets recus des 4 Stations de Bases

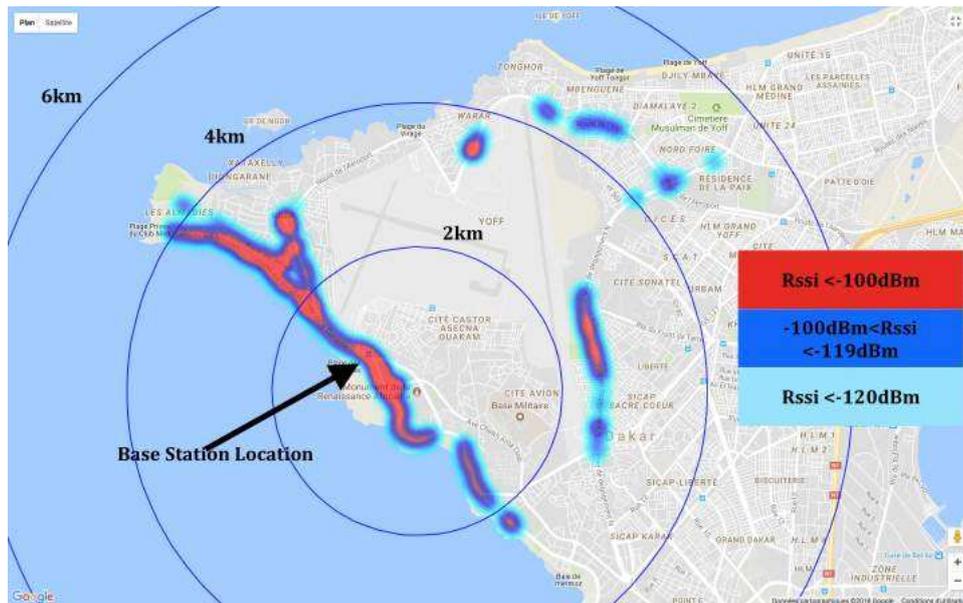


Figure 3.6: Distribution géographique des paquets reçus du Phare des Mammelles en terme de puissance

En résumé, la Figure 3.4 illustre la répartition géographique de nos quatre sites utilisés qui hébergent les stations de base.

La répartition géographique des différents emplacements où le signal émis par les quatre stations de base est reçu par la station mobile est illustrée sur la Figure 3.5. On peut voir qu'une grande partie de Dakar a été couverte par ces stations de base. Il convient de noter que la carte est réalisée avec l'API google map. Le signal reçu de chaque station de base est représenté par des couleurs distinctes. Il est à noter que les points de la carte qui ont la même couleur représentent le signal reçu de la même station de base en fonction de la station mobile en mouvement.

L'analyse de la Figure 3.5 illustre :

- La zone couverte par la station de base «Virage» n'est pas grande. Cela peut s'expliquer par le fait que «Virage» est un quartier résidentiel avec beaucoup de bâtiments d'au moins quatre étages. Par conséquent, nous notons l'existence de nombreux obstacles qui brisent la ligne de vue. De plus, nous sommes confrontés à un manque de points stratégiques pour placer d'autres stations de base. Cependant, il est possible d'étendre la couverture si l'on place un pylône qui héberge la station de base.
- La station de base «Monument de la Renaissance» est très proche du «Phare des Mamelles». Nous pouvons voir que de nombreux endroits ont été couverts par la station de base «Phare des Mamelles» mais la hauteur de la colline est clairement un masque donc ces points n'étaient récupérables qu'avec station de base du «Monument de la Renaissance» .



Figure 3.7: Distribution géographique des paquets reçus du Monument en terme de puissance

Table 3.1: Evaluation performance en zone Urbaine

Distance (Km)	Nombre de paquets transmis	Nombre de paquets reçu	Taux Erreur
0-2 Km	2501	2176	13%
2-4 Km	2560	2199	15%
4-6 Km	2300	1620	31%
6-8 Km	2110	633	70%
Total	9471	6628	30%

- Sur toutes les zones où le «Monument de la renaissance» n'est pas présent pour bloquer la vue, on constate que la station de base «Phare des Mamelles» est capable de couvrir de grandes surfaces. La distribution des points sur les Figure 3.6 et Figure 3.7 illustre bien cela.
- Bien que le bâtiment Ndiouga Kebe ne soit pas notre station de base la plus haute, c'est celui qui transmet le plus loin (plus de 8 Km). Cela peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a pas d'obstacle significatif devant cette station de base. Ce qui nous permet de noter une bonne ligne de visée à proximité.

Le tableau 3.1 montre les performances d'évaluation du taux d'erreur sur les paquets (*PER*) en fonction de la distance parcourue. Nous avons constaté que le taux d'erreur sur les paquets augmente avec la distance.

En combinant les résultats de la carte et du tableau PER, nous avons réalisé un graphique pour mettre en évidence un lien entre le PER et le RSSI sur la Figure 3.8.

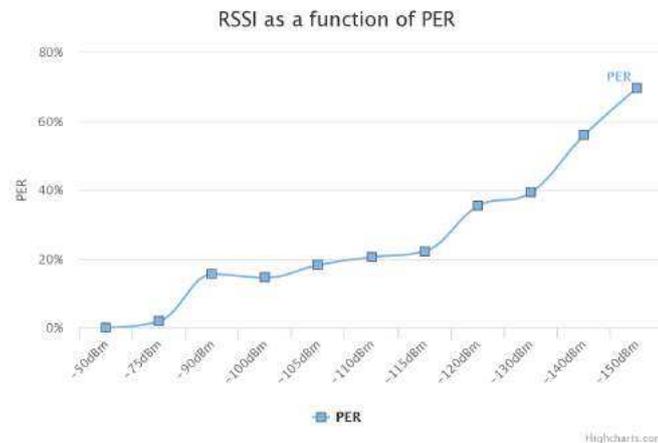


Figure 3.8: RSSI en fonction du PER.

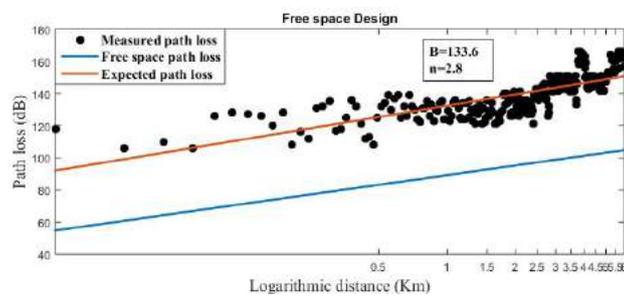


Figure 3.9: Perte de trajet pour Phare des Mamelles.

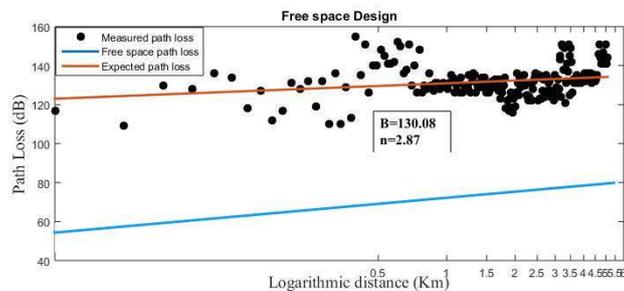


Figure 3.10: Perte de trajet pour Monument.

Pour chaque station de base, nous avons appliqué le modèle de régression pour mesurer la perte de trajet. La Figure 3.10 et la Figure 3.9 montrent la perte de trajet mesurée (points noirs) et la perte de trajet attendue ou EPL (expected Path Loss) (courbe rouge) pour deux stations de base à titre d'exemple. En bleu, nous avons la perte de chemin d'espace libre.

3.3.2 Application zone rurale

Pour les mesures en zones rurales nous avons naturellement choisi la zone sylvo-pastorale (Ferlo). Les tests reposent en partie sur l'envie de répondre à une problématique de



Figure 3.11: Relais Mobile dans un Pick up

la zone liée à la complexité de la collecte de lait. En effet, l'industrie laitière est une partie importante du secteur alimentaire au Sénégal et la collecte du lait est un problème logistique difficile qui intéresse depuis longtemps les chercheurs. De plus, certaines laiteries, notamment celles qui se trouvent dans la zone sylvo-pastorale du Sénégal (Ferlo) rencontrent un un soucis majeur : l'impossibilité de communiquer avec leur entourage du fait qu'elles se trouvent dans des zones blanches. Cela affecte leur efficacité dans la collecte journalière du lait de l'unité de production vers l'unité de transformation du lait [21] [20].



Figure 3.12: Vue en drone de Namarel

Depuis les années 1990, les filières laitières font partie des priorités des programmes de développement de l'élevage en Afrique de l'Ouest. Plusieurs systèmes de collecte ont été développés pour approvisionner de petites laiteries artisanales créées dans plusieurs pays (Sénégal, Mali, Burkina Faso, etc.). La collecte peut être groupée ou individuelle, assurée par des collecteurs équipés de conteneurs plus ou moins rudimentaires (bidon en plastique) et qui utilisent des vélos, des cyclomoteurs ou des charrettes pour transporter le lait des zones de production vers les unités de transformation. Ces unités collectent de 50 à 700 litres par jour. Ils fabriquent principalement du lait fermenté et du lait pasteurisé, commercialisés en sachets thermoscellés de 200 à 500 ml [39].

Nous avons effectué nos tests précisément à Namarel qui est le siège de l'Association pour le Développement de Namarel et ses environs (ADENA) [26] où la principale source de revenus pour les femmes est basée sur la collecte du lait.

Namarel est dans une zone semi-désertique. L'environnement est presque le même sur des kilomètres comme le montre la Figure 3.12. Il y a de grandes superficies de terres avec quelques arbres et des villages autour. Sur la Figure 3.14 et la Figure 3.13, nous pouvons voir des images de deux villages dans cette zone. Nous avons testé le dispositif autour de Namarel en essayant de couvrir une grande partie des villages impliqués dans la collecte du lait et le développement économique de la zone ADENA. Au cours de ces tests, nous avons mis une station de base sur le toit du siège de Namarel et nous avons placé un autre appareil sur un pick-up Figure 3.11, puis nous avons sillonné les alentours du village.

Il est important de préciser que le même dispositif que celui des tests en environnement urbain a été utilisé en zone rurale 3.3.1. Nous avons stocké l'indicateur de force du signal de réception (RSSI) chaque fois qu'un paquet était reçu et avons fait de même quant au nombre de paquets envoyés et reçus. Nous avons atteint une portée allant jusqu'à 16Km,



Figure 3.13: Village dans le Ferlo à 12Km de Namarel

et l'ensemble des paramètres(métriques) stockés lors des tests ont permis de faire une analyse poussée sur la qualité des communications.

Nous avons envoyé 3017 paquets et reçu 2911 paquets. Le taux d'erreur de paquets était de 4 % au total. Le tableau 3.2 et la Figure 3.15 montrent les performances du test avec le taux de perte de paquets en fonction de la distance parcourue. Ce tableau montre que le taux de perte de paquets augmente avec la distance. La Figure 3.16 montre le RSSI en fonction de la distance.



Figure 3.14: Village dans le Ferlo à 7Km de Namarel

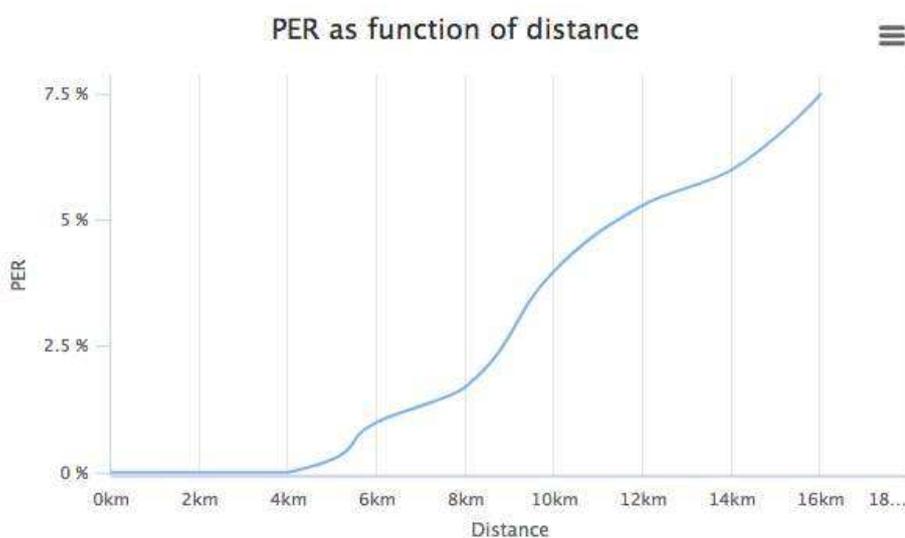


Figure 3.15: PER en fonction de la distance

Table 3.2: Evaluation performance en zone Rurale

Distance (Km)	Nombre de paquets transmis	Nombre de paquets reçu	Taux Erreur
0-4Km	757	757	0%
4-8Km	807	793	1.7%
8-12Km	803	760	5.3%
12-16Km	650	601	7.5%
Total	3017	2911	4%

3.3.3 Application zone maritime

Bien que le secteur de la pêche joue un rôle de premier plan dans l'économie sénégalaise grâce aux recettes en devises (exportations), et aux besoins vitaux de la population [32], les réseaux cellulaires sénégalais *GSM* ne couvrent pas une distance supérieure à 7 Km des côtes. Nous avons obtenu ces informations à partir de tests réels qui ont été effectués sur la presqu'île du Cap-Vert. Nous avons utilisé deux applications mobiles (*inViu OpencellID* et *network cell info lite*) pour capturer la qualité du signal par rapport aux positions fixes, comme illustré dans la Figure 3.18 et Figure 3.19. Les positions de croisement pendant le test ont été cartographiées sur la Figure 3.20. En considérant les coordonnées géographiques de la position où les captures d'écran ont été prises, *RSSI*, Mobile Network Code (MNC), Mobile Country Code (MCC) et Location Area Code (LAC), nous pouvons trouver les coordonnées géographiques de la station de base à laquelle le téléphone portable a été connecté grâce à [35], puis connaître la distance entre le téléphone portable et la station de base. Les centres d'origine bleu et rouge sont les stations de base des opérateurs auxquels notre téléphone portable était connecté. La distance entre le téléphone portable et la station

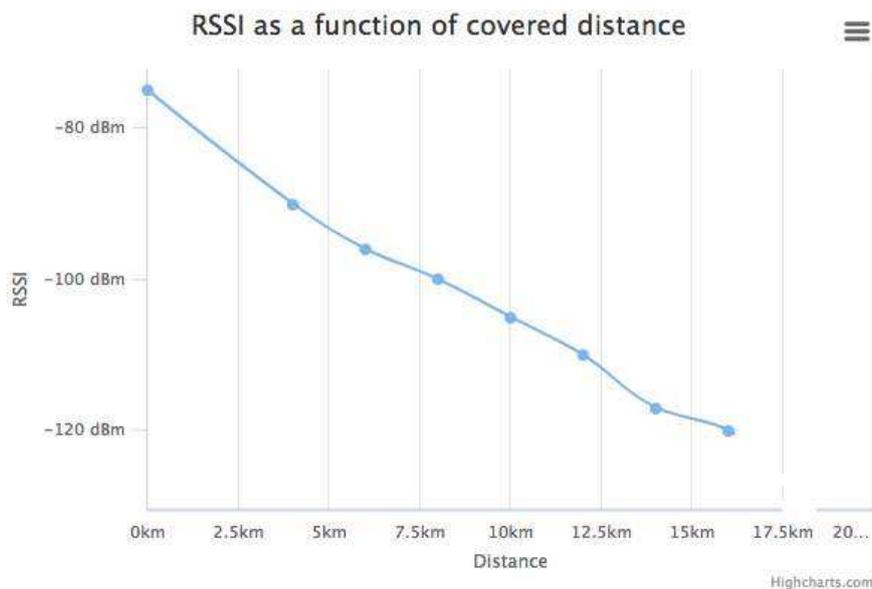


Figure 3.16: RSSI en fonction de la Distance

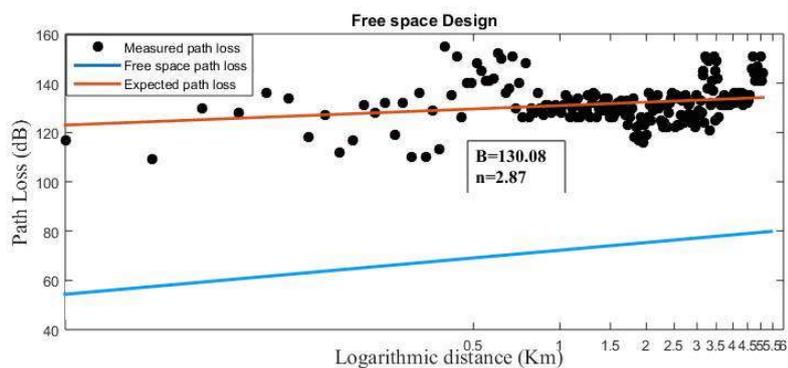


Figure 3.17: Path Loss pour la station en zone rurale.

de base n'est donc pas la même selon la station de base. Nous avons ensuite fait deux cercles pour calculer et mettre en évidence la distance exacte. Ce manque de couverture



Figure 3.18: 2G RSSI sur l'application "inViu OpenCellID"



Figure 3.19: 2G RSSI sur l'application Network Cell Info Lite

est la raison pour laquelle il n'y a pas de système de communication de sauvetage pour les pirogues qui vont pêcher au-delà de cette limite.

De ce fait, les conditions sociales et humaines y sont difficiles, sans compter les problèmes de sécurité en mer [83] (environ 100 décès par an). Les bateaux de pêche artisanale sont généralement constitués d'une coque en bois de conception locale, sur laquelle est installé un moteur hors-bord pouvant aller jusqu'à 60 chevaux.

Les pirogues sont emblématiques du Sénégal, donc leur intégration dans le paysage de pêche de demain reposera sur leur capacité de modernisation. En effet, à l'heure actuelle, l'électronique embarquée est au mieux composée des téléphones portables de l'équipage et d'un GPS "main" du capitaine [59]. De même, les systèmes de positionnement maritime centralisés conventionnels (VMS ou AIS) ne sont pas utilisés pour des raisons économiques. En conséquence, la distribution des pirogues reste inconnue des institutions en charge du suivi des pêches. Bien que le gouvernement sénégalais tente d'équiper certaines pirogues avec un système de géolocalisation, il peine encore à fournir tous les équipages, à cause du prix du dispositif. Proposer une solution à faible coût est l'un de leurs objectifs critiques.



Figure 3.20: RSSI 2G durant tests



Figure 3.21: Relais Mobile dans la pirogue

Le but des tests en zone maritime et entre autres de voir la fiabilité du dispositif afin de mettre une architecture qui permet à un pêcheur donné d'envoyer des maydays en cas de crash à un centre de contrôle ou à d'autres pêcheurs qui se trouvent à proximité. Cela permettrait également aux pêcheurs de communiquer entre eux lorsqu'ils sont à plus de 7

Figure 3.22: RSSI supérieur à $-95dBm$

Km de la côte. Un système de localisation géographique qui envoie au voisinage la position réelle de chaque pirogue pourrait donc être ajouté.

Durant les tests nous avons une station de base située à 105 m de hauteur et un relais mobile dans un bateau comme illustré sur la Figure 3.21 . Nous avons envoyé 4146 paquets et avons reçu 3935 paquets. Le taux d'erreur de paquet était d'environ 5%. Le tableau 3.3 montre les performances du test avec le taux d'erreur de paquets en fonction de la distance parcourue. La Figure 3.22 montre le signal reçu avec *RSSI* supérieur à $-95dBm$. Nous avons une couverture de distance allant jusqu'à 22Km en ce qui concerne les tests effectués en mer. La Figure 3.23 montre le path loss en zone maritime. On constate que c'est le meilleur path loss jamais mesuré avec des paquets qui ont des RSSI bien en dessous

Table 3.3: Evaluation performance en zone maritime

Distance (Km)	Nombre de paquets transmis	Nombre de paquets reçus	Taux Erreur
0-5Km	1057	1037	2%
5-15Km	1727	1685	3%
15-20Km	903	862	5%
20-22Km	459	351	13%
Total	4146	3935	5%

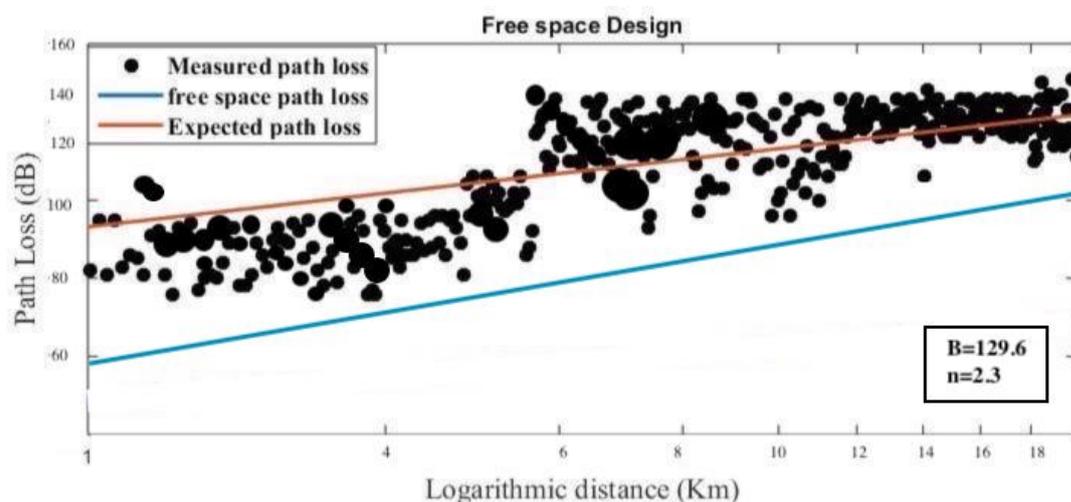


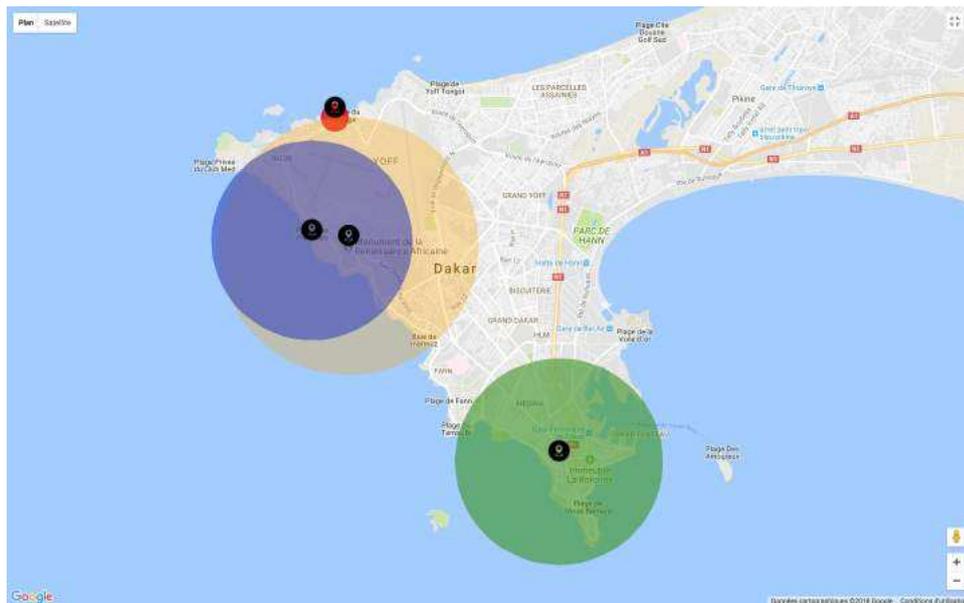
Figure 3.23: Path Loss en zone maritime

de l'EPL. On constate malgré tout que plus la distance le RSSI est affecté meme si le pourcentage de paquets recus reste bien supérieur a toutes les zones testés.

