



**HAL**  
open science

# Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues

Djibrilla Incha Adamou

► **To cite this version:**

Djibrilla Incha Adamou. Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLS457 . tel-02421314

**HAL Id: tel-02421314**

**<https://theses.hal.science/tel-02421314>**

Submitted on 20 Dec 2019

**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.

# Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à l'Université Paris-Sud

Ecole doctorale n°580 Sciences et technologies de l'information et de la  
communication (STIC)  
Spécialité de doctorat : Réseaux, Information et Communications

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 29/11/2019, par

**MONSIEUR DJIBRILLA INCHA ADAMOU**

Composition du Jury :

Maria POTOP-BUTUCARU Professeure des Universités, Sorbonne Université	Présidente
Riadh DHAOU Maître de Conférences-HDR, ENSEEIHT	Rapporteur
Selma BOUMERDASSI Maître de Conférences-HDR, CNAM	Rapporteur
Steven MARTIN Professeur des Universités, Université Paris Sud	Examineur
Véronique VEQUE Professeure des Universités, Université Paris Sud	Directrice de thèse
Alexandre MOURADIAN Maître de Conférences, Université Paris Sud	Co-Encadrant



---

## Résumé

Les zones blanches étendues sont de vastes espaces géographiques (forêts, déserts), sans ou ayant très peu d'infrastructures telles que les routes, les réseaux électrique ou de télécommunication. Cependant, très souvent, dans ces zones se développent de nombreuses activités économiques ou environnementales telles que le monitoring de l'environnement, la surveillance d'une frontière ou d'une installation de pipeline, ou encore la prévention des feux de forêt. Grâce aux techniques de télédétection et de communication, une fonction clé de ces activités repose sur la collecte d'informations issues de capteurs qui sont transmises à un centre d'analyse distant. Nous proposons des solutions réseau afin d'effectuer la collecte de ces données dans les zones blanches étendues grâce à des technologies de communication longue distance et faible énergie, de type LoRaWAN. Pour le problème du déploiement du réseau de capteurs sans fil dans ces zones difficiles, nous avons proposé une heuristique inspirée de la croissance biologique d'un champignon, le *physarum*. Le *physarum* est capable de créer un corps complexe de liens pour trouver de la nourriture nécessaire à sa survie tout en optimisant ses propres ressources corporelles lors des périodes de disette. Ce principe d'optimisation a été adapté au domaine des réseaux pour déployer un réseau tolérant aux fautes, tout en minimisant le nombre de ressources ou relais à placer sur la zone d'intérêt. Nous nous sommes ensuite intéressés à la collecte opportuniste de données dans les zones blanches afin de pouvoir collecter l'information des nœuds trop éloignés d'une station relais. Nous avons développé une méthode de collecte basée sur les avions de ligne qui survole le territoire. Durant une fenêtre de communication, l'avion est à portée d'un capteur et peut ainsi collecter les données stockées qui seront livrées au serveur à l'atterrissage de l'avion. Notre dernière contribution utilise conjointement les deux méthodes précédentes, pour permettre à la fois le déploiement du réseau et la collecte des capteurs isolés.

---

## Abstract

Although wide white areas are not equipped or sparsely equipped with any infrastructure (energy, roads ...), strategic human activities are being carried out such as mines, forest, pipeline... To tackle the problem of deploying sensor networks in a very large area where few infrastructures are available, we propose a network deployment algorithm which aims at efficiently linking sparse points of interest in a very wide white area. The originality of the proposed method is that it mimics the evolution of a type of mold called physarum. Secondly, we aim at overcoming the deployment problem in wide white areas by using long range communication between an aircraft and earth. The new data collection scheme we propose is based on the use of commercial flights to collect data while they cross over an area of interest. It investigates the feasibility of such a scheme by determining the collection capacity of commercial aircraft in different locations of the desert. Finally, we mixed both solutions to repatriate data from sensors not covered by any flight to a covered data sink that relays data to the aircraft.

---

## Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Madame Véronique Vèque, Professeure à l'Université Paris Sud, ma directrice thèse, pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir soutenu, encadré, guidé et encouragé tout au long de ces trois années de recherche. Au delà de ton engagement technique, je tenais à te remercier pour ta disponibilité et ta patience sans lesquelles ce mémoire ne saurait être bien élaboré. J'ai beaucoup appris de nos réunions et de nos diverses interactions scientifiques qui m'ont permis de mettre de l'ordre dans mes connaissances jadis pêle-mêle interposées.

Je remercie également Monsieur Alexandre Mouradian, Maître de Conférences à l'Université Paris Sud, pour son encadrement et surtout pour avoir partagé ses brillantes intuitions avec moi dans tous les aspects de ma thèse. Tes perpétuelles mises en questions critiques m'ont permis d'aller au delà de ce que j'ai supposé être mes limites.

Que tous les deux soient remerciés pour leur gentillesse, et pour les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Riadh Dhaou, Maître de Conférences à ENSEEIHT ainsi qu'à Madame Selma Boumerdassi, Maître de Conférences au CNAM, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. Leurs remarques et suggestions m'ont permis de parfaire la structuration de mon mémoire et de bien présenter les résultats de mes recherches.

J'exprime ma gratitude à Madame Maria Potop-Butucaru, Professeure à Sorbonne Université et à Monsieur Steven Martin, Professeur à l'Université Paris Sud, qui ont bien voulu être examinateurs de mes travaux. Ensemble vous m'avez gratifié d'un jury des plus prestigieux : Merci.

Je remercie l'Etat du Niger pour son effort à promouvoir l'éducation supérieure et la recherche scientifique à travers ses institutions telle que l'ANAB qui investit dans la jeunesse car "Le Niger de demain sera ce que c'est que sa jeunesse d'aujourd'hui".

Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire L2S, notamment le personnel du service Gestion et du service Informatique pour avoir permis le déroulement de cette thèse dans de bonnes conditions. Mention spéciale à Stéphanie Douesnard et à José Fonseca.

---

Mes chaleureux remerciements à l'endroit de mes amis du laboratoire L2S, spécialement à Melek Charfi et Yanqiao Hou, mes collègues du bureau, également à Hidayet Zemaga, Joao Alberto, Zicheng Liu et Ghida Achkar : Vous avez été merveilleux et notre amitié complice va delà du laboratoire.

Mes sincères remerciements à Dr Lynda Zitoune pour avoir eu confiance en mes compétences. J'ai eu d'expérience d'enseignant en me confiant tes élèves ingénieurs, de l'ESIEE Paris, en module de réseau et d'analyse des protocoles.

A l'occasion de cette thèse qui clos mon instruction, je tiens à remercier et à témoigner mon amour à l'ensemble de mes enseignants, nombreux vous êtes, que Dieu vous bénisse.

Je ne saurai finir cette liste sans mentionner des personnes extraordinaires. Un grand merci à mes parents pour leur amour et leur patience. Trouvez dans cette thèse le sens de votre noble sacrifice.

# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>x</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 Réseau de nouvelle génération . . . . .	3
1.2 Projet de recherche . . . . .	4
1.3 Structure du mémoire . . . . .	6
1.4 Publications . . . . .	7
1.4.1 Conférences internationales avec comité de lecture . . . . .	8
1.4.2 Communications nationales . . . . .	8
<b>2 Les Réseaux et collecte de données</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction . . . . .	10
2.2 Les applications dans les zones blanches étendues . . . . .	10
2.2.1 Les zones blanches étendues . . . . .	10
2.2.2 Les applications . . . . .	11
2.2.2.1 Classification par domaine d'activités . . . . .	11
2.2.2.2 Classification par type de trafic . . . . .	15
2.2.2.3 Projets réalisés dans les zones blanches étendues . . . . .	16
2.3 Classification des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	23
2.3.1 Objectifs dans la conception des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	23
2.3.2 Types fonctionnels des réseaux de capteurs sans fils . . . . .	24
2.3.3 Les technologies utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	25
2.3.3.1 Les technologies à courte portée . . . . .	26
2.3.3.2 Les technologies à longue distance . . . . .	31
2.4 Déploiement efficace des réseaux . . . . .	32
2.4.1 Méthodologie de déploiement . . . . .	33
2.4.1.1 Méthodes déterministes . . . . .	33
2.4.1.2 Méthodes aléatoires . . . . .	35

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.4.2	Objectif d'optimisation . . . . .	35
2.4.2.1	Couverture de la zone d'intérêt . . . . .	36
2.4.2.2	La connectivité dans le réseau . . . . .	36
2.4.2.3	La durée de vie du réseau . . . . .	36
2.4.2.4	L'intégrité des données . . . . .	36
2.4.3	Méthodes basées sur le rôle du nœud dans le réseau . . . . .	37
2.4.3.1	Déploiement de nœuds relais . . . . .	37
2.4.3.2	Déploiement en cluster . . . . .	38
2.5	Méthodes de collecte de données avec des puits mobiles . . . . .	38
2.5.1	Découverte des nœuds . . . . .	39
2.5.1.1	Méthodes indépendantes de la forme de mobilité . . . . .	39
2.5.1.2	Méthodes basées sur la prédiction . . . . .	40
2.5.2	La Collecte des données . . . . .	40
2.5.3	Méthodes de routage dans les réseaux de collecte . . . . .	40
2.5.3.1	Les principes du routage . . . . .	41
2.5.3.2	Routage plat . . . . .	41
2.5.3.3	Routage hiérarchique . . . . .	42
2.5.4	Le contrôle de la mobilité . . . . .	42
2.5.4.1	Contrôle des trajectoires fixes . . . . .	43
2.5.4.2	Trajectoires dynamiques . . . . .	43
2.5.4.3	Impact de la vitesse du puits mobile sur la méthode de collecte . . . . .	44
2.5.4.4	Méthodes hybrides . . . . .	44
2.5.5	Type de puits mobiles . . . . .	45
2.5.5.1	Les puits terrestres de collecte . . . . .	45
2.5.5.2	Les satellites . . . . .	45
2.5.5.3	Les ballons stratosphériques . . . . .	46
2.5.5.4	Les drones . . . . .	46
2.6	Les réseaux de capteurs sans fil tolérants au délai . . . . .	48
2.6.1	Développement des réseaux tolérants au délai DTN . . . . .	48
2.6.1.1	Architecture des réseaux DTN . . . . .	48
2.6.1.2	Mise en oeuvre de protocole des réseaux DTN . . . . .	49
2.6.2	Implémentation des DTN dans les zones blanches étendues . . . . .	50
2.6.2.1	Cas général des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	50
2.6.2.2	Cas particulier des zones blanches étendues . . . . .	50
2.7	Conclusion . . . . .	51

---

TABLE DES MATIÈRES

---

<b>3</b>	<b>Algorithmes de minimisation de ressources</b>	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	54
3.2	Heuristique bio-inspirée basée sur le Physarum . . . . .	55
3.3	Hypothèses et considérations . . . . .	55
3.4	Méthode bio-inspirée de déploiement de réseau . . . . .	56
3.4.1	Physiologie et principe de croissance du physarum . . . . .	56
3.4.2	Modèle mathématique d'optimisation de ressources . . . . .	58
3.5	Algorithmes de déploiement de réseaux . . . . .	61
3.5.1	Algorithme basé sur le modèle du physarum . . . . .	61
3.5.2	Méthode de référence . . . . .	64
3.5.2.1	Hypothèses . . . . .	64
3.5.2.2	Algorithme de calcul de l'arbre minimal de Steiner . . . . .	64
3.6	Évaluation des méthodes de déploiement . . . . .	65
3.6.1	Les scénarios . . . . .	65
3.6.2	Métriques de performance . . . . .	67
3.6.2.1	Longueur totale de l'arbre et nombre de relais . . . . .	67
3.6.2.2	Connectivité et tolérance aux fautes . . . . .	68
3.7	Résultats et discussion . . . . .	68
3.7.1	Analyse des topologies . . . . .	68
3.7.2	Analyse de l'influence des paramètres du modèle . . . . .	69
3.7.3	Analyse de la tolérance aux fautes . . . . .	71
3.8	Conclusion . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Collecte de données dans les zones blanches étendues</b>	<b>78</b>
4.1	Introduction . . . . .	79
4.1.1	Utilisation des puits mobiles pour la collecte des données . . . . .	79
4.1.1.1	Problématique liée aux puits mobiles terrestres . . . . .	82
4.1.1.2	Problématique liée aux puits mobiles aériens . . . . .	84
4.1.2	Les vols commerciaux comme puits mobiles . . . . .	85
4.2	Méthode opportuniste de collecte de données . . . . .	86
4.2.1	Modèle de communication . . . . .	86
4.2.2	Modélisation de la trajectoire des avions de ligne . . . . .	90
4.2.3	Fenêtre de communication Avion-Capteur . . . . .	94
4.2.4	Volume et capacité de collecte de données . . . . .	95
4.3	Évaluation . . . . .	96
4.3.1	Scénarios . . . . .	96
4.3.2	Les métriques de performance . . . . .	98
4.3.3	Résultats et discussion . . . . .	99

## TABLE DES MATIÈRES

---

4.3.3.1	Influence du facteur d'étalement sur la couverture de la zone d'intérêt . . . . .	99
4.3.3.2	Influence de la planification des vols sur la couverture de la zone . . . . .	100
4.3.3.3	Analyse de la fenêtre de communication . . . . .	101
4.3.3.4	Analyse du débit moyen . . . . .	102
4.3.3.5	Analyse des paramètres LoRa et du volume de données collectées . . . . .	104
4.4	Discussion et Conclusion . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Méthode multi-sauts de couverture et de collecte</b>	<b>110</b>
5.1	Introduction . . . . .	111
5.1.1	Collecte de données dans les zones non survolées . . . . .	111
5.1.1.1	Problématique liée au délai de collecte . . . . .	111
5.1.1.2	Problématique liée aux relais et à la couverture . . . . .	112
5.1.1.3	Défis à relever . . . . .	113
5.2	Les enjeux dans les réseaux de capteurs sans fil tolérants aux délais	114
5.2.1	Maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil DTN . . . . .	114
5.2.2	Conception de la trajectoire des puits mobiles dans les DTN . . . . .	115
5.3	Amélioration de la couverture et la connectivité dans les zones blanches étendues . . . . .	115
5.3.1	Définition . . . . .	115
5.3.2	Système et hypothèses . . . . .	116
5.3.3	Construction d'une infrastructure connectant les sources aux points de collecte . . . . .	117
5.3.4	Routage des sources vers les sous-puits . . . . .	118
5.3.4.1	Heuristique dérivée du modèle du Physarum . . . . .	118
5.3.4.2	Simulation de l'algorithme <b>PhyRoute</b> . . . . .	119
5.3.4.3	Limites et amélioration de <b>PhyRoute</b> . . . . .	122
5.4	Calcul du délai de collecte . . . . .	125
5.5	Choix du sous-puits par les sources de données . . . . .	128
5.5.1	Méthode basée sur la distance . . . . .	128
5.5.2	Méthode basée sur la fenêtre de communication . . . . .	130
5.5.3	Méthode efficace de choix de sous-puits . . . . .	131
5.6	Evaluation . . . . .	132
5.6.1	Scénarios . . . . .	132
5.6.2	Les métriques de performance . . . . .	132

## TABLE DES MATIÈRES

---

5.6.2.1	Définitions . . . . .	132
5.6.2.2	Objectif de performance . . . . .	133
5.6.3	Méthodes de référence . . . . .	134
5.6.3.1	Référence pour le nombre de sauts . . . . .	134
5.6.3.2	Référence pour la file d'attente . . . . .	134
5.6.4	Résultats et analyses . . . . .	134
5.6.4.1	Infrastructure d'interconnexion des sources aux sous-puits . . . . .	134
5.6.4.2	Comparaison du nombre de sauts sur les différents chemins . . . . .	137
5.6.4.3	Comparaison avec l'algorithme de Dijkstra . . . . .	138
5.6.4.4	Tailles des files d'attente . . . . .	139
5.7	Discussion et conclusion . . . . .	143
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>147</b>
6.1	Synthèse . . . . .	148
6.2	Perspectives . . . . .	150

# Table des figures

2.1	RCsF pour localiser des tireurs en étudiant l'onde de choc [Led+05]. . . . .	12
2.2	Application de surveillance d'un troupeau de bovins [Cor+10]. . . . .	14
2.3	Mesure du microclimat en milieu forestier [Cor+10]. . . . .	14
2.4	Un volontaire venant d'être secouru sous la neige [Cor+10]. . . . .	19
2.5	Exemple d'une architecture de RCsF [Crn11]. . . . .	23
2.6	Classification des méthodes de déploiement. . . . .	33
2.7	Pavage sous forme de grille d'une zone. . . . .	34
2.8	Pavage sous forme du diagramme de Voronoï . . . . .	34
2.9	Exemple de déploiement aléatoire . . . . .	35
2.10	Architecture hiérarchique d'un RCsF avec relais [HSS05]. . . . .	37
2.11	Scénario d'utilisation d'un puits mobile. . . . .	38
2.12	Taxonomie des méthodes de collecte de données avec puits mobiles. . . . .	39
2.13	Scénario d'utilisation de drone. . . . .	47
2.14	Architecture des réseaux DTN. . . . .	49
3.1	Formation de réseau de transport avec le physarum [Ter+10b] . . . . .	57
3.2	Phase de la création de structure en réseau optimisé. . . . .	57
3.3	Circulation de flux dans le corps du physarum. . . . .	58
3.4	Exemple de graphe initial. . . . .	66
3.5	Comparaison des graphes des 2 méthodes. . . . .	70
3.6	Réseau avec résilience (Méthode du physarum). . . . .	72
3.7	Topologies avec la méthode du physarum. . . . .	72
3.8	Analyse des fonctions des coûts . . . . .	74
3.9	Analyse de la tolérance aux fautes . . . . .	75
3.10	Analyse de la tolérance aux fautes (suite) . . . . .	76
4.1	Réseau de capteurs sans fil pour l'étude de l'habitat du zèbre. [Jua+02]. . . . .	80
4.2	Projet CubeSat. . . . .	80
4.3	Projet LOON. . . . .	81
4.4	Scénario d'utilisation de drone pour la collecte de données. [Moz+17]. . . . .	82

---

TABLE DES FIGURES

---

4.5 Exemple d'utilisation d'un véhicule pour détecter l'état des capteurs et charger leur batterie. [YWL15]. . . . .	83
4.6 Trajectoire définie par un ensemble de points de rendez-vous. [KNJ17]. . . . .	84
4.7 Scénario de collecte de données avec les avions de ligne. . . . .	86
4.8 Une balise VOR co-localisée avec le DME [Dme19]. . . . .	91
4.9 Extrait d'une carte répertoriant les routes aériennes près de Toulouse. [GIR14]. . . . .	91
4.10 Intersection entre la portée d'un capteur et la trajectoire d'un avion. . . . .	94
4.11 L'étendue géographique du Sahara [Sah19]. . . . .	97
4.12 Les routes aériennes au dessus du Sahara [Map19]. . . . .	98
4.13 Scénario avec la zone d'intérêt pixellisée. . . . .	99
4.14 Influence de $SF$ sur la couverture des pixels. . . . .	100
4.15 Nombre de pixels couverts parmi 1600. . . . .	101
4.16 Distribution des fenêtres de communication par pixel. . . . .	102
4.17 Débit de collecte des données $D_m$ (bps), case $SF=7$ . . . . .	103
4.18 Débit de collecte des données $CT$ (bps), case $SF=10$ . . . . .	104
4.19 Débit par jours. . . . .	106
4.20 Analyse des débits, $SF=7$ , $BW=500\text{kHz}$ . Pixels encerclés sur la figure 4.17b . . . . .	107
5.1 Zone d'intérêt et scénario. . . . .	116
5.2 Physarum peut calculer un chemin optimal dans une structure complexe [TKN07]. . . . .	119
5.3 Scénario de graphe de communication de 7 noeuds. . . . .	121
5.4 Chemin entre les noeuds 1 et 7 par <b>PhyRoute</b> . . . . .	121
5.5 Détection de panne. . . . .	122
5.6 Variation de flux dans les liens du graphe représenté par la figure 5.5. . . . .	123
5.7 Variation de flux dans un graphe connecté de 5 noeuds. . . . .	124
5.8 Comparaison entre les algorithmes <b>PhyRoute</b> et <b>PhyRouteX</b> [Zha+14b]. . . . .	127
5.9 Principe de formation des clusters. . . . .	129
5.10 Répartition des capteurs en zone de communication. . . . .	131
5.11 Exemple de scénario. . . . .	133
5.12 Calcul de réseau (structure minimale) d'interconnexion avec l'algorithme <b>PhyNetB</b> . . . . .	136
5.13 Calcul de réseau (structure à liens redondants) d'interconnexion avec l'algorithme <b>PhyNetB</b> . . . . .	137
5.14 Scénario n°2, les carrés représentent les sources de données et les triangles les points de collecte. . . . .	138
5.15 Plus courts chemins en nombre de sauts . . . . .	140
5.16 Temps de calcul . . . . .	141
5.17 Comparaison des chemins déterminés par l'algorithme <b>PhyRouteX</b> vs Dijkstra . . . . .	142

## TABLE DES FIGURES

---

5.18	Comparaison des chemins déterminés par l'algorithme <b>PhyRouteX</b> vs Dijkstra. . .	143
5.19	Comparaison des deux méthodes de collecte. . . . .	144
5.20	Comparaison avec des sources de même débit. . . . .	145
5.21	Comparaison avec des sources de débit variable. . . . .	146

# Liste des tableaux

2.1	Classification par type de trafic. . . . .	16
2.2	Comparaison de quelques projets (suite) . . . . .	21
2.3	Comparaison de quelques projets . . . . .	22
2.4	Caractéristiques de technologies sélectionnées . . . . .	28
2.5	Comparaison des différentes technologies . . . . .	30
2.6	Comparaison des différentes technologies LPWAN . . . . .	32
3.1	Paramètres du modèle . . . . .	63
3.2	Paramètres d'évaluation . . . . .	67
3.3	Indice de connectivité en fonction des différents paramètres. . . . .	73
4.1	Éléments de communication LoRa pour différents $SF$ avec $\gamma=9$ and $d_0=62m, P_t = 17dBm, NF=6$ . . . . .	89
4.2	Exemple de planning hebdomadaire de vols. . . . .	93
4.3	Volume de données collectées (Mbps) durant une semaine. $DR=5.46$ kbps, $BW=125$ kHz, $SF=7, d = 10.07$ Km. . . . .	108

# **Chapitre 1**

## **Introduction générale**



## 1.1 Réseau de nouvelle génération

Depuis que son concept a été introduit par Kevin Ashton en 1999, l'Internet des Objets (*Internet of Things, IoT*) [Ash09] n'a cessé de connaître une forte croissance. D'après une étude effectuée par une équipe de recherche de l'école polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), en dix ans, soit de 2015 à 2025, 150 milliards d'objets devraient se connecter entre eux, avec l'Internet et avec plusieurs milliards de personnes [HP19]; ce qui engendre une énorme quantité de données à gérer et à stocker. Cette évolution est telle qu'en 2015, le volume de données doublait tous les 12 mois, et désormais il double toutes les 12 heures.

L'Internet des Objets repose sur l'interconnexion des objets dotés d'une intelligence propre et d'une identité unique (adressage) et on parle d'objets intelligents ou d'objets connectés tels que les smartphones. Les objets connectés sont capables de mesurer des phénomènes naturels du monde qui nous entoure, de les convertir en numérique et d'estimer leur valeur. Ainsi, ils nous aident à prendre les décisions adéquates face aux situations qui peuvent dégrader notre confort.

Les éléments centraux de l'IoT sont les capteurs qui sont des composés électroniques, de plus en plus miniaturisés. Malgré leurs ressources limitées en mémoire, puissance de calcul et énergie, ils peuvent former un réseau et coopérer entre eux ou avec Internet sous différentes topologies et architectures [Fah16]. Lorsqu'ils communiquent en sans fil, on parle de réseaux de capteurs sans fil (RCsF) ou en anglais WSN (*Wireless Sensor Networks*) [ALM05].

La communication sans fil est essentielle pour les réseaux de capteurs car ils peuvent être facilement déployés dans presque tous les types d'environnement. A ce titre, plusieurs réseaux et technologies de communication existent. Ceux-ci peuvent être classés selon leur portée de communication en différents groupes :

- Le réseau corporel (*Body Area Network-BAN*) couvre les régions autour ou dans le corps humain.
- Le réseau personnel (*Personal Area Networks-PAN*) a une portée d'une dizaine de mètres et utilise des technologies telles que Bluetooth et Zigbee.
- Le réseau local (*Local Area Network-LAN*) comprend les réseaux domestiques et couvre une centaine de mètres pour être déployé dans les bâtiments et les habitations. Le WiFi est la technologie de réseau local sans fil la plus répandue.
- Le réseau métropolitain (*Metropolitan Area Network- MAN*) couvre un espace à l'échelle d'une ville entière. WiMAX en était un exemple.

- Le réseau étendu (*Wide Area Network- WAN*) est un réseau qui couvre tout un pays et peut s'étendre à l'échelle planétaire. Des exemples de réseau WAN sont les réseaux cellulaires, LoRaWAN ou Sigfox.

Le réseau de capteurs sans fil fait partie intégrante de l'Internet des Objets. Les avancées et la convergence des domaines tels que la micro-électro-mécanique et la transmission radio ont permis de concevoir des capteurs capables d'intégrer les différents réseaux et protocoles de communication.

Aujourd'hui, les RCsF sont utilisés dans tous les secteurs d'activité humaine tels que l'environnement, l'industrie, l'agro-pastoral, la médecine, l'armée, etc. Un RCsF est composé de plusieurs capteurs, le plus souvent ayant des fonctions différentes. Les capteurs sont placés dans une zone d'intérêt pour couvrir un phénomène et y détecter des changements. Ils communiquent avec des stations de base ou puits par des liaisons directes ou multi-sauts. La station de base peut stocker localement les données pour afficher les mesures effectuées ou les mettre à la disposition d'autres utilisateurs à travers l'Internet par exemple.

## 1.2 Projet de recherche

Notre projet de recherche a pour objectifs d'étudier les problèmes liés au déploiement de réseaux de communication dans les zones blanches étendues et de proposer des solutions basées sur les RCsF, notamment les technologies à longue portée et faible consommation d'énergie (*Low Power Wide Area Networks-LPWAN*).

Nous proposons ainsi des méthodes de déploiement efficaces qui permettent d'interconnecter des sources de données au puits afin de collecter toutes les informations générées par les capteurs. En général, dans les zones blanches étendues, les sources sont séparées par de grandes distances les uns des autres.

Ces distances sont si grandes qu'il n'existe pas de technologie de transmission permettant à une source de communiquer directement avec le puits de données [MRX08]. Ainsi, la communication entre les zones d'intérêt sera réalisée à l'aide de stations relais dont les positions sont déterminées selon un pavage uniforme [Yun+10].

Néanmoins, le motif optimal de pavage est très difficile à trouver et notre projet de recherche ne s'efforce pas de couvrir la totalité de la zone blanche étendue. Notre objectif est d'interconnecter au puits des sources de données éparpillées sur la

zone d'intérêt, au moyen de relais, en multi-sauts. Ce problème de déploiement est connu sous le nom du problème de l'arbre minimal de Steiner [Mis+08 ; MMH11 ; LX99]. Pour le résoudre, nous avons proposé une heuristique qui est inspirée de l'évolution d'un organisme biologique appelé Physarum.

Le Physarum est un champignon qui est capable d'optimiser les ressources de son corps en une structure minimale afin de prolonger sa durée de vie. Notre méthode imite son processus d'optimisation pour minimiser le nombre de relais qui permettent d'interconnecter toutes les sources aux puits de données. Cette heuristique peut également offrir des chemins redondants entre les sources et le puits. La redondance des chemins se traduit par un réseau tolérant aux fautes qui permet de traiter les pannes de relais et les coupures de lien. En effet, les LPWAN et les RCsF sont réputés pour la fragilité de leurs liens de communication sans fil, conséquence de fréquents changements dans leur topologie [Aky+02].

Par ailleurs, la vaste étendue des ZBE ainsi que leur relief varié ou leur climat rude rendent toute maintenance quasi-impossible. Et, dès lors que le réseau est partitionné, il n'est plus possible de continuer à collecter les données des sources. De plus, pour des raisons de sécurité, de disponibilité de source d'énergie ou de proximité des personnes compétentes, les puits de données et les centres d'analyses sont le plus souvent localisés dans les centres urbains loin des sources de données. La recherche des méthodes alternatives de collecte de données dans ce contexte s'impose.

Pour parcourir de grandes zones géographiques, la collecte des données va être réalisée grâce à des puits mobiles [YSM16 ; CRA06 ; KGH13]. Ces puits mobiles terrestres ou aériens permettent de collecter de grands volumes de données même si le réseau n'est pas connecté et surtout de prolonger sa durée de vie [KGH13], car ils n'utilisent pas de relais.

Les puits mobiles peuvent être des robots [YSM16], des véhicules [Moz+17], des satellites [PVP13], des ballons stratosphériques [Loo19] ou des drones [Moz+19]. Cependant, les puits mobiles terrestres ne peuvent être utilisés dans les ZBE à cause des longues distances à parcourir et du manque de routes qui rendent la collecte très longue [NP04]. Le problème d'accessibilité peut être résolu par l'utilisation des liaisons satellites [PSTA01] car un satellite couvre une grande surface de la terre. Mais même avec des satellites en orbite basse, il faut doter les capteurs de grandes puissances de transmission ce qui n'est possible dans un contexte où la consommation d'énergie est un enjeu. De plus, le coût d'exploitation des satellites

est très élevé pour des applications de RCsF qui ne génèrent le plus souvent que peu de trafic.

Face au problème des coûts élevés de l'exploitation des satellites, une solution consiste à utiliser des ballons dans la stratosphère, équipés de modules de communication [Kat14]. Cette technologie est encore en phase de test et de nombreux accidents enregistrés dans le monde ont montré des insuffisances dans la gouvernabilité dans l'atmosphère et la gestion de la trajectoire de ces ballons [Loo19].

Enfin, les puits mobiles les plus utilisés sont les drones. En effet, ils permettent de pallier le manque de maturité des ballons stratosphériques [Sun+08], au coût élevé des satellites et à l'impossibilité des véhicules terrestres à atteindre les zones difficiles. Cependant, les drones sont aussi limités en énergie. Ils ne peuvent pas embarquer suffisamment d'énergie pour parcourir toute l'étendue d'une ZBE qui peut atteindre plusieurs milliers de kilomètres carrés. Ils sont également des cibles faciles pour le sabotage dans un milieu d'insécurité et ne sauraient être utilisés non plus, dans certaines conditions météorologiques telles que les tempêtes de sable dans les déserts.

Pour contourner les problèmes et limitations des puits mobiles habituels, notre solution porte sur une nouvelle méthode opportuniste qui garantit la continuité des missions de collecte. Nous proposons d'utiliser les vols commerciaux pour collecter les données des capteurs lorsqu'ils survolent les zones d'intérêt. Pour réaliser cette méthode opportuniste de collecte où les altitudes des avions peuvent atteindre 10 km, nous proposons l'utilisation des technologies LPWAN telle que LoRaWAN pour faire communiquer les sources de données et les avions de ligne.

Finalement, puisque les routes des avions ne survolent pas toutes les sources de données, aussi nous avons proposé d'acheminer le trafic des sources non couvertes vers des stations relais qui communiquent avec les avions.

### **1.3 Structure du mémoire**

Ce document est organisé en cinq chapitres. D'abord, le chapitre 1 introduit le projet de recherche, particulièrement le contexte et les motivations qui ont conduit à l'élaboration de la thèse.

Dans le chapitre 2, nous présentons l'état de l'art des infrastructures de collecte de données avec les réseaux de communication sans fil. Nous commençons par une description des zones blanches étendues et des applications qui y sont

le plus souvent développées. Ensuite, nous étudions et comparons les différents standards et technologies des réseaux de capteurs sans fil notamment les technologies longue portée à faible consommation d'énergie. Enfin, nous introduisons les réseaux tolérants aux délais ou DTN (*Delay Tolerant Networks*) notamment en ce qui concerne les aspects à prendre en compte lors de la conception des protocoles de communication pour ce type de réseau.

Le chapitre 3 est consacré à la résolution du problème de déploiement de réseaux dans les zones blanches étendues. Une étude théorique du problème est faite pour le modéliser et proposer une solution. Le problème de déploiement et de couverture est modélisé par le problème de recherche de l'arbre minimal de Steiner (AMS). Dans ce chapitre, nous présentons le modèle mathématique qui modélise le processus d'optimisation des ressources du Physarum. Ensuite, nous adaptons un algorithme dérivé du modèle pour résoudre le problème de déploiement de réseaux de capteurs. Enfin, nous étudions des combinaisons des paramètres de l'algorithme et leurs conséquences sur les topologies de réseaux résultantes avec des liens redondants. Ainsi, nous obtenons des réseaux capables d'être tolérants aux fautes et de survivre aux pannes des liens.

Le chapitre 4 est notre méthode opportuniste de collecte de données avec les vols commerciaux qui survolent les zones d'intérêt. Après avoir évalué le temps de contact avion/capteur, nous dressons une cartographie du débit de collecte en tous lieux de la zone et nous en déduisons le volume de données qui peut être collecté par les avions.

Enfin, dans le chapitre 5, nous avons utilisé conjointement les solutions développées dans les chapitres 3 et 4 pour permettre à la fois le déploiement du réseau et la collecte des données des capteurs isolés. Nous étudions dans ce chapitre, le délai de collecte engendré par l'utilisation des puits mobiles et des relais. Les sources qui ne sont pas sous la trajectoire des avions envoient leur données à des stations relais qui communiquent avec les avions. Pour calculer le plus court chemin vers ces stations relais, nous avons proposé un autre algorithme dérivé du modèle de Physarum.

Enfin, nous terminons le mémoire par une conclusion générale.

## 1.4 Publications

Les travaux effectués au cours de notre thèse ont donné lieu à diverses formes de communications scientifiques. On y distingue des conférences nationales et in-

ternationales.

#### **1.4.1 Conférences internationales avec comité de lecture**

Djibrilla Incha Adamou, Alexandre Mouradian and Véronique Vèque, A Bio-Inspired Deployment Method for Data Collection Networks in Wide White Areas, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna 2018.

Djibrilla Incha Adamou and Alexandre Mouradian and Véronique Vèque, Déploiement de réseau de collecte de données dans les zones blanches étendues, CoRes/Algotel, Narbonne 2019.

Djibrilla Incha Adamou and Alexandre Mouradian and Véronique Vèque, Towards the Use of Commercial Flights for Data Collection in Wide White Area Networks, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona 2019.

#### **1.4.2 Communications nationales**

Djibrilla Incha Adamou and Alexandre Mouradian and Véronique Vèque, Commercial Flights as Opportunistic Mobile Sinks for Data Collection in Wide White Area Networks, Journées thématiques GDR RSD ResCom Low-Power Wide Area Networks (LPWAN), Lyon 2019

Djibrilla Incha Adamou and Alexandre Mouradian and Véronique Vèque, Méthodes de déploiement de réseau de Collecte de données dans les zones blanches étendues, Journées non-thématiques RESCOM, Toulouse 2018.



## **Chapitre 2**

# **Les infrastructures de collecte de données dans les zones blanches étendues**



## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous définissons le contexte technique dans lequel se positionne ce travail de thèse. D’abord, il présente les zones blanches étendues, puis il donne un aperçu des applications couramment rencontrées ou développées dans ce type de zone. Ensuite, nous élaborons une classification des réseaux sans fil qui peuvent être déployés dans les zones blanches étendues. Enfin, nous dressons un état de l’art sur les enjeux de déploiement de réseaux et de collecte de données dans les zones blanches étendues.

## 2.2 Les applications dans les zones blanches étendues

### 2.2.1 Les zones blanches étendues

Le concept des zones blanches est apparu dans les années 90 avec l’avènement de la téléphonie mobile. L’Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes (ARCEP) [Arc19], en France, définit une zone blanche comme étant une zone du territoire qui n’est pas desservie par un réseau donné, particulièrement un réseau de téléphonie mobile ou un accès Internet.

Il s’agit des zones rurales les moins peuplées [Zon19]. Les zones blanches ont une géographie qui rend difficile la couverture pour les opérateurs, par exemple, en France, en 2015 sur les 2624 communes en zones blanches, 848 se trouvent en montagne. Cependant, ces dernières années, le concept de zones blanches a évolué avec d’autres définitions. Ce sont les zones grises et les zones d’ombre. Pour les premières, elles désignent des zones desservies par un ou deux opérateurs et les secondes désignent, quant à elles, les zones où le réseau est accessible mais dont la qualité de service est insuffisante [Bg19].

De nos jours, le concept de zones blanches va au delà de l’absence seulement du réseau de téléphonie mobile. Le besoin d’applications autres que la voix ou le SMS (Small Message Service) d’une part, et d’autre part, l’avènement de l’Internet des objets ont permis d’élargir le concept des zones blanches. Les Zones Blanches Étendues (ZBE) sont des vastes étendues de plusieurs milliers de kilomètres carrés dépourvues, quasi-totalement, de toute infrastructure telles que des routes, des réseaux de distribution d’énergie, des réseaux de télécommunications, etc. Des exemples de ZBE sont les déserts, les forêts ou les mers.

Même si la population dans les zones blanches étendues est très peu dense, on y trouve diverses activités économiques et stratégiques telles que les mines d’exploitation des ressources naturelles, les réseaux de transport (autoroutes, pipelines,

énergies), les installations de protection de l'environnement, la surveillance du territoire, etc. Toutes ces activités ont en commun un besoin de collecte et d'analyse des données. Il faut donc déployer une infrastructure réseau dans ces zones pour collecter les données générées par ces différentes activités.

Les recherches dans différents domaines scientifiques tels que la physique, la micro-électronique, l'automatique, la science des matériaux, qui ont conduit à la création des micro-systèmes électromécaniques appelés MEMS (Micro-electro-Mechanical Systems) d'une part, et d'autre part, les avancées dans la technologie radio fréquence et le traitement des signaux ont rendu possible l'élaboration de capteurs. Ces capteurs sont capables de mesurer, de traiter et de communiquer sans fil [ALM05]. Malgré leurs ressources limitées en énergie, en mémoire, en calcul, ils peuvent former un réseau et coopérer dans divers modèles et architectures [Fah16]. Ces réseaux connus sous le nom de Réseaux de Capteurs sans Fil (RCsF) peuvent être homogènes, hétérogènes [ML02], multi-applicatifs et déployés dans la quasi-totalité des types d'environnement. Ils sont le meilleur candidat pour apporter une solution d'infrastructure réseau pour les zones blanches étendues [Pan+12; Kuo+18; TT06].

Ces dernières années, Les chercheurs en réseaux se sont focalisés sur les réseaux de capteurs sans fil (RCsF) en vue d'améliorer les fonctions de communication telles que le routage [CHC07], le codage [MP09; Hou+08], la correction d'erreur [VA09] ou encore le déploiement qui assure une bonne connectivité et couverture [Mis+08; MM10; GZD11; AMV18]. Depuis lors, de nombreuses applications, dont beaucoup sont exploitées dans les zones blanches étendues, ont été développées.

Dans le paragraphe suivant, nous verrons les différentes applications couramment développées et exploitées dans les zones blanches étendues.

## **2.2.2 Les applications**

Les applications dans les ZBE sont diverses. Elles se distinguent par les problèmes auxquels elles apportent des solutions. Elles peuvent être classés en fonction des domaines d'activité et du type de trafic qu'elles génèrent.

### **2.2.2.1 Classification par domaine d'activités**

Les applications des réseaux de capteurs sans fil sont utilisées dans presque tous les domaines d'activités, mais on les utilise surtout dans des domaines aussi stratégiques que :

### Militaire

Dans les opérations militaires telles que le renseignement, la surveillance et la reconnaissance constituent les principales sources d'informations pour les armées modernes. Les manoeuvres des soldats dans des régions isolées et hostiles aussi vastes que les ZBE sont difficiles et périlleuses. Lorsque des supports de logistiques tels que les avions ou les satellites ne peuvent être utilisés, les réseaux de capteurs sans fil sont une solution possible [AFS17]. Ils sont utilisés pour collecter des sons, des images, détecter des mouvements, des agents contagieux, etc. Par exemple, des algorithmes de fusion de données dans les RCsF ont été utilisés [Led+05] pour détecter et localiser avec précision des tireurs d'élite qui sont camouflés dans des environnements complexes. Dans ce type d'application, les capteurs détectent et étudient le profil acoustique des détonations des armes. Ce profil, comme sur la figure 2.1, est une onde de choc supersonique dont les caractéristiques physiques changent dans le temps et que les capteurs sont capables de mesurer afin de faire une estimation de l'origine du tir.

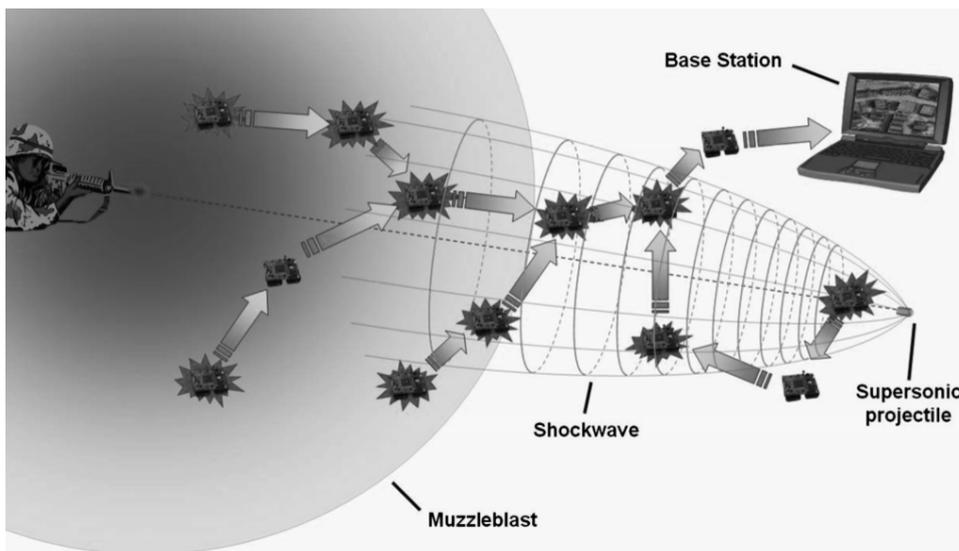


FIGURE 2.1 – RCsF pour localiser des tireurs en étudiant l'onde de choc [Led+05].

Les applications de RCsF dans le domaine militaire requièrent des protocoles de communication qui permettent aux capteurs d'économiser leur énergie, de sauvegarder l'intégrité des données [Lee+09] et des moyens de déploiement et de collecte efficaces sont nécessaires dans des zones hostiles où il est impossible de placer des stations de base [Jon+08] dans certains endroits, ou de remplacer des capteurs en fin de vie. Même si de nombreuses applications militaires basées sur les RCsF ont été proposées [Akm+18; AFS17; Paw16], de nombreux problèmes restent à résoudre. En effet, dans les zones de combats, déployer et sécuriser les capteurs et les stations de base reste un problème réel.

### **Industrie**

De nombreuses organisations telles que ISA (*International Society of Automation*), HART (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol Communication Foundation*) et Zigbee, ont activement promu l'utilisation des RCsF dans l'industrie, en proposant des standards qui sont adaptés au domaine. La plupart des RCsF se basent sur les standards IEEE 802.15 [Bal14]. Dans le milieu industriel, l'ingénierie des applications basées sur les RCsF est confrontée à des problèmes tels que les interférences électromagnétiques aléatoires, l'affaiblissement des signaux, les multi-chemins ou à l'existence d'autres équipements radio-électriques.

De nos jours, il existe de nombreux aspects de l'industrie qui nécessitent une application d'automatisation ou de collecte de données à des fins d'analyse et de maintenance préventive. Par exemple, le contrôle de l'usure des pompes industrielle doit être suivi de façon instantanée [AMT05], le niveau de vibration et de bruit doit être contrôlé pour la protection des équipements de production et des machinistes [DCL06]. Ce type de données doit être acheminé vers le centre de décision dans des brefs délais. Cependant, le développement de ces applications industrielles requiert des infrastructures réseaux qui consomment moins d'énergie et qui sont tolérantes aux fautes, car les sites industriels tels que les usines de production et les réseaux de transport de gaz, de pétrole, etc, sont situés dans des régions de type ZBE.

### **Environnement**

L'environnement est l'ensemble des éléments qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins. C'est aussi l'atmosphère, le climat dans lequel se trouve un individu [Lar]. D'après cette définition, les applications liées à l'environnement comprennent l'agriculture, l'élevage, la climatologie, la sismologie, la surveillance de la faune [Fah16]. Les défis de la crise climatique d'une part et de l'action de l'homme sur l'environnement d'autre part ont conduit à développer diverses applications pour la sauvegarde de notre environnement. Ce sont par exemples la reconstruction de l'habitat de certaines espèces [Sze+04; Hak+10], l'analyse de l'impact de l'homme sur son écosystème [ML04], la mesure du micro-climat pour une agriculture de précision [Lof; Sun+08], le contrôle des volcans actifs [WA+06], etc. Les figures 2.2 et 2.3 montrent, respectivement, un exemple de surveillance d'un parc animalier et une installation de mesure du climat de l'écosystème d'une forêt. Les enjeux des applications pour l'environnement résident d'abord dans la consommation d'énergie de l'infrastructure réseaux, l'efficacité dans la collecte des données et le déploiement des capteurs aux meilleurs endroits. En effet, dans les milieux couverts de végétation, le signal est beaucoup affaibli par le feuillage. Un nombre élevé de cap-

teurs est nécessaire pour couvrir de grande superficie de culture, d'élevage ou de surveillance de la faune.



FIGURE 2.2 – Application de surveillance d'un troupeau de bovins [Cor+10].



FIGURE 2.3 – Mesure du microclimat en milieu forestier [Cor+10].

### **Multimédia**

La technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) a permis de concevoir des caméras peu onéreuses capables d'être intégrées dans les RCsF. Le

réseau permet de récupérer, de traiter et de stocker du flux multimédia (audio, vidéo, image) produit par des capteurs spéciaux, en temps réel. Les RCsF qui embarquent des caméras sont déployés pour accroître la capacité d'opération des organismes chargés de l'application de la loi, de surveiller des zones, des événements publics, des propriétés privées ou des frontières [AMC08]. Les capteurs multimédias peuvent également surveiller le flux des véhicules sur les autoroutes et y extraire des informations globales telles que la vitesse moyenne et le nombre de voitures. Ces informations sont ensuite utilisées pour bien organiser le trafic urbain par exemple. Les réseaux de capteurs de télé-médecine [HK03] peuvent être intégrés aux réseaux multimédias de troisième génération pour fournir des services de soins de santé universels à distance [AMC08].

### 2.2.2.2 Classification par type de trafic

#### Trafic périodique

Dans ce type d'applications, les capteurs génèrent du trafic durant des intervalles réguliers de temps. Les applications qui se caractérisent par ce type de trafic se répartissent en deux groupes : celles qui sont sensibles au délai et celles qui sont tolérantes au délai.

Pour les applications sensibles au délai, les données doivent être reçues dans un délai de bout-en-bout limité [SC19; Dou+12; Des18]. C'est l'exemple des applications de contrôle d'industriel. Les protocoles pour ce type de communication sont plus gourmands en énergie [Kim+10].

Dans le type de trafic périodique où les applications sont tolérantes au délai, les capteurs n'ont pas de contrainte temporelle, ils n'utilisent qu'un pourcentage de leur temps d'activité (*duty cycle*) pour communiquer [Aln+15], ce qui leur permet d'économiser de l'énergie.

#### Trafic aléatoire

Dans ce type de RCsF, les capteurs ne génèrent de l'information qu'à l'avènement d'un phénomène détecté, comme par exemple une application d'alerte incendie en milieu forestier. Le trafic aléatoire peut être reparti en deux classes : trafic avec priorité et trafic sans priorité.

Le trafic aléatoire avec priorité est le type de trafic où les données doivent être reçues dans toute leur intégralité sans perte de paquet. La fiabilité est l'élément fondamental dans la conception de protocole pour ce type d'application [Kim+10].

Classification	Contrainte	Applications
Périodique	Sensible au délai	Contrôle industriel, surveillance
	Tolérant au délai	Monitoring
Aléatoire	Avec priorité	Alerte
	Sans priorité	donnée de mesure
Multimédia	Temps-réel	Images et vidéo

Tableau 2.1 – Classification par type de trafic.

Dans les applications qui génèrent du trafic aléatoire de type sans priorité, les capteurs n'ont pas de contrainte spécifique sur l'intégrité des données. On parle alors de trafic intermittent non critique.

### Trafic multimédia

Le multimédia est un type de trafic qui est de plus en plus demandé dans les RCsF pour des applications telles que la vidéo surveillance [ZG05], la télé-médecine [HK03], le monitoring du trafic urbain [Cam+05] ou les activités de l'armée [AMC07a]. Ce type de service, appelé souvent service temps-réel, requiert une importante qualité de service QoS (*Quality of Service*), un moindre délai bout-en-bout et une demande croissante en bande passante, ce qui augmente la complexité dans la conception de nouveaux protocoles de communications [Kim+10] et d'économie d'énergie.

Ces protocoles doivent surtout permettre d'éviter la congestion dans un réseau où le débit des capteurs atteint 500 kbits/s pour la vidéo et 64 kbits/s pour la voix, ce qui est largement supérieur au débit des applications non multimédia qui est environ de 40 kbits/s. Le taux de couverture des capteurs dans les applications multimédia doit être élevé pour que tous les événements dans la zone d'intérêt soient détectés par les caméras par exemple [AMC07b].

#### 2.2.2.3 Projets réalisés dans les zones blanches étendues

Nous présentons quelques applications et projets des réseaux de capteurs sans fil qui ont déjà été réalisés dans les zones blanches étendues.

##### Observation des oiseaux $O_2$

Il s'agit d'une application de RCsF pour étudier l'habitat naturel d'une espèce d'oiseau rare sur l'île Great Duck [MM02] aux Etats Unis. C'est une espèce menacée par les humains et donc le RCsF est le meilleur moyen de comprendre leur comportement notamment, la phase de leur reproduction. Les capteurs sont déployés dans

leur nid et l'espace autour. Ils mesurent des grandeurs physiques telles que l'humidité, la température, la pression et la visibilité. Dans les nids, les capteurs sont équipés de système infrarouge qui détecte la présence des oiseaux. Grâce à une architecture multi-sauts, les capteurs transmettent leurs informations, chaque minute, à des stations de bases qui sont reliées au serveur d'analyse par des liaisons satellite.

### **Zebranet**

Le projet Zebranet consiste à utiliser les RCsF dans des zones de plusieurs centaines de kilomètres carrés pour étudier le comportement de certaines animaux en voie de disparition (lions, zèbres, etc.) [Jua+02]. Les comportements étudiés sont les migrations, le pâturage et l'interaction avec d'autres espèces. Ce projet est réalisé au Kenya et concerne environ 4000 kilomètres carrés sur une période d'observation de plus d'un an. Les animaux sont équipés de modules qui comprennent des capteurs GPS, détecteurs d'intensité de lumière qui donnent de l'indication sur le moment de la journée, des capteurs de température de leur corps et de la température ambiante. Toutes les 3 minutes, les capteurs font des mesures et s'échangent leur information dans une architecture ad-hoc. Un pick-up et un avion embarquent les stations de base pour collecter les données des capteurs.

### **Monitoring des glaciers**

Dans l'objectif de comprendre le changement climatique, un réseau de capteurs sans fil a été mis en service, en Norvège, pour étudier les glaciers qui sont menacés de fonte [Mar04]. Les capteurs ont été placés dans des forages effectués dans le glacier pour mesurer la pression, la température et la dynamique du glacier. Les capteurs communiquent avec des station de base placées à la surface du glacier. Les conditions climatiques difficiles font que la maintenance des capteurs est impossible, ils alors déployés une fois et ne sont jamais récupérés pour changer leur batterie par exemple.

### **Élevage intensif**

Dans [But04], un RCsF a été déployé pour le contrôle de bétail dans un parc d'élevage. Dans ce projet, il s'agit de créer une clôture virtuelle que le bétail ne doit pas dépasser. Des modules de communication sont attachés aux cous des animaux et ils comprennent des capteurs de mouvement, de position, des haut-parleurs. Chaque fois que le bétail approche la limite virtuelle de l'enclos, une alarme sonore est déclenchée pour dissuader l'animal. Les modules communiquent dans une architecture ad-hoc pour router leurs données jusqu'aux stations de base.

### **Bathymétrie**

Le projet de Bathymétrie a pour objectif d'étudier l'impact d'un parc éolien sur l'environnement qui l'entoure [Mar03]. Le parc éolien est situé dans la mer, sur les côtes anglaises et les capteurs sont déployés à même l'océan. Ils sont mis à l'eau depuis un bateau dans des endroits sélectionnées et sont attachés à des bouées qui flottent à la surface de l'océan. Les données mesurées dans ce projet sont la température, la pression, la conductivité et l'intensité du courant électrique.

### **Projet Argo**

Le projet Argo [Arg19] est l'application d'un réseau de capteurs sans fil pour étudier les espaces marins. Les capteurs observent la température, la salinité et le profil des vagues à la surface des océans. Les capteurs sont déployés à la surface des océans depuis des bateaux ou des avions et ils transmettent leurs données au centre d'analyse à travers des liaisons par satellite. La durée de vie des capteurs est de 4 à 5 années.

### **Télé-culture du raisin**

Dans ce projet de télé-agriculture, un réseau de capteurs sans fil est utilisé pour le monitoring d'un champ de raisins [BTB04]. Dans cette application, des capteurs d'humidité, de température et de lumière sont déployés selon une grille de cellules espacées de 20 mètres sur toute l'étendue du champs. C'est une architecture de communication à 2 plans où les capteurs transmettent leurs données à des relais qui jouent le rôle de routeurs, ces derniers communiquant à leur tour avec le serveur final connecté à Internet par exemple.

### **Logistique froid**

Dans le souci de surveiller les conditions de stockage des marchandises (produits congelés), une application des réseaux de capteurs sans fil a été mise en service pour superviser la logistique utilisée, de la production à la livraison chez le client [Vis04]. L'application consiste à mesurer la température à l'intérieur des boîtes que les capteurs transmettent à des points d'accès qui servent de relais.

### **Secours**

*Secours* est un projet qui vise à apporter un secours aux personnes ensevelies sous une avalanche de glace. Dans ce projet, des capteurs sans fil sont posés sur les équipements portés par les personnes qui entrent dans les zones à risque telle qu'une avalanche [Mic03]. Le système comprend des capteurs d'activité cardiaque, respiratoire des victimes potentiellement enfouies sous les avalanches. Les données sont transmises aux secours qui décident de l'ordre d'intervention en fonction de la gravité de l'état des victimes.

Le module de communication des capteurs utilise la fréquence de 457 kHz dans la

bande ISM, cette gamme de fréquence a l'avantage de subir moins d'atténuation due à des obstacles tels que la neige, les arbres, les roches et les métaux [Mic03]. La figure 2.4 montre un test où la présence d'un volontaire, dans une cave sous la neige, est détectée avec l'aide des capteurs.



