



UNIVERSITÉ DE LILLE
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR 072
UNITÉ DE RECHERCHE INRIA LILLE - NORD EUROPE

Thèse préparée par **Brandon Foubert**
et soutenue publiquement le **10 septembre 2021**
en vue de l'obtention du grade de **Docteur en Informatique**
Discipline **Informatique et applications**

Communication sans fil polymorphique pour l'agriculture connectée

Devant le jury composé de :

Isabelle Guérin-Lassous Professeure des Universités, LIP	Rapportrice
André-Luc Beylot Professeur des Universités, IRIT	Rapporteur
Thomas Noël Professeur des Universités, ICube	Examineur
Marcelo Dias de Amorim Directeur de recherche, LIP6	Président
Nathalie Mitton Directrice de recherche, Inria	Directrice de thèse
Michaël Bruniaux Co-encadrant, Sencrop	Membre invité

Résumé

Les réseaux informatiques sans fil font aujourd'hui partie intégrante de notre quotidien. En particulier, les réseaux de capteurs sans fil sont couramment utilisés pour surveiller divers phénomènes. Les capteurs, ou nœuds, collectent et partagent diverses données de façon autonome. Nous nous intéressons particulièrement à l'agriculture connectée, qui offre une assistance aux agriculteurs. Surveiller la météo permet par exemple de se prémunir contre le gel et de prévoir l'apparition de nuisibles. Les nœuds doivent cependant limiter leur consommation électrique afin de prolonger l'autonomie de leur batterie. Plusieurs contraintes sont également liées à la technologie utilisée pour communiquer : portée, couverture, débit, etc. Ainsi, le choix de la technologie de communication complexifie la conception et le déploiement des réseaux de capteurs sans fil.

Ne serait-il donc pas envisageable de concevoir des réseaux multitechnologies ? Les nœuds disposeraient de plusieurs technologies et seraient ainsi capables de choisir laquelle utiliser. Le réseau gagnerait en flexibilité, couverture et résilience face aux pannes et autres imprévus. Les nœuds devraient cependant considérer l'utilisation de différentes technologies pour chacun des nœuds de leur voisinage. Aussi, différents nœuds pourraient être dédiés à différentes utilisations, variant ainsi les besoins de communication. Par exemple, des flux de données de surveillance et d'alarme n'ont pas les mêmes caractéristiques : les données de surveillance sont émises fréquemment et à intervalles réguliers, tandis que les données d'alarme sont exceptionnelles et urgentes, ne tolérant ni délai ni pertes. Il est donc nécessaire que les nœuds sachent sélectionner de façon autonome la technologie et le chemin les plus adaptés.

À cette fin, nous proposons un protocole de routage dynamique et adaptatif pour les réseaux multitechnologies. Il permet aux nœuds de sélectionner les meilleures routes et technologies, en fonction de leur situation et de leurs besoins. Il prend en compte plusieurs critères lors de la sélection grâce à une méthode de décision multiattributs. Mais cette méthode présente une importante complexité calculatoire ainsi que des inversions de rang. Nous avons donc conçu une nouvelle méthode de sélection, optimisée pour les réseaux de capteurs sans fil. Aussi, la convergence des communications peut distribuer la charge de travail et la consommation énergétique de façon inégale. Nous présentons donc une méthode de prédiction des données permettant aux nœuds de ne transmettre qu'une fraction des mesures. Afin d'évaluer la performance et la pertinence de nos propositions, nous les avons implémentées sur des modules FiPy de Pycom. Ces nœuds possèdent plusieurs technologies, nous permettant ainsi de prouver la faisabilité de notre approche par la conception d'un prototype de réseau multitechnologie. Les résultats expérimentaux montrent un accroissement de la flexibilité du réseau et une adaptabilité technologique automatique, améliorant ainsi l'autonomie énergétique des nœuds.

Abstract

Nowadays, wireless computer networks are an integral part of our daily lives. In particular, wireless sensor networks are commonly used to monitor various phenomena. Sensors, also called nodes, collect and share various data autonomously. We are particularly interested in smart agriculture, which offers an assistance to farmers. Monitoring the weather, for example, makes it possible to guard against frost and to predict the appearance of pests. The nodes must, however, limit their power consumption in order to prolong the autonomy of their battery. Several constraints are also linked to the technology used to communicate : range, coverage, speed, etc. Thus, the choice of the communication technology complicates the design and deployment of wireless sensor networks.

Wouldn't it therefore be possible to design multitechnology networks ? The nodes would have several technologies and would thus be able to choose which one to use. The network would gain in flexibility, coverage and resilience in the face of outages and other unforeseen events. Nodes should however consider using different technologies for each of the nodes in their neighborhood. Also, different nodes could be dedicated to different uses, thus varying the communication requirements. For example, monitoring and alarm data flows do not have the same characteristics : monitoring data is issued frequently and at regular intervals, while alarm data is exceptional and urgent, tolerating neither delay nor loss. It is therefore necessary that the nodes know how to independently select the most suitable technology and path.

To this end, we offer a dynamic and adaptative routing protocol suitable for multitechnology networks. It allows nodes to select the best routes and technologies, depending on their situation and needs. It takes into account several criteria during the selection thanks to a multi-attribute decision method. However, this method presents a significant computational complexity as well as problematic rank reversals. We have therefore devised a new selection method optimized for wireless sensor networks. Also, the convergence of communications can distribute the workload and the energy consumption unevenly. We therefore present a data prediction method allowing nodes to transmit only a fraction of the measurements. In order to assess the performance and relevance of our approach, we have implemented our proposals on Pycom FiPy modules. These nodes have several technologies, allowing us to prove the feasibility of our approach by designing a prototype of a multitechnology network. The experimental results show an increase in the flexibility of the network and an automatic technological adaptability, thus improving the battery life of the nodes.

Table des matières

Table des matières	iv
1 Introduction et contexte	1
1.1 Réseaux informatiques	1
1.2 Technologies de communication sans fil	2
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	5
1.4 Agriculture connectée : cas d'utilisation et motivation	7
1.5 Problématique(s) et limitation(s)	8
1.6 Solution explorée : les réseaux multitechnologies	11
1.7 Organisation et contenu du document	13
1.8 Liste des publications	16
2 Technologies de communication sans fil longue portée	17
2.1 Les réseaux étendus à basse consommation	17
2.2 Présentation et informations techniques	19
2.2.1 Bandes de fréquence de la téléphonie mobile	20
2.2.2 Bandes de fréquences ISM	23
2.3 Caractériser et comparer pour mieux choisir	30
2.3.1 À propos de la consommation énergétique	30
2.3.2 Couverture, occupation des fréquences et coût monétaire	32
2.3.3 Choisir sa (ou ses) technologie(s)	35
2.4 L'utilité des réseaux multitechnologies	37
3 Protocole de routage pour les réseaux multitechnologies	41
3.1 Réseaux de capteurs sans fil multitechnologies	41
3.2 Caractérisation générale des protocoles de routage	43
3.3 Travaux connexes et état de l'art	47
3.4 Bases et fondations protocolaires	49
3.4.1 Modèle réseau considéré	49
3.4.2 Hypothèses sur la pile de communication	51
3.4.3 Notations utilisées	51
3.5 Mécanismes et opérations de routage	52
3.5.1 Déroulement d'un cas d'exemple	53
3.5.2 Contenu et structure d'un paquet	54
3.5.3 Réception et construction des routes	55
3.5.4 Classement et sélection des routes	56
3.5.5 Diffusion et propagation des routes	57
3.6 Adaptativité et méthode de décision multiattribut	58

4	Méthode de sélection multiattribut pour les réseaux multitechnologies	59
4.1	Outils d'aide à la décision multicritère	59
4.2	Méthodes de décision multiattribut	62
4.2.1	Mécanismes internes de la méthode TOPSIS	63
4.2.2	Limitations de la méthode TOPSIS	64
4.3	Travaux connexes et état de l'art des améliorations	66
4.4	Normalisation simplifiée et méthode de décision optimisée	69
4.5	Estimation de la différence de complexité opérationnelle	71
4.6	Une méthode optimisée pour les réseaux multitechnologies	72
5	Évaluation expérimentale des réseaux multitechnologies	75
5.1	Pourquoi expérimenter avant de simuler	75
5.2	Implémentation expérimentale	76
5.2.1	Modules et autres matériels utilisés	76
5.2.2	Fonctionnement des micrologiciels	77
5.3	Configuration expérimentale	79
5.3.1	Organisation physique des expériences	79
5.3.2	Scénario d'utilisation reproduit	79
5.3.3	Évaluation de la méthode de décision	82
5.4	Résultats expérimentaux	82
5.4.1	Topologie et routage	83
5.4.2	Ratio de livraison des paquets	84
5.4.3	Fréquence d'inversion des rangs	85
5.4.4	Temps d'exécution des méthodes de décision	86
5.4.5	Réduction de la consommation énergétique	87
5.5	Un prototype imparfait, mais fonctionnel	88
6	Réduction de données	91
6.1	Convergence des communications et effet entonnoir	91
6.2	Travaux connexes et réduction de données	93
6.3	Coefficient de corrélation de Pearson	94
6.4	Algorithme de réduction de données	95
6.5	Réduction de données le long d'une route	97
6.6	Corrélation et estimation en chaîne pour une réduction efficace	100
7	Conclusion générale	101
7.1	Récapitulatif de nos travaux	101
7.2	Discussion des propositions	103
7.3	Perspectives et travaux futurs	105
	Bibliographie	107
	Webographie	111

Table des figures

1.1	Représentation visuelle du réseau Internet [3].	1
1.2	Les sept couches du modèle OSI [5].	2
1.3	La classe de Jacob Grimm à l'université de Göttingen [6].	2
1.4	Lever la main en classe permet (entre autres) de demander à prendre la parole[7].	3
1.5	Grand murin (<i>Myotis myotis</i>) équipé d'un noeud de réseau de capteurs sans fil [19].	6
1.6	Consommation énergétique d'un module radio CC2500 couplé à un microcontrôleur MSP430 et des capteurs classiques [20].	6
1.7	Comparatif de trois stations météo <i>Sencrop</i> . https://sencrop.com/fr/ . Accessible au 02-07-2021.	8
1.8	Le maïs (<i>Zea mays</i>) est une plante d'une taille généralement comprise entre 1 et 3 mètres, mais pouvant mesurer jusqu'à 6 mètres [22]!	9
2.1	Trajet et distance parcourus par le paquet de données le plus éloigné [33]. . .	17
2.2	Carte de la couverture mondiale de la technologie de téléphonie mobile LTE-Advanced (LTE-A) [43].	20
2.3	Carte de la couverture mondiale des technologies de téléphonie mobile LTE-M et NB-IoT [45].	21
2.4	Schéma de fonctionnement d'un four à micro-ondes [51].	23
2.5	Carte de couverture mondiale du réseau Sigfox [52]. En bleu les stations de base, en violet les pays dans lesquels le déploiement est en cours.	24
2.6	Carte de couverture mondiale du réseau LoRaWAN [55].	26
2.7	Débit maximal de chaque technologie en fonction de la portée de communication théorique en milieu urbain.	29
2.8	Carte de la couverture disponible lors de l'utilisation d'une carte SIM Hologram [83].	34
2.9	Diagramme de décision pour orienter le choix d'une technologie en fonction des contraintes du cas d'utilisation envisagé.	35
3.1	Représentation conceptuelle simplifiée d'un réseau multitechnologie.	42
3.2	Illustration de la stratégie de routage par la source : ici, le nœud 1 est le coordinateur du réseau, et connaît toutes les routes du réseau, tandis que les autres nœuds se contentent de lui faire remonter tous leurs messages qu'il enverra sur le bon chemin.	45
3.3	Illustration de la stratégie de routage proche en proche : chaque nœud maintient sa table de routage en fonction des différentes destinations dans le réseau. . .	46
3.4	Modèle de communication dit "convergecast" [96].	49
3.5	Illustration d'un réseau multitechnologie, où chacun des nœuds est capable d'utiliser plusieurs technologies de communication pour joindre ses voisins.	50
3.6	Sous-ensemble du réseau multitechnologie visible sur la figure 3.5.	53
3.7	Diagramme structurel d'un paquet du protocole de routage RODENT.	54
4.1	La station météo N_A s'occupe de la surveillance météo régulière et envoie des alarmes et cas d'urgence.	60
4.2	Conception assistée par ordinateur d'un disdromètre pour grêle [98].	60

4.3	Représentation graphique de la méthode TOPSIS exécutée pour une matrice de décision contenant trois alternatives A_1 , A_2 et A_3 offrant chacune deux attributs P_1 et P_2	63
5.1	Illustration d'un module FiPy de Pycom [84], disposant de six technologies de communication sans fil.	76
5.2	Shield Pytrack de Pycom [111], offrant des outils pour localiser les nœuds.	77
5.3	Branchement et positionnement du matériel expérimental.	79
5.4	Topologie logique de notre réseau multitechnologie, reproduisant un scénario de surveillance de cultures agricoles.	80
5.5	Rappel de la topologie logique de notre réseau multitechnologie, visible en figure 5.4.	83
5.6	Taux de livraison mesuré pour chaque nœud. Les barres d'erreurs représentent les écarts type, et les différentes colonnes correspondent à chacun des trois types d'expériences.	84
5.7	Prévalence des inversions de rang en fonction de l'ordre de la matrice carrée de décision.	86
5.8	Temps d'exécution en millisecondes des méthodes de décision en fonction de l'ordre de la matrice de décision.	87
5.9	Intensité de courant nécessaire pour utiliser les différentes technologies sans fil des nœuds FiPy [84, 101].	88
6.1	Illustration de l'effet entonnoir, où N_A est la clé de voûte du réseau, et relaye les messages de tous les autres nœuds du réseau.	91
6.2	Sous-partie de notre réseau expérimental, où N_3 décide de transférer ses données à N_1 aux dépens de ce dernier.	92
6.3	Illustration de la réduction des données de N_3 . La station de base estime les valeurs de mesures de N_3 en fonction des mesures de N_1 . En cas d'erreur, N_3 envoie un message de correction.	92
6.4	Scénario minimaliste de réduction des données, où les mesures de N_B peuvent être estimées en fonction des mesures de N_A . Lorsque les estimations sont justes, il n'y a ainsi pas besoin de faire remonter les mesures de N_B	95
6.5	Scénario minimaliste de réduction des données le long d'une route. Les mesures de N_B peuvent être estimées en fonction des mesures de N_A , et celles de N_C en fonction des estimations des mesures de N_B	97

Liste des tableaux

2.1	Coût indicatif en dollars de l'utilisation des technologies de communication sans fil longue portée [82].	34
2.2	Tableau récapitulatif des technologies présentées dans ce chapitre.	39
2.3	Tableau récapitulatif des normes technologiques présentées dans ce chapitre.	40
3.1	Matrice de lien LM_D	51
3.2	Matrice de route RM_D	52
3.3	Vecteurs de besoins relatifs à plusieurs cas d'utilisation.	52
4.1	Problème de décision des méthodes MADM sous la forme d'une matrice de décision.	62
4.2	Matrice de décision factice pour illustrer le problème des inversions de rang.	65
5.1	Vecteurs de besoins $RV_{surveillance}$ et RV_{alarme}	78

Introduction et contexte

1

1.1 Réseaux informatiques

On appelle "réseau informatique" un ensemble d'ordinateurs interconnectés et partageant un même ensemble de protocoles qui indiquent une suite d'opérations à effectuer pour pouvoir échanger des informations et diverses ressources. Depuis leur naissance à la fin des années 50 jusqu'à aujourd'hui, les réseaux informatiques se sont doucement, mais sûrement imposés comme étant une réalité quotidienne dans nos vies. Les réseaux nous permettent d'interconnecter nos ordinateurs, imprimantes, smartphones et autres équipements. Internet [1], le réseau informatique mondial, est le plus imposant de ces réseaux, interconnectant lui-même des millions d'autres réseaux. Par analogie avec un filet, on appelle l'équipement situé à l'extrémité d'une connexion un "nœud". Tout équipement capable d'interpréter et de structurer des données selon la suite des protocoles Internet [2], ou suite TCP/IP, est en théorie capable d'échanger avec l'immense quantité de nœuds peuplant Internet.

Et hop, sans les fils!

Il est courant de classer les réseaux informatiques selon de nombreux critères : la taille du réseau, les protocoles utilisés, le support de transmission utilisé, etc. Ainsi, on fait très souvent la distinction entre les réseaux filaires et les réseaux sans fil. Un réseau filaire utilise un ou plusieurs câbles comme support de transmission, qui sont le plus souvent conçus avec du cuivre, mais aussi du verre ou du plastique, dans le cas de la fibre optique. À l'inverse, un réseau sans fil [4], comme son nom l'indique, permet d'interconnecter des équipements sans l'intermédiaire de câble, mais grâce à l'utilisation de l'air comme support de transmission et la modulation d'ondes électromagnétiques pour porter l'information. Si auparavant le consensus était que les réseaux filaires offraient une rapidité et sécurité supérieures à celles des réseaux sans fil, l'amélioration continue de ces derniers au fil des dernières décennies a grandement réduit les écarts entre ces deux types de réseaux.

Si les réseaux filaires sont encore préférés pour les applications très exigeantes au regard des performances et de la fiabilité (par exemple la mise en place des réseaux d'opérateurs), il est indéniable que les réseaux sans fil disposent de nombreux atouts qui les rendent aujourd'hui incontournables. Pour en citer quelques-uns, la flexibilité offerte par un réseau sans fil permet aux nœuds de se connecter rapidement, sans nécessité de matériel supplémentaire comme des câbles, et de rester mobile même après connexion. Il est ainsi relativement facile d'installer un réseau sans fil et de l'étendre après déploiement, ce qui se traduit entre autres par une réduction du temps et de l'argent nécessaire pour sa mise en œuvre. Ainsi, l'on dénombre de nos jours de plus en plus d'applications pour les réseaux sans fil, parmi les plus courantes, nous

1.1 Réseaux informatiques . . .	1
1.2 Technologies de communication sans fil	2
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	5
1.4 Agriculture connectée : cas d'utilisation et motivation .	7
1.5 Problématique(s) et limitation(s)	8
1.6 Solution explorée : les réseaux multitechnologies .	11
1.7 Organisation et contenu du document	13
1.8 Liste des publications . . .	16

[1] : Futura sciences, Internet : qu'est-ce que c'est? <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-internet-3983/>. Accessible au 02-07-2021.

[2] : CCM, TCP/IP. <https://www.commentcamarche.net/contents/539-tcp-ip>. Accessible au 02-07-2021.

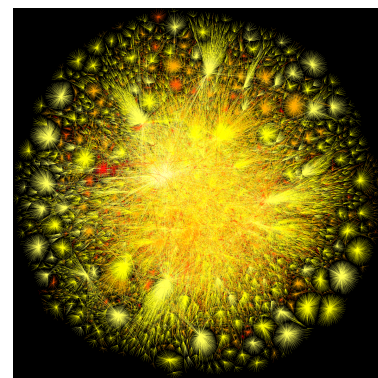


FIGURE 1.1 – Représentation visuelle du réseau Internet [3].

[3] : The Opte Project. <https://www.opte.org/the-internet>. Accessible au 02-07-2021.

[4] : Cisco, Qu'est-ce qu'un réseau sans fil? https://www.cisco.com/c/fr_fr/solutions/small-business/resource-center/networking/wireless-network.html. Accessible au 02-07-2021.

pouvons citer l'utilisation des réseaux Wi-Fi domestiques ou l'utilisation des réseaux cellulaires pour les smartphones.

1.2 Technologies de communication sans fil

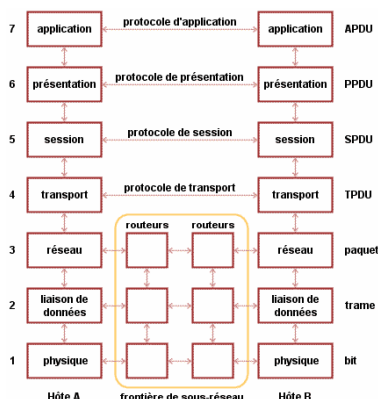


FIGURE 1.2 – Les sept couches du modèle OSI [5].

[5]: *FrameIP, Modèle OSI*. <https://www.frameip.com/osi/>. Accessible au 02-07-2021.

Le modèle OSI [5], de l'anglais "Open Systems Interconnections", est la principale norme de communication dans les réseaux informatiques. Il propose un modèle multicouche dans lequel chacune des couches joue un rôle dans le fonctionnement du réseau distinct de celui des autres couches. Les sept couches du modèle OSI sont les suivantes, dans l'ordre croissant de niveau d'abstraction : couche physique, liaison de données, réseau, transport, session, présentation et application. En théorie, chaque couche doit avoir un fonctionnement bien distinct des autres et proposer un niveau d'abstraction supplémentaire à la couche suivante. Dans la pratique, il arrive souvent que les couches fonctionnent de façon plus ou moins interdépendante, comme on peut le voir par exemple dans la suite des protocoles TCP/IP. On classe les différentes couches du modèle OSI en deux groupes : les couches hautes (transport, session, présentation et application) et les couches matérielles (physique, liaison de données et réseau). Dans cette thèse, c'est quasi exclusivement aux couches dites matérielles que nous nous intéressons.