3.4 Analyse résultats et proposition modèle basé sur la couverture

Le constat qui revient sur les tests est que plus la distance entre la station d'émission et la station mobile augmente plus nous perdons de paquets et en qualité de reception. Nous avons aussi vu qu'en zone urbaine la perte de paquets n'est pas uniquement due à la distance. En effet la présence d'obstacles est un autre élément important qui réduit la portée de transmission et la qualité du signal. Dans les résultats nous avons mis en relation la distance et la qualité du signal d'une part, et la distance et le nombre de paquets perdus d'autre part.

Il est intéressant de mettre en relation la qualité du signal et le nombre de paquets perdus car cela permet de voir le nombre de paquets perdus selon une qualité de signal choisie. Dans le cadre de la couverture d'une zone (urbaine, maritime ou rurale), la distance de couverture n'est plus seulement l'élément central dans le choix des métriques de transmission. En effet une qualité de signal précise est choisie, et en fonction de cette qualité, nos résultats nous donnent le nombre de paquets perdus correspondant et vice-versa. En exploitant ces deux paramètres, nous pouvons utiliser notre modèle de pathloss pour déterminer la zone de couverture d'une station de base à partir des données de qualité choisies.

Figure 3.24: Couverture à -110dBm

Nous avons tenté cette expérience avec la zone de Dakar (zone urbaine) et nos 4 stations de base.

La Figure 3.24 montre une couverture avec une tolérance de RSSI à -110dBm maximum et la Figure 3.25 montre une couverture avec une tolérance de RSSI à -120dBm maximum. La couverture à -110dBm assure un taux de paquets perdus de 20% mais ne permettra pas une couverture complète de la péninsule. Avec une couverture à -120dBm on arrive à couvrir une zone de 83Km^2 . Cependant, le taux de paquets perdus serait égal à 40%. Ceci nous donne un aperçu sur une approche que l'on peut avoir sur les moyens de dimensionner un réseau voulant être autonome et basé sur une technologie LPWAN.

3.5 Synthèse

Une couverture étendue, une faible consommation d'énergie et une connectivité sans fil sont les paramètres les plus importants des technologies LPWAN. Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances de la technologie LoRa avec des mesures empiriques.

Les résultats des mesures ont été utilisés pour proposer un modèle d'atténuation de canal. Nous avons dérivé les pertes de chemin prévues (EPL: Expected Path Loss) des données mesurées à partir de l'ajustement polynomial linéaire. Cela a été possible parce que l'indicateur d'intensité du signal reçu (RSSI: Received Signal Strength Indicator) et le rapport signal sur bruit (SNR: Signal Noise Ratio) reçus de chaque station de base par la station mobile ont été sauvegardés pour calculer la perte de chemin (PL: Path Loss). De plus, le modèle d'atténuation a été utilisé pour faire une estimation de la couverture de chacune des quatre stations de base. Enfin, nous avons proposé un modèle basé sur la couverture.

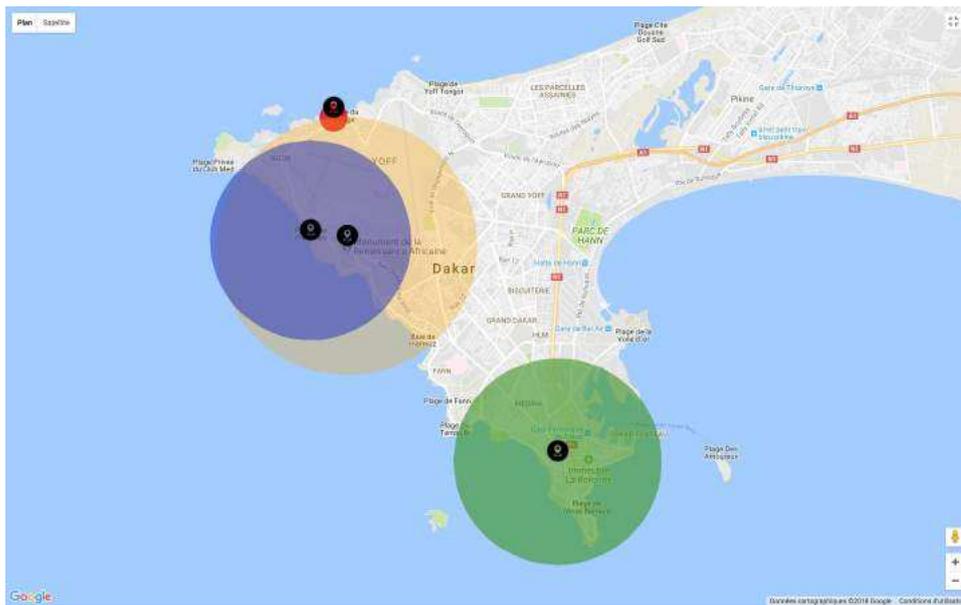


Figure 3.25: Couverture à -120dBm

Le modèle proposé peut être utilisé pour estimer la densité de stations de base requise pour un fournisseur de réseau. Cela pourrait permettre de déployer un grand nombre de services IoT tels que: suivi des bus, smart grid, télésurveillance des consommations d'électricité et d'eau ...

4 COWShED : Mise en oeuvre d'un outil de communication en zones blanches

4.1 Introduction

La région sylvo-pastorale du Sénégal est l'une des zones les moins peuplées du Sénégal, les opérateurs de télécommunications ne voient donc pas d'impact sur un investissement dans cette zone. Par conséquent, plusieurs zones du *Ferlo* dans le nord du Sénégal ne sont pas couvertes par les réseaux de communication terrestre et constituent des zones blanches. Les éleveurs au sein des zones blanches n'ont donc pas souvent la possibilité d'utiliser leurs téléphones portables en temps réel pour communiquer ou transmettre des informations utiles telles que l'état des points d'eau, la situation dans les forages et les pâturages, les épizooties (pays locaux et voisins), le vol de bétail le long des chemins de transhumance. Le pastoralisme qui est l'activité principale des éleveurs dans cette zone a un rôle socio-économique important au Sénégal, et en particulier dans la région de *Ferlo*, en fournissant de nombreux biens et services à la population. Par exemple, le projet *SPAIF* [76] a été lancé afin de gérer et aider la population dans la gestion de la transhumance du bétail. Le choix du pastoralisme et la transhumance comme mode de vie s'explique par le fait que le *Ferlo* est un espace semi-aride avec des précipitations entre 300 et 600mm d'eau [2] [11]. La mobilité pastorale sur de vastes zones est donc l'une des meilleures stratégies pour que les éleveurs s'adaptent à un environnement fragile. Aujourd'hui, au Sénégal, la quantité et la répartition géographique des précipitations sont une grande préoccupation pour la population et les autorités car elles impactent directement la disponibilité des points d'eau et des forages ou des pâturages pendant la longue saison sèche qui dure 6 – 8 mois [70]. La disponibilité d'informations sur la situation des forages et les pâturages peut sécuriser le troupeau en réduisant le nombre d'animaux qui seraient gravement touchés par l'absence ou le non fonctionnement d'un forage et / ou par le manque de pâturage. Il peut aussi aider à la gestion du problème de vol de bétail.. Il convient de noter que le vol de bétail est un risque récurrent dans le *Ferlo* et que les systèmes d'assurance existants ne le prennent pas encore en charge.

Par conséquent, *COWShED* (Communication Within White Spots for Breeders) permet la communication en zones blanches aux éleveurs [74] et peut réduire les asymétries d'information sur les termes d'échanges liés aux animaux et aux biens. Il permettrait d'augmenter les marges de revenus par type d'animal et par saison et le pouvoir de négociation des éleveurs avec les intermédiaires sur les marchés. De plus, cela peut également entraîner une augmentation des revenus par anticipation des ventes. *COWShED* vise à collecter diverses informations et à les diffuser dans le réseau. Les informations

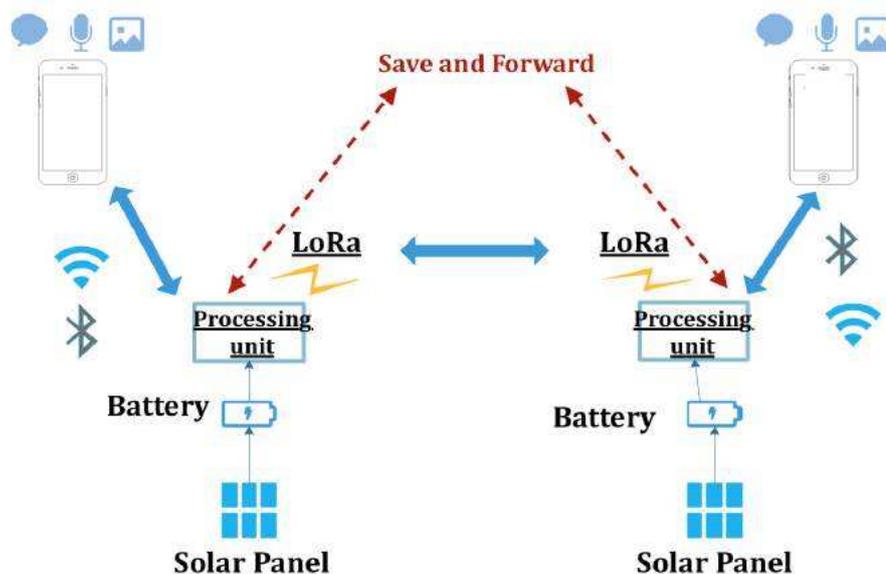


Figure 4.1: COWShED: Architecture de communication

peuvent être sur : l'environnement, l'activité pastorale, la santé animale, l'organisation et la gestion des terres pastorales et agricoles.

La solution technique pour notre système est basée sur des technologies pour des scénarios dans lesquels la mise en réseau est difficile tels que les réseaux de types opportuniste, l'Internet des Objets et la communication Machine-to-Machine (M2M). Un réseau *Proof of Concept* est conçu pour la communication entre éleveurs sur la base d'une transmission *LoRa* dans les bandes ISM pour les zones sans couverture cellulaire.

4.2 Architecture de communication

Le projet COWShED est principalement conçu pour la communication entre éleveurs basée sur la transmission *LoRa* pour les zones sans couverture cellulaire. Par conséquent, la communication de bout en bout entre des *téléphones intelligents* (smartphones) se fait via des relais mobiles qui échangent des informations via le protocole de transmission *LoRa*. Nous avons conçu deux prototypes différents de sorte à ce que la communication entre un smartphone et son relais mobile puisse se faire soit par *Bluetooth* soit par *Wifi*. Enfin, les relais mobiles sont alimentés par un panneau solaire. En effet, le *Ferlo* est une zone du Sénégal où l'irradiation solaire est très importante. La durée d'ensoleillement varie de 7 à 12 heures par jour dans l'ensemble de l'année [12]. Par conséquent, pour assurer l'alimentation électrique, nous utilisons des systèmes d'énergie solaire avec des batteries remplaçables de 7,4V et 5200mA qui ont 8 heures d'autonomie. La batterie est rechargée par un panneau solaire de 4W. La Figure 4.1 illustre un scénario de communication basé sur l'architecture COWShED.

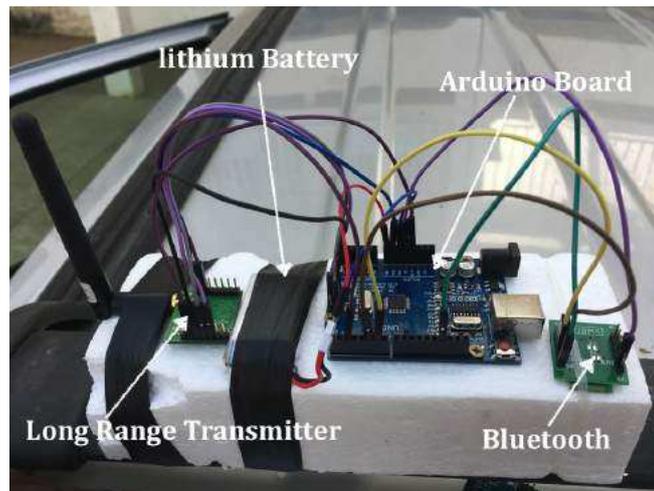


Figure 4.2: Prototype de communication basée sur le Bluetooth

Tout d'abord, nous avons conçu un prototype basé sur le Bluetooth qui permet une communication entre les éleveurs. Notre prototype de communication basé sur du Bluetooth est formé de deux composants. Le premier est illustré sur la Figure 4.2 et formé par :

- une carte émetteur longue portée (puce LoRa *Sx1272*) qui fait office de relais et peut en même temps diffuser les informations reçues du téléphone de l'éleveur vers les destinataires ou voisins directs et recevoir les informations provenant de ces derniers.
- une carte *arduinoUno* qui fait office d'unité de traitement.
- une carte Bluetooth Low Energy (*BLE*) qui transmet les informations reçues de la carte LoRa au téléphone, ou du téléphone vers la carte lora à travers la carte arduino.
- Une application Mobile que nous avons conçue. Les informations sont formatées depuis l'application (message texte). Nous l'envoyons à la carte arduino en passant par le module Bluetooth. La carte arduino traite l'information et l'envoie sur le réseau avec la carte LoRa. À la réception, le relais mobile destinataire fait les étapes contraire pour récupérer l'information sur le téléphone.

Nous avons aussi produit une deuxième version basée sur le Wifi. Une communication entre un téléphone et un boîtier relais (basé sur *Dragino LG01 – P*) se fait par *Wifi* avec la norme *IEEE802.11n* [29]. Le boîtier *LG01 – P* contient un processeur de *400MHz*, héberge un *openwrt* avec *16MB* de mémoire flash et *8MB* de mémoire de stockage, une puce LoRa (*SX1276*) et une *Carte arduino Yun*. Nous avons aussi une application mobile dans laquelle nous pouvons nous connecter à un serveur Web installé dans le relais mobile et envoyer / recevoir des données via le protocole *http*. Un serveur *MySQL* est installé dans le relais pour enregistrer à la fois les données envoyées depuis l'application mobile et les données provenant du réseau. Ensuite, nous avons créé un script *Shell* qui prend les données de la base de données et les envoie à une carte arduino Yun. La carte arduino lit les données



Figure 4.3: Prototype de communication basée sur le WiFi



Figure 4.4: Un éleveur utilisant le système Cowshed

en exécutant le processus Linux avec la *classe Process de la bibliothèque Bridge*. Une fois que les données sont dans la carte arduino, nous les envoyons via LoRa vers le nœud de destination. Pour la transmission LoRa, les métriques suivantes sont configurées:

- facteur d'étalement : 12 (4096 jetons)
- taille du canal : 125 kHz dans la bande ISM 868 MHz
- puissance de transmission : 14dBm
- taux de codage : 4/5

La Figure 4.4 montre un éleveur portant un sac qui contient le prototype (boîtier lg01, batterie et panneau solaire en extérieur), il a en main un smartphone dans lequel est installée notre application mobile.

Table 4.1: Performance Evaluation

Prototype	portée	Débit	consommation en énergie	Stockage
Bluetooth	-	-	+	-
Wifi	+	+	-	+

Les deux prototypes ont été testés et le tableau 4.1 montre une comparaison des deux selon quatre métriques. La portée (distance entre smartphone et unité de traitement), le débit binaire d'envoi, la consommation d'énergie et la capacité de stockage.

Nous avons constaté que la communication Bluetooth entre nos deux composants est instable. Afin de permettre une communication efficace entre les éleveurs, il est obligatoire d'avoir une bonne qualité de liaison entre le relais mobile et le téléphone de l'éleveur. Par contre, la transmission Bluetooth consomme moins d'énergie que la transmission WiFi. Cependant, la portée WiFi est supérieure à celle du Bluetooth.

Il convient de noter que le prototype de communication basée sur le Bluetooth est utile pour les services de messagerie texte, les systèmes d'alerte ou d'autres applications IoT qui ne nécessitent pas de transfert de grandes quantités de données. En revanche, le prototype de communication basé sur le WiFi est plus pertinent lorsque nous considérons un schéma de transmission à mémorisation et retransmission comme dans les réseaux DTN. En cas de messages vocaux ou d'images, le Wifi restera la solution la plus adaptée.

4.3 Des services à valeurs ajoutées de COWSheD

Fournir un système de communication aux personnes vivant dans les zones blanches afin de les aider à communiquer avec leur environnement pour divers usages est l'objectif majeur de notre travail. Pour cela, nous avons ajouté quelques fonctionnalités dans le projet COWSheD afin de répondre à ces besoins.

Il est important de noter que dans certaines zones du Ferlo (à Widou Thiengoly et d'autres unités pastorales) le téléphone portable s'est démocratisé à partir de 2011, date à laquelle l'opérateur téléphonique Orange installa des antennes-relais dans ces zones. Du fait d'un meilleur accès au réseau téléphonique et d'une baisse de prix conséquente des téléphones portables et de ses services, résultant d'une libéralisation du marché, donc de la mise en concurrence d'opérateurs (au Sénégal, on en retrouve trois : Free (ancien Tigo), Espresso, Orange), le téléphone portable a été rendu accessible à une population à faible revenus. Depuis 2011, cet outil technologique et de l'information est devenu indispensable dans la plupart des aspects de la vie quotidienne au village. Il est de plus en plus rare de trouver quelqu'un qui ne possède pas un téléphone mobile. Cet appareil est utilisé par toute la population : femmes et hommes, jeunes comme vieux et dans de nombreuses activités. Aujourd'hui, il est devenu primordial d'en avoir un afin de pouvoir communiquer. Il est même considéré par certains d'une utilité égale à la carte d'identité. Ces éléments montrent qu'il n'existe pas une fracture numérique avec l'ensemble des habitants du Ferlo et que l'utilisation du téléphone portable ne leur est pas inconnue. Cependant, l'accès au réseau des opérateurs est restreint. Les zones de couverture de ses antennes-relais restent relativement faible et les habitants se retrouvent assez vite dans des zones blanches

lorsqu'ils s'éloignent de leurs villages. Cette contrainte peut avoir un effet terrible lors de leurs activités de transhumance. Le téléphone portable y joue un rôle de plus en plus primordial. Le mouvement de transhumance consiste à quitter, en début ou en fin de saison sèche, une région d'attache où les ressources sont saisonnièrement raréfiées, pour chercher ailleurs des pâturages relativement plus abondants, avant de regagner le point d'attache dans le Ferlo quand l'hivernage s'installe [75]. Aujourd'hui, les pasteurs font toujours un état des lieux de l'endroit où ils souhaitent transhumer avant de partir avec leurs troupeaux. Ils se renseignent auprès d'une personne vivant dans la région souhaitée afin de glaner des informations relatives aux ressources fourragères, à l'état des points d'eau, des conditions sanitaires (maladies) et météorologiques (précipitations). Cela permet de savoir, avant de partir, si la situation de la région est optimale afin d'accueillir leurs troupeaux. Ainsi, La transhumance ne se fait pas à l'aveugle, les pasteurs essaient de se renseigner en amont sur l'état des parcours de transhumance, ce qui pourrait leur permettre de ne plus gâcher du temps, de l'argent et de l'énergie à parcourir des distances inutiles avec leurs troupeaux. Il y a aussi le besoin de coordination entre les pasteurs se trouvant à l'avant et à l'arrière du troupeau en cas de perte de bêtes ou pour tout autre changement à connaître lors des déplacements. À cela s'ajoute la dématérialisation des relations commerciales et sociales. En effet, dans le ferlo, les activités commerciales telles que la vente du bétail et du lait sont au coeur du mode de vie des pasteurs. La présence d'outil de communication facilite énormément les échanges et réduit les distances physiques et mentales [44].

Pour ces raisons, quelques services ont été ajoutés au dispositif permettant à un utilisateur de notre réseau de pouvoir bénéficier d'un plus grand nombre de possibilités dans ses interactions avec le monde extérieur.

4.3.1 Service de Géolocalisation

La géolocalisation désigne de façon très large un ensemble de techniques employées pour localiser, sur un plan ou une carte numérique, un objet ou un individu en fonction de ses coordonnées.

Cette localisation d'objet est pour un pasteur ou un marin une localisation de ressources qui est au centre de leurs activités.

Une étude [3] faite sur un chalutier a relevé ses communications sur une marée de 9 jours. L'analyse des données recueillies conduira à identifier les types de communications standard. Parmi celles-ci apparaît "localiser le poisson" 64,94% du temps. Les autres communications sont pour contacter la famille, les collègues, avoir des informations sur la météo etc.

Une autre étude [20] produite sur une zone pastorale (*Niassanté*) avait comme objectif de faire de la cartographie participative avec les communautés rurales. L'objectif est de faire participer ces communautés dans la gestion durable des ressources de leur territoire. La cartographie participative peut être divisée en deux types de productions graphiques : la carte mentale et la carte participative. La première veut faire refléter des connaissances de l'espace nécessairement incomplètes et nous informe sur les comportements socio-spatiaux des personnes interrogées. La méthode de la carte mentale stipule qu'aucun postulat ne doit être fait quant aux connaissances géographiques des acteurs. Le produit est fait par les enquêtés. La carte participative utilise à l'inverse des références (polarités, présences

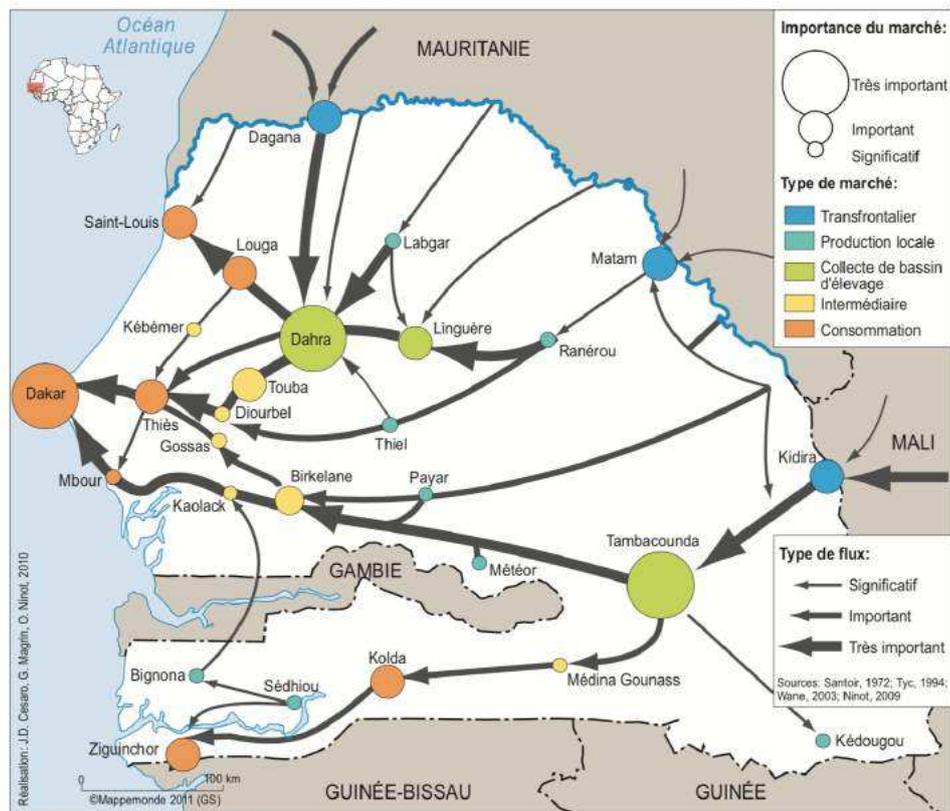


Figure 4.5: Marchés et flux de bétail sur pied

d'espaces géographiques précis...). Elle suppose une entente in fine sur la légende et les informations. La question au centre de l'étude était : « Pouvez-vous faire une carte de votre espace pastoral ? ». Le premier constat était que les éleveurs se sont toujours situés par rapport aux quatre pôles qui en pular sont : Newo (Nord) Worgo (Sud) Fulnangué (Est) Irnangué (Ouest). Ils connaissent très bien les polarités et cela est observable dans de nombreux lieux et pratiques des éleveurs. La porte d'un campement par exemple sera toujours en direction du sud. De plus, tous les éleveurs sont unanimes sur ce point : « Le vent vient de l'est, la pluie de l'ouest, et le nord n'est pas agréable ». Ensuite, selon la religion islamique, lors d'un enterrement le défunt devra être placé de façon à ce que sa tête soit en direction du sud. Les cinq prières quotidiennes se font en direction de la Mecque. Il n'est donc pas étonnant que les directions soient le plus souvent exactes dans leurs cartes, ce qui n'est pas le cas des distances. Les auteurs du travail ont pu voir par exemple un parc à bétail dessiné à la même hauteur qu'un forage alors que le premier se situe à cent mètres du campement de l'éleveur et le second à cinq ou six kilomètres.