FIGURE 2.4 – Un volontaire venant d'être secouru sous la neige [Cor+10].

### **Télé-médecine**

Le projet développé dans [BKM04] est l'application des RCsF pour la télé-médecine. Les données vitales des patients sont enregistrées par des capteurs et transmises à un serveur accessible par les médecins et les agents de santé, qui se trouvent dans les grands centres hospitaliers urbains, loin des patients. C'est un système qui permet aux médecins de suivre leurs patients qui se font soigner dans les dispensaires de l'arrière pays.

### **Monitoring du réseau électrique**

Le projet de monitoring d'infrastructure électrique [KR04] vise à surveiller la consommation d'énergie électrique de tous les bureaux d'un bâtiment. L'application comprend des capteurs, des transmetteurs et une unité de contrôle [KR04]. Les données sont collectées dans une architecture multi-sauts et envoyées à l'unité de contrôle et de gestion du réseau. L'unité de contrôle joue également le rôle de passerelle sur Internet pour permettre aux techniciens des réseaux électriques de suivre l'état des différentes installations et consommations du bâtiment.

### **Déplacement militaire**

Dans ce projet de logistique militaire, des capteurs de positions sont jetés au sol depuis un avion pour détecter le chemin suivi par un convoi militaire ennemi. Avec l'aide de puissants algorithmes d'estimation, la direction, la trajectoire des tanks sont calculées et transmises à un drone qui fait des rondes pour la collecte.

### **Champ de mines**

Dans ce projet, les mines anti-chars sont équipées de capteurs et de module de communication [Mer03]. Ainsi, l'intégrité du champ de mines est garanti tant que toutes les mines communiquent leur état aux contrôleurs. Une mine qui explose par exemple ou qui subit un sabotage ennemi est détectée lorsqu'elle cesse d'émettre par exemple, elle est aussitôt remplacée par une autre. Les modules de communication forment un réseau ad-hoc pour relayer les données.

Les caractéristiques de tous ces projets réalisés sont comparées dans les tableaux 2.2 et 2.3. Le tableau 2.2 dresse une comparaison de ces projets par rapport à l'architecture utilisée, la topologie, la couverture et la taille en nombre de nœuds utilisés par le projet et quant au tableau 2.3, pour les mêmes projets, nous comparons la durée de vie des capteurs, le type de déploiement, la mobilité, la source d'énergie et le type de nœuds compris dans les projets.

	Infras	Topologie	Couverture	Connectivité	Nombre de capteurs
$O_2$ [MM02]	St. base	clusters	dense	Connecté	>1000
Zebranet [Jua+02]	St. base	graphe	dense	sporadique	>100
Glacier [Mar04]	ST. base	étoile	éparse	connecté	>100
Eleavage [But04]	St. base	graphe	dense	intermittent	>100
Bathymétrie [Mar03]	GPS	graphe	éparse	connecté	>100
Mer [Arg19]	Satellite	étoile	éparse	intermittent	>3000
Raisins [BTB04]	St. base	arbre	éparse	connecté	>100
Froid	Relais	arbre	éparse	intermittent	>100
Secours	PDA	étoile	dense	connecté	>10
Médecine	Ad-hoc	1 saut	dense	connecté	>10
Rx. électrique		Multi sauts	éparse	connecté	10-100
Track	Drone	graphe	éparse	intermittent	10-1000
Mines	Ad-hoc	graphe	dense	connecté	20-1000
Militaire	Ad-hoc	graphe	redondant	connecté	60-1000

Tableau 2.2 – Comparaison de quelques projets (suite)

	Durée de vie	Déploiement	Mobilité	Coût	Énergie	Type de nœuds
O <sub>2</sub> [MM02]	7 mois	manuel	fixe	200 \$	batterie	hétérogène
Zebranet [Jua+02]	année	manuel	mobile		batterie	capteurs, SB
Glacier [Mar04]	> 1 mois	manuel	mobile		batterie	capteurs, SB
Élevage [But04]	semaines	manuel	fixe	1000 \$	batterie	homogène
Bathymétrie [Mar03]	> 1 mois	manuel	passive		batterie	homogène
Mer [Arg19]	> 4 années	aléatoire	passive	15000 \$	batterie	homogène
Raisins [BTB04]	> 1 mois	manuel	fixe	200 \$	batterie	capteurs
Froid	> 1 an	manuel, itératif	occasionnelle		batterie	capteurs
Secours	jours	manuel	passive		batterie	homogène
Médecine	mois	manuel	mobile		batterie	capteurs
Rx. électrique	années	manuel	fixe		réseau	capteurs
Track	années	aléatoire	occasionnelle	200 \$	batterie	homogène
Mines	années	manuel	mobile		batterie	homogène
Militaire	années	manuel	fixe	200 \$	batterie	homogène

Tableau 2.3 – Comparaison de quelques projets

## 2.3 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil peut être composé de milliers de capteurs placés, dans une zone d'intérêt, pour détecter et mesurer un phénomène [Aky+02]. Le puits de données peut être dans la zone d'intérêt ou à l'extérieur de celle-ci. Les données générées par les capteurs sont traitées localement ou envoyées à un centre distant à l'aide d'Internet comme illustré par la figure 2.5. Dans les zones blanches étendues, les enjeux majeurs, lors de la conception de ces réseaux, sont spécialement la topologie, l'auto-configuration, la connectivité, la maintenance ou la consommation d'énergie. Cependant, l'importance de ces enjeux diffère selon l'objectif d'efficacité visé, le type fonctionnel du réseau ou même la technologie et le standard utilisé.

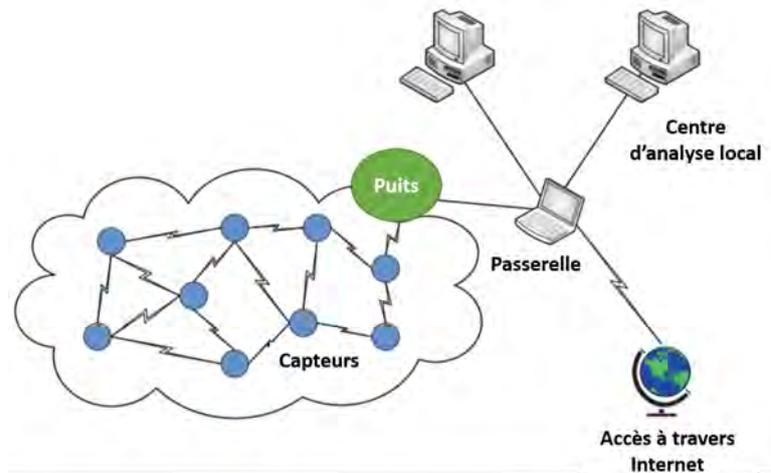


FIGURE 2.5 – Exemple d'une architecture de RCsF [Crn11].

### 2.3.1 Objectifs dans la conception des réseaux de capteurs sans fil

La viabilité d'un RCsF est estimée en fonction des critères qui définissent les performances et les critères communs à tous les groupes fonctionnels [Fah16] sont la durée de vie du réseau, la latence, la tolérance aux pannes des nœuds ou des liens, l'évolutivité et le débit.

#### — Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau est une mesure de l'efficacité énergétique. compte tenu que les capteurs fonctionnent avec des batteries le plus souvent, les protocoles de communication doivent permettre une faible consommation en énergie, afin de maximiser la durée de vie du réseau. Pour certaines applications, on peut la définir comme étant la durée pendant laquelle la moitié des capteurs du réseau consomment intégralement leur énergie [Aky+02].

— **La latence**

La latence est le temps moyen entre la transmission d'un paquet par une source et sa réception par la destination. Ce temps inclus le délai dans les files d'attente des capteurs ou des points de collecte (en cas utilisation des puits mobiles) et le temps de propagation.

— **Intégrité des données**

L'intégrité est l'absence d'erreur ou l'exactitude entre la donnée émise et celle reçue. Dans les RCsF, il y a un compromis à trouver entre la précision, la latence et l'efficacité énergétique.

— **Tolérance aux fautes**

Les capteurs peuvent cesser de fonctionner à cause des conditions environnementales difficiles, ou l'insuffisance d'énergie pour transmettre. Le RCsF doit pouvoir continuer de fonctionner lorsque ce genre d'évènement survient. Des protocoles de communications proposent de répliquer les liens de communications.

— **Evolutivité**

Un RCsF doit être évolutif, c'est-à-dire s'adapter à un ajout de nouveaux capteurs, à la complexité de la topologie du réseau.

— **Le débit**

Le débit est une métrique de performance commune à tous les réseaux. C'est le nombre de bits d'information par seconde dans une communication. Certaines applications ont besoin de plus de débit que d'autres, par exemple, les capteurs conçus spécialement pour les applications vidéo peuvent générer du trafic avec un débit supérieur à 500 kbits/s.

### 2.3.2 Types fonctionnels des réseaux de capteurs sans fils

On distingue quatre types fonctionnels de RCsF répartis en fonction des applications pour lesquelles ils ont été conçus [Raw+14]. Ces groupes fonctionnels sont :

— **RCsF terrestres**

Des milliers de capteurs sont déployés (à partir d'un avion par exemple) dans une zone d'intérêt et forment une architecture ad-hoc [Aky+02]. Les capteurs peuvent embarquer une source d'énergie comme des panneaux solaires pour pallier à la difficulté de maintenir ou de changer des batteries en fin de vie, dans certains environnements. Pour économiser de l'énergie et accroître la durée de vie du réseau, les techniques de routage multi-sauts, de l'agrégation et du duty-cycle sont utilisées. Ce type de réseau est utilisé dans l'étude de l'environnement, l'exploration ou le suivi industriel.

— **RCsF souterrains**

Dans ce type de réseau, les capteurs sont placés dans des caves, des conduits, des égouts ou sous la terre pour effectuer des études géophysiques par exemple [AS06]. Pour relayer les données aux stations de base, des relais terrestres sont utilisés [LL07]. Nécessitant des équipements particuliers, les RCsF souterrains sont plus chers à déployer et souffrent plus de l'affaiblissement des signaux [Raw+14]. Ces réseaux sont exploités dans l'agriculture, les mines souterraines, la sismologie, le suivi des réseaux d'eau potable.

— **RCsF sous-marins**

Les RCsF sous-marins consistent à placer les capteurs sous les masses d'eau comme les mers et océans [AS06]. Pour communiquer, les capteurs utilisent des ondes acoustiques dont l'utilisation introduit certaines contraintes telles qu'une bande passante très réduite, un long délai de propagation et des affaiblissements du signal [Hei+06; KM15]. Les réseaux sous-marins sont utilisés dans l'exploration des fonds marins, la détection de pollution, la prévention des maladies et des agents chimiques, la robotique sous-marine [Raw+14].

— **RCsF mobiles**

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être distingués selon la mobilité des nœuds qui les composent [Raw+14]. Les RCsF comprennent des nœuds mobiles qui se déplacent pour interagir avec leur environnement [YMG08]. La conception des RCsF mobiles inclut le modèle de déploiement initial, le modèle de mobilité, les techniques de localisation et de contrôle. Elle a aussi pour objet de minimiser la consommation d'énergie tout en garantissant le maintien de la connectivité et une bonne collecte de données.

### **2.3.3 Les technologies utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil**

Les standards de RCsF tentent tous de satisfaire les exigences des différentes applications telles que le débit, la portée, la sécurité et le niveau de consommation d'énergie. Un standard de RCsF est un ensemble de réalisations qui définit des propriétés de communication (fonctions et protocoles) requises. Il existe différents standards et technologies de RCsF chacun avec ses caractéristiques.

### 2.3.3.1 Les technologies à courte portée

#### IEEE 802.15

La famille IEEE 802.15 est un ensemble de standards qui se focalise sur le type de réseaux dits personnels WPAN (Wireless Personal Area Networks), et possède différentes standards qui proposent, souvent seulement les couches physique et liaison de données.

##### — WISA

Pour *Wireless Interface for Sensor and Actuators*, WISA est une technologie basée sur le IEEE 802.15.1 (connu aussi sous le nom de Bluetooth). Son faible taux d'erreur de l'ordre de  $10^{-9}$  en fait un potentiel candidat pour les applications industrielles qui nécessitent une grande qualité de service [CMH10].

##### — WirelessHart

WirelessHart est une technologie *open source* dont la couche physique est basée sur le standard 802.15.4, qui travaille à développer le protocole HART (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol*) [CMH10]. Celui-ci englobe, au-delà des couches physique et MAC (*Media Access Control*), les couches réseau, transport et application. Il ambitionne de garantir une robustesse face aux interférences et un délai de bout-en-bout meilleur que Zigbee et Bluetooth [Son+08]. Ce qui fait de cette technologie une meilleure candidate pour les applications de mesure et de contrôle industriel.

##### — ISA 100.11a

Développé en 2009 et basé, tout comme le WISA, sur IEEE 802.15.4, ce standard est conçu pour les applications qui tolèrent des délais de plus de 400 ms [Isa19; Wil08].

##### — ZigBee et ZigBee PRO

Développés par ZigBee Alliance, ZigBee est destiné aux applications de domotique et ZigBee PRO pour les réseaux industriels de contrôle et de télé-mesure [P.+07]. Leur couche physique, basée aussi sur le standard IEEE 802.15.4, scanne et sélectionne la fréquence qui a le moins d'interférence. Les couches supérieures (réseau et application) sont spécifiées et de la sécurité est introduite dans ce protocole [CMH10].

##### — 802.15.4e Factory Automation

Ce standard est une amélioration de la couche MAC du standard 802.15.4 pour supporter des applications de réseaux locaux et métropolitains notamment celles qui requièrent de faibles débits [All07]. Il s'inspire des technologies comme WirelessHart et ISA 100.11a et intègre certaines fonctionnalités tels que les technique d'accès (*slotted access*), dédiés ou non, les com-

munications multi-porteuses et le saut de fréquence [GBA16].

— **6LoWPAN**

Le standard 6LoWPAN défini dans la RFC-4944 [Mon19] adapte les communications IPv6 dans les réseaux de type 802.14.4, d'où son acronyme *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks* [Raw+14]. Il assure l'interopérabilité entre les nœuds de différents types d'adressage. C'est aussi le standard choisi par IPSO Alliance (*IP for Smart Objects*) pour le système de communication des objets intelligents [DV14].

Les caractéristiques de ces technologies sont comparées dans le tableau 2.4.

	WISA	WirelessHart	ISA 100.11a	ZigBee	802.15.4e F. A.	6LoPAN
PHY/MAC	802.15.1	802.15.4	802.15.4	802.15.4	802.15.1	802.15.4
Réseau/Transport	non spécifié	spécifié	spécifié	spécifié	non spécifié	spécifié
Application	non spécifié	spécifié	spécifié	spécifié	non spécifié	spécifié
Topologie	Mesh	Mesh	Mesh et étoile	Mesh	Mesh	Mesh
Batterie (jours)	x	760	1000	1000	x	365
Distance (m)	<50	10-100	100	10-100	<100	<100
Nombre de nœuds	120/cell	200	x	255	x	65536
Débit	>1Mbit/s	250 Kbit/s	250 Kbit/s	250 Kbit/s	x	250 Kbit/s

Tableau 2.4 – Caractéristiques de technologies sélectionnées

### **Autres technologies**

De nombreuses autres technologies ont fait leur apparition pour concurrencer celles basées sur 802.15.4 ou pour répondre au besoin croissant de mise à l'échelle, du débit, de faible consommation d'énergie, de portée, etc. Quelques unes de ces technologies sont :

— **Z-wave**

Avec une faible consommation d'énergie, Z-wave est dédiée aux applications de contrôle d'habitat en milieu urbain. Elle utilise la bande ISM, autour des 900 MHz et n'est donc pas affectée par les interférences venant d'autres technologies comme le Wi-Fi et les 802.15.4 [Wav19]. Les débits offerts sont environ de 40 kbit/s sur des portées de quelques dizaines de mètres [GP10].

— **ANT**

Conçu pour fonctionner dans la bande ISM de 2,4 GHz, ANT a une efficacité énergétique supérieure aux technologies 802.15.4 [Raw+14]. Elle supporte les topologies point-à-point, mesh, étoile et arbre. Elle est utilisée pour les applications de santé et le débit peut atteindre 1 Mbit/s [Ant19].

— **Wavenis**

Technologie candidate pour les transmissions longues distance, Wavenis est développée pour les applications de télémétrie environnementale et de contrôle industriel. Dans la bande ISM inférieure à 1 GHz, elle offre des débits qui peuvent atteindre 100 kbit/s [Wav].

— **EnOcean**

EnOcean est une technologie qui émerge. Elle n'utilise pas de batterie comme les autres technologie et les capteurs utilisent l'énergie de leur environnement immédiat (en utilisant des panneaux solaires par exemple) [Oce19]. EnOcean utilise les fréquences autour de 868 MHz et 315 MHz et a une portée de 300 mètres en communication libre [Mat+13].

Nous comparons ces technologies dans le tableau 2.5.

	IEEE 802.15.4 (ZigBee)	IEEE 802.15.4a	UWB IEEE 802.15.6	Blue- tooth	BLE	Z-wave	ANT	Wavenis	Dash7	EnOcean
Fréquence	868/915 MHz 2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	sub 1 GHz	2.4 GHz	868, 915, 433 MHz	433 MHz	868, 315 MHz
Débit max	250 kbps	110 Mbps	3 Mbps	1 Mbps	1 Mbps	40 kbps	1 Mbps	100 kbps	200 kbps	125 kbps
Portée	100 m	10 m	10-100 m	200 m	200 m	30 m		1-4 km	2 km	300 m
Batterie	Jours/années	années		mois	mois	années	année	années	années	
Consommation d'énergie	basse	basse	basse	très basse	très basse	basse	ultra basse	ultra basse	basse	ultra basse
Ouvert	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓
IPv6	✓			✓	✓	✓		✓		
Appli- cations	Télé- métrie	Track, loca- lisation	Domo- tique	Santé	Santé	Domo- tique	Santé	M2M	Paie- ment	Indus- trie

Tableau 2.5 – Comparaison des différentes technologies

### 2.3.3.2 Les technologies à longue distance

Communément appelées LPWAN pour *Low Power Wide Area Networks*, ces technologies sont développées pour faciliter l'Internet des Objets (IoT) en offrant des possibilités de communication à très basse consommation d'énergie et très longue distance. Parmi ces technologies IoT on distingue celles qui sont basées sur les réseaux mobiles cellulaires et celles qui ne le sont pas. Les technologies basées sur les réseaux mobiles telle que la 5G [Akp+17] par exemple, offrent de large couverture mais ont une consommation excessive d'énergie [Mek+19]. Par contre les technologies telles que Sigfox, LoRa et NB-IoT sont les leaders de la longue distance avec une faible consommation d'énergie.

Dans ce paragraphe, nous allons faire une étude comparative des technologies LPWAN.

#### **Sigfox**

Développée en 2010 à Toulouse, Sigfox [Sig19] développe ses propres solutions IoT à travers 31 pays. C'est un réseau propriétaire, les stations de base sont équipées de la technologie SDR (*Software-Defined Radio*) qui les connecte au réseau par de connexion de type IP [Lau+17]. Les débits offerts atteignent quelques centaines de bits/s pour des distances allant jusqu'à 40 km [UPS17].

#### **NB-IoT**

NB-IoT (*Narrow Band-Internet of Things*) est une technologie LPWAN basée sur la radio bande étroite (*narrow band*) Un canal radio est dit bande étroite lorsque le message transmis dans la bande passante ne dépasse pas excessivement la bande de cohérence du canal. Elle a été développée par le groupe de travail 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en 2016. Le protocole de communication de NB-IoT est basé sur LTE (*Long Term Evolution*). Les débit offerts sont de l'ordre de 200 kbits/s dans le sens descendant tandis qu'ils sont de seulement 20 kbits/s dans le sens ascendant [ALW16].

#### **LoRaWAN**

LoRaWAN est le protocole MAC de la technologie LoRa. Elle opère dans la bande ISM et est réputée être un standard ouvert, pourtant, la couche physique utilise une modulation à étalement de spectre qui est propriétaire au consortium LoRa Alliance [Sor+15]. Les débits théoriques sont compris de 300 bits/s à 50 kbits/s et les distances en visibilité directe atteignent les 30 km [Sor+15 ; Bor+16].

#### **Dash7**

Cette technologie *open source*, à très faible consommation d'énergie et longue distance est basée sur le standard ISO 18000-7, dans la bande des 433 MHz [Das19].

Les caractéristiques essentielles de Dash7 sont la durée de vie de sa batterie (des années), des portées sur 10 km environ, une faible latence, l'intégration de la mobilité et un débit allant jusqu'à 200 kbit/s [Wey+13].

Les détails techniques de ces technologies sont présentés dans le tableau 2.6.

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Fréquences	868 MHz Europe 915 MHz USA 433 MHz Asie	868 MHz Eu 915 MHz USA 433 MHz Asie	Bande de fréquence pour LTE
Bande Passante	100 Hz	125 et 250 kHz	200 kHz
Débit Max	100 bits/s	50 kbits/s	200 kbits/s
Bi-directionnelle	Limité Half-duplex	Oui Half-duplex	Oui Half-duplex
Max message/jour	140 (UL), 4 (DL)	Non limité	Non limité
Charge utile	12/8 (UL/DL) octets	243 octets	1600 octets
Distance	10 km (urbain) 40 km (rural)	5 km (urbain) 30 km (rural)	1 km (urbain) 10 km (rural)
Immunité aux interférences	Très élevée	Très élevée	faible
Authentification	×	AES 128b	codage LTE
Débit adaptatif	12/8 (UL/DL) octets	243 octets	1600 octets
Débit adaptatif	×	✓	×
Localisation	✓ (RSSI)	✓ (TDOA)	×
Compatible réseau tiers	×	✓	×
Standard	Sigfox & ETSI	LoRa Alliance	3GPP

Tableau 2.6 – Comparaison des différentes technologies LPWAN

## 2.4 Déploiement efficace des réseaux

Les réseaux de capteurs sans fil dans les zones blanches étendues sont constitués par un grand nombre de capteurs placés dans la zone d'intérêt. La manière dont les capteurs sont positionnés est très déterminante pour assurer une bonne couverture [WY06 ; Sak+15], une connectivité [Yun+10] du réseau et une longue durée de vie des batteries [WXA08]. Nous classons les techniques de déploiement des réseaux de capteurs sans fil selon trois caractéristiques que sont la méthodo-

logie de déploiement, les objectifs à atteindre et le rôle du nœud dans le réseau telles que présentées par la figure 2.6. Le rôle d'un nœud peut être un capteur, un relais, une station de base, un puits ou une combinaison de rôles.

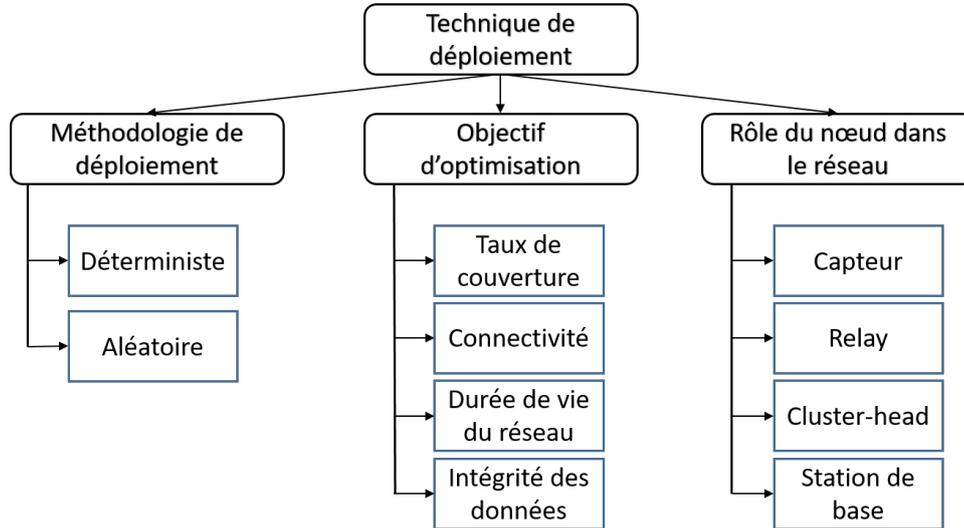


FIGURE 2.6 – Classification des méthodes de déploiement.

## 2.4.1 Méthodologie de déploiement

Les méthodes de déploiement aléatoires sont les plus utilisées dans les zones blanches étendues car elles sont très vastes et surtout pour les applications qui ne nécessitent pas une couverture totale de la zone d'intérêt [SMA14]. Il n'est pratiquement pas possible de placer les capteurs manuellement pour couvrir des milliers de kilomètres carrés, les capteurs sont alors jetés depuis des avions par exemple [Kho+14]. Par contre les méthodes déterministes permettent d'avoir une bonne couverture et une connectivité de tous les capteurs dans le réseau [Reb+15], pour des zones moins vastes [Bai+06].

### 2.4.1.1 Méthodes déterministes

Ce type de déploiement est le plus souvent utilisé dans les applications à l'intérieur des bâtiments [Che+06 ; Liu+07]. Il est aussi utilisé à l'extérieur où les zones d'intérêt ne sont pas très vastes et où un grand taux de couverture est nécessaire [Yun+10]. Pour les déploiements déterministes à l'extérieur, la zone d'intérêt est découpée suivant un motif régulier (grille, triangulation, hexagonal) [Wan+15].

La figure 2.7 illustre un exemple de pavage régulier d'une zone où un capteur est placé au centre de chaque cellule. Le pavage peut aussi se faire suivant des

motifs irréguliers de polygone, comme avec un diagramme de Voronoï [Wan+15] illustré à la figure 2.8. Ces méthodes sont simples et faciles mais elles nécessitent un grand nombre de capteurs pour couvrir entièrement des zones blanches, ce qui n'est pas économiquement rentable. La forme optimale de pavage en 2-D a une solution, par contre en 3-D la recherche de la solution optimale devient NP-difficile [DG12].

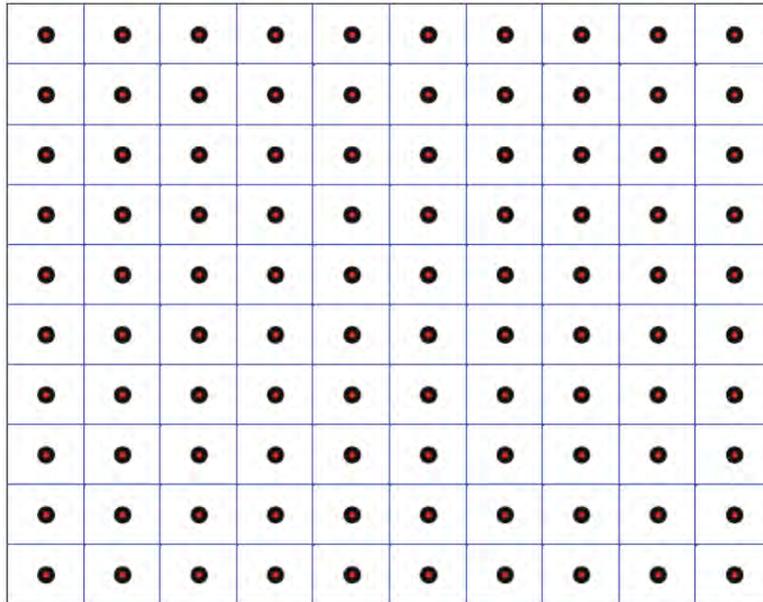


FIGURE 2.7 – Pavage sous forme de grille d'une zone.

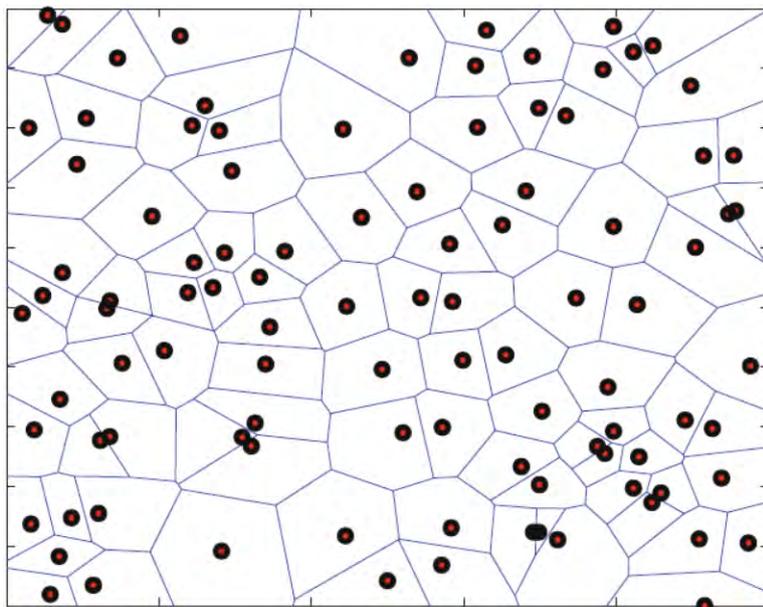


FIGURE 2.8 – Pavage sous forme du diagramme de Voronoï

### 2.4.1.2 Méthodes aléatoires

Souvent, c'est la seule possibilité de déploiement, lorsqu'il s'agit de zones blanches étendues par exemple, ou lorsqu'un RCsF doit être déployé dans une zone des catastrophes [SMA14]. La figure 2.9 montre un exemple de déploiement aléatoire où les capteurs (représentés par des cercles) sont uniformément placés dans une zone d'intérêt. Dans [IA04a], plusieurs fonctions de distribution ont été étudiées. Ces distributions sont ensuite classées selon le besoin des applications : grande couverture ou tolérance aux fautes et il est démontré qu'il y a une forme de distribution pour chaque type d'application [SMA14]. Une analyse des performances de diverses fonctions de densité de probabilité est faite dans [SMA12].

Par ailleurs, il existe aussi des méthodes de déploiement aléatoire qui ne suivent aucune distribution particulière, ce type de déploiement est fait à l'aide des méthodes heuristiques [PVM10; Mis+08]. Ces méthodes de déploiement prennent en compte des contraintes telles que l'efficacité énergétique. Par exemple, dans [PVM10], les capteurs sont placés dans des positions où non seulement la connectivité du réseau est assurée mais aussi les capteurs dépensent très peu d'énergie pour communiquer car les distances entre les voisins sont réduites.

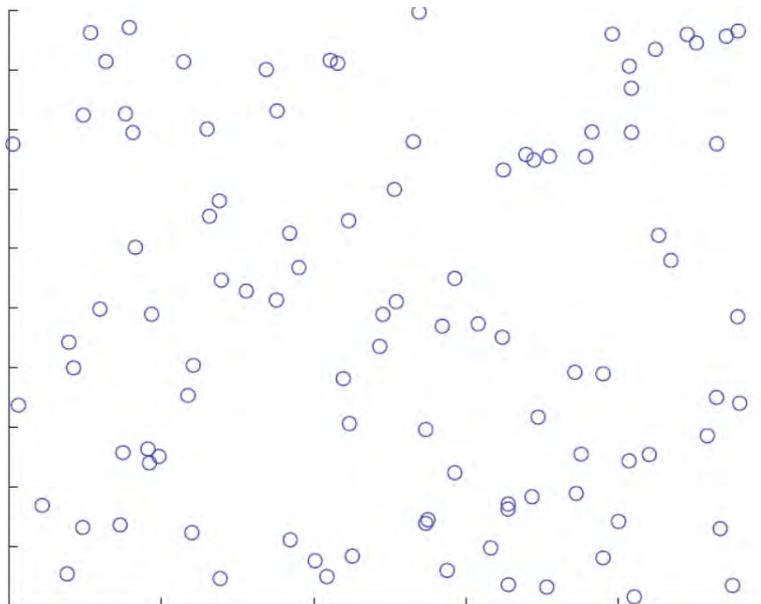


FIGURE 2.9 – Exemple de déploiement aléatoire

### 2.4.2 Objectif d'optimisation

L'idéal dans le déploiement des RCsF est que le réseau déployé puisse répondre à toutes les contraintes de conception qui assurent une longue vie au réseau. Ce-

pendant, dans la littérature, le plus souvent les méthodes de déploiement se focalisent plus sur des critères particuliers tels que la connectivité, la basse consommation ou la couverture [SMA14 ; IA04b ; Ali+16]. Dans ce paragraphe, nous étudions les méthodes de déploiement selon le critère sur lequel elles se focalisent le plus.

#### **2.4.2.1 Couverture de la zone d'intérêt**

Assurer une bonne couverture de la zone est un critère de performance dans le déploiement, dans de nombreuses méthodes [HT03 ; Yun+10 ; WY06 ; WXA08 ; KLB04]. Dans [HT03], l'auteur propose de répartir la zone d'intérêt en disques dont le rayon correspond à la portée des capteurs. D'autres travaux ont aussi proposé des formes plus régulières telles que la grille de motif rectangulaire [Cha+02 ; AT+10] ou triangulaire [PMA06]. Dans le travail présenté dans [Yun+10], un élément de polygone universel qui assure que chaque région de la zone peut être couverte par 6 capteurs, est étudié.

#### **2.4.2.2 La connectivité dans le réseau**

La connectivité est un élément sensible dans les RCsF, une déconnexion peut survenir en isolant certains nœuds du réseau : ce qui met fin la mission pour laquelle le réseau est déployé [SMA14]. Le  $k$ -connectivité est aussi étudié dans [Yun+10] et [Bre+05]. Il indique qu'il y a  $k$  chemins distincts entre chaque paire de nœuds.

#### **2.4.2.3 La durée de vie du réseau**

Il est démontré dans [WXA08] que la durée de vie du réseau dépend de la méthode de déploiement utilisée. Avec un réseau comprenant une grande densité de nœuds [CCZ05], la durée de vie peut être étendue en mettant une partie des capteurs en mode sommeil lorsqu'ils n'ont pas de données à transmettre.

#### **2.4.2.4 L'intégrité des données**

Assurer l'intégrité des données collectées dans les RCsF est un important objectif des méthodes de déploiement. La fusion des données peut garantir cette intégrité. Dans [ZW04], l'auteur résout le problème de placement des capteurs de point de vue fusion de données. Il a démontré que la distorsion d'estimation des données est liée à l'endroit où le capteur est situé lors de la mesure [GCBL04], par exemple les valeurs de l'échantillonnage de la courbe de température dépendent de la position du capteur [BBR17].

### 2.4.3 Méthodes basées sur le rôle du nœud dans le réseau

Les positions des nœuds n'affectent pas seulement la couverture mais elles ont aussi une influence sur la topologie du réseau. En effet, le réseau est déployé en respectant des architectures qui permettent d'améliorer certaines performances tel que le délai de livraison [MRX08 ; MM10].

#### 2.4.3.1 Déploiement de nœuds relais

Le déploiement des nœuds relais dans les RCsF est un élément important pour atteindre une efficacité de couverture et connectivité dans la topologie d'un réseau [MRX08]. Les relais permettent d'avoir des communications multi-chemins, ce qui diminue le risque de congestion, réduit les délais dans les files d'attente et augmente l'efficacité énergétique [DB17]. Les relais sont placés pour rétablir une connexion [RDV15]. Dans certaines topologies, tous les nœuds peuvent à la fois jouer le rôle de capteurs et de relais, par contre dans d'autres architectures les relais ne font que retransmettre les données reçues d'autres capteurs. On parle d'architecture *Two-Tiered*. Les relais agrègent les données des capteurs et les transmettent à la station de base ou au puits. c'est le principe de AFN (*Aggregation-and-Forwarding*) comme l'illustre la figure 2.10 [HSS05]. Le problème de minimisation du nombre de relais ainsi que leur positionnement est un problème complexe et NP-difficile [Suo06]. Cependant, il existe des algorithmes d'approximation qui calculent des solutions proches de l'optimale [MMH11 ; Bag+08 ; Zhu+13].

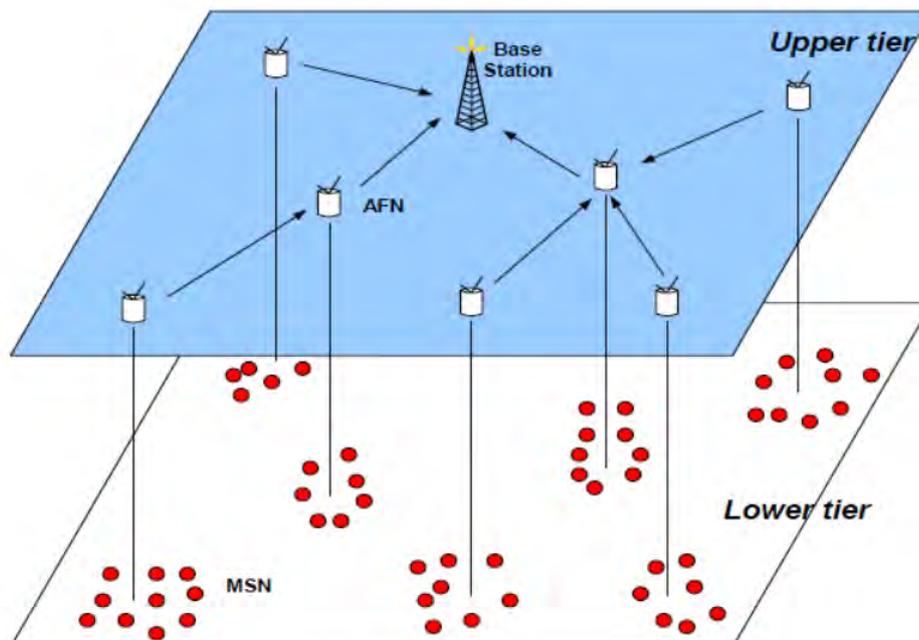


FIGURE 2.10 – Architecture hiérarchique d'un RCsF avec relais [HSS05].

### 2.4.3.2 Déploiement en cluster

Un cluster est un groupe de capteurs formé sans le but d'organiser la communication dans le réseau. Pour communiquer avec un nœud qui se trouve à l'extérieur du cluster, les capteurs passent par un nœud du cluster comme passerelle, il est désigné par *cluster-head*. Ce type d'organisation permet d'économiser l'énergie des capteurs ou d'éviter la congestion des liens [MK16].

La méthode du *clustering* est très utilisée car elle facilite les mécanismes de routage et l'évolutivité du réseau [YHE02]. Pour chaque *cluster*, un *cluster-head* est sélectionné [AY07] pour faire de l'agrégation de données avant de les transmettre au puits. Le plus souvent, les stations de base ont le rôle de *cluster-head* si l'architecture du réseau le permet [BMR04]. Il existe de nombreuses méthodes pour la formation des cluster [CW09] par exemple si un puits mobile est utilisé pour la collecte, les *cluster-heads* sont les nœuds qui se trouvent sur la trajectoire du puits [GZD11].

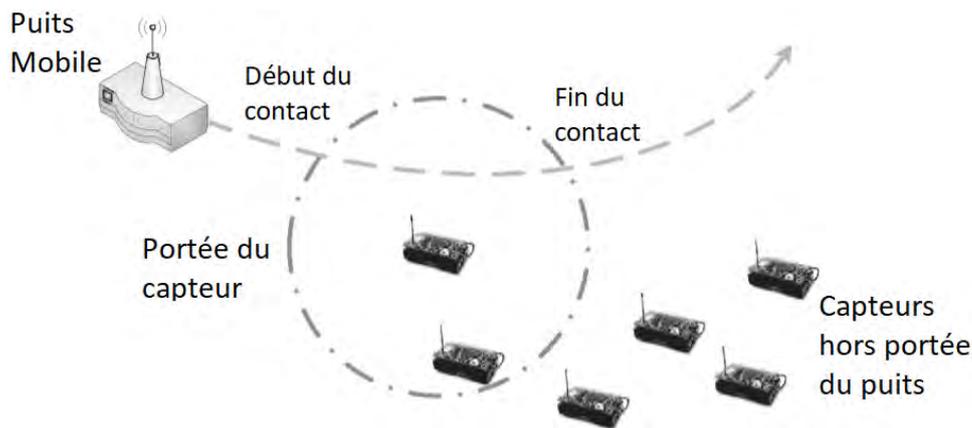


FIGURE 2.11 – Scénario d'utilisation d'un puits mobile.

## 2.5 Méthodes de collecte de données avec des puits mobiles

Lorsque l'accessibilité à la zone d'intérêt à cause d'un puit contagieux qui empêche de déployer des stations de base, des puits mobiles sont utilisés pour la collecte des données. En effet, lors de la conception des réseaux de collecte de données avec des puits mobiles, différentes phases sont prises en compte. La figure 2.11 illustre un scénario d'utilisation d'un puits mobile pour la collecte de données. Le puits mobile entre en communication avec un capteur lorsqu'il est dans sa portée. La **collecte de données** se fait uniquement durant le **temps de contact** qui est l'intervalle de temps entre le début et la fin de contact entre le puits et le capteur.

Nous définissons la **découverte** comme la méthode qui permet au capteur de détecter la présence du puits dans sa portée. Les capteurs hors de portée du puits peuvent à travers un mécanisme de **routage** transmettre leur données à des relais qui sont sur la **trajectoire** du puits mobile.

Nous classons les méthodes de collecte de données avec des puits mobiles selon la taxonomie illustrée par la figure 2.12.

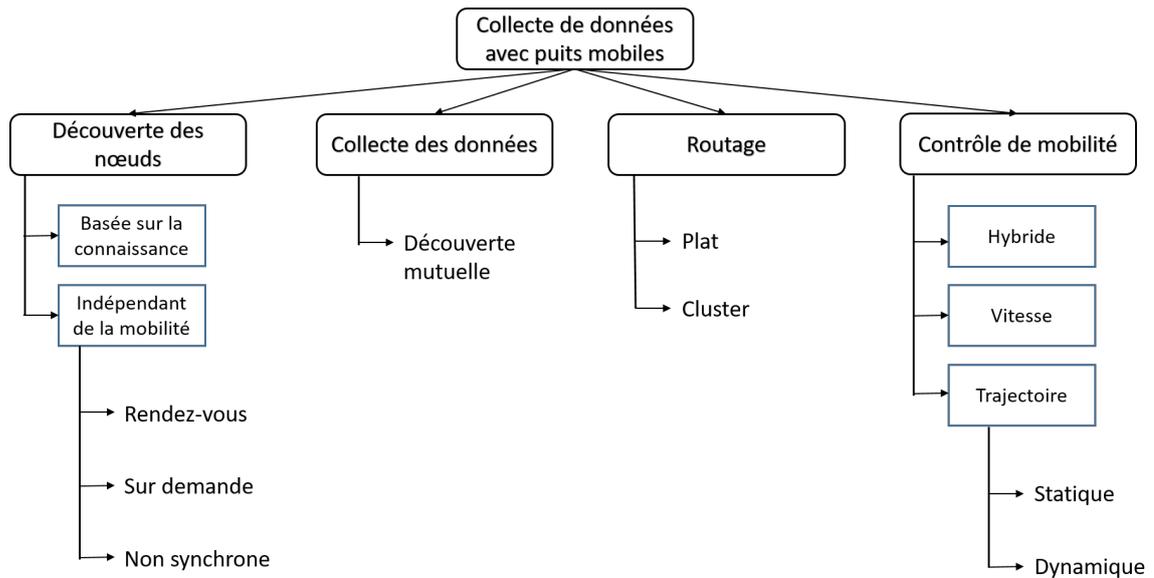


FIGURE 2.12 – Taxonomie des méthodes de collecte de données avec puits mobiles.

## 2.5.1 Découverte des nœuds

La découverte des nœuds est la phase au cours de laquelle les capteurs détectent la présence d'un puits mobile dans leur portée. Cette phase est très importante pour la collecte de données dans les zones où le collecteur passe de façon irrégulière. Il existe différentes approches basées sur la mobilité du puits.

### 2.5.1.1 Méthodes indépendantes de la forme de mobilité

Les méthodes de déploiement qui ne dépendent pas de la forme de mobilité du puits sont réparties en trois groupes qui sont les techniques basées sur le **rendez-vous**, sur la **demande** et les techniques **asynchrones**.

#### Sur rendez-vous

Les capteurs et le puits mobile sont synchronisés à des intervalles réguliers où la collecte doit être faite. Cette technique est utilisée par exemple dans [CSA03] où le puits est placé dans un transport public. Dans [ZW04], la synchronisation

est basée sur les positions GPS des capteurs et le protocole utilisé dans ce travail utilise le réveil radio pour mettre en activité les capteurs lorsque le puits est proche du lieu de rendez-vous.

### **Sur demande**

Dans ces méthodes, le puits indique sa présence aux capteurs [C.+02] qui sont continuellement en mode veille pour économiser leur énergie [J.+08]. Après la notification de sa présence, le puits demande aux capteurs de lui envoyer leurs données.

### **Asynchrone**

Avec cette technique, les puits sont continuellement à l'écoute et les capteurs transmettent leur données lorsqu'ils sont en mode réveil. Le restant du temps ils dorment [GMM08 ; GMM09]. Cette technique permet de prolonger certes la durée de vie des capteurs mais elle présente aussi le risque de ne pas collecter les données lorsque les capteurs ne sont pas actif [S.+03b] lors du passage du puits.

#### **2.5.1.2 Méthodes basées sur la prédiction**

Dans cette approche, les capteurs apprennent l'arrivée des puits mobiles en se basant sur la forme de leur mobilité. Dans [HME05], trois phases sont définies pour faciliter l'apprentissage aux capteurs : une phase où les capteurs dorment, aucune activité n'est enregistrée. Une phase de recherche au cours de laquelle les capteurs cherchent la présence d'un puits et enfin une phase de collecte lorsque la présence du puits est détectée. La phase de recherche correspond à un processus de prédiction et d'estimation de l'arrivée du puits [GZD11 ; SS07].

#### **2.5.2 La Collecte des données**

Après la détection d'un puits mobile dans sa portée, la phase de collecte peut commencer. Un capteur transmet alors entièrement ou en partie ses données au puits. La forme de mobilité et le débit de transmission ont un impact sur le volume de données collectées [A.+04 ; G.+07]. Il est démontré que le taux de perte décroît à mesure que le puits approche la position du capteur [G.+07].

#### **2.5.3 Méthodes de routage dans les réseaux de collecte**

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les capteurs sont déployés en nombre élevé pour couvrir entièrement le phénomène à étudier. Compte tenu de l'étendue de la zone d'intérêt et de la limite de la portée des capteurs, des protocoles de routage basés sur le multi-sauts sont nécessaires pour acheminer le trafic des

capteurs à la destination finale. Dans le réseau, le routage est une opération qui consiste à trouver une route (souvent la meilleure possible) entre une source et une destination [Aky+02].

Pour la conception des protocoles de routage pour les RCsF, des principes tels que l'efficacité énergétique et l'intégrité des données doivent être considérés pour la collecte de données dans les ZBE. Les techniques de routage, le plus souvent rencontrées dans les réseaux de collecte de données peuvent être regroupées en deux catégories qui sont le routage plat et le routage hiérarchique [AY07].

### 2.5.3.1 Les principes du routage

#### **Efficacité énergétique**

Le routage basé sur l'efficacité énergétique consiste à prendre en compte l'état de l'énergie disponible dans les batteries des capteurs ou l'énergie nécessaire qui serait dépensée suivant les différentes routes [Aky+02]. Il existe différentes approches basées sur le principe de l'efficacité énergétique comme par exemple la recherche de la route qui a l'**énergie maximale** [Sal+01]. Pour chaque route on calcule la somme des énergies de tous les nœuds qui la composent et on choisit la route qui a la plus grande énergie.

Par contre, pour le principe d'**énergie minimale** [SWR98], la route qui est choisie est celle suivant la quelle on dépense le moins d'énergie pour transmettre un paquet entre la source et la destination. Enfin, une autre technique consiste à déterminer la route qui a le **minimum de sauts** entre la source et la destination [CHC07].

#### **Agrégation de données**

Dans ce principe de routage, le RCsF est vu comme un arbre inversé [Aky+02], c'est-à-dire les données des capteurs sont agrégées dans plusieurs nœuds intermédiaires avant d'atteindre le puits final [HKB99]. La technique d'agrégation de données permet de résoudre le problème d'implosion et de congestion dans le réseau [Aky+02].

### 2.5.3.2 Routage plat

Le routage plat est une technique de routage dans laquelle tous les nœuds ont le même degré d'importance. Le réseau n'est pas hiérarchisé et une route est définie uniquement par les sauts intermédiaires [Kan+09] qui la composent.

De nombreux protocoles de routage basés sur OLSR (*Optimized Link State Routing Protocole*) sont proposés dans la littérature [C.+03]. OLSR est un protocole de

routage basé sur l'état des liens. Dans ce protocole, des nœuds sont choisis pour relayer des messages d'information et de contrôle [Cla+04].

Un exemple de ces protocoles est celui proposé dans [KG09]. IL est basé sur la qualité des liaisons afin de trouver le meilleur chemin qui conduit au puits. L'état des liens est diffusé dans le réseau suivant trois étapes [C.+03]. Dans la phase 1, le puits notifie sa présence et demande aux capteurs d'envoyer leurs données. Dans la phase 2, chaque capteur établit la liste de son voisinage qui permet de calculer tous les chemins possibles entre les capteurs et le puits. Enfin, dans la phase 3, les capteurs choisissent le meilleur chemin [A.+04 ; ATD03].

Dans [KM04], le protocole de routage proposé est basé sur l'efficacité énergétique c'est-à-dire la dépense minimale d'énergie.

### **2.5.3.3 Routage hiérarchique**

Avec le routage hiérarchique, les nœuds sont regroupés en clusters au sein desquels les cluster-heads jouent le rôle de sous-puits. Chaque cluster-head collecte les données du groupe de capteurs membres du cluster [H.+05]. Par exemple dans [GZD11], tous les cluster-heads sont situés sur la trajectoire du puits mobile. Les autres nœuds qui sont juste des membres de cluster calculent le plus court chemins (en terme de d'énergie dépensée) pour atteindre leur cluster-head. Ce type de routage fait face à plusieurs contraintes telle que la recherche du plus court chemin vers les cluster-head.

### **2.5.4 Le contrôle de la mobilité**

La mobilité du puits pose un problème pour la collecte de données. En effet, la mobilité peut limiter le volume de données collectées et ainsi réduire l'efficacité de la méthode de collecte. Par exemple, dans [IAS06], l'auteur évalue l'influence du modèle de mobilité (aléatoire ou déterministe). Les éléments à prendre en compte dans la conception du modèle de mobilité sont essentiellement le type de la trajectoire et la vitesse du puits qui permet de définir un compromis entre le temps de contact et le délai de collecte.

La trajectoire du puits mobile est le chemin que celui-ci suit dans la zone d'intérêt pour collecter les données de tous les capteurs. Au cours d'une mission de collecte, la trajectoire d'un puits peut être statique (connue d'avance et ne change pas) ou dynamique (adaptable en fonction des contraintes d'énergie par exemple). Le contrôle de trajectoire peut être utilisé aussi bien dans les réseaux à sources éparses que dans les réseaux denses.

#### 2.5.4.1 Contrôle des trajectoires fixes

Une trajectoire est fixe lorsqu'elle ne change pas au cours de la mission de collecte. Elle peut être de différentes formes. Par exemple, dans certains travaux [JJ05], la trajectoire que suit le puits mobile, dans un réseau très dense, est circulaire et est la même durant toute la collecte. Les différents capteurs, à travers un protocole de routage, cherchent le plus court chemin pour communiquer avec le puits mobile. Dans [S.+03a], ce sont des points de rendez-vous qui sont déterminés durant les missions de collecte. La trajectoire du puits n'a pas de forme particulière. Il peut s'agir d'un véhicule qui doit se déplacer d'un point de rendez-vous à un autre en se frayant un chemin à travers un champs de culture par exemple. Les méthodes de calcul de ces trajectoires dépendent de plusieurs paramètres tels que l'étendue de la zone d'intérêt, les obstacles physiques, le type d'application [MY06]. Des algorithmes de calcul de trajectoires sont étudiés dans [Y.+05; SRS04; GZD11].

Le travail dans [JS08] propose une méthode de calcul de trajectoire, suivant laquelle les capteurs communiquent avec le puits mobile en un saut, c'est-à-dire, des points de collecte sont choisis dans la zone d'intérêt de telle sorte que les capteurs ont au moins un point de collecte dans leur voisinage direct. Cette méthode augmente le délai de collecte par exemple lorsqu'il s'agit d'un grand réseau et le puits mobile doit embarquer beaucoup d'énergie pour pouvoir visiter tous les points. Pour résoudre ce problème, la même idée est reprise dans [JS10] en limitant le nombre de points de collecte et en augmentant le nombre de sauts entre les capteurs et les points de collecte.

#### 2.5.4.2 Trajectoires dynamiques

La trajectoire d'un puits mobile peut être dynamique. Par exemple, dans l'approche de découverte à la demande [WME04], dans ce travail, il s'agit de la conception d'un réseau tolérant au délai dans lequel le puits mobile commence à suivre une trajectoire par défaut. Périodiquement, il informe l'ensemble des capteurs de sa position et lorsqu'un capteur a des données à transmettre, il envoie un avis de visite au puits mobile. Celui-ci vient le visiter pour collecter ses données et une fois qu'il finit de collecter les données, il retourne sur sa trajectoire par défaut.

Une approche similaire est reprise dans [CYCY07]. Dans ce travail, il n'y a pas de trajectoire par défaut, le puits est dans un état initial stationnaire et demeure à l'écoute de la station de base. Lorsqu'un capteur a des données à transmettre, il émet un avis à la station de base. La station de base informe à son tour le puits

mobile. Enfin, il cherche une route pour visiter le capteur et collecter ses données, puis il retourne à la base.

#### **2.5.4.3 Impact de la vitesse du puits mobile sur la méthode de collecte**

Dans les techniques de collecte de données avec des puits mobiles, un **tour** est effectué lorsque le puits visite les points de collecte désignés dans le réseau. La vitesse du mobile est un élément important dans l'évaluation de la latence engendrée dans la collecte. Un compromis doit être trouvé car une grande vitesse entraîne certes une courte latence mais une partie des données risque de ne pas être collectée [KGH13].

Inversement, de petites valeurs de vitesse, notamment lorsqu'il s'agit de puits mobiles terrestre [MY07], est la cause principale de longs délais de collecte. Pour des applications qui sont sensibles aux délais, des algorithmes sont étudiés pour adapter la vitesse du puits mobile [A.+04]. Ces méthodes visent à limiter le délai en dessous d'une valeur seuil. Une approche similaire, de limitation de délai, est étudiée dans [Som+06], pour des réseaux de collecte multi-sauts. Les capteurs sont organisés en clusters, et le puits mobile adapte sa vitesse en fonction de l'état de congestion des liens. Les zones qui ont des risques de congestion sont celles où se trouve une forte densité de capteurs avec une grande probabilité de transmettre des données et la qualité des liens physiques peut donc facilement se dégrader. Dans ces zones, le puits adopte une faible vitesse pour maximiser le volume de données collectées.