Les couches matérielles dans une salle de classe

Les couches dites matérielles sont au nombre de trois, et servent principalement de base au bon fonctionnement des communications dans un réseau informatique. La couche physique s'occupe de la transmission réelle, c'est-à-dire la façon dont sont codés et transmis les bits de données sur le support de communication utilisé, et son rôle est généralement rempli par un circuit électronique dédié. La couche liaison de données est chargée de donner la marche à suivre pour que les nœuds puissent tous communiquer en limitant les interférences et autres erreurs de communication, et permet aux nœuds d'un même réseau local de communiquer entre eux. La couche réseau assure le routage, c'est-à-dire le calcul du meilleur chemin entre deux nœuds distants, et le relayage, c'est-à-dire la retransmission d'un paquet par un nœud non-destinataire pour le rapprocher de sa destination. La couche réseau permet donc aux nœuds non-adjacents ou faisant partie de réseaux différents de communiquer entre eux.



FIGURE 1.3 – La classe de Jacob Grimm à l'université de Göttingen [6].

[6]: *Wikipédia, Salle de classe*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Salle_de_classe. Accessible au 02-07-2021.

On peut se risquer ici à une analogie avec une salle de classe, où plusieurs élèves en train de compléter un examen papier veulent demander des précisions à leur professeur. Le protocole de la couche physique indique comment communiquer, comment parler : c'est notre langage, qui nous indique de quelle façon coder des informations abstraites sous la forme d'une suite de mots, et comment via une succession de micros mouvements contrôlés de notre appareil vocal, nous pouvons les transmettre à une autre personne de sorte qu'ils soient intelligibles, c'est-à-dire déchiffrables par l'enseignant.

Concernant la couche liaison de données, le constat est le suivant : la voix d'un être humain se déplace sous la forme d'une onde acoustique,

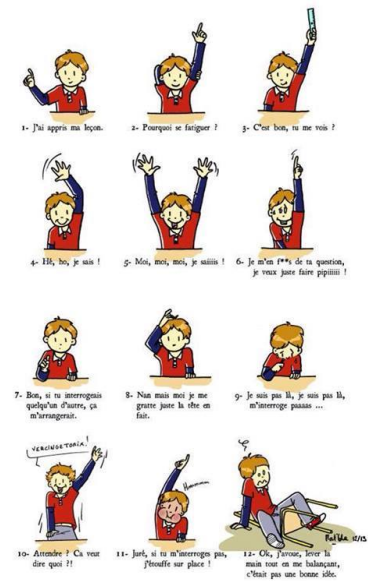
et de la même façon que le font les ondes électromagnétiques, utilise l'air environnant comme support pour se mouvoir dans l'espace. De la même façon que lorsque plusieurs équipements électroniques émettent simultanément sur la même fréquence, le fait que plusieurs élèves parlent au même moment résultera en un brouhaha duquel il serait impossible de dissocier les paroles de deux élèves différents. Ainsi, le protocole d'accès au support de communication indique comment se comporter pour minimiser les risques d'interférences : dans une salle de classe, on lève la main pour demander la parole au professeur qui l'accordera aux élèves tour à tour. De cette façon, on utilise un autre moyen de transit de l'information, ici les ondes du spectre visible (qui est une sous-partie du spectre électromagnétique) pour demander la parole, avant d'utiliser les ondes acoustiques pour faire transiter les données, permettant d'éviter la surcharge du spectre audible. C'est, en quelque sorte, une façon de séparer le plan des données, relatif aux données effectives, du plan de contrôle, relatif aux informations permettant d'organiser la transmission de ces données.

Finalement, le rôle de la couche réseau de notre salle de classe va être d'indiquer à chaque élève de quelle façon rendre sa copie et potentiellement celles de ses camarades à la fin de l'examen. Prenons l'exemple d'un élève au fond de la classe : son message, c'est sa copie, dont l'élève en question est le nœud source et l'enseignant le nœud destinataire. Le protocole de routage en vigueur dans cette classe est le suivant : identifier les nœuds voisins à portée de bras et choisir le voisin le plus approprié pour lui transmettre le message tout en lui demandant de le relayer de façon à le rapprocher de sa destination. Plusieurs stratégies peuvent exister : est-ce qu'on relaye les copies une à une aux voisins de la paillasse de devant ? Est-ce qu'on agrège l'ensemble des copies avant de le relayer le paquet à la paillasse suivante qui fera de même ? On peut également envisager un réseau mobile, où les élèves seraient capables de se déplacer jusqu'à l'avant de la classe pour communiquer leur copie à l'enseignant via une unique communication, simplifiant ainsi le schéma de communication, mais au prix de l'introduction de nouvelles contraintes, telles qu'une demande énergétique importante, nécessitant de s'assurer que la batterie des élèves ne soit pas déjà sollicitée intensément par la digestion de leur déjeuner.

Le routage, ou l'art de trouver le meilleur chemin

Nous avons introduit le modèle OSI et les différentes couches qui le composent. Chaque couche est chargée d'une tâche différente, et contribue au bon fonctionnement de la communication entre un équipement exécutant une suite de protocoles et le réseau auquel il participe. Spécifiquement, la couche réseau est chargée de l'adressage, du routage et du relaiage des données. Le processus de routage dans un réseau informatique consiste à déterminer quel est le meilleur chemin pour faire transiter des données depuis une source jusqu'à une ou plusieurs destinations. C'est un mécanisme qui n'est pas cantonné uniquement aux réseaux informatiques, car il permet également par exemple de trouver le chemin le plus rapide dans un réseau de transport. Dans un réseau de transport, pour déterminer par exemple un itinéraire routier, la route que l'on considère comme la "meilleure" dépend des priorités attribuées aux

Les 12 façons de lever la main pour répondre (ou non) à une question & leurs traductions



Note: Étude réalisée d'après 4 ans d'observation sur le terrain dans tous les niveaux de l'école élémentaire. Néanmoins en compte que les élèves ayant entendu qu'une question avant d'être posée, soit un pourcentage variant entre 10 et 90 % d'une population de classe moyenne.

FIGURE 1.4 – Lever la main en classe permet (entre autres) de demander à prendre la parole[7].

[7] : MieuxEnseigner, Les douze façons de lever la main en cours. <https://www.mieuxenseigner.com/lemagazine/les-douze-facons-de-lever-la-main-en-cours/>. Accessible au 02-07-2021.

différents attributs de la route. Est-ce que la meilleure route sera la plus rapide? Ou celle qui coûte le moins cher, en évitant les péages? De la même façon, dans un réseau informatique, ce qu'on considère comme la "meilleure" route dépend des différentes métriques et de leur importance relative : cherchons-nous la route offrant le débit le plus important, ou le délai minimum, le coût énergétique minimal, etc.

Pour effectuer le routage dans un réseau informatique, il est nécessaire que les nœuds communiquent entre eux pour partager des informations sur les routes qui leur sont disponibles afin d'en sélectionner la meilleure. À cette fin, il est nécessaire que les nœuds communiquant ensemble suivent un ensemble de directives bien établies : quelles informations envoyer, à quelle fréquence, à quelle destination, etc. C'est cet ensemble de règles que l'on appelle un protocole de routage. Un protocole de routage régit le partage des informations des nœuds, mais aussi le mécanisme de relayage des données et de sélection des routes. Il existe de nombreux protocoles de routage distincts, basés sur des principes variés et destinés à des types de réseau informatique différents. Nous détaillerons les familles et principes des protocoles de routage dans le chapitre 3.

À chaque utilisation, sa technologie

Dans cette thèse, nous appelons technologie, ou en anglais "Radio Access Technology" (RAT) [8], une ou l'ensemble de plusieurs des couches matérielles formant une norme pour les réseaux informatiques. Les technologies de communication, sont par définition dépendantes du support de communication utilisé, et se doivent ainsi de prendre en conséquence les spécificités de ce dernier. Le support de communication sans fil est l'air, qui est partagé par tous les nœuds d'un même secteur, là où les technologies filaires profitent de communication isolées dans des câbles indépendants. En conséquence, les technologies sans fil présentent d'importantes différences avec les technologies filaires.

De nos jours, de nombreuses technologies de communication sans fil sont utilisées couramment, et de façon interchangeable en fonction des besoins et des situations. Pour l'exemple, la majorité des smartphones actuels disposent de trois technologies sans fil : le Wi-Fi, le Bluetooth, et une technologie de téléphonie mobile telle que la 4G. Les normes spécifiées par le groupe de travail IEEE 802.11 [9] définissent l'ensemble des protocoles qu'on appelle le Wi-Fi [10]. Depuis la première version de la norme en 1997, de nombreux amendements sont venus compléter et raffiner le fonctionnement de cette technologie, qui permet aujourd'hui d'obtenir des débits très importants, sur une portée de plusieurs dizaines de mètres. Nous utilisons généralement le Wi-Fi pour nous connecter à notre réseau domestique ou professionnel, réseaux qui permettent généralement d'interconnecter également les ordinateurs personnels et les imprimantes par exemple. Le Bluetooth [11] est une autre technologie, basée sur l'utilisation de la même bande de fréquence que le Wi-Fi, mais offrant généralement un débit et une portée inférieure à celle du Wi-Fi, en fonction des versions et du module radio considéré. Cela lui permet de maintenir une consommation énergétique amoindrie, et on l'utilise généralement pour connecter des appareils plus limités, tels qu'un casque audio, un clavier ou une souris. La norme LTE-Advanced du 3GPP [12] est celle des réseaux de téléphonie mobile de quatrième

[8]: Wikipédia, *Radio access technology*. https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_access_technology. Accessible au 02-07-2021.

[9]: « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. » In : *IEEE Std 802.11* (2020)

[10]: Wikipédia, *Wi-Fi*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>. Accessible au 02-07-2021.

[11]: Wikipédia, *Bluetooth*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>. Accessible au 02-07-2021.

[12]: *3rd Generation Partnership Project*. <https://www.3gpp.org/>. Accessible au 02-07-2021.

génération, qu'on désigne ainsi par l'acronyme 4G [13]. La 4G ne permet pas seulement de transmettre des appels audio en utilisant la voix sur IP, mais aussi d'accéder au réseau Internet, donnant ainsi accès à toutes les possibilités numériques d'un ordinateur classique depuis un terminal facile à transporter. La 4G offre des débits bien plus conséquents que les normes précédentes du 3GPP, mais consomme une quantité d'énergie généralement supérieure à celle utilisée par le Wi-Fi.

On voit ici qu'à l'échelle d'un smartphone, déjà différentes technologies de communication sont utilisées pour différents cas d'utilisation, en fonction des besoins et des situations. De la même façon que réseaux filaires et réseaux sans fil ne font pas face aux mêmes contraintes, tous les types de réseaux sans fil ne sont pas égaux. Face à une contrainte énergétique très forte, et pour des nœuds transmettant un volume de donnée réduit, d'autres technologies de communication sans fil ont été conçues. Nous pouvons citer pour l'exemple la norme IEEE 802.15.4 [14] et son implémentation la plus connue qui est Zigbee [15], adaptée à l'utilisation dans des réseaux de capteurs sans fil.

1.3 Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux sans fil se distinguent des réseaux filaires par l'utilisation d'une technologie de communication basée sur des ondes radio pour échanger des informations. Il existe de nombreux types de réseaux sans fil, qu'on peut classer selon différents critères. Par exemple, un réseau personnel sans fil, de l'anglais "Wireless Personal Area Network" (WPAN) [16] est un réseau connectant différents équipements personnels, tels qu'une montre intelligente, des écouteurs sans fil et une tablette. Autre exemple, quelque peu différent, ce qu'on appelle un "Body Area Network" (BAN) [17] est un réseau sans fil interconnectant des équipements portés par une personne, généralement à une fin médicale, tel qu'un électrocardiogramme ou un capteur de glycémie. Ce genre de réseau fonctionne sur une portée très réduite, et possède des spécificités comme l'utilisation du corps humain pour support des transmissions sans fil. Ces réseaux possèdent donc des contraintes qui leur sont propres, comme l'absorption et l'atténuation des ondes électromagnétiques dues à leur traversée du corps humain.

Des capteurs partout pour tout mesurer, oui...

L'idée d'un BAN est d'interconnecter des capteurs miniatures capables de collecter et partager des informations de façon autonome. Si l'on met de côté la surveillance des métriques du corps humain, et en considérant un cas plus général, c'est ce que l'on appelle un réseau de capteurs sans fil [18], de l'anglais "Wireless Sensor Network" (WSN). Il existe autant de matériels différents, de technologies différentes, qu'il existe d'applications pour les réseaux de capteurs sans fil. Comme souvent, les premiers réseaux de capteurs sans fil étaient destinés à une application militaire. Il est ainsi possible d'utiliser ce genre de réseau pour surveiller à distance une zone à risque, par exemple en utilisant des capteurs de mouvements. On peut aussi interconnecter les différents systèmes d'un char d'assaut dans le but de centraliser toutes les informations critiques. On remarque

[13]: Wikipédia, 4G. <https://fr.wikipedia.org/wiki/4G>. Accessible au 02-07-2021.

[14]: « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks ». In : *IEEE Std 802.15.4* (2020)

[15]: Connectivity Standards Alliance, Zigbee. <https://zigbeealliance.org/fr/solution/zigbee/>. Accessible au 02-07-2021.

[16]: Wikipédia, Wireless Personal Area Network. https://fr.wikipedia.org/wiki/Wireless_Personal_Area_Network. Accessible au 02-07-2021.

[17]: Nazim AGOULMINE. *Techniques de l'ingénieur, Body Area Networks : les réseaux à la conquête du corps humain*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/body-area-networks-les-reseaux-a-la-conquete-du-corps-humain-11039/>. Accessible au 02-07-2021.

[18]: Wikipédia, Réseau de capteurs sans fil. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil. Accessible au 02-07-2021.



FIGURE 1.5 – Grand murin (*Myotis myotis*) équipé d'un nœud de réseau de capteurs sans fil [19].

[19]: Falko DRESSLER, Simon RIPPERGER, Martin HIEROLD, Thorsten NOWAK, Christopher EIBEL, Bjorn CASSENS, Frieder MAYER, Klaus MEYER-WEGENER et Alexander KOLPIN. « From radio telemetry to ultra-low-power sensor networks : tracking bats in the wild ». In : *IEEE Communications Magazine* 54.1 (2016)

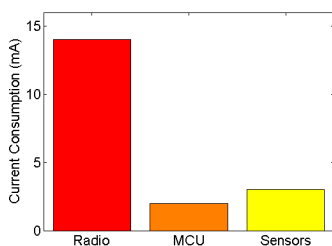


FIGURE 1.6 – Consommation énergétique d'un module radio CC2500 couplé à un microcontrôleur MSP430 et des capteurs classiques [20].

[20]: Abdelmalik BACHIR, Mischa DOHLER, Thomas WATTEYNE et Kin K. LEUNG. « MAC Essentials for Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 12.2 (2010)

également de plus en plus d'applications civiles, par exemple dans un but de conservation du patrimoine culturel, par la surveillance de bâtiments historiques. Beaucoup d'applications sont également à but environnemental, avec des réseaux permettant de surveiller diverses métriques, par exemple pour relever la qualité de l'air, détecter rapidement un incendie, ou offrir une aide aux agriculteurs comme nous le verrons plus en détail dans la section 1.4.

...mais beaucoup de contraintes et de limitations à prendre en compte!

Énormément de différents types de réseaux de capteurs existent, pour énormément d'applications différentes. Chaque application apporte son lot de contraintes, et il faut systématiquement tenir compte des limites plus ou moins strictes des capacités du matériel utilisé, matériel généralement fortement dépendant de l'application elle-même. Pour l'exemple, les auteurs de [19] cherchent à étudier le comportement des grands murins ; ces animaux pesant en moyenne 20g, ils ne peuvent pas être équipés d'un nœud pesant plus de 2g, au risque de fausser les résultats, ce qui limite très fortement les capacités des nœuds pouvant être utilisés.

Si de nombreuses contraintes des réseaux de capteurs sans fil sont exclusives à certains cas d'application spécifiques, il est aisé de dégager une liste des contraintes générales les plus fréquentes, que nous allons introduire ici. Tout d'abord, les nœuds doivent souvent être fonctionnels malgré une infrastructure environnante limitée voir inexistante, ce qui implique qu'ils doivent être capable de s'organiser de façon autonome pour partager leurs données. La taille et le poids des nœuds doivent bien souvent respecter une limite haute, tout particulièrement pour l'étude de la faune, dans le but de générer un encombrement minimal. Ces limites de taille et de poids, associées à une contrainte financière, restreignent très fortement les capacités des nœuds en termes de puissance de calcul et d'espace de stockage, ce qui entraîne la nécessité de concevoir des méthodes mathématiques et outils algorithmiques adaptés, générant une complexité calculatoire faible et un encombrement mémoire minimal. Enfin, dernier élément, mais non des moindres, la contrainte principale, et bien souvent la plus forte dans un réseau de capteurs sans fil, est le fait de ne disposer que d'une quantité d'énergie finie. Les nœuds, pour des raisons évidentes de flexibilité, tirent généralement leur alimentation électrique d'une batterie. La capacité limitée d'une batterie, mais aussi les limites de taille et de poids des nœuds, fait de l'énergie la ressource centrale dans ce type de réseau, la longévité de ce dernier étant directement dépendante de l'efficacité de la gestion énergétique.

Parallèlement, il est aujourd'hui bien établi que, sauf dans des cas particuliers, la principale dépense énergétique des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil découle de l'utilisation du module de communication radio [20]. En conséquence, pour l'amélioration des réseaux de capteurs sans fil, c'est une priorité que d'optimiser le schéma de communication sans fil, et de minimiser les dépenses énergétiques qui y sont liées. Les technologies sans fil "classiques", telles que le Wi-Fi, cherchent en général plus à optimiser la stabilité et le débit du réseau que sa consommation énergétique. Ces dernières années ont donc vu la réalisation de nombreux travaux visant à réduire la consommation énergétique, résultant en

l'émergence de nouvelles technologies de communication sans fil et de nouveaux paradigmes de transmission adaptés pour les réseaux de capteurs sans fil, notamment vis-à-vis des protocoles de routage.

1.4 Agriculture connectée : cas d'utilisation et motivation

Comme introduit précédemment dans la section 1.3, les réseaux de capteurs sans fil sont un outil utile pour de nombreuses applications. Dans des cas d'utilisation divers et variés, ils permettent de mesurer et collecter différents types d'informations, et ce, de façon automatisée. Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement à l'agriculture connectée, ou agriculture intelligente, de l'anglais "smart agriculture". La finalité de l'agriculture connectée est de mettre à disposition des agriculteurs des outils numériques pour les assister dans leurs tâches quotidiennes.

Des capteurs dans les champs, pour quoi faire ?

Il y a de cela quelques décennies, l'avènement de la révolution industrielle offrit aux agriculteurs des outils mécaniques, dans le but d'automatiser des tâches répétitives et éreintantes. Ceci permit entre autres de couvrir des exploitations plus larges, et ainsi d'augmenter le rendement total des cultures. De nos jours, la révolution numérique leur offre des outils de prévision et de décision. En particulier, les réseaux de capteurs sans fil permettent par exemple la surveillance étroite des variations météorologiques. Grâce à la collecte automatique de ces données, il est possible de mieux prévenir les maladies et les risques touchant les cultures. L'outil numérique, s'il ne permet pas de modifier la météo, permet de mieux la prévoir et de s'adapter à ses conséquences, en protégeant les cultures de façon préventive d'un orage de grêle ou d'une intempérie glaciale, et en adaptant l'arrosage et l'épandage de produits phytosanitaires. En effet, lorsque les conditions météorologiques sont idylliques pour les cultures, elles le sont bien souvent également pour les espèces nuisibles à ces dernières. Surveiller étroitement la météo permet ainsi de prévenir une invasion soudaine de nuisibles.

Une des façons d'accroître la fiabilité et la pertinence de la modélisation météorologique est de se baser sur des données plus précises, plus locales, d'une "granularité" supérieure. Pour collecter ces données, il est nécessaire de réaliser des mesures directement sur le terrain, mais pour des raisons évidentes, il n'est pas envisageable de réaliser ces mesures régulières manuellement. C'est là qu'entrent en scène les réseaux de capteurs sans fil, composés de capteurs autonomes en énergie et en décision permettant d'obtenir des mesures très précises au prix d'un effort virtuellement nul, une fois le réseau déployé et fonctionnel.

D'accord, mais est-ce que ça marche vraiment ?

Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons collaboré avec l'entreprise Sencrop [21], spécialiste de l'agriculture connectée. Sencrop

[21]: Sencrop. <https://sencrop.com/fr/>.
Accessible au 02-07-2021.