Ce travail montre l'importance de la géolocalisation pour un pasteur mais avec les moyens dont ils disposent, ils ont du mal à se faire une idée exacte des informations surtout lorsqu'il s'agit des distances.

Au-delà du besoin des acteurs, la sauvegarde des parcours de transhumance et des pêcheurs peut servir à créer une base de donnée dont l'analyse permettrait d'abord une avancée majeure dans la modélisation de l'effort de pêche artisanale ou du pastoralisme

mais aussi permettra la construction de modèles de distribution spatiale de l'effort de pêche artisanale. La Figure 4.5 montre un aperçu sur les marchés et les flux de bétail dans l'ensemble du Sénégal. La collecte de données dans ce domaine existe à ce jour par des méthodes d'enquête (CRODT), mais la numérisation de ces données n'est pas effective et pose de gros problème de fiabilité de la donnée (correspondance entre noms des lieux de pêche et positions GPS difficile à déterminer).

Afin de mettre en oeuvre un système d'information géographique, nous avons utilisé une carte hors-ligne (maps.me) qui est déployée dans les téléphones intelligents des éleveurs. Maps.me est une application de géolocalisation qui permet de positionner des coordonnées géographiques sur une carte sans l'utilisation d'internet. Grâce à notre réseau LoRa, l'appareil peut obtenir des données d'appareils connectés à distance et les placer sur une carte. Par conséquent, le service de géolocalisation peut être utilisé afin de localiser les points d'eau et les forages disponibles. De plus, la box LG01 est capable de stocker la localisation géographique des éleveurs (longitude, latitude) ainsi que tous les lieux importants le long des routes de transhumance.

4.3.2 Service de Messagerie vocal

Le téléphone portable a permis de rassembler les usagers entre eux et d'entretenir des relations déjà existantes. En effet, dans une société de l'oralité comme celle du Sénégal, les appels vocaux sont devenus le meilleur moyen de communication et celui qui est le plus utilisé dans certains villages du Ferlo. Pour des personnes entretenant des liens familiaux, professionnels, amicaux, il est désormais possible de se contacter à tout moment et sans se déplacer.

Une enquête [52] a permis de constater l'apparition d'une nouvelle pratique de sociabilité, n'existant pas autrefois du fait du manque d'accès à internet; il s'agit des groupes communs Whatsapp. Ces derniers sont de plus en plus adoptés grâce à leur facilité d'utilisation. En effet, contrairement aux SMS, il n'est pas nécessaire de savoir lire et écrire pour pouvoir jouir de cette application du fait de la possibilité d'enregistrer de courts messages vocaux. Ainsi, certaines familles ayant des membres très éloignés géographiquement, vivant en ville ou à l'étranger, créent des groupes communs Whatsapp leur permettant de prendre des nouvelles entre eux et de se soutenir moralement et financièrement. En effet, par l'intermédiaire de ces groupes, l'enquête a permis de constater la mise en place de tontines (association collective d'épargne) servant de caisse de prévoyance en cas de situation financière difficile pour un des membres de la famille (problème de santé, l'achat d'un billet d'avion...). Ces tontines sont également présentes dans des groupes Whatsapp entre amis permettant d'aider un de ses membres à se lancer professionnellement. Cette nouvelle pratique est un des exemples montrant que le téléphone portable est un outil médiateur permettant de renforcer des liens sociaux déjà existants mais également de mettre en relation des personnes ayant des points communs (famille, amis, centres d'intérêt..) et qui, sans cet outil, ne pourraient certainement pas garder facilement contact. Ces groupes sont également le support de nouvelles organisations de solidarité. Mais cela montre aussi que ces populations ont un rapport à la technologie qui est parfois bien plus avancé que nous ne pourrions le penser. Dans notre réflexion, bien qu'ayant rencontré des représentants dans les villages que nous avons visités avec un niveau d'éducation suffisant pour échanger des

SMS, nous avons pensé qu'il serait utile d'ajouter à notre système la possibilité d'envoyer des messages vocaux limités à 5 secondes. Nous avons donc ajouté une option dans l'application mobile pour envoyer un message vocal qui s'arrête automatiquement au bout de 5 secondes, ce message vocal est envoyé par la même méthode que lors de l'envoi de messages texte au serveur Web et est stocké dans une base de données. Un script shell qui s'exécute comme un démon (fait référence à un type de programme informatique, processus ou ensemble de processus qui s'exécutent en arrière-plan plutôt que sous le contrôle direct d'un utilisateur) vient le récupérer et l'envoyer à la carte Arduino grâce au processus, et le message est envoyé au réseau LoRa par la carte arduino. Le débit binaire LoRa est très faible, donc l'envoi de notes vocales prend un peu de temps (environ 5 minutes). En fait, nous envoyons 4000 octets pour une note vocale de 5 secondes avec des charges utiles de différentes tailles en fonction de la portée et de la configuration de l'émetteur pour réduire le taux de perte de paquets ou pour optimiser le débit de données. Tous les boîtiers relais reçoivent la première charge utile d'une note vocale et sont mis en pause pendant la durée de la transmission afin d'éviter d'éventuelles collisions. Il est important de se rappeler que le destinataire du message est ajouté lors du processus d'envoi dans l'application mobile comme pour le message texte.

4.3.3 Service de transmission d'information pour la collecte de lait

La vallée du fleuve Sénégal a connu d'importantes mutations au 20^e siècle. Les aménagements hydrauliques et la riziculture ont profondément modifié la mise en valeur agricole et pastorale du lit du fleuve. L'élevage a été le grand oublié des politiques de développement malgré le potentiel laitier associé à la présence permanente de l'eau et à la qualité des pâturages de décrue et post-récoltes. Après la création de quelques petites unités laitières artisanales au cours des années 1990-2000, une laiterie industrielle importante a commencé à collecter en 2006 dans l'arrière-pays de Richard-Toll. Elle collecte auprès de 250 chefs de familles aussi bien le long du fleuve (Waalo) que dans l'intérieur des terres (Diéri) dans un rayon de 35 kilomètres Figure 4.6. La production journalière est estimée à 2.000 litres en saison humide. Pour maintenir les éleveurs dans la zone de collecte en saison sèche, la laiterie accorde des crédits en aliment de bétail, deux fois moins chers que sur le marché. Elle cherche ainsi à développer le troupeau de case de saison sèche [21].

Pour rentabiliser la distance parcourue par les voitures de collecte, des regroupements d'éleveurs ont été encouragés par la laiterie. Certains éleveurs fournissent ensemble leur lait dans un même bidon. D'autres, trop éloignés des circuits, parcourent trois à six kilomètres pour atteindre un point de collecte. Au-delà, le gain par rapport au temps demandé ne semble plus intéresser les éleveurs.

Collecter dans le Diéri en saison sèche suppose que la Laiterie du Berger soit réactive et souple pour réorganiser en permanence les circuits en fonction des déplacements des éleveurs. La proximité du lac de Guiers est un atout en période de panne générale de forage, comme en avril 2009 lorsque les fournisseurs du circuit d'Alassane (à l'ouest) ont abreuvé les troupeaux au lac pour rester collectés. Les parcours post-récoltes autour du forage de Diaglé forment aussi une réserve herbacée importante, que certains pasteurs utilisent pour continuer à être collectés. Les pasteurs du circuit de Mouda (à l'est) ont été nombreux à partir rapidement vers le sud. Les circuits ont alors été allongés de sept

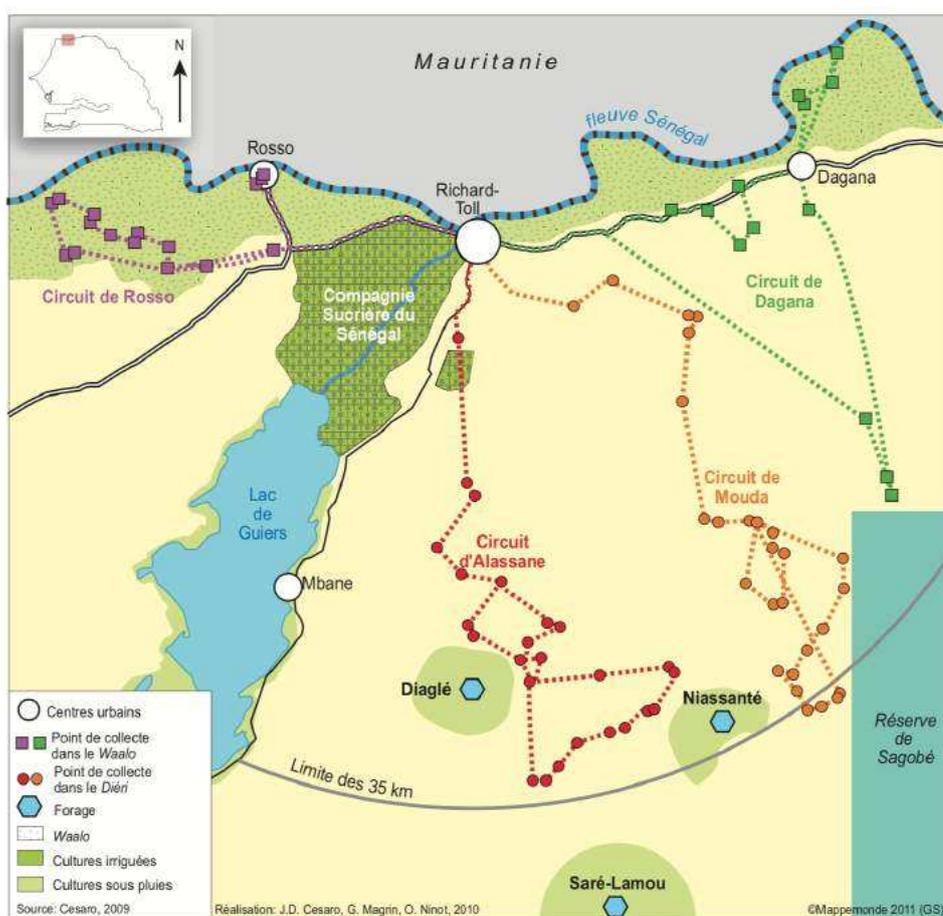


Figure 4.6: Le bassin de collecte du lait de la Laiterie du Berger

kilomètres pour collecter ces éleveurs transhumants et maintenir un certain niveau de production. Cela montre que les éleveurs, comme la Laiterie du Berger peuvent s'adapter à certains aléas Figure 4.7, mais aussi que la collecte de lait constitue un élément très important et une source de revenus non négligeable.. Beaucoup de familles dans le Ferlo vivent de cette collecte [28]. Nous avons pensé à faire une architecture spécialisée dans la collecte avec une application mobile permettant aux habitants de Namarel de pouvoir communiquer par SMS ou l'envoi de notes vocales afin d'informer régulièrement le centre de collecte sur la quantité de lait en stock mais aussi, à utiliser le système de géolocalisation afin de connaître la position des fournisseurs. Cela permettrait une meilleure gestion des ressources et une meilleure prise de décision en matière de collecte. La Figure 4.8 montre l'architecture de communication utilisée [72].

4.4 Synthèse

Fournir un système de communication peu coûteux et fiable aux personnes vivant dans les zones blanches afin de les aider à communiquer avec leur environnement était l'objectif majeur de notre travail.

Stratégies des éleveurs collectés en saison sèche D'APRÈS J.D CESARO (2009)

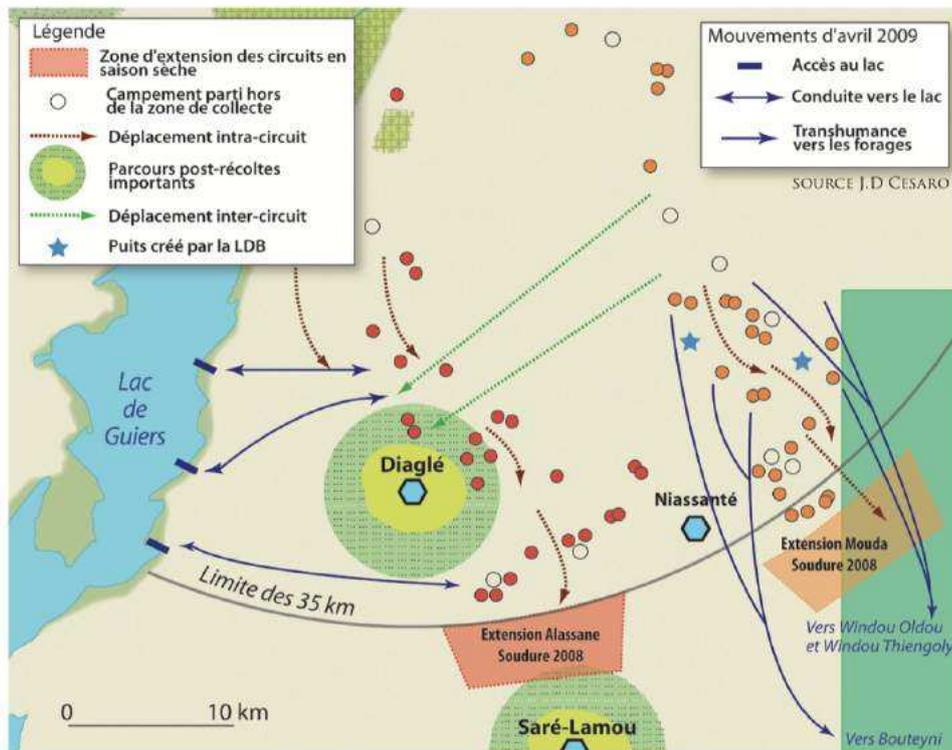


Figure 4.7: Stratégies des éleveurs collectés en saison sèche

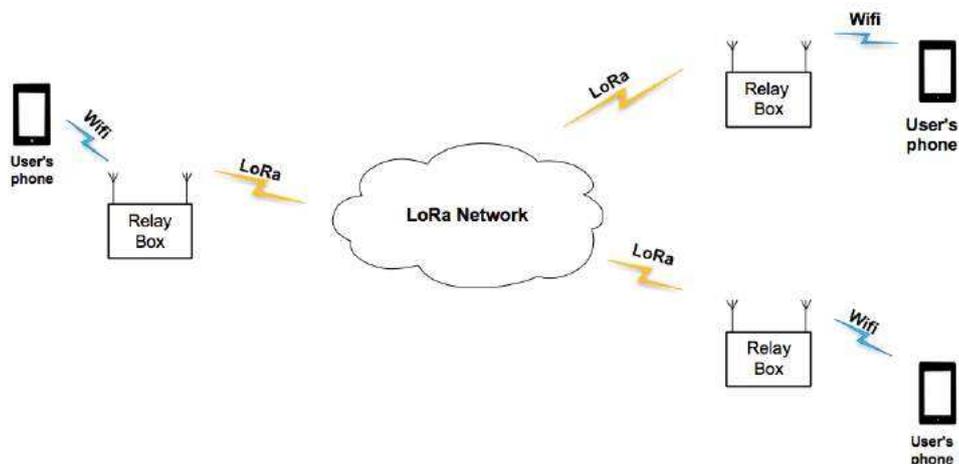


Figure 4.8: Architecture communication Collecte

Nous avons déployé une architecture qui permet une communication entre les éleveurs au sein des zones blanches. Un réseau "proof of concept" basé sur les réseaux tolérants aux délais est construit pour la communication entre les éleveurs sur la base de la transmission LoRa qui permet de partager des informations vitales pendant la transhumance

des éleveurs. Le projet COWShED fait usage de relais pour explorer de nouveaux services afin d'améliorer le mode de vie en zone rurale. Ces services sont principalement basés sur la messagerie texte, la géolocalisation, la messagerie vocale et la collecte de lait.

Ces services mettent en valeur des secteurs importants en milieu rural qui contribuent à la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages ruraux. Malgré ce rôle très important, les systèmes pastoraux se trouvent confrontés à de nombreuses difficultés, et notamment, à la marginalisation des populations pastorales et à la compétition croissante avec les autres groupes d'utilisateurs, en particulier les agriculteurs, pour l'accès aux ressources naturelles (pâturages, points d'eau etc.). Dans ce contexte, les éleveurs et les politiques ont besoin d'informations et d'indicateurs spécifiques pour guider les nécessaires évolutions et transformations de ce secteur très important de l'économie des pays de l'espace sahélien.

5 GAMMETA: Une approche multi-agents pour la modélisation d'un système de communication en zones blanches

5.1 Introduction

Partant du cas concret rencontré sur le terrain, en l'occurrence faire communiquer des éleveurs entre eux quand ils se trouvent dans des zones dites blanches, nos réflexions nous ont mené à penser à la possibilité de collecter diverses informations pour ensuite les disséminer dans un réseau afin de les rendre publiques et partagées.

Cependant, en raison de la grande distance qui sépare les différents utilisateurs du réseau et du manque d'équipement central pour tous les interconnecter, ce réseau doit être vu comme un réseau tolérant aux délais avec une architecture ad hoc. Nous supposons qu'il s'agit d'un réseau mobile ad hoc clairsemé et connecté par intermittence où une communication fiable et une connectivité de bout en bout ne sont pas toujours disponibles pour la transmission de messages [50]. De plus, l'utilisation du canal radio pour la communication nous expose au risque d'interférences. Ces éléments font que pour prétendre avoir un réseau de distribution cohérent, il faut penser à une organisation en cluster. Les réseaux sans fil sous forme de clusters ont été largement utilisés dans la littérature. Cependant, deux aspects de ces systèmes sont souvent négligés: à savoir, la probabilité de transmission utilisée pendant la phase de formation de cluster et la manière dont les chefs de cluster sont sélectionnés. Ces deux problèmes ont un impact important sur les performances du système [54].

Dans ce chapitre, nous proposons et décrivons un modèle de réseau de communication. Ce modèle permet d'assurer et d'optimiser la disponibilité du canal, la réutilisation des fréquences et un bon acheminement des informations pour assurer les diffusions. L'approche multi-agents est motivée par l'architecture de notre réseau qui n'est pas figée et fortement dépendante des mouvements des nœuds. De plus, la formation des clusters et l'élection des chefs de clusters reposent sur la connaissance de l'environnement de chaque nœud. Cette connaissance se fait grâce aux interactions entre le nœud et ses voisins à sa portée. Enfin, ce modèle sera utilisé dans un modèle décrivant une activité d'un écosystème marin ou pastoral situé dans des zones blanches pour promouvoir l'utilité de la communication dans des scénarios spécifiques.

5.2 Clusterisation et notion d'oracle

L'état de l'art sur les techniques de clustérisation nous a permis une meilleure compréhension des algorithmes de clustérisation existants et de prendre en compte leurs manquements pour proposer un algorithme de clustering répondant aux contraintes liées à notre domaine d'étude. Cet algorithme, prévu pour être intégré dans un protocole de routage, vise à générer une structure de cluster stable. La stabilité de la structure des clusters permet de garantir celle des routes et donc de réduire le coût de leur maintenance et d'améliorer les performances du réseau. La conception et l'évaluation de cet algorithme fait l'objet de cette section.

Tout d'abord, il y a le choix de la technique de clustering. Dans la littérature, des solutions ont été proposées (QT clustering, K-means, DBSCAN, HCC etc.) [82] qui sont des algorithmes très efficaces. Cependant, ces techniques ont en commun le fait que nous avons une connaissance totale du réseau à tout moment pour pouvoir faire des clusters (oracles). Ce n'est pas le cas dans notre contexte où il n'y a pas d'équipement central pour organiser tous les nœuds. Cette non existence de nœud central est la raison pour laquelle les nœuds n'ont aucune connaissance de la position exacte de leurs voisins. Cela montre la nécessité de proposer une technique de clustering répondant aux contraintes de notre réseau et de comparer ses performances avec un autre algorithme sur le même jeu de données avec le même environnement. L'idée ici est de proposer un nouvel algorithme de clustering en utilisant dans la littérature des règles de clustering que nous adaptons à notre cas afin de pouvoir créer des clusters à partir de l'échange d'informations entre les nœuds du réseau.

Il est important de savoir que nous avons trois états possibles pour un nœud (chef de cluster, passerelle, nœud simple). Le chef du cluster est élu par les membres du cluster après un échange d'informations. Celui avec le plus de voisins dans le cluster est appelé chef de cluster. Un nœud ayant la connaissance d'un autre nœud appartenant à un cluster différent est nommé passerelle (on garde la possibilité d'avoir plusieurs passerelles). Un nœud simple n'est ni une passerelle ni un chef de cluster, mais appartient à un cluster.

- Dans un premier temps, tous les nœuds sont activés et choisissent un numéro de back-off (nombre aléatoire sur un intervalle défini). Au moment de son back-off dans la fenêtre de clustérisation, chaque nœud émet sur le canal son identité, sa position, le nombre de voisins autour de lui. Le reste du temps, il écoute le canal et attend les mises à jour de localisation reçues des autres pour avoir des informations sur les voisins (id, localisation, ID de chef de cluster, nombre de voisins).