L'efficacité de la collecte en se basant sur le contrôle de la vitesse du puits est également étudiée dans [RK10]. Le calcul de la trajectoire du puits se fait selon des prédictions [RK08] : la vitesse que le mobile adopte est élevée lorsqu'il parcourt la distance qui sépare deux points de collecte et elle est la plus faible possible lors de la collecte.

#### **2.5.4.4 Méthodes hybrides**

Au lieu de définir de méthodes qui calculent séparément la trajectoire et la vitesse du puits mobile, des techniques proposent de faire les deux à la fois. Il existe des travaux qui ont adapté cette méthode hybride [SB18 ; KMA16 ; NF16 ; GZD09]. Elle a pour objectif de limiter le délai de collecte et de trouver un chemin optimal pour le puits mobile. Elle s'applique dans les cas des puits mobiles terrestres et aériens. Par exemple, dans le modèle proposé dans [M.+05] et [S.+08], le puits mobile rend visite aux différents points de rendez-vous suivant une trajectoire calculée et

qui ne change pas durant la mission de collecte. Ce modèle prend en compte la dépense d'énergie, le nombre de sauts et la latence de collecte.

Le type de puits mobile a une importance dans la conception d'un réseau de collecte de données dans les zones blanches étendues. Même s'ils présentent des avantages en offrant plus de flexibilité que les puits statiques, ils peuvent constituer un facteur limitant l'efficacité de la collecte. Dans le paragraphe suivant, nous étudions les différents types de collecteurs et leur impacts sur les méthodes de collecte.

## **2.5.5 Type de puits mobiles**

### **2.5.5.1 Les puits terrestres de collecte**

Dans l'objectif de mieux couvrir les zones d'intérêt et d'assurer une bonne couverture des sources de données, des solutions consistaient à installer de nombreuses stations de base et de déployer un grand nombre des capteurs [DTH02]. Mais ces solutions ne sont faisables que dans les zones d'intérêt de petite superficie. Pour les zones vastes comme les déserts, les forêts ou les mers, de nouvelles approches consistent à utiliser des MULEs (*Mobile Ubiquitous LAN Extensions*) [Sha+03].

Les MULEs sont en fait des puits mobiles qui embarquent des stations de base ou des puits de données. Ils peuvent être des animaux [Jua+02], des personnes ou le plus souvent des véhicules [MY07 ; PFH04]. Ainsi, une architecture à trois plans est proposée [Sha+03 ; JSS05]. Le premier plan contient les capteurs connectés en ad-hoc, le second contient les MULEs qui peuvent être des puits mobiles intermédiaires et le dernier plan contient les serveurs d'application et les points d'accès à Internet [Sha+03].

Cependant, les puits mobiles terrestres ont vite montré leur limite dans le domaine très évolutif des réseaux de capteurs sans fil. Ces limites sont, par exemple, de longues latences causées par la faible vitesse des puits mobiles et leur inaccessibilité dans certaines zones [NP04].

### **2.5.5.2 Les satellites**

Le problème d'accessibilité peut être résolu par l'utilisation des liaisons satellites [PVP13 ; PSTA01]. Un satellite couvre une grande surface de la terre, par exemple trois satellites en orbite géo-stationnaires suffisent à couvrir toute la terre, même si cette orbite ne peut être utilisée pour les capteurs sans fil. En

plus d'offrir une couverture universelle, les satellites répondent parfaitement aux besoins en débit de plusieurs types d'application des RCsF [Cel+13]. De plus c'est le support idéal pour les applications qui sont critiques ou temps-réel.

Dès lors, dans divers projets (surveillance d'infrastructure dans les zones blanches) des liaisons satellites sont utilisées. Par exemple, dans [SHK06], une application de surveillance des forêts en Corée du Sud est proposée. Les capteurs de température et de vitesse de vent sont déployés dans de vastes étendues de forêt. Les données sont envoyées à des serveurs Web localisés dans les grands centres urbains à travers des liaisons satellites.

Des problèmes techniques restent encore à être résolus, comme la synchronisation [PVP13]. D'autre part, le grand plus désavantage de l'utilisation des satellites pour les pour la collecte de données est le coût d'exploitation qui reste exorbitant.

### **2.5.5.3 Les ballons stratosphériques**

Face au problème des coûts d'exploitation des satellites, une solution qui offre aussi une large couverture à moindre coût serait d'utiliser les ballons gonflés à l'hélium. Dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, c'est Google qui est le précurseur de cette solution avec son projet LOON [Kat14]. Ce projet vise à offrir un accès haut débit de type 3/4G à des zones très reculées des centres urbains. Une couverture de 40 kilomètres à la ronde est assurée par un seul ballon positionné dans la stratosphère avec une autonomie de plus 180 jours.

Des tests de ce projet ont été effectués dans de nombreux pays où la connectivité à été mis à l'épreuve. Des résultats satisfaisants ont été obtenus, ce qui promet un avenir certain à ce support de communication dans les RCsF. Cependant, des problèmes liés à la gouvernabilité et à la gestion de la trajectoire du ballon dans l'atmosphère a été la cause de plusieurs chutes prématurées de ces ballons [Loo19].

### **2.5.5.4 Les drones**

Le puits mobile de collecte de données le plus couramment rencontré dans la littérature ces dernières années est le drone. En effet, les drones offrent plus de flexibilité par rapport aux autres puits mobiles : leur système de navigation est mieux maîtrisé que celui des ballons atmosphériques, ils ont un coût d'acquisition insignifiant par rapport aux satellites, et n'ont pas de problème d'accessibilité comme les véhicules terrestres [Sun+08].

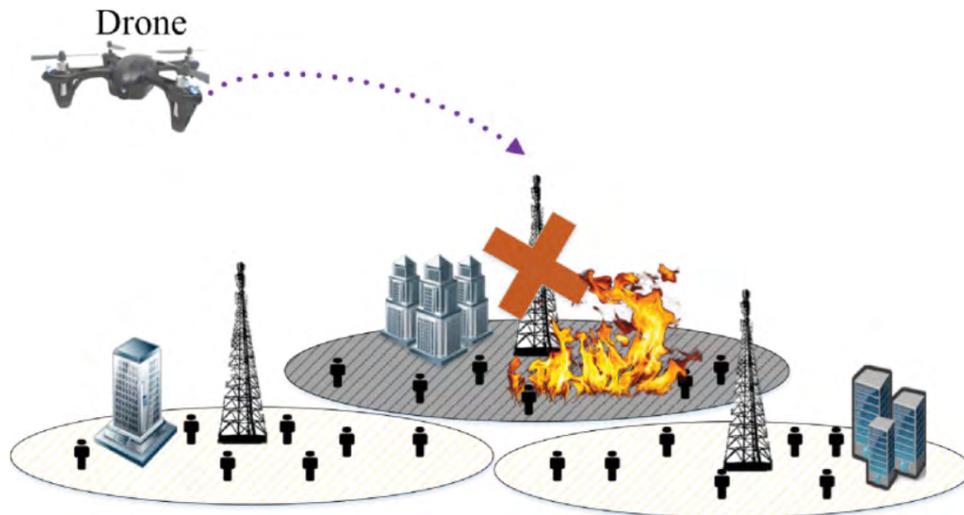


FIGURE 2.13 – Scénario d'utilisation de drone.

Les drones sont utilisés pour servir de point d'accès [Gom15] en cas de catastrophe qui détruit les infrastructures existantes. La figure 2.13 donne une illustration, le drone est utilisé comme station de base pour remplacer celle qui est endommagée par un incendie.

Cependant l'utilisation des drones n'est pas illimitée non plus [Moz+19]. Ils offrent certes de possibilités de communication en visibilité directe, les recherches continuent dans la modélisation des communications air-sol et l'amélioration leur efficacité énergétique dans la collecte de données. De plus, dans les applications pour les zones blanches étendues, les drones sont limités par la quantité d'énergie embarquée qui ne leur donne pas une grande autonomie pour couvrir de vastes territoires. Les conditions climatiques de certaines zones rendent pratiquement impossible l'utilisation des drones, c'est par exemple, dans les déserts des régions arides où sévissent de fréquentes tempêtes de sable.

Les puits et stations de base mobiles permettent d'étendre l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil à des zones très vastes (montagneuses, désertiques, forestières, maritimes). Des problèmes tels que la recherche de meilleures trajectoires, de nouveaux protocoles de routage et de collecte peuvent, cependant, réduire leur fiabilité. Par exemple, l'utilisation des puits de collecte mobiles induisent des délais dans la méthode de collecte. Souvent ces délais sont tellement grands que leur utilisation s'avère impossible pour certaines applications. Dans la suite de ce chapitre, nous étudions les réseaux de capteurs sans fils tolérants aux délais.

## 2.6 Les réseaux de capteurs sans fil tolérants au délai

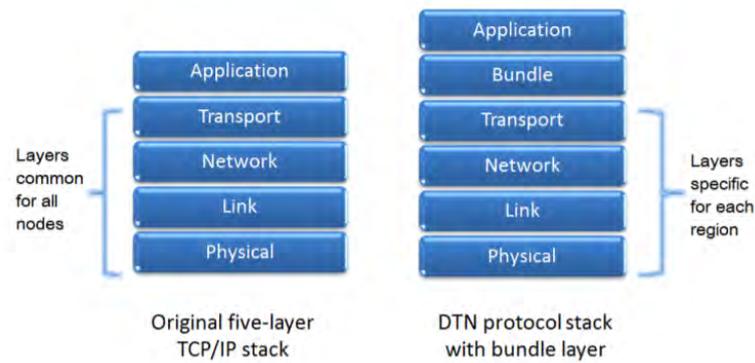
### 2.6.1 Développement des réseaux tolérants au délai DTN

Les réseaux tolérants au délai, DTN (*Delay Tolerant Networks*), désignent les réseaux conçus pour des transmissions sur des distances extrêmement longues telles que les communications spatiales ou inter-planétaires [VZS12]. Dans les environnements de type DTN, de longs délais qui peuvent se mesurer en heures, jours, voir même en années, sont fréquents [VZS12]. Pour ce type d'environnement, le modèle classique du protocole Internet ne peut pas être appliqué pour l'interconnexion des réseaux [Jon+08]. Ainsi, les recherches débutèrent sur les moyens de concevoir de nouveaux protocoles pour des communications interplanétaires [DFS99 ; Fal03]. A l'issue de ces premiers travaux, le protocole TCP a pu être adapté pour des communications entre Mars et la Terre, qui a permis d'atteindre des débits de 1600 bits/s à 250 kbits/s [KAF11] même si le taux d'erreur binaire TEB se situait entre  $10^{-9}$  à  $10^{-7}$ , les conditions atmosphériques sont responsables de 5% des pertes de paquets [VZS12].

#### 2.6.1.1 Architecture des réseaux DTN

Les réseaux DTN constituent des réseaux hétérogènes régionaux [Bur+03] et chaque région représente un type de communication homogène dans laquelle la technologie utilisée est différente de celle d'une autre région [Fal03]. Les données sont transmises de région en région jusqu'à atteindre la destination finale, à travers des passerelles (*gateways*). Les passerelles stockent les données collectées dans chaque région et les transmettent à une autre passerelle lorsque la connectivité est rétablie : c'est le principe de *stock-and-forward*. Dans les DTN, l'unité d'information échangée est appelée *Bundle* et une couche spéciale du même nom est ajoutée en dessus du protocole TCP (le plus souvent) pour la gestion de cette unité d'information. La figure 2.14 donne une illustration de l'architecture en couche des réseaux tolérants au délai par rapport à une architecture TCP/IP classique.

La caractéristique essentielle de la couche *Bundle* est de stocker les données en attendant l'établissement de la connexion. Les bundles reçus peuvent ainsi être stockés durant de longs temps allant de quelques minutes, des jours ou des années [Fal03]. Deux documents servent de base pour la conception des protocoles et le déploiement de l'architecture des réseaux DTN : Ce sont les RFC 5050 et 4838.



(a) Variation de flux dans les liens qui dégènèrent

FIGURE 2.14 – Architecture des réseaux DTN.

### 2.6.1.2 Mise en oeuvre de protocole des réseaux DTN

Les applications et les protocoles de communications dans les DTN doivent prendre en compte certaines caractéristiques qui conditionnent la communication entre deux régions différentes et différencient les DTN des autres réseaux.

- **Une connectivité intermittente.** S'il n'y a pas de chemin entre la destination et la source de données ou même entre deux passerelles, le réseau devient ainsi déconnecté.
- **délai long et variable.** En plus de l'intermittence de la connectivité, des délais de propagation pour les sources très éloignées sont introduits. Par exemple, il y a le délai d'attente des données stockées dans les différentes files d'attente des points de collecte. Ce dernier est plus important que le délai de propagation (entre source et point de collecte) puisqu'il dépend fortement de la fréquence d'établissement de la connexion.
- **Des débits variables.** Les données générées par les sources sont envoyées aux points de collecte (passerelles). Ces points de collecte communiquent avec les collecteurs mobiles avec des débits différents.
- **La synchronisation :** Dans les DTN, les passerelles entre différentes régions doivent être synchronisées à la même horloge [Llo+09] car c'est la condition qu'elles puissent communiquer lorsqu'elles sont dans la portée, les unes des autres.
- **La fragmentation :** Les passerelles sont aussi comme des points de collecte pour une région DTN. Les données stockées sont alors fragmentées en unités d'information avant d'être retransmises à la prochaine passerelle [WEH09].

## 2.6.2 Implémentation des DTN dans les zones blanches étendues

### 2.6.2.1 Cas général des réseaux de capteurs sans fil

Le concept des DTN a évolué depuis ces dernières décennies. Par exemple, depuis le projet IPN (*InterPlanetary Network* [DFS99]), les protocoles pour les DTN peuvent aussi servir, sur Terre, dans les réseaux à forte intermittence des liens [VZS12]. Avec l'avènement des réseaux de capteurs sans fil, le besoin de déployer des infrastructures de réseaux de collecte de données dans des environnements complexe, a poussé à l'utilisation de différents moyens opportunistes de collecte tels que les drones, les ballons, les véhicules terrestres. Ces derniers introduisent inmanquablement des latences ; même si elles sont largement inférieures à celles observées dans les DTN de communications spatiales, les réseaux de capteurs sans fil à puits mobiles fonctionnent selon le même principe.

Certains nœuds du réseau qui sont visités par le puits mobile reçoivent les données de ceux qui ne le sont pas, stockent ces données et les retransmettent au puits quand celui-ci rentre dans leur portée. Alors, ces types de réseaux doivent être tolérants au délai dû à l'intermittence de la connectivité [Tov+10 ; HYY13 ; DKN11].

Des exemples de mise en oeuvre sont : le DTNLite [NP04], qui est une architecture DTN pour les réseaux de capteurs sans fil sur TinyOS réalisée sur des nœuds Mica. DTNLite a pour objectif de réduire le taux de perte des données dans des environnements où les nœuds peuvent être mobiles avec des fréquentes pertes de connectivité. ContikiDTN [Lou06] est une autre implémentation de protocole DTN pour les capteurs sans fil. Elle vise à rendre efficace l'échange des messages de gestion et de synchronisation lors de l'établissement de la connectivité entre les capteurs d'un même réseau ou entre un réseau de capteurs sans fil et Internet.

### 2.6.2.2 Cas particulier des zones blanches étendues

Dans les réseaux pour zones blanches étendues, certaines entités du réseau peuvent être mobiles, c'est le cas de la collecte opportuniste avec des puits mobiles. Le principe "stock-and-forward" classique hérité des DTN devient alors "stock-carry-and-forward" [Kui08], car les puits mobiles (ballons stratosphériques, drones) ne sont pas la destination finale des données collectées. Ils établissent une connexion avec d'autres nœuds afin de collecter leur données [SBO19].

Dans l'architecture des réseaux DTN de capteurs sans fil avec des puits mobiles, des nœuds sont désignés dans le réseaux pour jouer le rôle de points de collecte ou points de rendez-vous avec les puits mobiles [ZTW17 ; Xin+08 ; Jon+08].

Les points de collecte correspondent aux passerelles dans les DTN classiques car ce sont eux qui collectent, stockent et retransmettent lorsqu'ils sont connectés aux puits mobiles. Ils sont placés sur la trajectoire du puits mobile [GZD11]. Pour améliorer la durée de vie des points de collecte, des protocoles proposent de les synchroniser au temps d'arrivée des puits mobiles [Gu+13 ; Yun+13].

Ainsi, les DTN ont aidé à déployer des infrastructures réseau dans les zones blanches étendues. On peut citer les exemples d'applications tels que DakNet [PFH04], KioskNet [Guo+11], des délais allant de quelques heures à quelques jours sont tolérés dans des réseaux qui fournissent des services Internet à des zones très reculées des centres urbains. ZebraNet [Jua+02] est un projet qui collecte des informations sur l'habitat naturel des espèces menacées d'extinction sur une zone plus 100 km<sup>2</sup>.

SUAAVE [WTJ09] et RESCUECELL [Res13] sont deux projets d'alerte et de secours dans des environnements où surviennent des catastrophes. Dans ces applications, des drones sont utilisés pour collecter des données des capteurs déployés au sol. Pour réduire le délai de collecte, des algorithmes de routage qui limitent le nombre de sauts, dans un environnement ad-hoc [Jon+08], sont utilisés [HYM16]. D'autres applications, présentées dans le paragraphe 2.2.2 sont conçues sur le principe des DTN.

Dans toutes ces applications, le problème qu'elles ont en commun est : Comment les données sont transmises aux points de collecte avec le minimum possible de relais ? et comment répartir la charge des données entre les différents points de collecte afin de ne pas surcharger certains plus que d'autres.

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le contexte technique dans lequel s'inscrit l'ensemble de nos contributions. Nous avons classé les différents domaines et les différentes activités que l'on rencontre le plus souvent dans les zones blanches étendues. Ces applications sont de plusieurs types et ont des caractéristiques souvent différentes les unes des autres. La meilleure infrastructure de collecte des données est sans doute les réseaux de capteurs sans fil en général et en particulier les technologies de communication longue distance à faible consommation d'énergie. Nous avons étudié et classé ces différentes technologies qui peuvent être utilisées dans les applications des réseaux pour zones blanches étendues. Puis, nous avons étudié les problèmes de conception des réseaux dans les zones blanches, des

problèmes tels que la déploiement des capteurs, des relais ou des puits. Les nombreuses solutions qui existent dans la littérature proposent des méthodes pour des déploiements dans de zones qui ne sont pas très vastes, et le souvent, les solutions qui assurent une bonne couverture et un connectivité permanente, sont les techniques de déploiement déterministes. Dans ce type de déploiement, les différents nœuds du réseau sont placés manuellement dans des positions définies au préalable. Cependant, le déploiement déterministe n'est pas possibles dans les zones blanches étendues qui couvrent des superficies de 40000 kilomètres carrés par exemple.

Nous avons aussi étudié le problème de collecte de données dans les zones blanches où nous avons déterminé les différentes méthodes de collecte qui incluent des puits statiques (placés dans la zones d'intérêt ou à l'extérieur), des puits mobiles qui présentent plus de flexibilité que les puits statiques. Les puits mobiles ont l'avantage de la mobilité et de l'accès aux endroits très éloignés. Des protocoles sont proposés pour résoudre les problèmes induits par l'utilisation des puits mobiles tels que la dissipation d'énergie des certains nœuds, la synchronisation des capteurs avec les puits mobiles et surtout les délais de collecte.

Nous nous inspirons de toutes ces avancées pour proposer des solutions de collecte de données dans les zones blanches étendue.



## **Chapitre 3**

# **Méthodes de déploiement de réseaux pour les zones blanches étendues**



### 3.1 Introduction

Les zones blanches étendues (ZBE) sont décrites comme de grandes étendues inhabitées ou quasi-désertiques. Sous-développées, elles souffrent d'un manque d'infrastructures de tout type : réseau routier maillé, villes, fourniture d'électricité et de moyens de communication. Cependant, quelques îlots d'activités sont éparpillés dans ces grandes étendues, distants les uns des autres de dizaines voire de centaines de km. Ces centres d'activités peuvent être par exemple, des mines, des postes frontières ou des exploitations forestières. Ces activités peuvent être concernées par l'utilisation de réseaux de capteurs, pour surveiller l'environnement (secousse sismique, feux de forêt), les déplacements humains à une frontière, ou un équipement comme un pipeline oléoduc ou gazoduc. Couvrir ces immenses zones avec des réseaux de capteurs sans fil (*WSN*, *Wireless Sensor Networks*, en anglais) [Aky+02] représente alors un défi, en termes de couverture, de portée des liens radio et de connectivité du réseau. Les satellites sont un bon moyen pour assurer la couverture des ZBE mais leur coût d'exploitation est très élevé pour des applications qui génèrent du trafic intermittent avec un faible débit. Dans le chapitre 2, nous avons présenté plusieurs technologies réseau longue distance à faible consommation d'énergie (*LPWAN*, *Low Power Wireless Area Network* en anglais) [Aug+16] qui nous paraissent appropriées aux ZBE mais cependant limitées à une dizaine de km. Il est donc nécessaire de déployer un réseau multi-sauts qui permet à une donnée collectée par une source d'être relayée de nœud en nœud jusqu'au point de collecte, ces nœuds relais étant à portée radio les uns des autres. Le problème à résoudre est celui du déploiement de ces nœuds relais de manière à interconnecter toutes les sources de données, puis à créer un graphe qui relie les nœuds et les sources jusqu'au point de collecte. En plus des contraintes d'accessibilité, nous tiendrons compte du coût de nos solutions qui est exprimé en termes de ressources à déployer pour avoir un réseau d'interconnexion.

Le problème du déploiement d'un réseau de capteurs sans fil pour interconnecter des sources à un centre de collecte a été traité dans de nombreuses méthodes, telles que les méthodes de déploiement aléatoires [YA08; HHW15] ou déterministes [DG12; Yun+10; Bai+06]. Toutes ces méthodes de déploiement apportent une solution certes pour bien couvrir et interconnecter les sources dans la zone d'intérêt mais ne prennent pas en compte les caractéristiques des zones blanches étendues à savoir leur grande étendue, leurs conditions d'accès difficiles ainsi que le besoin d'une infrastructure peu coûteuse. C'est dans ce contexte que nous proposons une nouvelle méthode de déploiement qui assure une connectivité totale de toutes les sources à moindre coût. Elle consiste à placer un nombre minimal

de relais judicieusement placés afin de connecter toutes les sources entre elles et avec le centre de collecte. Notre méthode appelée **Méthode de déploiement bio-inspirée de réseau** est basée sur la croissance du Physarum, un organisme biologique qui est capable d'optimiser les ressources de son corps en une structure minimale afin de prolonger sa durée de vie.

## 3.2 Heuristique bio-inspirée basée sur le Physarum

Pour rappel, notre méthode de déploiement vise à interconnecter un certain nombre de sources de données à un point de collecte unique grâce à des nœuds relais placés dans des endroits appropriés (accessibles ou alimentés en énergie) au moyen d'un LPWAN. Nous cherchons à minimiser le nombre de ces relais, sans garantir l'optimalité car l'existence de plusieurs chemins entre des sources et le puits permet de traiter les pannes de relais ou les coupures de liens. En effet, les LPWAN et les WSN sont réputés pour la fragilité de leurs liens de communications sans fil, conséquence de fréquents changements dans leur topologie [Aky+02].

Ce problème d'interconnexion avec un nombre minimal de relais ressemble au problème de construction d'un arbre minimal de Steiner, en anglais *MST*, *Minimum Steiner Tree*, sur l'ensemble des sources. Le problème de l'arbre minimal de Steiner est un problème de type NP-difficile [Suo06 ; VoB92] pour lequel il existe des heuristiques efficaces [MRX08 ; MM10 ; MM14 ; SMA12 ; Das+11]. Cependant, l'arbre ainsi construit étant minimal, il n'est pas du tout tolérant à la défaillance d'un lien. En effet, dès qu'un lien ou une branche de l'arbre casse, au moins une source, et le plus souvent plusieurs, est déconnectée du réseau.

Pour satisfaire aux contraintes de notre problème et aux propriétés que nous venons d'évoquer, nous avons proposé une nouvelle méthode de déploiement basée sur une heuristique qui mime la croissance d'un organisme biologique appelé physarum [TKN07 ; NYH04]. Notre heuristique permet de choisir de façon optimale des positions parmi un ensemble de candidates et y placer des nœuds relais afin d'effectuer l'interconnexion de toutes les sources de données.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle d'optimisation du Physarum.

## 3.3 Hypothèses et considérations

Dans la zone d'intérêt se trouve un ensemble de sources de données. Ces sources de données sont suffisamment éloignées les unes des autres de telle sorte

qu'elles ne peuvent ni communiquer directement avec le centre de collecte, ni directement entre elles. Pour faciliter notre étude, nous supposons que le centre de collecte est placé au centre de la zone d'intérêt. Un ensemble de positions sont pré-définies pour y placer des relais, du fait de leur accessibilité ou de leur capacité en énergie. Les sources communiquent avec les relais qui sont leur portée radio. Notre algorithme va déterminer les meilleures positions à utiliser pour que toutes les sources en présence communiquent en réseau.

Dans ce problème de déploiement, la topologie du réseau peut être : *plate* ou *hiérarchique* [MMH11]. Dans la topologie plate, les sources et les relais peuvent recevoir et retransmettre les données reçues d'autres nœuds [LX07] tandis que dans la topologie hiérarchique, seuls les relais ont la possibilité de relayer des données vers d'autres nœuds [Yan+10; WZM07]. Dans cette étude, nous considérons une topologie plate.

### **3.4 Méthode bio-inspirée de déploiement de réseau**

Dans ce paragraphe, nous détaillons la méthode de déploiement de réseaux dans les zones blanches étendues. Cette méthode assure la connectivité et la survie du réseau face à la défaillance d'un lien de communication. Elle est inspirée de la croissance du physarum, un organisme capable d'optimiser ses ressources, afin d'améliorer sa durée de vie.

#### **3.4.1 Physiologie et principe de croissance du physarum**

Le physarum polycephalum [NT00] ou blob est un organisme unicellulaire dont le plasmodium forme un réseau dendritique qui se présentent sous la forme de structures en tube, de texture jaunâtre. Il utilise ses pseudopodes [NT00], en rampant, pour explorer l'espace autour de lui, à la découverte de sources de nourriture. A travers ces structures transitent les nutriments et les signaux chimiques nécessaires à sa croissance [TKN07]. Les sources de nourriture qu'il découvre sont reliées entre elles par des connexions directes, toutefois des liens additionnels sont ajoutés à des endroits bien choisis pour réduire la distance parcourue par les nutriments ainsi obtenus.

Bien qu'unicellulaire, le physarum est doté d'une intelligence qui a inspiré la recherche dans les problèmes d'optimisation. Des cultures biologiques en laboratoire ont montré que cet organisme est capable de trouver un chemin de longueur minimale pour relier deux points dans un labyrinthe complexe. Ce qui n'est pas toujours une tâche aisée même pour les humains [NYT01], pourtant multicellulaires. Une autre expérimentation a été faite dans [Ter+10b] pour simuler biologiquement le

réseau de transport ferroviaire du Japon. De la matière organique est placée dans des endroits qui représentent les différentes villes du pays, et le corps initial du physarum représente Tokyo. A la fin du processus de croissance, l'organisme a pu générer une structure très proche du réseau ferroviaire réel du Japon. La figure 3.1 illustre les différentes étapes de cette création. Lorsque toutes les sources sont connectées les unes aux autres, le physarum a supprimé tous les liens qui n'aboutissent pas à une source de nourriture, et ne garde ainsi que les liens utiles par lesquels il nourrit l'ensemble de son corps.

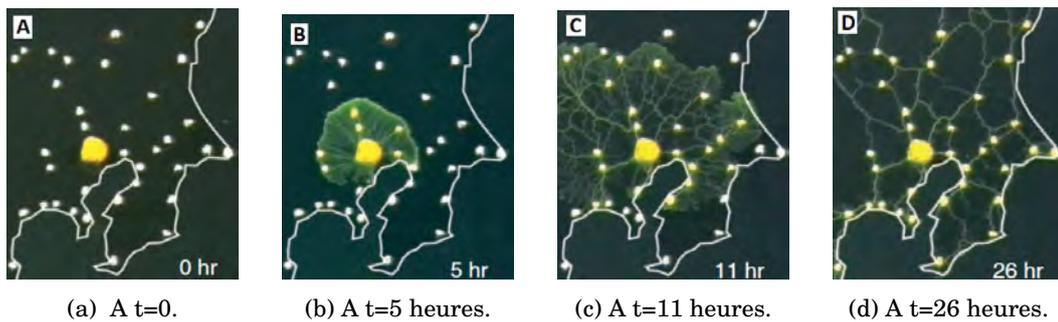


FIGURE 3.1 – Formation de réseau de transport avec le physarum [Ter+10b]

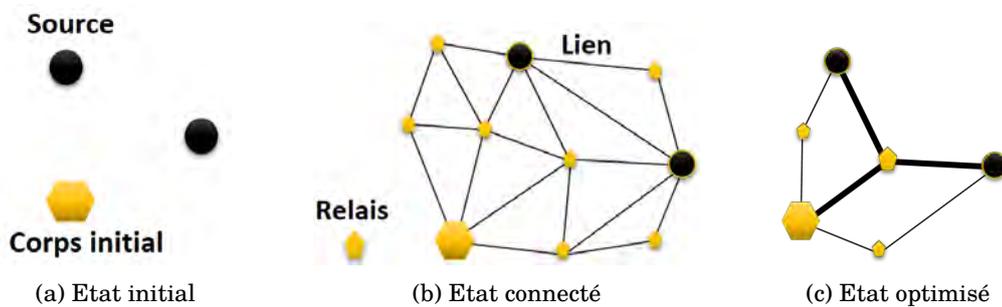


FIGURE 3.2 – Phase de la création de structure en réseau optimisé.

Pour expliquer ce processus naturel de création et d'optimisation de ressources, considérons la figure 3.2 où un corps initial du physarum est en présence de deux sources de nourriture (figure 3.2a). Il crée un réseau de liens pour explorer et exploiter la nourriture qu'il trouve en la transformant en substance nutritive. Cette phase de création aboutit à un réseau dont la complexité dépend du temps mis pour atteindre les nourritures [Nak+07]. De plus, ce réseau comprend des liens redondants et de nombreux lieux de croisements (figure 3.2b). Enfin, comme le montre la figure 3.1d, lorsque toutes les sources sont liées à son corps, il entame une phase d'optimisation en supprimant des liens superflus. Les liens conservés sont les plus courts et les plus gros [TKN07] (figure 3.2c). Ainsi, le physarum peut

relier deux sources de nourriture par le chemin le plus court possible. Par ailleurs, on remarque qu'il conserve certains points de croisement et aussi certains liens redondants moins importants.

Cette dernière phase d'optimisation est particulièrement intéressante dans notre cas, car c'est au cours de cette phase que toutes les sources de nourriture sont interconnectées avec le minimum possible de liens et de points d'intersection. Nous allons étudier le modèle mathématique de cette phase et l'adapter au déploiement de réseau pour les zones blanches étendues. Les liens qui survivent représentent des liens de communication tandis que les points de croisement sont des relais.

### 3.4.2 Modèle mathématique d'optimisation de ressources

Dans ce paragraphe, nous allons étudier le modèle mathématique qui régit la phase d'optimisation du réseau du physarum. Pour cela, nous considérons un réseau connecté initial, représenté par un graphe comme dans [TKN07 ; Ter+10b]. Les nœuds du graphe sont les sources ou les points de croisement qui interconnectent les liens tandis que les arêtes sont les liens par lesquels transiteront les nutriments.

L'objectif de ce modèle est de reproduire la capacité du physarum à élaguer certains liens pour ne garder que les plus efficaces afin d'assurer une interconnexion à moindre coût et une redondance de chemins dans le réseau final. Durant ce processus, de nombreux nœuds autres que les sources seront supprimés du graphe. Dans [Bru+10 ; Ken+11], l'analyse des propriétés de l'algorithme dérivé de cette modélisation montre qu'il est robuste et stable. Dans [XZZ16], les auteurs montrent qu'il converge avec une complexité polynomiale.

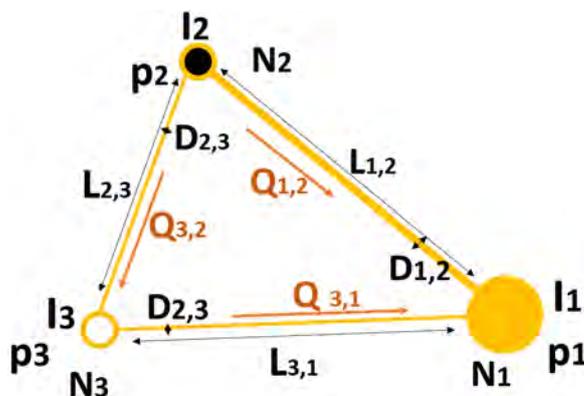


FIGURE 3.3 – Circulation de flux dans le corps du physarum.

Considérons le réseau de physarum dont le graphe est illustré par la figure 3.3. Il comprend un nœud qui représente le corps du physarum  $N_1$ , un nœud pour source de nourriture  $N_2$  et un nœud pour le point de connexion ou relais  $N_3$ . La nourriture est transformée en flux de nutriment  $I_0$  qui entre dans le réseau et circule d'un nœud à un autre à travers les liens. Pour que cette dynamique ait lieu, à chaque nœud  $N_i$  on associe un flux  $I_i$ , une pression  $P_i$  avec  $i$  l'indice du nœud.

Le flux initial est un paramètre fixe du système et la différence de pression entre deux nœuds indique le sens de circulation du flux [Bru+10]. Enfin, deux nœuds  $i$  et  $j$  avec  $i \neq j$  sont connectés par un lien qui est représenté par un tube circulaire de longueur  $L_{ij}$  et de section  $a_{ij}$ .

Le flux est caractérisé par un faible nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds est un paramètre sans dimension de la dynamique des fluides qui caractérise les types d'écoulement [Ste78]. Plus ce nombre est grand plus le fluide a un écoulement turbulent et quand il est petit on parle d'écoulement laminaire : c'est le cas du flux dans le corps du physarum. Ainsi, pour ce type d'écoulement, le flux, à travers les arêtes est défini par la loi de Poiseuille [TKN07] tel que :

$$Q_{ij} = \frac{\pi a_{ij}^4}{8L_{ij}k} (P_i - P_j); \quad (3.1)$$

où  $k$  est la viscosité du fluide de nutriment, si on simplifie  $D_{ij} = \frac{\pi a_{ij}^4}{8\pi k}$  [TKN07]. Ce paramètre désigne l'épaisseur du lien de communication. Nous l'utiliserons pour modéliser la qualité du lien de communication. Alors le flux devient :

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}} (P_i - P_j); \quad (3.2)$$

L'équation 3.2 représente la conservation de flux telle que :

$$\sum_{j \in N_i} Q_{ij} = I_i \quad (3.3)$$

$$\sum_{N_i} I_i = I_0 \quad (3.4)$$

Les équations 3.2 et 3.4 peuvent être écrites sous forme de système d'équations linéaires [TKN07] :

$$\sum_i \frac{D(ij)}{L(ij)} (P_i - P_j) = \begin{cases} -I_0 & \text{si } j \text{ est l'indice de la source} \\ +I_0 & \text{si } j \text{ est l'indice du puits} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

Ce système est caractérisé par une matrice éparsée et symétrique que l'on résout avec la méthode numérique de décomposition ICCG [Ker78] (*Incomplete Cholesky-Conjugate Gradient*).

Tero, dans [TKN07], estime que les liens suivent un phénomène de croissance/décroissance exponentielle qui est liée à la valeur du flux qui les traverse. L'épaisseur des liens et leur flux sont liés par la relation différentielle définie par :

$$\frac{dD_{ij}}{dt} = rD_{max}f(|Q_{ij}|) - rD_{ij}; \quad (3.6)$$

où  $r$  est le taux de régression des liens. L'équation 3.9 implique que les liens dont les flux décroissent tendent à disparaître alors que ceux aux flux croissants sont renforcés.  $f$  est une fonction de la forme :

$$f(x) = ax^\mu; \quad (3.7)$$

ou bien

$$f(x) = \frac{ax^\mu}{1 + ax^\mu}; \quad (3.8)$$

L'équation 3.7 est une simple croissante fonction qui satisfait la condition  $f(0) = 0$  (les liens à flux nul n'évoluent pas), elle a une croissance exponentielle lorsque  $\mu > 1$ . l'équation 3.8 satisfait les mêmes conditions et en plus a un niveau de saturation qui équivaut au double de  $a$ . Par ailleurs, l'équation 3.6 peut être résolue sous forme linéaire avec une méthode semi-implicite [TKN07]; elle devient :

$$\frac{D_{ij}^{n+1} - D_{ij}^n}{\delta_t} = f(|Q_{ij}^n|) - D_{ij}^{n+1}, \quad (3.9)$$

où  $\delta t$  est le paramètre du temps et  $n$  le pas d'itération.

Le résultat de cette modélisation est un graphe qui connecte les différents nœuds entre eux ainsi que le flux contenu par chaque lien, à tout instant.

La stabilité de ce modèle a été étudiée et prouvée [Bru+10]. Des travaux antérieurs [Ter+10b; TKN06; Zha+13] ont considéré le modèle mathématique de la croissance du physarum pour concevoir des algorithmes d'optimisation pour des structures de transports routiers et ferroviaires.

Notre travail constitue la première étude pour le déploiement de réseaux dans les zones blanches étendues. Nous allons montrer comment adapter la terminologie et les paramètres du modèle de physarum au domaine du déploiement de réseaux.

## 3.5 Algorithmes de déploiement de réseaux

Nous avons adapté ce modèle mathématique à notre problème de réseau et nous avons proposé un algorithme de déploiement [Ter+10b]. L'algorithme prend en entrée un graphe initial de tous les nœuds (sommets) et liens (arêtes) d'un réseau de capteurs sans fil et il calcule une structure minimale qui interconnecte les sources (certains sommets) au puits de données. Ce qui revient au même problème que la recherche de l'arbre minimal de Steiner sur un ensemble de cibles.

### 3.5.1 Algorithme basé sur le modèle du physarum

Nous supposons que les arêtes et les sommets du graphe du physarum sont respectivement les canaux de communication et les nœuds (capteurs et relais) du réseau de capteurs sans fil. Le graphe initial en entrée de l'algorithme comprend un ensemble de sommets composés des capteurs ou sources de données, du puits de données et des positions potentielles pour les relais. Ces positions ainsi que celles des capteurs et du puits de données sont disposées sur une carte géographique de la zone d'intérêt.

Les relais sont placés à des endroits où ils sont facilement alimentés en énergie, et maintenus sans difficulté. Un lien de communication entre deux nœuds existe si et seulement si les deux nœuds sont à portée radio l'un de l'autre, c'est-à-dire que le rapport signal sur bruit permet aux deux nœuds de recevoir et décoder sans erreur les données échangées. Pour notre étude, nous considérons des portées de type LoRa qui sont capables d'atteindre théoriquement 30 kilomètres en visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur [Pet+15; GG15].

Ensuite, nous paramétrons les données du modèle pour les faire correspondre aux besoins du déploiement. Nous considérons que  $D_{ij}$  est proportionnel à la capacité des liens comme c'est le cas avec le physarum, ensuite le flux  $Q_{ij}$  est à son tour proportionnel à  $D_{ij}$ . Par ailleurs les valeurs d'initialisation des  $D_{ij}$  sont choisies dans l'intervalle  $]0, 1]$  [TKN07]. Nous considérons que  $L_{ij}$  est simplement la distance géographique qui sépare deux nœuds  $N_i$  et  $N_j$ , si la communication est possible entre eux.

Les sources de données sont les points d'intérêt que nous cherchons à interconnecter en utilisant des relais choisis parmi des positions potentielles. Ces positions sont modélisées comme des sources de nourriture pour le physarum. Chaque nœud  $i$  est associé à un flux  $I_i$  : il vaut  $I_0$  si c'est une source et  $-I_0$  si c'est le puits

de données. La pression  $P_i$  est une variable calculée dans chaque itération de l'algorithme.

L'algorithme est itératif et à chaque itération, 2 étapes sont exécutées.

### Étape 1

Dans la première étape, on calcule toutes les pressions des nœuds. La différence de pression entre deux nœuds qui communiquent est considérée comme un potentiel et le flux se déplace dans le sens des potentiels positifs.

Les pressions sont obtenues en résolvant le système d'équations (3.5). On désigne un puits local (qui est en fait une destination de transit pour le flux) et une source parmi l'ensemble des sources et du centre de collecte. Le puits local est choisi avec une probabilité uniforme de fonction de masse définie par :

$$p(S = k) = \begin{cases} \frac{1}{K+W} & \text{si } k \text{ est une source,} \\ \frac{W}{K+W} & \text{si } k \text{ est une destination,} \end{cases} \quad (3.10)$$

La variable aléatoire  $S$  représente le puits de données et  $W$  le poids du puits. Le choix de la source suit aussi une probabilité spécifique dont la fonction de masse est définie par :

$$p(S = j) = \frac{d_{ij}^\gamma}{\sum_{k \neq j} d_{kj}^\gamma}, \quad (3.11)$$

où  $d_{ij}$  est la mesure de la distance entre le nœud  $N_i$  (désigné comme puits) et un autre nœud  $N_j$ ,  $\gamma$  est un paramètre positif et  $k$  un indice sur l'ensemble des sources. Cette probabilité permet de choisir la source la plus éloignée possible du puits lorsque  $\gamma$  est choisi grand. Dans nos simulations, nous la paramétrons égale à 20 comme dans [Ter+10a]. Ensuite, on calcule les flux  $Q_{ij}$  (équation 3.2) avec les  $P_i$  ainsi obtenus et l'étape (1) prend alors fin.

### Étape 2

Dans la deuxième étape, on adapte les paramètres des liens (les capacités) en utilisant l'équation 3.9 et la fonction d'adaptation 3.8.

Ces deux étapes sont répétées jusqu'à la convergence du processus. L'algorithme s'arrête lorsque la différence  $D_{ij}^{n+1} - D_{ij}^n$  est inférieure à un seuil (valeur positive); ce seuil étant pris égal à 0 dans ce chapitre. Le résultat de l'algorithme est donc l'ensemble des  $D_{ij}$  de tous les liens. Pour obtenir la topologie finale il suffit de supprimer les  $D_{ij}$  qui ont une valeur nulle ou proche de zéro.

Les notations des paramètres de l'algorithme sont résumées dans le tableau 3.1 et le pseudo-code de notre heuristique, appelé **PhyNetA**, est représenté dans l'algorithme 1.

Noms	Définitions
$i$	indice du nœud
$N$	Nombre de positions potentielles de relais
$P_i$	Pression dans le nœud $i$
$I_i$	Flux initial dans le nœud $i$
$D_{ij}$	Largeur du lien entre le nœud $i$ et $j$
$Q_{ij}$	Flux dans le lien entre $i$ et $j$
$L_{ij}$	Distance du lien qui relie les nœuds $i$ et $j$
$\delta_t$	Pas du temps
$W$	Poids du puits

Tableau 3.1 – Paramètres du modèle

---

**Algorithme 1 : PhyNetA**

---

**Données :** Graphe initial  $G(V, E, L)$

**Résultat :** Topologie de réseau

Initialisation;

$D_{ij} \leftarrow (0, 1] \forall i, j = 1, 2, \dots, N \wedge i \neq j;$

$Q_{ij} \leftarrow 0 \forall i, j = 1, 2, \dots, N;$

$p_i \leftarrow 0 \forall i = 1, 2, \dots, N;$

$n \leftarrow 1;$

converge  $\leftarrow 0;$

**tant que** *converge=0* **faire**

    Choisir une source  $i;$

    Choisir un puits  $j;$

$p_j \leftarrow 0;$

    Calculer la pression pour chaque nœud ;

    Calculer les nouveaux flux ;

$Q_{ij} \leftarrow D_{ij}(p_i - p_j)/L_{ij};$

    Adapter la capacité des liens ;

$D_{ij} \leftarrow f(Q_{ij}) + D_{ij};$

    Comparer les flux actuels et précédents ;

**si** *flux identiques* **alors**

        converge  $\leftarrow 1;$

**sinon**

$n \leftarrow n + 1;$

**fin**

**fin**

---

### 3.5.2 Méthode de référence

Comme nous l'avons défini dans le paragraphe 3.2, le problème de déploiement de capteurs peut être vu comme le problème de recherche de l'arbre minimal de Steiner (AMS). La recherche de l'AMS est un problème NP-difficile [Ter+10a] et on trouve, dans la littérature, des heuristiques qui calculent des solutions approchées à l'optimale [VoB92; MM10].

Pour comparer nos résultats, nous avons choisi une de ces heuristiques appelée **CHINS** qui servira de méthode de référence afin de la comparer à l'algorithme **PhyNetA**.

#### 3.5.2.1 Hypothèses

Soit un graphe  $G = (V, E)$  associé à un réseau de communication où  $V = \Pi \cup S$  où  $\Pi$  est l'ensemble des sources de données et du puits,  $S$  est l'ensemble des sommets candidats, positions potentielles, où les relais peuvent être placés et  $E$  l'ensemble des arêtes.  $S$  est tel que  $S \cap \Pi = \emptyset$ .

Soit le sous-graphe  $T = (V_T, E_T)$  de  $G$ ,  $T$  est un sous-graphe connecté s'il existe un chemin entre deux quelques sommets dans  $V_T$ ,  $T$  est alors une solution possible d'arbre qui interconnecte les sommets de  $V_T$  [VoB92]. Notons que  $V_T$  comprend tous les éléments de  $\Pi$  et quelques uns de  $S$ .

Considérons que  $d_{ij}$  est le poids de l'arête qui relie les nœuds  $i$  et  $j$ , il est pris comme la valeur de la distance qui sépare les deux nœuds.  $c_{ij}$  est le poids du plus court chemin  $\Psi_{ij}$  entre  $i$  et  $j$ , c'est donc la somme des mesures des segments qui constituent le chemin  $\Psi_{ij}$  dans le graphe  $G$ . Enfin,  $c(i, T) = \min\{c_{ij} \mid j \in V_T\}$  le poids du plus court chemin entre le sommet  $i$  et le sous-graphe  $T$ . Si  $Z_T$  est le poids de  $T$ , alors la solution optimale est l'arbre de poids minimal  $Z_{opt}$ .

Cet arbre de poids minimal est appelé l'Arbre Minimal de Steiner (AMS). Nous présentons, dans le paragraphe suivant, l'heuristique **CHINS** qui a pour objectif la recherche d'un arbre AMS dont le poids  $Z_{AMS}$  est très proche de  $Z_{opt}$ .

#### 3.5.2.2 Algorithme de calcul de l'arbre minimal de Steiner

La méthode heuristique de **CHINS**, dérivée de l'anglais *CHeapest INSertion*, construit un arbre minimal de Steiner dans un graphe en procédant par le calcul des plus courts chemin entre les sommets. En se basant sur le même principe de calcul que l'algorithme de Prim [Pri57], l'heuristique débute avec une solution partielle  $T = (\{w\}, \emptyset)$  où  $w \in \Pi$ .

Le sous-graphe  $T$  évolue vers une solution possible en insérant les sommets de proche en proche jusqu'à inclure tous les éléments de  $\Pi$ .

---

**Algorithme 2 : CHINS**

---

**Données :** Graphe initial  $G(V = \Pi \cup S, E, L)$

**Résultat :** Arbre minimal de Steiner

Initialisation ;

Choisir une cible  $w \in \Pi$  ;

Commence une solution partielle  $T = (\{w\}, \emptyset)$  ;

**tant que**  $\Pi \not\subset V_T$  **faire**

Trouver les plus proches sommets  $v^*$  et  $p^*$  ;

tels que  $v^* \in V_T$  et  $p^* \notin V_T$  ;

et  $c_{v^*p^*} = \min\{c_{vp} \mid v \in V_T, p \in V - V_T\}$  ;

Ajouter les sommets et arêtes de  $\Psi(v^*, p^*)$  à  $T$  ;

**fin**

---

L'un des aspects intéressants de **CHINS** est le choix de la première solution partielle  $\{w\}$  [VoB92]. Le poids de l'arbre solution varie selon qu'on commence avec un sommet plutôt qu'avec un autre. Une version améliorée de cette heuristique consiste à calculer tous les arbres possibles en changeant de solution partielle et à la fin de retenir celle qui aboutit à l'arbre de poids minimal. C'est cette dernière version que nous implémentons à des fins de comparaison [RSC86 ; VoB92].

Dans [VoB92], les rapports de poids  $Z_T/Z_{opt}$ , qui définit le rapport de proportionnalité entre la solution obtenue et la solution optimale, permet d'évaluer la performance de **CHINS** par rapport à d'autres heuristiques. **CHINS** calcule un arbre minimal de Steiner plus proche de l'optimal avec un rapport de  $2(1 - 1/|\Psi|)$  et une complexité de  $O(|\Psi| \cdot |V|^2)$  ou  $O(|\Psi|^2 \cdot |V|^2)$  selon la version de **CHINS** qui est utilisée [VoB92].

## 3.6 Évaluation des méthodes de déploiement

Avant de présenter les résultats qui comparent notre méthode avec **CHINS**, nous définissons d'abord nos scénarios de simulation ainsi que les métriques de performance.

### 3.6.1 Les scénarios

Pour implémenter les différentes solutions de déploiement en zones blanches étendues, nous considérons une zone d'intérêt de 180x180 km<sup>2</sup> dans laquelle nous

faisons varier le nombre de sources de données qui sont placées uniformément dans la zone. Le puits de données est placé au centre de la zone d'intérêt dans une position fixe.

Ensuite, nous choisissons aléatoirement les positions potentielles des relais. Nous faisons varier le nombre de positions potentielles de 500 à 5000. Nous faisons varier la portée radio  $R_c$  entre deux nœuds de 5 à 30 km. Ces portées peuvent être calculées avec les paramètres LoRa [GG15].

Plus  $R_c$  est grand, plus le graphe initial est connecté. La figure 3.4 illustre un exemple d'un graphe de communication initial qui comprend 1500 positions potentielles sur lesquelles on a placé des relais avec une portée  $R_c = 15$  km.

Ces relais prédéfinis sont représentés par les disques noirs tandis que les carrés et le triangle schématisent respectivement les source de données et le puits. Enfin les lignes qui relient les disques représentent les liens de communication. Les deux heuristiques définies par les algorithmes **PhyNetA** et **CHINS** seront exécutés pour déterminer le nombre minimal de relais qu'il faut utiliser pour que toutes les sources et le puits communiquent entre eux.

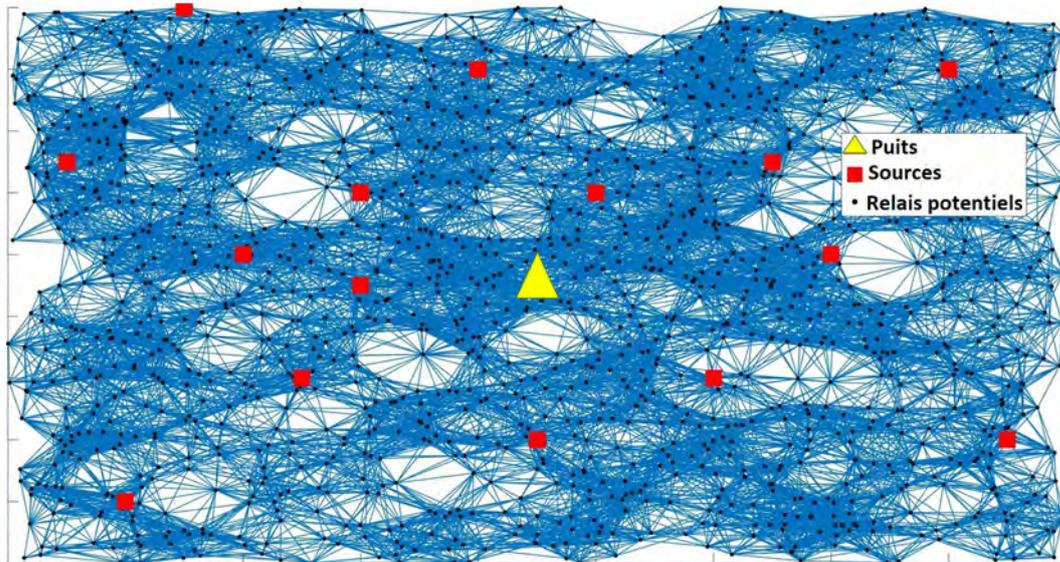


FIGURE 3.4 – Exemple de graphe initial.

L'algorithme **CHINS** prend en entrée le graphe avec des poids sur les arêtes. Le critère d'arrêt de **CHINS** est l'inclusion totale de toutes les sources de données dans l'arbre solution. Par ailleurs, pour l'algorithme **PhyNetA**, les paramètres initiaux ( $I_0$  et  $\mu$ ) ont une forte influence sur le type de topologie de sortie [TKN07]. Nous faisons varier ces paramètres afin d'observer leur influence sur la topologie de sortie.

Les valeurs testées sont notées dans le tableau 3.2. **PhyNetA** converge lorsque

Paramètre	Dénomination	Valeur
ZoI	Zone d'intérêt	180x180 $km^2$
$N$	Nombre de noeuds	500. $i$ with $i \in 1, \dots, 10$
$N_{Src}$	Nombre de sources	{10, 12, 16, 32 }
$R_c$	Portée des capteurs	{5, 10, 15, 20, 25, 30}
$D_0$	Capacité initiale	]0,1]
$\delta_t$	Paramètre de temps	{0.001, 0.05, 0.5}
$I_0$	Flux initial	[1,7]
$\mu$	Constante	[1,9]
$\gamma$	Constante	{1,3,5,20}
$W$	Poids du puits	7

Tableau 3.2 – Paramètres d'évaluation

les valeurs des  $D_{ij}$ , flux dans les liens, ne sont plus modifiées, donc lorsque la différence  $D_{ij}^{n+1} - D_{ij}^n = 0$ . Les deux algorithmes sont exécutés avec Matlab 2016b.

Dans le paragraphe suivant, nous allons définir les métriques de performance sur la base desquelles nous analyserons les résultats obtenus.

### 3.6.2 Métriques de performance

Les métriques de performances sur lesquelles portent nos analyses des scénarios de déploiement sont la connectivité, la longueur totale des liens de l'arbre (qui représente le réseau à déployer), le nombre de relais à utiliser, et la tolérance aux fautes.

#### 3.6.2.1 Longueur totale de l'arbre et nombre de relais

La longueur totale du réseau  $LT$ , mesurée en kilomètres, est la somme totale des mesures de tous les liens qui constituent l'arbre solution. Le nombre total de relais  $NR$  est l'ensemble des relais sélectionnés parmi les relais potentiels pour établir l'interconnexion de toutes les sources avec le puits de collecte.