Pluviomètre connecté



- ✓ Pluie
- ✓ Températures
- ✓ Humidité
- ✓ Point de rosée

Anémomètre connecté



- ✓ Vitesse du vent et rafales
- ✓ Direction du vent

Capteur d'humectation



- ✓ Taux d'humectation
- ✓ Point de rosée
- ✓ Températures

FIGURE 1.7 – Comparatif de trois stations météo Sencrop. <https://sencrop.com/fr/>. Accessible au 02-07-2021.

conçoit et vend des outils numériques destinés aux agriculteurs. Ces outils prennent la forme de stations connectées, qui sont équipées de capteurs variés rendant ainsi capable la surveillance constante et à distance de diverses métriques liées à la météorologie. Il est ainsi possible de mesurer la quantité de précipitation, la force du vent, l'humectation des cultures, etc. Les données collectées sont ensuite partagées via Internet, grâce à l'utilisation d'une technologie de communication sans fil appelée Sigfox. Très rapidement, Sigfox est une technologie offrant une très basse consommation énergétique et une importante portée de communication, au prix d'un débit très faible. Sigfox est aussi le nom de l'opérateur déployant le réseau d'accès permettant l'utilisation de cette technologie. Les antennes, ou stations de base, écoutent en permanence les communications Sigfox environnantes et relayent ces dernières via une connexion filaire. La topologie d'un réseau Sigfox est donc ce que l'on appelle un réseau en étoile, dans lequel les nœuds communiquent tous avec un équipement central, ici une station de base. Plus de détails sur Sigfox seront donnés dans le chapitre 2.

1.5 Problématique(s) et limitation(s)

Comme nous l'avons expliqué dans la section 1.3, un réseau de capteurs, en soit, doit déjà faire face à de nombreuses problématiques et limitations. En plus de ça, les spécificités qui découlent d'une utilisation d'un réseau de capteurs pour l'agriculture connectée sont loin de simplifier le tout.

Batterie faible : merci de brancher votre capteur...

Pour commencer, la problématique la plus importante dans les réseaux de capteurs sans fil est probablement la gestion énergétique. Les nœuds fonctionnant sur batterie, ils doivent optimiser leur fonctionnement et chercher à minimiser leurs communications pour étendre au maximum leur durée de vie. Ceci est valable pour tous les réseaux de capteurs sans fil sur batterie. Cependant, dans le cas de l'agriculture connectée,

et de toutes les utilisations en extérieur, il faut aussi prendre en compte les variations météorologiques. En effet, la batterie, souvent une pile au lithium, ne présente généralement un fonctionnement optimal que dans une plage de température bien définie. S'il fait trop chaud, ou trop froid, la batterie pourrait se vider plus rapidement, ou à l'inverse être incapable de fournir la tension minimale requise pour alimenter le capteur. Un réseau de capteurs sans fil pour l'agriculture connectée doit rester fonctionnel même pendant les hivers les plus rudes, puisque c'est même dans ces conditions difficiles qu'il se révèle le plus utile pour faire face à la météo instable. Pour cela, il est essentiel de sélectionner soigneusement le type des batteries utilisées, et d'étudier les solutions d'isolation thermique et d'étanchéisation de la source d'énergie des capteurs.

De nombreux travaux scientifiques cherchent à perfectionner les systèmes de récolte d'énergie, qu'elle soit solaire, thermique, cinétique, etc. La solution évidente pour palier une pénurie énergétique pourrait sembler être de coupler un système de stockage d'énergie avec un système de récolte d'énergie, tel qu'un panneau solaire. Cependant, cela représente non seulement un coût économique supplémentaire non-négligeable pour la conception des capteurs, mais dans le cas de l'agriculture connectée, cela rend également le fonctionnement des capteurs directement dépendant des conditions environnementales qu'ils sont justement censés surveiller.

La portée de communication et le maïs

Pour des raisons évidentes, la communication sans-fil est indispensable pour l'agriculture connectée. En effet, on ne peut raisonnablement pas tirer des câbles en plein milieu de terres agricoles circulées par des tracteurs et autres moissonneuses-batteuses. Ainsi, les ondes radioélectriques sont aujourd'hui notre meilleur support pour transmettre de l'information de façon fiable et rapide. Les capacités de communication varient cependant beaucoup en fonction des technologies sans fil considérées, comme nous l'avons expliqué dans la section 1.2. Par exemple, les technologies Wi-Fi et Bluetooth sont très adaptées pour un réseau domestique, mais leur utilisation dans un champ de plusieurs hectares se révèle hasardeuse, en raison d'une portée limitée. Qui n'a jamais vu la qualité de son wifi dégringoler rien qu'en passant d'un étage à un autre ?

Non seulement l'envergure d'un champ agricole est généralement bien supérieur à celle d'une résidence, mais en plus, il faut composer avec des obstacles changeants : si le déploiement d'un réseau de capteurs est fonctionnel à la période des semis, il n'est pas à exclure que des cultures de maïs au meilleur de leur forme puissent faire complètement barrage aux communications sans fil.

Le cas Sigfox

Pour différents besoins, il existe différentes technologies. Si l'on veut augmenter la portée des ondes, il est possible par exemple d'abaisser leur fréquence : c'est ce que propose entre autres la technologie Sigfox, utilisée par Sencrop dans leurs stations météo. La réduction de la fréquence

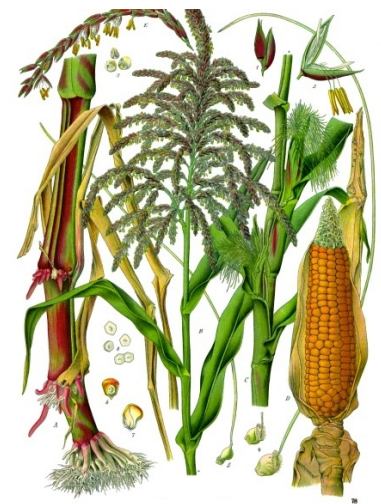


FIGURE 1.8 – Le maïs (*Zea mays*) est une plante d'une taille généralement comprise entre 1 et 3 mètres, mais pouvant mesurer jusqu'à 6 mètres [22]!

[22] Wikipédia, *Zea mays*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>. Accessible au 02-07-2021.

impose toutefois un ralentissement du débit considérable. Sigfox étant aussi bien une technologie de communication qu'un réseau d'opérateur, il est nécessaire d'être à portée de communication d'au moins une station de base Sigfox. Cependant, comme on peut le voir sur la carte de déploiement du réseau Sigfox, chapitre 2, figure 2.5, les stations de base ne sont pas uniformément réparties et déployées dans la totalité des pays du globe. En conséquence, des capteurs se basant sur la technologie Sigfox, comme ceux de Sencrop, ne peuvent pas être déployés dans un pays ou une zone non couverte par le réseau Sigfox.

Dur dur, de choisir une technologie !

Ce problème spécifique illustre par l'exemple une problématique plus globale : le déploiement d'un réseau de capteurs est fortement contraint par les performances qu'offre la technologie de communication sur laquelle le réseau se base. Ceci est vrai en terme de couverture, comme nous le voyons ici avec Sigfox, mais en termes de portée, débit, fréquence, etc. Une portée de communication trop courte limitera la zone qu'il est possible de couvrir, un débit trop faible empêchera de transférer des volumes de données importants, l'utilisation d'une bande de fréquence ne sera pas forcément soumise aux mêmes régulations en fonction de la position géographique... Le corollaire de ces contraintes, est qu'à l'inverse, il est nécessaire de soigneusement étudier le cas d'utilisation qui est visé par un réseau de capteurs sans fil afin de choisir la technologie de communication qui sera utilisée. Ce choix doit se faire en fonction des caractéristiques de l'environnement de déploiement, tel que la couverture réseau disponible, la taille de la zone à couvrir, la végétation, etc. Il est tout aussi important de prendre en compte les besoins de communications des nœuds, comme la taille et la fréquence des données transmises.

La multiplicité des facteurs à prendre en compte, couplé à la longue liste des imprévus, tels que les variations météorologiques soudaines, ou une panne de l'opérateur réseau, rendent le choix de la technologie de communication particulièrement complexe. À l'inverse, l'ultra spécialisation de certaines technologies de communication pour palier les besoins de cas d'utilisations bien définis, fait qu'après conception et déploiement des nœuds, le réseau est extrêmement spécialisé, rigide, et il est difficile, voir impossible, d'apporter des modifications au type des données transportées. Par exemple, si l'on considère les capteurs de Sencrop utilisant Sigfox, impossible de transmettre des données de volume important, comme un flux vidéo, à cause des lourdes limitations de débit et de fréquence des messages imposées par Sigfox. Il serait également bien pratique de pouvoir mettre à jour le micrologiciel des stations à distance, sans avoir besoin d'un accès physique à chacune, pour corriger facilement le fonctionnement du système. Malheureusement, pour cela, il est indispensable de repenser la conception des nœuds depuis le début, et choisissant une technologie de communication différente, ce qui imposera probablement de nouvelles limitations, comme probablement une consommation énergétique des capteurs plus élevée et ainsi une durée de vie réduite. Voici donc tout l'enjeu du choix de la technologie de communication : quels sont les compromis acceptables en fonction du cas d'utilisation ? Un faible débit, une courte portée de communication, un délai important, une couverture limitée... ?

1.6 Solution explorée : les réseaux multitechnologies

Un simple canif fera bien souvent un meilleur couteau qu'un outil multifonction, disposant d'une lame étrangement située entre un tournevis et un coupe-ongles. Toutefois, dans une situation nécessitant flexibilité et adaptabilité, l'outil multifonction sera, généralement, beaucoup plus polyvalent. De même, dans un environnement stable, pour un cas d'utilisation précis et bien défini, une unique technologie bien choisie sera, généralement, plus adaptée. Mais dans le cas de l'agriculture connectée, où l'on doit composer avec le hasard, où terrain et environnement peuvent changer rapidement et du tout au tout, la possibilité de disposer d'un "outil multifonction technologique", et ainsi de pouvoir changer de technologie de communication en fonction des besoins, serait un atout inestimable.

L'union fait la force !

Cet avantage permettrait de surmonter de nombreuses limitations. Tout d'abord, vis-à-vis de la couverture technologique, un nœud serait capable de choisir une des technologies parmi l'ensemble de celles disponibles dans sa zone. En effet, si des technologies comme Sigfox ou les réseaux cellulaires sont aisément accessibles dans la majorité des pays occidentaux, il n'en est pas forcément de même partout sur notre planète, ce qui limite grandement le déploiement de l'agriculture connectée, là où elle pourrait être la plus utile pour aider les populations défavorisées. De plus, il existe toujours des zones blanches, couvertes par aucune technologie et n'offrant donc pas de possibilité d'accès à un réseau externe. Ainsi, un nœud pourrait se retrouver dans l'impossibilité de communiquer avec sa station de base, car situé trop loin de tout réseau externe, et générerait donc un taux de pertes important. Avec plusieurs technologies à sa disposition, un nœud pourrait relayer ses données à un nœud voisin intermédiaire, qui serait à la fois plus proche de lui et d'une station de base, tout cela en utilisant potentiellement une technologie de communication offrant un moindre coût énergétique. C'est ce que l'on appelle un réseau multisaut, et c'est un sujet particulièrement bien étudié, mais principalement lorsque tous les capteurs au sein d'un même réseau utilisent une même technologie de communication.

Si ça ne marche plus... alors on change !

Les capteurs seraient également bien plus équipés pour faire face aux imprévus. Une erreur de câblage, ou une mauvaise manipulation peuvent facilement mettre le réseau d'un opérateur hors d'usage. En cas d'une telle panne, il suffirait de se rabattre temporairement sur l'utilisation d'une autre technologie, en attendant que la situation revienne à la normale. De la même façon, une météo diluvienne, ou la croissance rapide des cultures, peuvent faire obstacle à la propagation des ondes et impacter lourdement la qualité des communications. Dans une telle situation, il serait là encore possible de changer de technologie, soit pour communiquer directement avec une station de base différente, soit pour

organiser des routes multisauts avec les nœuds voisins pour relayer les données. En conséquence, la stabilité du réseau et la continuité de service en seraient grandement améliorées.

Travailler la souplesse, c'est important

Finalement, cela permettrait également d'accroître substantiellement la flexibilité des nœuds. Si l'on veut, par la suite, par exemple pouvoir mettre à jour le micrologiciel des nœuds, il est nécessaire d'être capable de transmettre un volume plus important de données. Avec plusieurs technologies à disposition, il serait possible de sélectionner une technologie offrant un débit plus élevé, le temps de transmettre ou de réceptionner les données, puis de repasser ensuite sur une technologie basse consommation. Si un orage de grêle menace de ravager les cultures les plus fragiles, il serait possible d'utiliser une technologie avec un délai court et sans limitations sur le nombre de messages pour avertir les agriculteurs au plus vite. D'une façon générale, avoir plusieurs technologies disponibles permettrait à un seul et même nœud d'être capable de communiquer différents types de données, qui peuvent requérir différents besoins de communication. Il serait ainsi donc possible, dans un même réseau de capteurs sans fil, de faire cohabiter plusieurs nœuds remplissant différentes fonctions, pour différents cas d'utilisation, comme la surveillance de température avec une surveillance vidéo.

Oui, mais c'est compliqué...

Pour résumer, l'idée fondatrice que nous nous sommes proposé d'étudier dans ces travaux est la suivante : si l'utilisation d'une unique technologie de communication dans un réseau de capteurs sans fil impose des restrictions aussi lourdes, ne serait-il pas envisageable de concevoir des nœuds disposant de plusieurs technologies, et capables d'en choisir une de façon dynamique en fonction de l'environnement et des besoins de communication relatifs au type des données communiquées ? Dans la suite de ce document, nous appelons des réseaux de capteurs sans fil composés de nœuds disposant de plusieurs technologies de communication des "réseaux multitechnologies".

Si les avantages des réseaux multitechnologies par rapport aux réseaux de capteurs sans fil classiques sont nombreux, il est important de nuancer le tableau global. Le principal prix de l'utilisation de nœuds multitechnologies est l'accroissement de la complexité globale du système. En effet, les nœuds doivent non seulement être autonomes énergiquement, mais aussi dans leurs décisions. Ils doivent ainsi être capables de décider par eux-mêmes quelle technologie est la plus adaptée, en fonction de leurs besoins et de leur environnement. Le multisaut étend artificiellement la couverture réseau, mais multiplie le nombre de routes que la donnée peut emprunter. Les protocoles de routage classiques ne sont pas ou peu adaptés aux réseaux multitechnologies, partants du principe qu'il n'existe qu'une unique interface de communication, et bien souvent qu'une seule métrique à optimiser. Dans ce cas, la sélection de la route est triviale, car un nœud sélectionne généralement la route la plus courte. À l'inverse, dans un réseau multitechnologie, chaque capteur peut disposer de plusieurs technologies en commun avec chacun de ces voisins. De

plus, chaque capteur peut vouloir partager différents types de données, comme des données vidéo ou des données urgentes. La sélection de la route doit donc se faire en fonction des nombreux liens disponibles avec les capteurs voisins, mais aussi du type des données transportées, afin d'en respecter les besoins associés, en termes de délai, débit, etc.

L'augmentation des possibilités technologiques d'un nœud peut permettre une économie d'énergie substantielle, par exemple en permettant d'utiliser des routes et des technologies moins consommatrices en énergie lorsqu'un nœud en a la possibilité. Néanmoins, il ne faut pas négliger le fait qu'une mauvaise gestion de la multiplicité technologique risque à l'inverse d'augmenter la consommation énergétique de façon importante. Utiliser toutes les interfaces réseau disponibles de façon parallèle et simultanée saperait rapidement l'autonomie énergétique des nœuds. Il est donc important de concevoir une solution capable d'utiliser les technologies de façon parcimonieuse, de sorte à ne pas impacter négativement la durée de vie du réseau.

1.7 Organisation et contenu du document

Cette thèse compile les travaux que nous avons réalisés sur le sujet des réseaux multitechnologies au cours des trois dernières années. Elle est découpée en sept chapitres distincts, dont les suivants sont organisés de la façon suivante.

La quête du Graal sans fil

Nous avons succinctement introduit les technologies de communication sans fil dans la section 1.2. Si de nos jours, les communications radio sont omniprésentes, de notre TV à notre smartphone, en passant par notre voiture, elles ne sont pour autant pas omnipotentes, et font face à certaines limitations en fonction des paramètres choisis et des cas d'utilisation. Ainsi, de nombreuses technologies différentes ont fait leur entrée sur le marché ces dernières années, chacune offrant différentes performances et offrant de palier les limitations des autres technologies. Tout particulièrement, les technologies longue portée bénéficient d'une attention particulière de la part des scientifiques et des industriels, ces dernières permettant de couvrir une grande surface tout en simplifiant la structure du réseau. Elles sont donc très intéressantes pour une utilisation de type agriculture connectée, car les exploitations agricoles peuvent facilement couvrir plusieurs hectares. Il nous paraît donc pertinent de nous pencher sur l'état de l'art et du marché des technologies de communication sans fil longue portée, que nous dressons donc dans le chapitre 2. Nous y détaillerons les principales technologies longue portée disponibles aujourd'hui et leurs caractéristiques. Nous verrons notamment que, de la même façon que pour les technologies sans fil classiques, chacune dispose de forces et de faiblesses bien définies, et qu'en conséquence aucune ne peut être considérée objectivement supérieure aux autres, et qu'il n'existe donc pas de technologie longue portée miracle pouvant palier toutes les limitations et contraintes des réseaux de capteurs sans fil pour l'agriculture connectée.

Trouver sa route dans la forêt des technologies

En partant de ce constat, nous proposons donc de concevoir ce que nous appelons des réseaux multitechnologies. Selon nous, la pierre angulaire d'un réseau multitechnologie est son protocole de routage. C'est lui qui déterminera quelle route, et donc indirectement quelle technologie de communication sera utilisée pour atteindre telle ou telle destination. Contrairement aux protocoles standards, il doit prendre en compte la multiplicité technologique des nœuds, mais aussi leur multiplicité en besoins de communication, et donc chercher à optimiser plusieurs critères à la fois en fonction du type des données considérées. Ainsi, dans le chapitre 3 nous présentons RODENT, de l'anglais "Routing Over Different Existing Network Technologies", notre proposition de protocole de routage conçu pour les réseaux multitechnologies. Plus précisément, dans ce chapitre, nous introduirons dans un premier temps le modèle et les hypothèses réseau sur lesquels nous avons basé RODENT, puis ses opérations de routage. L'originalité de RODENT est de rendre possible le routage en utilisant plusieurs technologies de communication le long d'une même route. Dans cette optique, le processus de sélection des routes prend en compte les performances et coûts de chacune des routes disponibles, ceci en faisant abstraction des technologies utilisées. Le corpus des travaux sur l'aide à la décision multicritère regorgeant d'outils pertinents, nous avons adapté pour cela une méthode de sélection multicritère bien connue qui fera l'objet du chapitre suivant.

Miroir mon beau miroir, dis-moi quelle est la plus adaptée ?

Les méthodes de décision multiattributs, de l'anglais "Multiple Attribute Decision-Making methods", permettent d'établir un classement de différentes alternatives en prenant en compte plusieurs attributs à la fois. Parmi celles-ci, la méthode "Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution" (TOPSIS) permet de comparer les alternatives en se basant non seulement sur la ressemblance de chacune avec une meilleure alternative possible, mais aussi sur la dissemblance de chacune avec la pire possible. Cette dernière offrant un outil de sélection multicritère de qualité, nous avons choisi d'utiliser la méthode TOPSIS pour effectuer le processus de sélection de route dans notre protocole RODENT. Il est ainsi possible de chercher à optimiser autant de critères qu'on le souhaite lors du processus de sélection des routes. Néanmoins, la méthode TOPSIS est imparfaite, et possède ses propres limitations. En particulier, sa complexité calculatoire et le problème des inversions de rang risquent d'être des freins à son utilisation sur du matériel dédié au réseau de capteurs sans fil. Pour palier ces défauts, nous avons apporté des modifications à la méthode TOPSIS que nous détaillerons dans le chapitre 4. Ces améliorations nous permettent non seulement d'écourter le temps nécessaire à l'exécution de la méthode, mais également de faire disparaître le problème des inversions de rang. Pour mettre en évidence les gains calculatoires de notre méthode améliorée, nous présenterons une évaluation de différence de complexité entre notre méthode et la méthode TOPSIS classique.

Concevoir, tester, améliorer... et recommencer!

Les deux chapitres précédents détaillent nos propositions sur le plan théorique. Pour mettre clairement en évidence la pertinence et la faisabilité de notre approche, nous avons implémenté ces propositions sur des modules FiPy de Pycom. Ces nœuds ont la particularité de posséder plusieurs technologies de communication sans fil différentes, nous permettant ainsi de prouver la faisabilité de notre démarche en concevant un prototype de réseau multitechnologie. Nous présentons le matériel et la production logicielle utilisés pour nos expériences dans le chapitre 5. Nous y détaillons la configuration des expériences, ainsi que le scénario que nous avons cherché à reproduire, puis les résultats des expériences. De façon générale, les résultats expérimentaux montrent un accroissement de la flexibilité du réseau ainsi qu'une adaptabilité automatique de la technologie de communication, ce qui permet d'améliorer l'autonomie énergétique des nœuds.