- Dans un second temps, chacun peut, à partir des informations reçues au préalable, décider de son état : chef de cluster, passerelle ou nœud simple. A chaque cycle, des mises à jour sont effectuées par chaque nœud sur l'état des autres nœuds et sur eux-mêmes car étant au courant des décisions prises par les voisins. Une fois le chef de cluster élu, il décide des métriques en règle dans le cluster c'est à dire :

- Le Canal de fréquence de transmission : selon la bibliothèque Sx1276, dans la bande de fréquence 868Mhz de LoRa, nous avons 8 canaux de transmission. Le premier canal est utilisé pour les mises à jour de localisation pour chaque nœud et les chefs de cluster peuvent utiliser les 7 autres pour une utilisation intra-cluster.

- Le facteur d'étalement est modifié afin de réduire ou d'étendre la portée de transmission en fonction de la distance entre le nœud le plus éloigné et le chef du cluster. Sur la base de tests approfondis effectués sur le chapitre 3, nous avons proposé un modèle de régression linéaire afin d'estimer la perte de chemin. Nous connaissons donc la distance de transmission maximale pour chaque cas et la perte de chemin.
- La probabilité de transmission sera utilisée à l'avenir pour la formation de cluster. Une étude [55] montre que les stratégies de transmission fixes, adaptatives et optimales ont des résultats différents en termes de consommation d'énergie, de latence et de probabilité de succès dans la formation de cluster. La Figure 5.1 montre ces différentes stratégies et leur résultats par rapport à la consommation d'énergie, la latence et la probabilité de succès dans la transmission.

Lorsque le nombre de nœuds est susceptible de changer, l'utilisation de stratégies de transmission adaptatives se révèle être la meilleure dans notre cas. La figure Figure 5.1 montre la comparaison de différentes stratégies. Sur la base du nombre de nœuds dans le cluster, le cluster choisira la probabilité de transmission adéquate [55].

5.3 Construction modèle

Pour décrire le modèle, nous avons opté pour le protocole ODD (Overview, Design concepts, Details) utilisé pour décrire les modèles basés sur des agents. Ce protocole se compose de trois blocs (Overview, Design concepts, et Details), qui sont subdivisés en sept éléments : Purpose, State variables and scales, Process overview and scheduling, Design concepts, Initialization, Input, and Submodels [34].

Nous avons choisi l'algorithme de K-means comme technique de clustérisation de référence. Nous comparerons nos résultats à ce dernier.

- Purpose : L'objectif du modèle est d'évaluer les performances d'une technique de clustering par rapport à une autre (K-means). Les éléments de comparaison sont basés sur les métriques suivantes : Le nombre moyen de clusters par cycle, le nombre de changements de chef de cluster, La durée de vie d'un chef de cluster, le taux de correspondance entre le chef de cluster choisi et le centroïde désigné par les nœuds.
- State variables and scales : Le modèle comprend quatre niveaux hiérarchiques : individuel(relais mobiles), clusters, centroïdes et environnement.

Les relais mobiles sont caractérisés par les variables d'état : numéro d'identification, emplacement géographique, vitesse de déplacement, nombre de voisins et destination (représente la zone d'intérêt vers laquelle se dirige le relais mobile). Ils ont également un état variable qui définit leur rôle dans un cluster (chef de cluster, passerelle, nœud simple). Enfin, le relais mobile a une variable qui définit sa probabilité de transmission et qui est choisie par le chef de cluster.

Le cluster est défini par le nombre de nœuds appartenant au cluster, le numéro d'identification du chef de cluster et les numéro d'identification des passerelles. Un

cluster est un ensemble de relais mobiles situés au minimum à une distance seuil du chef de cluster. Un cluster peut être créé, maintenu ou détruit.

Les centroïdes sont caractérisés par une position géographique et le nombre de nœuds qu'ils regroupent. Nous avons K centroïdes. K étant un nombre dont le choix n'est pas intuitif. Cela se fait en appliquant quelques contraintes (distance, nombre de nœuds...) liées au cas de notre étude. Les centroïdes sont utilisés par l'algorithme K-Means.

L'environnement est un maillage caractérisé par un périmètre et des zones d'intérêt où se dirigent les relais mobiles (forages, points d'eau, marché aux bestiaux ..).

- Process overview and scheduling : le modèle se déroule dans un pas de temps qui est la seconde. Les nœuds commencent par choisir un numéro back-off qui est aléatoire, puis écoutent le canal à chaque pas de temps. Lorsqu'une mise à jour de localisation est reçue, ils stockent toutes les informations qui y sont liées (état, localisation de

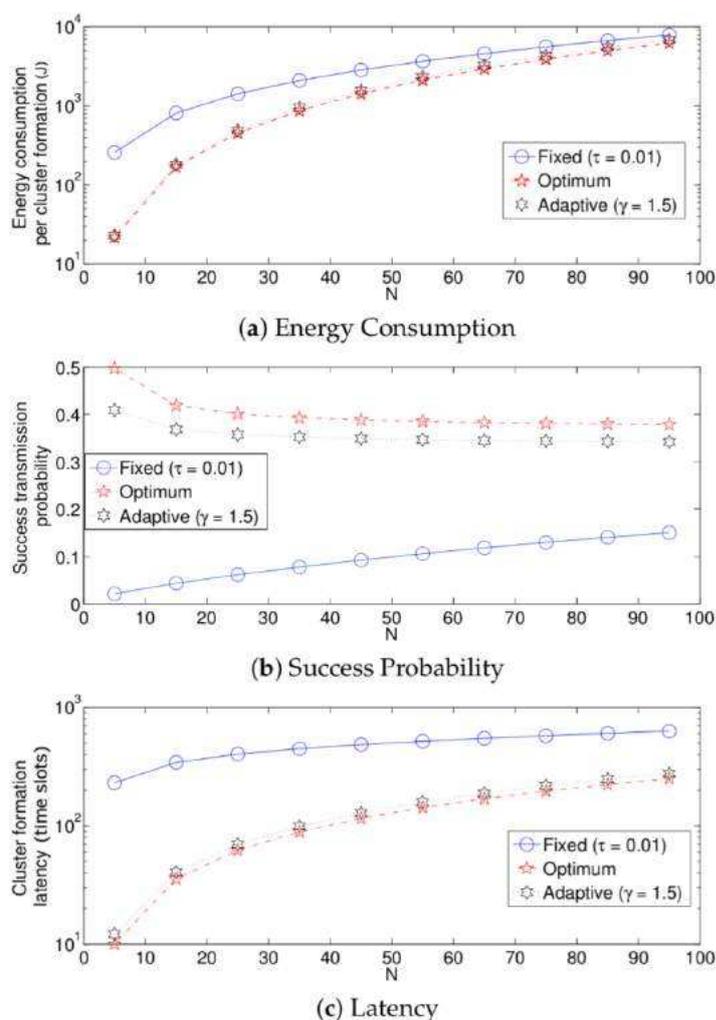


Figure 5.1: Comparaison des stratégies de transmission

l'expéditeur etc.). Lorsque le temps est égal au back-off choisi, le nœud envoie sa mise à jour de localisation au réseau. La figure Figure 5.2 montre ce processus. Il est à noter que chaque nœud est en mouvement en direction d'une destination choisie parmi les zones d'intérêt.

Les centroïdes sont créés au premier pas de temps avec une valeur K aléatoire. À l'étape suivante, ce K est réévalué en fonction de la distance avec les nœuds affiliés à chaque centroïde et du nombre de nœuds qui ne sont pas dans un cluster après l'évaluation de la distance. Ces métriques aident à savoir si la valeur K va augmenter ou diminuer. A chaque pas de temps, nous avons une maintenance de clustering qui consiste à évaluer la valeur K. Il convient de noter que chaque valeur de K représente le nombre de clusters obtenus.

- Design concepts

Emergence : La dynamique du réseau émerge du comportement des relais mobiles, mais les comportements des relais mobiles sont représentés par des règles décrivant la mise à jour de localisation, la probabilité de transmission, etc. Ces éléments peuvent donc induire des variations dans la structure du réseau et des tailles de cluster. À chaque simulation, la structure du réseau sera toujours différente. Le nombre de cluster peut varier en fonction de la destination des relais mobiles.

Adaptation : Les relais mobiles ont des caractéristiques qui changent en fonction de la taille du cluster. Chaque chef de cluster donne des informations aux membres du cluster sur les règles à adopter afin de maintenir un bon accès au canal. Cela conduit à modifier des caractéristiques telles que la probabilité de transmission, la fréquence du facteur d'étalement et la taille du canal.

Prediction : Les changements de caractéristiques sont basés sur une prédiction de la future destruction d'un cluster et donc la formation d'autres clusters. En effet, lorsqu'un cluster est sur le point d'être saturé et que la communication ne sera plus possible, le chef de cluster décide d'un re-clustering où le cluster sera divisé en de plus petits clusters avec une réévaluation des métriques de transmission.

Sensing : Les relais mobiles sont supposés connaître leur emplacement géographique, leur identifiant, les identifiants de leur chef de cluster (s'ils ne sont pas un chef de cluster) et de leurs voisins. Cela les aide à effectuer correctement leur mise à jour de localisation et à décider de leur rôle dans le cluster.



Figure 5.2: Le "Process Overview" de notre modèle.

Interaction : Trois types d'interactions sont modélisés de manière explicite:

- Un relais mobile vers chaque relais mobile afin de donner sa localisation et ses informations.
- Un chef de cluster à ses membres du cluster.
- Un relais mobile vers un autre pour la communication peer-to-peer.

Stochasticity : Les identifiants, l'emplacement géographique de départ des relais, le back-off et la direction des relais mobiles (représente la zone d'intérêt vers laquelle se dirige le relais mobile) sont tous randomisés. La position des zones d'intérêt dans l'environnement est randomisée afin d'avoir des scénarios différents à chaque simulation.

Collectives : Ils sont représentés en cluster. Un ensemble de relais mobiles situés à une distance maximale définie d'un même relais mobile forment un cluster. Un cluster est un autre niveau d'organisation où le groupe de relais mobiles est considéré comme un agent unique appelé cluster. Le cluster a ses propres variables et caractéristiques et sera utilisé pour les algorithmes de routage.

Observation : Pour les tests du modèle, le nombre de chefs de cluster et le nombre de centroïdes sont pris à chaque nouvelle formation de cluster. De plus, la décision de chaque chef de cluster est enregistrée (facteur d'étalement, fréquence, taille de canal, etc.). Nous avons également pris l'identifiant du relais mobile le plus proche des centroïdes afin de comparer leur identité avec le chef de cluster élu par les voisins. Tous les 86400 cycles(24h), la population de relais mobiles augmente.

- Initialization : Au temps $t = 0$, nous avons des relais mobiles dans une grille carrée de 60 km de côté. Chaque relais mobile a un identifiant aléatoire, un emplacement géographique et une possibilité de communication de 15 km de portée. Il y a des zones d'intérêt dans la grille, localisées de manière aléatoire. Le nombre de centroïdes est également aléatoire au temps $t = 0$. Les relais mobiles sont considérés comme n'ayant pas été connectés à leur environnement auparavant; ils ne connaissent donc aucun de leurs voisins. Leur rôle n'est alors pas défini, ils ont des attributs booléens comme `isCh`, `isMember`, `isGw` qui sont mis à `false`.
- Input : Pour le modèle sans cas d'étude, il n'y a pas de données d'entrée environnementales. Nous travaillons sur un réseau et supposons que nous sommes dans les meilleures conditions de transmission sans aucune contrainte dans le déplacement des relais mobiles.

Dans les cas d'étude, nous pourrions avoir des données qui montrent la répartition des précipitations, la croissance et la disparition des pâturages, la dynamique des déplacements des troupeaux, la répartition spatiale des éleveurs et la répartition spatiale de l'effort de pêche artisanale selon les cas.

- Submodels

distance de transmission : Nous avons un modèle d'atténuation de canal qui permet d'estimer les pertes de trajet avec notre appareil émetteur. Nous utilisons la

technologie LoRa et nous avons réalisé un modèle de régression linéaire pour établir une relation entre la distance et la qualité du signal. Grâce à des tests empiriques en milieu rural et en mer, nous avons calculé la perte de trajet (PL) en utilisant l'indicateur de force du signal reçu ($RSSI$) et le rapport signal sur bruit (SNR).

$$PL = |RSSI| + SNR + Ptx + Grx \quad (5.1)$$

“ Ptx ” est la puissance isotrope rayonnée effective et “ Grx ” est le gain d'antenne du récepteur.

Nous avons dérivé la perte de chemin attendue (EPL) des données mesurées à partir de l'ajustement polynomial linéaire. Nous l'avons calculé comme [30] avec :

$$EPL = B + 10n \log_{10}(d/d_0) \quad (5.2)$$

“ B ” représente la perte de chemin, “ n ” est l'exposant de perte de chemin, “ d ” est la distance entre le nœud et la station de base et “ d_0 ” signifie la distance de référence de 1 km.

Ce modèle est la base de référence que nous considérons pour choisir la distance de transmission maximale en fonction de la zone de déploiement.

Personalized K-means : Le clustering K-means est une méthode de quantification vectorielle, à l'origine du traitement du signal, qui vise à partitionner n observations en k clusters dans lesquels chaque observation appartient au cluster avec la moyenne la plus proche (centres de cluster ou centroïde de cluster), servant de prototype du cluster. Cela se traduit par un partitionnement de l'espace de données en cellules Voronoi. Il est populaire pour l'analyse de grappes dans l'exploration de données. Le clustering k-means minimise les variances intra-cluster (distances euclidiennes au carré). L'algorithme ne garantit pas la convergence vers l'optimum global. Le résultat peut dépendre des clusters initiaux. Comme l'algorithme est généralement rapide, il est courant de l'exécuter plusieurs fois avec des conditions de départ différentes [82].

Dans notre cas, nous avons modifié son fonctionnement pour qu'il corresponde à nos besoins. Lorsque l'algorithme s'exécute pour la première fois, k "centroïdes" initiaux sont générés aléatoirement. Donc k groupes sont créés en associant chaque observation à la moyenne la plus proche et le centroïde de chacun des k groupes devient la nouvelle moyenne. Normalement ces 2 étapes sont répétées jusqu'à ce que nous trouvions une convergence. Dans notre cas, nous voyons si la distance entre les éléments du cluster et le centroïde est inférieure à la distance de transmission. Chaque nœud qui ne remplit pas cette condition est hors du cluster et ces nœuds deviennent des singletons. Si nous avons plus de 1 % de l'ensemble des nœuds sans cluster, nous ajoutons un autre k ($k = k + 1$) et nous redémarrons l'algorithme de clustering. Dans le cas où chaque nœud est dans un cluster ou moins de 1 % de l'ensemble n'a pas de cluster, nous ne considérons pas que c'est l'optimum; nous supprimons un k ($k = k-1$). Le processus est répété avec l'algorithme de clustering jusqu'à ce que l'optimum soit atteint. Ce modèle sur les k-means est une référence

pour notre algorithme de clustering GAMETTA. Nous supposons que le nombre de clusters obtenus avec le K-means doit être un optimum et un objectif à atteindre avec notre algorithme.

Loc update : La procédure de mise à jour de localisation présentée dans le process overview peut être divisée en deux algorithmes. Nous mettons d'abord en évidence l'annonce de localisation d'un nœud à ses voisins pour la première fois. Le nœud donne en plus du nombre de voisins qu'il a, son id. Chaque nœud fait de même et après deux annonces de localisation, les nœuds peuvent commencer à ajouter des informations sur leur rôle dans le cluster (passerelle, chef de cluster ou nœud simple) car ils connaissent désormais des informations sur leurs voisins (Algorithme 1). Deuxièmement, nous mettons en évidence dans un autre algorithme le canal d'écoute des nœuds, les informations stockées sur leurs voisins et la mise à jour automatique de l'état des nœuds. En fait, chaque nœud écoute en permanence l'annonce de localisation de ses voisins. Une fois que c'est fait, le nœud doit stocker les informations reçues et les utiliser pour mettre à jour son statut dans le cluster afin de pouvoir les diffuser dans l'annonce de localisation suivante (algorithme 2).

Algorithm 1 Annonce de localisation

```
temps ← cycle ;
i ← 0 ;
D ← Distancedetransmission ;
if temps = backoff then
  while i ≤ listeVoisins.lentgth() do
    i ← i + 1 ;
    N ← listeVoisins[i] ;
    if self.distanceVers(N) ≤ D then
      infos[] ← location, id, etc. ;
      listeVoisins[i] ← infos[] ;
    else
      | Aller au prochain voisin
    end
  end
else
  | Ce n'est pas le moment pour l'annonce
end
```

Algorithm 2 Mise à jour de localisation

```

time ← cycle ;
registreVoisins ← 0 ;
while time != backoff do
    attend une mise à jour de locations ;
    if receptionMAJ = true then
        registreVoisins ← registreVoisins + 1;
        stockerInfoVoisins;
        Self.majmonstatutsibesoins;
    end
end
end

```

5.4 Analyse expérimentale

5.4.1 Implémentation

Pour l'implémentation du modèle, nous avons travaillé sur la plateforme GAMA [77].

GAMA (GIS Agent-based Modeling Architecture) est une plateforme de simulation open source développée depuis 2007. GAMA est un environnement de développement intégré (IDE) complet basé sur l'IDE Eclipse, et permet de basculer rapidement entre la perspective de modélisation et de simulation. GAMA propose une interface riche et un langage de modélisation simple appelé GAML (GAMA Modeling Language). GAMA est un langage orienté agent, ce qui signifie que tout ce qui est "actif" (entités modèles, simulations...) peut être représenté comme un agent dans GAML. Les agents appelés *species* dans GAML fournissent un ensemble:

- *d'attributs* (ce qu'ils savent),
- *d'actions* (ce qu'ils peuvent faire),
- *de reflexes* (ce qu'ils vont et peuvent vraiment faire).

et spécifient également les propriétés de leur population, par exemple leurs topologies (comment ils sont connectés) ou leurs plannings (dans quel ordre et quand ils doivent s'exécuter).

Dans GAML, on peut utiliser le concept de *skills* pour construire des *espèces* de manière combinée. Les *Skills* sont des ensembles d'attributs et d'actions qui peuvent être partagés entre différentes *espèces* et hérités par leurs enfants.

Afin de mettre en œuvre notre proposition, nous avons créé un environnement multi-agents où les relais mobiles ont le stéréotype << *agent* >>. Les agents interagissent entre eux et ont des attributs et des réflexes. Nous avons également des clusters qui sont une abstraction d'un ensemble de mobiles relais qui sont regroupés et ont des attributs et des réflexes que nous allons décrire. Enfin, nous avons les centroïdes qui sont aussi des agents avec des attributs et des réflexes, ils sont utilisés pour construire des clusters avec

l'algorithme K-means. Ces éléments sont considérés comme des espèces dans GAML; nous pouvons donc avoir une population d'agents créée à partir de l'espèce.

Après avoir déclaré tous les attributs de l'espèce, nous définissons un état initial (avant de lancer la simulation). Il peut être vu comme le "constructeur de la classe" en POO. Dans l'état initial, nous donnons des valeurs initiales pour chaque attribut. Ces valeurs changeront en fonction de l'évolution de la simulation. Un comportement, ou réflexe, est un ensemble d'instructions qui est appelé automatiquement à chaque pas de temps par un agent. Dans notre modèle, nous avons 3 espèces :

- L'espèce relais mobile : Elle a des attributs tels que la vitesse, la probabilité de transmission, l'identifiant, le numéro de back-off, la destination, l'emplacement, le nombre de voisins... Les valeurs initiales de la vitesse et de la probabilité de transmission sont les mêmes pour chaque nœud au premier pas de temps. L'id, le numéro de back-off et l'emplacement sont uniques pour chaque nœud. Le nombre de voisins est fixé à 0 au premier pas de temps et la destination peut être la même pour les nœuds puisque la destination est pour chaque nœud un point d'intérêt.

De plus, l'agent de relais mobile a des réflexes :

-Moving : Nous utilisons l'action *goTo* lorsque la destination de l'agent est différente de *null*. A chaque pas de temps l'agent se dirige vers une zone cible avec la vitesse définie dans les attributs jusqu'à ce que la valeur de la destination et l'emplacement actuel de l'agent soient des points de coordonnées similaires. Nous définissons ensuite la destination sur *null*.

-Rest : Lorsque la valeur de la destination est *null*, l'agent arrête de se déplacer pendant un nombre défini de pas de temps puis change sa destination vers un autre point d'intérêt.

-Mise à jour de localisation : lorsque le premier numéro de back-off est égal au pas de temps, le nœud peut faire sa mise à jour de localisation. Lorsque le clustering est effectué pour la première fois, le chef de cluster donne la probabilité de transmission aux nœuds. La mise à jour de l'emplacement est effectuée en fonction de la probabilité de transmission 5.5.2. Un autre réflexe est mis en place pour le calculer. Lorsqu'il est temps de faire la mise à jour de l'emplacement, le nœud applique les algorithmes 1 et 2.

-transmit : A l'état actuel du modèle, nous utilisons un booléen qui prend le résultat d'une fonction (flip) sur la probabilité de transmission pour simuler des transmissions hors clusterisation.

- L'espèce cluster : Elle a des attributs tels que le nombre de nœuds, le chef de cluster, le canal de transmission, le facteur d'étalement, la liste des passerelles. Le chef de cluster est un relais mobile, le nombre de nœuds du cluster est égal au nombre de voisins du chef de cluster. Le canal et le facteur d'étalement sont initialement réglés sur la meilleure valeur pour une portée de transmission maximale (125 kHz, 12). Le chef du cluster les changera en fonction de la densité du cluster. La liste des passerelles est un ensemble de relais mobiles qui sont des voisins du chef de cluster et se définissent comme étant des passerelles. Le cluster a trois réflexes :

- Création : Une fois que tous les relais mobiles ont effectué leur première mise à jour de localisation, les chefs de cluster sont alors élus, nous créons autant d'agents de type cluster qu'il y a de chef de cluster. Chaque cluster est affilié à un chef de cluster.
- Mise à jour des métriques : Le chef de cluster effectue des mises à jour à chaque pas de temps pour définir des valeurs pour les attributs du cluster si nécessaire.
- Destruction : lorsque deux chefs de cluster sont à portée de transmission, celui avec le plus de voisins garde son ancien cluster et reste le chef de cluster. L'autre devient un nœud; son cluster est détruit et une réélection de chef de cluster est entamée. Ce réflexe est fait pour détruire le cluster à l'aide d'une action dite *Built – in action* (die) de la plateforme Gama.
- L'espèce centroïde : Un centroïde a son emplacement et le nombre de relais mobiles comme attributs. Cependant, le choix du nombre de relais mobiles n'est pas intuitif. Cela se fait en appliquant certaines contraintes. Par exemple, le centroïde a un réflexe pour déterminer le nombre final de relais mobiles qui se trouvent dans le cluster.
- Évaluer la distance : Le centroïde évalue sa distance par rapport à chaque relais mobile du cluster. Si la distance est supérieure à la distance maximale autorisée, le relais mobile est mis hors du cluster.

Avec le langage GAML, nous avons une espèce spéciale : l'espèce *Global*. Dans l'espèce globale, nous pouvons définir les attributs, les actions et les comportements qui décrivent l'agent dit global ou mondial. Il y a un agent mondial unique par simulation : c'est cet agent qui est créé lorsqu'un utilisateur exécute une expérience et qui initialise la simulation via la fonction *init*. L'espèce globale est une espèce comme les autres et peut être manipulée comme elles. De plus, l'espèce globale hérite automatiquement de plusieurs variables et actions intégrées. Il faut noter qu'une spécificité de l'espèce globale est que tous ses attributs peuvent être référencés par tous les agents de la simulation [77].