**CHINS** coûte forcément moins cher puis qu'il n'est pas tolérant aux fautes. Nous regardons de combien les résultats de **PhyNetA** s'écartent en prix pour gagner en résilience. Pour effectuer ces comparaisons, nous déduisons des fonctions de coût définies par les rapports  $LT/LT_{AMS}$  et  $NR/NR_{AMS}$  où  $LT_{AMS}$  et  $NR_{AMS}$  sont respectivement la longueur totale et le nombre de relais dans l'arbre minimal de Steiner (AMS) obtenu avec la méthode **CHINS**.

Ces rapports de proportionnalité nous permettent de mesurer l'écart de coût entre notre solution et **CHINS**. La solution idéale est que ces rapports tendent au plus vers 1.

### 3.6.2.2 Connectivité et tolérance aux fautes

La connectivité est une variable booléenne  $C$  qui prend la valeur 1 lorsqu'il existe au moins un chemin entre une source et le centre de collecte (puits), sinon elle vaut 0.

La tolérance aux fautes  $TF_m$  du réseau est définie comme la probabilité que le réseau reste connecté lorsque  $m$  coupures accidentelles de lien surviennent dans le réseau. Elle est calculée par la relation suivante :

$$TF_m = \frac{\xi - \xi^*}{\xi}, \quad (3.12)$$

Où  $\xi = \binom{|E|}{m}$  est le nombre de possibilité de choix de  $m$  liens dans l'ensemble  $|E|$  des arêtes du graphe de solution, et  $\xi^*$  le nombre de configurations où si l'on supprime  $m$  liens le réseau devient déconnecté.

Dans le paragraphe suivant, nous analysons et commentons les différents résultats.

## 3.7 Résultats et discussion

Notre objectif est de calculer une structure d'interconnexion des sources de données au puits avec le minimum possible de relais. Nous analysons et comparons les résultats obtenus avec les algorithmes **PhyNetA** et **CHINS**.

### 3.7.1 Analyse des topologies

La figure 3.5a illustre un exemple de topologie à déployer pour connecter toutes les sources au puits avec le minimum possible de ressources (relais). Ce résultat est obtenu pour un graphe initial comprenant 3000 relais potentiels avec une portée maximale de 15 km chacun.

Les paramètres physarum utilisés sont  $I_0 = 1$ ,  $\delta t = 0.5$ ,  $\mu = 2$ . Les lignes bleues d'épaisseurs différentes représentent les arêtes ou liens de communication  $D_{ij}$  entre les relais choisis. Les relais sélectionnés sont représentés par les étoiles. Ce sous-graphe solution est composé de 62 sommets (représentant les relais) et sa longueur totale est de  $LT=611,26$  km.

La figure 3.5b, quant à elle, montre le résultat pour le même scénario, obtenu avec la méthode du **CHINS**. Cet arbre comporte 60 relais. La méthode de physarum **PhyNetA**, avec ses paramètres, approche la solution de **CHINS**, elle a, par exemple, seulement 2 relais de plus.

Cependant **PhyNetA** a un temps de convergence plus court ainsi pour cet exemple, la solution est obtenue en moins de 4 minutes sur un ordinateur de processeur *Core i7* à 2.60 GHz.

Par ailleurs, étant basée sur l'écoulement des différents flux dans le réseau, la méthode du physarum nous donne une indication sur la taille des liens par lesquels transitent le flux d'information. Certains liens, qui reçoivent plus de flux, ont les plus gros diamètres et donc dans une réalisation pratique, ce sont les liens de meilleure qualité ou de plus haut débit qui assurent une bonne qualité de propagation.

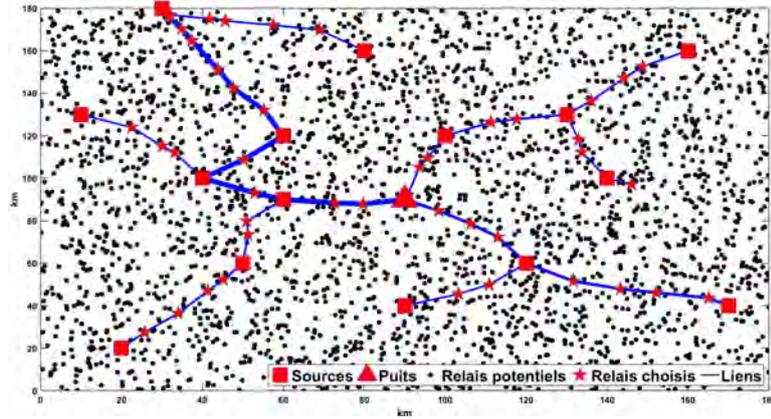
Cette propriété est mise en exergue sur la figure 3.7. Sur ces figures, on observe bien que les liens les plus épais sont ceux qui reçoivent les données de plusieurs sources et qui collectent le plus de flux vers la destination. Les liens qui connectent une seule source sont les plus étroits. Ce résultat est obtenu pour deux scénarios différents. La figure 3.7a concerne un scénario de 4000 relais et la figure 3.7b un scénario de 2000 relais. Le puits est déplacé à l'extrémité gauche de la zone d'intérêt pour observer le comportement de l'algorithme.

Cependant, nous avons remarqué dans certains résultats, que le nombre de relais sélectionnés n'est pas optimisé d'où la différence observée avec la solution de référence **CHINS**. Ceci est illustré, par exemple sur la figure 3.7b par les ellipses. Très proche de certaines sources, on observe une agglomération de relais qui pourraient pourtant être supprimés.

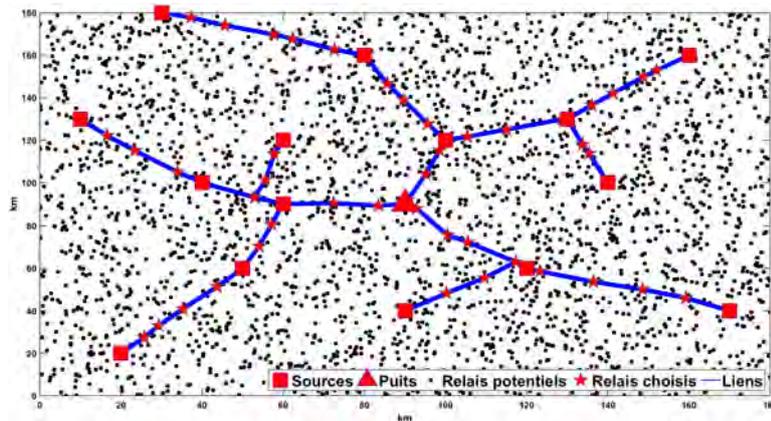
Nous avons, de plus, observé ce phénomène en répétant la même simulation tout en gardant les mêmes paramètres. Les résultats peuvent être différents de quelques relais comme par exemple sur les figures 3.5a et 3.5c, le premier réseau comporte 62 relais et le second 65 pour  $I_0 = 1$ ,  $\mu = 2$  et  $\gamma = 1$ . Si ce facteur est pris en compte, le modèle de physarum pourra encore mieux minimiser les ressources [NYT01].

### 3.7.2 Analyse de l'influence des paramètres du modèle

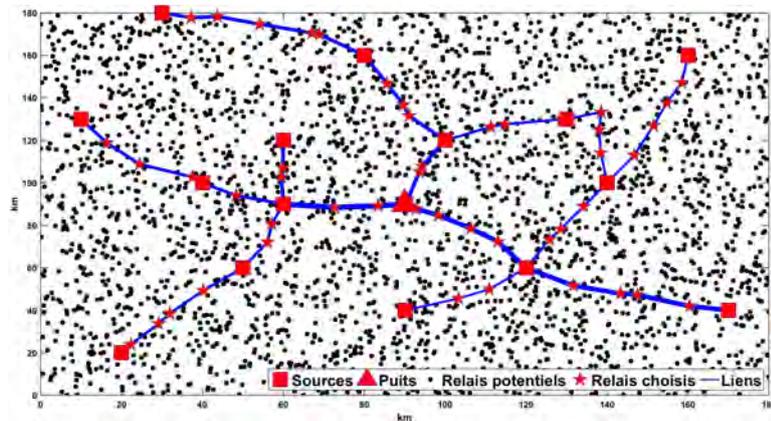
Les paramètres  $I_0$  et  $\mu$  du modèle mathématique du physarum ont une influence importante sur le graphe de sortie. Certains couples de valeurs comme par



(a) Arbre minimal de Steiner (méthode du physarum)



(b) Arbre minimal de Steiner (méthode **CHINS**)



(c) Réseau avec peu de résilience (Méthode **PhyNetA**)

FIGURE 3.5 – Comparaison des graphes des 2 méthodes.

exemple  $(I_0, \mu) = \{(1.9, 0.7), (1.8, 0.6)\}$  peuvent aboutir à des graphes non connectés. Pour tous les scénarios considérés, nous avons simulé 100 fois pour chaque couple de valeurs afin de classer les couples en fonction de leur influence (connecté ou déconnecté) sur le graphe de sortie. Nous avons remarqué que pour  $\mu$  supérieur à 2

et  $I_0$  supérieur ou égale à 1, l'algorithme **PhyNetA** converge toujours et le graphe de sortie est toujours connecté (très proche obtenu avec **CHINS**), c'est-à-dire que toutes les sources de données sont connectées au puits.

Nous concluons que, si l'objectif est de dimensionner une topologie optimisée de réseau (avec le moins possible de nœuds relais) comme sur la figure 3.5a, il faut paramétrer  $I_0 = 1$  et  $\mu = \{2, 3, 4, 5\}$ .

Le tableau 3.3 fait correspondre à chaque couple de valeurs l'indice de connectivité du graphe de solution. L'aspect du graphe solution observé est la connectivité qui est définie par l'indice de connectivité  $(\sum_i^M C_i)/M$  où  $M$  est le nombre de fois que nous simulons pour les mêmes paramètres  $I_0$  et  $\mu$ ,  $C_i$  est la connectivité du graphe solution à l'exécution  $i$ . Ce résultat est obtenu pour un graphe initial de 500 relais potentiels,  $\delta t = 0.1$  et  $\gamma = 20$ .

Le paramètre  $I_0$  a une influence capitale dans la conception d'une topologie redondante où plusieurs chemins permettent de connecter une même source au puits et donc capable de supporter des ruptures de liens. Nous illustrons ce cas avec la figure 3.6. Le scénario du graphe initial est le même que les deux figures précédentes 3.5a et 3.5b. En modifiant juste les paramètres  $I_0 = 3$  et  $\mu = 1.8$ , on obtient un graphe complètement différent. Le résultat n'est plus de la forme d'un arbre minimal de Steiner car il comprend 96 relais.

Cependant, même si ce graphe dépasse l'arbre minimal de Steiner de 36 relais, il a l'avantage d'offrir des liens supplémentaires. En effet, dans le graphe de la figure 3.6, quel que soit le lien qui rompt, la connectivité de toutes les sources avec le puits est garantie. La combinaison des différents paramètres permet ainsi de calculer des topologies complexes en fonction du besoin des applications. On peut obtenir des structures denses comme la figure 3.6 ou moins denses avec de la redondance autour de seulement certains nœuds comme sur la figure 3.5c.

### 3.7.3 Analyse de la tolérance aux fautes

Nous nous intéressons surtout au compromis entre le nombre de liens supplémentaires et le coût de l'infrastructure comme définie dans le paragraphe 3.6.2, puis nous comparons les coûts entre la méthode du physarum et celle de **CHINS**. Si nous considérons les fonctions des coûts  $NR/NR_{AMS}$  et  $LT/LT_{AMS}$  respectivement illustrées par les figures 3.8a et 3.8b. Ces coûts sont représentés en fonction du flux initial  $I_0$  pour les valeurs de  $\mu = \{1.2, 1.9$ . Les différents écarts-types sont également représentés par les segments verticaux. Les écarts-types sont calculés pour une série de 100 simulations pour chaque couple  $(I_0, \mu)$ .

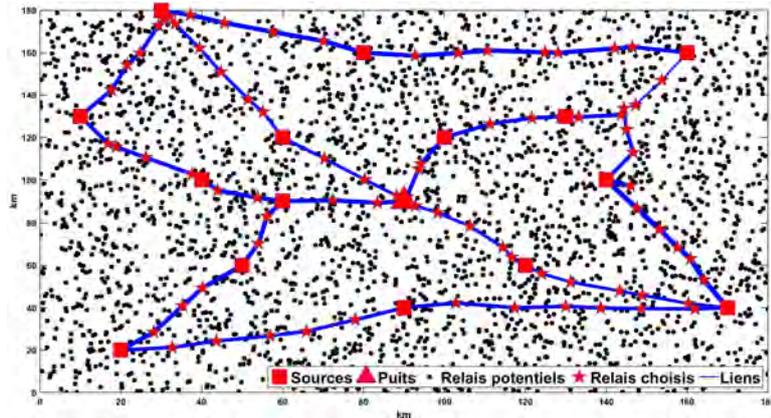
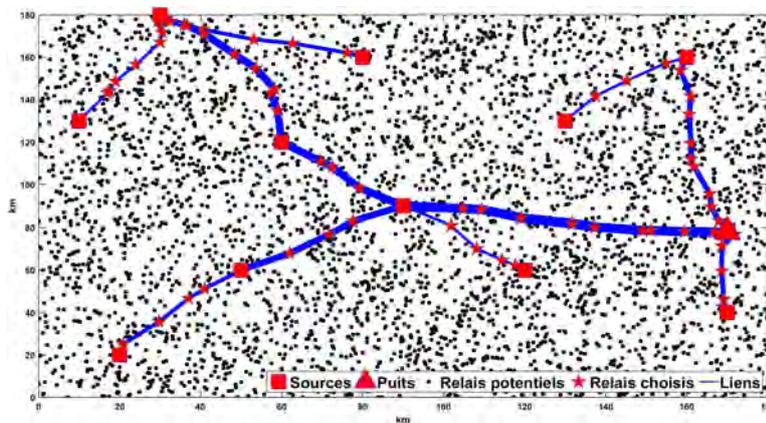
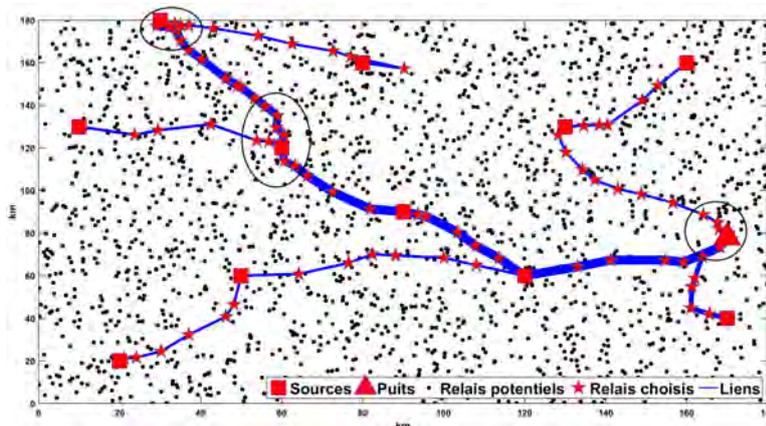


FIGURE 3.6 – Réseau avec résilience (Méthode du physarum).



(a) Arbre minimal de Steiner (méthode du physarum) sur 4000 nœuds



(b) Arbre minimal de Steiner (méthode du physarum) sur 2000 nœuds

FIGURE 3.7 – Topologies avec la méthode du physarum.

On observe que le coût croît avec  $I_0$ . En fait, on observe sur les graphes de sortie, comme celui de la figure 3.6, que le modèle du physarum crée davantage de chemins alternatifs lorsque la valeur du flux initial croît, d'où l'augmentation du coût. Il y a une relation évidente entre les coûts et la connectivité. Plus on investit

$I_0$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	3
$\mu$											
<b>0.1</b>	0.84	0.09	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>0.2</b>	1	0.12	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>0.3</b>	1	0.24	0.07	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>0.4</b>	1	0.80	0.20	0.07	0	0	0	0	0	1	1
<b>0.5</b>	1	0.88	0.81	0.60	0.06	0	0	0	0	1	1
<b>0.6</b>	1	0.91	0.83	0.72	0.10	0.11	0	0	0	1	1
<b>0.7</b>	1	0.93	0.84	0.82	0.19	0.43	0.20	0	0	1	1
<b>0.8</b>	1	0.97	0.89	0.88	0.73	0.56	0.50	0.29	0.10	1	1
<b>0.9</b>	1	0.99	0.93	0.95	0.86	0.59	0.54	0.67	0.62	1	1
<b>1</b>	1	1	0.97	0.95	0.90	0.72	0.74	0.76	0.74	1	1
<b>1.5</b>	1	1	1	0.98	0.97	0.94	0.87	0.89	0.80	1	1
<b>2</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 3.3 – Indice de connectivité en fonction des différents paramètres.

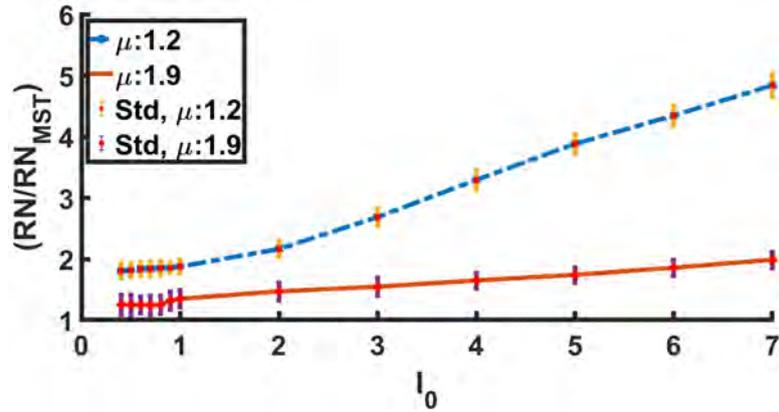
dans l’infrastructure, plus on a de chemins alternatifs qui permettent d’améliorer la connectivité. Cela crée de la résilience dans le réseau.

Nous avons traduit cette résilience en tolérance aux fautes. Cette dernière est la caractéristique qui permet de définir la viabilité du réseau en cas de coupure de liens ou de la perte d’un nœud sans énergie.

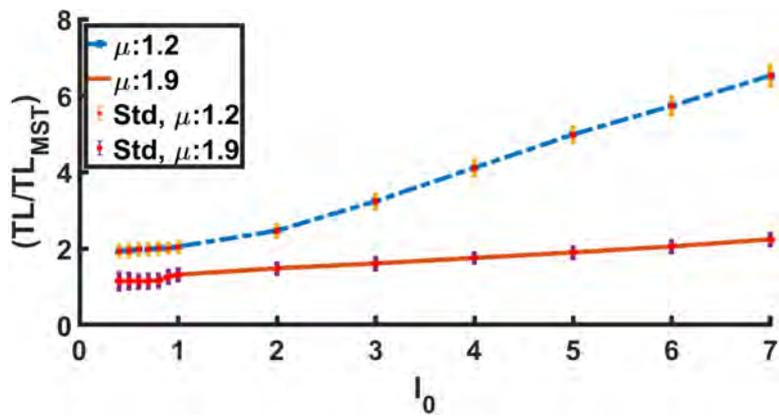
Les figures 3.9a et 3.9b illustrent le compromis entre les ressources et la tolérance aux fautes  $TF_1$  pour différentes valeurs de  $I_0$  et  $\mu$ . Chaque point des courbes représentent la valeur moyenne de 100 exécutions de notre algorithme pour les valeurs de  $I_0$  inscrites le long des courbes. Ce résultat est basé sur un scénario de 3000 relais potentiel avec  $R_c = 15$  km. Des résultats similaires sont obtenus en faisant varier  $N$  et  $R_c$ .

Cependant, nous n’avons retenu que les graphes de sortie qui sont connectés, c’est-à-dire avec  $C$  toujours égale à 1. De ces résultats, nous analysons tous les paramètres de notre modèle, les graphes qui possèdent une grande tolérance aux fautes sont plus coûteux à déployer. Ainsi, lors de la conception de la topologie du réseau, le concepteur pourra estimer l’efficacité et la tolérance aux pannes du réseau en fonction du budget disponible.

Le modèle de déploiement de réseau basé sur l’heuristique qui mime la croissance du physarum donne une méthode de déploiement rapide et simple par rapport aux méthodes complexes de détermination de l’arbre minimal de Steiner.



(a) Fonction du coût (analyse du nombre des relais)



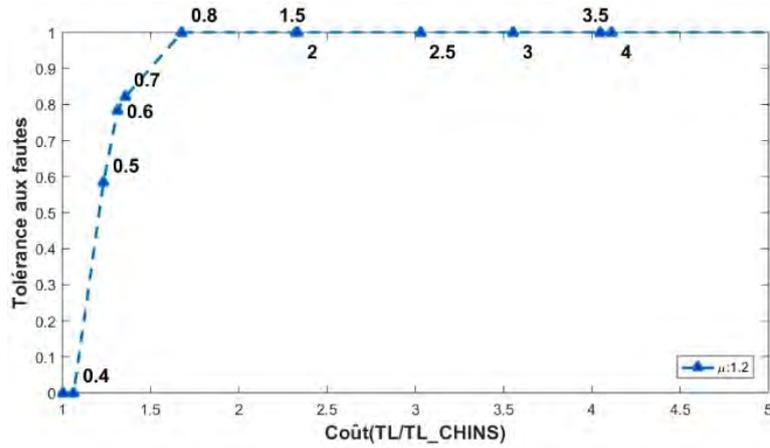
(b) Fonction du coût (analyse de la taille du réseau)

FIGURE 3.8 – Analyse des fonctions des coûts

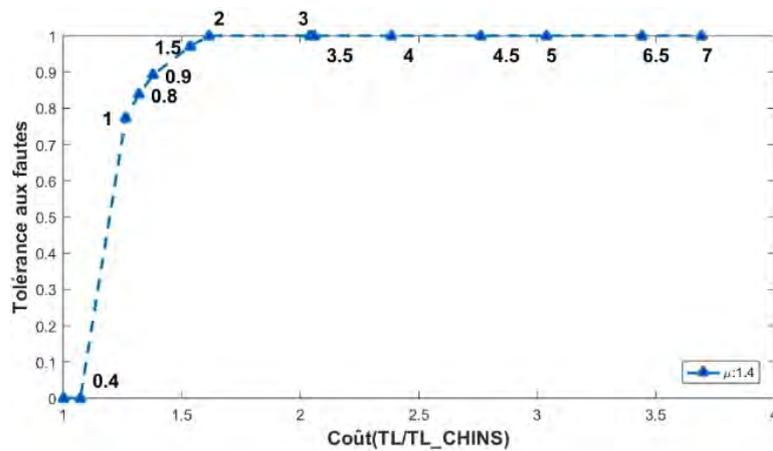
### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons considéré le problème de déploiement de réseau dans les zones blanches étendues. L'objectif est de connecter toutes les sources de données à un même puits avec un certain niveau de tolérance aux fautes tout en limitant le coût de l'infrastructure. Nous avons montré que ce défi ressemble au problème de recherche de l'arbre minimal de Steiner dans un graphe, or ce problème est de type NP-difficile. Les méthodes de résolution de ce type de problème sont d'une complexité exponentielle.

Par ailleurs, les réseaux de capteurs sans fil qui sont déployés dans les zones blanches sont confrontés à divers problèmes dus à la nature difficile de la zone d'intérêt et de la dissipation des batteries des capteurs. Aussi, on observe de nombreux changements de topologie dans ces types de réseaux. Pour que le réseau continue de faire le travail pour lequel il est déployé, tous les nœuds doivent rester connectés au centre de collecte malgré les pannes de certains liens. Pour satisfaire ces deux



(a) Tolérance aux fautes pour  $\mu = 1.2$ .



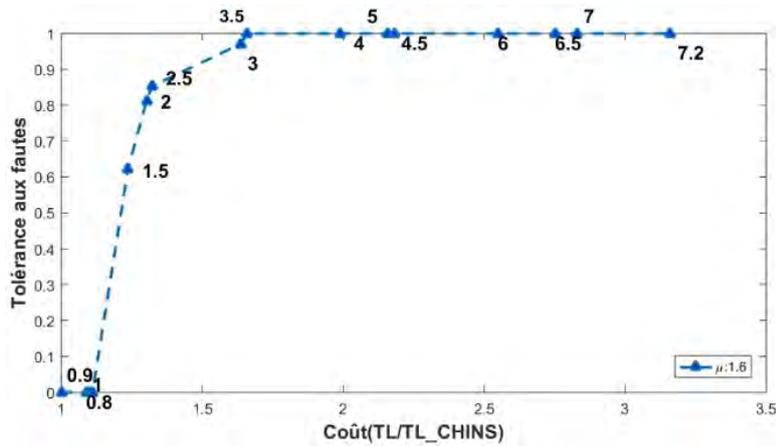
(b) Tolérance aux fautes pour  $\mu = 1.4$ .

FIGURE 3.9 – Analyse de la tolérance aux fautes

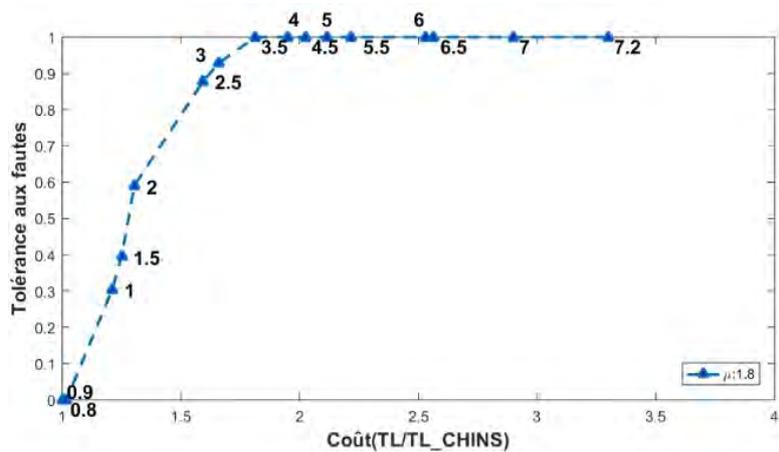
exigences, on doit déployer le réseau avec le minimum possible de ressources tout en offrant une tolérance aux fautes.

Pour apporter une solution à ce problème de déploiement, nous avons proposé une heuristique de déploiement bio-inspirée. Cette méthode est basée sur l'observation du phénomène de croissance du physarum. Nous avons détaillé le modèle mathématique qui régit le processus d'optimisation du réseau du corps du physarum, nous l'avons ensuite adapté au déploiement de réseau pour les zones blanches étendues. De nombreux scénarios ont été étudiés pour analyser les différents paramètres de l'algorithme afin de les classer en fonction de leur importance et de leur influence sur le résultat.

Ensuite, nous avons implémenté une autre heuristique qui calcule l'arbre minimal de Steiner dans un graphe, pour des besoins de comparaison avec notre



(a) Tolérance aux fautes pour  $\mu = 1.6$ .



(b) Tolérance aux fautes pour  $\mu = 1.8$ .

FIGURE 3.10 – Analyse de la tolérance aux fautes (suite)

algorithme. Nous avons trouvé que la méthode du physarum est capable, de manière très efficace, de donner une solution approchée au problème de recherche de l'arbre minimal de Steiner dans un graphe, proche de la méthode de référence. De plus, elle permet également de contrôler la tolérance aux fautes en choisissant les bons paramètres. Cela se fait au prix d'une augmentation du coût de l'infrastructure.

Nous avons analysé le compromis entre le coût de l'infrastructure du réseau et la tolérance aux fautes qu'on peut avoir. Un troisième avantage de la méthode du physarum est qu'elle donne une indication sur la qualité des liens. Ce faisant, lors d'un déploiement réel, nous connaissons, par exemple, les endroits du réseau où il faut placer plus de ressources. Enfin, la méthode du physarum a l'avantage d'avoir une complexité algorithmique polynomiale. Cela est montré dans la rapidité de convergence de nos simulations qui ne nécessitent que quelques secondes.

Cependant, même si cet algorithme est déjà très efficace pour les problèmes

de déploiement, quelques améliorations sont nécessaires pour améliorer encore plus le résultat final. En effet, la méthode du physarum permet certes d'obtenir des réseaux tolérants aux pannes, mais dans le modèle, il n'y a pas de maîtrise absolue sur la manière de distribuer la tolérance au niveau de certains nœuds plutôt que d'autres.



## **Chapitre 4**

# **Collecte opportuniste de données utilisant les vols commerciaux**



## 4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, nous avons développé une méthode originale de déploiement basée sur le modèle de croissance du *Physarum*. Néanmoins, cette méthode suppose qu'on est capable de placer des relais à une distance raisonnable les uns des autres et qui communiquent grâce à la technologie LoRa. Malheureusement, les zones blanches étendues sont immenses et ne permettent pas toujours de satisfaire cette condition. Dans certains endroits, il est impossible de placer des stations de base ou même des relais à cause de condition d'accès difficiles, d'absence de sources d'énergie ou de l'insécurité. Ainsi, un seul réseau connexe qui couvre toute la zone ne pourra être déployé.

Et quand bien même le réseau est déployé, les activités de maintenance y sont pratiquement impossibles. A cela s'ajoute le fait que les réseaux de capteurs sans fil sont sujets à des ruptures de liens de communication qui impliquent des changements dans la topologie du réseau, par exemple, si un capteur est endommagé ou a épuisé sa batterie. Le réseau n'est alors plus connexe et ne permet plus la collecte des données.

Pour faire face à ce problème, nous proposons une nouvelle méthode opportuniste de collecte de données adaptée aux zones blanches étendues et qui a pour objectif une efficacité de collecte (volume de données collectées) même lorsqu'une partie du réseau est déconnectée du reste du réseau. Nous étudions la faisabilité de collecte des données en positionnant le puits sur des avions de ligne.

### 4.1.1 Utilisation des puits mobiles pour la collecte des données

Des travaux antérieurs ont déjà considéré ce problème et ont proposé d'utiliser des puits de données mobiles [KGH13 ; NF16]. Ces puits mobiles sont capables de collecter de l'information même si le réseau n'est pas connexe. En effet, les puits mobiles ont été introduits dans la conception des réseaux de capteurs sans fil pour augmenter la durée de vie du réseau [CRA06] ou pour améliorer la collecte en maximisant le volume des données collectées [YSM16 ; GZD11]. Les puits mobiles peuvent être attachés à des robots, des ballons stratosphériques gonflés à l'hélium, des véhicules terrestres ou aériens. Ainsi, dans le projet ZebraNet [Jua+02], pour étudier l'habitat naturel des zèbres, un réseau de capteurs sans fil est déployé, dans ce réseau les capteurs sont attachés, sous forme de colliers, aux cous des animaux. Dans une architecture ad-hoc, les capteurs communiquent leurs informations au puits mobile qui est placé dans le véhicule des chercheurs. Ce n'est pas la seule application où le puits est placé dans de véhicule. On peut citer par exemple KioskNet [Guo+11 ; MY07]. Cependant, dans le cas où le puits est attaché

à des animaux, il est difficile de prédire la forme de mobilité, par conséquent il n’y a pas de contrôle sur la latence engendrée. Ce qui n’est pas le cas avec le puits placé dans le transport urbain (bus ou les trains) [CSA03 ; PFH04] où les routes sont connues d’avance. Avec les véhicules, on a l’avantage de connaître à priori la trajectoire du puits mobile.

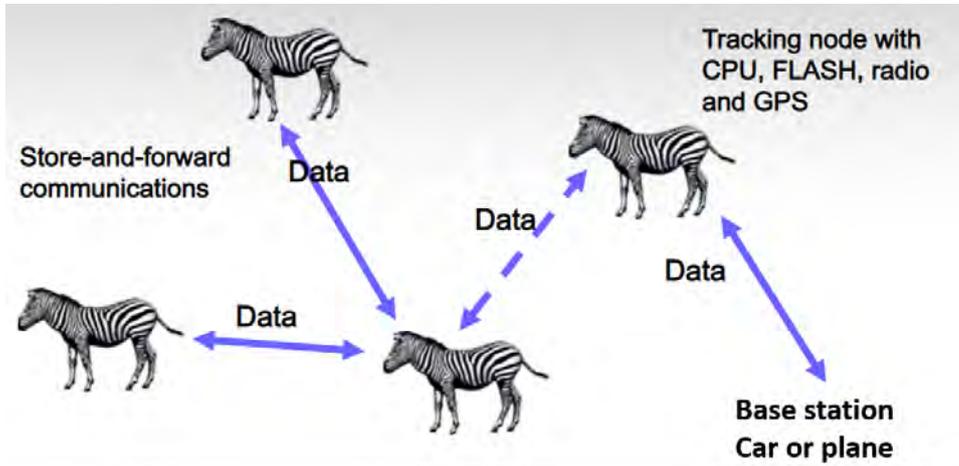


FIGURE 4.1 – Réseau de capteurs sans fil pour l’étude de l’habitat du zèbre. [Jua+02].

Par ailleurs, dans le projet CubeSat [PSTA01 ; Lap+11], un système de pico-satellites à très basse altitude est utilisé pour embarquer un puits de données. Les recherches dans le projet CubeSat visent à réduire le coût énorme d’exploitation des satellites de télécommunication. La figure 4.2a montre un exemple d’un pico-satellite de seulement  $10\text{ cm}^3$  et un exemple de réseaux ad-hoc de pico-satellites (figure 4.2b).



(a) CubeSat Norvégien de  $10\text{ cm}^3$  [Sat19]



(b) Constellation de CubeSats [Int19]

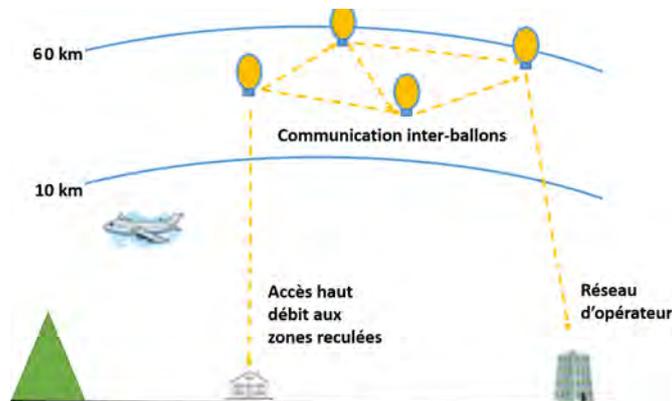
FIGURE 4.2 – Projet CubeSat.

Aussi, en basse altitude, un projet propose d’utiliser des ballons gonflés à l’hélium pour donner un accès haut débit (3/4G) à des zones éloignées des grandes

viles (figure 4.3). Ils peuvent également servir de puits de données tel que dans le projet LOON [NS17], où il s'agit de lancer des ballons dans la stratosphère (figure 4.3b), équipés de systèmes de communication et de capteurs, ces ballons constituent une nouvelle plate-forme de collecte de données dans les zones blanches étendues. C'est un projet qui est encore en phase d'étude et de test, malgré quelques accidents liées aux fonctions de contrôle et de gouvénarbilité dans l'atmosphère [Loo19], des applications dans différents pays (Kenya, Australie, Etats Unis) ont montré que ce moyen de communication peut permettre d'étendre la couverture réseau à des zones très vastes.



(a) Lancement d'un ballon par Google



(b) Architecture de base

FIGURE 4.3 – Projet LOON.

Enfin, les applications de puits mobiles, récemment les plus développées sont celles qui utilisent les drones [MKD16; DWW10; Wan+15; SB18; Moz+19; EKN17] comme puits mobile. On peut citer, par exemple, le projet AWARE [Oll+07] qui vise à utiliser plusieurs drones pour collecter des données des capteurs au sol à des fins de surveillance et des opérations de track. Les drones peuvent être utili-

sés dans les centres urbains comme dans les zones rurales [Moz+17]. La figure 4.4 illustre un exemple d'utilisation de drones pour collecter les données des capteurs déployés au sol. Les drones survolent les capteurs suivant une trajectoire définie avant le début de la mission, ils sont synchronisés aux capteurs actifs afin de minimiser la consommation de leur énergie [Moz+17].

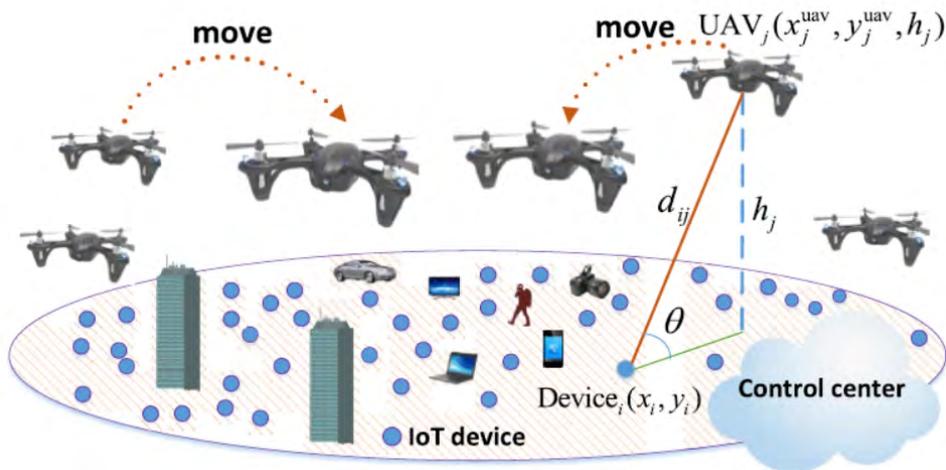


FIGURE 4.4 – Scénario d'utilisation de drone pour la collecte de données. [Moz+17].

Les puits mobiles sont un moyen de collecte des données dans les réseaux déployés dans les zones où l'accessibilité est un problème, c'est aussi un moyen d'économiser l'énergie de certains nœuds, qui servent de relais par exemple. Cependant, l'utilisation des puits mobiles est confrontée à de problèmes qui sont le plus souvent liés au type du puits mobile et la forme de sa mobilité.

#### 4.1.1.1 Problématique liée aux puits mobiles terrestres

Les puits mobiles terrestres ont l'avantage de pouvoir collecter les informations dans les larges réseaux de capteurs sans fil par rapport aux puits statiques. Cependant, leur utilisation dans les zones blanches étendues est confrontée à des difficultés [KGH13] parmi lesquelles on peut citer la mobilité réduite. Ces difficultés impactent fortement les performances de la collecte telles que la latence de collecte qui augmente avec la faible mobilité du puits. La latence est plus grande dans les applications où il est nécessaire que le puits visite tous les capteurs comme l'illustre la figure 4.5 [MY07] où le puits mobile a pour mission de collecter les informations liées à l'état des batteries des capteurs de procéder à leur chargement si nécessaire. Dans [Jua+02] la latence se mesure en jours à cause de la double mobilité des capteurs et du puits mobile, même si les capteurs communiquent dans une architecture ad-hoc pour faciliter la collecte.

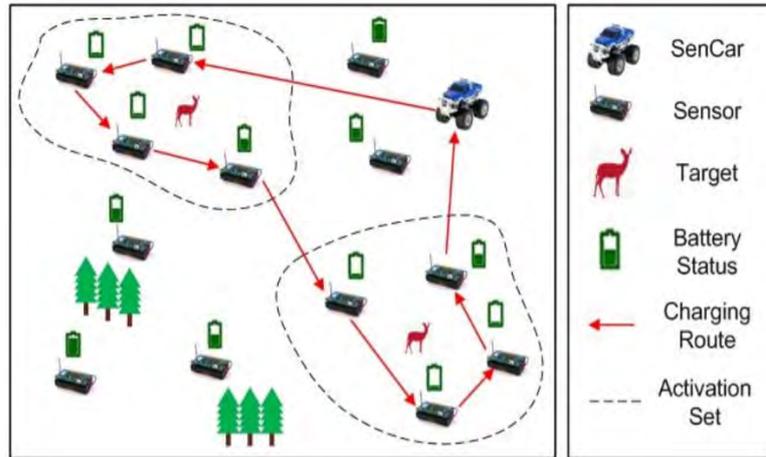


FIGURE 4.5 – Exemple d'utilisation d'un véhicule pour détecter l'état des capteurs et charger leur batterie. [YWL15].

Puisque, la couverture de la zone et le volume de données collectées dépendent fortement de la forme de la trajectoire du puits [Moz+19], une solution consiste à concevoir des trajectoires ou des chemins optimisés en minimisant les points de collecte que les puits mobiles visitent [KMA16]. Un chemin optimisé peut être défini comme étant la trajectoire suivant laquelle l'énergie dépensée par le puits est minimisée [GZD09]. Par exemple, dans [KNJ17] une méthode de calcul de trajectoire de les puits consiste à déterminer des points de rendez-vous pour la collecte (figure 4.6). Les points de collecte sont désignés en fonction de leur priorité. La priorité est définie comme le volume de données à collecter. Dans cette méthode, les trajectoires calculées pour deux missions de collecte peuvent être différentes et une trajectoire plus longue que prévu peut conduire à une consommation supplémentaire de l'énergie du puits mobile. Une solution est apportée à ce problème dans [wLYf13], où les points de collecte sont connus et fixes durant toute les phases de collecte de données. Les données des autres nœuds du réseau qui ne sont pas des points de collecte sont transmis à travers des relais aux points de collecte. Pour cela, on utilise des méthodes de recherche de nombre de sauts minimal entre une source de données et les points de rendez-vous [GZD11].

Cependant, la conception de trajectoire optimale que le puits mobile suit pour visiter tous les points de collecte dans le réseau équivaut au problème NP-difficile du voyageur du commerce [KMA16; GZD09]. De plus, il est pratiquement impossible pour un puits mobile terrestre de parcourir toute l'étendue d'une zone blanche étendue ou même d'accéder à certains endroits qui ont des reliefs abruptes [YSM16], de désert de sable ou des zones des changements de topologie surviennent fréquemment. Comme dans le cas du projet ZebraNet [Jua+02], les

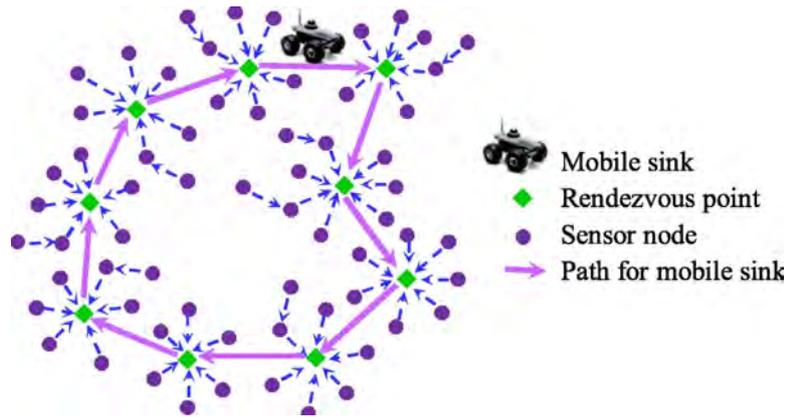


FIGURE 4.6 – Trajectoire définie par un ensemble de points de rendez-vous. [KNJ17].

capteurs étant embarqués dans les colliers aux cous des zèbres, la horde peut être séparée par une rivière qui est un obstacle au véhicule de collecte. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont proposé l'utilisation des puits mobiles aériens tels que les drones ou les satellites.

#### 4.1.1.2 Problématique liée aux puits mobiles aériens

Les puits mobiles tels que les drones (quadricoptères ou planeurs) ou les satellites à basse altitude offrent plus de flexibilité que les puits mobiles terrestres [PVP13 ; SB18 ; Wan+15]. Cependant, ils sont également inappropriés pour les zones blanches étendues. En effet, même s'ils ne rencontrent pas de problème d'accessibilité dans des zones blanches désertiques par exemple, les drones sont limités en énergie [Moz+19]. Leur rayon d'action est limité par l'énergie embarquée, insuffisante pour parcourir de vastes territoires comme les ZBE qui peuvent s'étendre sur plusieurs milliers de kilomètres carrés. D'ailleurs, la conception de tels drones capables de parcourir de si grande zones est tout aussi coûteuse. De même, pour les réseaux de capteurs sans fil, les satellites [Cel+13 ; PVP13] sont très coûteux pour des applications qui le plus souvent ne nécessitent pas de communication temps réel [Cel+13].

Enfin, la technologie des ballons stratosphériques semble avoir un rayon de couverture plus grand que les drones et un coût de conception et d'utilisation plus faible que les satellites à basse altitude [Kat14]. Ces technologies conviendraient pour la collecte de données dans les ZBE mais elles rencontrent de nombreux problèmes à résoudre tels que leur gouvernabilité [NS17] dans l'atmosphère. De nombreux tests des ballons stratosphériques ont été réalisés mais cette technologie n'est pas encore assez mature, au vu du nombre élevé d'accidents enregistrés de par le monde [Loo19].

Pour tous ces inconvénients, les puits mobiles tels que les drones, les satellites ou les ballons stratosphériques ne peuvent garantir une collecte des données efficace et à moindre coût pour les zones blanches étendues. Nous proposons alors une approche qui ne soit pas limitée par les mêmes obstacles. Elle consiste à utiliser, pour la collecte des données, les avions des vols commerciaux qui survolent régulièrement les zones d'intérêt.

Le paragraphe suivant résume les contributions que notre méthode apporte dans la résolution du problème de collecte dans les zones blanches étendues.

### 4.1.2 Les vols commerciaux comme puits mobiles

Nous envisageons d'utiliser les vols commerciaux afin que les avions servent de collecteurs mobiles lorsqu'ils survolent les zones d'intérêt. Ils sont considérés comme des stations de base volantes qui collectent les données des capteurs fixes au sol, chaque fois qu'elles sont dans leur portée de communication. La figure 4.7 illustre le principe de collecte avec les avions.

Cette méthode de collecte de données n'est pas limitée par le problème d'accès à la zone, la consommation d'énergie du collecteur encore moins par le problème de recherche de chemins optimaux. En effet les avions volent au dessus des zones d'intérêt à des altitudes de 9 km environ où la géographie de ces zones n'a pas d'impact sur la mobilité du collecteur. Par ailleurs, les avions des vols commerciaux embarquent assez de kérosène pour rallier l'aéroport de départ à celui d'arrivée, ce qui ne pose pas de problème d'alimentation en énergie des systèmes de communication.

Enfin, les routes suivies par ces avions sont connues, établies en avance et changent très peu avec le temps. Cependant, ces routes ne passent pas forcément partout au-dessus des zones blanches, aussi devons-nous faire une étude de faisabilité de cette méthode ainsi que de ses performances.

Pour réaliser la collecte de données avec des distances de communication d'environ 10 km avec une faible consommation d'énergie, nous proposons d'utiliser les technologies LPWAN telles que LoRaWAN pour faire communiquer les sources de données et les avions. L'efficacité d'une telle méthode dépend de la fréquence à laquelle la zone d'intérêt est survolée par les avions. A notre connaissance, cette technique opportuniste de collecte de données pour les zones blanches étendues n'a jamais été considérée, c'est la première fois qu'une telle étude de faisabilité est envisagée.

Cette étude de faisabilité répond aux questions suivantes :

- Est-il possible de collecter les données avec les avions de ligne, dans les

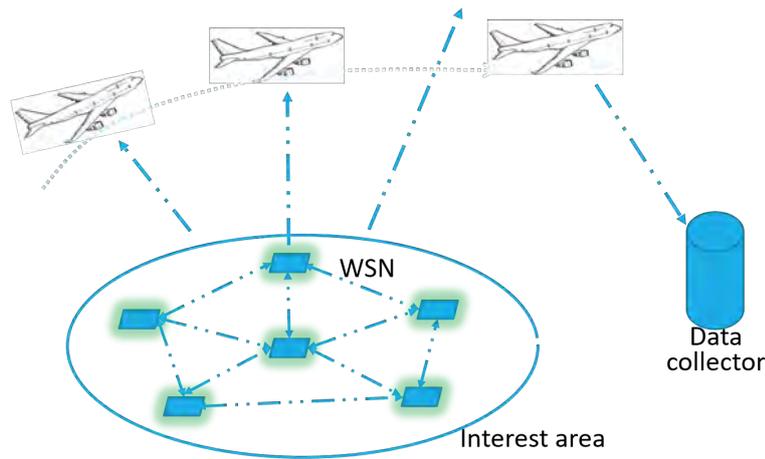


FIGURE 4.7 – Scénario de collecte de données avec les avions de ligne.

zones blanches étendues ?

- Quelle est la capacité de collecte que les vols offrent en tout lieu de la zone d'intérêt ? Il s'agit d'établir une cartographie de la capacité des zones survolées et de distinguer les zones couvertes de celles qui ne le sont pas ;
- Est-ce que cette capacité est suffisante pour des applications de collecte habituelles pour ZBE ?
- Enfin, quels sont les meilleurs paramètres LoRa pour établir une bonne communication capteur/avion ? Il s'agit de déterminer les effets de propagation sol-air sur le débit des communications de type LoRa.

Dans la suite de ce chapitre, nous détaillons notre méthode de collecte. Le chapitre est organisé comme suit : Le paragraphe 4.2.1 décrit le modèle de communication ; dans le paragraphe 4.2.2, nous étudions la trajectoire des avions. La fenêtre de communication ou le temps de contact entre les capteurs et les avions est calculée dans le paragraphe 4.2.3, puis dans le paragraphe 4.2.4 nous déduisons les capacités de collecte. Nous évaluons la méthode dans le paragraphe 4.3 où des scénarios de simulation et des métriques de performance sont définis. Les résultats de l'évaluation sont analysés et commentés au paragraphe 4.3.3 avant de conclure au paragraphe 4.4.

## 4.2 Méthode opportuniste de collecte de données

### 4.2.1 Modèle de communication

Dans notre travail, nous considérons la technologie LoRaWAN pour tirer avantage des ses débits adaptables et de ses communications longue distance [GR17].

Les débits variables ainsi que les longues portées de communication sont un avantage pour les applications hétérogènes rencontrées dans les zones blanches étendues (paragraphe 2.2.2). Les réseaux de type LoRaWAN (paragraphe 2.2.2 forment une topologie en étoile où les stations de base relaient les données des capteurs vers un serveur central [Sor+15].

Durant les communications, les capteurs exécutent une modulation à étalement de spectre appelée *LoRa Modulation* où différents facteurs d'étalement noté SF (*Spreading Factor*), peuvent être utilisés sur un même canal [Ade+17]. En conséquence, sur un même canal de bande passante BW, on peut obtenir différents débits notés DR (*Data Rate*) en fonction des SF tels que [Sem15] :

$$DR = \frac{SF \cdot CR}{\frac{2^{SF}}{BW}}, \quad (4.1)$$

où CR est le taux de codage défini par  $4/(4+n)$  pour  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ . Il y a au total 6 SF numérotés de 7 à 12. D'après l'équation (4.1), les facteurs d'étalement les plus faibles permettent d'atteindre les débits les plus grands [GR17].

Une transmission LoRa atteint un récepteur si et seulement si la puissance reçue  $P_r$  est supérieure ou égale à une valeur seuil  $\psi_r$ , appelée sensibilité du récepteur, que nous calculons comme dans [Sem13]. Elle est exprimée par :

$$\psi_r = -174 + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR. \quad (4.2)$$

où  $\psi_r$  est en dBm, -174 est le niveau du bruit thermique dans la bande passante de 1 Hz, NF en dBm est le facteur du bruit du récepteur. Ce facteur quantifie la dégradation relative du ratio signal sur bruit SNR (en dB).

$P_r$  dépend de la puissance d'émission  $P_e$ , de tous les gains et pertes le long du lien de communication. Le bilan de liaison peut alors être exprimé en dB tel que [Bor+16] :

$$P_r = P_e + G - L_c - F_m - L_p \quad (4.3)$$

où G est le gain des antennes en émission et en réception,  $L_c$  représente les pertes dans les circuits,  $F_m$  est la marge de fading [Lib19] et  $L_p$  l'affaiblissement de propagation ou le *path-loss*. Pour le calcul du path-loss, nous considérons le modèle de propagation en espace libre [Bor+16], le path-loss est donc lié à la distance par :

$$L_p = \bar{L}_p + 10\gamma\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.4)$$

où  $\bar{L}_p = 20\log_{10}(\lambda/4\pi d_0)$  est le path-loss moyen à la distance de référence  $d_0 = [10, 100]$  pour les communications en espace libre (*outdoor*) [Gol05],  $\gamma$  est l'exposant

d'affaiblissement en environnement suburbains [Erc+99 ; Gol05].

La distance  $d$  est alors déduite de l'équation (4.4), et elle est maximale pour  $P_r = \psi_r$ . Le tableau 4.1 montre la correspondance entre la portée  $d$  des capteurs, le facteur d'étalement SF, la *path-loss*, la bande passante et la sensibilité du récepteur, dans le cas d'une transmission en espace libre.

Comme définies dans le paragraphe 2.2.1, les zones blanches peuvent être situées aussi bien dans les régions désertiques que dans les régions forestières. Dans le cas des forêts, la propagation du signal subit d'autres atténuations qui sont causées par les arbres et leur feuillage [Ndz+12 ; AO18 ; ML10]. Il existe de nombreux modèles empiriques pour estimer ce type d'affaiblissement [Ndz+12]. Dans cette étude, nous considérons le modèle qui est recommandé par l'Union International des Télécommunications (UIT) [IR16]. Ce modèle s'applique à une gamme de fréquences allant de 30 MHz à 30 GHz [Ndz+12] et l'affaiblissement maximal est donné par la relation :

$$A_{max} = A_m \left( 1 - e^{-\frac{R_a d_a}{A_m}} \right) \quad (4.5)$$

où  $A_m$  est le facteur d'affaiblissement maximal mesuré et il est lié à la fréquence par la relation  $A_m = A_L f^\alpha$  avec  $(A_L, \alpha) = (0.18 \text{ dB}, 0.752)$  [IR16].  $R_a$  le gradient initial de l'affaiblissement et  $d_a$  est un paramètre positif.

L'affaiblissement causé par la végétation (équation 4.5) a un impact sur la conception des systèmes de communication sans fil. La puissance reçue  $P_r$  sur une distance donnée  $d$  suit une distribution log-normale avec une probabilité  $p_{out}$  que  $P_r < \psi$ .

$p_{out}(\psi, d)$  est appelée probabilité de panne, c'est la probabilité que la puissance reçue soit inférieure au seuil de sensibilité  $\psi_r$  :  $p_{out}(\psi_r, d) = p(P_r(d) < \psi_r)$ . Cette probabilité est définie telle que [Gol05] :

$$p(P_r(d) \leq \psi_r) = 1 - Q\left(\frac{\psi_r - (P_t + 10\log_{10}K - 10\gamma\log_{10}(d/d_0))}{\sigma_{\psi_{dB}}}\right) \quad (4.6)$$

La fonction  $Q$  est définie comme la probabilité qu'une variable aléatoire gaussienne  $x$  de moyenne 0 et de variance 1 soit supérieure à  $z$  [Gol05].  $\psi_{dB}$  est une variable aléatoire gaussienne de moyenne 0 et de variance  $\sigma_{\psi_{dB}}^2$ .

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons le modèle de mobilité des avions.