Boule de cristal mathématique

RODENT assure le routage de façon efficace dans les réseaux multitechnologies, mais ne permet cependant pas de résoudre certaines problématiques propres aux réseaux multisauts. Spécifiquement, puisque les communications se font depuis les nœuds vers les stations de base, les nœuds proches de ces dernières ont tendance à relayer une quantité plus importante de trafic que les nœuds éloignés. La convergence des communications à travers un sous-ensemble réduit de nœuds et de routes distribue donc la charge de travail dans le réseau d'une façon inégale. Ceci est un phénomène connu sous le nom d'effet entonnoir, de l'anglais "funneling effect". Il introduit des iniquités de consommation énergétique et donc d'autonomie, pouvant conduire à l'épuisement énergétique précoce de certains nœuds, et ainsi la rupture des routes qu'ils assurent. Pour mitiger les conséquences délétères de cet effet, nous présentons dans le chapitre 6 une méthode de prédiction et de réduction des données. Par le calcul du coefficient de corrélation, il est possible de mettre en évidence une relation linéaire entre deux métriques mesurées. S'il y a corrélation, nous utilisons une méthode de prédiction se basant sur le ratio moyen observé dans le jeu de données pour prédire la mesure suivante. Si la prédiction est similaire à la mesure, ou présente une différence négligeable, le nœud source n'a pas besoin d'envoyer la mesure, car la même prédiction est faite par le nœud destination. De cette façon, les nœuds peuvent se permettre de ne transmettre qu'une fraction des données mesurées, réduisant ainsi la consommation énergétique causée par les communications des nœuds.

Pour terminer, le chapitre 7 apporte une conclusion générale à ce document. Nous y récapitulons nos propositions, notre production et les résultats de nos recherches. Nous y exposerons l'état général de notre solution : ses avantages, mais aussi ses limitations. Nous consacrerons également quelques paragraphes aux perspectives de recherches qu'il nous paraît intéressant de creuser plus loin, afin d'améliorer et d'étendre toujours plus les capacités et les possibilités d'utilisation des réseaux de capteurs sans fil.

1.8 Liste des publications

Journaux

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « RODENT : a flexible TOPSIS based routing protocol for multi-technology devices in wireless sensor networks ». In : *ITU Journal on Future and Evolving Technologies* 2.1 (avr. 2021)

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Long-Range Wireless Radio Technologies : A Survey ». In : *Future internet* 12.1 (jan. 2020)

Conférences internationales

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Joint Technology and Route Selection in Multi-RAT Wireless Sensor Networks with RODENT ». In : *IWCMC 2021 - 17th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*. Harbin / Virtual, China, juin 2021

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Lightweight network interface selection for reliable communications in multi-technologies wireless sensor networks ». In : *DRCN 2021 - 17th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks*. Milan, Italy, avr. 2021

Ateliers internationaux

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Routing Over Multiple Technologies with RODENT ». In : *Percom 2021 (Demo) - 19th International Conference on Pervasive Computing and Communications*. Kassel, Germany, mars 2021

Brandon FOUBERT. « Routing in Multi-Technologies Wireless Sensor Networks ». In : *EWSN 2021 (PhD Forum) - 18th International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. Delft, Netherlands, fév. 2021

Conférences nationales

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Sélection d'interface de communication dans les réseaux de capteurs multi-technologies ». In : *CoRes 2020 - 5èmes Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Evaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication*. Lyon, France, sept. 2020

Vulgarisation

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Des capteurs multitechnologies pour surveiller les champs : les épouvantails 2.0 ». In : *The Conversation* (avr. 2021)

Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « Autonomous Collaborative Wireless Weather Stations : A Helping Hand for Farmers ». In : *ERCIM News* 119 (oct. 2019)

Technologies de communication sans fil longue portée

2

2.1 Les réseaux étendus à basse consommation

Les technologies de communication sans fil, en anglais "Radio Access Technology" (RAT), sont omniprésentes dans notre quotidien. Le Wi-Fi par exemple, permet d'interconnecter de nombreux équipements numériques, et est ainsi couramment disponible dans les foyers, dans les environnements professionnels, et même dans des lieux publics, tels que les gares. Les technologies cellulaires, telles que la 4G, nous offrent une connexion en extérieur lors de nos déplacements et autres pérégrinations, avec une couverture et une stabilité telles que nous avons pu voir l'apparition de mouvances telles que le nomadisme numérique [32]. Si ces technologies sont adaptées pour et en conséquence adoptées par le grand public, des contraintes toujours plus fortes imposées par des cas d'utilisation spécifiques ont poussé à la recherche et au développement de technologies basées sur de nouveaux paradigmes de communication.

Communiquer toujours plus loin

Ainsi, ces dernières années ont vu l'apparition d'un certain nombre de nouvelles technologies sur le marché des communications sans fil. En opposition aux technologies usuelles, qu'on pourrait qualifier de technologies à "moyenne portée", les technologies à "longue portée" promettent des communications sans fil fonctionnelles sur plusieurs kilomètres de distance, et ceci au prix d'une faible consommation énergétique. Le compromis se fait généralement sur la vitesse de communication, souvent beaucoup plus faible que celle offerte par les technologies classiques. L'utilisation de ces technologies à longue portée permet la conception et le déploiement de ce que l'on appelle des réseaux étendus à basse consommation, de l'anglais "Low Power Wide Area Network" (LPWAN), et on y réfère donc couramment sous le nom de technologies LPWAN. Les LPWAN peuvent potentiellement couvrir des dizaines de kilomètres, et dans des conditions bien particulières, telles qu'une visibilité quasi-directe entre l'émetteur et le récepteur, il est possible de communiquer sur des distances exceptionnelles longues.

En effet, le record de distance de communication maximum avec la technologie LoRa (Long Range) ne cesse d'être amélioré, le dernier en date de rédaction de ce manuscrit étant de 832 km [33]! La possibilité de communiquer sur de très longues distances, et ceci à un coût énergétique moindre, est une perspective particulièrement alléchante pour interconnecter les nœuds des réseaux de capteurs sans fil ou autres objets connectés. En conséquence, les technologies LPWAN sont l'objet d'une attention académique et industrielle importante. L'agriculture connectée évolue généralement dans des environnements très larges et sur des distances importantes et les technologies LPWAN ont donc un net avantage pour ce cas d'usage. Il est donc tout naturel pour nous de nous intéresser à l'état de l'art et du marché de ces technologies.

2.1	Les réseaux étendus à basse consommation . . .	17
2.2	Présentation et informations techniques	19
2.2.1	Bandes de fréquence de la téléphonie mobile	20
2.2.2	Bandes de fréquences ISM	23
2.3	Caractériser et comparer pour mieux choisir	30
2.3.1	À propos de la consommation énergétique	30
2.3.2	Couverture, occupation des fréquences et coût monétaire	32
2.3.3	Choisir sa (ou ses) technologie(s)	35
2.4	L'utilité des réseaux multi-technologies	37

[32] Wikipédia, *Nomadisme numérique*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Nomadisme_num%C3%A9rique. Accessible au 02-07-2021.



FIGURE 2.1 – Trajet et distance parcourus par le paquet de données le plus éloigné [33].

[33]: *The Things Network, LoRa World Record Broken : 832km/517mi using 25mW*. <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>. Accessible au 02-07-2021.

Un marché florissant

Les deux pionniers dans le domaine des technologies LPWAN sont incontestablement Sigfox et LoRa, autant sur le terrain technologique que commercial. Si ces deux dernières sont autant connues qu'utilisées, au fil du temps, beaucoup d'autres technologies ont cherché à se faire une place à leurs côtés, et à tirer leur épingle du jeu. Si globalement, les principes et paradigmes de communication sont similaires, le fonctionnement interne de ces candidats varie beaucoup. Certaines technologies sont des implémentations de normes : en conséquence, elles n'offrent que de légères variations par rapport aux autres implémentations de ces mêmes normes. Certaines de ces technologies sont basées sur du matériel ou logiciel propriétaire, tandis que d'autres sont totalement ouvertes. Encore d'autres technologies utilisent les fréquences de la bande Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM) [34], tandis que certaines utilisent les bandes de fréquences de téléphonie mobile [35]. Les différences techniques sont nombreuses, et les modèles commerciaux sont tout aussi variables. Certaines technologies sont gérées par des opérateurs : le réseau est ainsi déployé et géré par une tierce partie, généralement au prix d'un abonnement mensuel. D'autres permettent aux utilisateurs de déployer leur propre réseau : ainsi pas d'abonnement, mais potentiellement un surcoût important pour déployer l'infrastructure de base du réseau.

[34]: Wikipédia, *Bande industrielle, scientifique et médicale*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Bande_industrielle_scientifique_et_m%C3%A9dicale. Accessible au 02-07-2021.

[35]: Wikipédia, *Fréquences de téléphonie mobile en France*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9quences_de_t%C3%A9l%C3%A9phonie_mobile_en_France. Accessible au 02-07-2021.

En raison de toutes ces différences, les performances théoriques de chaque technologie varient beaucoup. La portée de communication maximale, le débit maximal, le délai moyen de communication, la consommation énergétique instantanée, etc. qu'un nœud peut espérer atteindre sont dépendants de la technologie de communication sous-jacente. Sans compter que les performances réelles sont généralement encore plus variables, et varient d'un déploiement à l'autre. Des signaux différents en termes de fréquence, modulation, etc., ne se comporteront pas de façon similaire dans un même environnement. Les caractéristiques de chaque technologie les rendent donc plus performantes dans certains cas que d'autres.

Étudier et choisir

Si de nombreuses technologies sont disponibles et utilisables, certaines bénéficient d'une visibilité plus importante que d'autres. Par conséquent, il peut être parfois difficile d'obtenir des informations précises à propos des différentes caractéristiques et performances de chacune. Ce manque de visibilité peut conduire à choisir une technologie de communication sous-optimale. C'est pourquoi, nous proposons dans ce chapitre un condensé des informations que nous avons pu réunir sur les technologies existantes, une classification de chacune en fonction de leurs performances, et un guide simple qui offre des recommandations en fonction des contraintes du cas d'application considéré. Nous omettons ici volontairement de mentionner les technologies à moyenne portée, telles que Zigbee, car les technologies à longue portée offrent des avantages décisifs lorsque l'on considère les grands espaces de l'agriculture connectée.

Pour commencer, la section 2.2 présente les différentes technologies ainsi que les caractéristiques qui leur sont associées. Nous avons collecté et classifié les informations disponibles non seulement dans la littérature

scientifique [36-42], mais également provenant de plusieurs sources commerciales. En nous basant sur l'ensemble des informations techniques collectées, nous proposons une discussion vis-à-vis des forces et faiblesses de chaque technologie dans la section 2.3. Particulièrement, nous y proposons de classer et comparer les technologies en fonction des caractéristiques qui nous paraissent primordiales : couverture, portée, consommation énergétique, etc. Sur la base de ce classement, nous présentons des recommandations pour guider le choix de la technologie la plus appropriée en fonction des besoins applicatifs et des attentes. Pour finir, la section 2.4 conclut ce chapitre, et justifie l'utilité d'une solution multitechnologie.

2.2 Présentation et informations techniques

Dans cette section, nous présentons les technologies de communication sans fil longue portée disponibles en date de la rédaction de ce manuscrit. Il est commun dans la littérature de voir une classification des technologies selon le fait qu'elles présentent des aspects propriétaires ou non. Cependant, plusieurs technologies présentent des aspects hybrides, comme LoRaWAN qui est basé sur une couche physique qui est la propriété de l'entreprise Semtech et une couche liaison de données libre, LoRaWAN. Nous proposons donc à la place de regrouper les technologies en fonction des bandes de fréquence qu'elles utilisent. Ainsi, on distingue principalement deux types de bandes : les bandes de téléphonie mobile dont l'utilisation est soumise à licence et les bandes ISM sans licence.

Une histoire de spectre...

L'utilisation d'une importante partie du spectre des ondes radio est soumise à licence, pour des utilisations telles que la télévision, la téléphonie, etc. Les entreprises doivent acheter le droit d'utilisation de ces bandes de fréquences, ce qui en retour garantit que les interférences générées par une utilisation tierce soient limitées. L'utilisation des bandes de fréquences de téléphonie mobile est donc également soumise à licence, et pour celles-ci, il ne faut pas oublier qu'il est probable de devoir composer avec une certaine congestion due à la grande utilisation des téléphones mobiles, particulièrement dans un milieu urbain présentant une forte densité de population. Les technologies de communication sans fil à longue portée de la téléphonie mobile sont gérées par des opérateurs réseaux, et l'utilisateur doit donc payer un abonnement à ces derniers pour pouvoir utiliser leurs réseaux.

À l'inverse, les bandes "Industrielle, Scientifique et Médicale" (ISM) sont un ensemble assez réduit de fréquences libres d'utilisation. Tout un chacun peut émettre dans ces fréquences gratuitement, mais elles ne sont pas exemptes de règles pour autant. Les restrictions légales varient en fonction des fréquences considérées, la puissance d'émission et les pays. L'un des avantages des bandes ISM est la possibilité de librement étendre l'infrastructure du réseau. Le besoin de déployer une infrastructure de communication personnelle peut venir de plusieurs raisons : par exemple, car la zone de déploiement des nœuds ne bénéficie d'aucune couverture active d'une autre technologie de communication, ou encore pour garder

[36]: Usman RAZA, Parag KULKARNI et Mahesh SOORIYABANDARA. « Low Power Wide Area Networks : An Overview ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19.2 (2017)

[37]: Joseph FINNEGAN et Stephen BROWN. « A Comparative Survey of LPWA Networking ». In : (2018)

[38]: Qahhar Muhammad QADIR, Tarik A RASHID, Nawzad K AL-SALIHI, Birzo ISMAEL, Alexander A KIST et Zhongwei ZHANG. « Low power wide area networks : a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs ». In : *IEEE Access* 6 (2018)

[39]: Mncedisi BEMBE, Adnan ABU-MAHFOUZ, Moshe MASONTA et Tembisa NGQONDI. « A survey on low-power wide area networks for IoT applications ». In : *Telecommunication Systems* 71.2 (2019)

[40]: Rashmi Sharan SINHA, Yiqiao WEI et Seung-Hoon HWANG. « A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT ». In : *ICT Express* 3.1 (2017)

[41]: Augustine IKPEHAL, Bamidele ADEBISI, Khaled M. RABIE, Kelvin ANOH, Ruth E. ANDE, Mohammad HAMMOUDEH, Haris GACANIN et Uche M. MBANASO. « Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things : A Comparative Review ». In : *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019)

[42]: Noushin POURSAFAR, Md Eshrat E ALAHI et Subhas MUKHOPADHYAY. « Long-range wireless technologies for IoT applications : A review ». In : *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*. 2017

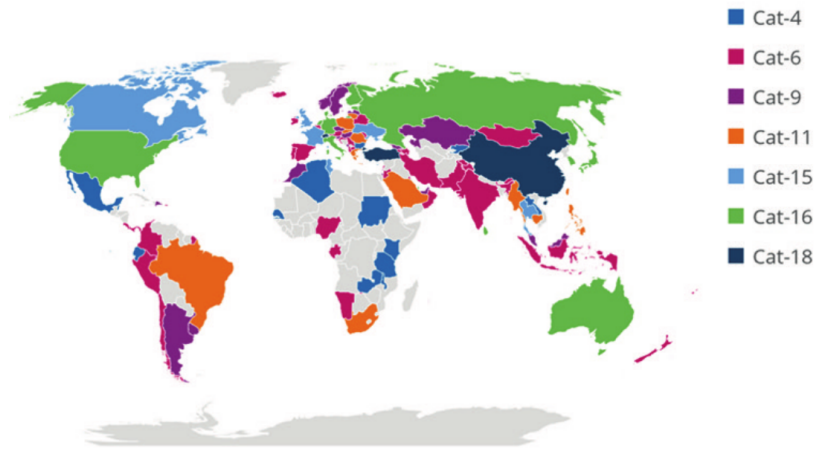


FIGURE 2.2 – Carte de la couverture mondiale de la technologie de téléphonie mobile LTE-Advanced (LTE-A) [43].

un contrôle total sur la gestion de l'infrastructure de communication et des données qui y transitent. N'importe qui peut déployer de nouvelles stations de base et introduire de nouveaux nœuds dans le réseau. Il est également possible de créer des réseaux privés, pour n'autoriser l'accès qu'à un sous-ensemble de nœuds, et d'utiliser ces bandes de fréquence pour communiquer entre pairs, c'est-à-dire entre nœuds d'un même réseau, sans passer par une station de base. En contrepartie, la disponibilité des bandes de fréquences ISM n'est pas garantie : les interférences peuvent être nombreuses dans les zones où le spectre est surchargé par de nombreux appareils utilisant les mêmes bandes de fréquences, que ce soit dans un but de communication ou non.

2.2.1 Bandes de fréquence de la téléphonie mobile

[43] GLOBAL MOBILE SUPPLIERS ASSOCIATION (GSA). *Evolution from LTE to 5G : Global Market Status*. Rapp. tech. Nov. 2018

Les technologies de communication de la téléphonie mobile sont largement déployées et utilisées à une échelle mondiale. Par exemple, on peut voir sur la figure 2.2 une carte de la couverture mondiale de la technologie LTE-Advanced, aussi appelée 4G. S'il existe indéniablement toujours des zones blanches non couvertes, le réseau mondial de téléphonie mobile est probablement le réseau sans fil déployé le plus large offrant un accès à Internet. L'union "3rd Generation Partnership Project" (3GPP) est chargée de la spécification et de la normalisation des technologies de téléphonie mobile. Le 3GPP a apporté un amendement à la norme de la technologie LTE-Advanced, dans le but de rendre les technologies de téléphonie mobile accessibles pour les réseaux de capteurs sans fil et l'internet des objets, et qui permet ainsi de réduire le coût énergétique et calculatoire de ces technologies.

Quatre technologies de téléphonie mobile sont adaptées pour les réseaux LPWAN. Les deux premières sont déjà déployées et utilisées actuellement : enhanced Machine-Type Communication (eMTC ou LTE-M) et Narrow-Band IoT (NB-IoT). Elles sont toutes les deux dérivées de la norme 3GPP de la technologie LTE. Les deux suivantes sont Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT) et la 5G. Nous allons détailler l'ensemble de ces technologies dans cette sous-section.

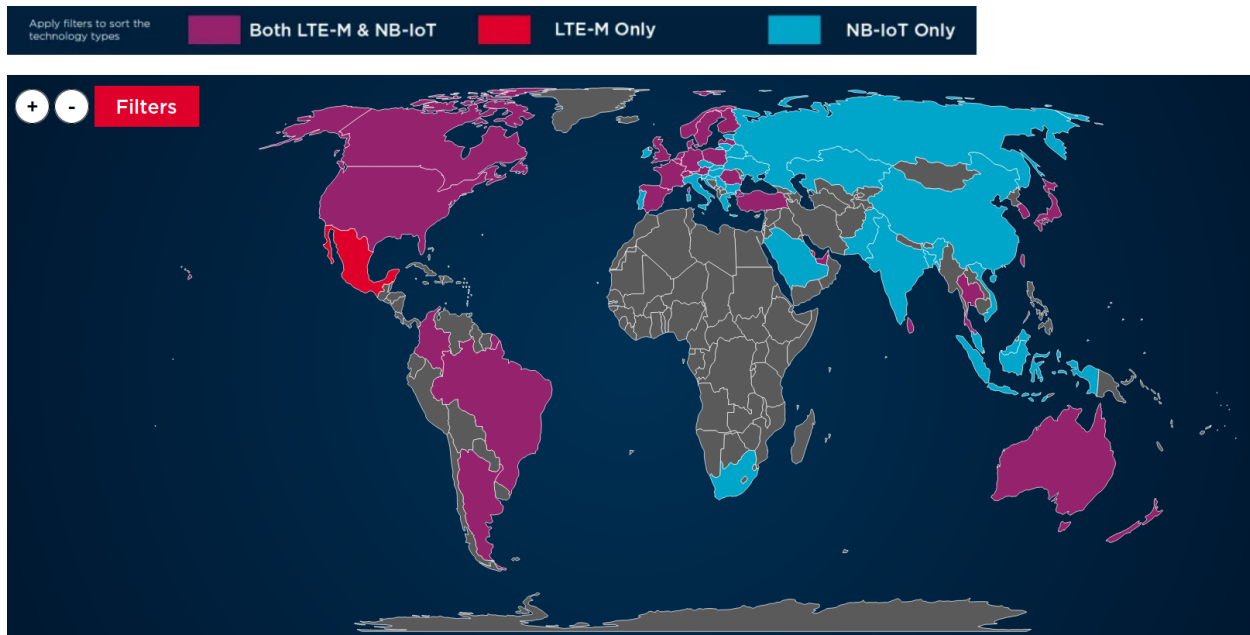


FIGURE 2.3 – Carte de la couverture mondiale des technologies de téléphonie mobile LTE-M et NB-IoT [45].

Enhanced Machine-Type Communication (eMTC ou LTE-M)

"Long Term Evolution" (LTE), est une norme du 3GPP. Elle est plus connue sous le nom de 4G. LTE Cat M1, qu'on désigne sous les acronymes LTE-M ou eMTC, est dérivée de la norme spécifiant la technologie LTE. Sa spécification est disponible dans la "release 13" [44] du 3GPP. Elle est conçue pour les communications "Machine to Machine" (M2M), type de communication que l'on utilise par exemple dans les réseaux de l'internet des objets. La technologie LTE-M est en quelque sorte une simplification de la technologie LTE. Les buts principaux sont de réduire la consommation énergétique et d'augmenter la portée de communication par rapport à la technologie LTE. La technologie LTE-M offre un débit maximal de 1 Mbps, dix fois inférieur à celui de la technologie LTE. La largeur de bande utilisée passe de 20 MHz pour LTE à 1.4 MHz pour LTE-M. LTE-M permet de communiquer de façon bidirectionnelle et simultanée (full-duplex), mais dispose également d'un mode optionnel de communication bidirectionnelle à l'alternat (half-duplex) pour réduire encore plus sa consommation énergétique. Les deux nouvelles spécificités de LTE-M sont "extended Discontinuous Reception" (eDRX) et "Power Saving Mode" (PSM). eDRX autorise des cycles de pagination plus long, tandis que PSM permet de rendre les nœuds inactifs pendant une période de temps prolongée, le but de ces nouveautés étant de réduire la consommation énergétique de la communication. LTE-M autorise également le transfert intercellulaire, de l'anglais "handover", ce qui lui donne un net avantage pour concevoir des réseaux mobiles. Il est notable que la "Voice over LTE" (VoLTE) est toujours fonctionnelle avec des communications LTE-M, il est donc possible de transmettre un flux audio avec cette technologie. Les caractéristiques et performances offertes par LTE-M font qu'il est également envisageable de l'utiliser pour la mise à jour à distance des nœuds.