Dans les espèces globales, nous utilisons la fonction *init* pour créer des relais mobiles, des centroïdes et des grappes et effectuer toutes les initialisations pour chaque espèce citée auparavant. L'espèce globale a aussi des réflexes que nous avons défini. -K-means building : Puisque nous utilisons l'algorithme K-means qui est disponible dans la plateforme Gama, nous l'employons comme un réflexe dans l'espèce globale. Dans la première étape, nous exploitons l'algorithme tel qu'il a été mis en place. Nous prenons la valeur initiale K et créons des centroïdes K. Avec ces centroïdes, l'algorithme crée K clusters. Nous appelons cette phase la construction du cluster.

-K-Means maintenance : lorsque chaque centroïde évalue sa distance avec ses relais mobiles, il expulse ceux d'entre eux qui sont à une distance supérieure à la distance maximale. A ce moment, ce réflexe est appelé à reconstruire le cluster en augmentant ou en diminuant la valeur K afin d'avoir un autre clustering.

Pour les besoins de la simulation, nous avons différents ensembles de relais mobiles. Nous partons de 50 agents, jusqu'à 250. Toutes les 24 heures de simulation, nous ajoutons 50 nouveaux relais mobiles en utilisant les mêmes métriques que pour les

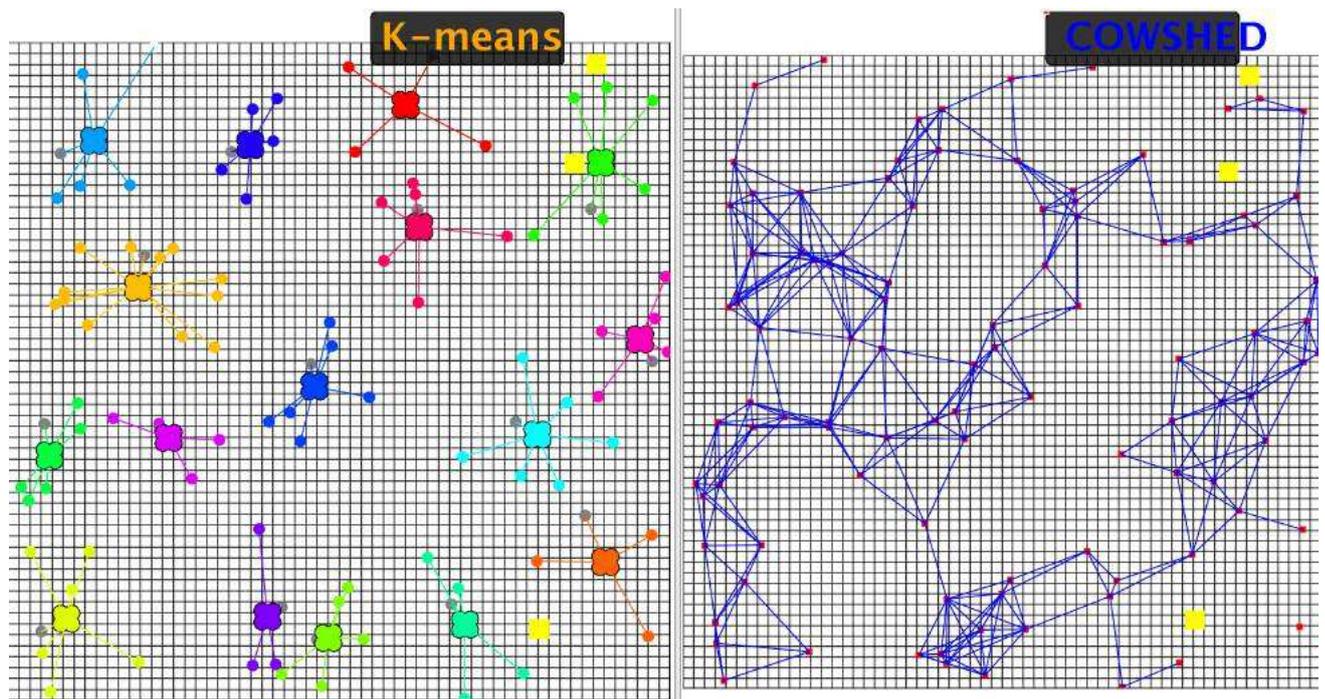


Figure 5.3: Simulation GAMMETA et K-means personnalisé

premiers relais mobiles dans la fonction *init* . Pour automatiser cette tâche, nous avons fait un réflexe appelé *update simulation* dans l'espèce globale.

5.4.2 Métriques d'évaluation

Pour Analyser les résultats de simulation que nous aurons et comparer notre algorithme à celui du K-Means, nous avons défini des métriques d'évaluation. En se basant sur les travaux de [78], nous avons déduit des groupes de métriques. Cette liste n'est pas exhaustive mais représente les éléments que nous avons pu mettre en valeur pour étudier le modèle. Parmi ces métriques il y a :

- Caractéristiques des clusters
 - Le nombre moyen de clusters : le nombre moyen de clusters formés dans le réseau.
 - Taille moyenne d'un cluster : le nombre moyen de nœuds gérés par un chef de cluster.
 - Distance totale aux chef de clusters : la somme des distances entre les nœuds et leurs chef de clusters.
- Complexité des algorithmes : Complexité en temps pour un changement de topologie qui représente le temps passé pour accomplir une ré-organisation valide des clusters après un changement dans la topologie du réseau.

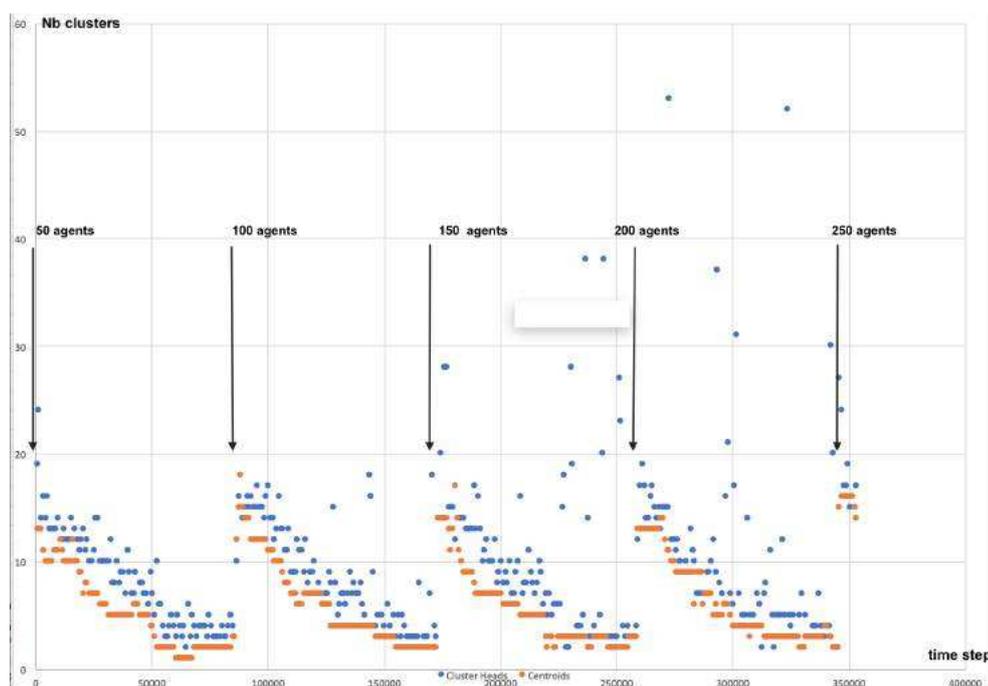


Figure 5.4: Le nombre moyen de clusters par algorithme

- Stabilité de la structure des clusters
 - Durée moyenne de vie d'un chef de cluster : la durée moyenne pendant laquelle un nœud joue le rôle de chef de cluster.
 - Durée moyenne de vie d'un noeud simple : la durée moyenne pendant laquelle un nœud est associé à son chef de cluster.
 - Nombre de changements de chef de cluster : le nombre de fois qu'un chef de cluster change de statut.

La Figure 5.3 montre l'environnement de simulation sur GAMA. Nous avons à gauche l'architecture simulée avec le K-means modifié et à droite l'architecture simulée avec notre algorithme de clustérisation. Il est important de souligner que les environnements sont exactement les mêmes pour les deux interfaces : le nombre de noeud, leurs positions de départ ainsi que tous leurs attributs. Nous avons en réalité un environnement dupliqué sur deux interfaces. Pour chaque interface nous appliquons un algorithme de clustérisation.

5.4.3 Analyse et évaluation des résultats

L'analyse de nos résultats se fera selon plusieurs points cités dans la section 5.4.2.

La première phase est lié aux carastéristiques des clusters.

- Le nombre moyen de clusters : La Figure 5.4 montre le nombre moyen de clusters générés par notre algorithme(bleu) en comparaison avec le nombre de centroïdes produits par le K-means(orange) après plusieurs series de simulations. Nous avons

en abscisse le temps qui s'étale sur 350 milles cycles de simulation répartis en lot de 86400 cycles après lesquels on constate une augmentation de 50 agents (noeuds). En ordonnée nous avons le nombre moyen de clusters.

Nous constatons d'abord que :

-l'algorithme de K-means donne toujours un nombre de cluster inférieur à notre algorithme quelque soit le nombre d'agents mis en simulation. Cela s'explique par le fait que le k-means s'optimise plus vite que le notre et trouve l'optimum plus vite grâce à sa capacité à avoir une vue globale sur le réseau. Notre algorithme dépend des mises à jour de localisation de chaque noeud et donne des résultats en fonction des décisions des noeuds. Dans un cycle où deux ou plusieurs noeuds se disent chef de cluster, il faudra à notre algorithme un tour de plus pour déterminer le véritable chef de cluster pendant que le k-means le détermine instantanément.

-En moyenne, le nombre de clusters trouvés par notre algorithme est toujours proches de celui du K-means (différence de 2 ou 3) à part pour certains cas. En effet, la problématique souligné dans le premier résultat sur la décision du vrai chef de cluster revient souvent et parfois sort des situations dans lesquelles nous avons des cycles isolés où le nombre de chefs de clusters augmente d'un coup. Il arrive de voir un cycle avec 40 cluster pour notre algorithme pendant que le k-means affiche 6 ou 7 cluster. En réalité la courbe ne montre pas le nombres de clusters créés mais le nombre de potentiels chefs de cluster (le nombre de noeuds après calcul des voisins pensant être chefs de cluster au prochain tour. Cela se produit au sein d'un meme cluster où les noeuds sont proches et en grande densité. Le nombre d'entre eux ayant le même nombre de voisins augmente. On peut remarquer sur la courbe qu'au prochain tour le nombre diminue toujours car le choix du chef de cluster est toujours fait. Ces situations se produisent lorsqu'un nouveau noeud entre dans le cluster et remet en questions la hiérarchie établie.

-Pour la surface choisie (60x60) et la portée de communication (15km), nous constatons qu'il y a un nombre maximum de clusters (20) que nous ne dépassons jamais pour le K-Means et notre algorithme (en moyenne) quelque soit le nombre d'agents. Ce résultat pose la question de la gestion des ressources. En effet, le nombre de cluster qui atteint un plafond met en lumière une question qui est de se dire que si le nombre de noeuds augmente mais que le nombre de cluster n'augmente pas, c'est que le nombre de noeuds par cluster augmente. Du coup, au bout de quel nombre de noeuds par cluster atteindrons-nous une situation de saturation dans le cluster? Nous avons dit que la clustérisation consistait d'abord à diviser le réseau en un ensemble de noeuds géographiquement proches. Mais aussi qu'elle présentait ensuite une solution intéressante pour simplifier et optimiser les fonctions et services d'un réseau. Cette optimisation se fait à travers une bonne utilisation des chefs de cluster. Mais ces chefs de clusters, en fonction de leurs caractéristiques, doivent avoir des limites dans leur gestion sous peine de tomber dans les problèmes classique de réseau (saturation, gouleau d'étranglement, mauvaise répartition de charges etc.). Pour apporter une réponse à ces questions, nous parlerons de la gestion des fenêtres de transmission dans la section 5.5.

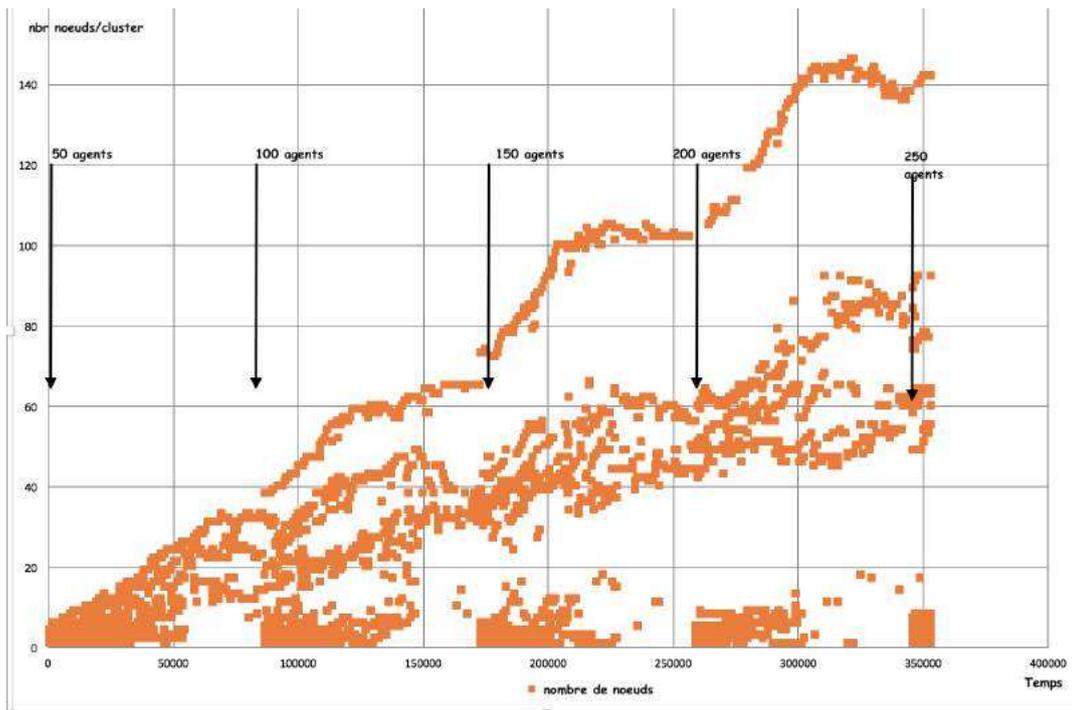


Figure 5.5: le nombre moyen de nœuds gérés par un chef de cluster

- Le nombre de cluster diminue au cours du temps. Au moment de l'injection des nœuds dans la simulation le nombre de cluster est supérieur à celui que l'on a après quelques cycles et ce scénario se répète à chaque injection de nœuds (100, 150...). Dans la construction du modèle nous avons clairement dit que la position initiale des nœuds est aléatoire. Mais ces derniers se déplacent ensuite vers un centre d'intérêt. Le constat est qu'au début nous avons des nœuds éparpillés sur la carte et au fil du temps des couloirs se créent (des routes, des trajectoires privilégiées, des points de concentration etc.). Ces couloirs continuent malgré tout à se créer en fonction de la position des centres d'intérêts qu'ils soient proches ou éloignés.
- Taille moyenne d'un cluster : le nombre moyen de nœuds gérés par un chef de cluster. Nous avons dans la Figure 5.5 en abscisse le temps et en ordonnée le nombre de nœuds par cluster en moyenne. Cette courbe peut être analysée en gardant un œil sur la Figure 5.4. Le nombre de nœuds par cluster est mis en fonction du nombre de cluster et du nombre d'agents. On constate rapidement quelques éléments :
 - Moins il y a de clusters, plus il y a de nœuds par clusters. Nous avons noté dans la courbe des clusters que le nombre de clusters diminue en fonction du temps depuis l'injection de nouveaux agents. Dans cette courbe, la moyenne de nœuds par cluster augmente au cours du temps.
 - Nous n'avons pas, dans cette courbe, différencié les résultats comme dans le premier résultat. En effet, Le nombre de nœuds en moyenne par cluster au niveau du K-means est pareil à celui sur notre algorithme. Cela s'explique par le fait que le nombre de clusters était proche dans la majorité des cas.

Table 5.1: Nombre de noeuds par cluster

Nombre Agents	Nombre de clusters	Nombre de noeuds par cluster	Nombre de noeuds par centroïdes
50	15 – 4	8, 71	9, 2
100	15 – 4	22, 08	23, 1
150	15 – 4	37, 8	39
200	15 – 4	50, 54	51, 22

-Le tableau 5.1 montre la comparaison entre le nombre de noeuds par cluster et le nombre de noeuds par centroïdes. On voit que les valeurs moyennes sont proches.

- la somme des distances entre les nœuds et leurs chef de clusters :

La deuxième phase de l'analyse est liée à la complexité des algorithmes : Complexité en temps pour un changement de topologie qui représente le temps passé pour accomplir une réorganisation valide des clusters après un changement dans la topologie du réseau. Dans notre cas, les noeuds sont en constante mobilité. De ce fait, d'une mise à jour de localisation à une autre, la topologie est capable de changer. Les règles qui régissent notre clustering ne sont pas complexes, donc un changement de topologie est réglé en une mise à jour de localisation. C'est-à-dire la réorganisation des clusters ne dure que le temps d'une mise à jour de localisation dans le réseau.

La troisième et dernière phase est liée à stabilité de la structure des clusters. Cette partie sera analysée sous différents angles, à un moment où les noeuds sont dispersés, et à un moment où les noeuds suivent les couloirs et chemins préférentiels.

- Durée moyenne de vie d'un chef de cluster : la durée moyenne pendant laquelle un nœud joue le rôle de chef de cluster. Le choix d'un chef de cluster est fait en fonction du nombre de voisins des noeuds et de leurs identifiants. La zone d'étude de notre simulation étant très large avec une densité de population faible, les distances deviennent de suite très grande entre les noeuds. Cela fait que lorsque les noeuds sont dispersés en début de simulation, le comportement des noeuds lié aux changements de chef de cluster n'est pas le même que lorsqu'ils se retrouvent dans une zone à forte densité. En effet, un noeud peut garder son statut de chef de cluster plus longtemps dans le premier cas. De base, un noeud, une fois élu chef de cluster, garde son statut au minimum le temps d'une mise à jour de localisation (15mn dans notre cas). Une fois élu, rencontrer un nouveau noeud perturbant la structure du cluster et ayant un identifiant inférieur à celui ci peut prendre du temps. En moyenne, les noeuds vont jusqu'à 4 cycles sans changer leur statut et sans apporter de nombreux changements dans les membres du cluster. En situation de forte densité, la moyenne est de 2 à 3 cycles. Et un changement de chef de cluster peut apporter des modifications importantes sur les membres du cluster.
- Durée moyenne de vie d'un noeud simple : la durée moyenne pendant laquelle un nœud est associé à son chef de cluster. Le résultat sur la durée de vie des chefs de

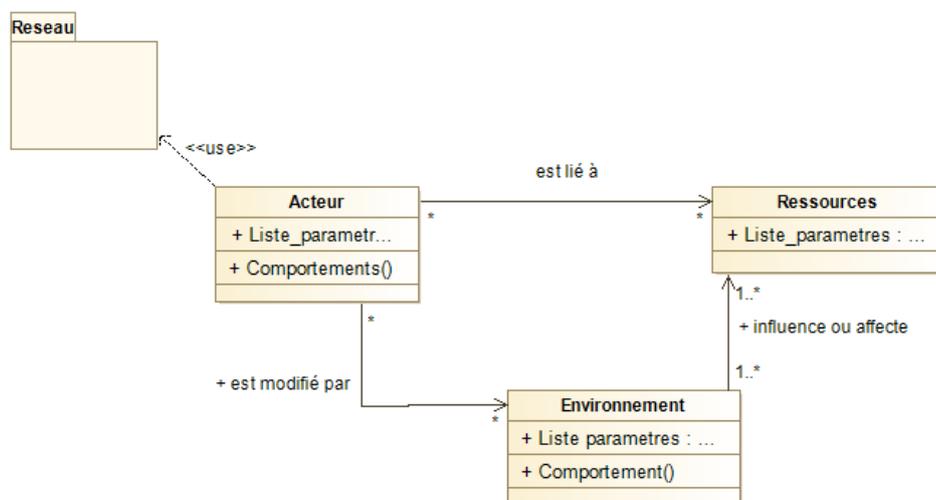


Figure 5.6: Diagramme de classes du modèle d'intégration

cluster affecte directement la durée de vie des noeud simples. Un membre de cluster a une durée de vie variable selon les contextes. Mais le premier constat fait est qu'il est fréquent de voir un noeud simple changer de statut pour devenir une passerelle. Mais ce changement est fréquent en zone de forte densité. Lorsqu'un changement de chef de cluster se produit, la majorité des noeud simples qui changent de statut deviennent des passerelles et les passerelles se retrouvent dans la situation de chef de cluster. La durée de vie d'un noeud simple est de 3 cycles en moyenne en zone de faible densité, mais est supérieur en zone de forte densité (5 cycles).

5.5 Intégration environnement pastoral ou marin

L'objectif de cette partie est d'intégrer notre modèle de communication à un environnement pastoral ou marin en procédant à un couplage de modèle. De façon générale, le terme "couplage de modèles" est utilisé lorsque l'on fait interagir au moins deux modèles qui peuvent par ailleurs fonctionner de façon indépendante. "Modèle" est un terme générique qui recouvre différentes notions. Par modèle, on désigne toute représentation qui permet de décrire un système dans un formalisme donné afin de mieux comprendre une réalité de départ. En sciences humaines, le formalisme utilisé est très souvent le langage (langue écrite ou parlée) mais les sciences proposent en général des formalismes spécifiques et l'on trouve des modèles mathématiques, des modèles physiques, des modèles biologiques, etc. Ces modèles peuvent être traduits en langage informatique et l'on conservera le terme de modèle pour les logiciels créés qui les mettent en œuvre. Parmi les différents formalismes permettant de spécifier un problème, les méthodes mathématiques s'inscrivent dans la logique "poser le problème c'est le résoudre" alors que les méthodes de simulation sont utilisées lorsque la complexité du problème nécessite la prise en compte d'aspects que n'autorise pas la spécification mathématique, généralement selon une approche systémique. Les modèles de simulation n'excluent cependant pas la spécification par un formalisme

mathématique d'une partie du système. Par exemple, on peut utiliser des formules mathématiques pour spécifier des règles de conservation et d'équilibre, ou pour calculer une valeur objectif évaluée par le modèle de simulation. Il s'agit là d'une forme de couplage [33].

Une démarche de couplage est généralement adoptée lorsque l'on se trouve dans l'un des deux cas suivants :

-Il peut arriver que le problème à modéliser nécessite la prise en compte de plusieurs niveaux de détails (lorsque le processus étudié est actif sur une région très hétérogène, par exemple) et que le meilleur modèle approchant le système est une association de différents modèles existant déjà. Dans cette démarche de couplage, l'objectif est de coupler différents modèles de processus chargés de résoudre la même question avec des niveaux de détails différents.