	$SF=7$		$SF=8$		$SF=9$		$SF=10$		$SF=11$		$SF=12$	
	125	500	125	500	125	500	125	500	125	500	125	500
$BW$ (kHz)	125	500	125	500	125	500	125	500	125	500	125	500
$\psi$ (dBm)	-123	-117	-126	-120	-129	-123	-131	-126	-134.5	-128.5	-137	-131
$L_p$ (dB)	148.8	142	151.3	145.3	153.8	147.7	149	143	151.5	145.5	154	148
$d$ (Km)	10.07	9.07	11.7	9.9	12.53	10.74	13.38	11.47	14.3	12.25	15.29	13.11
$DR$ (Kbps)	5.46	21.87	3.12	12.5	1.76	7.03	0.976	3.91	0.537	2.14	0.292	1.17

Tableau 4.1 – Éléments de communication LoRa pour différents  $SF$  avec  $\gamma=9$  and  $d_0=62m$ ,  $P_t = 17dBm$ ,  $NF=6$ .

### 4.2.2 Modélisation de la trajectoire des avions de ligne

La collecte des données avec les vols commerciaux nécessite la connaissance non seulement du délai de survol des avions au dessus de la zone d'intérêt mais aussi du moment où ils entrent en communication avec les capteurs. Pour cela, il faut modéliser la mobilité des avions lorsqu'ils survolent la zone d'intérêt. A cette fin, nous utilisons des informations de vol réelles collectées à partir de différents outils dédiés à la navigation aérienne.

Nous avons utilisé des bases de données sur des sites web tels que *Open Flights* [Fli19] et *Wego* [Go19] pour collecter les informations des vols. *Open Flights* est une base de données qui répertorie les informations concernant plus de 10 000 aéroports, 6 000 compagnies aériennes et 68 000 routes qui relient certains aéroports. Même si cet outil ne met pas à jours toutes les données telles que les fréquences des vols pour certaines routes, il comporte suffisamment d'informations pour en déduire les routes et estimer la capacité de collecte qu'offrent les avions qui les suivent. Les routes qui nous intéressent, dans ce travail, sont celles qui traversent nos zones d'intérêt, des zones blanches étendues localisées dans le désert du Sahara.

Les routes aériennes sont des successions de segments dans le plan reliés entre elles par des balises appelées *waypoint* [GIR14]. Quelques exemples de balises de navigations aériennes sont le *Very High Frequency Omnidirectional Range* (VOR) et le *Distance Measuring Equipment* (DME). Le VOR permet de déterminer le radial magnétique sur lequel l'avion est situé par rapport à une station au sol. Par déduction, il permet de suivre n'importe quelle route qui passe par la station (en rapprochement ou en éloignement de celle-ci) [Vor19]. Le DME est un radio-transpondeur qui permet de connaître la distance qui sépare un avion d'une station au sol en mesurant le temps que met une impulsion radioélectrique UHF (*Ultra High Frequency*) pour faire un aller-retour [Nav19]. La figure 4.8 montre un exemple de balise VOR-DME.

La figure 4.9 montre un exemple de route aux alentours de Toulouse. Les balises sont représentées par des petits triangles et elles sont reliées entre elles par des routes aériennes matérialisées par des lignes droites. Les points représentent les balises au-dessus des villes [GIR14]. C'est à l'intersection des segments de routes, au niveau des balises, que peuvent apparaître des conflits ou de problèmes [GIR14], comme par exemple l'attribution de l'ordre de passage des avions à ces intersections. Ce qui conduit à l'élaboration d'un plan de vol pour chaque trajet selon des règles établies par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale

(OACI).



FIGURE 4.8 – Une balise VOR co-localisée avec le DME [Dme19].

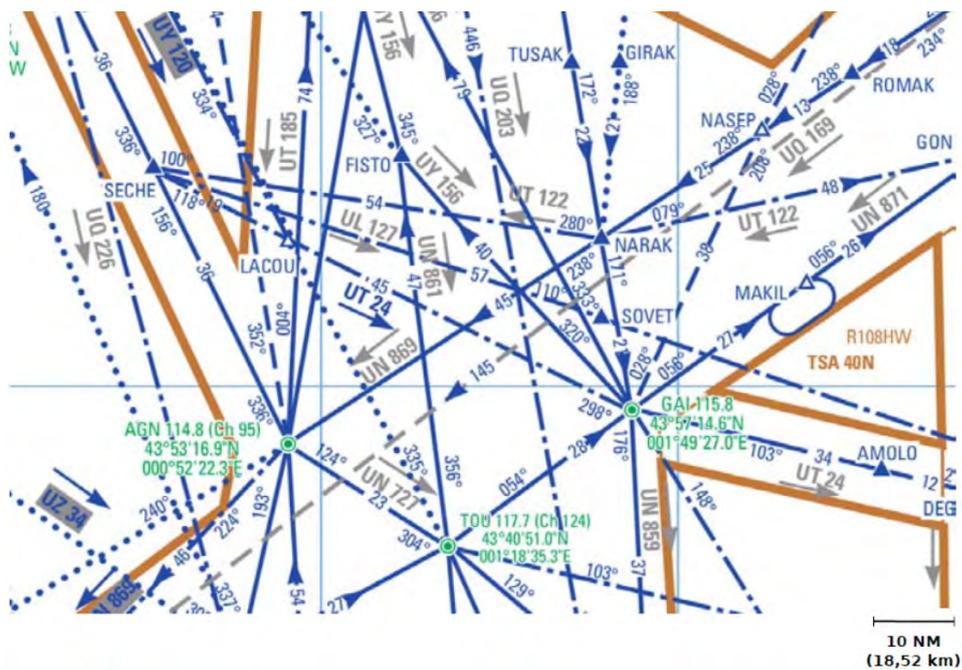


FIGURE 4.9 – Extrait d'une carte répertoriant les routes aériennes près de Toulouse. [GIR14].

Dans la suite de ce chapitre, pour modéliser la mobilité des avions commerciaux, nous considérons que la trajectoire d'un avion suit plusieurs segments de route définis par les balises VOR et DME. Elle est considérée rectiligne au dessus de la zone d'intérêt. Si sur cette trajectoire, un avion est caractérisé par son vecteur vitesse  $\vec{V}$  constant, sa position instantanée  $M(t)$  est donnée par :

$$M(t) = V(t - t_0) + M_0, \quad (4.7)$$

où  $M_0$  est la position initiale ou de référence de l'avion au temps  $t_0$ ,  $t$  exprime le temps courant.

Après avoir défini les routes par lesquelles passent les avions au dessus de la zone d'intérêt, il reste à déterminer la fréquence avec laquelle ces routes sont empruntées par les avions. Pour cela, nous utilisons un autre outil ouvert, en ligne, *Wego* [Go19] qui récapitule les vols programmés par les différentes compagnies aériennes à travers le monde. Le Tableau 4.2 relève le planning hebdomadaire des vols sur 8 routes différentes qui traversent une portion du Sahara qui est prise comme zone d'intérêt.

Comme ce modèle de mobilité est simple, nous ne considérons pas les effets des phénomènes météorologiques sur les trajectoires des avions et leur vitesse moyenne est prise égale à 0,84 Mach soit environ 285,852 m/s. C'est la vitesse de croisière pour la plupart des avions commerciaux [VMB13].

		Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Paris CDG	Douala	10.55 am		10.55 am		10.55 am	10.55 am	10.55 am
Paris CDG	Yaounde	2 pm			1.30 pm		2 pm	1.30 pm
Paris CDG	Abuja	1.10 pm				1.10 pm		1.10 pm
Paris CDG	Lagos	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm
Casablanca	Ndjamenana		10.15 pm		10.15 pm			10.15 pm
Istanbul	Niamey	6.05 pm		6.05 pm		6.05 pm		6.05 pm
Istanbul	Accra							2.40 pm
Istanbul	Lagos	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm	2.15 pm

Tableau 4.2 – Exemple de planning hebdomadaire de vols.

Dans le paragraphe suivant, nous calculons la durée maximale de communication entre un capteur et un avion qui le survole. Nous convenons d'appeler cette durée **fenêtre de communication**.

### 4.2.3 Fenêtre de communication Avion-Capteur

La fenêtre de communication CW (*Communication Window*) caractérise le temps de contact entre un capteur et un avion lorsque celui-ci survole la zone d'intérêt où se trouve le capteur.

Selon le modèle de communication décrit par les équations 4.2, 4.3 et 4.4, la portée d'un capteur est une sphère au centre de laquelle est placé le capteur et le rayon de la sphère correspond à la portée maximale du capteur. Nous n'aurions considéré que par la partie de la sphère au dessus du plan du sol qui contient le capteur comme décrit sur la figure 4.10. D'après le modèle de mobilité choisi (paragraphe 4.2.2), la trajectoire d'un avion est une droite. Ainsi une communication entre le capteur et un avion est possible si et seulement si la trajectoire de l'avion est sécante à la sphère de portée du capteur. La figure 4.10 montre un exemple d'intersection aux points  $P_1$  et  $P_2$  entre la trajectoire d'un avion et la portée d'un capteur. La fenêtre de communication CW est le temps durant lequel l'avion séjourne dans la sphère du capteur. Dans l'exemple de la figure 4.10, c'est le temps mis par l'avion pour parcourir la distance qui sépare  $P_1$  et  $P_2$ .

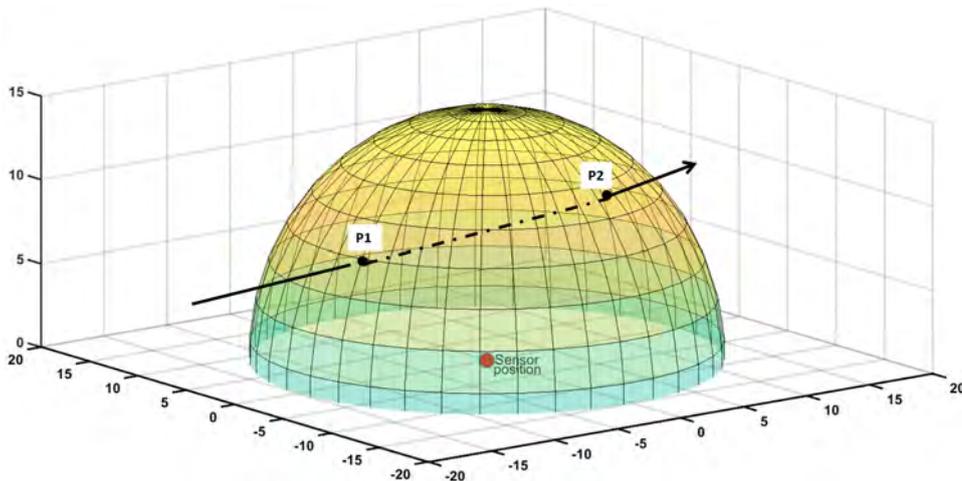


FIGURE 4.10 – Intersection entre la portée d'un capteur et la trajectoire d'un avion.

Comme défini précédemment, considérons que  $(X_0, Y_0, Z_0)$  et  $(X(t), Y(t), Z(t))$  soient les coordonnées 3D respectivement de la position initiale de l'avion et de sa position à l'instant  $t$ , le long de la trajectoire. Alors nous pouvons écrire l'équa-

tion (4.7) de la trajectoire sous la forme d'un système d'équations paramétriques tel que :

$$\begin{cases} X(t) = V_x(t - t_0) + X_0 \\ Y(t) = V_y(t - t_0) + Y_0 \\ Z(t) = V_z(t - t_0) + Z_0 \end{cases} \quad t > 0. \quad (4.8)$$

De plus, si nous considérons que le capteur est situé à un point de coordonnées  $(C_x, C_y, C_z)$ , la trajectoire de l'avion traverse la sphère du capteur si et seulement s'il existe au moins un point situé sur la sphère qui vérifie l'équation suivante :

$$(X(t) - C_x)^2 + (Y(t) - C_y)^2 + (Z(t) - C_z)^2 = d^2, \quad (4.9)$$

où  $d$  est le rayon de la sphère qui correspond à la portée du capteur. Nous substituons l'équation (4.8) dans (4.9) et résolvons pour obtenir les points d'intersection et en déduire la fenêtre de communication.

S'il n'y a pas de solution pour le système 4.8, cela implique que l'avion ne rentre jamais dans la sphère du capteur. S'il existe un seul point d'intersection comme solution, alors la trajectoire de l'avion est tangente à la portée du capteur et aucune communication n'est possible,  $CW$  est alors nulle. Lorsque il y a deux points d'intersection aux instants  $t_1$  et  $t_2$ , alors le capteur peut avoir un temps de communication valide avec l'avion et  $CW$  se déduit par :

$$CW = t_2 - t_1 \quad (4.10)$$

Pour que les données d'un capteur soient entièrement collectées par un avion qui le survole, le capteur doit impérativement communiquer durant l'intervalle de temps  $CW$ . Ainsi, le débit de collecte doit être adapté de telle sorte que le capteur puisse communiquer un grand volume de données à l'avion.

Dans le paragraphe suivant, nous calculons le volume de données qu'un capteur peut transmettre à l'avion pendant le temps  $CW$ .

#### 4.2.4 Volume et capacité de collecte de données

Dans ce paragraphe, nous calculons le volume de données collectées, appelé  $V_c$ , durant la fenêtre de communication, puis nous déduisons la capacité de collecte. La capacité de collecte est le débit moyen  $D_m$  avec lequel les capteurs communiquent avec les avions.

Le débit instantané d'un lien LoRa peut être calculé en utilisant l'équation (4.1). Il dépend de la largeur de bande passante utilisée et du facteur d'étalement choisi. La largeur de bande est fixée par le standard. Comme il est montré dans le tableau 4.1, pour atteindre de longues distances de communication, il faut choisir un grand facteur d'étalement SF aux détriments du débit de base qui décroît. Et, inversement pour de grands débits, un petit SF doit être choisi. Par exemple, dans la bande des 125 KHz, le débit de base varie entre 0,3 à 27 kbits/s.

Si un capteur  $N_i$  transmet avec les paramètres  $SF_i$ ,  $CR_i$ ,  $DR_i$  et possède  $CW_i$  comme fenêtre de communication avec un avion, alors le volume de données qu'il peut transmettre à l'avion est donnée par  $V_{c_i} = DR_i.CW_i$ . Par addition, de tous les capteurs qui auront transmis leurs données à un avion, le volume total collecté  $V_c$  est :

$$V_c = \sum_{i=1}^N DR_i.CW_i \quad (4.11)$$

où  $N$  est le nombre de capteurs couverts par un avion. Par ailleurs, si  $F_A = N_A/O_d$  est la fréquence des avions sur une route donnée où  $N_A$  est le nombre d'avions qui suivent la route et  $O_d$  est la période d'observation, alors nous pouvons estimer le débit moyen  $D_m$  de collecte pour le capteur  $N_i$  par :

$$D_{m_i} = V_{c_i}.F_A \quad (4.12)$$

Le calcul du débit moyen nous permettra de savoir à quel type d'applications notre méthode opportuniste de collecte est la mieux adaptée.

Dans la suite de ce chapitre, nous décrivons les scénarios pour évaluer et analyser notre méthode de collecte.

## 4.3 Évaluation

### 4.3.1 Scénarios

Nous étudions la faisabilité de notre méthode de collecte de données pour les zones blanches étendues en considérant le désert du Sahara comme zone d'intérêt. En nous basant sur les informations réelles des vols commerciaux, nous montrons qu'il est possible de collecter des données de diverses applications. En effet, le Sahara est un vaste désert chaud situé dans la partie nord du continent africain. Il s'étend sur 5000 km d'ouest en est, de l'océan Atlantique à la mer rouge, et couvre plus de 8,5 millions de km<sup>2</sup> (figure 4.11). Ce qui en fait la plus grande étendue

de terre aride d'un seul tenant au monde [Sah19], donc le Sahara est une zone blanche étendue par définition.

Il constitue une manne économique pour les pays qui le partagent. Il renferme de nombreux sites de prospection ou d'exploitation de ressources naturelles telles que le pétrole, le manganèse, le cuivre, le fer, le phosphate, l'uranium ou l'or. Il s'y trouve également l'une des plus grandes réserves d'eau douce au monde qu'il faut étudier et protéger [Gon+13]. Par exemple, la nappe phréatique sous le Sahara du Niger regorge plus de 2000 milliards de mètres cubes d'eau douce dont une grande partie est menacée par le risque de pollution radioactive [Nap19].

De plus, les recherches scientifiques qui se multiplient ces dernières années [Cli19], ont pour objet l'étude du Sahara, les conséquences du réchauffement climatique sur le climat. Cependant, toutes ces activités sont confrontées à un manque crucial d'infrastructure réseau pour la collecte et l'analyse des données, entre collaborateurs. Pour toutes ces raisons, nous nous sommes intéressés au Sahara pour évaluer notre méthode opportuniste de collecte des données.

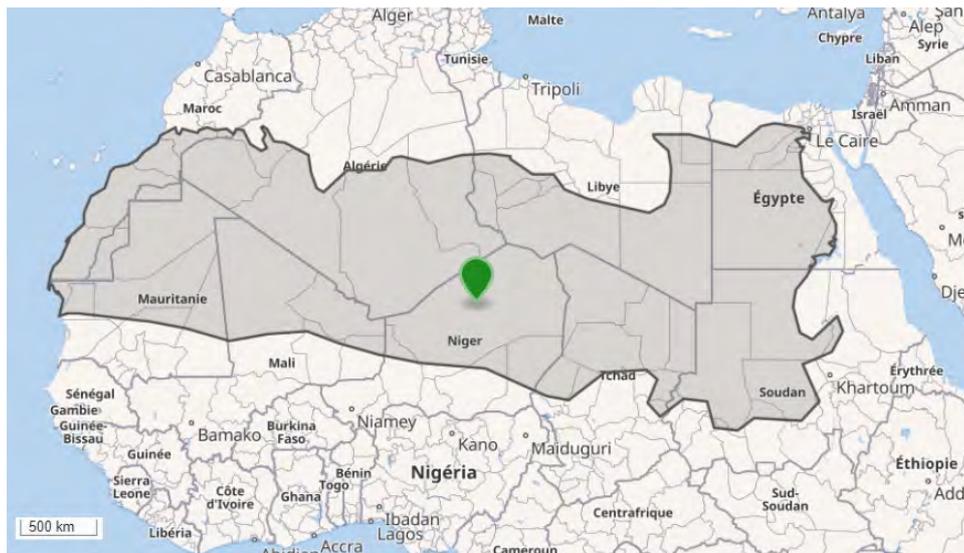


FIGURE 4.11 – L'étendue géographique du Sahara [Sah19].

Les informations sur les routes sont produites par l'outil *Openflight* [Fli19]. La figure 4.12 montre un ensemble de routes aériennes qui enjambent le Sahara. Les points représentent les aéroports de départ et d'arrivée tandis que les lignes droites schématisent les trajectoires qui relient ces aéroports. Dans notre premier scénario, nous avons considéré comme zone d'intérêt une portion du Sahara qui s'étend sur 40000 km<sup>2</sup> et qui est représentée par le carré sur la figure 4.12.

Pour nos simulations, nous avons considéré un sous-ensemble des routes qui survolent la zone d'intérêt qui sont les routes Paris-Douala, Paris-Yaounde, Paris-

Lagos, Paris-Kano Casablanca-N'Djamena, Istanbul-Niamey, Istanbul-Accra et Istanbul-Lagos. La fréquence des vols sur ces routes est indiquée dans le tableau 4.2.

Nous utilisons le système de coordonnées WGS 84 (*World Geodesic System 1984*) pour définir les positions des avions, des aéroports de départ et d'arrivée. Puisque ce système donne une localisation en 2D, nous utilisons, en plus, les altitudes (des avions, des positions de départ et d'arrivée) pour obtenir un positionnement en 3D. Ces coordonnées sont ensuite converties dans le système ECEF (en anglais *Earth-Centered, Earth-Fixed*) pour faciliter les simulations et les calculs. ECEF est un système de coordonnées cartésien qui prend pour point origine (0,0,0), le centre massique de la terre.

Pour constituer une cartographie de la capacité de collecte en tout point de la zone d'intérêt, nous avons procédé à une répartition de celle-ci en pixels. Chaque pixel est un carré de 5 km de côté, son centre est une position virtuelle de capteur. La figure 4.13 montre un exemple de zone d'intérêt pixellisée où les lignes droites représentent les trajectoires des avions et les carrés les pixels.

### 4.3.2 Les métriques de performance

Pour le calcul des débits de base LoRa, nous retenons l'ensemble des facteur d'étalement  $SF = \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$  afin d'analyser leur influence sur la capacité de collecte.

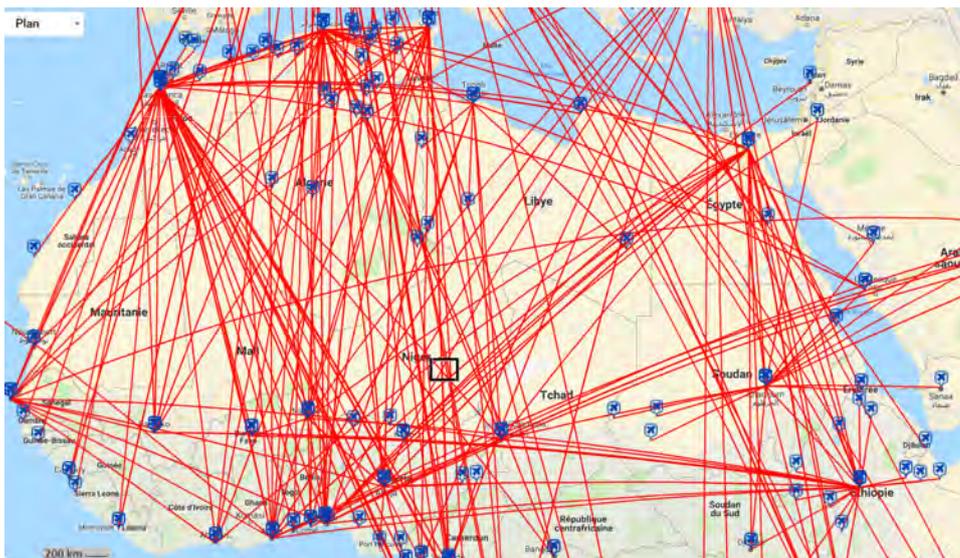


FIGURE 4.12 – Les routes aériennes au dessus du Sahara [Map19].

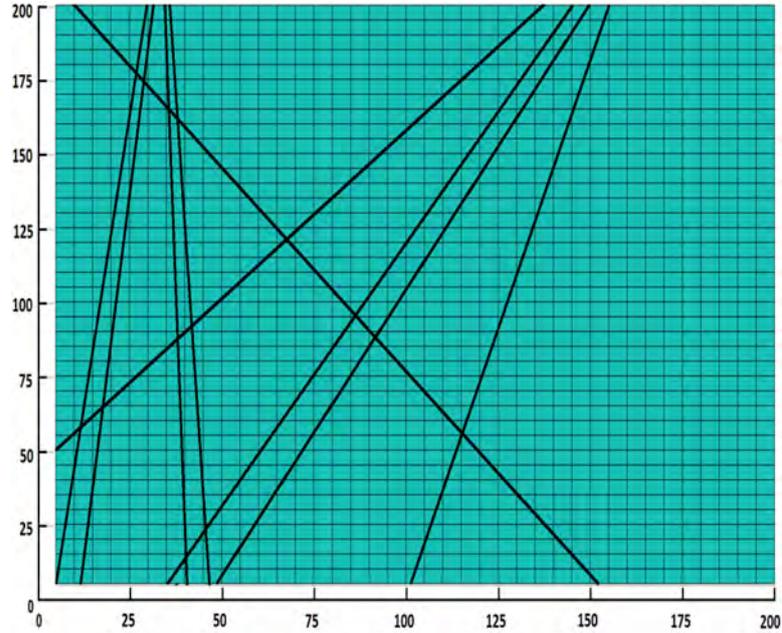


FIGURE 4.13 – Scénario avec la zone d'intérêt pixellisée.

L'évaluation de notre méthode se fait à travers l'analyse de plusieurs métriques qui sont le taux de couverture des pixels, la durée de communication CW et le débit moyen de collecte. Les résultats sont présentés et commentés dans le paragraphe suivant.

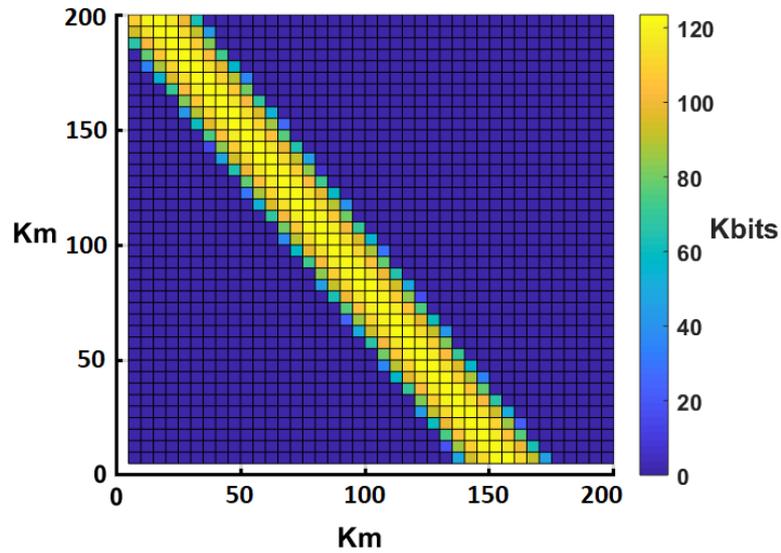
### 4.3.3 Résultats et discussion

#### 4.3.3.1 Influence du facteur d'étalement sur la couverture de la zone d'intérêt

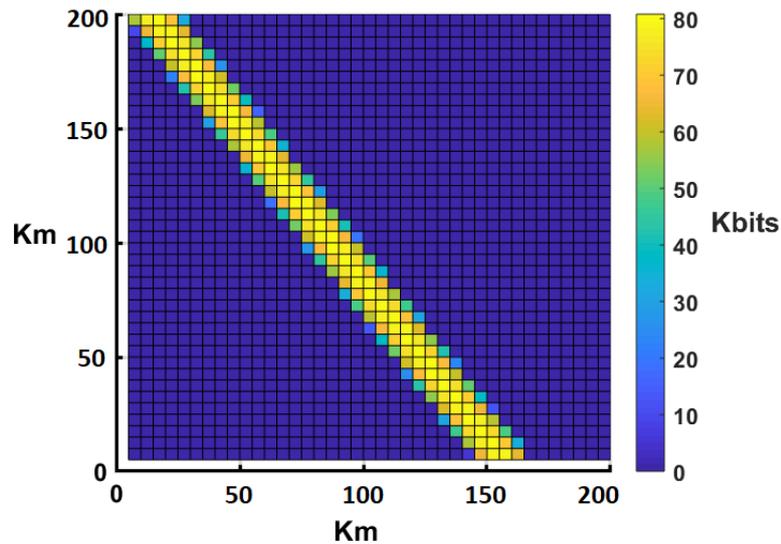
Le tableau 4.1 récapitule le compromis entre les facteurs d'étalement, la portée des capteurs et le débit. Cela fournit une indication sur les caractéristiques de communication à choisir pour satisfaire les besoins des applications.

Dans notre scénario, pour un avion qui se trouve à une altitude donnée, le nombre de pixels couverts est étroitement lié au facteur d'étalement choisi. Ceci est bien indiqué sur la figure 4.14 qui montre l'impact du facteur d'étalement sur la couverture d'une route. Dans cet exemple, nous avons considéré la route Casablanca-N'djamena et une altitude de vol de 9 km, pour un SF de 12, le nombre de pixels couverts par un avion est de 298 (figure 4.14a). Ce nombre décroît avec un SF plus petit. Par exemple, pour SF=7, il n'y a que 197 pixels qui sont couverts (figure 4.14b). En conséquence, le facteur d'étalement impacte également la quantité des données qui peuvent être collectées. Pour le même exemple, comme le montre la figure 4.14, la couverture de la zone ainsi que le volume de données

collectées sont meilleures pour les SF de valeur élevée. Sur ces figures, les parties claires correspondent aux meilleures performances.



(a) 298 pixels couverts,  $SF=12$ ,  $BW=125$  kHz.



(b) 197 pixels couverts,  $SF=7$ ,  $BW=125$  kHz.

FIGURE 4.14 – Influence de  $SF$  sur la couverture des pixels.

#### 4.3.3.2 Influence de la planification des vols sur la couverture de la zone

Nous avons ensuite analysé le taux de couverture de la zone d'intérêt par jour et durant une semaine d'observation. Nous remarquons que les meilleurs jours de collecte sont les jeudis et dimanches (nombre élevé d'avions), comme il est montré sur la figure 4.15. Par exemple, les dimanches, pour des facteurs d'étalement de 12, 10 et 7 respectivement 950, 850 et 724 pixels sont couverts pour un total de 1600

que compte la zone d'intérêt. Ce qui correspond à des taux de couverture respectifs de 0.6, 0.53 et 0.45.

Cependant, même si tous les pixels de la zone ne sont pas couverts, en fonction de la fréquence des avions sur une route considérée, certains pixels peuvent être survolés par plusieurs avions, dans un intervalle de temps de quelques heures par exemple. Cela améliore la taux de couverture localement et le volume de données collectées est augmenté.

Il peut être intéressant d'exploiter cette caractéristique du trafic aérien. Par exemple, les données des capteurs qui ne sont pas couverts ou qui le sont très peu, peuvent être relayées vers des points de collecte qui se trouve dans des endroits fréquemment survolés par les avions.

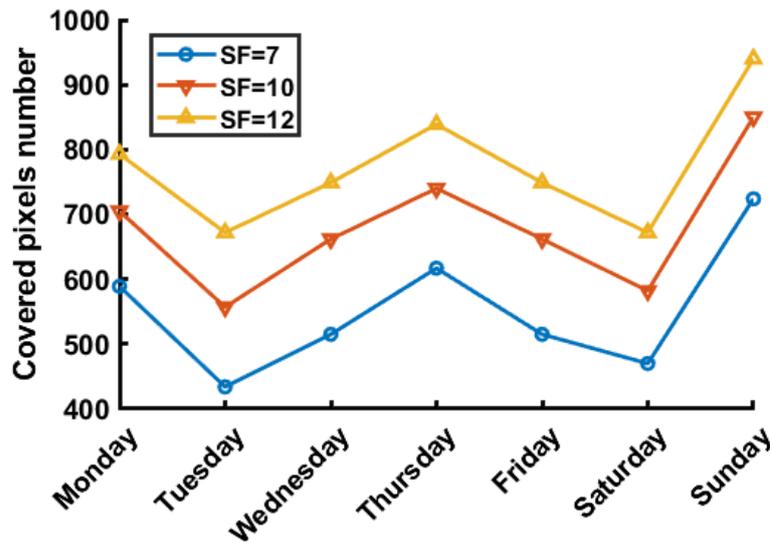


FIGURE 4.15 – Nombre de pixels couverts parmi 1600.

#### 4.3.3.3 Analyse de la fenêtre de communication

Comme définie dans le Paragraphe 4.2.3, la fenêtre de communication CW est l'intervalle de temps en secondes qui limite la phase de collecte des données. Nous l'avons calculée pour chaque pixel de la zone d'intérêt. Puisque dans notre scénario, nous avons considéré plusieurs routes et avions, pour un pixel donné, CW est la somme de tous les temps de contact qu'un capteur (placé dans un pixel) a avec l'ensemble des avions qui croisent sa portée. La figure 4.16 donne une illustration des fenêtres de communication pour l'ensemble des pixels de la zone. Ainsi, elle nous permet de situer et de distinguer les lieux bien couverts de ceux qui ne le sont pas du tout ou qui le sont très peu. Sur la figure 4.16, les pixels de couleur plus vive correspondent aux positions qui offrent les plus longs temps de communication

(plus CW supérieure à 500 secondes dans ce scénario). Ces positions sont celles qui se trouvent à l'intersection de plusieurs routes par exemple, alors que les couleurs sombres indiquent les lieux peu ou pas couverts (CW tend vers zéro). Ce résultat est obtenu pour une altitude des avions fixée à 9 km, SF=12, BW=125 kHz,  $\psi=-128.5$  dBm et  $L_p=154$  dB.

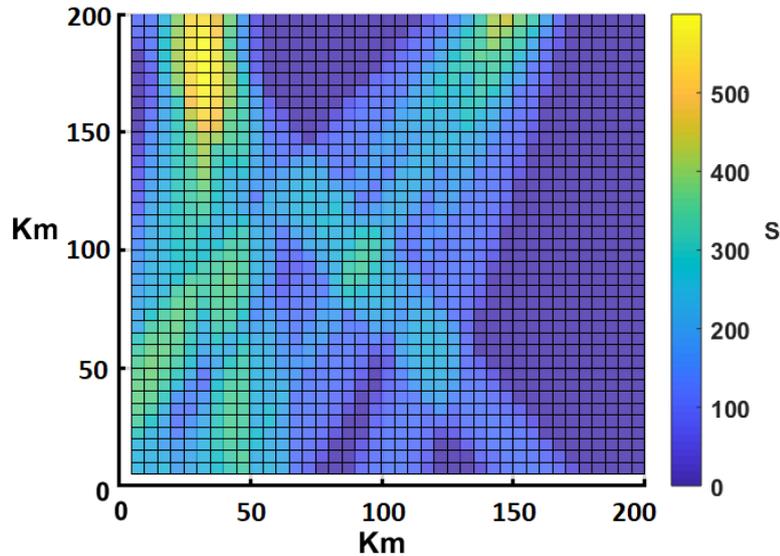
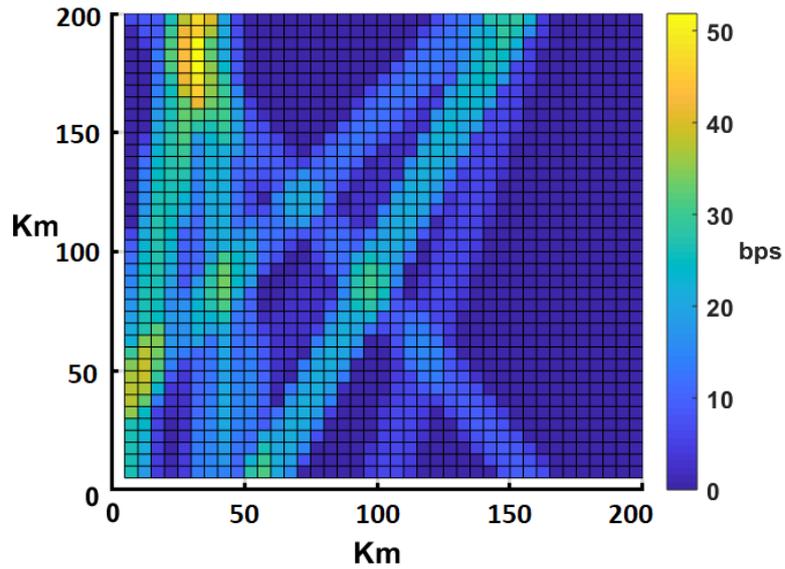


FIGURE 4.16 – Distribution des fenêtres de communication par pixel.

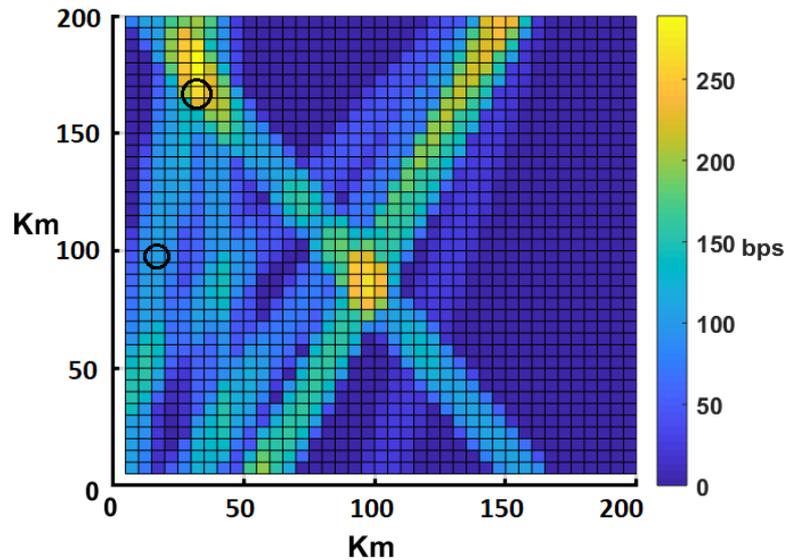
#### 4.3.3.4 Analyse du débit moyen

En outre, pour évaluer le débit moyen horaire de collecte  $D_m$  pour chaque pixel, nous avons considéré plusieurs facteurs d'étalement SF={12, 10, 7} pour des fins de comparaisons. Ces SF correspondent à des débits de base LoRa respectivement de 292,97, 976 et 5469 bits/s dans un canal de 125 kHz ou 1172, 3906 et 21875 bits/s dans un canal de 500 kHz. Ces débits sont calculés en utilisant la relation 4.1. Dans notre scénario, si nous prenons le dimanche, par exemple où il y a un vol sur chacune des routes considérées, certains pixels qui sont couverts par 2 ou 3 avions peuvent transmettre jusqu'à 160 ou 600 kbits s'ils opéraient respectivement dans des canaux de 125 et 500 kHz avec SF=12, car ce facteur d'étalement permet un large intervalle de temps de communication avec les avions (figure 4.16). Cette capacité de collecte augmente si nous choisissons un facteur d'étalement plus petit ou en augmentant la bande passante du canal. Par exemple, si nous considérons un facteur d'étalement SF=7, bien entendu le nombre de pixels couverts diminue mais on collecte plus de données puisque le débit LoRa augmente lorsque SF décroît (Paragraphe. 4.2.1).

Dans le cas où SF=7, BW=500 kHz, on peut collecter 8790 kbits sur les pixels



(a)  $BW=125$  kHz,  $\psi_r=-132$ dBm,  $DR=976$  bps.

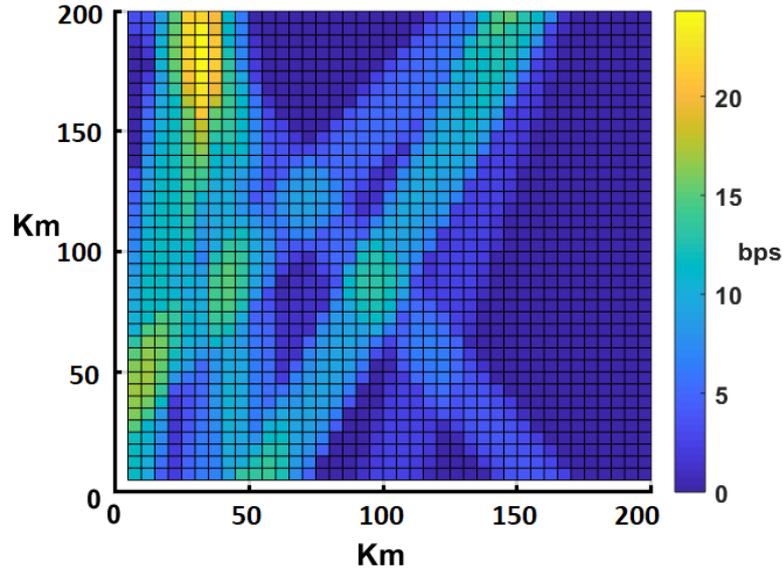


(b)  $BW=500$  kHz,  $\psi_r=-126$ dBm,  $DR=3906$  bps.

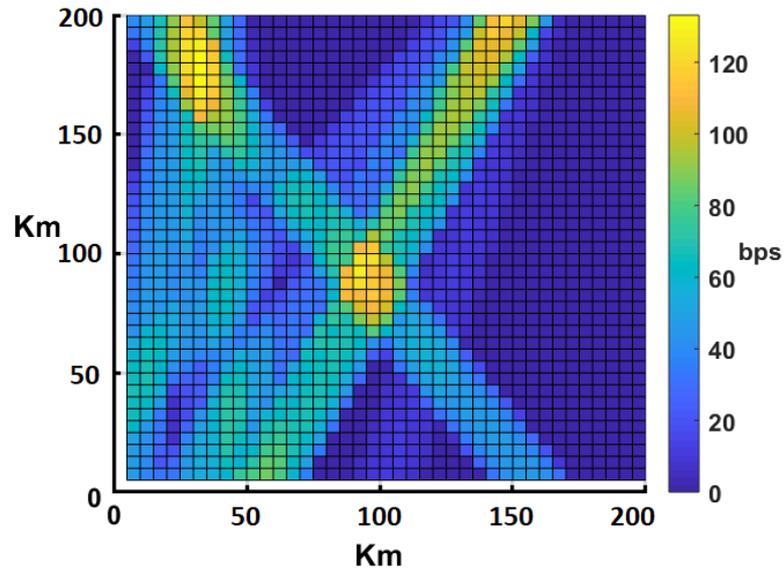
FIGURE 4.17 – Débit de collecte des données  $D_m$  (bps), case SF=7.

qui se trouvent à l'intersection de plusieurs routes, représentés par une couleur vive sur la figure 4.16. Nous pouvons alors déduire le débit moyen, par heure, de collecte de données (équation 4.12), en observant l'ensemble des vols sur toutes les routes en une semaine. La figure 4.17 montre une cartographie du débit moyen en tout lieu de la zone d'intérêt pour SF=7 pour les canaux de bande passante 125 kHz (4.17a) et 500kHz (4.17b). Les débits atteignent 50 et 250 bits/s respectivement pour les bandes 125 et 500 kHz.

La différence de débits entre ces figures est due non seulement à la différence



(a)  $BW=125$  kHz,  $\psi_r=-134.5$ dBm,  $DR=538$  bps.



(b)  $BW=500$  kHz,  $\psi_r=-128.5$ dBm,  $DR=2148$  bps.

FIGURE 4.18 – Débit de collecte des données  $CT$  (bps), case SF=10.

des bandes passantes, des débits de base LoRa mais aussi à la sensibilité des récepteurs. Une grande sensibilité améliore la portée des capteurs et le taux de couverture. En effet, avec un débit moyen de 250 bits/s, les pixels qui sont bien couverts peuvent transmettre aux avions jusqu'à 144 Mbits de données la semaine.

#### 4.3.3.5 Analyse des paramètres LoRa et du volume de données collectées

Les résultats de la figure 4.17 sont comparés avec ceux obtenus pour un SF=10 (figure 4.18). Le débit ainsi obtenu est plus faible avec 125 bits/s pour  $BW=500$  kHz

et 25 bits/s pour  $BW=125$  kHz, même si la largeur des zones couvertes est plus grande pour  $SF=10$  que pour  $SF=7$ . Ces débits moyens sont relativement faibles dans les deux cas ( $SF=7$  et  $SF=10$ ) car la fréquence des avions est plus faibles. Par exemple si, sur certaines routes, cette fréquence peut atteindre une dizaine de vols par semaine, sur d'autres routes elle n'est que d'un ou deux vols par semaine.

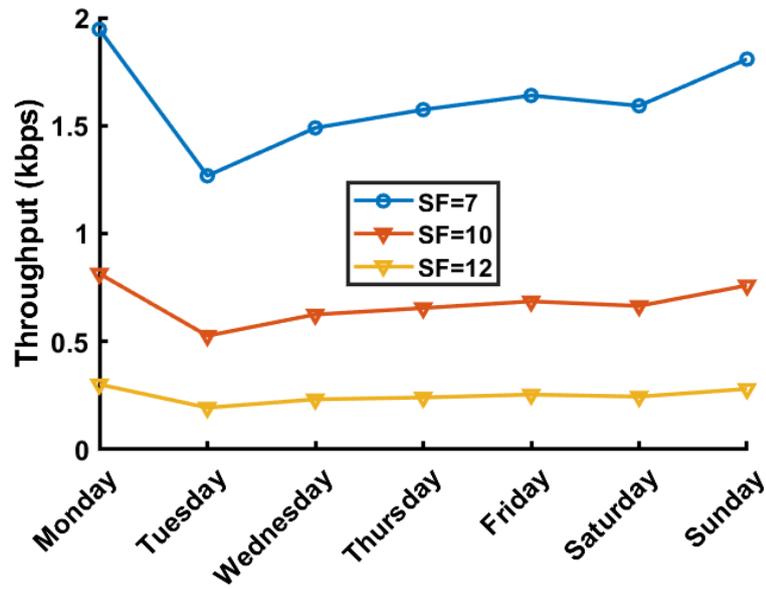
Si nous considérons le pixel vif encerclé sur la figure 4.17, il totalise un temps de communication de 1517 secondes dans la semaine. Avec les mêmes paramètres LoRa qui sont  $BW=500$  kHz,  $\psi=-126$  dBm,  $DR=2148$  bits/s, 3.1076 Mbits de données peuvent être collectées sur ce pixel. Par ailleurs, si nous considérons le planning hebdomadaire fourni par le tableau 4.2, le débit moyen est donné par la figure 4.19 et il est analysé pour les 125 et 500 kHz et  $SF=\{7, 10, 12\}$ .

Contrairement au résultat précédent, le débit moyen observé certains jours peut atteindre 12 kbits/s (figure 4.19b) et 2 kbits/s (figure 4.19a). Ces résultats obtenus conviennent à beaucoup d'applications qui sont couramment rencontrées dans les zones blanches étendues, qui ont besoin d'un débit de moins de 10 kbits/s (chapitre 2).

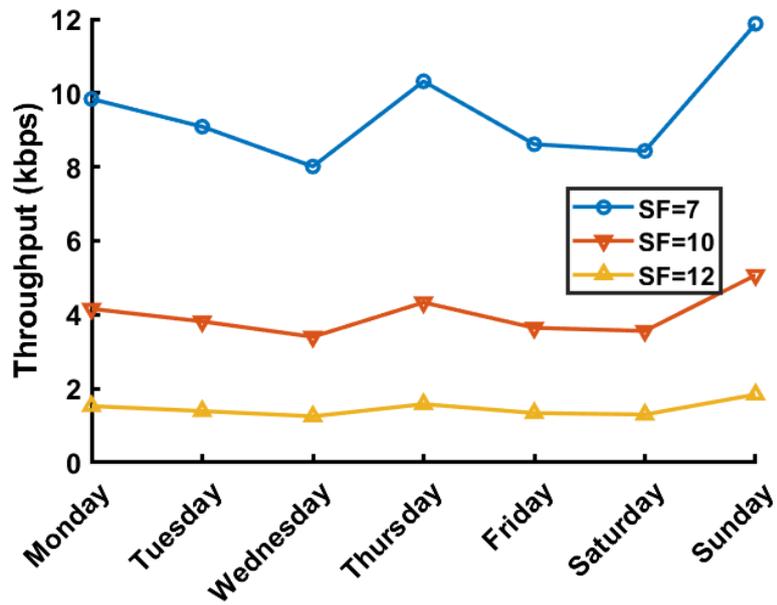
Par exemple, une application de monitoring de pipelines, par exemple, qui surveille l'état du réseau de pipeline et détecte d'éventuels points de fuite, génère 1000 octets par jour. Elle aurait besoin d'un débit de seulement 0.1 bits/s en continu pour acheminer son trafic. Ce besoin est largement couvert par notre méthode de collecte.

La figure 4.20 caractérise le débit dans l'heure où le contact entre capteur et avion a lieu pour deux pixels, un qui est couvert par 5 routes (4.20a) et un autre couvert par 2 routes (4.20b). Ces deux pixels sont identifiés par les cercles sur la figure 4.17. La figure 4.19 résume la règle selon laquelle les meilleurs débits sont obtenus pour un facteur d'étalement plus petit et une bande passante plus large. Et, même si les débits moyens peuvent être petits, de grands volumes de données sont collectés pendant les intervalles de communication entre les capteurs et les avions.

Enfin, le Tableau 4.3 donne l'estimation des données collectées par vol et par route et est associé au planning hebdomadaire qui est donné par le Tableau 4.2. Ces données sont collectées pendant la phase aller uniquement et pour une altitude de vol de 9 km où les paramètres LoRa pris en compte sont  $BW=125$  kHz et  $SF=7$ .

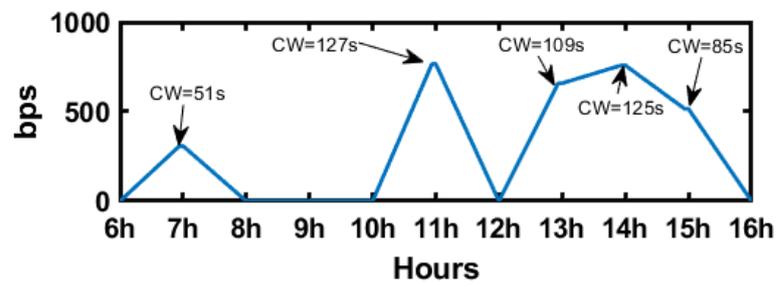


(a)  $BW=125$  kHz.

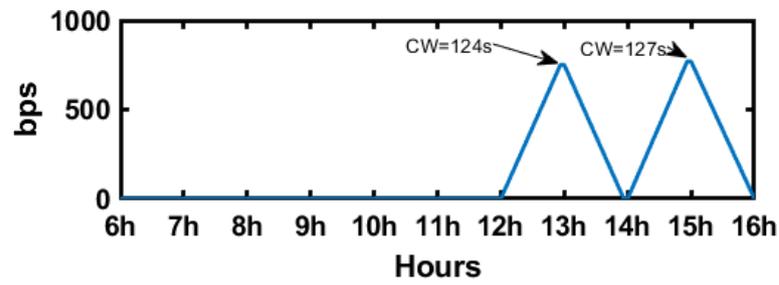


(b)  $BW=500$  kHz.

FIGURE 4.19 – Débit par jours.



(a) Pixels couverts par 5 avions).



(b) Pixels couverts par 2 avions.

FIGURE 4.20 – Analyse des débits, SF=7, BW=500kHz. Pixels encerclés sur la figure 4.17b

		Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Paris CDG	Douala	55.03		55.03		55.03	55.03	55.03
Paris CDG	Yaounde	55.78			55.78		55.78	55.78
Paris CDG	Abuja	54.31				54.31		54.31
Paris CDG	Lagos	48.44	48.44	48.44	48.44	48.44	48.44	48.44
Casablanca	Ndjamen		67.91		67.91			67.91
Istanbul	Niamey	39.33		39.33		39.33		39.33
Istanbul	Accra							20.83
Istanbul	Lagos	52.03	52.03	52.03	52.03	52.03	52.03	52.03

Tableau 4.3 – Volume de données collectées (Mbps) durant une semaine.  $DR=5.46$  kbps,  $BW=125$  kHz,  $SF=7$ ,  $d = 10.07$  Km.

## 4.4 Discussion et Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons considéré le problème de collecte des données des réseaux déployés dans les zones blanches étendues. L'objectif est de parvenir à collecter l'information générée par les capteurs même lorsque l'accès à la zone d'intérêt est difficile ou impossible. Nous avons montré que l'utilisation des méthodes de collecte telles que les véhicules, les drones, les ballons stratosphériques ou même les satellites à basse altitude est limitée dans les zones blanches étendues.

Nous avons alors proposé une nouvelle approche de collecte qui surmonte ces obstacles. C'est une méthode de collecte opportuniste qui propose d'utiliser les vols commerciaux pour collecter les données des capteurs lorsque les avions survolent les zones d'intérêt. Nous avons analysé la couverture de la zone, le débit de collecte offert et le volume de données qui peut être collecté au dessus de la zone. Nous avons montré que cette méthode convient à beaucoup d'applications (qui génèrent peu de trafic) communément développées pour les zones blanches étendues et qui peuvent tolérer des délai de transmission.

Enfin, pour améliorer les résultats obtenus par le scénario présenté dans ce chapitre, nous envisageons de placer des relais pour que les éventuelles sources de données, qui ne se trouvent pas sur les routes des avions, puissent communiquer avec les capteurs couverts. Les pixels couverts qui offrent de grands temps de communication avec les avions pourront servir de position pour des sous-puits de données. Les sous-puits de données recevront les données des sources trop éloignées, par l'intermédiaire des relais, et les transmettront aux avions. Enfin les avions les transmettront aux puits de données terminaux.

En outre, nous allons également considérer, dans le prochain chapitre, la technique de restitution des données par les avions au puits de données.



## **Chapitre 5**

# **Méthode multi-sauts de couverture et de collecte**



## 5.1 Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons étudié la faisabilité d'utiliser les vols commerciaux pour collecter les données générées par les réseaux de capteurs sans fil, déployés dans les zones blanches étendues. Les avions se comportent alors comme des puits mobiles. Cette méthode opportuniste a montré son intérêt notamment dans les régions survolées par les avions. En effet, nous avons estimé des débits moyens qui peuvent atteindre plus de 20 kbit/s ce qui permet de collecter de grands volumes de données. Cependant, avec cette méthode, deux problèmes restent à résoudre : le délai de collecte qui peut s'avérer long si la fréquence des avions est faible ainsi que l'existence de régions non couvertes par les vols commerciaux. Dans ce chapitre, nous proposons d'améliorer notre méthode de collecte de données pour les zones blanches étendues. Notre principal objectif est d'étendre la couverture de la zone d'intérêt aux régions non couvertes, en utilisant, comme dans la méthode du Physarum (chapitre 3), des noeuds relais pour atteindre les noeuds couverts par des avions de ligne. Les noeuds couverts sont appelés sous-puits. Par ailleurs, nous proposons d'attribuer suffisamment de volume de stockage aux sous-puits afin de stocker, temporairement, les données générées par les sources non couvertes. Enfin, puisque les sources de données non couvertes et les sous-puits sont interconnectés à travers une topologie multi-chemins, nous proposons également un mécanisme de routage basé sur le principe du plus court chemin. Ce protocole est utilisé par les sources pour transmettre leurs données aux sous-puits qu'elles ont choisis.

### 5.1.1 Collecte de données dans les zones non survolées

#### 5.1.1.1 Problématique liée au délai de collecte

Dans le chapitre 4, on définit le délai de collecte comme le délai entre la production de la donnée et sa collecte effective par le puits mobile. Il dépend de deux facteurs : la vitesse des avions et la fréquence à laquelle ils survolent la zone d'intérêt [Jon+08]. Ainsi, plus une ligne commerciale comporte de vols, plus une source de données aura de fenêtres de communication et plus vite les données seront collectées et transmises au centre de collecte.

Cependant, la collecte de données avec des puits mobiles procure par nature des liens de communication intermittents qui augmentent considérablement le délai de collecte, ce qui limite l'efficacité des protocoles de communications standards basés sur le protocole Internet [Jon+08]. Ainsi, lorsque des drones, par exemple, sont utilisés pour la collecte de données [Sah14 ; EKN17], le délai de collecte qu'ils

engendrent est calculé afin de concevoir de nouveaux protocoles de communications. On parle alors de protocoles de communication pour les réseaux tolérants au délai [DWW10; Voy12].

Dans ces protocoles, par exemple, des points de rendez-vous sont placés tout au long de la trajectoire du puits mobile [GZD11]. Ainsi, les sources qui ne sont pas sur cette route ont la possibilité de transmettre leurs données aux points de rendez-vous [DWW10]. Mais pour que cette méthode soit efficace et qu'elle n'engendre pas de la latence supplémentaire, le volume de données générées par les sources doit être réparti en fonction de l'état de la file d'attente dans les points de rendez-vous et surtout du temps nécessaire pour vider celle-ci [HC08].