LTE-M est déjà déployée et utilisable dans plusieurs pays, comme on

[44]: 3GPP, Release 13. <https://www.3gpp.org/release-13>. Accessible au 02-07-2021.

[45] GSMA, Mobile IoT Deployments Map. <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/>. Accessible au 02-07-2021.

peut le voir sur la figure 2.3 qui représente la carte de déploiement des réseaux LTE-M et NB-IoT à une échelle mondiale. Il est théoriquement aisé pour un opérateur de réseau mobile de déployer son propre réseau LTE-M. En effet, l'infrastructure LTE existante ne nécessite pour cela qu'une mise à jour logicielle, sans modification matérielle extensive. Par exemple, l'opérateur français Orange, principal opérateur réseau en France, a rapidement mis en fonctionnement son propre réseau LTE-M, dont la carte de couverture est visible sur leur site internet [46].

[46]: Orange, Couverture LTE-M. <https://www.orange-business.com/fr/reseau-lte-m>. Accessible au 02-07-2021.

Narrow-Band IoT (NB-IoT)

"Narrow-Band IoT" (NB-IoT), qu'on désigne aussi sous le nom de LTE Cat NB1, est la seconde dérivation de la norme spécifiant la technologie LTE. Petit frère de LTE-M, NB-IoT est également spécifié par le 3GPP dans leur release 13. NB-IoT, comme son nom l'indique, est pensé pour les applications de l'internet des objets. Il est conçu pour être utilisé dans des contextes imposant d'importantes contraintes énergétiques, qui n'autorisent ainsi pas l'utilisation de LTE-M. NB-IoT est basé sur des communications à bande étroite, et la largeur de bande est donc réduite à 180 kHz. Forcément, le débit s'en retrouve largement limité. Si l'on peut espérer un débit d'environ 250 kbps en communication descendante (des stations de base vers les nœuds), les communications montantes (des nœuds vers les stations de base) sont limitées à 20 kbps. Concernant les fréquences utilisées, NB-IoT dispose de trois modes de fonctionnement : "in-band", "guard-band LTE" et "standalone". Le mode "in-band" utilise les bandes de fréquences de la technologie LTE. Le mode "guard-band" utilise un ensemble de fréquences soumis à licence de la technologie LTE, mais qui ne sont pas utilisées, recyclant ainsi de façon efficace ces fréquences. Finalement, le mode "standalone" utilise un ensemble de fréquences dédiées. À l'inverse de LTE-M, NB-IoT n'autorise pas les transferts intercellulaires, ce qui réduit beaucoup son intérêt lorsque que l'on cherche à déployer un réseau mobile. Également, le débit limité risque de rendre difficile la mise à jour à distance des nœuds. En contrepartie, toutes ces caractéristiques de NB-IoT lui permettent de réduire considérablement sa consommation énergétique, et d'étendre encore plus loin sa portée de communication maximale en comparaison avec LTE-M.

De la même façon que LTE-M, NB-IoT est déjà déployé et utilisable dans certains pays. Il est mondialement en cours de déploiement, et la couverture actuelle est visible sur la figure 2.3. Au contraire de LTE-M, le déploiement de NB-IoT nécessite une mise à jour matérielle de l'infrastructure LTE existante, ce qui justifie un délai un peu plus long.

Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT)

Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT) est la troisième technologie issue de la release 13 du 3GPP. La principale différence entre les technologies LTE-M/NB-IoT et la technologie EC-GSM-IoT est que cette dernière ne se base pas sur la norme de la technologie LTE (4G), mais sur celle de la technologie eGPRS, plus connue sous le nom de 2,75G. Pour simplifier, EC-GSM-IoT est à la eGPRS ce que LTE-M est à la LTE, ça à dire une version simplifiée amenant principalement des améliorations de portée

et d'efficacité énergétique. La largeur de bande par canal passe à 200 kHz, pour une largeur de bande totale de 2.4 MHz. EC-GSM-IoT permet d'atteindre un débit entre 70 et 240 kbps, en fonction de la modulation utilisée (GSMK ou 8PSK).

Cette technologie pourrait se révéler particulièrement utile pour les réseaux contraints déjà déployés et qui se basent sur une ancienne technologie de téléphonie mobile, permettant de réduire la consommation énergétique des nœuds d'une simple mise à jour. Malheureusement, EC-GSM-IoT ne bénéficie pas d'autant d'attention que ses deux alternatives sus-mentionnées. La principale raison est simple : les opérateurs mobiles prévoient de démanteler l'ancienne infrastructure de téléphonie mobile sous peu [47]. En conséquence, aucun réseau EC-GSM-IoT n'est fonctionnel aujourd'hui, et cette technologie sera probablement abandonnée dans un futur proche.

5G

La 5G est la dernière innovation technologique en matière de téléphonie mobile. En date de rédaction de ce manuscrit, le déploiement commence tout doucement sur le territoire français. La cinquième génération des normes pour la téléphonie mobile promet de nombreuses améliorations, pour la téléphonie classique, mais aussi pour les réseaux contraints [48]. Cependant, peu d'informations précises sont disponibles concernant l'intégration de l'important débit de la 5G avec le respect de la basse consommation énergétique nécessaire aux réseaux contraints. La priorité de la 5G semble en effet être la communication ultra rapide, ceci grâce à l'utilisation des bandes de fréquences hautes comme 60 GHz et une importante largeur de bande [49]. Cela devrait permettre d'offrir un débit énorme, de l'ordre de 1 à 10 Gbps. En revanche, cela semble assez éloigné des besoins et des contraintes des nœuds très limités que l'on trouve classiquement dans les réseaux de capteurs sans fil ou de l'internet des objets.

Actuellement, la 5G vise deux types de communication : les "massive Machine-Type communications" (mMTC) et les "critical Machine-Type Communications" (cMTC). Les prérequis cMTC sont beaucoup trop stricts pour les réseaux contraints qui ne peuvent pas assurer des "Ultra Reliable and Low Latency Communications" (URLLC). Les communications de type mMTC semblent cependant cibler les réseaux de l'internet des objets et autres types de réseaux contraints. Mais les technologies LTE-M et NB-IoT respectent déjà les critères des mMTC définis par la 5G, et en conséquence, il ne semble pas y avoir de solution prévue qui soit basée sur la 5G pour les réseaux contraints [50].

2.2.2 Bandes de fréquences ISM

Les bandes de fréquences "industriel, scientifique et médical" sont libres d'utilisation. Ainsi, chacun peut utiliser ce morceau du spectre électromagnétique pour différents usages. L'usage le plus courant est la radiocommunication, mais d'autres équipements peuvent également fonctionner sur les mêmes fréquences. Par exemple, un four à micro-ondes [51] utilise un rayonnement micro-onde pour agiter les molécules

[47]: Heimar LECHT. *2G and 3G networks are shutting down globally?!* <https://lot.mobi/blog/2g-and-3g-networks-are-shutting-down-globally>. Accessible au 02-07-2021.

[48]: 5G – *The high-speed mobile network of the future.* <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/mobile-communication-5g/>. Accessible au 02-07-2021.

[49]: GSMA. *5G Spectrum GSMA Public Policy Position.* Rapp. tech. 2019

[50]: Olof LIBERG, Mårten SUNDBERG, Y.-P. Eric WANG, Johan BERGMAN et Joachim SACHS. « Chapter 10 - 5G and the Internet of Things ». In : *Cellular Internet of Things*. 2018

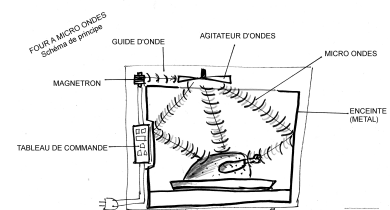


FIGURE 2.4 – Schéma de fonctionnement d'un four à micro-ondes [51].

[51]: Wikipédia, *Four à micro-ondes.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_%C3%A0_micro-ondes. Accessible au 02-07-2021.

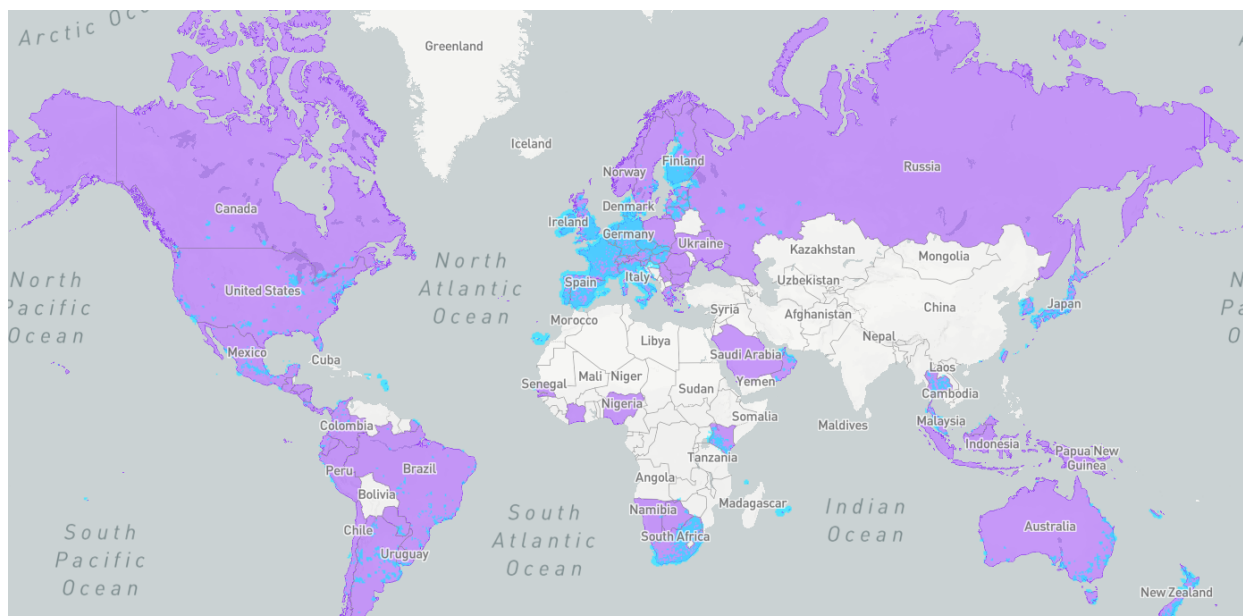


FIGURE 2.5 – Carte de couverture mondiale du réseau Sigfox [52].
En bleu les stations de base, en violet les pays dans lesquels le déploiement est en cours.

d'eau, ce qui génère de la chaleur. Les fréquences utilisées par un four à micro-ondes sont très proches de celles utilisées par la technologie Wi-Fi, et c'est donc pour cela qu'il n'est pas recommandé de placer un tel four sur le chemin d'une connexion sans fil. Bien que l'utilisation des bandes ISM ne soit pas soumise à licence, elle n'est pas pour autant dépourvue de réglementation. Ainsi, en fonction des fréquences, de la puissance d'émission, du pays, etc., il est nécessaire de respecter certaines limitations. Ces restrictions sont particulièrement fortes concernant les bandes de fréquences qui sont inférieures à 1 GHz, qu'on appellera les bandes de fréquences "sub-GHz". Par exemple, un émetteur qui utilise la bande des fréquences entre 868.0 MHz et 868.6 MHz sur le territoire européen se doit de respecter une puissance de transmission maximale de 25 mW. Ce même émetteur doit également respecter un rapport cyclique, de l'anglais "duty cycle", de 1%. Le rapport cyclique est la portion de temps durant laquelle un nœud a le droit d'émettre, donc sur une heure, un rapport de 1% autorise l'émission pendant 36 secondes.

Il existe de nombreuses technologies de communication sans fil à longue portée qui utilisent les fréquences ISM. Celles-ci sont définies et maintenues par quasiment tout autant d'entreprises et d'organismes différents, et les sources d'informations pour obtenir les détails techniques sont donc très variées. Nous allons introduire rapidement les caractéristiques de ces technologies dans cette sous-section.

Sigfox

[52] Sigfox, Coverage. <https://www.sigfox.com/en/coverage>. Accessible au 02-07-2021.

[53]: Sigfox. <https://www.sigfox.com>. Accessible au 02-07-2021.

La technologie Sigfox [53] est une solution propriétaire proposant une connectivité de bout en bout, principalement à visée des réseaux de l'internet des objets. Sigfox se positionne comme un opérateur réseau alternatif, et déploie ainsi des stations de base dans le monde entier. On peut voir la couverture de leur réseau sur la figure 2.5. Cette technologie utilise une modulation dite "Differential Binary Phase Shift Keying"

(DBPSK), sur une porteuse "Ultra-Narrow-Band" (UNB) située dans les bandes de fréquences sub-GHz. Le principe de l'UNB, qui est d'utiliser une bande de fréquence d'une très faible largeur, permet de réduire grandement le niveau de bruit lors de la communication, ce qui permet ainsi de décoder plus facilement le signal et donc d'augmenter significativement la portée de communication. Un des autres avantages de Sigfox est qu'un unique opérateur s'occupe du réseau mondial. Un nœud équipé de la technologie Sigfox peut donc communiquer dans n'importe quel pays sans avoir à souscrire un abonnement chez un opérateur tiers. En contrepartie, puisque la fréquence utilisée est basse et que la largeur de la bande est faible, le débit est également extrêmement limité, et ne permet pas d'atteindre plus que 100 bps. De plus, pour pouvoir respecter les restrictions de rapport cyclique imposées par les régulations de l'utilisation de la bande sub-GHz, Sigfox limite les communications montantes à 140 transmissions de 12 octets de données, et les communications descendantes à 4 transmissions de 8 octets de données, par jour, et par machine.

"Long Range", ou LoRa, est une technologie propriétaire de Semtech [54], conçue en 2009 par Cycléo et rachetée en 2012. Basée sur une modulation dite "Chirp Spread Spectrum" (CSS), LoRa permet d'utiliser plusieurs bandes de fréquences sub-GHz, en fonction de la localisation géographique, et des variations des régulations locales. Les communications LoRa sont connues pour être modérément résilientes à la détection et aux interférences, ainsi que résistantes à l'effet Doppler, et permettent donc d'atteindre une portée de communication maximale importante. LoRa propose différents paramètres qu'il est possible de modifier pour ajuster le compromis entre portée et débit, tels que le "Spreading Factor" (SF). Le débit obtenu varie entre 0.3 et 50 kbps. L'acronyme LoRa ne désigne cependant que la technologie de la couche physique. LoRaWAN [55] est un protocole ouvert pour les couches liaison de données et réseau, géré par la LoRa Alliance. LoRaWAN spécifie entre autres trois types de nœuds aux comportements différents, qu'il est possible de faire varier en fonction des cas d'utilisations et des besoins. Pour simplifier, la classe A correspond aux nœuds très contraints en énergie, la classe B aux nœuds moyennement contraints en énergie et la classe C aux nœuds qui peuvent se permettre de rester en écoute permanente. En utilisant les bons paramètres, LoRa permet d'atteindre un débit suffisamment important pour transmettre des données un peu plus conséquentes. Par exemple, il est possible d'envisager de transmettre une mise à jour à distance à des nœuds LoRa, mais cela peut présenter un certain coût. En effet, il faut que tous les nœuds aient la possibilité de devenir classe C, ce qui demande de disposer d'une autonomie énergétique suffisante [56]. LoRa fait l'objet d'une importante attention académique, et plusieurs études scientifiques [57, 58] montrent qu'il est possible d'atteindre de grandes distances de communication, à condition qu'une ligne de vue directe entre émetteur et récepteur soit dégagée. Dans le cas contraire, par exemple en environnement urbain, la portée maximale risque d'être fortement réduite.

Plusieurs opérateurs réseau dans différents pays déploient et maintiennent un réseau LoRa, par exemple l'opérateur Orange en France [59]. Mais puisque LoRa est une technologie qui se base sur les bandes de fréquences ISM, n'importe qui a la possibilité de déployer ses propres sta-

[54]: *Semtech LoRa Technology Overview*. <https://www.semtech.com/lora>. Accessible au 02-07-2021.

[56]: *Firmware updates over low-power wide area networks*. <https://www.thethingsnetwork.org/article/firmware-updates-over-low-power-wide-area-networks>. Accessible au 02-07-2021.

[57]: Jetmir HAXHIBEQIRI, Abdulkadir KARAAGAC, Floris VAN DEN ABEELE, Wout JOSEPH, Ingrid MOERMAN et Jeroen HOEBEKE. « LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment : Case study ». In : *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2017

[58]: Ibrahim AMADOU, Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « LoRa in a haystack : a study of the LoRa signal behavior ». In : *WiMob 2019 - 15th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. Barcelona, Spain, oct. 2019

[55] *LoRaWAN, Coverage & Operator Maps*. <https://lora-alliance.org/>. Accessible au 02-07-2021.

[59]: *Orange, Couverture LoRa*. <https://www.orange-business.com/fr/reseau-iot>. Accessible au 02-07-2021.

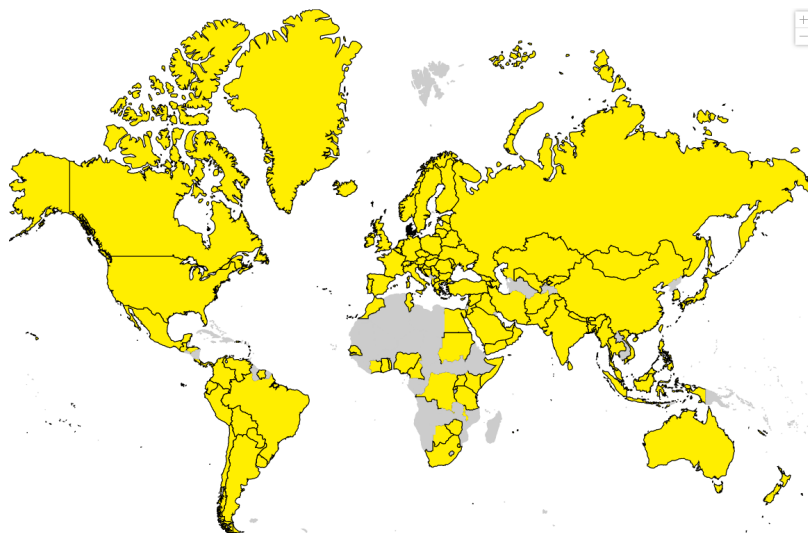


FIGURE 2.6 – Carte de couverture mondiale du réseau LoRaWAN [55].

[60]: *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/>. Accessible au 02-07-2021.

tions, et d'étendre son réseau personnel. Ainsi, il est également possible d'utiliser des réseaux communautaires, constitués de stations de bases et nœuds déployés par des particuliers, et mis à disposition du public, comme le réseau "The Things Network" [60]. La carte du déploiement mondial des réseaux LoRaWAN est visible sur la figure 2.6.

Ingenu

[61]: *Ingenu*. <https://www.ingenu.com/>. Accessible au 02-07-2021.

Ingenu [61] est une technologie de communication longue portée propriétaire. La principale particularité d'Ingenu est de ne pas utiliser les mêmes bandes de fréquences que les autres technologies à longue portée. Là où les technologies Sigfox et LoRa utilisent les bandes ISM sub-GHz, Ingenu utilise à la place la bande des fréquences de 2.4 GHz. Cette bande est également utilisée par exemple par les technologies Wi-Fi ou Bluetooth, et l'un de ses avantages est qu'elle ne fait pas l'objet de restrictions aussi strictes que les bandes sub-GHz, notamment vis-à-vis du ratio de rapport cyclique. Ingenu se base sur une couche physique propriétaire nommée "Random Phase Multiple Access" (RPMA), qui est elle-même une variation de la technologie physique "Code Division Multiple Access" (CDMA). D'après les informations commerciales communiquées [62], Ingenu permettrait d'obtenir un réseau bénéficiant de performances bien meilleures que la plupart des autres technologies à longue portée. La portée sera ainsi grandement étendue, particulièrement dans des conditions de visibilité directe entre émetteur et récepteur. Le débit atteint serait de 78 kbps en communication montante et de 19.5 kbps en communication descendante. Également, grâce à la grande portée et pénétration des ondes la couverture serait très étendue. Cependant, en date de rédaction de ce manuscrit, cette technologie ne semble pas encore avoir fait l'objet d'études scientifiques indépendantes permettant de s'assurer des performances réelles atteignables.