-La démarche de couplage peut également être envisagée lorsque la question à laquelle on souhaite répondre est une question globale ou complexe (le processus que l'on veut étudier est la résultante d'un enchevêtrement de processus) dont les différentes composantes ont fait l'objet de modèles spécialisés que l'on souhaite faire coopérer dans un modèle qui les intègre. C'est en général le problème posé par les recherches pluridisciplinaires. La question du climat (comme en général les questions écologiques) est un exemple où une prédiction nécessite la prise en compte de différents domaines de savoir correspondant à des échelles d'espace et de temps différentes.

De façon classique, la compréhension d'un problème passe par la construction d'un modèle représentant ses caractéristiques principales.

Le couplage de modèles est une démarche a priori séduisante : elle vise à réutiliser et valoriser des connaissances déjà validées, en espérant à la fois un moindre risque d'erreur et une construction plus rapide du modèle de simulation. C'est pourquoi le couplage de modèles est une problématique que l'on rencontre à la fois dans les milieux industriels (où la rapidité de conception de nouveaux produits est une question importante) et dans les milieux de recherche où l'on doit traiter des questions de plus en plus complexes. Les prévisions climatiques, la prévision de risques environnementaux ou la simulation des mécanismes urbains sont des exemples de domaines où le couplage de modèles est une problématique d'actualité [18].

L'intégration de notre modèle dans un environnement pastoral ou marin revient à un travail qui nous mène d'abord à identifier des cas à étudier dans ce milieu, puis à construire ou réutiliser des modèles existants pour ces cas. Ensuite il faudra combiner ces modèles afin qu'ils puissent interagir en tenant compte de toutes les contraintes (temporelles, spatiales etc.).

La Figure 5.6 montre le diagramme de classe du modèle d'intégration. Elle met en évidence un acteur (pasteur ou marin), dans son environnement avec les ressources qui l'entourent. L'acteur a des relations particulières avec la ressource et l'environnement, et ce dernier affecte ou a une influence sur les ressources. Mieux, cet acteur a une relation avec une classe appelée réseau qui représente le réseau de communication auquel il fait appel pour des besoins d'échange d'informations.

Nous avons donc deux modèles en interaction à travers l'agent acteur. Nous devons donc nous poser des questions comme "que doivent représenter chacun des modèles ?", "comment interagissent les modèles ?", "comment est représenté un même objet dans les

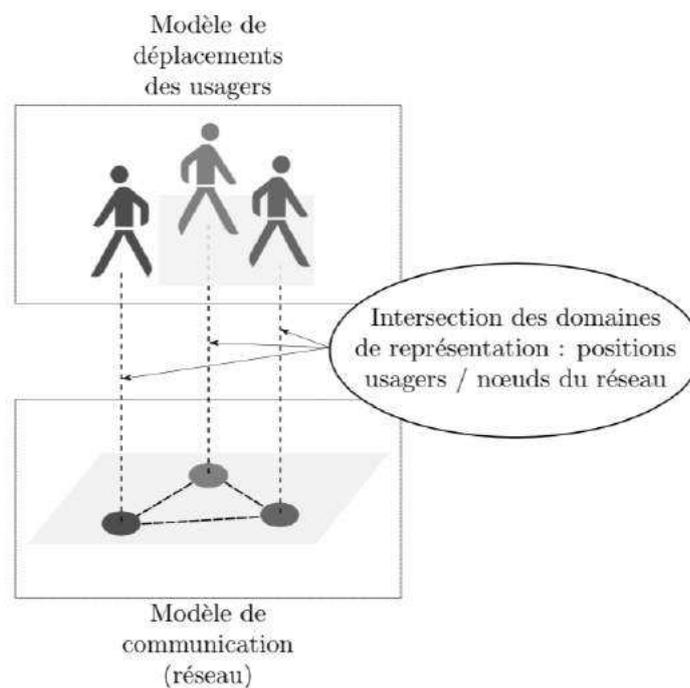


Figure 5.7: Exemple d'intersection de domaines de représentation de différents modèles

différents modèles ?" ou encore "que signifie passer d'un niveau d'abstraction à un autre ?". D'une manière générale, le couplage doit répondre à une question sur le phénomène étudié. Nous ne concevons donc pas seulement un modèle pour répondre à une question sur le système mais nous couplons un ensemble de modèles à cette fin. Il faut dès lors définir un schéma d'interaction entre les modèles puis définir ce que signifient chacune des flèches dans ce graphe comme le montre la Figure 5.6. Ensuite, il faut faire en sorte que l'ensemble des objets et phénomènes représentés dans chacun des modèles s'accordent afin que le résultat final soit cohérent d'un point de vue sémantique, syntaxique, technique, dynamique et conceptuel.

L'exemple de la Figure 5.7 d'après [73] illustre le couplage d'un réseau mobile représenté par un modèle de déplacement des usagers (en haut) et un modèle de réseau (en bas). Ces deux modèles partagent une information commune (on dit que leurs domaines d'abstraction s'intersectent). En effet, la position spatio-temporelle des usagers correspond à la position des nœuds du réseau.

Sachant que les modèles sont peut-être représentés à des échelles spatio-temporelles différentes, nous devons définir comment l'information d'un modèle doit être perçue par un autre. Par exemple, la qualité de service du réseau au cours du temps dépend notamment d'un certain nombre de messages qui sont relativement rapides et fréquents (de l'ordre de la milliseconde). Si l'on souhaite modéliser des utilisateurs qui perçoivent la qualité de services et qui modifient leurs comportements en fonction de celle-ci, l'échelle temporelle ne sera pas la même (de l'ordre de la minute ou de l'heure) car un comportement humain n'évolue pas aussi rapidement et fréquemment. Il faut représenter la qualité de service

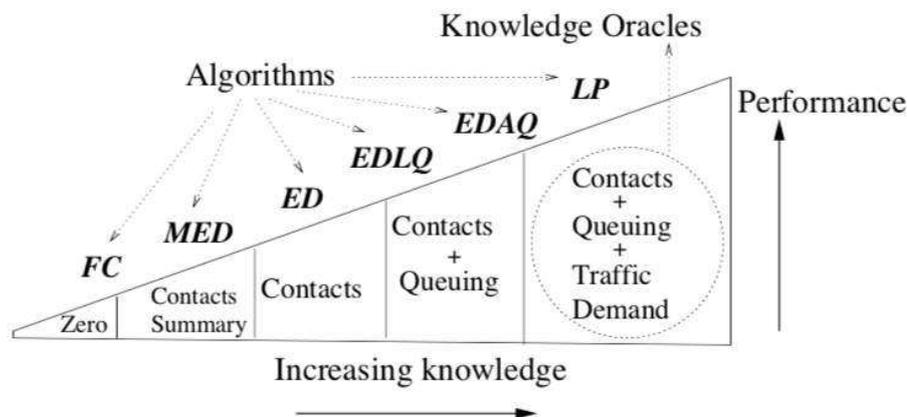


Figure 5.8: La performance en fonction du niveau de connaissance du réseau.

perçue pour un usager, par exemple le nombre de messages d'erreur survenus dans les 10 dernières minutes [73].

Nous aurons la même démarche dans notre travail. Dans nos deux modèles, le noeud et l'acteur forment une même entité, mais ont des tâches qui s'effectuent sur des temps avec des ordres de grandeur très différents (millisecondes et minutes voire heures). Un acteur qui souhaite faire une communication devra se servir du noeud qui se repère dans son environnement. Une synchronisation des deux est nécessaire. Dans l'étude des cas d'applications nous décrirons les modèles choisis et le type de contraintes rencontrés pour le couplage.

5.5.1 Routage

Nous avons parlé de communication dans la section précédente. La communication dans ce sens ne saurait se limiter à des échanges point à point. En effet, dans les interconnexions de réseaux actuelles, l'usage des applications de groupe se généralise. Ces applications requièrent du réseau un service de diffusion extensible à grande échelle. Des protocoles de routage sont ainsi nécessaires pour permettre l'acheminement de ces flux de données vers des groupes d'utilisateurs qui peuvent être largement répartis dans le réseau. Cela nous montre qu'il est donc indispensable de penser à la problématique du routage de l'information.

Nous faisons donc face au problème de routage dans un réseau tolérant aux délais, où les messages doivent être déplacés de bout en bout sur un graphe de connectivité qui varie dans le temps mais dont la dynamique ne peut être connue à l'avance. À ce problème s'ajoutent les contraintes de tampons finis à chaque nœud et la propriété générale qu'aucun chemin de bout en bout ne peut jamais exister. Cette situation limite l'applicabilité des approches de routage traditionnelles qui ont tendance à traiter les absences de routes comme des échecs et cherchent toujours à trouver un chemin de bout en bout existant.

Dans ce travail, il faudrait comparer les performances des algorithmes en fonction de la quantité de connaissances dont ils ont besoin sur la topologie pour proposer un

Abbr.	Name	Description	Oracles Used
FC	First Contact	Use any available contact	None
MED	Minimum Expected Delay	Dijkstra with time-invariant edge costs based on average edge waiting time	Contacts Summary
ED	Earliest Delivery	Modified Dijkstra with time-varying cost function based on waiting time	Contacts
EDLQ	Earliest Delivery with Local Queue	ED with cost function incorporating local queuing	Contacts
EDAQ	Earliest Delivery with All Queue	ED with cost function incorporating queuing information at all nodes and using reservations	Contacts and Queuing
LP	Linear Program	-	Contacts, Queuing and Traffic

Figure 5.9: Tableau récapitulatif des algorithmes proposés

bon routage. La Figure 5.8 d'après [41] montre la performance en fonction du niveau de connaissance du réseau. L'axe des "x" représente le niveau de connaissances (augmentant dans le sens positif). L'axe des "y" représente les performances attendues qui peuvent être obtenues en utilisant un certain niveau de connaissances. La figure montre que plus de connaissances sont nécessaires pour atteindre de meilleures performances. Les étiquettes en haut montrent les algorithmes développés dans cet article [41] en utilisant les oracles correspondants.

L'auteur a aussi proposé un tableau récapitulatif des algorithmes proposés que nous montrons dans la Figure 5.9. Tous les algorithmes basés sur Dijkstra intègrent une fonction de coût sensible aux délais de transmission. Les coûts sont déterminés en consultant les oracles respectifs.

Dans nos travaux, nous n'intégrerons ni ne proposerons d'algorithme de routage car cela constitue une des perspectives du travail. Nous partirons sur des diffusions d'informations à travers les chefs de clusters et les passerelles. Nos cas d'études se concentreront sur des scénarios où la diffusion d'informations sera privilégiée par rapport aux communications point à point. Les chefs de cluster et les passerelles se chargeront de partager la diffusion et nous observerons le taux de cibles atteintes par rapport au total.

5.5.2 Gestion des Fenêtres de transmission

Les résultats présentés dans la section 5.4.3 ont montré que le nombre de clusters dans nos simulations atteignait une valeur maximale à partir d'une densité donnée de noeuds. Cela met en lumière une observation : si le nombre de noeuds augmente mais que le nombre de clusters n'augmente pas, c'est que le nombre de noeuds par cluster augmente. Ce qui nous mène à la question suivante : au bout de quel nombre de noeuds par cluster atteindrons-nous une situation de saturation dans le cluster?

Nous avons parlé de backoff sans parler de la gestion des collisions dans le réseau. Le principe du backoff qui est utilisé dans la méthode CSMA (en français : accès multiple avec écoute de la porteuse) est une méthode de base qui contrôle la communication de plusieurs participants sur un support de transmission partagé et décentralisé. Cependant, il est désormais disponible en trois variantes différentes, qui dépendent du support de transmission. Alors que CSMA/CA est principalement utilisé dans les réseaux sans fil, CSMA/CD est développé pour le réseau Ethernet, et CSMA/CR est utilisé dans les réseaux

CAN (Controller Area Networks) qui sont principalement utilisés dans de nombreuses industries, notamment l'automobile [68].

Pour comprendre exactement ce qu'est le Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, il est important d'examiner les composants individuels :

-Carrier Sense (CA) : l'idée est que les participants ne peuvent envoyer des données via le réseau que si le support de transmission est libre. Le support de détection d'état vérifie donc le canal à tout moment. Les données ne sont pas envoyées tant que le canal n'est pas disponible.

-Multiple Access (MA) : plusieurs stations partagent un même support de transmission. Pour que la communication soit efficace, il est essentiel qu'elles adhèrent à un protocole contraignant.

-Collision Avoidance (CA) : un plan de structure complexe tente de s'assurer que deux participants ou plus ne démarrent pas une transmission en même temps. Cela permet donc d'éviter les collisions. S'il se produit néanmoins des chevauchements, ceux-ci sont détectés et la transmission est alors réessayée [68].

L'idée de base de CSMA/CA repose sur le principe de « Listen before Talking ». Ce qui signifie qu'il faut d'abord vérifier si le service est libre (« idle ») avant que la station puisse commencer une transmission. Mais ce n'est que la première étape. D'autres fonctions au sein du processus garantissent dans une large mesure l'évitement des collisions.

L'algorithme de backoff est utilisé dans le CSMA pour résoudre le problème de l'accès au support lorsque plusieurs stations veulent transmettre des données en même temps. Initialement, une station calcule la valeur d'un temporisateur= timer backoff, compris entre 0 et une valeur CW qui peut être fixé à 7. Lorsque le support est libre, les stations décrémentent leurs temporisateurs jusqu'à ce que le support soit occupé ou que le temporisateur atteigne la valeur 0.

-Si le temporisateur n'a pas atteint la valeur 0 et que le support est de nouveau occupé, la station bloque le temporisateur.

-Dès que le temporisateur atteint 0, la station transmet sa trame.

-Si 2 ou plusieurs stations atteignent la valeur 0 au même instant, une collision se produit et chaque station doit régénérer un nouveau temporisateur, compris entre 0 et 15.

-Pour chaque tentative de transmission, le temporisateur croît de la façon suivante : $[2^{2+1} * \text{randf}()] * \text{timeslot}$.

Le backoff est donc utilisé comme un intervalle de temps d'attente pour chaque noeud déterminé par un numéro aléatoire qui est décrémenté par un temporisateur.

Dans notre contexte, pour répondre à la problématique des fenêtres de transmission et de contention, nous avons pensé à proposer une solution qui s'appuie sur la logique des CSMA mais en y incluant un certain nombre de contraintes.

Il nous faut d'abord déterminer le temps que prend une mise à jour de localisation pour un noeud et en déduire le temps que cela prendrait pour un cluster entier. Pour cela il faut connaître le temps de propagation d'un signal LoRa pour donner le temps d'occupation du canal par un noeud.

Dans [57], The things Network propose un calculateur de "time on air" pour LoRa en fonction des configurations (taille du payload, facteur d'étalement, largeur de canal). Ce calculateur donne le temps d'occupation du canal du signal.

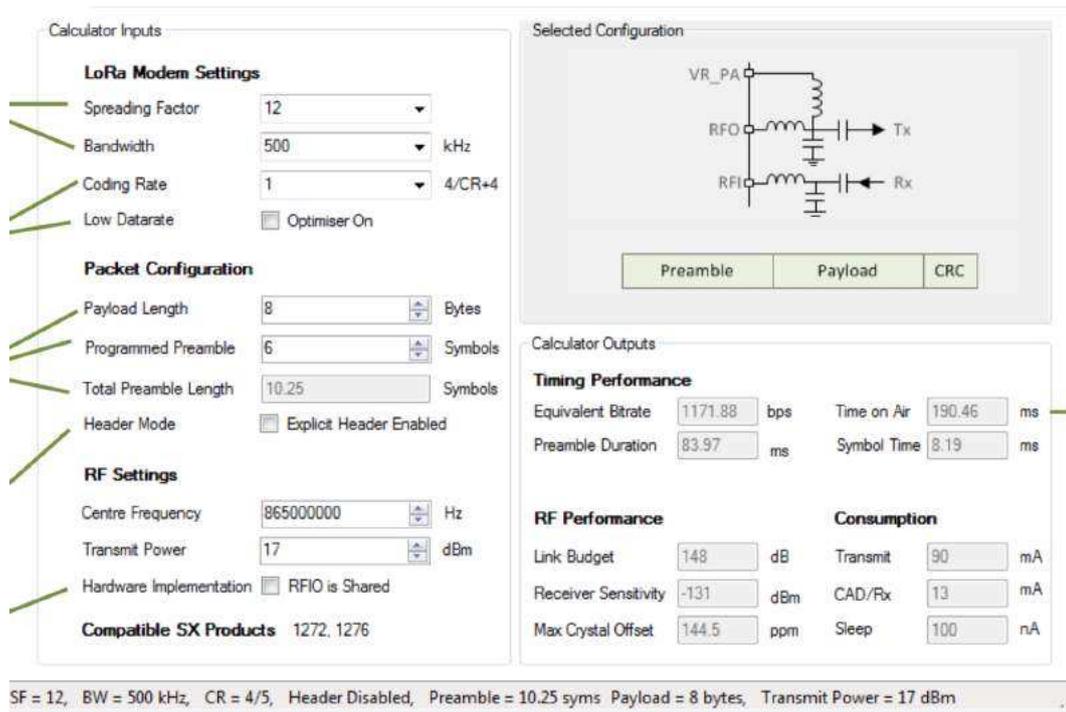


Figure 5.10: Calculateur de Time on air.)

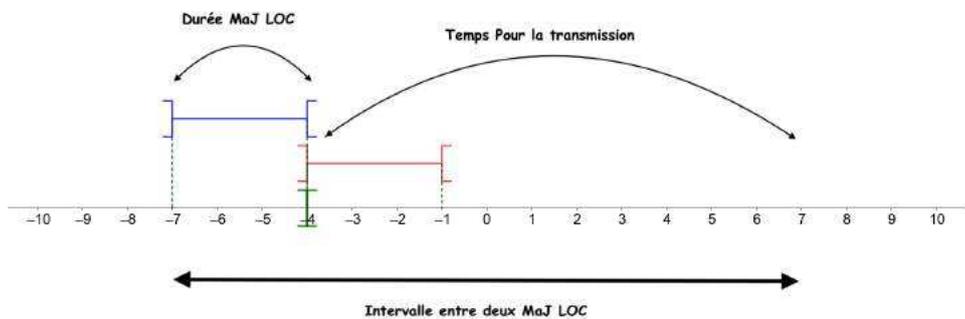


Figure 5.11: Intervalle entre deux mises à jour de localisation

La Bibliothèque sx1276 [69] de Semtech propose des Mode de transmission avec des "time on air" qui diffèrent. La Figure 5.10 montre le calculateur de SEMTECH.

Pour le calcul du "time on air", il est pratique de définir la durée symbole (T_{sym}). C'est le temps nécessaire pour envoyer 2^{SF} chips au débit chip donc, en rappelant que la bande passante définit le débit chip, il est donné par :

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5.3)$$

SF signifie "spreading factor" ou facteur d'étalement, BW représente la bande passante. On remarque que plus le spreading factor est grand plus le temps symbole est long et plus la bande passante est petite plus le temps symbole est long. Cela explique qu'avec une grande portée (SF 12, BW=125 khz) nous aurons le temps symbole le plus long possible.

Nous sommes donc appelés à penser à une stratégie quant aux choix des chefs de cluster concernant les métriques de transmission dans leurs clusters.

En effet, deux choix sont possibles :

- Avoir de grand clusters avec des noeuds ayant des portées maximales (SF max, BW min) mais avec un temps de propagation supérieure et donc des fenêtres de transmission plus longues (Tsym max). Ce qui obligerait à réduire le nombre de noeud.
- Avoir des clusters avec des tailles moyennes (SF min, BW min) avec plus de noeuds et donc des fenêtres de transmission plus courtes (Tsym min). Ce qui augmenterait le nombre de clusters et rendrait plus complexe l'interconnexion des noeuds.

Un scénario de test basé sur les résultats obtenus dans la section 5.4.3 est mis en place. Il est défini dans le modèle du chapitre 5 que l'intervalle entre deux mises à jour de localisation dans notre modèle est de 15 minutes. Dans cet intervalle, un temps est utilisé pour la transmission des données et un autre pour la formation de cluster . Ce dernier dépend des variables telles que le nombre de noeuds dans le cluster ou la probabilité de transmission [55]. L'objectif est de le rendre le plus court possible en gardant une forte probabilité de succès dans les transmissions. Ainsi, il pourra être réutilisé pour la transmission de données en gardant les mêmes backoff pour chaque noeud.

La Figure 5.11 montre en exemple un intervalle entre deux mises à jour de localisation.

Dans ce schéma, la formation de cluster représente $\frac{3}{14}$ du temps total. Mais ce n'est qu'à titre d'exemple. Notre travail dans cette partie consiste à déterminer ce temps en fonction du nombre de noeuds, de la probabilité de réussite et de la configuration de l'émetteur dans le canal. En effet, on a vu qu'avec LoRa, les métriques d'émission (le facteur d'étalement, la largeur du canal) jouent un rôle sur le temps d'occupation du canal.

-Dans notre environnement de simulation il y a une population qui augmente en fonction des résultats du tableau 5.1. La population a été incrémenté jusqu'à 100 noeuds pour pousser les tests.

-L'instant de transmission a été pris comme seul élément pour déterminer une collision de transmission. En effet, l'instant de transmission n'est pas en réalité le seul élément suffisant pour déterminer une collision car le choix d'un canal et d'un facteur d'étalement différents peut éviter une collision lorsque l'instant de transmission de deux noeuds est le même [42].

-Les temps d'occupation du canal par noeud en fonction du facteur d'étalement et de la largeur du canal ont été considérés en utilisant le calculateur sur [57]. Trois cas ont été choisis : des compromis entre temps temps d'occupation du canal et portée de transmission.

-Chaque noeud tire un backoff et son temps d'occupation lui est ajouté. Si deux noeuds tirent le même backoff une collision se produit. Si deux noeuds tirent des backoff suffisa-

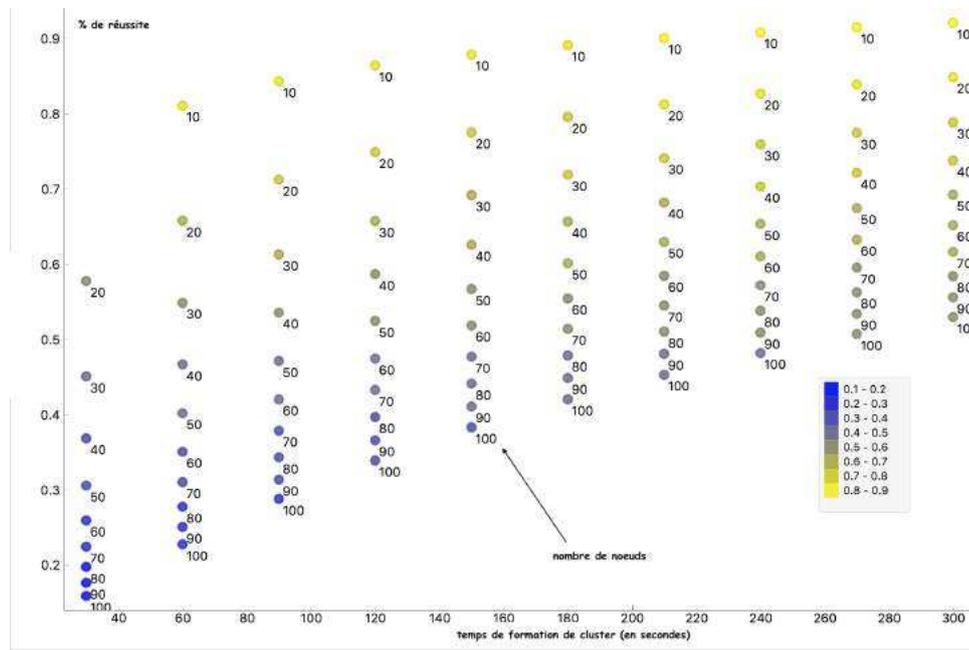


Figure 5.12: Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster (temps d'occupation du canal : 2000ms).

ment proches pour que leurs occupations de canal se chevauchent, une collision se produit également.