### 5.1.1.2 Problématique liée aux relais et à la couverture

Du fait de la vaste superficie des zones blanches de type désert ou forêt, les vols commerciaux ne peuvent couvrir la totalité de ces zones d'intérêt. Par conséquent, lorsqu'une source de données se trouve dans une zone non couverte, il est impossible de collecter l'information générée. Un problème similaire a déjà été considéré dans des travaux antérieurs [GZD11; GZD09; Som+06; MY07], où des puits mobiles sont utilisés pour collecter les données dans de grands réseaux de capteurs sans fil. Les puits mobiles étant limités en énergie qu'ils embarquent, ils ne peuvent pas couvrir tous les nœuds déployés dans toute la zone.

Une solution est d'utiliser des relais pour acheminer en plusieurs sauts, les données des nœuds non couverts jusqu'aux puits mobiles [MY07]. Par exemple, les auteurs [MM10; YA08] ont proposé des méthodes de placement de relais afin que toutes les sources éparpillées puissent être tout le temps connectées au réseau. Mais toutes ces méthodes sont complexes à mettre en oeuvre et les solutions qu'elles proposent ne sont pas tolérantes aux pannes d'un lien, par exemple [Reb+15].

Par ailleurs, certains relais sont utilisés plus souvent parce qu'ils sont plus proches du chemin du puits mobile et ils consomment leur énergie plus vite que d'autres relais; la durée de vie du réseau s'en trouve alors réduite. Pour remédier à ce problème de dissipation précoce d'énergie des relais, des protocoles de communication ont également été étudiés [SRS04; JSS05] afin de répartir de façon efficace la charge de données entre plusieurs relais.

Cependant, tous ces travaux ont été effectués pour des puits mobiles de type drones, dans des environnements où les chemins suivis par les puits sont contrôlables et peuvent être calculés lors de chaque mission de collecte [Som+06; KMA16]. Ils ne peuvent donc être appliqués pour des scénarios de collecte de

données avec les vols commerciaux pour lesquels la planification des routes est fixe et ne change pas pendant de longues années (on parle de routes radio-électriques) [GIR14]. Lorsque les puits mobiles ne peuvent être contrôlés, il faut développer des solutions alternatives pour résoudre les problèmes de couverture, de connectivité des sources de données et de longs délais de collecte.

Pour améliorer l'efficacité de la méthode opportuniste de collecte de données en utilisant les vols commerciaux, nous proposons dans ce chapitre d'utiliser des relais, afin qu'ils connectent les sources de données non couvertes à des relais ou des sources qui se trouvent sur les routes de passage des avions. Non seulement cette méthode permettra aux sources de données de transmettre leur information à des points de collecte situés dans les régions couvertes par les avions mais aussi de les faire communiquer entre elles. Les relais sont choisis de telle sorte que toute source de donnée utilise un nombre minimum de sauts afin d'atteindre une destination choisie. Ceci permettra d'avoir une bonne connectivité dans le réseau tout en minimisant le nombre de relais à utiliser et leur énergie. Les relais sont placés selon la méthode du physarum développée au chapitre 3 car elle est assez simple et de complexité polynomiale. Notre solution propose de plus une méthode de recherche de chemins vers les points de collecte qui minimise le nombre de sauts et qui réduit le délai d'attente des données dans les files d'attente.

### 5.1.1.3 Défis à relever

Certaines applications des réseaux de capteurs sans fil sont tolérantes au délai dans une certaine mesure mais ont tout de même des contraintes de délai (voir paragraphe 2.2.2).

Pour atteindre nos objectifs, nous allons adresser ces différentes questions :

1. Quel est le délai induit par la fréquence des avions ?
2. Les sources de données sont-elles toutes connectées au réseau ?
3. Comment choisir le bon sous-puits de collecte pour une source ?

La suite de ce chapitre porte d'abord sur les réseaux tolérants aux délais DTN (*Delay Tolerant Networks*) et leurs caractéristiques. Puis, nous détaillons le mécanisme amélioré de la collecte de données dans les réseaux DTN, de collecte avec les avions de lignes dans les zones blanches étendues. Enfin, nous évaluons et analysons cette technique à travers divers scénarios. Les résultats sont comparés aux méthodes de collecte de données.

## 5.2 Les enjeux dans les réseaux de capteurs sans fil tolérants aux délais

L'introduction des puits mobiles (puits, stations de base et relais) dans les réseaux de capteurs sans fil induit de la latence dans la collecte des données à la destination finale [Voy12] puisqu'il faut attendre son passage puis son retour au centre de collecte avant qu'il puisse disposer des données. La latence est fortement liée à la mobilité du puits de collecte et peut se mesurer en minutes, en heures ou en jours [DWW10]. Les techniques de collecte de données avec les puits mobiles ne conviennent pas à certaines applications qui exigent de la communication temps-réel ou avec des garanties temporelles [JS10].

Les délais induits doivent être pris en compte dans la conception des réseaux de collecte de données avec des collecteurs mobiles. Les auteurs de [Fal03 ; VMB13 ; Bur+03 ; Llo+09 ; SBO19 ; Kui08] ont développé un nouveau concept dans les RCsF : il s'agit des réseaux de capteurs sans fil tolérants aux délais. C'est un concept hérité des communications inter-planétaires [Fal03], dans lesquelles les perturbations et le manque d'opportunité de connexion peuvent engendrer des délais qui atteignent souvent plusieurs mois [Kui08]. Le principe de fonctionnement reste le même : les données sont stockées dans certains nœuds du réseau en attendant que la connexion soit rétablie.

Il est important de concevoir de nouveaux protocoles qui intègrent la prise en charge des effets des délais induits [DWW10]. Les capteurs doivent être réveillés lorsque le puits mobile passe dans leur portée, alors que leur radio était en veille pour économiser leur énergie et étendre la durée de vie du réseau [Yun+13]. Pour cela, des méthodes de réveil radio ont été proposées pour les réseaux de capteurs sans fil avec puits mobile [MB14 ; CDC19]

### 5.2.1 Maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil DTN

Pour garantir une collecte de données efficace dans les réseaux DTN, il est important que les différents nœuds du réseau conservent leur énergie surtout dans les zones d'intérêt où il est impossible de recharger les batteries des capteurs. Cet aspect est longuement considéré dans la littérature [Sha+03]. Par exemple, le travail dans [YX10] propose un protocole pour optimiser la durée de vie du réseau. Le protocole prend en compte l'état des batteries des nœuds pour déterminer le volume de données à transférer au puits ainsi que la durée de la communication du capteur. L'auteur montre ainsi que le délai de collecte n'affecte pas la vie du réseau. Cependant, l'inconvénient de ce protocole est que le volume de données

collectées est très limité.

Le volume de données collectées et le délai de collecte peuvent être améliorés si on définit une trajectoire optimale au puits de données lors des missions de collecte [Hu+14], pour les puits mobiles de type drones.

### **5.2.2 Conception de la trajectoire des puits mobiles dans les DTN**

Les communications dans les réseaux DTN sont intermittentes. Si le puits pouvait visiter tous les capteurs, il pourrait collecter toutes les données disponibles mais ce n'est pas possible au vu des ressources (énergie, volume de stockage) à dépenser. Les trajectoires des puits mobiles vont chercher à minimiser le nombre de positions à visiter ; ces positions jouent le rôle de sous-puits ou de clusterhead [Hu+14]. Dans chaque endroit visité, le puits a un temps de collecte qui est défini de telle sorte que le délai global de sa mission soit minimal [XLW11]. La recherche de trajectoire optimale permet de répondre aux deux problèmes de maximisation de la vie du réseau et du volume de données collectées [M.+05] mais c'est un problème d'optimisation complexe et NP-difficile [Hu+14]. Par ailleurs, celui-ci introduit un problème de routage dans cette architecture où le déplacement du puits mobile est limité qu'à un petit nombre de nœuds [ACA09].

Une méthode efficace de collecte pour les zones blanches étendues doit tenir compte de tous ces enjeux afin de maximiser le volume de données que l'on peut collecter. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons une approche qui permet d'étendre couverture du réseau aux zones non couvertes par les puits mobiles (avions) et de réduire le délai en diminuant le temps d'attente des données dans les différentes files des sous-puits.

## **5.3 Amélioration de la couverture et la connectivité dans les zones blanches étendues**

Notre méthode prend en compte les enjeux des réseaux DTN et elle consiste à utiliser des relais pour étendre la couverture aux zones non couvertes par les avions et en même de temps, d'acheminer le trafic vers des points de collecte survolés par les avions.

### **5.3.1 Définition**

Les points de collecte ou sous-puits de données sont des stations relais couvertes par les routes des avions. Ils ont pour rôle de recevoir les données générées

par les sources éloignées, de les stocker et enfin de les retransmettre aux avions lorsque ceux-ci arrivent dans leur portée. Placés en grand nombre, les points de collecte augmentent le volume de données que les avions vont collecter et de réduire la latence de transmission. Comme dans les DTN classiques [Fal03], les points de collecte jouent le rôle de passerelles entre les sources de données et les puits mobiles.

Dans la suite de ce chapitre, pour répondre aux questions posées, nous allons détailler notre méthode qui permet à toutes les sources de se connecter aux différents points de collecte en utilisant un nombre réduit de relais.

### 5.3.2 Système et hypothèses

Nous considérons une zone d'intérêt comme le montre la figure 5.1, dans laquelle un ensemble de sources de données sont uniformément placées. Nous supposons que certaines sources de données ne se trouvent pas dans des positions couvertes par les avions (rectangles rouges).

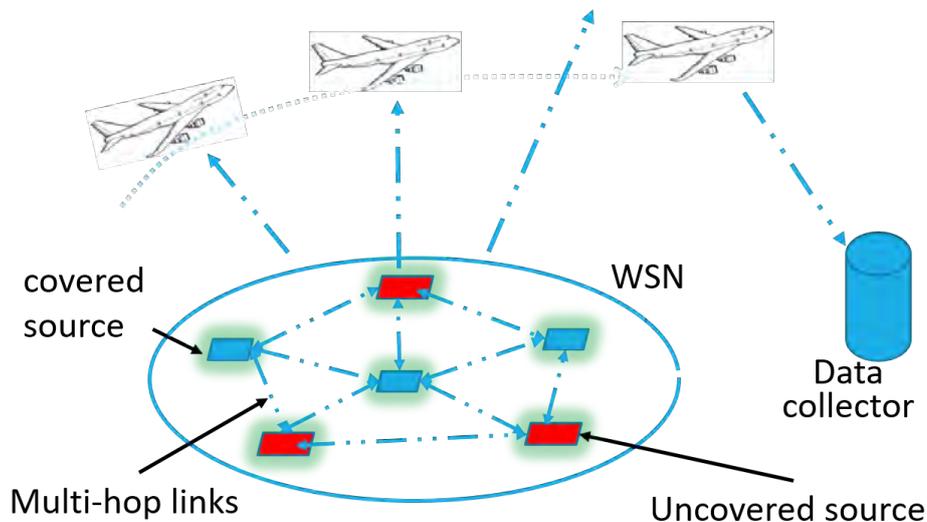


FIGURE 5.1 – Zone d'intérêt et scénario.

Nous considérons également un ensemble de points de collecte répartis sur les différentes routes des vols commerciaux (rectangles bleus). La position de ces points de collecte détermine leur fenêtre de communication et leur débit de communication (respectivement définis dans les chapitres 4.2.3 et 4.2.4). Chaque point de collecte dispose d'un espace de stockage de données pour stocker les données reçues des sources. Dans chaque point de collecte, les données sont stockées dans une file d'attente. Entre les sources de données éloignées et les sous-puits, il peut

exister des liens de communication multi-sauts assurés par des relais. Les données sont entièrement ou en partie transmises aux avions lorsqu'ils survolent les points de collecte. Enfin, nous considérons que les points de collecte peuvent se synchroniser sur les temps d'arrivée des avions afin de transmettre ses données durant sa fenêtre de communication avec l'avion.

Notre méthode consiste d'une part, à placer les relais pour connecter toutes les sources au réseau et d'autre part, à efficacement répartir les données entre les différentes file d'attente.

### 5.3.3 Construction d'une infrastructure connectant les sources aux points de collecte

Dans ce paragraphe, nous proposons de construire un réseau d'interconnexion de toutes les sources de données avec les points de collecte avec un nombre de relais limité. Ainsi, toutes les données générées dans le réseau pourront être stockées dans les noeuds traversés par les avions.

Pour calculer cette topologie d'interconnexion, nous utilisons la même approche que dans le chapitre 3. Notre solution de déploiement de réseau de capteurs est une heuristique inspirée de la croissance du physarum, décrite dans le paragraphe 3.5.1. Cette solution calcule un compromis entre la robustesse du réseau (redondance des liens) et le nombre de relais à utiliser. Cependant, la solution présentée dans le chapitre 3 est proposée pour un seul puits de données. Dans ce chapitre, nous adaptons cette heuristique de déploiement afin de supporter plusieurs sous-puits. Nous rappelons que les sous-puits sont l'ensemble des points de collecte situés sur les trajectoires des avions. La modification que nous apportons dans cette heuristique consiste à ajouter des poids à l'ensemble des destinations des sous-puits. Ces poids sont attribués en fonction des capacités de communication des sous-puits. Ainsi, les sous-puits qui ont de plus grands débits se voient attribuer de grands volumes de données à transmettre. Le puits diffère des sources de données car un poids plus fort lui est attribué qui lui donne une plus grande probabilité d'être choisi comme destination.

Tout comme les résultats décrits dans le paragraphe 3.7, cet algorithme, à la fin de son exécution, calcule une topologie du réseau qui connecte l'ensemble des sources de données et les points de collecte entre eux, en utilisant un nombre limité de relais choisis de façon à avoir des liens redondants. Cet algorithme modifié, appelé **PhyNetB** diffère de **PhyNetA** par l'insertion d'une étape dans laquelle on définit les points de collecte auxquels on associe un poids. A la fin de son exécution,

il donne une infrastructure qui connecte toutes les sources de données aux sous-puits. La redondance est assurée car on obtient une  $k$ -connectivité entre chaque couple (source, sous-puits), avec  $k \leq 2$  (comme discutée dans le paragraphe 3.7).

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons notre méthode de routage qui détermine le meilleur chemin d'une source à un sous-puits, en minimisant le nombre de sauts en utilisant le réseau d'interconnexion calculé avec l'algorithme **PhyNetB**.

---

**Algorithme 3 : PhyNetB**

---

**Données :** Graphe initial  $G(V, E, L)$

**Résultat :** Topologie de réseau

**Etape 1;**

Définir les points de collecte;

Attribuer des poids aux points de collecte;

**Etape 2;**

Exécuter l'algorithme **PhyNetA**;

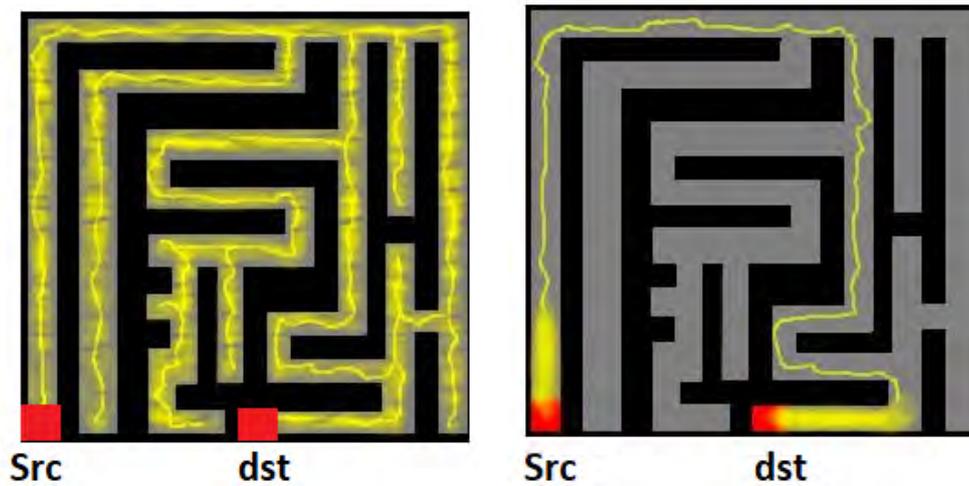
---

### 5.3.4 Routage des sources vers les sous-puits

#### 5.3.4.1 Heuristique dérivée du modèle du Physarum

Le réseau que nous obtenons de l'algorithme **PhyNetB** présente une topologie complexe de liens de communication sans fil dont de nombreux liens redondants. L'objectif, dans une telle structure, est de permettre aux différentes sources de données d'atteindre les points de collecte à travers des chemins constitués par le minimum possible de sauts. Nous proposons un algorithme de recherche de chemin optimal depuis chaque source vers les points de collecte avec un nombre limité de sauts. Une telle approche est en effet utilisée dans la littérature pour calculer un chemin à travers un labyrinthe [NYT01], ou pour calculer le plus court chemin dans un graphe connecté et des structures complexes de transport [MO07; Zha+13; TKN06]. La faible complexité de cet algorithme a guidé notre choix pour l'adapter facilement au domaine des réseaux et télécommunication comme dans [ZXG14; ZG13; Zha+14a] où il a inspiré des protocoles de routage.

Soit le graphe  $G = (V, E)$  associé à un réseau de données où chaque nœud  $v \in V$  représente un relais ou un capteur ou un point de collecte et chaque arête  $e \in E$  représente l'existence d'un lien sans fil entre deux nœuds, compte tenu de la portée de communication calculée selon le modèle défini dans le paragraphe 4.2.1. Nous



(a) Labyrinthe rempli du corps de physarum (b) Physarum trouve un chemin qui relie l'entrée à la sortie.

FIGURE 5.2 – Physarum peut calculer un chemin optimal dans une structure complexe [TKN07].

supposons que *src* est une source de données qui cherche à atteindre le point de collecte *dst*. L'algorithme, appelé **PhyRoute**, que nous utilisons pour trouver le plus court chemin entre une source et un point de collecte est dérivé de l'heuristique du physarum du chapitre 3, où on a une seule source et une seule destination.

L'algorithme **PhyRoute** s'arrête lorsque  $|D_{ij}^n - D_{ij}^{n-1}| < \delta$  où  $\delta$  est une valeur seuil. Cet algorithme de complexité  $O(N^3)$  [XZZ16] converge à un état d'équilibre dans lequel les flux ne varient plus. L'ensemble des liens qui contiennent un flux non nul constitue le chemin qui a survécu, donc le seul chemin qui relie la source à la destination choisie.

### 5.3.4.2 Simulation de l'algorithme PhyRoute

Pour évaluer les capacités de **PhyRoute** à calculer le plus court chemin dans un graphe de communication, nous avons considéré un scénario comme décrit sur la figure 5.3. Dans ce scénario, il s'agit d'un graphe de communication où les sommets numérotés de 1 à 7 sont des noeuds du réseau, les arêtes représentent des liens de communications bi-directionnels. Les valeurs marquées sur les arêtes représentent les coûts de communication. Nous modélisons le nombre de sauts qui constituent le chemin ou le lien reliant deux sommets par le coût de communication.

Dans ce graphe, nous utilisons l'algorithme **PhyRoute** pour déterminer le chemin le moins coûteux entre les noeuds 1 et 7. Le résultat est montré par la fi-

---

**Algorithme 4 : PhyRoute**

---

**Données :** Graphe initial  $G(V, E, L)$

**Résultat :** Chemin entre deux nœuds

*/\*Initialisation\*/;*

$D_{ij} \leftarrow ]0, 1]$  ( $\forall i, j = 1, 2, \dots, N \wedge L_{ij} \neq 0$ ); */\*matrice D des capacités\*/;*

$Q_{ij} \leftarrow 0$  ( $\forall i, j = 1, 2, \dots, N$ ); */\*matrice Q des flux\*/;*

$Q_{ij}^p \leftarrow 0$  ( $\forall i, j = 1, 2, \dots, N$ ); */\*matrice  $Q^p$  des flux à l'itération n-1\*/;*

$p_i \leftarrow 0$  ( $\forall i = 1, 2, \dots, N$ );

$n \leftarrow 1$ ;

$converge \leftarrow 0$ ;

**tant que**  $converge=0$  **faire**

    Choisir la source ;

    Choisir la destination ;

$p_k \leftarrow 0$ ; */\*k est l'indice de la destination\*/;*

    Calculer et associer à chaque sommet un potentiel; */\*Équation 3.5\*/;*

**pour**  $i = 0$ ;  $i < N$ ;  $i = i + 1$  **faire**

**pour**  $j = 0$ ;  $j < N$ ;  $j = j + 1$  **faire**

*/\*Calculer les nouveaux flux\*/;*

$Q_{ij} \leftarrow D_{ij}(p_i - p_j)/L_{ij}$  ;

**fin**

**fin**

*/\*Adapter la capacité des liens\*/;*

**pour**  $i = 0$ ;  $i < N$ ;  $i = i + 1$  **faire**

**pour**  $j = 0$ ;  $j < N$ ;  $j = j + 1$  **faire**

$D_{ij} \leftarrow f(Q_{ij}) + D_{ij}$  ;

**fin**

**fin**

*/\*Comparer les flux actuels et précédents\*/;*

**si**  $Q^p == Q$  **alors**

$converge \leftarrow 1$ ;

**sinon**

$Q^p \leftarrow Q$ ;

$n \leftarrow n + 1$ ;

**fin**

**fin**

---

gure 5.4. Ainsi, c'est le chemin  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  qui est choisi. Si nous comparons le coût de chemin par rapport aux autres, nous trouvons qu'il a le plus petit coût égal à la somme des coûts des différentes arêtes, soit 17. Le même résultat est obtenu avec l'algorithme de Dijkstra.

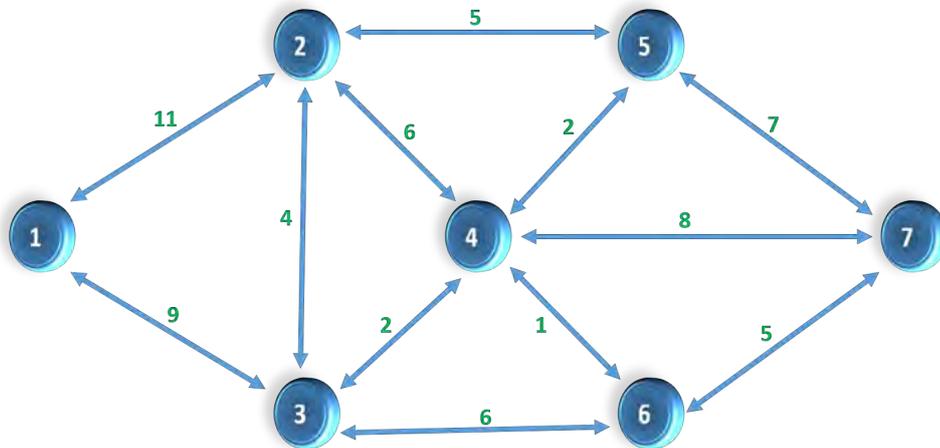


FIGURE 5.3 – Scénario de graphe de communication de 7 noeuds.

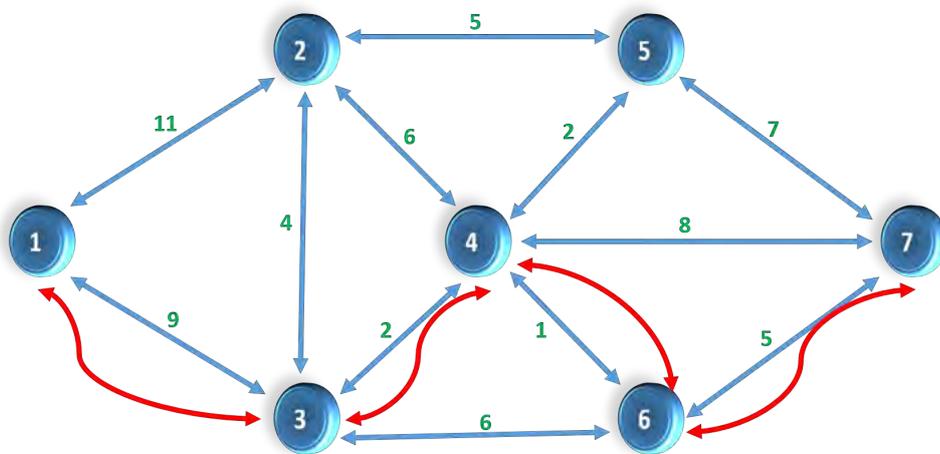


FIGURE 5.4 – Chemin entre les noeuds 1 et 7 par **PhyRoute**.

Par ailleurs, nous avons regardé un cas particulier où une portion du chemin choisi vient de rompre. Dans la pratique, cette situation survient lorsque, par exemple, un capteur consomme intégralement son énergie [Aky+02] ou lorsque le rapport signal sur bruit (plus interférence) est si élevé que l'information reçue ne peut être décodée sans erreur. Dans ces conditions, l'algorithme **PhyRoute** calcule un nouveau chemin vers la destination désignée.

Dans notre scénario, nous avons intentionnellement coupé le lien  $4 \rightarrow 6$  qui a

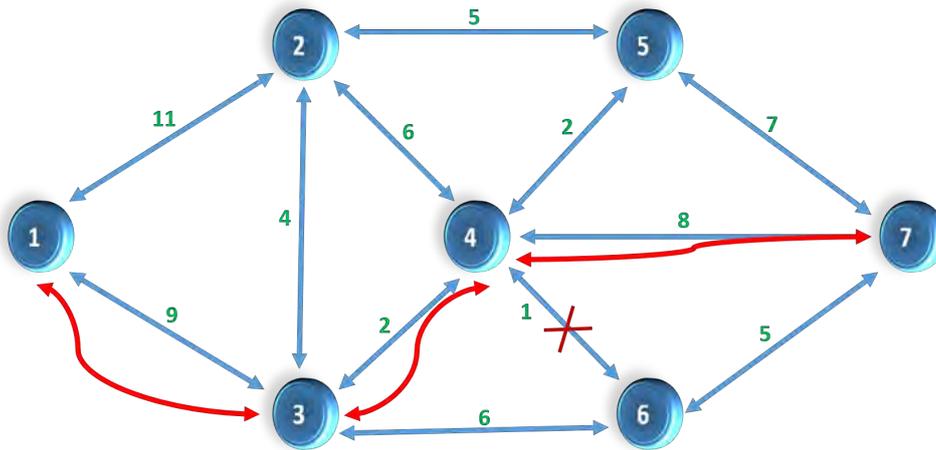


FIGURE 5.5 – Détection de panne.

un petit coût de 1. De nouveau, **PhyRoute** est capable de détecter la panne et de proposer un chemin alternatif par la sélection d’une autre arête. C’est une propriété du Physarum qui est également utilisée dans la navigation [TKN06]. Le résultat est montré par la figure 5.5. Le nouveau chemin alternatif est  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7$ . Sur la figure 5.6, l’ensemble des flux de tous les liens du graphe 5.5 est représenté en fonction du nombre d’itérations. Les liens qui ont survécu sont ceux dont les flux ont convergé vers 1, ce qui est cohérent avec le modèle mathématique de la dynamique des nutriments dans le corps du Physarum [TKN07]. Cependant, nous remarquons que dès le premier tiers des itérations nécessaires à l’arrêt de l’algorithme, les différents flux ont des variations strictement monotones.

Dans le paragraphe suivant, nous proposons une amélioration de **PhyRoute** qui vise à réduire le nombre d’itérations, ce qui permettrait de réduire le temps de calcul de l’algorithme surtout dans les scénarios de grands réseaux. Ensuite, nous utiliserons la version améliorée pour calculer les meilleurs chemins possibles entre nos sources de données et les points de collecte (sous-puits de collecte) qui se trouvent sur les routes des avions.

### 5.3.4.3 Limites et amélioration de PhyRoute

Le processus de suppression complète d’un lien dont le flux décroît prend beaucoup d’itérations et donc beaucoup de temps, comme il est montré sur la figure 5.6. Par ailleurs, nous observons des variations brusques des flux lors des 10 premières itérations. Cette variation est plus remarquée si nous représentons les flux séparément comme sur la figure 5.7. Les liens qui dégènèrent sont représentés sur la figure 5.7a) et ceux qui survivent sur la figure 5.7b). Le changement brusque (figure 5.7b), mis en relief par un cercle, est causé par la valeur initiale de la capacité

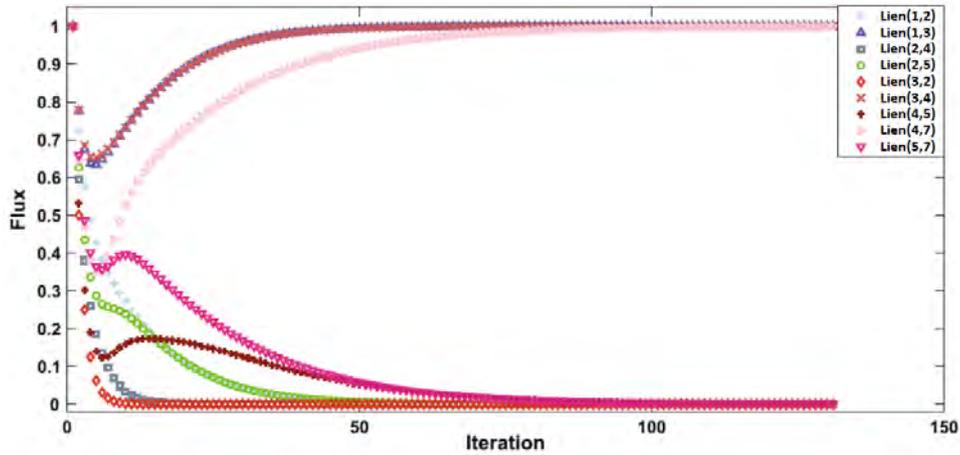


FIGURE 5.6 – Variation de flux dans les liens du graphe représenté par la figure 5.5.

du lien. En effet, les capacités initiales  $D_{ij}$  sont choisies aléatoirement dans l'intervalle  $]0, 1]$ . Durant les premières itérations, un lien qui a une faible capacité initiale et donc de faible flux peut régresser avant d'être renforcé au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmente.

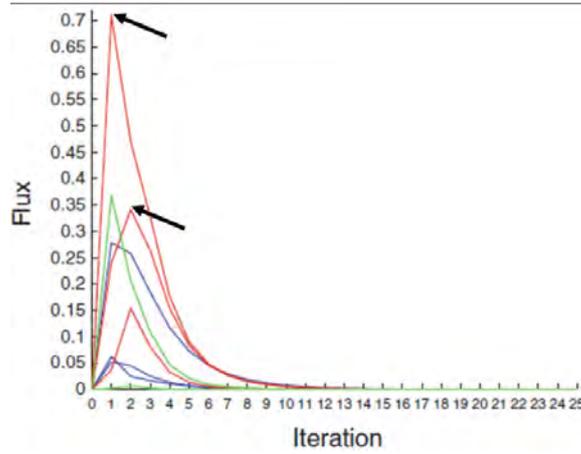
Sur la figure 5.7a, les flèches indiquent le moment où le flux commence à décroître. Nous constatons que les deux tiers des itérations sont utilisées pour complètement supprimer les liens dont le flux décroît [Zha+14b]. Alors, si nous déterminons le moment où un flux décroît ou croît et devient strictement monotone, nous accélérerons la convergence de l'algorithme en mettant à zéro les flux décroissants et en augmentant les flux croissants. Pour cela nous adaptons un critère de décision. Nous intégrerons dans l'algorithme **PhyRoute** une fonction de test qui détermine le moment où un flux  $Q_{ij}$  croît/décroît irrévocablement dans un lien de communication. La nouvelle fonction de test  $S$  est définie telle que [ZXG14] :

$$S(Q_{ij}^v, Q_{ij}) = Q_{ij}^v + C_1 + R_1(Q_{ij}) + R_2(n) \quad (5.1)$$

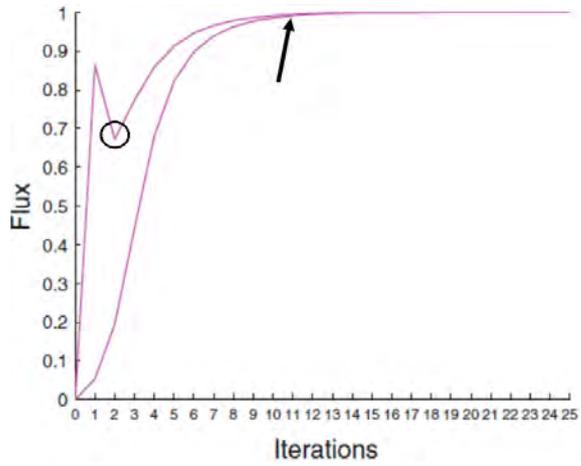
où  $Q_{ij}^v$  est le nombre de fois où la variation du flux  $Q_{ij}$  devient monotone.

$C_1 = 2$ ,  $R_1 = 10$ .  $R_1(Q_{ij})$  représente l'influence du flux courant sur  $S$  et  $R_2 = \log_{10}(N)$  est un paramètre de la fonction  $S$  qui tient compte de la taille du graphe initial [Zha+14b].

Si  $S(Q_{ij}^v, Q_{ij}) \leq 0$  alors la fonction de flux du lien commence une décroissance monotone et donc la valeur zéro est attribuée au flux  $Q_{ij}$  correspondant. L'équation 5.2 montre la manière dont  $Q_{ij}^v$  est incrémenté en fonction de la différence des valeurs des flux  $Q_{ij}$  et  $Q_{ij}^p$ , respectivement obtenus lors des itérations  $n$  et  $n - 1$ .



(a) Variation de flux dans les liens qui dégèrent



(b) Variation de flux dans les liens qui survivent.

FIGURE 5.7 – Variation de flux dans un graphe connecté de 5 nœuds.

$$Q_{ij}^v = \begin{cases} Q_{ij}^v + 1, & |Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| \geq 0 \text{ et } Q_{ij} \geq 0 \\ +1, & |Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| \geq 0 \text{ et } Q_{ij} < 0 \\ Q_{ij}^v - 1, & |Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| < 0 \text{ et } Q_{ij} \leq 0 \\ -1, & |Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| < 0 \text{ et } Q_{ij} > 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Lorsque la différence  $|Q_{ij}| - |Q_{ij}^p|$  est supérieure ou égale à 0 et  $Q_{ij} \geq 0$ ,  $Q_{ij}^v$  est incrémenté de 1. Cela veut dire que le flux dans ce lien a augmenté par rapport à son état précédent et sa chance d'être sélectionné augmente. Lorsque le flux augmente dans plusieurs liens, il faut beaucoup d'itérations pour déterminer le début de la monotonie [Zha+14b].

Lorsque  $|Q_{ij}| - |Q_{ij}^p|$  est supérieur ou égale à 0 et  $Q_{ij} < 0$ , la variable  $Q_{ij}^v$  est mise à 1. Le flux dans le lien correspondant a augmenté et peut désormais survivre. Alors, les valeurs négatives de  $Q_{ij}^v$  précédemment enregistrées sont remises à 0.

Par contre, un début de régression d'un lien est mis en exergue par  $|Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| < 0$ . Dans cette condition,  $Q_{ij}^v$  prend la valeur 1. Enfin, si  $|Q_{ij}| - |Q_{ij}^p| < 0$  et  $Q_{ij} \leq 0$  alors la fonction du flux suit une décroissance monotone qui conduit à l'élimination totale du lien.

Avec cette fonction de test, nous adaptons ainsi une heuristique plus rapide que le modèle mathématique de recherche du plus court chemin (algorithme **PhyRoute**). Le nombre d'itérations est ainsi réduit de deux tiers par rapport à l'algorithme **PhyRoute**. Cette heuristique est détaillée par l'algorithme **PhyRouteX**. La condition d'arrêt de l'algorithme **PhyRouteX** est le non changement des flux dans tous les liens. Les deux algorithmes sont comparés par rapport au temps de convergence et le nombre d'itérations nécessaires. Les figures 5.8a et 5.8b montrent l'efficacité de l'algorithme **PhyRouteX** par rapport à l'algorithme **PhyRoute**, il nécessite moins de temps pour converger [Zha+14b]. Ces résultats sont obtenus pour un scénario où le nombre de noeuds varie de 100 à 1000. Sur les figures 5.8, chaque point représente la moyenne des valeurs obtenues pour 40 simulations. La source et la destination sont fixes pour toutes les simulations et les longueurs des arêtes sont aléatoirement attribuées au début de chaque série de tests [Zha+14b].

Nous utilisons l'algorithme **PhyRouteX** pour déterminer le plus court chemin entre une source et un point de collecte. Puisque le chemin est composé d'un ensemble de sommets du graphe et un sommet est un saut, nous obtenons le nombre de sauts qu'une source de données doit utiliser pour atteindre un point de collecte spécifique. Chaque saut représente un nœud qui relaie une information.

Les points de collecte sont des sous-puits qui reçoivent les informations de toutes les sources, les stockent et les retransmettent aux avions lorsqu'ils sont dans leur portée. Dans le paragraphe suivant, nous déterminons le temps nécessaire à tous les points de collecte pour transmettre leurs données à la destination finale par l'intermédiaire des avions.

## 5.4 Calcul du délai de collecte

Nous considérons qu'un sous-puits est caractérisé par son temps de communication avec les avions que nous avons défini par la fenêtre de communication avion-capteur (paragraphe 4.2.3). Il permet de calculer le débit moyen de collecte comme dans le paragraphe 4.2.3. De plus, à chaque sous-puits est associé un volume de stockage qui est en fait une file d'attente pour stocker les données à transmettre aux avions. Le délai de communication pour un point de collecte définit le temps que met celui-ci pour vider complètement sa file d'attente, et retransmettre l'inté-

---

**Algorithme 5 : PhyRouteX**

---

**Données :** Graphe initial  $G(V, E, L)$

**Résultat :** Chemin entre deux nœuds

Initialisation;

$D_{ij} \leftarrow (0, 1][\forall i, j = 1, 2, \dots, N \wedge i \neq j)$ ; /\*matrice D des capacités\*/;

$Q_{ij} \leftarrow 0(\forall i, j = 1, 2, \dots, N)$ ; /\*matrice Q des flux\*/;

$Q_{ij}^p \leftarrow 0(\forall i, j = 1, 2, \dots, N)$ ; /\*matrice  $Q^p$  des flux dans l'itération n-1\*/;

$Q_{ij}^v \leftarrow 0(\forall i, j = 1, 2, \dots, N)$ ; /\*variations des flux\*/;

$p_i \leftarrow 0(\forall i = 1, 2, \dots, N)$ ;

$n \leftarrow 1$ ;

$converge \leftarrow 0$ ;

**tant que**  $converge=0$  **faire**

$p_j \leftarrow 0$ ; /\*Pression au point de collecte\*/;

    Calculer les pressions des noeuds; /\*Équation 3.5\*/;

**pour**  $i = 0$ ;  $i < N$ ;  $i = i + 1$  **faire**

**pour**  $j = 0$ ;  $j < N$ ;  $j = j + 1$  **faire**

$Q_{ij} \leftarrow D_{ij}(p_i - p_j)/L_{ij}$ ;

            Mettre à jour  $Q_{ij}^v$  en fonction de  $Q_{ij}$  et  $Q_{ij}^p$ ; /\*Équation 5.2\*/;

**si**  $Q_{ij}^v \leq f(Q_{ij}^v)$  **alors**

$Q_{ij} = 0$ ;

$Q_{ij}^v = 0$ ;

**fin**

**fin**

**fin**

**pour**  $i = 0$ ;  $i < N$ ;  $i = i + 1$  **faire**

**pour**  $j = 0$ ;  $j < N$ ;  $j = j + 1$  **faire**

$D_{ij} \leftarrow f(Q_{ij}) + D_{ij}$ ;

**fin**

**fin**

**si**  $Q^p == Q$  **alors**

$converge \leftarrow 1$ ;

**sinon**

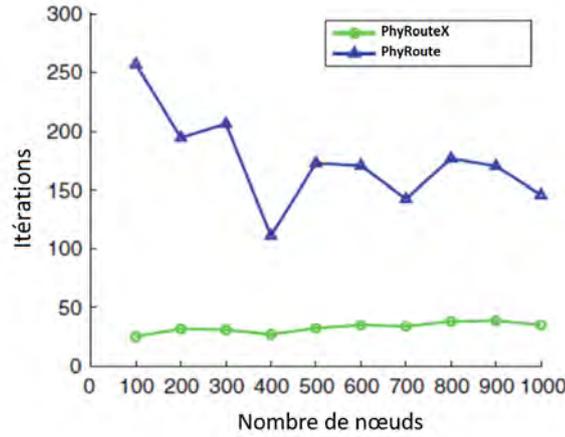
$Q^p \leftarrow Q$ ;

$n \leftarrow n + 1$ ;

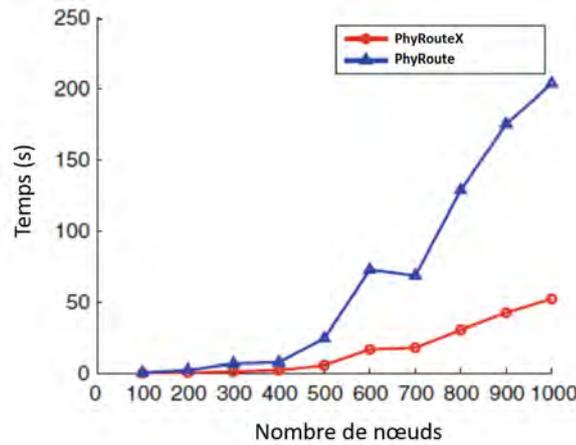
**fin**

**fin**

---



(a) Nombre d'itérations avant convergence



(b) Délai de convergence

FIGURE 5.8 – Comparaison entre les algorithmes **PhyRoute** et **PhyRouteX** [Zha+14b].

gralité des données aux avions qui sont dans sa portée. Nous convenons d'appeler ce délai de transmission *forwarding delay*.

Si un point de collecte  $i$  possède un débit de  $CT_i$  et un volume de données stockées de  $X_i$  alors le temps total pour retransmettre toutes ses données est donné par la relation suivante :

$$\Delta_i = \frac{X_i}{CT_i}, \quad (5.3)$$

De la même manière, pour l'ensemble des points de collecte, la latence dans le réseau est la somme de tous les *forwarding delay* des différents sous-puits. Nous considérons que le temps de propagation entre une source et son point de collecte est très inférieur au temps de propagation vers les avions. Dans le paragraphe suivant, nous montrons comment est choisi un point de collecte spécifique par une source, afin de lui transmettre ses données.

## 5.5 Choix du sous-puits par les sources de données

### 5.5.1 Méthode basée sur la distance

Dans un réseau de collecte de données avec un puits mobile, le puits ne peut pas visiter toutes les sources de données lorsque celles-ci sont placées très loin les unes des autres [GZD09 ; Som+06], dans une zone blanche étendue. Le collecteur mobile (terrestre ou aérien) n'a pas suffisamment d'énergie pour parcourir de très longues distances (milliers de kilomètres) et il se déplace suivant une trajectoire définie qui ne passe que par un nombre limité de sources.

Cependant, pour acheminer le trafic des sources non visitées par le collecteur mobile, des relais sont utilisés pour leur permettre d'envoyer leurs données à noeuds qui sont dans la trajectoire du collecteur. Ces noeuds jouent le rôle de points de collecte dans le réseau et il existe différentes méthodes qui sont utilisées dans le choix de point de collecte par une source. Dans [Som+06], chaque source de données calcule le point de collecte le plus proche d'elle en utilisant le moins possible de sauts en relais en comparant l'énergie dépensée pour atteindre les différents sous-puits [WJW10].

Le principe de cette méthode est illustré à la figure 5.9. Le mobile qui se déplace, le long de sa trajectoire, transmet, à des intervalles de temps réguliers, un beacon. Le beacon permet une organisation hiérarchisée de la topologie du réseau. Toutes les sources qui reçoivent le beacon directement du puits mobile constituent plus tard des *clusterheads* tandis qu'ils retransmettent le beacon aux autres sources éloignées afin qu'elles deviennent les membres des différents *clusters*. Le beacon contient l'identité du noeud re-transmetteur, le nombre de fois qu'il a été relayé et l'identité du *clusterhead*. Sur la base de ces informations, les sources de données choisissent le *clusterhead* le plus proche d'elles et lui envoient leurs données. La communication au sein d'un *cluster* se fait par multi-sauts si nécessaire, entre les sources et le *clusterhead*. Donc un chemin comprend l'ensemble des sauts nécessaires pour une source pour atteindre le *clusterhead* et le plus court chemin est celui qui compte moins de sauts. La recherche du plus court chemin revient à exécuter l'algorithme de Dijkstra entre la source et le point de collecte ainsi choisi [GZD11]. Nous convenons d'appeler cette méthode, la méthode **MBSD** (Méthode Basée Sur la Distance).

Si les noeuds A, B, C reçoivent le beacon du puits mobile, ils sont systématiquement désignés comme *clusterheads* et les noeuds 1, 2, 3, 4, 5 sont repartis entre les *clusters*. Le *cluster* A et C comprennent deux noeuds chacun alors que le *cluster*

B comprend 4 noeuds. Le noeud 4 est d'abord membre de B puis il change pour devenir membre de C lorsque le noeud C devient *clusterhead*. Ensuite, si le puits mobile arrive dans la portée du noeud 5 et que celui-ci reçoit directement de lui le beacon, alors il cesse d'être membre du *cluster* C et il se voit lui-même attribué le rôle de *clusterhead*.

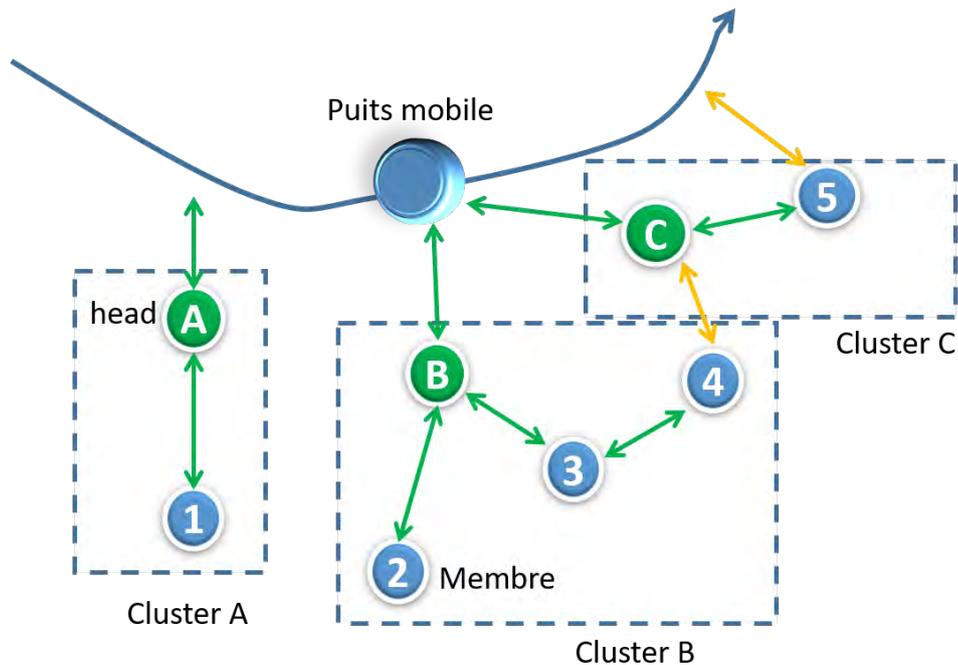


FIGURE 5.9 – Principe de formation des clusters.

Même si cette méthode est simple d'utilisation, elle a l'inconvénient de ne pas répartir efficacement le trafic entre les points de collecte [GZD09]. Elle est aussi sensible au moindre changement dans la trajectoire du collecteur mobile ou dans la topologie (ajout de noeuds, panne d'un noeud) du réseau.

Enfin, un autre inconvénient de cette méthode est, par exemple, le fait qu'un point de collecte ayant plus de débit peut être sous-exploité si sa position est très éloignée des sources de données et, inversement, un point de collecte avec un petit débit mais proche des sources va être saturé.

Pour remédier à ce problème et améliorer cette méthode, il faut adopter un mécanisme qui permet, par exemple, de limiter le nombre des membres dans un *cluster* en fonction de la capacité du *cluster-head*.

### 5.5.2 Méthode basée sur la fenêtre de communication

Le problème de répartition de trafic est considéré dans [GZD11]. Dans ce travail, l'auteur propose de limiter le nombre de sources qui se connectent à un même point de collecte. Pour cela, comme il est illustré sur la figure 5.10, la zone d'intérêt est partitionnée en deux zones de communication. La première est la zone de communication directe (ZCD) où tous les noeuds qui s'y trouvent peuvent communiquer directement avec le puits mobile. La deuxième partie est la zone de communication multi-sauts (ZCM) où les noeuds sont situés à plusieurs sauts du puits mobile et les données sont relayées de noeud en noeud avant d'arriver au puits mobile. Les noeuds dans la ZCD sont désignés comme les points de collecte ou sous-puits dans lesquels les données des capteurs situés dans la ZCM sont déposées, puis retransmises au puits mobile.

Contrairement à la méthode **MBSD**, les sources dans la ZCM ne se contentent pas seulement de calculer le plus proche point de collecte, leurs données sont plutôt réparties entre tous les points de collecte en fonction de leur fenêtre de communication et de leur capacité. La capacité d'un point de collecte désigne le débit avec lequel celui-ci communique avec le puits mobile. Le nombre de sources qui peuvent choisir un même point de collecte est donné par la relation suivante [GZD09] :

$$r_i^m = \frac{d_t t_i}{d_s t} - 1 \quad (5.4)$$

où  $d_s$  est le débit avec lequel les sources communiquent avec le point de collecte  $i$ .  $t$  est le temps mis par le puits mobile pour traverser toute la zone d'intérêt et  $t_i$  est la fenêtre de communication du point de collecte  $i$  avec le puits mobile.

Néanmoins, dans ce travail [GZD11], le sous-puits est toujours limité par le volume de données qu'il peut transmettre au puits mobile. ce qui n'est pas efficace pour la collecte de données avec des avions de ligne, dans les zones blanches étendues où un très grand nombre de sources est déployé et le volume de données généré est énorme.

Pour améliorer cette solution, nous proposons de mettre suffisamment de capacité de stockage sur les points de collecte de telle sorte qu'ils puissent empiler les données collectées tant qu'ils sont choisis comme destination et que les sources ont des données à envoyer.

Nous combinons et améliorons ces deux méthodes pour que les points de collecte soient efficacement sélectionner comme sous-puits. Notre approche est expliquée dans le paragraphe suivant.

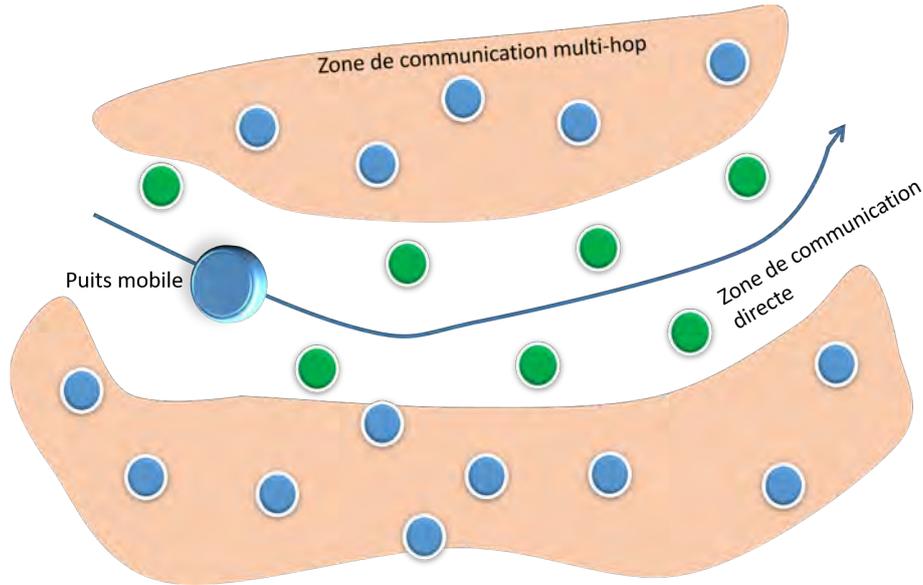


FIGURE 5.10 – Répartition des capteurs en zone de communication.

### 5.5.3 Méthode efficace de choix de sous-puits

Nous proposons une nouvelle solution pour le choix de sous-puits appelée méthode **MECP** (Méthode Efficace de Choix de sous-Puits). Une source doit connaître l'état de tous les sous-puits notamment leur débit de transmission, la taille courante de leur file d'attente (pour calculer le délai de transmission), leur position et le nombre de sauts pour les atteindre. Deux règles définissent la décision pour une source de choisir un sous-puits de collecte plutôt qu'un autre. Ce sont :

1. Détermine le point de collecte qui possède le moins de latence. La latence est calculée en prenant en compte de débit et le volume de données présentes dans la file d'attente, comme au paragraphe 5.4.

$$N_i, \quad \{\Delta_i = \min(\Delta_j), j = \{1; 2, \dots, M\}\} \quad (5.5)$$

M est le nombre de points de collecte.

2. Détermine le chemin est constitué par le plus petit nombre de sauts  $h$  pour atteindre  $N_i$ , parmi l'ensemble des chemins possibles ?

$$\min \sum_{i=1}^n h_i \quad (5.6)$$

Lorsque deux points de collecte ont la même latence, le plus proche en terme de nombre de sauts est choisi.

## 5.6 Evaluation

### 5.6.1 Scénarios

Pour valider notre méthode multi-sauts de collecte de données dans les zones blanches étendues, nous considérons la même zone d'intérêt qui est définie dans le paragraphe 4.3.1. Dans cette zone, on dispose d'un ensemble de points de collecte et d'un ensemble de sources de données.

La figure 5.11 donne une illustration de la zone d'intérêt. Les lignes représentent les liens de communication sans fil entre deux nœuds voisins placés aux centres des pixels. La portée des capteurs est limitée à 15 km. En effet, nous avons considéré que la portée LoRa permette d'atteindre cette valeur [GG15] (voir paragraphe 4.2.1).

Les triangles montrent les positions des points de collecte tandis que les carrés sont les sources de données placées hors des routes des avions. Le pas des pixels est fixé à 5 km. Le nombre des points de collecte et des sources de données peut varier d'un scénario à un autre comme l'illustre la figure 5.14.

Ce scénario comprend 8 points de collecte (triangles) et 14 sources de données uniformément disposées dans la zone d'intérêt. Chaque source de données est associée à un débit de transmission vers les points de collecte (équation 4.1), de même que les points de collecte ont leur propre débit calculé en fonction de leur position par rapport aux trajectoires des avions (équation 4.12).

Par ailleurs, lorsque toutes les sources transmettent leurs informations aux points de collecte, une période ou un tour de collecte est ainsi exécuté.