[62]: *RPMA technology*. <https://www.ingenu.com/technology/rpma/>. Accessible au 02-07-2021.

Weightless

[63]: *Weightless*. <https://www.ubiik.com/weightless-sig>. Accessible au 02-07-2021.

Le nom Weightless [63] désigne un ensemble de normes de communication spécifiées et maintenues par le "Weightless Special Interest

Group" (Weightless-SIG). On dénombre dans cet ensemble trois normes différentes : Weightless-W, Weightless-P et Weightless-N.

La norme Weightless-W propose de recycler une partie des bandes de fréquences allouées à l'utilisation pour la télévision, mais qui ne sont actuellement pas utilisées. Une bande de fréquence à largeur faible est utilisée pour transporter un signal codé selon une modulation dite "Quadrature Amplitude Modulation" (QAM), entre autres. Le débit obtenu est rapide pour une technologie à longue portée, et varie entre 1 kbps et 10 Mbps. L'idée de réutiliser les bandes de fréquences TV non utilisées est intéressante, et permettrait d'atteindre des débits importants. En revanche, l'utilisation de ces fréquences est soumise à diverses restrictions qui varient en fonction des pays. De plus, les fréquences disponibles varient également en fonction des villes, et la conception d'une antenne de taille réduite qui serait capable de fonctionner sur toute la variété du spectre de fréquence n'est pas possible [64].

Les caractéristiques de Weightless-N sont plus classiques. Cette technologie se base sur une bande à largeur extrêmement faible, située dans les fréquences ISM sub-GHz. Le signal est codé selon la même modulation qu'utilise Sigfox, DBPSK, et uniquement les communications montantes sont possibles. De façon générale, Weightless-N dispose d'un fonctionnement proche de celui de Sigfox, et offre ainsi des avantages analogues, mais est donc aussi limité par des restrictions similaires. En revanche, à l'inverse de Sigfox, le débit annoncé est bien plus élevé, de 30 à 100 kbps. La principale implémentation de la norme Weightless-N est portée par l'entreprise Nwave [65], qui propose principalement des solutions de gestions intelligentes pour les parkings.

La troisième et plus récente norme du groupe Weightless-SIG est nommée Weightless-P [66]. Cette technologie utilise de canaux de communication larges de 12.5 kHz, situés dans les bandes de fréquences ISM sub-GHz. Les modulations utilisées sont "Gaussian Minimum-Shift Keying" (GMSK) et "Quadrature Phase Shift Keying" (QPSK). Le débit qu'il est possible d'atteindre varie entre 0.2 et 100 kbps. La norme Weightless-P annonce également le support des mises à jour système à distance [67]. À ce jour, c'est l'entreprise Ubiik [68] qui est porteuse de la principale implémentation de la norme. Entre autres, Ubiik fournit et équipe Taiwan en compteurs électriques intelligents.

Telensa

Telensa [69] est une technologie et une entreprise fournissant une solution de connectivité longue distance de bout en bout. Cette technologie se base sur une bande de largeur extrêmement faible, située dans les bandes de fréquences ISM sub-GHz. À l'instar de la technologie Sigfox, Telensa offre un débit assez faible, de 62.5 bps pour les communications montantes et de 500 bps pour les communications descendantes [70]. L'entreprise Telensa ne semble pour l'instant pas proposer l'utilisation de son réseau et de sa technologie au grand public, mais indique vouloir normaliser sa technologie de communication longue portée. Actuellement, Telensa est spécialisé dans la conception et le déploiement de réseaux d'éclairage intelligent, solutions qui sont en cours de déploiement dans plusieurs villes, telles que Leicester en Angleterre ou Stirling en Australie.

[64]: Link Labs, *What is Weightless?* <https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>. Accessible au 02-07-2021.

[65]: Nwave. <https://www.nwave.io/>. Accessible au 02-07-2021.

[66]: *Weightless-P system specification*. https://pro-bee-user-content-eu-west-1.s3.amazonaws.com/public/users/Integrators/929cb090-e779-401a-b06c-c629ff6b0fea/ap-cambridgestartuplimi/Weightless-P_v1.03.pdf. Accessible au 02-07-2021.

[67]: Ubiik, *FOTA : Weightless-P vs. LoRaWAN*. <https://www.ubiik.com/post/2017/03/28/fota-weightless-p-vs-lorawan>. Accessible au 02-07-2021.

[68]: Ubiik. <https://www.ubiik.com/>. Accessible au 02-07-2021.

[69]: Telensa. <https://www.telensa.com/>. Accessible au 02-07-2021.

[70]: Telensa, *Ultra Narrow Band (UNB) Smart City Network*. https://info.telensa.com/hubfs/Resources/20page%20files/datasheet_telensa_planet_network.pdf. Accessible au 02-07-2021.

DASH7 Alliance Protocol (D7AP)

[71]: DASH7 Alliance. <https://dash7-alliance.org/>. Accessible au 02-07-2021.

L'alliance DASH7 [71] est un consortium formé par plusieurs partenaires industriels. Ce consortium définit et maintient un protocole de communication nommé le "DASH7 Alliance Protocol" (D7AP). Ce protocole se base lui aussi sur une bande de faible largeur, située dans les bandes de fréquences ISM sub-GHZ, et utilise une modulation dite de "Gaussian Frequency Shift Keying" (GFSK). Il permet d'atteindre un débit maximum compris entre 9.6 et 166.7 kbps. Le D7AP spécifie cependant une pile protocolaire relativement complexe. De plus, certains mécanismes sont coûteux, par exemple le réveil périodique obligatoire des nœuds. Si D7AP permet ainsi d'obtenir une faible latence dans les communications, la consommation énergétique qu'il induit est en contrepartie relativement importante par rapport aux autres technologies à longue portée.

Normes longue portée de l'IEEE

L'"Institute of Electrical and Electronics Engineers" (IEEE) est une association professionnelle et un organisme de normalisation internationale. En tant que tel, l'IEEE joue un rôle primordial dans l'établissement des normes technologiques, notamment les normes régissant les réseaux informatiques sans fil. L'IEEE spécifie trois normes pour les technologies longue portée dédiées aux réseaux contraints. Ces normes sont des amendements apportés aux normes antérieures que sont IEEE 802.11 [9] et IEEE 802.15.4 [14].

[9]: « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. » In : *IEEE Std 802.11* (2020)

[14]: « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks ». In : *IEEE Std 802.15.4* (2020)

[72]: « IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 5 : Physical Layer Specifications for Low Energy, Critical Infrastructure Monitoring Networks. » In : *IEEE Std 802.15.4k* (2013)

[73]: « IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 3 : Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. » In : *IEEE Std 802.15.4g* (2012)

[74]: « IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2 : Sub 1 GHz License Exempt Operation. » In : *IEEE Std 802.11ah* (2016)

La norme IEEE 802.15.4k [72] spécifie une utilisation des bandes de fréquences ISM sub-GHz ou 2.4 GHz. Les modulations spécifiées originellement par la norme IEEE 802.15.4 sont remplacées dans cet amendement par "Direct-Sequence Spread Spectrum" (DSSS) et "Frequency-shift keying" (FSK). Concernant la couche liaison de données, il y a trois possibilités de fonctionnement prévues : "Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance" (CSMA/CA) classique, CSMA/CA sans "Priority Channel Access" (PCA) ou un mécanisme ALOHA sans PCA. Le débit annoncé varie entre 1.5 bps et 128 kbps. Il est notable que la technologie Ingenu, présentée précédemment, est une implémentation de la norme IEEE 802.15.4k.

La norme IEEE 802.15.4g [73] est un second amendement de la norme IEEE 802.15.4. Ici, la couche physique spécifie l'utilisation de trois modulations : FSK, QPSK, ou "Orthogonal Frequency-Division Multiple Access" (OFDMA). Les bandes de fréquences utilisées sont situées dans les bandes ISM sub-GHz. Pour cet amendement, la couche liaison ne change pas, et reste semblable à celle spécifiée dans la norme IEEE 802.15.4e. En revanche, à la différence de la norme IEEE 802.15.4e, ce nouvel amendement prévoit une augmentation de la taille des trames, jusqu'ici limitées à 127 octets, à une contenance maximale de 1500 octets. Ce mécanisme est notamment utile pour éviter la fragmentation que mettent en place les protocoles IP pour transmettre des trames trop larges. Le débit obtenu annoncé est compris entre 4.8 et 800 kbps.

Pour finir, comme indiqué précédemment, la norme IEEE 802.11 spécifie la technologie Wi-Fi. Ainsi, la norme IEEE 802.11ah [74] apporte un amendement à cette dernière, qui est plus connu sous le nom de "Wi-Fi

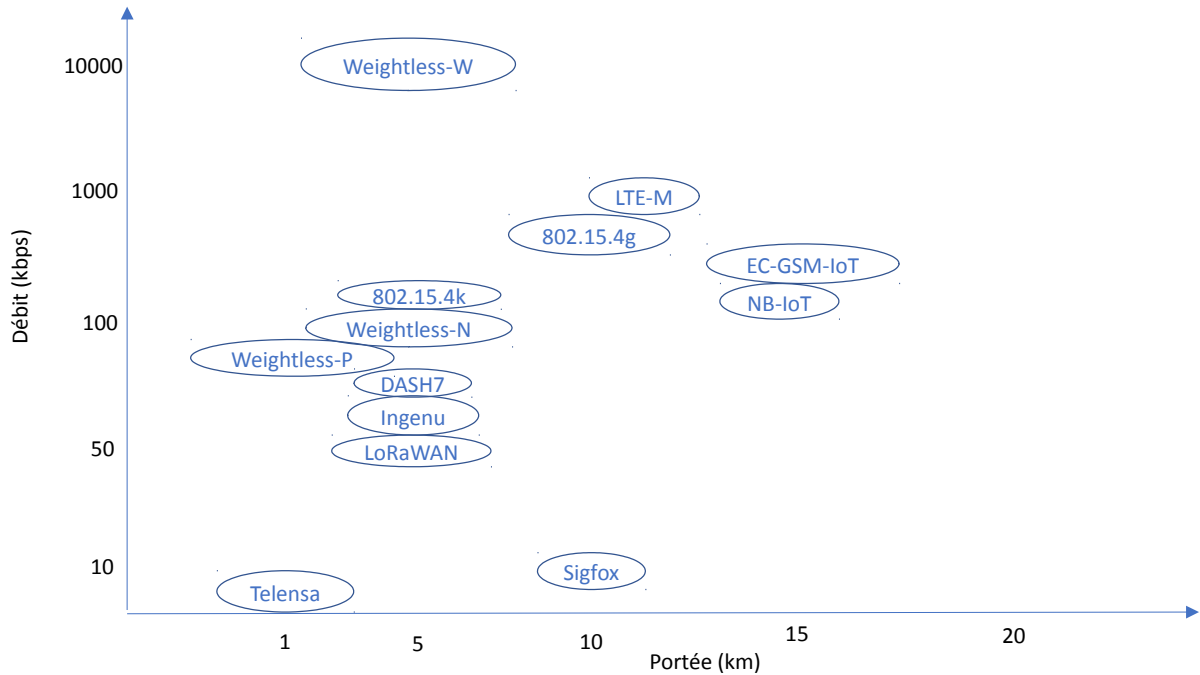


FIGURE 2.7 – Débit maximal de chaque technologie en fonction de la portée de communication théorique en milieu urbain.

HaLow". Le but premier de la technologie Wi-Fi HaLow est d'augmenter la portée de communication et de réduire son coût énergétique par rapport à la technologie Wi-Fi. Comme souvent, le compromis se fait sur le débit atteignable par la technologie, qui varie ainsi entre 0.6 et 8 Mbps pour Wi-Fi HaLow. Si les optimisations apportées à Wi-Fi HaLow permettent d'obtenir des performances plus adaptées aux réseaux contraints qu'avec la technologie Wi-Fi, la plupart des technologies à longue portée sus-mentionnées permettent tout de même de mieux respecter les contraintes énergétiques imposées.

Et bien d'autres encore...

Au cours de cette section, nous avons brossé le portrait des principales technologies de communication longue portée. Cependant, il existe d'autres technologies moins connues, et il nous est malheureusement impossible d'être exhaustif ici. Nous pouvons citer par exemple Qowisio [75] qui propose une solution de communication double, à l'aide d'une nouvelle technologie couplée avec la technologie LoRa. Également, WAVIoT [76] est une entreprise qui propose une pile protocolaire connue sous le nom de "Narrow-Band Fidelity" (NB-Fi). Très peu d'informations techniques sont disponibles à propos de ces technologies, et c'est pourquoi nous ne les présenterons pas en détail ici.

[75]: Qowisio. <https://www.qowisio.com/>. Accessible au 02-07-2021.

[76]: WAVIoT. <https://waviot.com/>. Accessible au 02-07-2021.

Pour résumer !

Nous pouvons trouver à la fin de ce chapitre deux tableaux qui résument et compilent les informations techniques relatives aux technologies et normes introduites dans cette section. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent les technologies et leurs spécificités, en termes de modulation, bandes

de fréquences, débit, portée, couche liaison de données, topologie, taille de paquets de données, aspects propriétaires et modèle de déploiement. Aussi, la figure 2.7 permet de visualiser rapidement les performances en termes de débit maximal et de portée de communication théorique en zone urbaine de chacune des technologies que nous avons considérées.

2.3 Caractériser et comparer pour mieux choisir

Dans la section précédente, nous avons introduit les informations techniques relatives à chacune des technologies de communication à longue portée présentées. Sur la base de ces informations, nous proposons dans cette section un classement des technologies relatif à la consommation énergétique de chacune. Minimiser la consommation énergétique des nœuds est primordial, mais ce n'est pas le seul facteur que l'on peut se permettre de prendre en compte lors du choix d'une technologie de communication. Ainsi, nous proposons également une comparaison des différentes technologies en termes de couverture, d'occupation des fréquences et de coût monétaire. Pour finir, nous proposons une méthode simplifiée pour orienter le choix d'une technologie de communication, en fonction des contraintes imposées par le cas d'application du réseau.

2.3.1 À propos de la consommation énergétique

Au cours de la section précédente, nous avons volontairement mis de côté une métrique qu'il est pourtant primordial de prendre en compte lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil. La consommation énergétique nécessaire à l'utilisation des communications sans fil est en effet la principale dépense énergétique des nœuds. Cependant, les taux de consommation d'une technologie de communication donnée sont très dépendants de nombreux facteurs : matériel et composants des nœuds, implémentation logicielle de la communication, puissance de transmission... C'est pourquoi nous pensons qu'il n'est pas pertinent d'associer de simples taux énergétiques à chacune des technologies, ceux-ci pouvant varier énormément en fonction des conditions. À la place, nous proposons dans cette sous-section d'établir un classement comparatif des technologies, de façon à visualiser simplement quelles technologies devraient en général consommer plus ou moins d'énergie par rapport aux autres. Nous nous basons pour cela sur les informations techniques collectées et présentées dans les tableaux 2.2 et 2.3, telles que les bandes de fréquences utilisées, mais aussi sur les taux énergétiques annoncés dans la documentation relative à des modules de communication communs.

Faible largeur de bande = faible consommation énergétique ?

Plusieurs technologies communiquent sur une bande de largeur extrêmement faible, de l'anglais "Ultra Narrow Band" (UNB). La largeur d'une bande de fréquences correspond à la différence entre ses fréquences maximales et minimales. Une faible largeur de bande permet au récepteur de ne surveiller qu'un spectre de fréquence très réduit, et d'ainsi faciliter le tri entre le signal d'un émetteur et le bruit environnant. Un émetteur peut donc transmettre un message sur une plus longue distance, et ce,

sans avoir à utiliser une puissance de transmission importante. Ceci, combiné à un protocole de communication simpliste, permet de réduire énormément la consommation énergétique due aux transmissions sans fil. En revanche, une des principales contreparties est de restreindre énormément le débit maximal atteignable.

Parmi les technologies mentionnées dans la section précédente et qui utilisent une largeur de bande extrêmement faible, nous retrouvons : Sigfox, Telensa, Weightless-N (dont la principale implémentation est celle de Nwave) et Qowisio. Pour l'exemple, un module Sigfox TD1204 de Telecom Design [77] nécessite un courant d'une intensité comprise entre 37 et 49 mA en mode transmission et à une puissance d'émission comprise entre +10 et +14 dBm.

Consommation à taux variable

À la prochaine place dans le classement, nous retrouvons la technologie LoRa ainsi que la norme Weightless-P (dont la principale implémentation est celle de Ubiik). Ces deux technologies offrent en effet des débits plus importants que les technologies UNB, et autorisent ainsi plus de possibilités d'utilisation différentes. Par exemple, un module Weightless-P de l'entreprise Ubiik [78] nécessite un courant d'une intensité de minimum 26 mA pour une émission à une puissance de 0 dBm, et de maximum 70 mA pour une puissance de +13 dBm.

LoRa est probablement parmi l'une des technologies sans fil à longue portée les plus configurables et personnalisables en fonction du cas d'application choisi et des données à transmettre. En conséquence, son débit, sa portée, mais également sa consommation énergétique sont très variables. Pour l'exemple, un module SX1272 de Semtech [79] en mode transmission nécessite un courant d'une intensité variant de 18 mA à 125 mA pour une puissance d'émission variant de +7 dBm à +20 dBm.

La téléphonie mobile et l'ovni

Logiquement, les technologies de communication de la téléphonie mobile pour les réseaux contraints arrivent en fin de classement. Celles-ci offrent un débit plutôt conséquent, pour des technologies à longue portée, et utilisent parfois des bandes de fréquences hautes. De plus, il faut prendre en compte les mécanismes de la téléphonie mobile, comme l'authentification et l'association des terminaux avec les stations de base, qui génèrent un trafic de contrôle conséquent. Pour l'exemple, un module Xbee3 de Digi [80] a besoin en moyenne d'un courant d'une intensité de 190 mA au cours d'une transmission en utilisant NB-IoT. Le même module, en mode transmission avec la technologie LTE-M, aura besoin en moyenne d'un courant d'une intensité de 235 mA.

Pour finir, nous pouvons également citer la technologie Ingenu. Très peu d'informations techniques sont disponibles, et il ne semble pas y avoir de documentation relative à un module de communication basé sur cette technologie qui soit disponible pour le public. Si l'on se base sur le débit atteignable et les bandes de fréquences utilisées par Ingenu, la logique voudrait que sa consommation énergétique soit plutôt conséquente,

[77]: Telecom Design, TD1204 Datasheet. https://github.com/Telecom-Design/Documentation_TD_RF_Module/raw/master/TD1204%20Datasheet.pdf. Accessible au 02-07-2021.

[78]: Ubiik, Weightless End Device Module Evaluation Board Datasheet. <https://89d40fcb-7f56-4ec2-b6a2-6a84dcfb24ba.filesusr.com/ugd/3e61aa-7fc0f76b9d824eae81ef58e417af42db.pdf>. Accessible au 02-07-2021.

[79]: Semtech, SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet. <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1272-1277619.pdf>. Accessible au 02-07-2021.

[80]: Digi, Xbee 3 Cellular LTE-M/NB-IoT Modem Datasheet. https://www.digi.com/resources/library/datasheets/ds_xbee3-cellular-lte-m-nb-iot. Accessible au 02-07-2021.

probablement proche de celle des technologies de téléphonie mobile sus-mentionnées.

Plus c'est long, mieux c'est... ou pas ?

Si ce classement permet de se faire une idée du coût énergétique de l'utilisation de telle ou telle technologie, il est important de noter que nous ne présentons ici qu'une comparaison des taux énergétiques absolus. En utilisation réelle, une technologie basse consommation est très souvent contrainte par un débit extrêmement limité [81]. Ainsi, pour une même quantité de données, la période d'émission de cette technologie sera plus longue que celle d'une technologie disposant d'un débit plus rapide. De cette façon, même si une technologie plus rapide impose une consommation énergétique plus importante, la quantité d'énergie dépensée au final pour un même volume de données peut des fois se révéler moindre que dans le cas de la technologie au débit plus réduit. C'est pourquoi l'étude énergétique des technologies de communication ne peut pas être précise si l'on ne prend pas en compte le cas d'utilisation, la fréquence et la taille des données, etc.

[81]: Harald NAUMANN. *NB-IoT versus SIGFOX, LoRaWAN, and Weightless – power / energy the inconvenient truth.* <https://www.gsm-modem.de/M2M/iot-university/nb-iot-power-consumption/>. Accessible au 02-07-2021.

2.3.2 Couverture, occupation des fréquences et coût monétaire

Outre la consommation énergétique des nœuds, il est également nécessaire de considérer plusieurs autres critères pour comparer les technologies de communication. Particulièrement, les critères de couverture, d'occupation du spectre de fréquences, et de coût monétaire n'ont pas vraiment été abordés dans la section 2.2. Dans cette sous-section, nous nous attardons donc un peu plus sur ces aspects qu'il nous paraît important de mentionner.

Couverture : ça capte ou pas ?

Nous définissons la couverture d'un réseau comme étant l'accessibilité et la disponibilité de ce réseau en fonction de la zone géographique considérée. C'est un paramètre essentiel à prendre en considération lors de l'utilisation d'une technologie sans fil, puisqu'un nœud déployé en dehors de la zone de couverture offerte par le réseau ne sera pas capable de communiquer avec les autres nœuds et stations de base. Il est donc important de comprendre que les paradigmes de déploiement et d'utilisation sont très différents entre les technologies basées sur les bandes de fréquences de la téléphonie mobile et les technologies basées sur les bandes ISM.