-Ce scénario est répété 500 fois pour chaque simulation. En effet, au-delà de 500 itérations, les résultats ne varient plus. Pour chaque simulation, le pourcentage de transmissions réussies sur un intervalle de temps donné est sorti. Pour chaque population ce test est fait sur des intervalles de 30s jusqu'à 300s, par pas de 30s.

La Figure 5.12, la Figure 5.13, et la Figure 5.14 montrent le pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster.

Ces résultats montrent quelques éléments :

- Plus la population augmente, plus le pourcentage de succès diminue pour un temps de formation de cluster fixé.
- Plus le temps de formation de cluster augmente, plus le pourcentage de succès augmente pour une population fixée.
- Pour une même population avec un temps de formation de cluster fixé, plus le temps d'occupation de canal augmente plus le pourcentage de succès diminue.
- Les remarques ci-dessus nous permettent de dire qu'en situation de forte densité, utiliser un facteur d'étalement faible est la meilleure solution. En effet, cela induit un temps d'occupation du canal plus petit et permet de meilleurs résultats.
- En situation de très faible densité, utiliser un facteur d'étalement élevé permet une meilleure utilisation de nos ressources, car nous avons avec cette métrique des résultats qui permettent d'avoir plus de 75% de réussite.

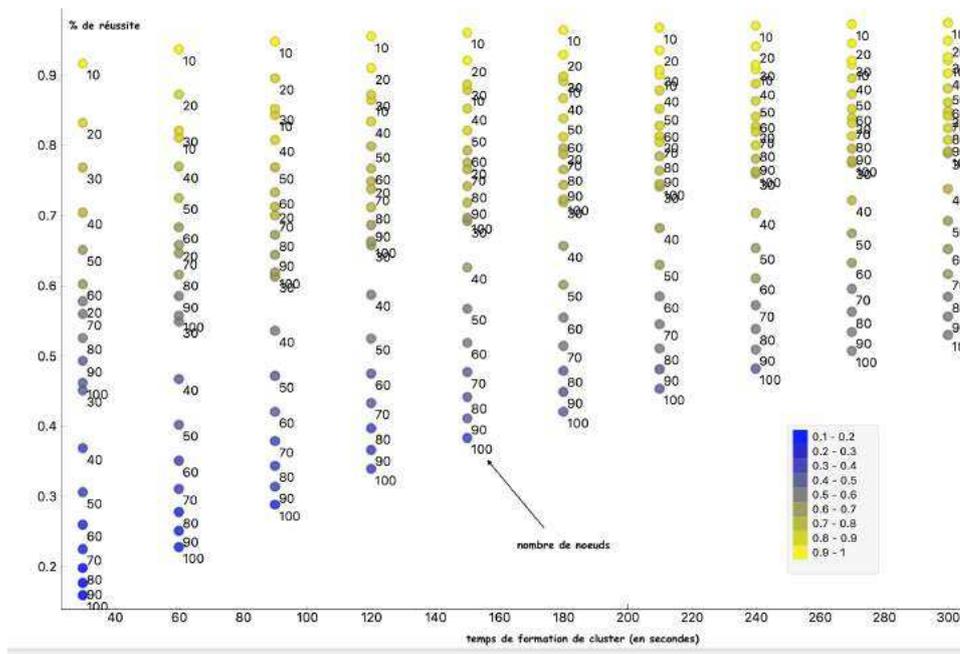


Figure 5.13: Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster (temps d'occupation du canal : 700ms).

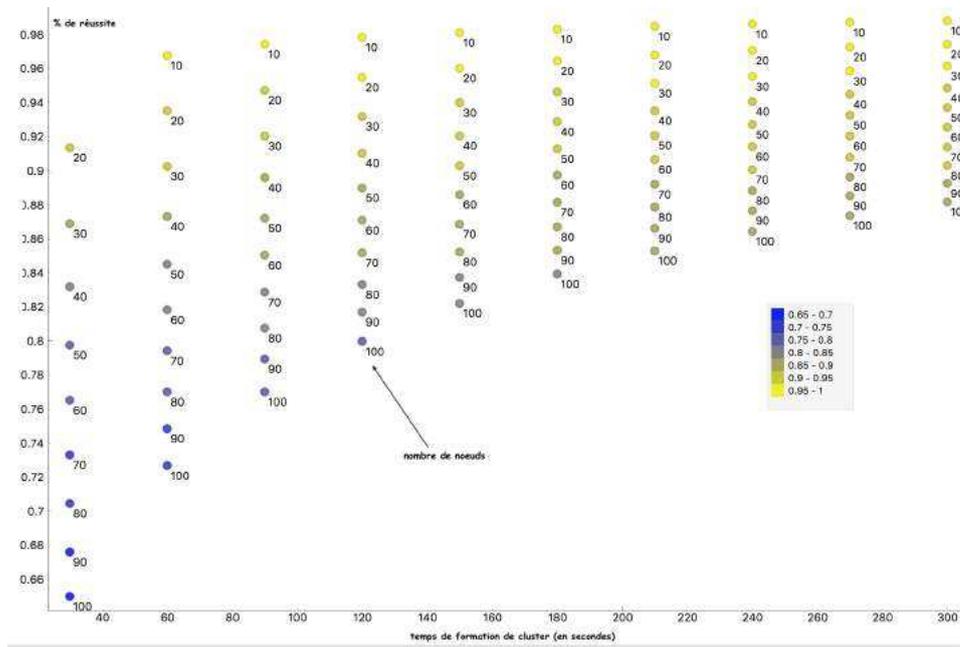


Figure 5.14: Pourcentage de réussite dans la transmission pour une population en fonction du temps de formation de cluster. (temps d'occupation du canal : 300ms)

Ces résultats montrent que le choix des métriques de transmission peuvent être des pistes de réflexion et laissent une autonomie au chef de cluster dans ses choix quant aux règles qui seront appliquées au sein de son cluster.

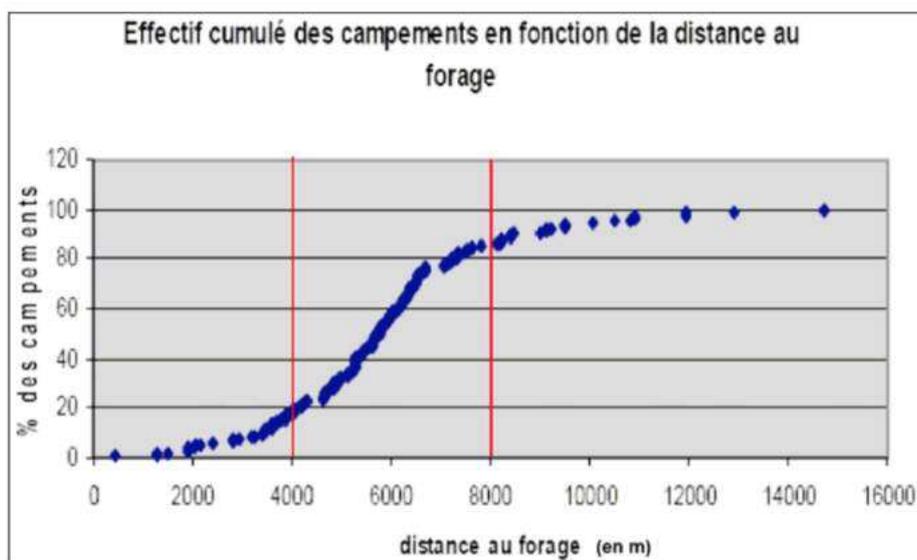


Figure 5.15: Distance des campements par rapport au forage

D'après le travail de [20], on peut observer que même en étant près d'une zone d'intérêt, les campements d'éleveurs se placent plus ou moins loin du forage. La Figure 5.15 montre que 80% des campements se trouvent à plus de 8km du forage. De plus, la Figure 5.16 qui est un carroyage fait par Daniel Cesaro [20] dans la village de Niassante, montre que les densités de campements varient autour du forage. Cela nous conforte dans l'idée de se dire que nos chefs de cluster devront avoir une liberté par rapport aux choix de métriques dans leurs clusters pour s'adapter aux besoins propres du cluster.

5.5.3 Modèle de Gestion de l'espace et des ressources

Dans cette partie est décrit un modèle simple de gestion des ressources en zone pastorale. Ce modèle sera simulé d'abord sans l'adjonction de notre modèle de communication puis nous y ajouterons le modèle de communication. L'objectif sera de comparer les résultats liés à la gestion des ressources d'un pasteur avec et sans la communication.

L'exemple est basé sur un cas d'unité pastorale qui cherche à collecter du lait dans 5 villages de son secteur.

Nous avons vu dans le chapitre 4 le contexte de la collecte de lait qui représente un véritable problème logistique pour les habitants du Ferlo. Les mini-laiteries qui se créent doivent trouver des solutions pour rentabiliser la distance parcourue par les voitures de collecte. Le principal problème qu'elles rencontrent est de savoir si le lait est disponible ou pas dans les lieux de collecte.

Nous prenons un modèle simple qui décrit l'activité d'une laiterie de l'ADENA (Association pour le développement de Namarel et des villages environnants) qui va collecter le lait dans 5 villages pour ensuite le revendre et avoir un bénéfice. La Figure 5.17 montre l'environnement de simulation pour la collecte de lait.

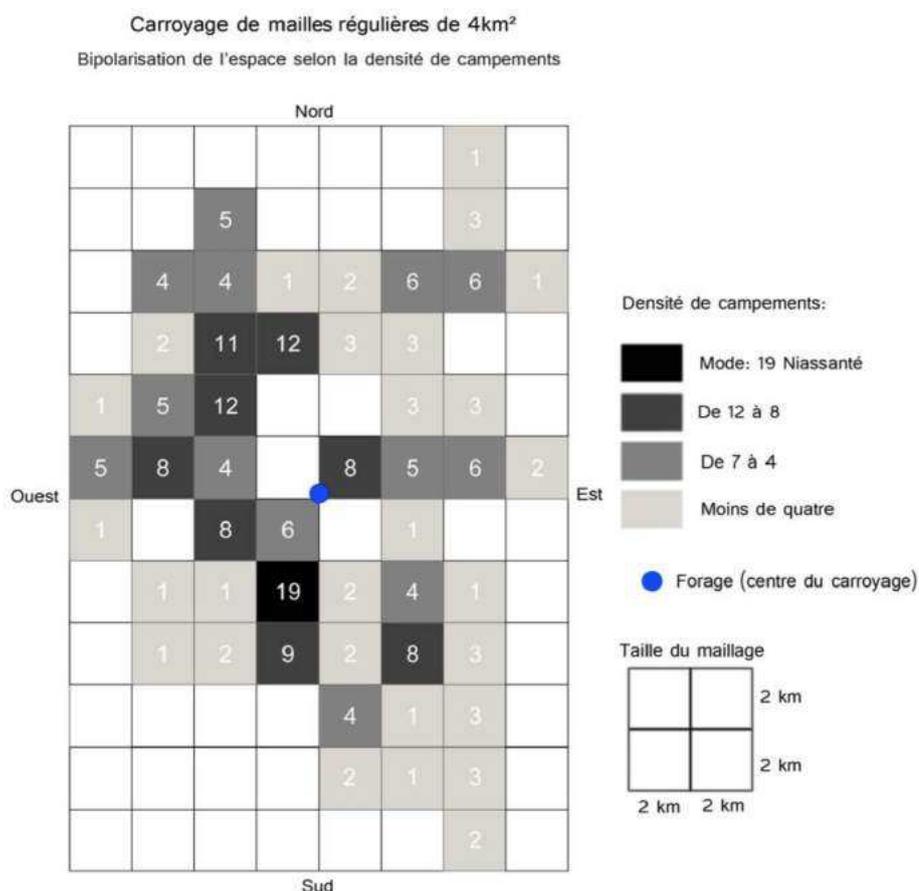


Figure 5.16: Carroyage de mailles de 4km²

Nous prenons en compte la saisonnalité de la ressource. En effet, en saison sèche, la plupart des éleveurs conduisent leur cheptel vers le sud pour faire pâturer leurs bêtes. Peu de vaches restent sur place et le lait est largement autoconsommé. D'après une étude [23], les années 2013 et 2014 ont vu une suspension provisoire de la production de lait de la mini-laiterie d'avril à juillet. Les activités de transformation ont repris au début du mois d'août. Nous avons défini dans le modèle trois saisons avec des niveaux différents de disponibilité de la ressource. Une saison avec une absence totale de lait, une saison où la production reprend timidement et une saison avec de gros rendements.

La collecte se fait quotidiennement. Chaque jour, les producteurs livrent entre 5 et 10 litres de lait. La collecte est un aspect crucial de la filière. La traite des vaches s'effectue très tôt le matin, mais bien souvent, le lait n'est pas transporté tout de suite à la mini-laiterie. Dans les villages éloignés, les producteurs n'effectuent qu'un voyage à Namarel dans la journée. Le lait est parfois laissé 2 à 3 heures dans de mauvaises conditions de conservation[23]. L'unité de collecte choisit le village à collecter au hasard dans le modèle classique. Cependant, avec la communication, elle s'informe au préalable de la quantité de lait disponible et calcule le rendement de la collecte. La collecte rapportera financièrement à la laiterie après vente mais nous lui donnons un coût lié au carburant ou à l'utilisation des ressources disponibles pour récupérer le lait.

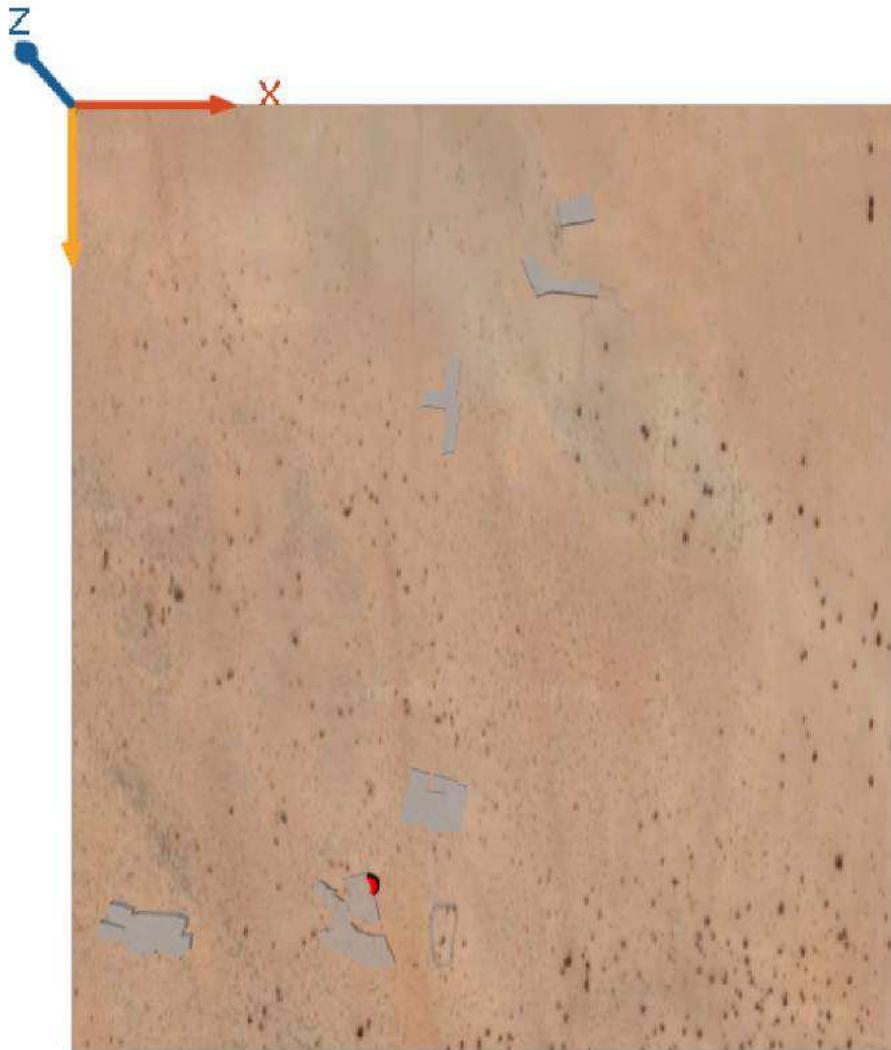


Figure 5.17: Environnement de simulation pour la collecte de lait

Une variable nommée gain calcule le gain obtenu grâce à la vente de lait. Une variable nommée perte calcule les dépenses relatives aux activités de la laiterie et enfin une variable nommée bourse donne la différence des deux premières variables et équivaut au bénéfice de la laiterie. La Figure 5.18 montre la bourse de la laiterie après 10 ans de simulation avec communication et la Figure 5.19 montre la bourse de la laiterie après 10 ans de simulation sans communication.

Les valeurs sur les courbes sont sans unité de monnaie. Les deux simulations ont une bourse de départ à 100.

Les simulations montrent que la bourse de la laiterie avec communication est deux fois supérieure à celle sans communication (3000 et 6000). Les pertes sont à 16.000 avec communication mais à 21.000 sans communication. Cela montre clairement un problème dans la gestion des ressources et certainement beaucoup de voyages en vain. Les gains sont de 22.000 avec communication et 24.000 sans communication. Cela s'explique par le

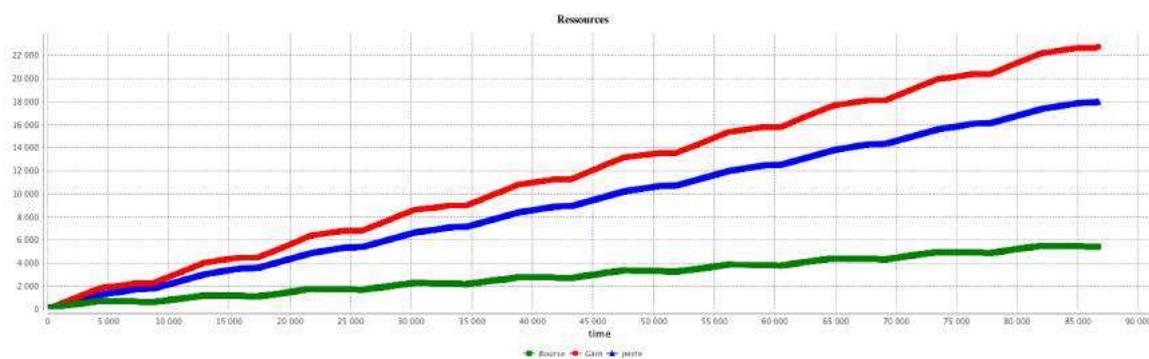


Figure 5.18: Bourse de la laiterie après 10 ans de simulation avec communication

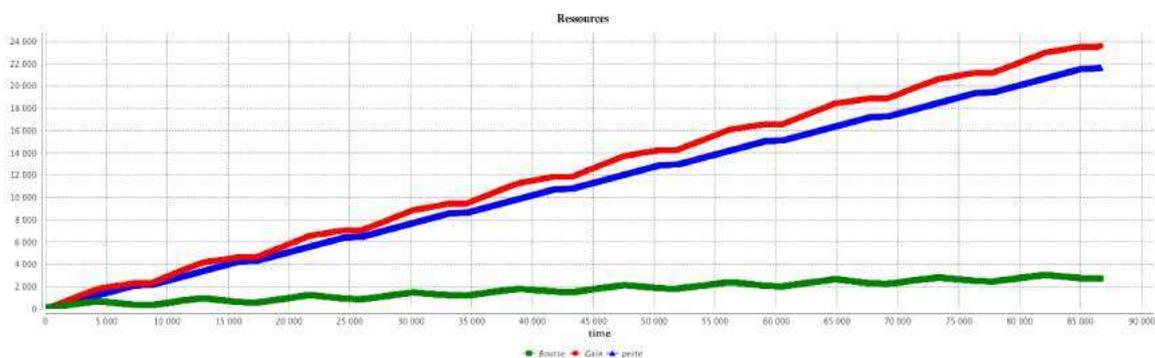


Figure 5.19: Bourse de la laiterie après 10 ans de simulation sans communication

fait que l'objectif du modèle n'était pas de maximiser les gains mais plutôt de minimiser les pertes. Par conséquent, la laiterie, avec communication, ne se déplace que si elle calcule le voyage et se rend compte que la perte engendrée par le voyage sera inférieure au gain.

5.6 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons proposé et décrit un modèle de réseau de communication. Ce modèle permet d'assurer et d'optimiser la disponibilité du canal, la réutilisation des fréquences et un bon acheminement des informations pour assurer les diffusions. Nous avons eu une approche multi-agents dans nos travaux et avons utilisé le protocole ODD pour décrire le travail. Ce modèle a été implémenté sur GAMA (GIS Agent-based Modeling Architecture) est une plateforme de simulation open source avec un environnement de développement intégré (IDE). Le modèle a été évalué selon des métriques précises puis comparé à l'algorithme des K-Means pour tester sa performance. Enfin, en vue de l'intégrer dans un modèle décrivant une activité d'un écosystème marin ou pastoral, nous avons évoqué les questions liées au routage de l'information et la gestion des fenêtres de transmission. Enfin, nous avons intégré notre modèle dans un modèle simple qui

décrit une activité de collecte de lait en des zones blanches pour promouvoir l'utilité de la communication dans ce genre de situations.

6 Conclusion

6.1 Bilan

Dans cette thèse, nous avons travaillé sur l'intégration d'un nouveau modèle de communication entre acteurs dans une architecture de simulation multi-agents. Après un état de l'art sur l'ensemble des concepts liés à l'Internet des Objets, nous avons vu l'architecture type utilisée dans ce concept ainsi que ses composants. Ensuite, nous avons montré les différents outils de communications utilisés et parmi eux les LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Nous avons également défini le principe de réseaux tolérants aux délais, ce qui nous a mené à parler de la notion de réseaux auto-organisables. Ce type de réseaux fait intervenir la clustérisation qui permet d'organiser un réseau afin d'optimiser certaines de ses ressources. Pour finir l'état de l'art, nous avons fait un focus sur les agents et les systèmes multi-agents qui appartiennent à un domaine de l'intelligence artificielle et qui offrent de nombreuses possibilités de description de systèmes dans le domaine des sciences sociales, informatiques et expérimentales.

La première contribution de cette thèse était dans l'évaluation des performances de la technologie LoRa avec des mesures empiriques. Les résultats des mesures ont été utilisés pour proposer un modèle d'atténuation de canal. Nous avons dérivé les pertes de chemin prévues (EPL : Expected Path Loss) des données mesurées à partir de l'ajustement polynomial linéaire. Cela a été possible parce que l'indicateur d'intensité du signal reçu (RSSI : Received Signal Strength Indicator) et le rapport signal sur bruit (SNR : Signal Noise Ratio) reçus de chaque station de base par la station mobile ont été sauvegardés pour calculer la perte de chemin (PL : Path Loss). De plus, le modèle d'atténuation a été utilisé pour faire une estimation de la couverture de chacune des quatre stations de base. Enfin, nous avons proposé un modèle basé sur la couverture.