Chaque source exécute l'algorithme **PhyRouteX** pour déterminer les chemins vers les points de collecte. La condition d'arrêt de cet algorithme est lorsque le flux dans les liens ne change plus de valeur. Le meilleur point de collecte choisi par une source est celui qui possède le moins de latence pour vider sa file d'attente en transmettant toutes les données vers les avions. Les scénarios ainsi que tous les algorithmes sont exécutés avec Matlab 2018b sur un ordinateur de processeur Core I7 à 2.60 GHz.

### 5.6.2 Les métriques de performance

#### 5.6.2.1 Définitions

Les métriques de performance que nous analysons pour l'évaluation de notre méthode de collecte de données sont le nombre de sauts  $NS$  qui constituent les chemins entre les sources et les points de collecte, la taille des files d'attente  $TF$  qui

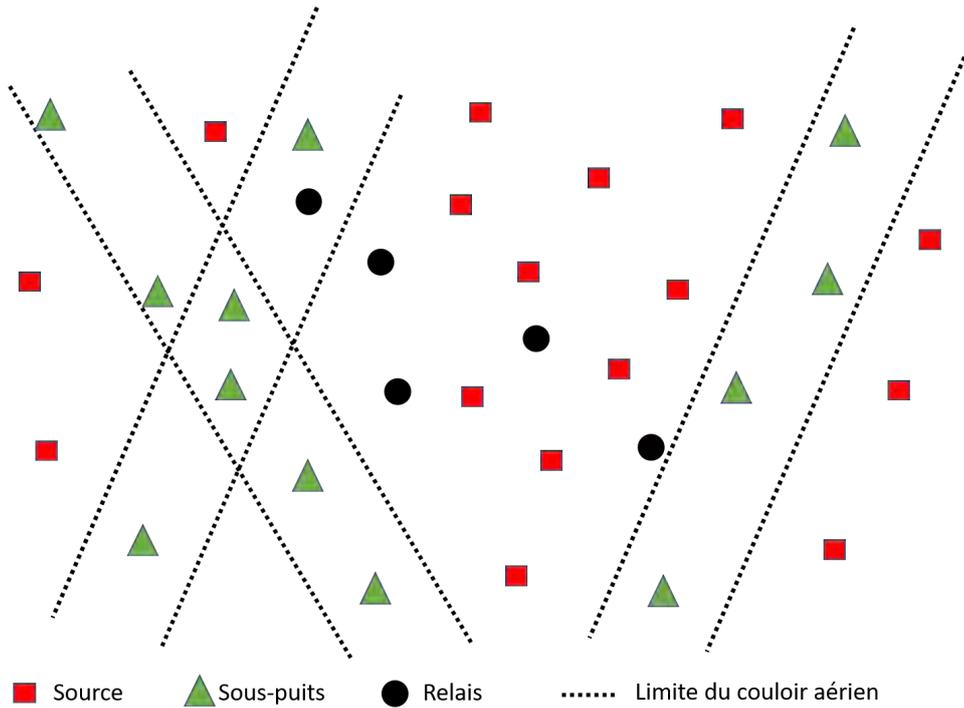


FIGURE 5.11 – Exemple de scénario.

définit le volume de stockage au niveau des sous-puits, le délai de collecte appelé *forwarding delay*  $FD$  ou le temps nécessaire pour chaque point de collecte pour transmettre aux avions toute les données qui sont stockées dans sa file d'attente.

### 5.6.2.2 Objectif de performance

Les réseaux de capteurs sans fil sont connus pour être sujets à des défaillances [Aky+02]. Ces défaillances, en grande partie liées aux fluctuations de la qualité (ratio signal sur bruit) des liens sans fil [SL14], sont encore plus fréquentes dans les réseaux qui sont déployés dans les zones blanches étendues.

Pour apporter des solutions à ce problème de défaillance, des solutions ont consisté, par exemple, à améliorer la couverture de la zone d'intérêt [SL14] ou la connectivité des nœuds du réseau [Yun+10]. En effet, dans le chapitre 3, nous avons proposé une méthode de déploiement de réseau de collecte de données dans les zones blanches étendues.

Cette méthode permet, d'une part de déployer un réseau connecté en plaçant des nœuds relais si nécessaire et d'autre part de trouver un compromis entre le nombre de relais placés et la tolérance au faute dans le réseau [AMV18]. Dans notre méthode opportuniste de collecte de données, nous avons utilisé cette méthode de déploiement pour connecter toutes les sources de données, non seulement entre elles mais aussi entre elles et les points de collecte.

La première approche que nous avons analysée est la création d’une topologie minimale qui interconnecte tous les nœuds de réseau (sources et points de collecte) en sélectionnant des positions où nous pouvons placer des relais.

### 5.6.3 Méthodes de référence

#### 5.6.3.1 Référence pour le nombre de sauts

La méthode qui consiste à déterminer le meilleur point de collecte inclut la recherche du chemin optimal pour atteindre un puits choisi en fonction de la latence de collecte qu’il offre. Dans beaucoup de travaux [Som+06 ; GZD11 ; Li+17], la recherche du chemin optimal consiste à déterminer le plus court chemin entre une source et une destination. Ainsi, nous comparons notre méthode, basée sur une heuristique qui mime la croissance du physarum, à l’algorithme Dijkstra [Cor+01].

En théorie des graphes, cet algorithme consiste à résoudre le problème du plus court chemin à travers les arêtes pondérées du graphe et il a une complexité polynomiale. Nous comparons le nombre de nœuds (sommets du graphe) qui composent les chemins déterminés par les deux méthodes.

#### 5.6.3.2 Référence pour la file d’attente

Par ailleurs, nous comparons notre méthode de collecte à la méthode présentée dans le travail effectué dans [Som+06]. Cette méthode consiste à collecter les données dans de larges réseaux de capteurs sans fil, en utilisant un puits mobile.

Elle consiste aussi à organiser les nœuds du réseau en *clusters*. Les *cluster heads* sont les nœuds qui se trouvent dans des positions couvertes par la trajectoire du puits mobile.

Les nœuds qui ne sont pas couverts déterminent les *clusters heads* les plus proches de leur position et leur transmettent leurs données. Nous comparons la taille des files d’attente des points de collecte et le délai nécessaire, à ces derniers, pour intégralement transmettre les données stockées aux avions.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les résultats et les analyses.

### 5.6.4 Résultats et analyses

#### 5.6.4.1 Infrastructure d’interconnexion des sources aux sous-puits

##### Réseau minimal d’interconnexion

La figure 5.12 illustre une topologie d’interconnexion entre 14 sources de données et 5 points de collecte situés le long d’un couloir aérien. Comme il a été démontré dans [AMV18], diverses structures, de taille différentes, peuvent être

obtenues non seulement en variant les paramètres de l'algorithme mais aussi en attribuant des débits aux sous-puits.

Par exemple, dans les figures 5.12a et 5.12b, les mêmes paramètres  $I_0=1$  et  $\mu=3$  ont été sélectionnés, mais la différence est que dans la figure 5.12a, les sous-puits ont le même débit de transmission aux avions. Alors que, pour la figure 5.12b, les valeurs des débits sont attribuées de façon aléatoire entre 21, 18, 16, 10 kbits/s.

L'épaisseur des liens représente la capacité de communication des liens [AMV18] et les liens qui ont de grandes capacités vont vers les points de collecte qui ont les grands débits.

Par ailleurs, il est aussi montré que cette méthode de déploiement calcule des topologies très proches de l'arbre minimal de Steiner avec une complexité polynomiale [AMV18; Ter+10a]. Enfin, les figures 5.12c et 5.12d montre une structure minimale de réseau d'interconnexion pour différents paramètres  $I_0=1, \mu=5$  et  $I_0=3, \mu=4$  respectivement pour les scénarios des figures 5.12c et 5.12d, les points de collecte ont le même débit de 21 kbits/s.

Le réseau de la figure 5.12c comprend 104 relais contre 122 relais dans la figure 5.12d. Cette différence est due au choix des paramètres. En effet, avec  $I_0=1$ , on optimise plus avec le moins possible de relais utilisé.

### **Réseau avec des liens redondants**

Une topologie minimale n'offre pas de tolérance aux fautes, il suffit qu'un lien du réseau de la figure 5.12a tombe pour qu'au moins une source se déconnecte du reste du réseau. A ce problème de manque de tolérance aux fautes, il suffit de créer des liens redondants dans le réseau [Mis+08]. Pour avoir des liens redondants, dans notre méthode opportuniste de collecte de données, nous avons proposé d'utiliser la même méthode de déploiement que précédemment.

Il est démontré dans le chapitre 3, que cette heuristique crée une structure de réseau avec des liens redondants. Pour cela, il faut choisir convenablement les paramètres de l'algorithme. Pour le scénario utilisé dans ce paragraphe, les résultats sont illustrés sur la figure 5.13. Cette figure présente des structures de réseau qui sont tolérants aux fautes.

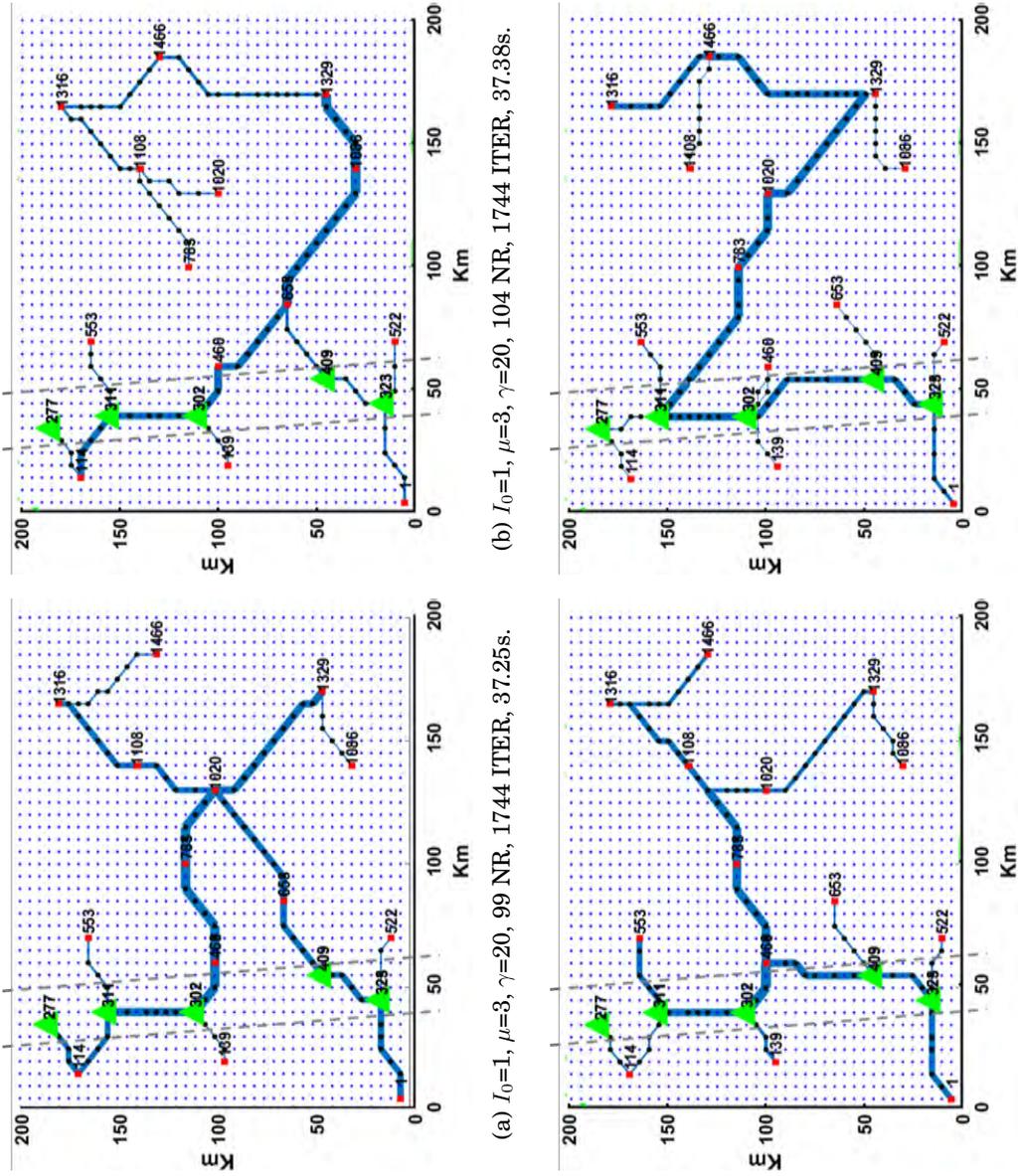
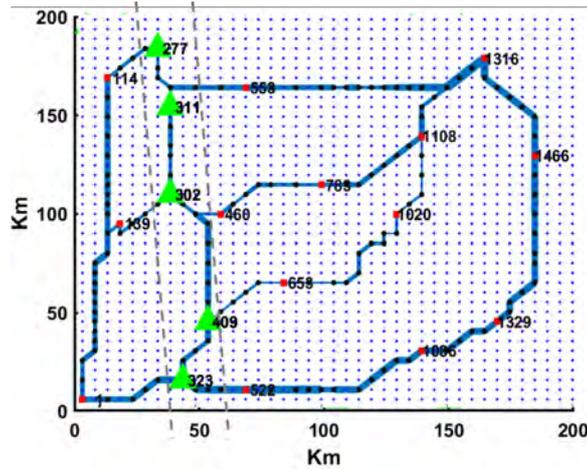
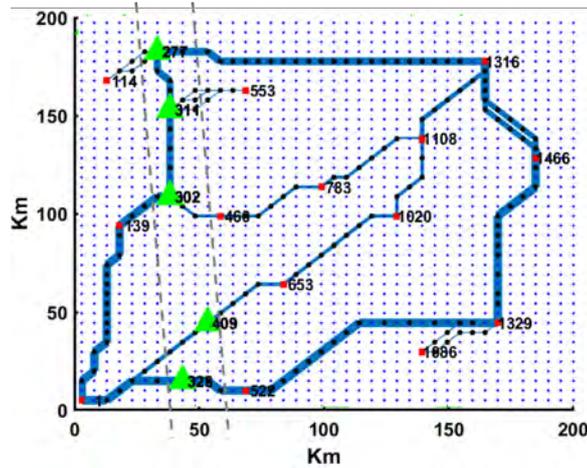


FIGURE 5.12 – Calcul de réseau (structure minimale) d'interconnexion avec l'algorithme **PhyNetB**.



(a)  $I_0=2, \mu=1.5, \gamma=20, 150 \text{ NR}, 1835 \text{ ITER}, 60.51\text{s}.$



(b)  $I_0=4, \mu=2, \gamma=20, 167 \text{ NR}, 490 \text{ ITER}, 9.32\text{s}.$

FIGURE 5.13 – Calcul de réseau (structure à liens redondants) d’interconnexion avec l’algorithme **PhyNetB**

### 5.6.4.2 Comparaison du nombre de sauts sur les différents chemins

Dans le scénario présenté par la figure 5.14, nous avons testé l’algorithme **PhyRouteX**. Chaque source de données calcule des chemins pour atteindre tous les points de collecte. Ces chemins ainsi obtenus doivent être les plus courts possible. Les sources de données sont des carrés numérotés de 1 à 14 tandis que les points de collecte sont les triangles, aussi numérotés de 1 à 8.

Un chemin est constitué par un ensemble de sauts qui représente l’ensemble des relais traversés par une information transmise par une source à un point de collecte. La figure 5.15 donne une correspondance entre les sources, les points de collecte et le nombre de sauts qui les relie. Sur l’axe des abscisses se trouvent

les numéros des points de collecte, les indices des sources sont sur l'axe des ordonnées et l'axe des altitudes représente la longueur des chemins en nombre de sauts. Ainsi, les figure 5.15a et 5.15b montrent les chemins entre les points de collecte et les sources respectivement de 1 à 7 et de 8 à 14.

En conclusion, ces deux figures montrent que notre heuristique (algorithme **PhyRouteX**) trouve un chemin pour toutes les sources, et vers n'importe quel point de collecte. Le temps de calcul de l'algorithme est illustré par les figures 5.16a et 5.16b qui correspondent respectivement aux figure 5.15a et 5.15b.

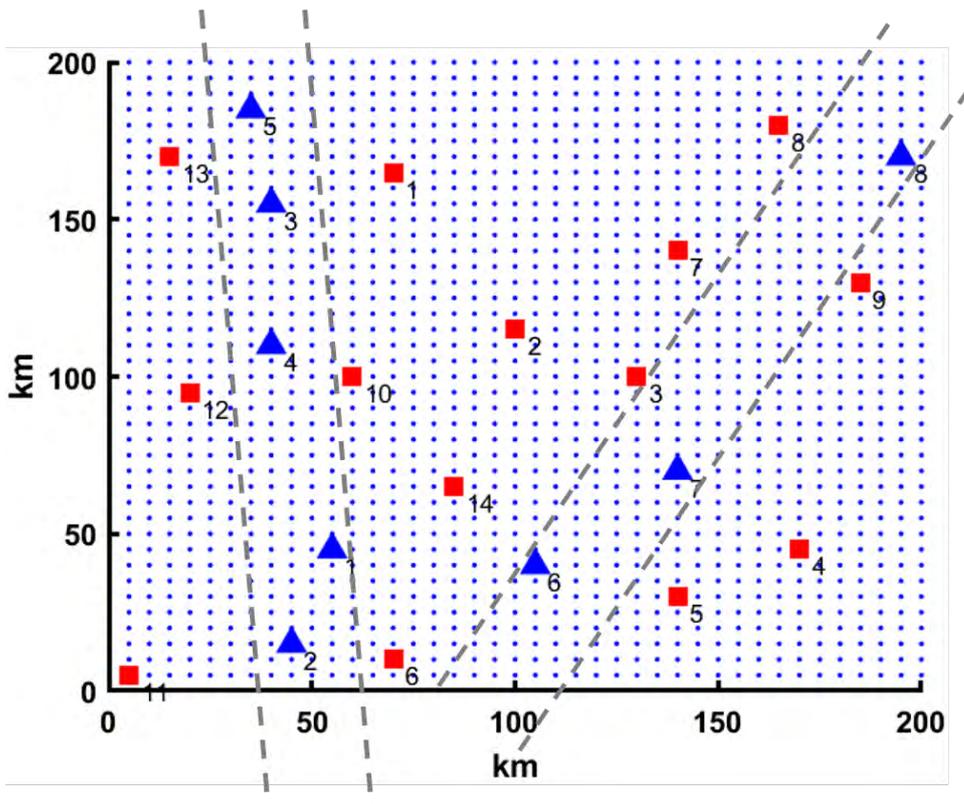


FIGURE 5.14 – Scénario n°2, les carrés représentent les sources de données et les triangles les points de collecte.

### 5.6.4.3 Comparaison avec l'algorithme de Dijkstra

Les figures 5.17 et 5.18 illustrent la comparaison entre notre méthode et l'algorithme du Dijkstra. En abscisse on trouve les numéros des points de collecte et en ordonnées, les nombres de sauts des différents chemins. Nous avons comparé les chemins pour l'ensemble des sources. Nous observons que dans la plus part des cas notre méthode est meilleure que l'algorithme du Dijkstra.

Par exemple, sur la figure 5.17, notre méthode calcule des chemins plus courts que l'algorithme de Dijkstra vers tous les points de collecte à une exception près,

le chemin vers le huitième point de collecte. C'est seulement vers cet unique point de collecte que notre heuristique trouve au mieux un chemin de longueur égale à celui de Dijkstra (source n°7, 11 et 8 et le point de collecte n°8). Pour tous les autres points de collecte, nous obtenons les meilleurs résultats.

Notre heuristique est en effet capable de calculer le plus court chemin entre une source et destination. Une approche similaire, basée sur l'algorithme **PhyRoute**, moins rapide que le notre en plus, a été utilisée dans d'autres travaux [TKN06] pour la recherche de chemins optimaux. Ils ont prouvé que cette heuristique est plus efficace que des algorithmes génétiques et ceux basés sur les fourmis.

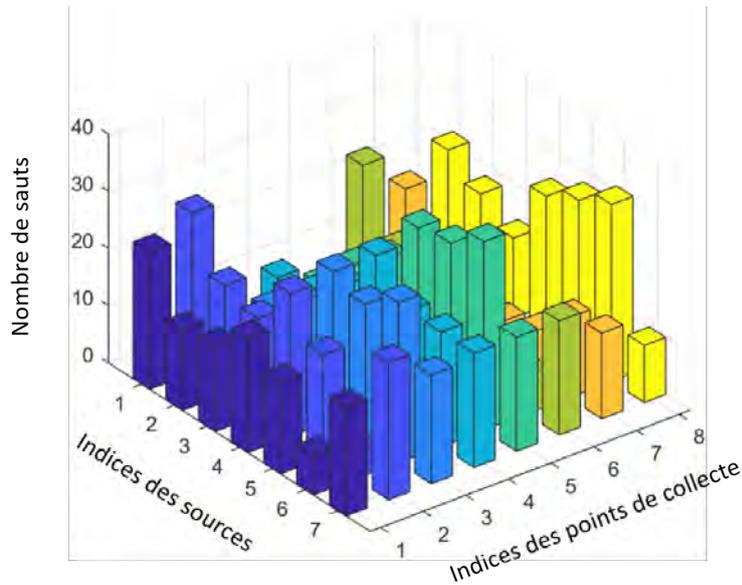
Le résultat obtenu est plus court que celui obtenu avec d'autres méthodes, même si le scénario étudié est un réseau routier. Nous venons de prouver que ce constat est aussi vrai pour les scénarios de réseaux de capteurs sans fil pour les zones blanches étendues, où d'après les résultats illustrés par les figures 5.17 et 5.18, dans 70% des cas nous obtenons des chemins plus courts que Dijkstra, dans 21% de cas Dijkstra est meilleur et dans 9% des cas, les deux algorithmes trouvent des chemins de même longueur.

#### 5.6.4.4 Tailles des files d'attente

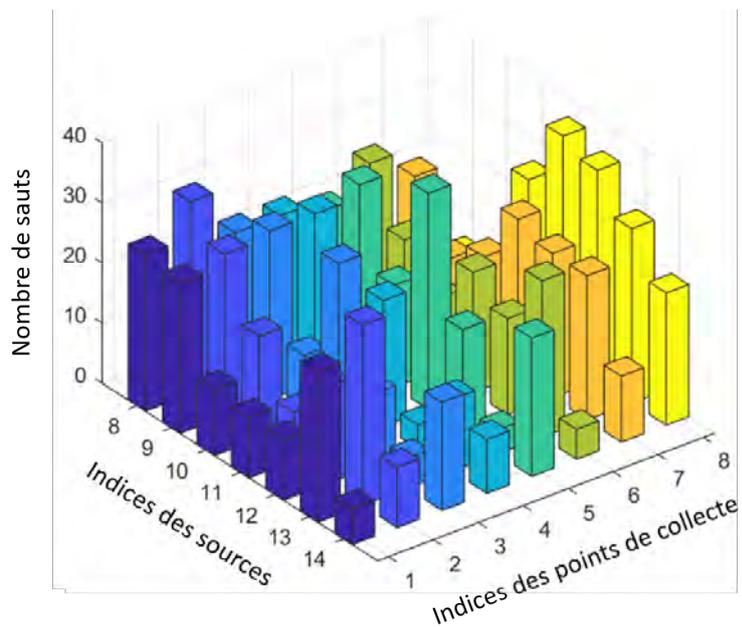
Pour collecter les données avec des puits mobiles, les sources de données qui ne sont pas couvertes par la trajectoire des avions peuvent transmettre leur données à des relais couverts par les puits mobiles. Une technique similaire est utilisée dans [Som+06], cette approche étant facile à mettre en oeuvre car les sources n'ont besoin de connaître que la position des relais.

Cependant, cette méthode n'est pas efficace vis-à-vis de la distribution de la charge de données. Nous avons alors proposé une méthode qui tient compte de la capacité des points de collecte qui relaient les données vers les avions. Les résultats comparés de ces méthodes sont illustrés dans les figures ci-dessous. Les figures 5.19a et 5.19b montrent les résultats, pour une période de transmission, respectivement pour la taille de la file d'attente en kbits et le délai nécessaire pour transmettre les données stockées aux avions. En abscisse, on trouve les numéros des points de collecte et en ordonnées, le volume de données stockées dans les files d'attente (figure 5.19a) et le délai de collecte en seconde (figure 5.19b).

Dans ce scénario, nous avons considéré que les sources communiquent avec leur point de collecte avec un même débit de 21 kbits/s qui correspond au débit de base LoRa pour une bande passante de 500 kHz, un facteur d'étalement de 7. Les points de collecte ont des capacités de transmission avec les avions respectivement de 10, 12, 18, 21, 6, 14, 16, 8 kbits/s. Nous considérons aussi qu'une période de



(a) Sources 1 à 7.

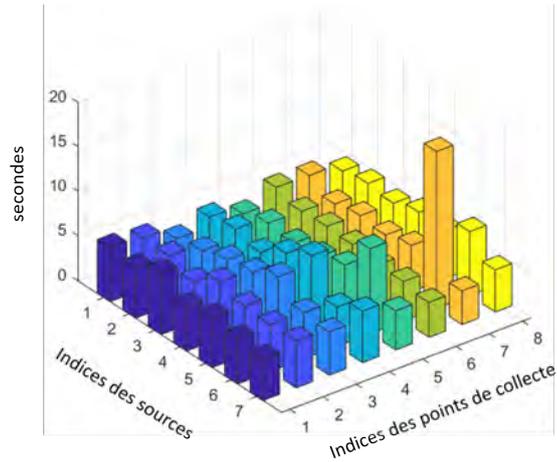


(b) Sources 8 à 14.

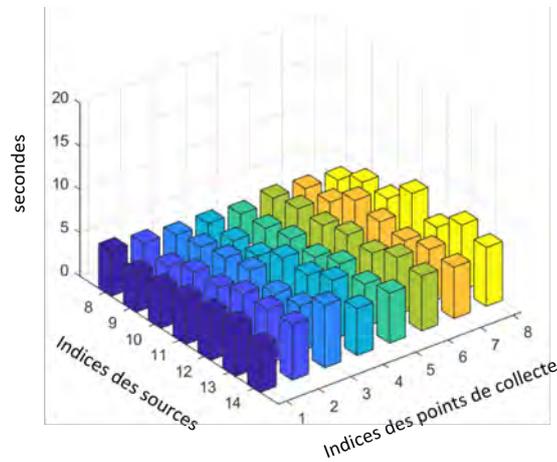
FIGURE 5.15 – Plus courts chemins en nombre de sauts

communication dure de 15 secondes et que les sources transmettent intégralement leurs données sans interférence avec les autres sources.

Comme l'illustre la figure 5.19, la méthode **MBSD** qui consiste à seulement déterminer le plus proche point de collecte n'est pas efficace car il n'y a pas une répartition optimale des données. Par exemple, Le point de collecte n°1 reçoit 0 kbit tandis que le n°7 et 8 reçoivent le plus grand volume de données, cela indé-



(a) Sources 1 à 7.



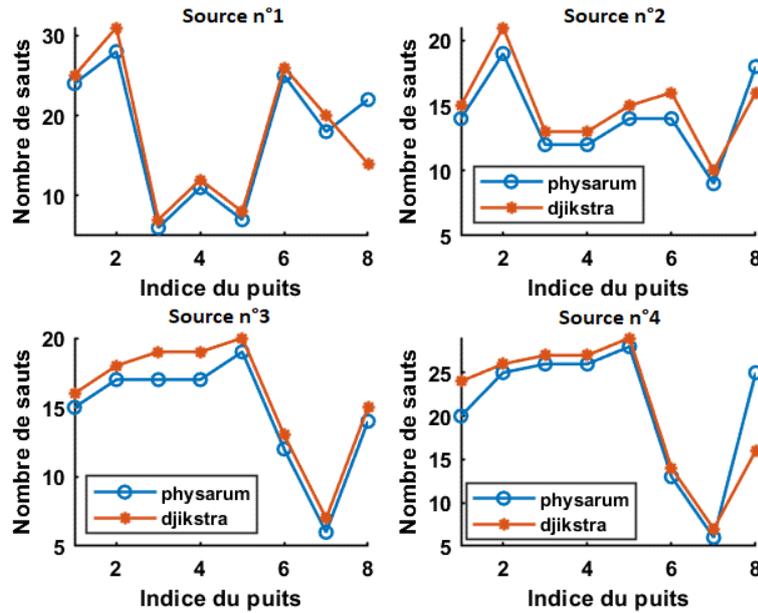
(b) Sources 8 à 14.

FIGURE 5.16 – Temps de calcul

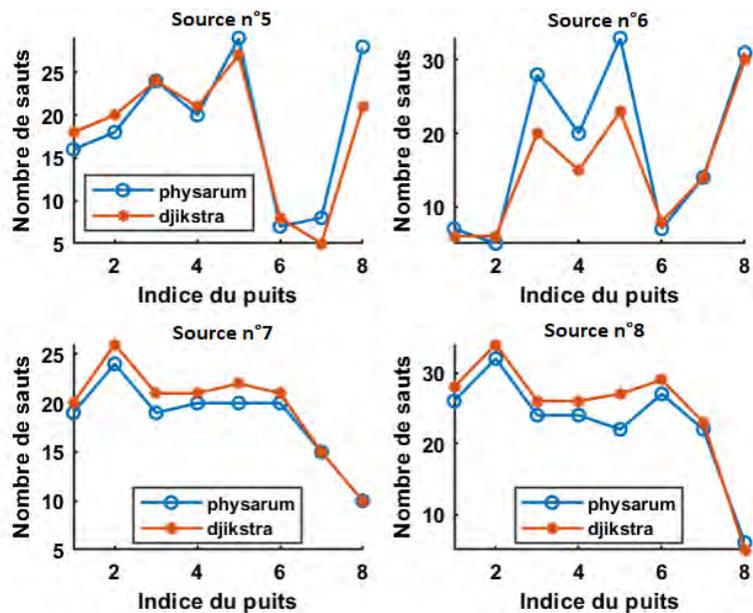
pendamment de leur capacité de transmission.

Par contre, avec la méthode **MECP**, tous les points de collecte reçoivent des données à relayer au puits mobile. Cette efficacité est plus remarquée dans l'analyse de la latence (figure 5.19b). Le point de collecte n°1 a 0 seconde de latence malgré sa capacité de 10 kbits/s par ce qu'il n'a pas reçu de données avec la méthode basée sur la recherche du plus proche point de collecte (**MBSD**).

Au même moment, le point de collecte n°8 aura besoin d'environ 120 secondes pour vider sa file d'attente. Quand à notre méthode, qui tient compte du délai de transmission, les données sont réparties en fonction de la capacité des points de collecte (barres rouges) ce qui résulte en une réduction de la latence. Moins de 1 minute aurait été nécessaire pour que l'ensemble des points de collecte transmettent intégralement le volume de données de leurs files.



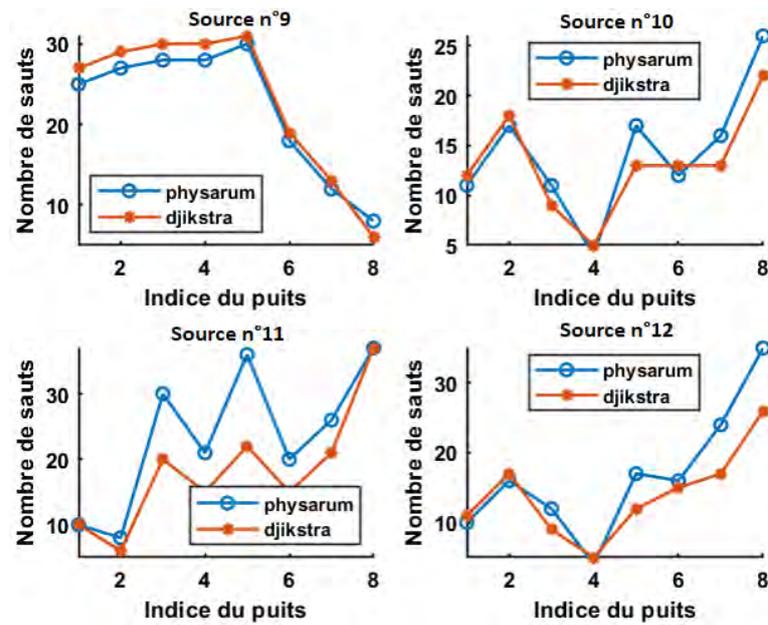
(a) Sources n°1 à 4



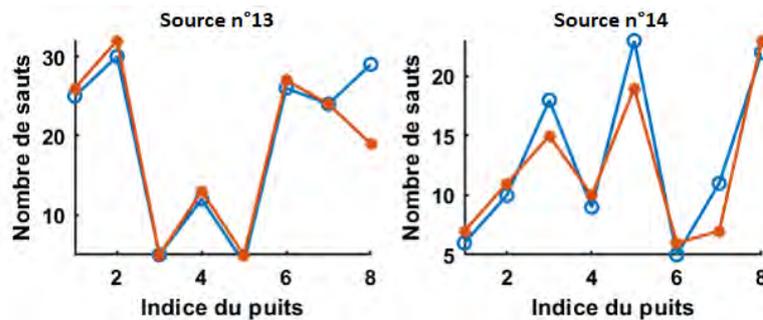
(b) Sources n°5 à 8

FIGURE 5.17 – Comparaison des chemins déterminés par l’algorithme **PhyRouteX** vs Dijkstra

De plus, nous avons analysé et comparé les performances des deux méthodes pour un nombre variable de période de transmission (figure 5.20) et avec des sources de débits différents (figure 5.21). Nous avons observé le volume moyen de données stockées dans chaque file d’attente et le délai de transmission nécessaire pour transmettre chaque volume stocké. Ensuite nous avons analysé l’écart type de ces observations. Il est, une fois de plus, montré que notre méthode est



(a) Sources n°9 à 12



(b) Sources n°13 et 14

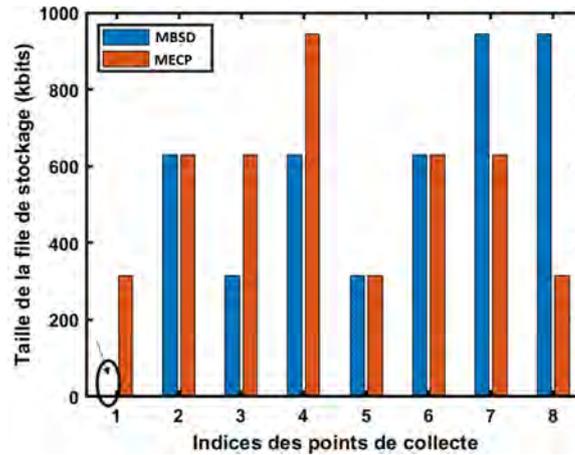
FIGURE 5.18 – Comparaison des chemins déterminés par l’algorithme **PhyRouteX** vs Dijkstra.

meilleure et plus efficace (figures 5.20b et 5.21b).

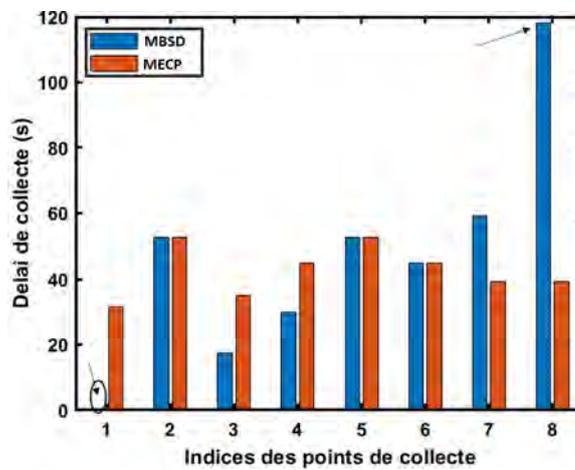
## 5.7 Discussion et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche pour améliorer la méthode opportuniste de collecte de données dans les zones blanches étendues. Cette méthode consiste à placer des relais entre les sources de données éloignées et non couvertes par les avions d’une part, et des points de collecte couverts, d’autre part.

D’abord, nous avons montré qu’il est possible d’interconnecter toutes les sources de données entre elles et avec les différents points de collecte, ceci en formant une structure minimale de type arbre minimal de Steiner ou en formant une structure de réseau tolérant aux fautes. Ensuite, chaque source transmet ses don-



(a) Etat de la file d'attente.



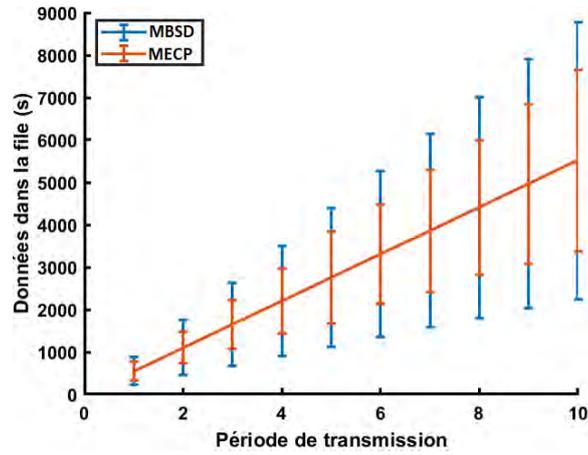
(b) délai de transmission des données collectées

FIGURE 5.19 – Comparaison des deux méthodes de collecte.

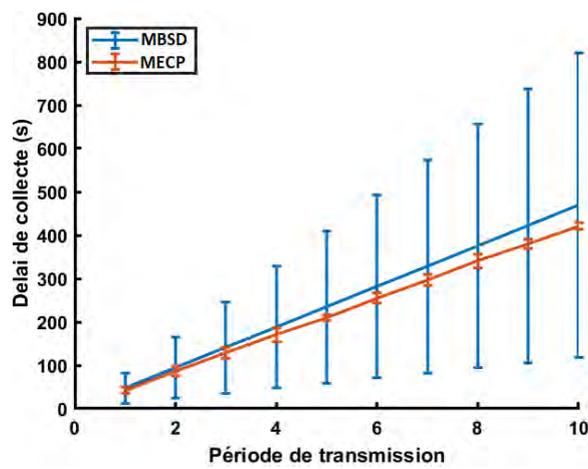
nées au point de collecte caractérisé par la moindre latence. Alors, elle détermine le plus court chemin afin d'atteindre le point de collecte choisi.

Pour évaluer notre méthode, à travers différents scénarios, nous avons observé et analysé des métriques que sont le nombre de relais utilisés pour interconnecter toutes les sources de données, le nombre de relais qui constituent les différents chemins qui relient les sources aux points de collecte, le volume de données stockées dans les files d'attente des points de collecte et enfin le délai nécessaire aux points de collecte pour transmettre les données qu'ils ont stockées dans leur file d'attente, aux avions.

Nous avons ainsi comparé nos résultats avec plusieurs méthodes de collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil à puits mobiles. Notre méthode est plus efficace car elle répartit le volume de données en tenant compte de la capacité



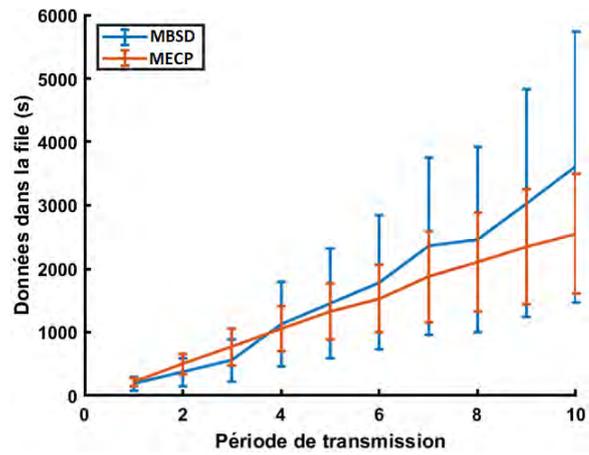
(a) Etat de la file d'attente.



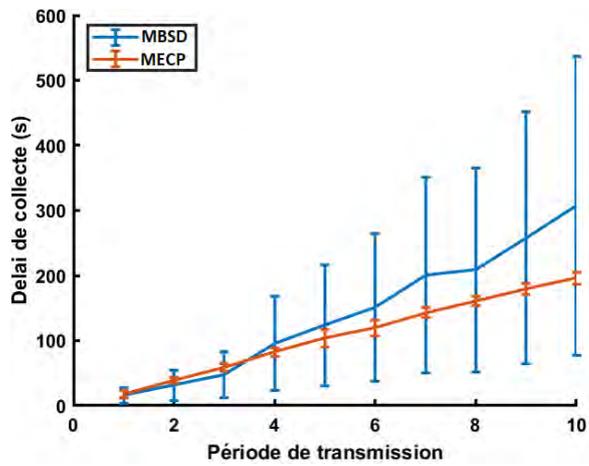
(b) délai de transmission des données collectées

FIGURE 5.20 – Comparaison avec des sources de même débit.

des points de collecte. Ce faisant, il n'y a pas de sous-utilisation ou de saturation des points de collecte. Le délai de collecte dans le réseau est alors réduit, ce qui correspond aux pré-requis de plusieurs types d'application supportés par les DTN.



(a) Etat de la file d'attente après 10 périodes de transmission



(b) délai de transmission des données collectées

FIGURE 5.21 – Comparaison avec des sources de débit variable.



## **Chapitre 6**

## **Conclusion**



## 6.1 Synthèse

Les zones blanches étendues sont principalement caractérisées par des conditions climatiques extrêmes rendant la vie difficile pour les populations peu nombreuses qui y vivent. Par ailleurs, ces zones souffrent d'un manque d'infrastructure routières, distribution d'énergie et moyens de télécommunication. Pourtant, de nombreuses activités économiques s'y développent comme des extractions minières, des pipelines ou des exploitations forestières, qui nécessitent une infrastructure de réseaux de capteurs sans fil. La surveillance de ces zones étendues, comme les frontières ou les feux de forêt, est une autre activité utilisant massivement des réseaux de capteurs. Cependant, quelques îlots d'activités sont éparpillés dans ces grandes étendues, distants les uns des autres de dizaines voire de centaines de km. Couvrir ces immenses zones avec des réseaux de capteurs sans fil représente alors un défi, en termes de couverture, de portée des liens radio et de connectivité du réseau. Les satellites sont un bon moyen pour assurer la couverture des ZBE mais leur coût d'exploitation est très élevé pour des applications qui génèrent du trafic intermittent avec un faible débit. Le développement des nouvelles générations de réseaux de capteurs sans fil telles que les technologies de communication longue distance à faible consommation d'énergie offre une alternative prometteuse et bon marché au problème de couverture des zones blanches étendues. Ainsi, la technologie LoRa a une portée théorique de 30 kilomètres. En plus de leur grande portée et de leur consommation d'énergie limitée, les technologies LPWAN sont multi-applicatifs et permettent d'adapter le débit de transmission à l'application, la portée souhaitée ou à l'énergie disponible dans le capteur. Contrairement aux réseaux d'accès des opérateurs des réseaux cellulaires, le coût de l'infrastructure est très limité.

Cependant, l'ingénierie des réseaux de collecte de données dans les zones blanches étendues fait face à de nombreux problèmes de déploiement et de collecte efficace.

Pour résoudre le problème du déploiement, nous avons proposé une heuristique qui permet d'interconnecter avec un puits collecteur, des sources de données éparpillées sur un grand territoire. Le réseau à déployer consiste en un réseau multi-sauts qui permet à une donnée collectée par une source d'être relayée de nœud en nœud jusqu'au point de collecte, ces nœuds relais étant à portée radio les uns des autres. Le problème à résoudre est celui du déploiement de ces nœuds relais de manière à interconnecter toutes les sources de données, puis à créer un graphe qui relie les nœuds et les sources jusqu'au point de collecte. Ce problème d'intercon-

nexion avec un nombre minimal de relais ressemble au problème de construction d'un arbre minimal de Steiner sur l'ensemble des sources. Le problème de l'arbre minimal de Steiner est un problème de type NP-difficile pour lequel il existe des heuristiques efficaces.

Notre heuristique, qui a une complexité polynomiale, est inspirée de la croissance du physarum qui est un organisme biologique qui sait optimiser les ressources de son corps lors des disettes. La structure de sortie est une topologie d'interconnexion de toutes les sources de données à un même puits avec un nombre minimum de relais. Plusieurs combinaisons des paramètres de l'algorithme ont permis d'obtenir diverses topologies que nous avons comparées avec une autre heuristique qui calcule des solutions approchées au problème de l'arbre minimal de Steiner.

Nous avons montré que, selon la configuration des paramètres du physarum, notre heuristique était capable de créer plusieurs chemins redondants pour aller d'une source au puits, mais au prix de quelques relais supplémentaires. La redondance des liens permet au réseau d'être tolérant à la panne des liens. A partir de cette propriété, nous avons défini un compromis entre le nombre de relais déployés et la tolérance aux fautes. De plus, la méthode du Physarum donne une indication sur la quantité de données qui transite sur les liens de communication entre les noeuds. Cela permet de déterminer les liens du réseau qui doivent offrir le plus grand débit car c'est par ceux-ci que transite le plus de flux d'information.

Malgré tout, dans les zones blanches étendues, il n'est pas toujours possible de connecter tous les capteurs tout le temps au réseau. Une solution est d'utiliser des puits mobiles qui se déplacent régulièrement à proximité des capteurs non-connectés pour collecter leurs données. Cette approche est couramment utilisée dans les réseaux tolérants au délai ou DTN (Delay Tolerant Network). Cependant, nous avons montré que les puits mobiles terrestres (véhicules) et aériens tels que les drones, les satellites ou les ballons stratosphériques ne sont pas efficaces pour la collecte dans les ZBE. Nous avons alors proposé une nouvelle approche opportuniste qui consiste à utiliser les avions des vols commerciaux pour collecter les données lorsqu'ils survolent des zones d'intérêt. En effet, des avions de ligne équipés d'un module LoRa peuvent communiquer avec les capteurs pendant une fenêtre de transmission lors de leur survol de la zone. Le grand nombre d'avions de ligne, leur périodicité, leur indépendance énergétique, leur vitesse, l'immensité des zones survolées nous ont incités à explorer cette approche. Nous avons fait une étude de faisabilité de notre méthode opportuniste de collecte. Pour évaluer ses performances, nous avons considéré une zone d'intérêt située dans le désert du

Sahara. Nous avons analysé la fenêtre de communication entre un avion et un capteur, le taux de couverture de la zone, le débit de collecte et le volume de données qui peut être collecté en tout endroit de la zone d'intérêt. Nous avons aussi montré que cette méthode conviendrait à des applications couramment rencontrées dans les zones blanches étendues.

Cependant, la méthode de collecte opportuniste laisse encore des zones non couvertes, c'est pourquoi nous l'avons couplé avec le déploiement Physarum afin de couvrir tous points de la zone d'intérêt. Il s'agit de placer des relais entre les sources de données non couvertes et les points de collecte couverts par des vols commerciaux, au moyen de l'heuristique du Physarum. Comparé à d'autres méthodes de collecte utilisant des puits mobiles, notre méthode est plus efficace car elle répartit le volume de données en tenant compte de la capacité des points de collecte. Le délai de collecte dans le réseau est alors réduit, ce qui correspond aux pré-requis de plusieurs types d'application supportés par les DTN.

## 6.2 Perspectives

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire ont apporté des solutions au manque d'infrastructure de collecte de données dans les zones blanches étendues. En plus des études de faisabilité techniques des méthodes de déploiement et de collecte que nous avons proposées, il y a d'autres aspects, tout aussi importants, sur lesquels il faut continuer les recherches. Dans la suite de ce paragraphe, comme perspectives, nous discutons de ces aspects.

L'heuristique basée sur la croissance du Physarum a permis de trouver des solutions au problème de déploiement des réseaux de capteurs sans fil et de calculer un compromis entre le nombre de relais et la tolérance aux fautes. Un bon compromis dépend des paramètres de l'algorithme. Notre première perspective est d'approfondir la recherche des meilleures combinaisons des paramètres qui permettent de prédire et de maîtriser la tolérance aux fautes du réseau. Cela a pour but de proposer des chemins redondants autour des endroits critiques du réseaux car la tolérance aux fautes peut être nécessaire dans certains endroits du réseau plutôt que dans d'autres.

Puisque la méthode du Physarum crée un réseau avec plusieurs chemins distincts entre paires de sources. Un nœud du réseau peut avoir le choix entre plusieurs chemins pour transmettre ses données. Ce choix peut, par exemple, être basé sur l'état des liens de communication tel que le rapport signal sur bruit ou

encore la probabilité de transmettre les données sans en perdre. Pour faciliter le routage dans cette topologie de réseau, il peut être envisagé d'étudier un protocole de routage, basé sur le multi-chemin, qui permet aux capteurs de choisir la meilleure route pour envoyer leur données. Dès lors que l'heuristique basée sur le physarum donne la capacité des liens, celle-ci peut être utilisée pour servir à estimer la qualité des routes.

Par ailleurs, la capacité indicative des liens qui sont sélectionnés donne une connaissance sur la quantité de données qui transitent entre les nœuds. Cela permet lors du déploiement pratique de mettre plus de débit sur les liens qui ont les plus grandes capacités indicatives d'après le modèle du physarum. Afin d'obtenir ces débits, d'autres facteurs doivent être pris en compte. Ces facteurs sont par exemple, les facteurs d'étalement et les bandes passantes LoRa. Ainsi, on pourra déduire une estimation de la consommation d'énergie de l'ensemble des nœuds du réseau.

Faire communiquer un avion et un capteur nécessite un mécanisme de synchronisation pour que le capteur se réveille au moment où l'avion entre dans sa portée. Puisque l'avion a suffisamment d'énergie, il peut par exemple émettre des beacons qui ont pour but de réveiller et de synchroniser les capteurs. La procédure réveil/sommeil permet non seulement d'économiser l'énergie des capteurs, car ceux-ci ne communiquent que lorsqu'un avion est présent dans leur portée mais aussi de réduire le taux de perte des données et la latence de collecte. La technologie de réveil radio (*Wake-up radio*) est beaucoup étudiée dans la conception des réseaux de capteurs sans fil [Jel+12; MB14; Oll+13]. Cependant, elle est surtout orientée pour des capteurs qui ont de courte portée et des récepteurs de faible sensibilité (-55 dBm par exemple) [Spe+15]. L'application de ce concept est à étudier pour les réseaux à longue portée et surtout pour des récepteurs de type LoRa dont la très haute sensibilité peut atteindre -137 dBm [Sem15]. De plus, le beacon transmis par un avion pourrait aussi contenir sa position instantanées (GPS par exemple) qui permettra au capteur d'adapter sa puissance d'émission et son débit afin de communiquer le plus possible de données une fois que la synchronisation est faite.

L'étude de l'effet de la mobilité des avions dans des communications de type LoRa n'est pas encore faite, à notre connaissance. Il est nécessaire d'étudier l'efficacité (portée, débits, sensibilité) de LoRa dans les scénarios de grande vitesse comme celle des avions de ligne. Parmi le peu de travaux [AFM19; ART17] qui se sont penchés sur l'effet de la mobilité dans les réseaux de type loRa/LoRaWAN, aucun d'eux n'a considéré des vitesses aussi élevées que celle des avions de lignes

et encore moins la mobilité vue du côté de la station de base. Est-ce qu'une forte mobilité réduit la portée des capteurs et de la station de base? Le protocole LoRaWAN est-il robuste face à l'effet doppler? Toutes ces questions doivent avoir des réponses. Cette investigation serait une importante contribution pour estimer l'efficacité de l'utilisation des avions de lignes pour la collecte de données dans les zones blanches étendues.



# Bibliographie

- [A.+04] Kansal A. et al. « Intelligent Fluid Infrastructure for Embedded Networks ». In : *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'04)*. 2004.
- [ACA09] G.G. Md. Nawaz ALI, Rajib CHAKRABORTY et Md. Shihabul ALAM. « Performance Analysis of Different Routing Algorithms for Load Distribution in Multipath Packet Switched Network ». In : *IEEE International Conference on Computer and Information Technology, Xiamen, China* (2009).
- [Ade+17] Ferran ADELANTADO et al. « Understanding the Limits of LoRaWAN ». In : *IEEE Communications Magazine* 55.9 (sept. 2017), p. 34–40.
- [AFM19] Ibrahim AMADOU, Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « LoRa in a haystack : a study of the LORA signal behavior ». In : *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. 2019.
- [AFS17] Tarek AZZABI, Hassene FARHAT et Nabil SAHLI. « A Survey on Wireless Sensor Networks Security Issues and Military Specificities ». In : *IEEE International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (ICASET)*. Hammamet, jan. 2017.
- [Akm+18] Çağlar AKMAN et al. « Sensor Fusion, Sensitivity Analysis and Calibration in Shooter Localization Systems ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 271.1 (mar. 2018), p. 66–75.
- [Akp+17] Godfrey Anuga AKPAKWU et al. « A Survey on 5G Networks for the Internet of Things : Communication Technologies and Challenges ». In : *Journals and Magazines* 6 (sept. 2017), p. 3619–3647.
- [Aky+02] Ian F. AKYILDIZ et al. « A survey on sensor networks ». In : *IEEE Communications Magazine* (2002).

- [Ali+16] Salman ALI et al. « SimpliMote : A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines ». In : *IEEE Systems Journal* (2016).
- [All07] ALLIANCE. *802.15.4e-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1 : MAC sublayer*. 2007.
- [ALM05] Th. ARAMPATZIS, J. LYGEROS et S. MANESIS. « A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*. Limassol, juin 2005.
- [Aln+15] Mariam ALNUAIMI et al. « Data Gathering in Delay Tolerant Wireless Sensor Networks Using a Ferry ». In : *Sensors (Basel)* 10.5 (2015), 25809–25830.
- [ALW16] A. ADHIKARY, X. LIN et Y. P. E. WANG. « Performance evaluation of NB-IoT coverage ». In : *Proc. of VTC-Fall*. 2016.
- [AMC07a] Ian F. AKYILDIZ, Tommaso MELODIA et Kaushik R. CHOWDHURY. « A survey on wireless multimedia sensor networks ». In : *Computer Networks* (2007).
- [AMC07b] Ian F. AKYILDIZ, Tommaso MELODIA et Kaushik R. CHOWDHURY. « Wireless multimedia sensor networks : A survey ». In : *IEEE Wireless Communications* 14.6 (déc. 2007), p. 32 –39.
- [AMC08] Ian F. AKYILDIZ, Tommaso MELODIA et Kaushik R. CHOWDHURY. « Wireless Multimedia Sensor Networks : Applications and Testbeds ». In : *Proceedings of the IEEE* 96.10 (oct. 2008), p. 1588 –1605.
- [AMT05] N. AAKVAAG, M. MATHIESEN et G. THONET. « Timing and Power Issues in Wireless Sensor Networks-An Industrial Test Case ». In : *IEEE International Conference on Parallel Processing Workshops*. Oslo, juin 2005.
- [AMV18] Djibrilla Incha ADAMOU, Alexandre MOURADIAN et Véronique VÈQUE. « A Bio-Inspired Deployment Method for Data Collection Networks in Wide White Areas ». In : *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2018.
- [Ant19] ANT. *ANT Technology*. <http://www.thisisant.com/technology>. 2019.