Dans le cas des technologies de la téléphonie mobile, les réseaux sont déployés et maintenus par des opérateurs, car les bandes de fréquences ne sont utilisables que par les organismes auxquels elles sont attribuées. Cela peut représenter un avantage, car le déploiement et la gestion d'un réseau est une activité complexe qu'une entreprise nécessitant un accès réseau et spécialisée dans une activité annexe ne veut pas forcément avoir à gérer. De plus, les réseaux de téléphonie mobile sont probablement les réseaux sans fil disposant de la couverture mondiale la plus large. À

l'inverse, il n'est pas possible de combler par soi-même un trou dans la couverture réseau, par le déploiement d'une station de base, puisque l'utilisation du spectre est soumise à licence.

Ce schéma s'inverse lorsque l'on considère les technologies basées sur les bandes ISM, à l'exception de celles fonctionnant sur un modèle opérateur, comme Sigfox. La couverture disponible est généralement plus limitée, et fortement dépendante des technologies, des zones géographiques, des réseaux communautaires, etc. Un des avantages de ces technologies est qu'il est possible pour tout un chacun de déployer une nouvelle station de base, afin d'étendre un réseau existant ou de déployer un nouveau réseau privé. Cependant, cela peut engendrer un coût monétaire et temporel important, et peut nécessiter de nombreuses tâches d'administration supplémentaires pour gérer le réseau. Également, si l'utilisation d'un réseau communautaire peut-être pratique, la disponibilité et la gestion des pannes ne peut pas être garanti de la même façon que lors de l'utilisation d'un réseau géré par un opérateur.

Spectre, es-tu occupé ?

Le spectre électromagnétique désigne l'ensemble des fréquences que peuvent prendre les rayonnements électromagnétiques. Un sous-ensemble du spectre électromagnétique est utilisé notamment pour la radiocommunication, et il est donc partagé par toutes les technologies de communication sans fil. Lors du choix d'une technologie de communication sans fil, il est important de prendre en compte l'occupation et l'utilisation des bandes de fréquences. Une forte utilisation des bandes de fréquences génère en effet des interférences et un fort niveau de bruit, ce qui nuit à la qualité des communications sans fil.

Hors, l'autorisation d'utilisation d'une importante partie des bandes de fréquences de radiocommunication est soumise à licence. La part restante aux bandes ISM est donc limitée et partagée par de nombreuses technologies pour la communication sans fil, mais également pour d'autres utilisations, par exemple les plaques à induction. Ainsi, et puisque n'importe quel utilisateur est libre d'utiliser les bandes ISM sous réserve de respecter les restrictions spécifiques aux fréquences en questions, les technologies de communication utilisant les bandes ISM risquent de faire face à des nombreuses interférences. Plus l'adoption de ces technologies grandira et plus la densité des appareils les utilisant sera importante, plus l'occupation des bandes ISM deviendra un problème. À l'inverse, les technologies de la téléphonie mobile opérant sur des bandes différentes des bandes ISM, elles ne seront pas impactées par l'occupation de ces dernières. Cependant, comme nous l'avons expliqué dans la section 2.2, les technologies à longue portée de la téléphonie mobile se basent sur les mêmes bandes de fréquences que celles utilisées par les technologies de la 4G. Ces dernières étant largement occupées par l'utilisation des smartphones, il sera probable d'avoir à composer également avec des interférences environnantes, notamment en milieu urbain dense.

TABLE 2.1 – Coût indicatif en dollars de l'utilisation des technologies de communication sans fil longue portée [82].

	Module	Connectivité	Infrastructure
LTE-M	10 à 15\$	3 à 5\$ / mo pour 1 Mb	
NB-IoT	7 à 12\$	<1\$ / mo pour 100 kb	
Sigfox	5 à 10\$	<1\$ / mo	
Ingenu	10 à 15\$	Inconnu	
LoRaWAN (public)	9 à 12\$	1 à 2\$ / mo	
LoRaWAN (privé)	9 à 12\$	0,25\$ / mo	500\$



FIGURE 2.8 – Carte de la couverture disponible lors de l'utilisation d'une carte SIM Hologram [83].

Et le blé dans tout ça ?

Les performances des technologies de communication guident souvent fortement le choix de technologie lors de la conception d'un réseau. Cependant, il est également bien souvent nécessaire de prendre en compte les considérations monétaires qui y sont associées. Les modèles commerciaux relatifs aux technologies à longue portée sont aussi variables que les autres critères. Si on utilise le réseau d'un opérateur, il faut généralement compter le prix d'un abonnement. Si l'on déploie son propre réseau, il faut compter les coûts d'acquisition du matériel. Pour donner une idée générale du coût de quelques technologies, nous pouvons voir dans le tableau 2.1 le coût des modules et des abonnements de connectivité en fonction des technologies [82]. Les prix présentés sont bien évidemment indicatifs, puisque qu'ils dépendent des pays, des opérateurs, des revendeurs, etc.

[82]: Brian RAY. *Link Labs, Cost of Building With LPWAN Technologies*. <https://www.link-labs.com/blog/costs-in-iot-lte-m-vs.-nb-iot-vs.-sigfox-vs.-lora>. Accessible au 02-07-2021.

[83]: *Hologram*. <https://hologram.io/>. Accessible au 02-07-2021.

Il nous paraît également intéressant d'indiquer ici que des modèles commerciaux alternatifs existent. Nous pouvons par exemple citer l'entreprise Hologram [83]. Hologram ne propose pas une technologie de communication alternative, mais noue des partenariats avec les différents opérateurs de téléphonie mobile dans le monde. Cela leur permet de proposer une carte SIM universelle, capable d'offrir une connectivité de téléphonie mobile mondialement. Les coûts varient en fonction du nombre de nœuds, mais sont proches de 2\$ par mois par nœud. Puisqu'Hologram permet l'accès à une grande portion des réseaux de téléphonie mobile disponibles sur notre planète, cela permet aux nœuds de profiter d'une excellente couverture, visible sur la figure 2.8.

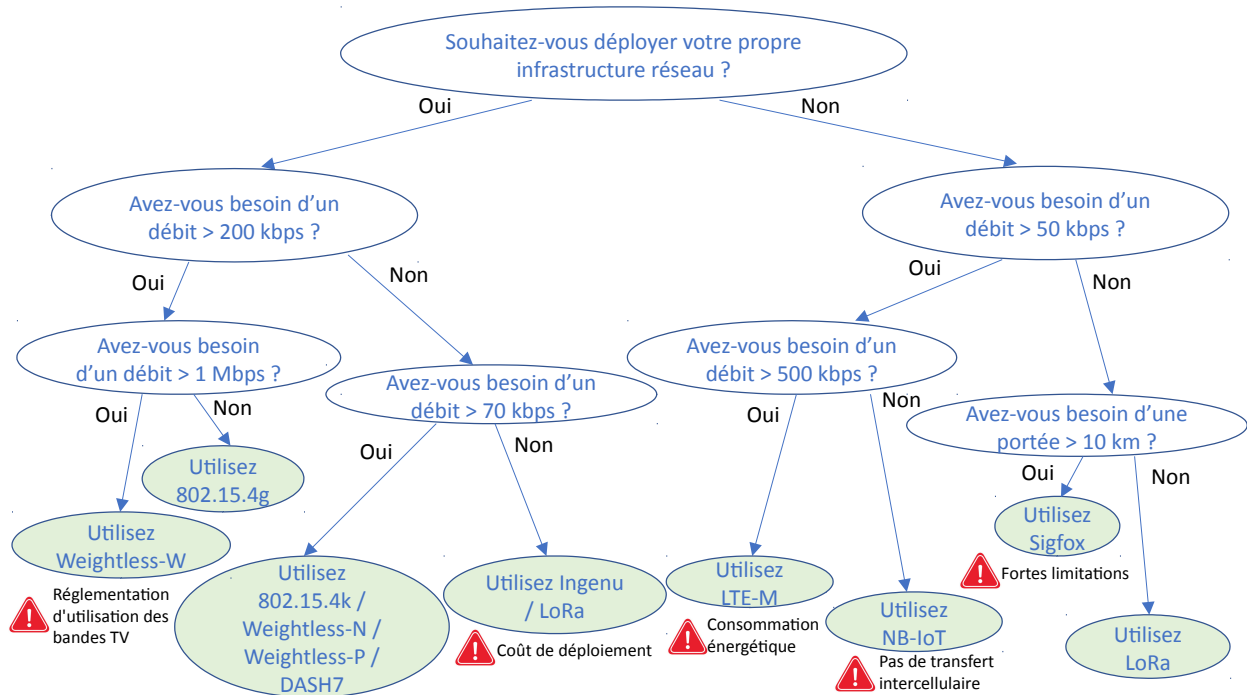


FIGURE 2.9 – Diagramme de décision pour orienter le choix d'une technologie en fonction des contraintes du cas d'utilisation envisagé.

2.3.3 Choisir sa (ou ses) technologie(s)

Choisir une technologie de communication lors de la conception et du déploiement d'un réseau de capteurs sans fil est complexe. En effet, il faut prendre en compte les besoins et contraintes du cas d'application, les contraintes de l'environnement, les capacités des différentes technologies, etc. Pour orienter ce choix, nous proposons dans cette sous-section un diagramme de décision simplifié. Également, nous illustrons par l'exemple avec les technologies à longue portée de la téléphonie mobile que choisir une unique technologie de communication n'est pas forcément la seule possibilité pour un réseau de capteurs sans fil.

Faire en fonction des contraintes

En nous basant sur les informations que nous avons présentées jusqu'ici, nous avons conçu un diagramme de décision simplifié, visible sur la figure 2.9. Il peut être suivi pour orienter le choix d'une technologie de communication, en fonction des besoins et des contraintes du cas d'application envisagé pour le réseau. Nous pouvons en illustrer son utilisation par quelques exemples.

Dans un premier temps, considérons le cas d'application qui nous intéresse le plus dans nos travaux : l'agriculture connectée. Les nœuds sont déployés dans des champs, restent statiques, et mesurent des métriques utiles aux agriculteurs, telles que la température et la pluviométrie. Pour un tel cas d'utilisation, il est préférable d'utiliser une infrastructure de communication existante, car les agriculteurs n'ont pas vocation à déployer un réseau privé, et nous supposons donc que les champs considérés disposent de la couverture nécessaire. La surveillance des variations météorologiques génère régulièrement des données numériques, qui

ne représentent généralement pas un volume important. Le débit peut donc être inférieur à 50 kbps, mais la technologie doit offrir une portée de communication supérieure à 10 km, car les exploitations agricoles peuvent être très larges. En considérant ce scénario, la technologie Sigfox est particulièrement intéressante.

Pour illustrer avec un second exemple, imaginons un système de localisation des patients dans un hôpital. Ici, nous voulons déployer un réseau privé, et ce, pour plusieurs raisons. Les zones à l'intérieur des bâtiments, et particulièrement les sous-sols, peuvent être isolées des radiocommunications externes. Également, cela permet de ne pas laisser la gestion du réseau à un opérateur tiers, et donc potentiellement de limiter les interférences, la congestion et les pannes. Nous n'avons pas ici non plus besoin d'un débit supérieur à 70 kbps. Ingenu et LoRa sont donc des choix qu'il est pertinent de considérer. Spécifiquement, puisque les communications LoRa sont résilientes à la mobilité basse vitesse, LoRa est probablement le meilleur choix dans ce scénario.

LTE-M et NB-IoT, deux faces d'une même médaille

Il est assez clair que chaque technologie est plus adaptée à certains cas d'utilisation que d'autres. En fonction des contraintes, choisir la technologie de communication la plus performante lors de la conception des nœuds est donc complexe, et un simple diagramme comme celui de la figure 2.9 ne peut pas être suffisamment exhaustif pour prendre en compte toutes les possibilités. Le meilleur choix serait peut-être donc de ne pas avoir à en faire du tout : imaginons par exemple vouloir déployer un réseau basé sur des technologies de téléphonie mobile longue portée. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les technologies de la téléphonie mobile longue portée présentent de nombreux avantages. En fonction du cas d'application et de l'environnement de déploiement, ces technologies peuvent offrir de meilleures performances que les technologies utilisant les bandes ISM. Mais choisir quelle technologie utiliser parmi celles présentées dans la section 2.2, n'est pas aisé, et il faut considérer les contraintes du cas d'application.

Tout d'abord, nous pouvons mettre la technologie EC-GSM-IoT de côté. Cette dernière arrive trop tard, et ne sera plus déployée puisque l'infrastructure qui lui est nécessaire est en cours de démantèlement. À l'inverse, il est encore un peu tôt pour considérer l'utilisation de la 5G dans les réseaux contraints. La cinquième génération des technologies de téléphonie mobile n'apporte pas encore de nouvelles solutions pour ces réseaux, et son infrastructure est encore trop peu déployée pour une utilisation à grande échelle. Les technologies LTE-M et NB-IoT proposent toutes les deux des mécanismes et des performances intéressantes. Elles disposent déjà d'une couverture mondiale conséquente, qui devrait s'améliorer dans les années à venir. Choisir entre les deux est une question de compromis : LTE-M permet de transmettre des données plus volumineuses que NB-IoT, mais impose un coût énergétique plus important. Côté couverture, nous avons pu voir sur la figure 2.3 qu'en fonction des pays, il n'y a des fois qu'une seule des deux technologies qui soit disponible.

Il semblerait donc que les technologies LTE-M et NB-IoT soit complémentaires, et plus à même de répondre à différentes contraintes lorsqu'elles

sont utilisées conjointement. Il est facile d'imaginer un réseau où les nœuds utiliseraient NB-IoT pour les transmissions régulières, et LTE-M pour les données exceptionnellement larges, telles que pour une mise à jour du système. Le matériel pour ce genre d'utilisation est même déjà disponible, par exemple le module XBee3 de Digi [80] dispose à la fois des technologies LTE-M et NB-IoT.

[80]: Digi, XBee 3 Cellular LTE-M/NB-IoT Modem Datasheet. https://www.digi.com/resources/library/datasheets/ds_xbee3-cellular-lte-m-nb-iot. Accessible au 02-07-2021.

2.4 L'utilité des réseaux multitechnologies

Les technologies de communication sans fil à longue portée disposent de nombreux avantages. La portée de communication est bien plus grande que les technologies sans fil classiques, ce qui permet également de simplifier la structure et la logique du réseau. En conséquence, ces technologies sont l'objet d'une attention soutenue de la part de la communauté scientifique et des industriels depuis plusieurs années. Elles sont une solution de connectivité particulièrement intéressante pour les réseaux contraints, tels que les réseaux de capteurs sans fil, en raison de leur grande portée et de la faible consommation énergétique qu'elles imposent. Chacune dispose de performances différentes, en fonction du cas d'utilisation et de l'environnement considérés. En conséquence, un nombre important de technologies et de normes différentes ont vu le jour, et sont aujourd'hui disponibles.

Le Graal sans fil serait donc une légende... ?

Dans ce chapitre, nous avons introduit la plupart des technologies à longue portée utilisables en date de rédaction de ce manuscrit. Nous avons présenté les caractéristiques de chacune, et les informations techniques associées disponibles. Les performances en termes de débit, portée, volume de donnée transportable, etc. sont des facteurs qu'il est important de prendre en compte dans la conception et le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil. Ce ne sont en revanche pas les seuls critères à considérer, c'est pourquoi nous avons également établi un classement et une comparaison des différentes technologies vis-à-vis de leur consommation énergétique, couverture, occupation du spectre de fréquence et coût monétaire. Également, sur la base des informations techniques compilées et de la classification établie plus tôt, nous avons proposé un diagramme de décision simplifié pour orienter le choix d'une technologie de communication à longue portée en fonction des contraintes du cas d'application considéré.

La conclusion de ce chapitre est donc la suivante : bien qu'il existe de nombreuses technologies de communication différentes, chacune étant plus adaptée à certains cas d'utilisation que les autres, elles font toutes face à plusieurs limitations qui leur sont propres. Lors du choix d'une technologie pour la conception et le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil, les compromis sont donc inévitables, et limitent ainsi les capacités et possibilités offertes par les réseaux.

Un outil multifonction adaptatif

Cependant, une autre possibilité semble être envisageable, comme nous l'avons introduit avec l'exemple des technologies LTE-M et NB-IoT. Ces deux dernières, utilisées de façon conjointe et interchangeable en fonction des besoins, se révèlent complémentaires, et permettent ainsi de répondre de façon appropriée à plus de besoins et d'utilisations. Par contre, cette combinaison technologique fait toujours face à des restrictions, comme l'impossibilité d'étendre la couverture du réseau à une zone isolée, puisque que ces technologies utilisent une partie du spectre des radiocommunications dont l'utilisation est soumise à autorisation.

Mais comme nous l'avons expliqué précédemment, une des forces des technologies utilisant les bandes de fréquences ISM est de ne pas être soumises à des restrictions légales aussi fortes. Dans ce cas, pourquoi ne pas concevoir des nœuds mixtes disposant de technologies de téléphonie mobile est de technologies ISM afin de profiter de pouvoir étendre l'infrastructure ISM du réseau lorsque celle de la téléphonie mobile est insuffisante? De même, les communications nœuds à nœuds n'étant pas permises avec les technologies de la téléphonie mobile, on pourrait utiliser des technologies ISM afin que les nœuds s'organisent en réseau multisaut, que ce soit pour profiter de routes offrant de meilleures performances ou pour offrir une couverture à un nœud voisin isolé.

En poussant cette réflexion jusqu'au bout, il serait extrêmement bénéfique, et ce, sur de nombreux aspects, que les nœuds aient la possibilité de piocher dans une réserve de technologies de communication, afin de s'adapter à leurs besoins et contraintes individuels. Comme nous l'avons vu plus tôt, les outils matériels requis pour une telle utilisation sont de surcroît déjà existants. Cependant, nous ne disposons pas encore des outils logiques adaptés à cet emploi. C'est donc dans l'optique de combler ce manque que nous proposons dans le chapitre suivant un nouveau protocole de routage, adapté aux nœuds et aux réseaux disposant de plusieurs technologies de communication.

TABLE 2.2 – Tableau récapitulatif des technologies présentées dans ce chapitre.

Technologie	Sigfox	LoRaWAN	Ingenu	Telensa	LTE-M	NB-IoT	EC-GSM-IoT
Modulation	UNB DBPSK GFSK	CSS	RMPA- DSSS CDMA	UNB 2-FSK	16QAM	QPSK	GMSK
Bandes de fréquence	Sub-GHz EU 868 MHz US 902 MHz	Sub-GHz EU 433 MHz 868 MHz US 915 MHz Asia 430 MHz	2,4 GHz	Sub-GHz EU 868 MHz US 915 MHz Asia 430 MHz	Sous licence 700-900 MHz	Sous licence 700-900 MHz	Sous licence 800-900 MHz
Débit	Vers le haut 100 bps Vers le bas 600 bps	0,3-37,5 kbps FSK 50 kbps	Vers le haut 78 kbps Vers le bas 19,5 kbps	Vers le haut 62,5 bps Vers le bas 500 bps	1 Mbps	Vers le haut 158 kbps Vers le bas 106 kbps	70-240 kbps
Portée	Urbain 10 km Rural 50 km	Urbain 5 km Rural 15 km	Urbain 15 km Ligne de vue 500 km	Urbain 1 km	11 km	15 km	15 km
Couche liaison de données	ALOHA	ALOHA	CDMA	Inconnu	FDMA OFDMA	FDMA OFDMA	CDMA
Topologie	étoile	étoile d'étoiles	étoile arbre	étoile	étoile	étoile	étoile
Taille des données	Vers le haut 12 octets Vers le bas 8 octets	250 octets	10 kilo octets	64 kilo octets	Inconnu	Vers le haut 125 octets Vers le bas 85 octets	Inconnu
Aspects propriétaires	Couches physique et liaison de données	Couche physique	Totalité de la pile	Totalité de la pile	Totalité de la pile	Totalité de la pile	Totalité de la pile
Modèle de déploiement	Réseau opérateur	Réseau privé et opérateur	Réseau privé	Réseau privé	Réseau opérateur	Réseau opérateur	Réseau opérateur

Protocole de routage pour les réseaux multitechnologies

3

3.1 Réseaux de capteurs sans fil multitechnologies

Les réseaux de capteurs sans fil, que nous avons introduit dans le chapitre 1, se basent généralement sur l'utilisation d'une seule technologie de communication sans fil, ou "Radio Access Technology" (RAT), dans un même réseau. La topologie d'un réseau varie en fonction de la technologie utilisée : par exemple, la plupart des technologies que nous avons présentées dans le chapitre 2 permettent la formation de réseaux en étoile, où les nœuds communiquent avec un même coordinateur central. À l'inverse, un réseau basé sur la norme 802.15.4 de l'IEEE [14] peut prendre une forme de réseau maillé, ou réseau "mesh". Dans ce cas, tous les nœuds sont connectés en pair à pair, et relayent leurs messages de saut en saut, d'où l'appellation de réseau multisaut.