La deuxième contribution consistait à développer un système de communication peu coûteux et fiable aux personnes vivant dans les zones blanches afin de les aider à communiquer avec leur environnement. Ce système, nommé *COWShED* (Communication Within White Spots for Breeders) permet une communication via des boîtiers relais qui échangent des informations avec le protocole de transmission *LoRa*. Nous présentons également l'architecture de déploiement, les composantes du système et des services principalement basés sur la messagerie texte, la géolocalisation, la messagerie vocale et la collecte de lait.

La troisième contribution propose et décrit un modèle de réseau de communication. Ce modèle permet d'assurer et d'optimiser la disponibilité du canal, la réutilisation des fréquences et un bon acheminement des informations pour assurer les diffusions. Nous avons eu une approche multi-agents dans nos travaux et avons utilisé le protocole ODD pour décrire le travail. Le modèle a été évalué selon des métriques précises puis comparé à l'algorithme des K-Means pour tester sa performance. Enfin, en vue de l'intégrer dans

un modèle décrivant une activité d'un écosystème marin ou pastoral, nous avons évoqué les questions liées au routage de l'information et la gestion des fenêtres de transmission. Nous l'avons enfin intégré dans un modèle simple qui décrit une activité de collecte de lait en zones blanches.

6.2 Discussions et Perspectives

Le modèle GAMETTA présente quelques résultats encourageants qui permettent d'avoir un début de réflexion sur le réseau que nous voulons mettre en place. Cependant, il faudra l'améliorer en intégrant un routage qui sera compatible au contexte. Nous prévoyons aussi de comparer l'algorithme de clustering à d'autres algorithmes qui ont fait leur preuves dans le monde des réseaux auto-organisables. Nous avons aussi comme objectif de tester d'autres cas d'applications en prenant le maximum d'informations sur ces derniers pour avoir un modèle bien plus fournies en données.

En nous basant sur le travail réalisé dans cette thèse, nous pouvons déterminer plusieurs axes sur lesquelles des perspectives de travail méritent d'être trouvées.

L'ajout de services supplémentaires à notre système de communication apparaît comme étant un des principaux objectifs. Ces ajouts sont à la fois sur le plan fonctionnel et structurel. Il est important de prendre en comptes des besoins pratiques des cibles de notre travail et de réfléchir à comment les matérialiser afin qu'elles puissent bénéficier de ces services.

De nombreux sujets restent des problèmes réels dans la zone du Ferlo sur lesquelles les chercheurs essaient de trouver des solutions (la gestion des conflits (concurrence spatiale), la gestion des risques et alertes précoces : impact sur le bétail et le revenu, l'optimisation et gestion de la production et la gestion de l'environnement et l'évaluation de l'écosystème).

Le Modèle GAMMETA présenté dans ce document représente un point de vue de l'architecture que l'on pourrait avoir dans ces zones, mais d'autres approches existent et nous pensons à les exploiter et comparer avec notre approche.

Un projet du nom de SMIRNA (Sustainable Milk and Cereal Production for better Nutrition Performance in Africa) veut utiliser COWSHED comme support pour la communication dans ses activités en zones rurales. En effet, SMIRNA est un projet qui se donne pour objectif de déployer des services dans les zones rurales et notamment faire de la dissémination d'informations. Conscient que le contexte du Ferlo ne facilite pas la dissémination à travers des routes simples, l'objectif est de passer par les réseaux opportunistes.

La Figure 6.1, montre le concept de diffusion de données dans SMIRNA . Fondamentalement, le réseau considère trois types de nœuds : les boîtiers collecteurs fixes (C) qui sont situés aux points d'intérêt tels que les points d'eau, les boîtiers relais fixes (R) qui sont déployés pour améliorer la couverture et relayer les informations et les boîtiers mobiles (M) qui sont portés par les bergers et fournissent une communication opportuniste ainsi qu'un point d'accès pour les smartphones comme interface utilisateur.

Contrairement à GAMETTA, une approche avec des stations fixes est présenté. La figure a dans la Figure 6.1 montre un exemple de fonctionnement à un point d'eau où une boîte collectrice (C) est déployée. Utilisant LoRa, il peut potentiellement collecter des

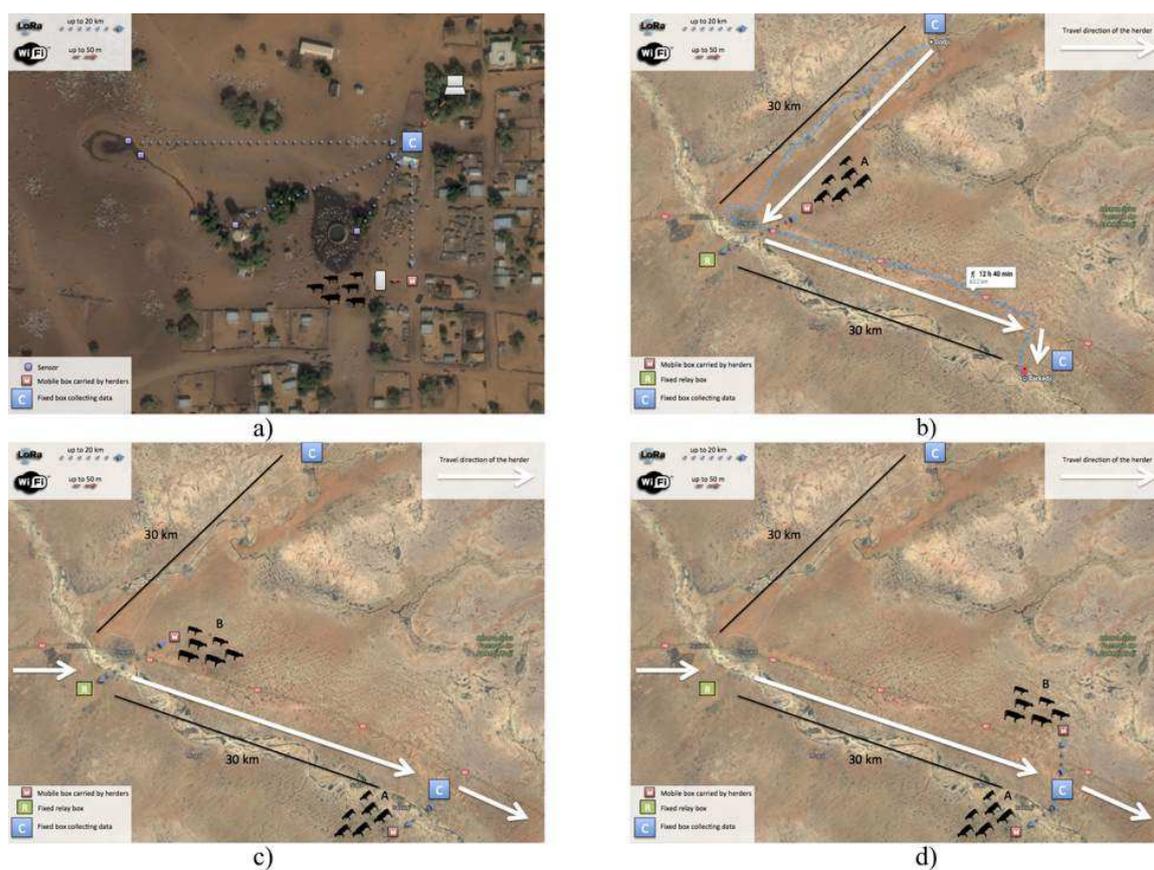


Figure 6.1: Utilisation des principes de réseau opportuniste pour la diffusion de l'information

données à partir de capteurs déployés localement ainsi que diffuser ces données vers le boîtier mobile (M) porté par un éleveur présent au point d'eau. En utilisant le WiFi, un responsable du point d'eau peut se connecter au point d'accès C pour la saisie manuelle de données, tandis que l'éleveur peut utiliser un smartphone pour se connecter à son relais pour accéder aux données et décider de la destination future du troupeau. Les relais mobiles peuvent échanger ces informations avec d'autres relais lors des déplacements sur les couloirs de transhumance comme le montre les figures b-d de la Figure 6.1. Cela peut se produire directement entre les boîtiers mobiles, d'un boîtier mobile à un boîtier collecteur, ou indirectement entre les boîtiers mobiles en stockant l'informations au niveau d'un relais fixe intermédiaire. Ainsi, les informations sont diffusées sur l'ensemble du réseau en utilisant le principe du store-carry-and-forward.

L'ensemble de ces solutions et approches ont pour objectifs de développer de nouveaux systèmes de production pour une agriculture intelligente (ie production de lait, production de céréales, racines et tubercules), qui soient durables, réduisent et optimisent l'utilisation des ressources naturelles (ex. eau, sol), limitent l'utilisation de polluants (ex. pesticides, engrais, antibiotiques), améliorent la qualité de la production et préviennent les risques pour la santé humaine et animale. Les projets existants [7] présentent certaines limites

telles qu'une représentativité limitée des données détectées dans des emplacements très limités, une latence élevée dans la livraison des données, une acceptation limitée par les agriculteurs qui n'ont pas été associés à la conception de la solution.

Le système intelligent proposé est la convergence de l'IoT (Internet des objets) et du cloud computing. Son objectif est de collecter des données provenant de différentes sources pour comprendre, prévoir et mieux organiser l'activité agricole. Grâce à l'IoT, des capteurs sont déployés partout (sol, élevage, culture) pour collecter différents types de données (humidité du sol, santé des cultures, comportement animal) en temps réel. Ces données, stockées dans une plateforme Cloud, sont traitées pour construire une base de connaissances qui accélérera l'innovation, tout en impliquant différents acteurs dans le cadre de l'écosystème agricole.

Bibliographie

- [1] Abbasi and Younis. “A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks”. In: *Computer Communications* 30 (2007) 2826–2841 ().
- [2] Adeyewa and Al. “Validation of TRMM radar rainfall data over major climatic regions in Africa”. In: *Journal of Applied Meteorology* 42 (2003), pp. 331–347.
- [3] A. BOUTET et Al. “Incidence des Technologies de l’Information et de la Communication sur l’intégration terre/mer : le cas des bateaux de pêche maritime et de la vente à la criée.” In: ().
- [4] Arshad et Al. “Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond”. In: *IEEE Access* 5 (2017), pp. 15667–15681. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2686092.
- [5] Sandro Nižetić et Al. “Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future”. In: *Journal of Cleaner Production* 274 (2020), p. 122877. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262032922X>.
- [6] U. Raza et Al. “Low Power Wide Area Networks: A Survey,” in: *arXiv preprint arXiv:1606.07360* (2016).
- [7] . T. Balafoutis et al. “Smart farming technologies – description, taxonomy and economic impact”. In: *Springer* (2017).
- [8] Florea et Al. “Survey of standardized protocols for the Internet of Things”. In: *IEEE 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)* (2017), pp. 190–196.
- [9] G. Werner-Allen et al. “Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano,” in: *IEEE Internet Computing*, vol. 10 (2006). URL: [doi:%2010.1109/MIC.2006.26..](https://doi.org/10.1109/MIC.2006.26)
- [10] S. Kim et al. “Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring,” in: *4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, NY, USA* (2006). URL: [doi:%2010.1145/1182807.1182889](https://doi.org/10.1145/1182807.1182889).
- [11] Ali and Al. “Routing protocols in Delay Tolerant Networks - a survey”. In: (2010), pp. 70–75. DOI: 10.1109/ICET.2010.5638377.
- [12] ANSD. In: (2013). Accessed: 2013-05.
- [13] ANSD. “https://satisfaction.ansd.sn/index.php?option=com_regionsview=regionsItemid=213”. In: ().
- [14] Basagni. “Distributed clustering for ad hoc networks”. In: (). DOI: 10.1109/ISPAN.1999.778957.

- [15] Nabil Benamar and Al. “Routing protocols in Vehicular Delay Tolerant Networks: A comprehensive survey”. In: *Computer Communications* 48 (2014). Opportunistic networks, pp. 141–158. ISSN: 0140-3664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.03.024>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414001212>.
- [16] Benhamid and Al. “Using delay tolerant network for the Internet of Things: Opportunities and challenges”. In: (2017), pp. 252–257. DOI: 10.1109/IACS.2017.7921980.
- [17] E. Berthelsen and J. Morrish. ““Forecasting the internet of things revenue opportunity,”” in: *Machina Research, Tech. Rep.* (2015). URL: <https://machinaresearch.com/report%20pdf/313>.
- [18] Boissier and Al. “Une architecture multi-agents pour des systèmes de visions ouverts et décentralisés . Techniques et Sciences Informatiques”. In: (1997). DOI: 16(8) : 1039-1062.
- [19] Dora Cama-Pinto and AL. “Path Loss Determination Using Linear and Cubic Regression Inside a Classic Tomato Greenhouse”. In: (2019). DOI: 10.3390/ijerph16101744.
- [20] Jean-Daniel Cesaro. “Mobilité pastorale et accès aux marchés: Le cas des éleveurs du forage de Niassanté”. In: ().
- [21] Jean-Daniel Cesaro and Al. “Atlas de l’élevage au Sénégal, Commerce et territoires”. In: (). DOI: ISBN:2-901560-78-4.
- [22] Chen and Liestman. “Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks”. In: (2002). URL: <https://doi.org/10.1145/513800.513821>.
- [23] Mamadou Cissé. “Coordinateur au Sénégal de l’ONG italienne CISV. AU SÉNÉGAL LE LAIT DU FERLO DÉFERLE SUR DAKAR”. In: ().
- [24] E. C Commitee. “E. C. Committee and Others, ERC Recommendation 70-03, ed. Tromso”. In: (2016). Accessed: 2016-10.
- [25] Dawaliby and Al. “In depth performance evaluation of LTE-M for M2M communications”. In: (2016), pp. 1–8. DOI: 10.1109/WiMOB.2016.7763264.
- [26] Association pour le Developpement de Namarel. In: (). URL: <http://www.fao.org/pastoralist-knowledge-hub/pastoralist-networks/database-of-organization/details/en/c/980012/>.
- [27] Bassirou Kasse Moussa Diallo and Bamba Gueye. “Leveraging GPS and SMS-Based Bus Tracking Architecture for an Efficient Transportation”. In: *INTERSOL* (2017).
- [28] Abdoulaye Diarra and Al. “International Trade and Development of dairy farming in Senegal. A comparative study of three economic policy simulations”. In: (2013). DOI: 10.4000/economierurale.3936.
- [29] Dragino. “Dragino Technology”. In: (2017). Accessed: 2017-05.
- [30] EPL. “P. Heino et al.” In: (2015). Deliverable D5.3, WINNER+ Final Channel Models V1.0, CELTIC CP5–026 WINNER+ Project.

-
- [31] ETSI. “F. C. Commission FCC Part 15 Radio Frequency Devices, Code of Federal Regulation 47 CFR Ch. 1”. In: (2008). Federal Regulation: 10-1-15 Edition.
- [32] Senegal export. “La pêche et les ressources halieutiques au Sénégal”. In: (2016). Accessed: 2016-10.
- [33] Yawa Edern FIANYO. “Couplage de modèles à l’aide d’agents: le système OSIRIS”. In: ().
- [34] Grimm and Hal. “A standard protocol for describing individual-based and agent-based models”. In: *Ecological modelling* 2006 (). DOI: doi : 10 . 1016 / j . ecolmodel . 2006 . 04 . 023.
- [35] GSM. “Profone GSM Tracker”. In: (2019). Accessed: 2019-05.
- [36] Robert M. Seye Bamba Gueye and Moussa Diallo. “An Evaluation of LoRa Coverage in Dakar Peninsula.” In: *IEEE IEMCON* (2017).
- [37] Badreddine Guizani. “algorithmes de clustérisation et routage dans les réseaux Ad Hoc. Ordina- teur et société [cs.CY]”. In: ().
- [38] Hou and Tsai. “A access-based clustering protocol for multihop wireless ad hoc networks”. In: (). DOI: 10 . 1109 / 49 . 932689.
- [39] Inter-Réseaux. “Les Systèmes de collecte de lait”. In: (). URL: <http://www.inter-reseaux.org/publications/revue-grain-de-sel/46-47-repondre-aux-evolutions/article/les-systemes-de-collecte-du-lait>.
- [40] Ferber J. “Les systèmes multi-agents: un aperçu général. Technique et Science Informatiques”. In: vol.16 n°8 (1997), pp. 979–1012.
- [41] Jain and Al. “Routing in a Delay Tolerant Network”. In: 34.4 (Aug. 2004), pp. 145–158. ISSN: 0146-4833. DOI: 10 . 1145 / 1030194 . 1015484 . URL: <https://doi.org/10.1145/1030194.1015484>.
- [42] Anthony JUTON. “Réseaux très basse consommation, longue portée, bas débit, l’exemple de LoRaWAN”. In: *Revue 3EI* (2019).
- [43] Lauridsen and Al. “Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area”. In: (2016), pp. 1–5. DOI: 10 . 1109 / VTCSFall . 2016 . 7880946.
- [44] Grégoire Leclerc and Oumar Sy. “Spatial indicators for Ferlo’s pastoral transhumance”. In: (2011). DOI: 10 . 4000 / cybergeogeo . 23661.
- [45] In Lee and Kyoochun Lee. “The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises”. In: *Business Horizons* 58.4 (2015), pp. 431–440. ISSN: 0007-6813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681315000373>.
- [46] Lin and Gerla. “A distributed architecture for multimedia in dynamic wireless networks”. In: (). DOI: 10 . 1109 / GLOCOM . 1995 . 502646.
- [47] Odell J. Van Dyke Parunak H. Fleischer M. “Modeling agent organizations using roles. Softw Syst Model”. In: (2003), pp. 76–81.

- [48] Laurent Magnin. “Modelisation et simulation de l’environnement dans les systemes multi-agents. Application aux robots footballeurs”. In: ().
- [49] Mangrulkar and Al. “Routing protocol for Delay Tolerant Network: A survey and comparison”. In: (2010), pp. 210–215. DOI: 10.1109/ICCCCT.2010.5670553.
- [50] R. S. Mangrulkaru and al. “Routing Protocol for Delay Tolerant Network: A Survey and Comparison”. In: (). DOI: 978-1-4244-7770-8/10/\$26.00. 2010IEEE\$.
- [51] P. Marichamy and Al. “Overview of handoff schemes in cellular mobile networks and their comparative performance evaluation”. In: *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference* (1999).
- [52] Marie MAY. “Rapport de la première mission de terrain à Widou Thiengoly dans le Ferlo sénégalais”. In: ().
- [53] McDonald and Znati. “A mobility-based framework for adaptive clustering in wireless ad hoc networks”. In: (1999). DOI: 10.1109/49.780353.
- [54] Edgar Romo Montiel and Al. “Performance Analysis of Cluster Formation in Wireless Sensor Networks”. In: *Sensors 2017* ().
- [55] Edgar Romo Montiel and Al. “Performance Analysis of Cluster Formation in Wireless Sensor Networks”. In: *Sensors 2017* ().
- [56] Jean-Pierre Müller and Al. “Modélisation et simulation multi-agent”. In: ().
- [57] LoraWan The Things Network. In: (). URL: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>.
- [58] Bassirou NGOM. “A Hybrid Measurement Kit for Real-time Air Quality Monitoring Across Senegal Cities”. In: *IEEE ICSCC* (2018).
- [59] Osiris. “Geolocalisation des pirogues”. In: (2015). Accessed: 2015-11.
- [60] Pearlman and Haas. “Determination of Critical Transmission Range in Ad-Hoc Networks”. In: (1999). URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5920-430>.
- [61] Belding-Royer Per. “Hierarchical routing in ad hoc mobile networks”. In: (2002). DOI: <https://doi.org/10.1002/wcm.74>.
- [62] Juha Petajajarvi and Al. “On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology”. In: *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)* (2015).
- [63] Tara Petri and Al. “Measurements, Performance and Analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN”. In: *27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2016).
- [64] Ratasuk and Al. “Narrowband LTE-M System for M2M Communication”. In: (2014), pp. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6966070.
- [65] P. P. Ray. “A Survey on Internet of Things Architectures,” in: *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things* (2016). URL: [doi: %2010.4108/eai.1-12-2016.151714..](https://doi.org/10.4108/eai.1-12-2016.151714)

-
- [66] Usman Raza and Al. “Low Power Wide Area Networks: An Overview”. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 19 (2017).
- [67] S. et Al Russell. “Intelligence artificielle”. In: (2006).
- [68] Sabharwal and Al. “Opportunistic Spectral Usage: Bounds and a Multi-Band CSMA/CA Protocol”. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 15.3 (2007), pp. 533–545. DOI: 10.1109/TNET.2007.893230.
- [69] Semtech. “<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>”. In: ().
- [70] Au Senegal. In: (). URL: <https://www.au-senegal.com/le-climat-et-la-meteo,046.html>.
- [71] Senenews. “durcissement des peines d'emprisonnement pour vol de bétail les éleveurs”. In: *Senenews* (2016). URL: https://www.senenews.com/2013/02/16/durcissement-des-peines-demprisonnement-pour-%20vol-de-betail-les-eleveurs-de-fatick-saluent-linitiative_54354.html.
- [72] Madoune R. Seye. “An Ad Hoc communication system for an Efficient Milk collection within White Areas”. In: *IEEE IWCMC* (2019).
- [73] Julien Siebert. “Approche multi-agent pour la multi-modélisation et le couplage de simulations”. In: ().
- [74] Internet Society. In: (2018). URL: <https://www.internetsociety.org/cowshed-communication-within-white-spots-breeders>.
- [75] DIAO CAMARA Astou Sougou. “Le rapport au changement en société pastorale Le cas des éleveurs du Ferlo et de Colonnat”. In: *Thèse de doctorat en Sociologie* (2013).
- [76] SPAIF. “SPAIF”. In: (2018). Accessed: 2018-09.
- [77] Taillandier and al. “Building, Composing and Experimenting Complex Spatial Models with the GAMA Platform”. In: *GeoInformatica* (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>.
- [78] Wei and Chan. “Energy Efficient Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks”. In: (). DOI: 10.1109/ICCW.2008.50.
- [79] Danny WEYNS and Al. “Environments in multiagent systems”. In: ().
- [80] Andrew J Wixted and Al. “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless Sensor Networks”. In: *IEEE SENSORS* (2016).
- [81] M. Wooldridge. “« Intelligent Agent », Multiagent Systems de Weiss G.” In: *Cambridge, The MIT Press* (1999).
- [82] Rui Xu and D. Wunsch. “Survey of clustering algorithms”. In: *IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 16, no. 3, pp. 645-678* (2005). DOI: 10.1109/TNN.2005.845141..
- [83] Yveslebelge. “Victimes de la mer”. In: (2014). Accessed: 2014-05.
- [84] Yahia ZAKARIA and Lubomir IVANEK. “Propagation Modelling of Path Loss Models for Wireless Communication in Urban and Rural Environments at 1800 GSM Frequency Band”. In: *INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND SERVICES* (2016). DOI: 10.15598/aeec.v14i2.1586.