- [AO18] Adebayo S. ADEWUMI et Olusegun OLABISI. « Characterization and Modeling of Vegetation Effects on UHF Propagation through a Long Forested Channel ». In : *Progress In Electromagnetics Research Letters* 73 (2018), p. 9–16.
- [Arc19] ARCEP. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/la-couverture-des-zones-peu-denses.html>. 2019.
- [Arg19] ARGO. ARGO — Global Ocean Sensor Network,” <http://www.argo.ucsd.edu>. 2019.
- [ART17] M. L. ANDREI, L. A. RADOI et D. S. TUDOSE. « Measurement of node mobility for the LoRa protocol ». In : *IEEE RoEduNet*. 2017.
- [AS06] I. AKYILDIZ et E. STUNTEBECK. « Wireless underground sensor networks : Research challenges ». In : *Ad Hoc Networks* 4.6 (nov. 2006), 669–686.
- [Ash09] K. ASHTON. « Internet of Things ». In : *RFID Journal* (2009).
- [AT+10] Fadi M. AL-TURJMAN et al. « Deploying Fault-Tolerant Grid-Based Wireless Sensor Networks for Environmental Applications ». In : *IEEE International Workshop on Wireless Local Networks* (2010).
- [ATD03] Woo A., TONG T. et CULLER D. « Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks ». In : *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*. 2003.
- [Aug+16] Aloys AUGUSTIN et al. « A Study of LoRa : Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things ». In : *Sensors* (2016).
- [AY07] Ameer Ahmed ABBASI et Mohamed YOUNIS. « A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks ». In : *Computer Communications* 30.14-15 (oct. 2007), p. 2826–2841.
- [Bag+08] Miloud BAGAA et al. « Optimal Placement of Relay Nodes Over Limited Positions in Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS* (2008).
- [Bai+06] Xiaole BAI et al. « Deploying Wireless Sensors to Achieve Both Coverage and Connectivity ». In : *International symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (2006).
- [Bal14] Mert BAL. « Industrial applications of collaborative Wireless Sensor Networks : A survey ». In : *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Istanbul, juin 2014.

- [BBR17] Ahmed BOUBRIMA, Walid BECHKIT et Hervé RIVANO. « Optimal WSN Deployment Models for Air Pollution Monitoring ». In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2017).
- [Bg19] Zone BG. *ZoneBG*, <https://www.igi-global.com/chapter/ppp-as-a-tool-for-stimulating-investments-in-ict-infrastructures/112376>. 2019.
- [BKM04] H. BALDUS, K. KLABUNDE et G. MUESCH. « Reliable SetUp of Medical Body-Sensor Networks ». In : *Proc. EWSN*. 2004.
- [BMR04] A. BOGDANOV, E. MANEVA et S. RIESENFELD. « Power-aware Base Station Positioning for Sensor Networks ». In : *Proceedings of the 23rd International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'04)*. Hong Kong, mar. 2004.
- [Bor+16] Martin C. BOR et al. « Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? » In : *19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*. Malta, nov. 2016.
- [Bre+05] J. BREDIN et al. « Deploying Sensor Networks with Guaranteed Capacity and Fault Tolerance ». In : *6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC'05)*. 2005.
- [Bru+10] Charlie BRUMMITT et al. *A Mathematical Study of Physarum polycephalum*. Rapp. tech. American Mathematical Society, 2010.
- [BTB04] R. BECKWITH, D. TEIBEL et P. BOWEN. « Pervasive Computing and Proactive Agriculture ». In : *Proc. PERVASIVE*. 2004.
- [Bur+03] S. BURLEIGH et al. « Delay-Tolerant Networking : An Approach to Interplanetary Internet ». In : *IEEE Communications Magazine* 41.6 (juin 2003), p. 128 –136.
- [But04] Z. BUTLER. « Networked Cows : Virtual Fences for Controlling Cows ». In : *WAMES*. 2004.
- [C.+02] Schurgers C. et al. « Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design spac ». In : *IEEE Trans. Mob. Comp* (2002).
- [C.+03] Intanagonwivat C. et al. « Directed diffusion for wireless sensor networking ». In : *IEEE/ACM Trans. Netw.* (2003).
- [Cam+05] J. CAMPBELL et al. « IrisNet : An internet-scale architecture for multimedia sensors ». In : *Proc. ACM Multimedia Conf.* 2005.

- [CCZ05] Y. CHEN, C. CHUAN et Q. ZHAO. « Sensor Placement for Maximizing Lifetime per Unit Cost in Wireless Sensor Networks ». In : *Proceedings of the IEEE Military Communication Conference (MILCOM'05)*. 2005.
- [CDC19] Jianfei CHEN, Zhaohua DAI et ZhiQiang CHEN. « Development of Radio-Frequency Sensor Wake-Up with Unmanned Aerial Vehicles as an Aerial Gateway ». In : *Sensors* (2019).
- [Cel+13] N. CELANDRONI et al. « A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless sensor networks : system design aspects ». In : *INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS AND NETWORKING* (2013).
- [Cha+02] K. CHAKRABARTY et al. « Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks ». In : *IEEE Transactions on Computers* (2002).
- [CHC07] Shao shan CHIANG, Chih hung HUANG et Kuang chiung CHANG. « A Minimum Hop Routing Protocol for Home Security Systems Using Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE Transactions on Consumer Electronics* (2007).
- [Che+06] Yingying CHEN et al. « A Practical Approach to Landmark Deployment for Indoor Localization ». In : *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. 2006.
- [Cla+04] Thomas CLAUSEN et al. *The Optimised Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks : protocol specification*. Rapp. tech. INRIA, 2004.
- [Cli19] Sahara CLIMAT. <https://www.consoglobe.com/desert-sahara-avance-superficie-cg>. 2019.
- [CMH10] Delphine CHRISTIN, Parag S. MOGRE et Matthias HOLLICK. « Survey on Wireless Sensor Network Technologies for Industrial Automation : The Security and Quality of Service Perspectives ». In : *Future Internet* 2 (2010), p. 96–125.
- [Cor+01] Thomas H. CORMEN et al. *Introduction to Algorithms*. 2<sup>e</sup> éd. MIT Press et McGraw-Hill, 2001.
- [Cor+10] Peter Ian CORKE et al. « Environmental Wireless Sensor Networks ». In : *Proceedings of the IEEE* 98.11 (déc. 2010), p. 1903–1917.
- [CRA06] Arnab CHAKRABARTI, Ashutosh Sabharwal RICE et Behnaam AAZHANG. « Communication power optimization in a sensor network with a path-constrained mobile observer ». In : *ACM Transactions on Sensor Networks* 2.3 (2006), p. 297–324.

- [Crn11] Aleksandar CRNJIN. *Application and Multidisciplinary Aspects of Wireless Sensor Networks : Concepts, Integration, and Case Studies*. Sous la dir. de Liljana GAVRILOVSKA et al. Springer-Verlag, 2011.
- [CSA03] A. CHAKRABARTY, A. SABHARWAL et B. AAZHANG. « Using predictable observer mobility for power efficient design of a sensor network ». In : *Second International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. 2003.
- [CW09] Gongben CAN et Shaorong WANG. « A Novel Node Deployment and Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks ». In : *Second International Symposium on Electronic Commerce and Security*. 2009.
- [CYCY07] Tseng Y. C., WANG Y.-C. et CHENG K. Y. « iMouse : An integrated mobile surveillance and wireless sensor system. » In : *IEEE Comp* (2007).
- [Das+11] Ariyam DAS et al. « An improved greedy construction of minimum connected dominating sets in wireless networks ». In : *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2011, pp. 790-795*. 2011.
- [Das19] DASH. *Dash7 Alliance*. <http://www.dash7.org>. 2019.
- [DB17] Djamel DJENOURI et Miloud BAGAA. « Energy-Aware Constrained Relay Node Deployment for Sustainable Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE Transactions on Sustainable Computing* (2017).
- [DCL06] F.M. DISCENZO, D. CHUNG et K. A. LOPARO. « Pump condition monitoring using self-powered wireless sensors ». In : *Sound and Vibration* 40.5 (2006), p. 12–15.
- [Des18] François DESPAUX. « Modeling and evaluation of the end-to-end delay in wireless sensor networks ». Thèse de doct. Université de Lorraine, 2018.
- [DFS99] Robert C. DURST, Patrick D. FEIGHERY et Keith L. SCOTT. « Why not use the Standard Internet Suite for the Interplanetary Internet ». In : *Interplanetary Internet Study Seminar, California Institute of Technology*. Corporation, 1999.
- [DG12] Luhutyit Peter DAMUUT et Dongbing GU. « A Survey of Deterministic Vs. Non-Deterministic Node Placement Schemes in WSNs ». In : *SENSORCOMM 2012 : The Sixth International Conference on Sensor Technologies and Applications*. 2012.

- [DKN11] Jingzhe DU, Evangelos KRANAKIS et Amiya NAYAK. « Distributed Key Establishment in Disruption Tolerant Location Based Social Wireless Sensor and Actor Network ». In : *Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference*. Ottawa, Canada, mai 2011.
- [Dme19] Vor DME. [https://en.wikipedia.org/wiki/VHF\\_omnidirectional\\_range](https://en.wikipedia.org/wiki/VHF_omnidirectional_range), retrieved 2019-06-12. 2019.
- [Dou+12] Messaoud DOUDOU et al. « Slotted contention-based energy-efficient MAC protocols in delay-sensitive wireless sensor networks ». In : *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. Cappadocia, juil. 2012.
- [DTH02] O. DOUSSE, P. THIRAN et M. HASLER. « Connectivity in ad-hoc and hybrid networks ». In : *IEEE Infocom*. 2002.
- [DV14] A. DUNKELS et J. VASSEUR. *IP for Smart Objects*. IPSO Alliance, 2014.
- [DWW10] Kai DANIEL, Andreas WOLFF et Christian WIETFELD. « Protocol Design and Delay Analysis for a MUAV-Based Aerial Sensor Swarm ». In : *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*. April, 2010.
- [EKN17] Milan ERDEL, Michał KRÓL et Enrico NATALIZIO. « Wireless Sensor Networks and Multi-UAV systems for natural disaster management ». In : *Computer Networks* 124.4 (sept. 2017), p. 72–86.
- [Erc+99] V. ERCEG et al. « An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 17.7 (juil. 1999), p. 1205–1211.
- [Fah16] Hossam Mahmoud Ahmad FAHMY. *Wireless Sensor Networks*. Sous la dir. de SPRINGER. SpringerNature, 2016.
- [Fal03] Kevin FALL. *A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets*. Rapp. tech. 2003.
- [Fli19] Open FLIGHT. *OpenFlights, "Airport, airline and route data," 2019* <http://openflights.org/data.html>. 2019.
- [G.+07] Anastasi G. et al. « Motes Sensor Networks in Dynamic Scenarios : An Experimental Study for Pervasive Applications in Urban Environments ». In : *Int. J. Ubiq. Comp. Intell* (2007).
- [GBA16] Domenico De GUGLIELMO, Simone BRIENZA et Giuseppe ANASTASI. « IEEE 802.15.4e : A survey ». In : *Computer Communications* 88.15 (août 2016), p. 1–24.

- [GCBL04] D. GANESAN, R. CRISTESCU et B. BEFERULL-LOZANO. « Power-efficient sensor placement and transmission structure for data gathering under distortion constraints ». In : *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*. 2004.
- [GG15] Claire GOURSAUD et Jean-Marie GORCE. « Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges ». In : *EAI Endorsed Transactions on the Internet of Things* (2015).
- [GIR14] Brunilde GIRARDET. « Trafic Aérien : Détermination optimale et globale des trajectoires d'avions en présence de vent ». Thèse de doct. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2014.
- [GMM08] ANASTASI G., CONTI M. et DI FRANCESCO M. « Data Collection in Sensor Networks with Data Mules : An integrated simulation analysis ». In : *Proceedings of the 13th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC08)*. 2008.
- [GMM09] Anastasi G., CONTI M. et DI FRANCESCO M. « Reliable and Energy Efficient Data Collection in Sparse Sensor Networks with Mobile Elements. » In : *Performances Evaluation* (2009).
- [Go19] We Go. *Wego, "Flight schedules", 2019*  
*https://www.wego.com/schedules*. 2019.
- [Gol05] Andrea GOLDSMITH. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [Gom15] K. GOMEZ. « Capacity evaluation of aerial LTE base-stations for public safety communications ». In : *Proc. IEEE Eur. Conf. Netw. Commun. (EuCNC)*. 2015.
- [Gon+13] J. GONÇALVÈS et al. « Quantifying the modern recharge of the “fossil” Sahara aquifers ». In : *Geophysical Research Letters* 40.11 (juin 2013), p. 2673–2678.
- [GP10] Carles GOMEZ et Josep PARADELLS. « Wireless home automation networks : A survey of architectures and technologies ». In : *IEEE Communications Magazine* 48.6 (juin 2010), p. 92–101.
- [GR17] Orestis GEORGIU et Usman RAZA. « Low Power Wide Area Network Analysis : Can LoRa Scale? » In : *IEEE Wireless Communications Letters* 6.2 (jan. 2017), p. 162–165.

- [Gu+13] Yu GU et al. « ESWC : Efficient Scheduling for the Mobile Sink in Wireless Sensor Networks with Delay Constraint ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 24.7 (2013), p. 1310 –1320.
- [Guo+11] S. GUO et al. « Design and implementation of the KioskNet system ». In : *Computer Networks* 55.1 (2011), 264–281.
- [GZD09] Shuai GAO, Hongke ZHANG et Sajal DAS. « Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks ». In : *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*. Kos, juin 2009.
- [GZD11] Shuai GAO, Hongke ZHANG et Sajal K. DAS. « Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks with Path-Constrained Mobile Sinks ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* 10.5 (2011).
- [H.+05] Luo H. et al. « TTDD : Two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks ». In : *Wirel. Netw* (2005).
- [Hak+10] Ismo HAKALA et al. « Evaluation of Environmental Wireless Sensor Network-Case Foxhouse ». In : *International Journal on Advances in Networks and Services* 3.1 (jan. 2010), p. 29–39.
- [HC08] Elyes Ben HAMIDA et Guillaume CHELIUS. « Strategies for data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks ». In : *IEEE Wireless Communications* 15.6 (2008), p. 31 –37.
- [Hei+06] J. HEIDEMANN et al. « Underwater sensor networking : Research challenges and potential applications ». In : *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2006.
- [HHW15] Teng-Cheng HSU, Y.-W. Peter HONG et Tsang-Yi WANG. « Optimized Random Deployment of Energy Harvesting Sensors for Field Reconstruction in Analog and Digital Forwarding Systems ». In : *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING* (2015).
- [HK03] F. HU et S. KUMAR. « Multimedia query with QoS considerations for wireless sensor networks in telemedicine ». In : *Proc. Soc. Photo-Optical Instrum. Eng. Int. Conf. Internet Multimedia Manage. Syst.* 2003.
- [HKB99] W. R. HEINZELMAN, J. KULIK et H. BALAKRISHNAN. « Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks ». In : *Proc. ACM MobiCom*. 1999.

- [HME05] Jun H., AMMAR M. et ZEGURA E. « Power Management in Delay Tolerant Networks : A Framework and Knowledge-Based Mechanisms ». In : *IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'05)*. 2005, 418–429.
- [Hou+08] I.-H. HOU et al. « AdapCode : Adaptive Network Coding for Code Updates in Wireless Sensor Networks ». In : *The 27th Conference on Computer Communications INFOCOM*. 2008.
- [HP19] Dirk HELBING et Evangelos POURNARAS. <https://www.nature.com/news/society-build-digital-democracy-1.18690>. 2019.
- [HSS05] Y. T. HOU, Y. SHI et H. D. SHERALI. « On Energy Provisioning and Relay Node Placement for Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4.5 (sept. 2005), p. 2579–2590.
- [HT03] C.-F. HUANG et Y.-C. TSENG. « The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network ». In : *Proceedings of the ACM 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03)*. 2003.
- [Hu+14] Yi-Fan HU et al. « A particle swarm algorithm based routing recovery method for mobile sink wireless sensor networks ». In : *Control and Decision Conference*. 2014.
- [HYM16] Samira HAYAT, Evşen YANMAZ et Raheeb MUZAFFAR. « Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications : A Communications Viewpoint ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18.4 (2016), p. 2624–2661.
- [HYY13] Phuong Tran Thi HA, Hiroshi YAMAMOTO et Katsuyuki YAMAZAKI. « Using Autonomous Air Vehicle in DTN Sensor Network for Environmental Observation ». In : *IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference*. Kyoto, Japan, juil. 2013.
- [IA04a] M. ISHIZUKA et M. AIDA. « Performance study of node placement in sensor networks ». In : *24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. 2004.
- [IA04b] M. ISHIZUKA et M. AIDA. « Performance study of node placement in sensor networks ». In : *International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (2004).

- [IAS06] Chatzigiannakis S. I., KINALIS A. et NIKOLETSEAS S. « Sink mobility protocols for data collection in wireless sensor networks. » In : *proceedings of the 4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access (MobiWac'06)*. 2006.
- [Int19] Space INTEL. *Space Intel* <https://www.spaceintelreport.com/for-cubesat-specialist-isis-sigint-is-a-mission-cubesats-are-made-for/>. 2019.
- [IR16] ITU-R. *Recommendation ITU-R P.833-9, Attenuation in vegetation*. Rapp. tech. <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>. Geneva : International Telecommunication Union, sept. 2016.
- [Isa19] ISA. *International Society of Automation. ISA-100.11a-2009, Wireless Systems for Industrial Automation : Process Control and Related Applications*. <http://www.isa.org> (accessed on November 2009). 2019.
- [J.+08] Ansari J. et al. « Radio-triggered wake-ups with addressing capabilities for extremely low power sensor network applications ». In : *Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'08)*. 2008.
- [Jel+12] V. JELICIC et al. « Analytic Comparison of Wake-up Receivers for WSNs and Benefits over the Wake-on Radio Scheme ». In : *Proceedings of ACM PM2HW2N*. 2012.
- [JJ05] Luo J. et HUBAUX J.-P. 2005b. J. « Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks ». In : *Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'05)*. 2005.
- [Jon+08] Thomas JONSON et al. « Application of delay tolerant networking (DTN) in Airborne Networks ». In : *IEEE Military Communications Conference*. San Diego, CA, USA, nov. 2008.
- [JS08] Rao J. et BISWAS S. « Joint routing and navigation protocols for data harvesting in sensor networks. » In : *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS'08)*. 2008.
- [JS10] Rao J. et BISWAS S. « Network-assisted sink navigation for distributed data gathering : Stability and delay-energy trade-offs ». In : *Comp. Comm.* 2010.

- [JSS05] D. JEA, A.A. SOMASUNDARA et M.B. SRIVASTAVA. « Multiple Controlled Mobile Elements (Data Mules) for Data Collection in Sensor Networks ». In : *First IEEE/ACM Int'l Conf. Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS '05)*. Juin 2005.
- [Jua+02] P. JUANG et al. « Energy-efficient computing for wildlife tracking : Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet ». In : *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 36.5 (2002), 96–107.
- [KAF11] Maurice J. KHABBAZ, Chadi M. ASSI et Wissam F. FAWAZ. *Disruption-Tolerant Networking : A Comprehensive Survey on Recent Developments and Persisting Challenges*. 2011.
- [Kan+09] Anita KANAVALI et al. « A flat routing protocol for sensor networks ». In : *Proceeding of International Conference on Methods and Models in Computer Science (ICM2CS)*. 2009.
- [Kat14] Soujanya KATIKALA. « GOOGLE PROJECT LOON ». In : *Rivier Academic Journal* 10.2 (2014).
- [Ken+11] Ito KENTARO et al. *Convergence Properties for the Physarum Solver*. Rapp. tech. 2011.
- [Ker78] David S KERSHAW. « The incomplete Cholesky-Conjugate Gradient Method for the Iterative Solution of Systems of Linear Equations ». In : *Journal of Computational Physics* (1978).
- [KG09] Dantu K. et SUKHATME G. « Connectivity vs. control : Using directional and positional cues to stabilize routing in robot networks ». In : *Proceedings of the 2nd International Conference on Robot Communication and Coordination (RoboComm'09)*. 2009.
- [KGH13] Majid I. KHAN, Wilfried N. GANSTERER et Guenter HARING. « Static vs. mobile sink : The influence of basic parameters on energy efficiency in wireless sensor networks ». In : *Elsevier Computer Communications* 36.9 (2013), p. 965–978.
- [Kho+14] Ines KHOUF et al. « Survey of Deployment Algorithms in Wireless Sensor Networks : Coverage and Connectivity Issues and Challenges ». In : *Int. J. Autonomous and Adaptive Communications Systems* (2014).
- [Kim+10] JaeHyun KIM et al. « Comparison of traffic dependent wireless sensor network protocols ». In : *IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Jeju, juin 2010.

- [KLB04] Santosh KUMAR, Ten H. LAI et József BALOGH. « On k-coverage in a mostly sleeping sensor network ». In : *MobiCom* (2004).
- [KM04] Akkaya K. et YOUNIS M. « Energy-aware routing to a mobile gateway in wireless sensor networks. » In : *Proceedings of the 47th IEEE Global Telecommunications Conference Workshops (GlobeCom'04)*. 2004.
- [KM15] Vani KRISHNASWAMY et Sunilkumar S. MANVI. « Analysis of acoustic channel in underwater acoustic sensor network ». In : *IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*. 2015.
- [KMA16] Ines KHOUFI, Pascale MINET et Nadjib ACHIR. « Unmanned Aerial Vehicles Path Planning for Area Monitoring ». In : *International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*. Paris, nov. 2016.
- [KNJ17] Amar KASWAN, Kumar NITESH et Prasant K. JANAA. « Energy efficient path selection for mobile sink and data gathering in wireless sensor networks ». In : *AEU - International Journal of Electronics and Communications* 73 (2017), p. 110–118.
- [KR04] C. KAPPLER et G. RIEGEL. « A Real-World, Simple Wireless Sensor Network for Monitoring Electrical Energy Consumption ». In : *Proc. EWSN*. 2004.
- [Kui08] Erik KUIPER. « Mobility and Routing in a Delay-tolerant Network of Unmanned Aerial Vehicles ». Thèse de doct. Linköping Institute of Technology at Linköping University, 2008.
- [Kuo+18] Yaw-Wen KUO et al. « Design of a Wireless Sensor Network-Based IoT Platform for Wide Area and Heterogeneous Applications ». In : *IEEE Sensors Journal* 18.12 (juin 2018), p. 5187–5197.
- [Lap+11] Vaios LAPPASA et al. « CubeSail : A low cost CubeSat based solar sail demonstration mission ». In : *Advances in Space Research* (2011).
- [Lar] *Larousse, Mai 2019, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/environnement>*.
- [Lau+17] Mads LAURIDSEN et al. « Interference Measurements in the European 868 MHz ISM Band with Focus on LoRa and SigFox ». In : *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. San Francisco, CA, USA, 2017.
- [Led+05] Akos LEDECZI et al. « Countersniper System for Urban Warfare ». In : *ACM Transactions on Sensor Networks* 1.2 (nov. 2005), p. 153–177.

- [Lee+09] Sang Hyuk LEE et al. « Wireless sensor network design for tactical military applications : Remote large-scale environments ». In : *MILCOM IEEE Military Communications Conference*. 2009.
- [Li+17] Peng LI et al. « A path planning method of wireless sensor networks based on service priority ». In : *13th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*. Tokyo, Japan, jan. 2017.
- [Lib19] LIBELIUM. *Waspote-LoRa-868MHz-915MHz-SX1272 Networking Guide at [www.libelium.com/products/waspote/](http://www.libelium.com/products/waspote/)*. 2019.
- [Liu+07] Hui LIU et al. « Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* (2007).
- [LL07] M. LI et Y. LIU. « Underground structure monitoring with wireless sensor networks ». In : *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*. Cambridge, 2007.
- [Llo+09] Wood LLOYD et al. *Use of the delay-tolerant networking bundle protocol from space*. Rapp. tech. NASA Glenn Research Center, 2009.
- [Lof] LOFAR, <http://www.lofar.org/agriculture/fighting-phytophthora-using-micro-climate/fighting-phytophthora-using-micro-climate>.
- [Loo19] LOON. *Loon 2019, en.wikipedia.org/wiki/Loon(company)*. 2019.
- [Lou06] M. LOUBSER. *Delay tolerant networking for sensor networks*. Rapp. tech. Swedish Institute of Computer Science, 2006.
- [LX07] E. LLOYD et G. XUE. « Relay node placement in wireless sensor networks. » In : *IEEE Transactions on Computers* 56 (2007), 134–138.
- [LX99] Guo-Hui LINAB et Guoliang XUE. « Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length ». In : *Information Processing Letters* (1999).
- [M.+05] Wang Z. M. et al. « Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. » In : *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05)*. 2005.
- [Map19] Free MAP. *FreeMap2019 at [www.freemaptools.com/plot-airport-routes.htm](http://www.freemaptools.com/plot-airport-routes.htm)*. 2019.
- [Mar03] I. W. MARSHALL. « Self-Organizing Sensor Networks ». In : *UbiNet*. 2003.
- [Mar04] K. MARTINEZ. « GLACSWEB : A Sensor Web for Glaciers ». In : *Proc. EWSN*. 2004.

- [Mat+13] J W MATIKO et al. « Review of the application of energy harvesting in buildings ». In : *Measurement Science and Technology* 25.1 (nov. 2013).
- [MB14] M. MAGNO et L. BENINI. « An ultra low power high sensitivity wake-up radio receiver with addressing capability ». In : *Proceedings of GROWN Workshop*. 2014.
- [Mek+19] Kais MEKKIA et al. « A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment ». In : *ICT Express* 5.1 (2019), p. 1–7.
- [Mer03] W. M. MERIAL. « Collaborative Networking Requirements for Unattended Ground Sensor Systems ». In : *Proc. IEEE Aerospace Conf.* 2003.
- [Mic03] F. MICHAHELLES. « Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue ». In : *Computers and Graphics* (2003).
- [Mis+08] S. MISRA et al. « Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks to Meet Connectivity and Survivability Requirements ». In : *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE* (2008).
- [MK16] Shreshtha MISRA et Rakesh KUMAR. « A literature survey on various clustering approaches in wireless sensor network ». In : *2nd International Conference on Communication Control and Intelligent Systems (CCIS)*. 2016.
- [MKD16] Xiaoyan MA, Rahim KACIMI et Riadh DHAOU. « Fairness-aware UAV-assisted data collection in mobile wireless Sensor Networks ». In : *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Paphos, Cyprus, 2016.
- [ML02] E.J. Duarte MELO et Mingyan LIU. « Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks ». In : *Global Telecommunications Conference GLOBECOM*. 2002.
- [ML04] Britton MATTHEW et Sacks LIONEL. « The SECOAS Project : development of a self-organising, wireless sensor network for environmental monitoring ». In : *International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA)*. Boston, mai 2004.
- [ML10] Y. S. MENG et Y. H. LEE. « Investigations of Foliage Effect on Modern Wireless Communication Systems : A Review ». In : *Progress In Electromagnetics Research* 105 (2010), p. 313–332.
- [MM02] A. MAINWARING et Friedemann MATERN. « Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring ». In : *WSNA*. 2002.

- [MM10] Rajiv MISRA et Chittaranjan MANDAL. « Minimum Connected Dominating Set Using a Collaborative Cover Heuristic for Ad Hoc Sensor Networks ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems ( Volume : 21, Issue : 3, March 2010 )* (2010).
- [MM14] Jasaswi Prasad MOHANTY et Chittaranjan MANDAL. « A distributed greedy algorithm for construction of minimum connected dominating set in wireless sensor network ». In : *Applications and Innovations in Mobile Computing (AIMoC)* (2014).
- [MMH11] Satyajayant MISRA, Nahid Ebrahimi MAJD et Hong HUANG. « Constrained Relay Node Placement in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks ». In : *International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS) IEEE* (2011).
- [MO07] T. MIYAJI et OHNISHI. « Physarum can solve the shortest path decision problem mathematically rigorously. » In : *International Journal of Pure and Applied Mathematics, accepted.* ((2007).
- [Mon19] MONTENEGRO. G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, D. Culler, *Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks, IETF RFC 4944.* 2019.
- [Moz+17] Mohammad MOZAFFARI et al. « Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications ». In : *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS* 16.11 (nov. 2017), p. 7574–7590.
- [Moz+19] Mohammad MOZAFFARI et al. « A Tutorial on UAVS for Wireless Networks : Applications, Challenges, and Open Problems ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials, Early Access* (2019).
- [MP09] Stevan MARINKOVIC et Emanuel POPOVICI. « Network Coding for Efficient Error Recovery in Wireless Sensor Networks for Medical Applications ». In : *First International Conference on Emerging Network Intelligence.* 2009.
- [MRX08] Satyajayant MISRA, Martin REISSLEIN et Guoliang XUE. « A survey of multimedia streaming in wireless sensor networks ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 10.4 (2008), p. 18–39.
- [MY06] Ma M. et YANG Y. « SenCar : An energy efficient data gathering mechanism for scale multihop sensor networks. » In : *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'06).* 2006.

- [MY07] Ming MA et Yuanyuan YANG. « SenCar : An Energy-Efficient Data Gathering Mechanism for Large-Scale Multihop Sensor Networks ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 18.10 (sept. 2007), p. 1476 –1488.
- [Nak+07] T. NAKAGAKI et al. « Minimum-risk path finding by an adaptive amoebal network ». In : *Physical Review Letters* (2007).
- [Nap19] NAPPE. *Nappe* <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/07/sahel-niger-160712.pdf>, retrieved 19-06-2019. 2019.
- [Nav19] NAVIGATION. *Ground-Based Navigation - Very High Frequency Omni-Directional Range (VOR)*". [www.faa.gov](http://www.faa.gov). Federal Aviation Administration. retrieved 2019-06-12. 2019.
- [Ndz+12] D. L. NDZI et al. « Vegetation Attenuation Measurements and Modeling in Plantations for Wireless Ssensor Network Planning ». In : *Progress In Electromagnetics Research B* 36 (2012), p. 283–301.
- [NF16] M. Taufiq NURUZZAMAN et Huei-Wen FERNG. « A low energy consumption routing protocol for mobile sensor networks with a path-constrained mobile sink ». In : *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
- [NP04] S. NEDENSHI et R. PATRA. « DTNLite : A reliable data transfer architecture for sensor networks ». In : *8th International Conference on Intelligent Engineering Systems*. 2004.
- [NS17] Lavina NAGPAL et Krishna SAMDANI. « Projet LOON : Innovating the Connectivity Worldwide ». In : *IEEE International Conference On Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT)*. Bangalore, India, 2017.
- [NT00] Toshiyuki NAKAGAKI et Agota TOTH. « Maze-Solving by an Amoeboid Organism ». In : *Nature September 2000* (2000).
- [NYH04] Toshiyuki NAKAGAKI, Hiroyasu YAMADA et Masahiko HARA. « Smart network solutions in an amoeboid organism ». In : *Biophysical Chemistry* (2004).
- [NYT01] Toshiyuki NAKAGAKI, Hiroyasu YAMADA et Agota TOTH. « Path finding by tube morphogenesis in an amoeboid organism ». In : *Biophysical Chemistry* (2001).
- [Oce19] En OCEAN. *EnOcean*. <http://www.enocean.com/en/enocean-wireless-standard/>. 2019.

- [Oll+07] A. OLLERO et al. « AWARE : platform for autonomous self-deploying and operation of wireless sensor-actuator networks cooperating with unmanned AeRial vehiclEs ». In : *Proceedings of the 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. Rome, Italy, sept. 2007.
- [Oll+13] J. OLLER et al. « Design development and performance evaluation of a low-cost low-power wake-up radio system for wireless sensor networks ». In : *ACM Transactions on Sensor Networks* (2013).
- [P.+07] Baronti P. et al. « Wireless Sensor Networks : A Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards ». In : *Computer Communications* 30 (2007), 1655–1695.
- [Pan+12] Zhibo PANG et al. « Global fresh food tracking service enabled by wide area wireless sensor network ». In : *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2012.
- [Paw16] Wichai PAWGASAME. « A Survey in Adaptive Hybrid Wireless Sensor Network for Military Operations ». In : *IEEE Second Asian Conference on Defence Technology (ACDT)*. Chiang Mai, jan. 2016.
- [Pet+15] Juha PETAJAJARVI et al. « On the coverage of LPWANs : range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology ». In : *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. 2015.
- [PFH04] A. S. PENTLAND, R. FLETCHER et A. HASSON. « DakNet : Rethinking connectivity in developing nations ». In : *Computer* 37.1 (2004), 78–83.
- [PMA06] D. POMPILI, T. MELODIA et I. F. AKYILDIZ. « Deployment Analysis in Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks ». In : *Proceedings of the ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet)*. 2006.
- [Pri57] R. C. PRIM. « Shortest Connection Networks And Some Generalizations ». In : *The Benn System technical Journal* (1957).
- [PSTA01] J. PUIG-SUARI, C. TURNER et W. AHLGREN. « Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class PicoSatellite ». In : *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2001.
- [PVM10] Sasikumar P, Shriram K VASUDEVAN et Ramesh M. « Heuristic Approaches with Energy Management for Node Placement in Wireless Sensor Networks ». In : *International Journal of Computer Applications* (2010).

- [PVP13] Marios I. POULAKIS, Stavroula VASSAKI et Athanasios D. PANAGOPOULOS. « Satellite-Based Wireless Sensor Networks : Radio Communication Link Design ». In : *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (2013).
- [Raw+14] Priyanka RAWAT et al. « Wireless sensor networks : a survey on recent developments and potential synergies ». In : *The Journal of Supercomputing* 68.1 (avr. 2014), p. 1–48.
- [RDV15] Virender RANGA, Mayank DAVE et Anil Kumar VERMA. « Relay Node Placement for Lost Connectivity Restoration in Partitioned Wireless Sensor Networks ». In : *Recent Advances on Electrosience and Computers* (2015).
- [Reb+15] Maher REBAI et al. « Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks ». In : *Computers & Operations Research* (2015).
- [Res13] RESCUECELL. *RESCUECELL*, [online] Available : <http://www.rescuecell.eu/the-project/>. 2013.
- [RK08] Sugihara R. and GUPTA R. K. « Improving the data delivery latency in sensor networks with controlled mobility ». In : *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'08)*. 2008.
- [RK10] Sugihara R. et GUPTA R. K. « Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks. » In : *IEEE Trans. Mob. Comp.* (2010).
- [RSC86] V.J. RAYWARD-SMITH et A. CLARE. « On finding Steiner vertices ». In : *Networks* (1986), p. 283–294.
- [S.+03a] Gandham S. et al. « Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. » In : *Proceedings of the 46th IEEE Global Telecommunications Conference Workshops (GlobeCom'03)*. 2003.
- [S.+03b] Jain S. et al. « Exploiting Mobility for Energy Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks ». In : *ACM/Springer Mobile Network Applications* 11.3 (2003), 327–339.
- [S.+08] Basagni S. et al. « Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. » In : *Wirel. Netw.* (2008).

- [Sah14] Ozgur Koray SAHINGOZ. « Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) : Concepts and Challenges ». In : *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74.1-2 (avr. 2014), 513–527.
- [Sah19] SAHARA. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sahara>, retrieved 2019-06-12. 2019.
- [Sak+15] Kazuya SAKAI et al. « A Framework for the Optimal k -Coverage Deployment Patterns of Wireless Sensors ». In : *IEEE Sensors Journal* (2015).
- [Sal+01] A. SALHIEH et al. « Power efficient topologies for wireless sensor networks ». In : *International Conference on Parallel Processing*. 2001.
- [Sat19] Cube SAT. *Cube Sat* <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>. 2019.
- [SB18] Peng SUN et Azzedine BOUKERCHE. « Performance modeling and analysis of a UAV path planning and target detection in a UAV-based wireless sensor network ». In : *Elsevier Computer Networks* 146 (2018), p. 217–231.
- [SBO19] Aloizio Pereira da SILVA, Scott BURLEIGH et Katia OBRACZKA. *Delay and Disruption Tolerant Networks*. Sous la dir. d'Aloizio Pereira da SILVA. Taylor & Francis Group, 2019.
- [SC19] Harshavardhan SABBINENI et Krishnendu CHAKRABARTY. « An Energy-Efficient Data Delivery Scheme for Delay-Sensitive Traffic in Wireless Sensor Networks ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2010.5 (juil. 2019).
- [Sem13] Corporation SEMTECH. *LoRa Modem Design Guide*. Rapp. tech. Semtech Wireless et Sensing, juil. 2013.
- [Sem15] AN1200.22 SEMTECH. *LoRa Modulation Basics*. Rapp. tech. Semtech Corporation, mai 2015.
- [Sha+03] Rahul C. SHAH et al. « Data MULEs : Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks ». In : *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications* (2003).
- [SHK06] Byungrak SON, Yong sork HER et Jung-Gyu KIM. « A Design and Implementation of Forest-Fires Surveillance System based on Wireless Sensor Networks for South Korea Mountains ». In : *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security* (2006).
- [Sig19] SIGFOX. *Sigfox world coverage available in* : [www.sigfox.com/en/coverage/](http://www.sigfox.com/en/coverage/). 2019.

- [SL14] Anil Kumar SAGAR et D. K. LOBIYAL. « Fault Tolerant Coverage and Connectivity in Presence of Channel Randomness ». In : *Scientific World Journal* (2014).
- [SMA12] Mustapha Reda SENOUCI, Abdelhamid MELLOUK et Amar AISSANI. « An analysis of intrinsic properties of stochastic node placement in sensor networks ». In : *Global Communications Conference (GLOBECOM)* (2012).
- [SMA14] Mustapha Reda SENOUCI, Abdelhamid MELLOUK et Amar AISSANI. « Random deployment of wireless sensor networks : a survey and approach ». In : *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing* (2014).
- [Som+06] A.A. SOMASUNDARA et al. « Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5.8 (2006), p. 958 –973.
- [Son+08] Jianping SONG et al. « WirelessHART : Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control ». In : *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*. St. Louis, MO, USA, juin 2008.
- [Sor+15] N. SORNIN et al. *LoRaWAN Specifications*. Rapp. tech. LoRa Alliance, jan. 2015.
- [Spe+15] Dora SPENZA et al. « Beyond duty cycling : Wake-up radio with selective awakenings for long-lived wireless sensing systems ». In : *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. 2015.
- [SRS04] A.A. SOMASUNDARA, A. RAMAMOORTHY et M.B. SRIVASTAVA. « Mobile element scheduling for efficient data collection in wireless sensor networks with dynamic deadlines ». In : *25th IEEE International Real-Time Systems Symposium*. Lisbon, Portugal, Portugal, déc. 2004.
- [SS07] Poduri S. et Sukhatne G. S. « Achieving Connectivity Through Coalescence in Mobile Robot Networks ». In : *1st International Conference on Robot Communication and Coordination (RoboComm'07)*. 2007.
- [Ste78] Peter Smith STEVENS. *Les Formes dans la Nature*. Sous la dir. d'Éditions du SEUIL. 59-68. Science ouverte, 1978. ISBN : 2-02-004813-2.
- [Sun+08] Jongwoo SUNG et al. « Wireless Sensor Networks for Cultural Property Protection ». In : *International Conference on Advanced Information Networking and Applications - Workshops (aina workshops 2008)*. Okinawa, avr. 2008.

- [Suo06] Jukka SUOMELA. « Computational Complexity of Relay Placement in Sensor Networks ». In : *International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science* (2006).
- [SWR98] Suresh SINGH, Mike Woo et C. S. RAGHAVENDRA. « Power-aware routing in mobile ad hoc networks ». In : *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. 1998.
- [Sze+04] Robert SZEWCZYK et al. « An analysis of a large scale habitat monitoring application ». In : *SenSys '04 Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. Baltimore, nov. 2004.
- [Ter+10a] Atsushi TERO et al. « A Method Inspired by Physarum for Solving the Steiner Problem ». In : *International Journal of Unconventional Computing* (2010).
- [Ter+10b] Atsushi TERO et al. « Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design ». In : *Science* (2010).
- [TKN06] Atsushi TERO, Ryo KOBAYASHIA et Toshiyuki NAKAGAKI. « Physarum solver : A biologically inspired method of road-network navigation ». In : *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications* (2006).
- [TKN07] Atsushi TERO, Ryo KOBAYASHIA et Toshiyuki NAKAGAKI. « A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold ». In : *Journal of Theoretical Biology* (2007).
- [Tov+10] A. TOVAR et al. « A DTN wireless sensor network for wildlife habitat monitoring ». In : *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. Calgary, Canada, mai 2010.
- [TT06] S. TOUMPIS et L. TASSIULAS. « Optimal deployment of large wireless sensor networks ». In : *IEEE Transactions on Information Theory* 52.7 (juil. 2006), p. 2935–2953.
- [UPS17] Raza U., Kulkarni P. et SOORIYABANDARA. « Low power wide area networks : An overview ». In : *IEEE J. Commun. Surv. Tuto* 19.2 (2017), p. 855–873.
- [VA09] Mehmet C. VURAN et Ian F. AKYILDIZ. « Error Control in Wireless Sensor Networks : A Cross Layer Analysis ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking* 17.4 (août 2009), p. 1186–1199.
- [Vis04] R. Riem Vis. « Cold Chain Management Using an Ultra Low Power Wireless Sensor Network ». In : *WAMES*. 2004.

- [VMB13] Ruben Martinez VIDAL, Ramon MARTI et Joan BORRELL. « Characterization of a transoceanic aircraft delay tolerant network ». In : *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. Sydney, oct. 2013.
- [VoB92] Stefan VoB. « Steiner’s problem in graphs : heuristic methods ». In : *Discrete Applied Mathematics* 40 (1992).
- [Vor19] VOR. [https://fr.wikipedia.org/wiki/VHF<sub>Omnidirectional</sub>Range](https://fr.wikipedia.org/wiki/VHF_Omnidirectional_Range), retrieved 2019–06 – 12. 2019.
- [Voy12] Artemios G. VOYIATZIS. « A Survey of Delay- and Disruption-Tolerant Networking Applications ». In : *Journal of Internet Engineering* 5.1 (juin 2012), p. 331–344.
- [VZS12] Athanasios VASILAKOS, Yan ZHANG et Thrasyvoulos V. SPYROPOULOS. *Delay Tolerant Networks Protocols and Applications*. Sous la dir. d’Athanasios VASILAKOS. CRC Press, 2012.
- [WA+06] G. WERNER-ALLEN et al. « Deploying a wireless sensor network on an active volcano ». In : *IEEE Internet Computing* 6.2 (mar. 2006), p. 18–25.
- [Wan+15] Chengliang WANG et al. « Efficient Aerial Data Collection with UAV in Large-Scale Wireless Sensor Networks ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 11.11 (2015).
- [Wav] WAVENIS. *Wavenis Technology*. <http://www.coronis.com/>.
- [Wav19] WAVE. *Z-Wave Alliance*. Available Online : <http://www.z-wavealliance.com/technology/>. 2019.
- [WEH09] Lloyd WOOD, Wesley M. EDDY et Peter HOLLIDAY. « A bundle of problems ». In : *IEEE Aerospace conference*. Big Sky, MT, USA, avr. 2009.
- [Wey+13] Maarten WEYN et al. « Survey of the DASH7 Alliance Protocol for 433MHz Wireless Sensor Communication ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* (2013).
- [Wil08] WILLIG. « Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications : A Selection ». In : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 4 (2008), 102–124.
- [WJW10] Yanbin WENG, Weijia JIA et Guojun WANG. « Joint routing and controlled mobility for energy efficiency in Wireless Sensor Networks ». In : *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*. 2010.

- [wLYf13] ZHANG Xi WEI, SHEN LIN et JIANG YI-FENG. « Optimizing path selection of mobile Sink nodes in mobility-assistant WSN ». In : *Journal on Communications* 2 (2013).
- [WME04] Zhao W., AMMAR M. et ZEGURA E. « A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks ». In : *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'04)*. 2004.
- [WTJ09] S. WAHARTE, N. TRIGONI et S. JULIER. « Coordinated search with a swarm of UAVs ». In : *Proc. IEEE Conf. Sensor Mesh Ad Hoc Commun. Netw. Workshops*. Juin 2009.
- [WXA08] Demin WANG, Bin XIE et Dharma P. AGRAWAL. « Coverage and Lifetime Optimization of Wireless Sensor Networks with Gaussian Distribution ». In : *IEEE Transactions on mobile computing* (2008).
- [WY06] Peng-Jun WAN et Chih-Wei YI. « Coverage by randomly deployed wireless sensor networks ». In : *IEEE Transactions on Information Theory* (2006).
- [WZM07] G. Xue W. ZHANG et S. MISRA. « Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks : problems and algorithms. » In : *IEEE INFOCOM*. Barcelona, mai 2007, 1649–1657.
- [Xin+08] Guoliang XING et al. « Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station ». In : *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. Hong Kong, Hong Kong, China, mai 2008.
- [XLW11] Xu XU, Weifa LIANG et Tim WARK. « Data quality maximization in sensor networks with a mobile sink ». In : *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*. 2011.
- [XZZ16] Yong Deng XIAOGE ZHANG Cai Gao et Zili ZHANG. *Advances in Physarum Machines : Sensing and Computing with Slime Mould*. Sous la dir. de Guanrong Chen IVAN ZELINKA Andrew Adamatzky. 519-558. Springer Nature, 2016.
- [Y.+05] Gu Y. et al. « Partitioning based mobile element scheduling in wireless sensor networks ». In : *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'05)*. 2005.

- [YA08] Mohamed YOUNIS et Kemal AKKAYA. « Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In : *Ad Hoc Networks* (2008).
- [Yan+10] Dejun YANG et al. « Two-Tiered Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks : Efficient Approximations ». In : *IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)* (2010).
- [YHE02] Wei YE, J. HEIDEMANN et D. ESTRIN. « An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks ». In : *Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)* (2002).
- [YMG08] J. YICK, B. MUKHERJEE et D. GHOSAL. « Wireless sensor network survey ». In : *Computer Networks* 52.12 (2008), 2292–2330.
- [YSM16] Rathod YOGIRAJASINH, Mehul B. SHAH et Parthesh MANKODI. « Efficient data gathering in wireless sensor network using mobile sink ». In : *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. Bangalore, 2016.
- [Yun+10] Ziqiu YUN et al. « Optimal Deployment Patterns for Full Coverage and k-Connectivity ( $k \leq 6$ ) Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking, VOL. 18, NO. 3, JUNE 2010* (2010).
- [Yun+13] Young Sang YUN et al. « Distributed Algorithm for Lifetime Maximization in a Delay-Tolerant Wireless Sensor Network with a Mobile Sink ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* 12.10 (2013), p. 1920 –1930.
- [YWL15] Yuanyuan YANG, Cong WANG et Ji LI. « Wireless Rechargeable Sensor Networks : Current Status and Future Trends ». In : *Journal of Communications* 10.9 (2015).
- [YX10] YoungSang YUN et Ye XIA. « Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sink in Delay-Tolerant Applications ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* (2010).
- [ZG05] X. ZHU et B. GIROD. « Distributed rate allocation for multi-stream video transmission over ad hoc networks ». In : *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Image Processing (ICIP)*. 2005.
- [ZG13] Mingchuan ZHANG et Changqiao Xu Jianfeng GUAN. « P-iRP : Physarum-Inspired Routing Protocol for Wireless Sensor Networks ». In : *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), IEEE* (2013).

- [Zha+13] Xiaoge ZHANG et al. « Route selection for emergency logistics management : A bio-inspired algorithm ». In : *Safety Science* (2013).
- [Zha+14a] Mingchuan ZHANG et al. « P-bRS : A Physarum-Based Routing Scheme for Wireless Sensor Networks ». In : *The Scientific World Journal* (2014).
- [Zha+14b] Xiaoge ZHANG et al. « Rapid Physarum Algorithm for shortest path problem ». In : *Applied Soft Computing* 23 (oct. 2014), p. 19–26.
- [Zhu+13] Wang ZHU et al. « Relay Node Placement Algorithm Based on Grid in Wireless Sensor Network ». In : *Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)* (2013).
- [Zon19] ZONE. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Zone%lanche>. 2019.
- [ZTW17] Jian ZHANG, Jian TANG et Tianbao WANG. « Energy-efficient data-gathering rendezvous algorithms with mobile sinks for wireless sensor networks ». In : *International Journal of Sensor Networks* 23.4 (2017).
- [ZW04] X. ZHANG et S. B. WICKER. « How to distribute sensors in a random field? » In : *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*. 2004.
- [ZXG14] Mingchuan ZHANG, Changqiao XU et Jianfeng GUAN. « B-iTRF : A novel bio-inspired trusted routing framework for wireless sensor networks ». In : *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE* (2014).

## Glossaire

<b>3GPP</b> . . . . .	3rd Generation Partnership Project
<b>6LoWPAN</b> . . . . .	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
<b>AFN</b> . . . . .	Aggregation-and-Forwarding
<b>ARCEP</b> . . . . .	Arbre Minimal de Steiner
<b>ARCEP</b> . . . . .	Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes
<b>BAN</b> . . . . .	Body Area Network
<b>CHINS</b> . . . . .	CHeapest INSertion
<b>CMOS</b> . . . . .	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
<b>DME</b> . . . . .	Distance Measuring Equipement
<b>DTN</b> . . . . .	Delay Tolerant Networks
<b>ECEF</b> . . . . .	Earth-Centered Earth-Fixed
<b>GPS</b> . . . . .	Global Positioning System
<b>HART</b> . . . . .	Highway Addressable Remote Transduce
<b>ICCG</b> . . . . .	Incomplete Cholesky-Conjugate Gradient
<b>IEEE</b> . . . . .	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IoT</b> . . . . .	Inernet of Things
<b>IP</b> . . . . .	Internet Protocol
<b>IPN</b> . . . . .	InterPlanetary Network
<b>IPSO</b> . . . . .	IP for Smart Objects
<b>ISA</b> . . . . .	International Society of Automation
<b>ISM</b> . . . . .	Bande Industrielle, Scientifique et Médical
<b>LAN</b> . . . . .	Local Area Network
<b>LoRaWAN</b> . . . . .	Long Range Wide Area Network
<b>LPWAN</b> . . . . .	Low Power Wide Area Networks
<b>LTE</b> . . . . .	Long Term Evolution
<b>MAC</b> . . . . .	Media Access Control
<b>MAN</b> . . . . .	Metropolitan Area Network
<b>MEMS</b> . . . . .	Micro-Electro-Mechanical Systems
<b>MST</b> . . . . .	Minimum Steiner Tree
<b>MULEs</b> . . . . .	Mobile Ubiquitous LAN Extensions
<b>NB-IoT</b> . . . . .	Narrow Band-Internet of Things

## BIBLIOGRAPHIE

---

<b>OACI</b> . . . . .	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
<b>OLSR</b> . . . . .	Optimized Link State Routing Protocole
<b>PAN</b> . . . . .	Personal Area Network
<b>PIMRC</b> . . . . .	International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications
<b>QoS</b> . . . . .	Quality of Service
<b>RCSF</b> . . . . .	Réseaux de Capteurs Sans Fil
<b>RFC</b> . . . . .	Request For Comments
<b>SMS</b> . . . . .	Small Message Service
<b>TCP</b> . . . . .	Transport Control Protocol
<b>UHF</b> . . . . .	Ultra High Frequency
<b>UIT</b> . . . . .	Union International des Télécommunications
<b>VOR</b> . . . . .	Very High Frequency Omnidirectional Range
<b>WAN</b> . . . . .	Wide Area Network
<b>WGS 84</b> . . . . .	World Geodesic System 1984
<b>WiMob</b> . . . . .	International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications
<b>WISA</b> . . . . .	Wireless Interface for Sensor and Actuators
<b>WPAN</b> . . . . .	(Wireless Personal Area Networks
<b>WSN</b> . . . . .	Wireless sensor Networks
<b>ZB</b> . . . . .	Zone Blanche
<b>ZBE</b> . . . . .	Zone Blanche Étendue



**Titre :** Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues

**Mots clés :** Réseaux de capteurs sans fil, zones blanches étendues, LPWAN, LoRaWAN, avions de ligne, bio-inspiré

**Résumé :** Les zones blanches étendues sont de vastes espaces géographiques (forêts, déserts), sans ou ayant très peu d'infrastructures telles que les routes, les réseaux électrique ou de télécommunication. Cependant, très souvent, dans ces zones se développent de nombreuses activités économiques ou environnementales telles que le monitoring de l'environnement, la surveillance d'une frontière ou d'une installation de pipeline, ou encore la prévention des feux de forêt. Grâce aux techniques de télédétection et de communication, une fonction clé de ces activités repose sur la collecte d'informations issues de capteurs qui sont transmises à un centre d'analyse distant. Nous proposons des solutions réseau afin d'effectuer la collecte de ces données dans les zones blanches étendues grâce à des technologies de communication longue distance et faible énergie, de type LoRaWAN. Pour le problème du déploiement du réseau de capteurs sans fil dans ces zones difficiles, nous avons proposé une heuristique inspirée de la croissance biologique d'un cham-

pignon, le physarum. Le physarum est capable de créer un corps complexe de liens pour trouver de la nourriture nécessaire à sa survie tout en optimisant ses propres ressources corporelles lors des périodes de disette. Ce principe d'optimisation a été adapté au domaine des réseaux pour déployer un réseau tolérant aux fautes, tout en minimisant le nombre de ressources ou relais à placer sur la zone d'intérêt. Nous nous sommes ensuite intéressés à la collecte opportuniste de données dans les zones blanches afin de pouvoir collecter l'information des nœuds trop éloignés d'une station relais. Nous avons développé une méthode de collecte basée sur les avions de ligne qui survole le territoire. Durant une fenêtre de communication, l'avion est à portée d'un capteur et peut ainsi collecter les données stockées qui seront livrées au serveur à l'atterrissage de l'avion. Notre dernière contribution utilise conjointement les deux méthodes précédentes, pour permettre à la fois le déploiement du réseau et la collecte des capteurs isolés.

**Title :** Data Collection Networks for Wide White Areas

**Keywords :** Wireless Sensor Networks, Wide White Areas, LPWAN/LoRaWAN, Commercial Aircraft, Bio-Inspired Methods

**Abstract :** Although wide white areas are not equipped or sparsely equipped with any infrastructure (energy, roads ...), strategic human activities are being carried out such as mines, forest, pipeline... To tackle the problem of deploying sensor networks in a very large area where few infrastructures are available, we propose a network deployment algorithm which aims at efficiently linking sparse points of interest in a very wide white area. The originality of the proposed method is that it mimics the evolution of a type of mold called physarum. Secondly, we aim at overcoming the

deployment problem in wide white areas by using long range communication between an aircraft and earth. The new data collection scheme we propose is based on the use of commercial flights to collect data while they cross over an area of interest. It investigates the feasibility of such a scheme by determining the collection capacity of commercial aircraft in different locations of the desert. Finally, we mixed both solutions to repatriate data from sensors not covered by any flight to a covered data sink that relays data to the aircraft.