Chaque topologie et chaque technologie possèdent chacune leurs avantages et limitations. Les compromis sont obligatoires et les réseaux se retrouvent donc limités sur certains critères : couverture, débit, délai, etc. Des besoins de communication spécifiques, tels que d'importants volumes de données ou des données intolérantes au délai sont ainsi impossibles à respecter pour les technologies les plus limitées. Ainsi, dans l'état actuel, les réseaux de capteurs sans fil doivent être conçus spécifiquement pour et se cantonner à un cas d'utilisation à la fois. Dans ces conditions, difficiles en sus de composer avec les imprévus, tels que les intempéries météorologiques, qui impactent lourdement la qualité des communications sans fil.

Improviser, adapter, surmonter

Dans l'optique de surmonter une partie des limitations des réseaux de capteurs sans fil, nous proposons de concevoir ce que nous appelons des réseaux multitechnologies, de l'anglais "Multiple Technology Network" (MTN). Dans de tels réseaux, chaque nœud aurait à sa disposition plusieurs technologies de communication sans fil. De cette façon, en fonction des performances et des coûts associés à chaque technologie et chaque route disponible, chaque nœud pourrait sélectionner et utiliser celles qui sont les plus adaptées à sa propre situation et ses besoins de communication. Les nœuds ne seraient plus cantonnés à une seule topologie : une topologie en étoile pourrait par exemple être favorisée lorsque les conditions sont favorables afin de minimiser la complexité du réseau et sa consommation énergétique. Pour illustrer cela, nous pouvons voir une représentation conceptuelle simplifiée sur la figure 3.1. Ici, le nœud A a la possibilité d'utiliser les technologies Sigfox, LTE-M et NB-IoT, tandis que le nœud B peut utiliser uniquement les technologies de la téléphonie mobile LTE-M et NB-IoT. Le nœud C lui, est hors de portée de communication des stations de base disponibles. Pour débloquer ce genre de situations, dans un réseau multitechnologie les

3.1 Réseaux de capteurs sans fil multitechnologies . . .	41
3.2 Caractérisation générale des protocoles de routage	43
3.3 Travaux connexes et état de l'art	47
3.4 Bases et fondations protocolaires	49
3.4.1 Modèle réseau considéré .	49
3.4.2 Hypothèses sur la pile de communication	51
3.4.3 Notations utilisées	51
3.5 Mécanismes et opérations de routage	52
3.5.1 Déroulement d'un cas d'exemple	53
3.5.2 Contenu et structure d'un paquet	54
3.5.3 Réception et construction des routes	55
3.5.4 Classement et sélection des routes	56
3.5.5 Diffusion et propagation des routes	57
3.6 Adaptativité et méthode de décision multiattribut .	58

[14] : « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks ». In : *IEEE Std 802.15.4* (2020)

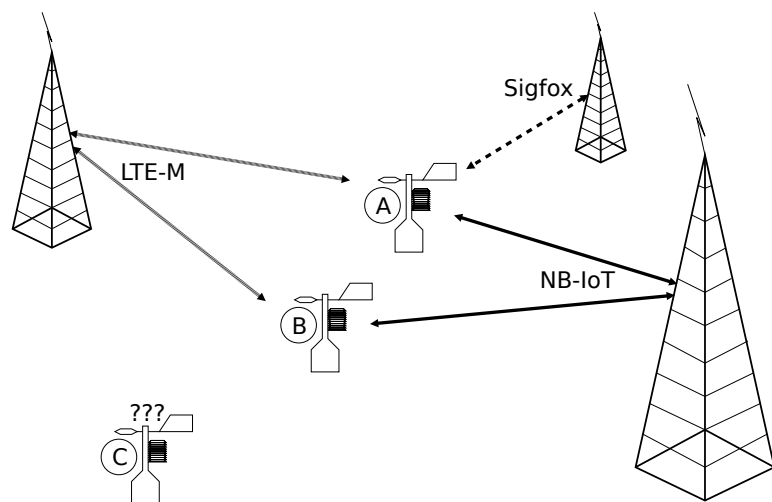


FIGURE 3.1 – Représentation conceptuelle simplifiée d'un réseau multitechnologie.

nœuds auraient également la possibilité de s'organiser afin de former des réseaux multisauts, comme pour palier un défaut de couverture dans le cas du nœud C, qui pourrait ainsi joindre le nœud B grâce à l'utilisation d'une technologie tierce.

Dans le temps, si la qualité ou la disponibilité d'une route sélectionnée devait venir à décroître, en raison par exemple d'un changement climatique ou d'une panne, les nœuds seraient capables de recalculer la solution la plus appropriée à leur nouvelle situation afin de s'adapter en conséquence. Aussi, dans ce genre de réseaux, il serait possible de faire cohabiter des nœuds associés à des cas d'utilisation différents, voir plusieurs cas d'utilisation différents dans un même nœud. En fonction de l'utilisation, les besoins de communications varient, mais ces variations seraient prises en compte dans le processus de sélection des routes, permettant ainsi d'utiliser les technologies et les chemins les plus adaptés.

Pour des raisons évidentes de logistique, les nœuds se doivent de gérer de façon autonome leur hétérogénéité technologique. Il est ainsi nécessaire qu'ils soient capables de décider par eux-mêmes quelles routes et quelles technologies sont les plus appropriées à leurs besoins. Pour cela, il nous faut donc un protocole de routage qui soit capable de prendre en compte les performances et coûts associés à chaque route. Aussi, le basculement vers la technologie sous-jacente utilisée par une route devra se faire de façon transparente et automatisée. Cependant, les solutions existantes ne permettent pas de prendre en compte la multiplicité technologique des nœuds, et de profiter pleinement du potentiel que cela apporte.

Comment gérer efficacement une infestation de RAT dans son réseau

Pour combler ce manque, nous proposons dans ce chapitre notre protocole "Routing Over Different Existing Network Technologies" (RODENT). Conçu pour effectuer le routage dans les réseaux multitechnologies, il permet de prendre en compte toutes les possibilités de communication technologiques à la disposition de chacun des nœuds dans le calcul des

routes. Pour cela, il se base sur une liste des liens disponibles entre le nœud courant et ses voisins, autres nœuds ou stations de base. De tels liens sont associés à des performances et des coûts donnés, et possèdent une notation énergétique, de débit, etc. La table de routage de chaque nœud est assemblée à partir de cette base : les routes sont obtenues en combinant les valeurs disponibles dans cette liste de liens et les valeurs associées aux routes partagées par le voisinage du nœud. À partir de sa table de routage, un nœud est ensuite capable de classer la totalité des routes disponibles grâce à une méthode de décision multicritère que nous détaillerons dans le chapitre 4. Les critères pris en compte pour déterminer quelle route est considérée comme la meilleure sont établis en fonction du cas d'utilisation considéré et des besoins de communication associés, comme la taille des données, l'importance du délai, etc. De cette façon, les nœuds sont capables de sélectionner et d'utiliser la route la plus adaptée à leurs besoins et situations de façon régulière. Contrairement aux travaux connexes, RODENT offre une méthode dynamique et flexible d'améliorer les capacités et des réseaux de capteurs sans fil sans nécessiter une infrastructure dédiée du côté opérateur.

Afin de mesurer les performances de notre protocole, nous avons choisi d'effectuer une évaluation expérimentale. Pour cela, nous avons conçu un prototype de réseau multitechnologie basé sur des modules FiPy de Pycom [84] exécutant une implémentation en MicroPython de RODENT. Les résultats collectés montrent que cela permet d'améliorer la flexibilité du réseau ainsi que sa résistance aux pannes. Nous détaillerons nos expériences dans le chapitre 5, et spécifiquement les résultats dans la section 5.4.

[84]: *FiPy specsheet*. Version 1.0. Pycom. 2018

La suite de ce chapitre est organisée de la façon suivante. Tout d'abord, nous introduisons un peu de contexte relatif aux protocoles de routage dans la section 3.2, afin de positionner RODENT dans cet écosystème. Nous présentons ensuite l'état de l'art et les travaux connexes aux réseaux multitechnologies dans la section 3.3. Dans la section 3.4 nous présentons le modèle réseau considéré ainsi que les hypothèses sur lesquelles RODENT est basé. Nous détaillons son fonctionnement interne et les opérations de routage qu'il effectue dans la section 3.5. Pour finir, la section 3.6 récapitule et conclue ce chapitre.

3.2 Caractérisation générale des protocoles de routage

Il existe de nombreux protocoles de routage distincts, basés sur des principes variés et destinés à des types de réseau informatique différents. On distingue ainsi deux grandes familles de protocoles de routage : les protocoles de routage interne, de l'anglais "Interior Gateway Protocol" (IGP) et les protocoles de routage externe, de l'anglais "Exterior Gateway Protocol" (EGP).

Du routage oui, mais en-dedans ou en-dehors du réseau ?

Les protocoles de routage internes dirigent les opérations de routage entre plusieurs équipements faisant partie d'un même réseau, et entre

[85]: Y. REKHTER, T. LI et S. HARES. *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. RFC 4271. 2006

réseaux différents, permettant à deux nœuds de réseaux différents de communiquer. Cela est possible à condition que les deux réseaux distincts fassent partie d'un même système autonome. Schématiquement, un système autonome, de l'anglais "Autonomous System" (AS), est un ensemble de plusieurs réseaux au sein duquel la communication se fait de façon autonome grâce à l'utilisation d'un protocole de routage interne. Interconnecter différents systèmes autonomes, notamment dans le réseau Internet, est le rôle d'un protocole de routage externe. Le plus connu de cette famille, et utilisé dans le réseau Internet, est "Border Gateway Protocol" (BGP) [85]. Le routage au sein des réseaux de capteurs sans fil se fait entre plusieurs nœuds d'un même réseau, nous nous intéressons donc ici aux protocoles de routage interne et leurs caractéristiques. On caractérise généralement les protocoles de routage interne selon trois aspects : la connaissance du réseau que possède chaque nœud, la stratégie de construction des routes et les instructions de relayage.

Vision globale ou locale ?

Concernant la connaissance du réseau détenue par chaque nœud, il existe de nombreuses techniques : routage géographique, hiérarchique, hybride, etc. On distingue cependant deux paradigmes importants : les protocoles de routage à vecteur de distance et les protocoles de routage à état de lien. Lors de l'utilisation d'un protocole à vecteur de distance, un nœud ne possède qu'une vue "locale" du réseau, c'est-à-dire de lui-même et de son voisinage direct. Chaque nœud annonce les destinations vers lesquelles il est en mesure de router des données, ainsi que la distance en nombre de sauts à laquelle il se situe de chacune de ces destinations, d'où le terme vecteur de distances. Ainsi, en se basant sur la connaissance de son voisinage direct, un nœud est capable de choisir son prochain saut pour la destination qu'il vise, c'est-à-dire le nœud voisin auquel il adressera son message au niveau liaison, le routage se faisant ainsi de proche en proche. Dans les réseaux IP communs, l'usage des protocoles à vecteur de distances a globalement été délaissé au profit des protocoles à état de lien. La faute, en partie, à la base des protocoles à vecteur de distances, l'algorithme de Bellman-Ford-Moore, qui ne permet pas de prévenir son réseau des boucles de routage. À l'inverse, un nœud respectant un protocole à état de lien possède une vision globale de la topologie et des entités composant le réseau. Sur la base de cette "carte", le nœud construit un graphe du réseau. Ainsi, chaque nœud dispose des informations nécessaires pour calculer les meilleures routes vers les destinations qu'il cherche à joindre.

En règle générale, les protocoles à vecteur de distances sont plus simples à implémenter et opérer. Les protocoles à état de liens, souvent plus complexes, et requérant une puissance de calcul et une capacité de stockage plus importantes, offrent néanmoins généralement de meilleures performances, et leur utilisation est donc largement préférée dans les réseaux IP. Parmi les protocoles célèbres de cette famille, on peut citer "Open Shortest Path First" (OSPF) et "Intermediate System to Intermediate System" (IS-IS). Cependant, les protocoles à état de lien nécessitent un trafic de contrôle relativement lourd, particulièrement lorsqu'ils sont utilisés dans des réseaux "instables", ou l'état des liens varie fréquemment, et doit donc être mis à jour régulièrement. L'utilisation des protocoles à

vecteur de distances leur est donc parfois préférée, car leur relativement faible complexité en fait des candidats intéressants pour réaliser les opérations de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Mieux vaut prévenir que guérir... sauf quand ça coûte trop cher ?

Penchons-nous à présent sur un second aspect important des protocoles de routage : la stratégie de construction des routes. Particulièrement, la question de "quand" construire les routes. Ainsi, on peut dégager deux stratégies contraires : les protocoles de routage réactifs, et les protocoles de routage proactifs. Le principe d'un protocole réactif est de construire les routes à la demande. Ainsi, lors de l'initialisation de la communication avec une nouvelle destination, les informations nécessaires sont collectées pour trouver et utiliser la meilleure route. À l'inverse, un protocole proactif essaye de maintenir les informations de routage à jour en permanence, et de déterminer les routes optimales pour toutes les destinations qu'elles soient utilisées ou non. Évidemment, le choix entre protocoles réactifs et proactifs est une question de compromis, entre la latence, plus longue pour les protocoles réactifs qui imposent un délai dû à la construction de la route avant son utilisation, et la consommation énergétique, plus élevée lors de l'utilisation d'un protocole proactif, principalement due à un trafic de contrôle important.

Qui c'est qui s'occupe du routage déjà... ?

Se pose à présent la question du routage : est ce que le chemin emprunté par un message devrait être déterminé par la source du message en question, ou au contraire est-ce que la source devrait uniquement choisir le prochain nœud à qui envoyer le message et qui devra le relayer, et ainsi de suite de sauts en saut jusqu'à la destination finale du message ? On appelle la première approche un routage par la source, et la seconde un routage de proche en proche.

Lors d'un routage par la source, la source d'un message indique la totalité du trajet entre elle-même et la destination finale du message, ainsi que le détail de toutes les étapes, dans l'en-tête du message en question. De cette façon, les nœuds intermédiaires peuvent simplement se contenter de relayer le message au prochain nœud indiqué dans l'en-tête du message, sans même avoir recours à une table de routage. Cela nécessite cependant que chaque nœud source du réseau ait une connaissance extensive de la topologie du réseau, et risque ainsi d'engendrer une importante occupation de la mémoire de stockage allouée à chaque nœud. Pour y remédier, il est possible de déléguer le routage par la source à un unique nœud coordinateur dans le réseau. De cette façon, les autres nœuds n'ont qu'à retenir à quel voisin ils doivent adresser leurs messages pour les rapprocher et les transmettre au coordinateur, qui s'occupera à son tour de retransmettre chaque message après avoir déterminé et indiqué dans l'en-tête du message le meilleur chemin pour atteindre sa destination. Nous pouvons voir une illustration de cette stratégie de routage dans la figure 3.2.

La stratégie opposée est ce qu'on appelle un routage proche en proche. Dans ce cas, chaque nœud du réseau construit et maintient sa propre

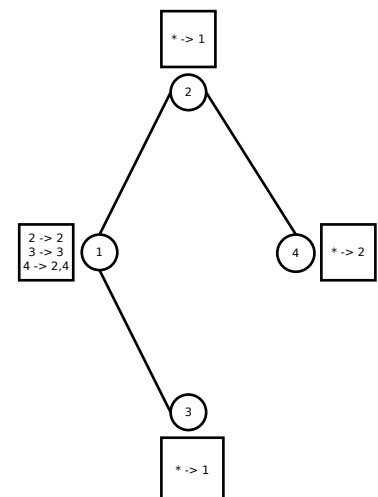


FIGURE 3.2 – Illustration de la stratégie de routage par la source : ici, le nœud 1 est le coordinateur du réseau, et connaît toutes les routes du réseau, tandis que les autres nœuds se contentent de lui faire remonter tous leurs messages qu'il enverra sur le bon chemin.

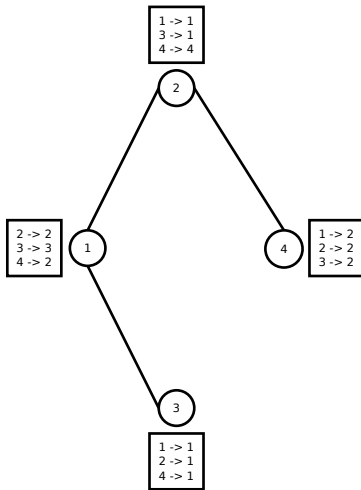


FIGURE 3.3 – Illustration de la stratégie de routage proche en proche : chaque nœud maintient sa table de routage en fonction des différentes destinations dans le réseau.

table de routage, en se basant sur les informations qu'il est capable de collecter. À chaque destination, est associé un voisin : le prochain saut, qui sera capable de rapprocher le message de sa destination finale. Un nœud source, à l'envoi d'un message, adresse son message au voisin approprié en se basant sur sa table de routage. Le nœud voisin en question, après réception du message, vérifie dans un premier temps qu'il n'est pas lui-même la destination finale. Dans quel cas, il vérifie sa table de routage et relaye le message, et ainsi de suite jusqu'à ce que le message arrive à bon port. Nous pouvons voir une illustration de cette stratégie de routage dans la figure 3.3.

L'utilisation d'un nœud coordinateur auquel on délègue le routage par la source permet de minimiser l'occupation de la mémoire de stockage vis-à-vis des informations de routage pour les autres nœuds du réseau, cependant la taille du trafic de contrôle est accrue à cause des en-têtes des messages qui peuvent rapidement devenir très longs dans un réseau de taille considérable. Surtout, cette approche souffre des problèmes classiques des solutions centralisées : dans le cas où le coordinateur central n'est plus joignable, par exemple, dans le cas d'une panne électrique ou d'une importante congestion, l'ensemble du réseau s'en retrouve paralysé. À l'inverse, le routage de proche en proche propose une approche décentralisée, de sorte que les nœuds puissent s'adapter au mieux de façon dynamique aux pannes imprévues et déterminer une route alternative.

Différents protocoles pour différents contextes

Il existe de nombreux protocoles de routage différents pour les réseaux de capteurs sans fil. Chacun propose un fonctionnement différent et se base sur un ensemble de stratégies diverses, et ils sont de cette façon plus adaptés à certains cas d'utilisation qu'à d'autres. Tous les lister ici serait fastidieux, mais pour l'exemple, et pour illustrer la classification sus-mentionnée, nous pouvons citer trois des protocoles les plus connus pour effectuer le routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Le premier est "Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector Routing Protocol - Next Generation" (LOADng) [86]. LOADng est un protocole de routage à vecteur de distances, réactif, et de proche en proche. Il est en grande partie dérivé du protocole de routage "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing" (AODV), conçu pour les réseaux ad hoc. Le second s'appelle "IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks" (RPL) [87]. RPL est un protocole de routage à vecteur de distances, proactif, et de proche en proche, mais qui a également la possibilité de fonctionner en mode routage par la source. RPL est également la norme de l'"Internet Engineering Task Force" (IETF) pour le routage dans les réseaux contraints. Le troisième protocole que l'on peut citer est "Optimized Link State Routing Protocol" (OLSR) [88]. OLSR est un protocole de routage à état de lien, proactif, et de proche en proche. OLSR résulte des recherches d'Inria, et est considéré par l'IETF comme un des protocoles de base pour les réseaux de capteurs sans fil.

[86]: International Telecommunication UNION. *Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks*. Recommendation ITU-T G.9903. 2017

[87]: T. WINTER, P. THUBERT, A. BRANDT, J. HUI, R. KELSEY, P. LEVIS, K. PISTER, R. STRUIK, JP. VASSEUR et R. ALEXANDER. *RPL : IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. RFC 6550. 2012

[88]: T. CLAUSEN et P. JACQUET. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. RFC 3626. 2003

3.3 Travaux connexes et état de l'art

S'il existe de nombreux protocoles de routage bien connus et régulièrement utilisés, aucun n'est particulièrement adapté pour effectuer le routage dans des réseaux multitechnologies. De façon générale, il existe peu d'outils logiques conçus pour cette utilisation. En conséquence, plusieurs travaux ont été poursuivis dans le but d'offrir de nouvelles solutions appropriées. Dans cette section, nous présentons succinctement les travaux connexes aux réseaux multitechnologies disponibles dans la littérature scientifique.

Un opérateur réseau virtuel

Les auteurs de l'article [89] proposent une architecture multimodale pour l'internet des objets. Celle-ci se base sur des nœuds utilisant de façon conjointe plusieurs technologies de communication sans fil de la bande sub-GHz, ainsi qu'une couche d'abstraction qui permet de fédérer les différentes technologies en une seule couche réseau virtuelle. Un contrôleur réseau hétérogène occupe la même fonction du côté opérateur. La plateforme matérielle est détaillée, ainsi qu'un mécanisme de compression des données basé sur le protocole "Static Context Header Compression" (SCHC) de l'IETF. Puisque cela permet l'utilisation de multiples technologies dans le réseau, la flexibilité et les performances du réseau sont améliorées. Cependant, cela nécessite de déployer un opérateur réseau virtuel spécifique. De plus, ce travail ne se concentre pas et ne détaille donc pas le processus de routage dans le réseau.

Proposant une idée assez proche, l'article [90] présente une architecture pour un opérateur réseau virtuel situé dans le cloud. Celui-ci permet de gérer l'aspect multimodal des communications, et s'occupe ainsi de la configuration et de la gestion des équipements multitechnologies. Ici, l'accent est mis sur les couches supérieures de la pile protocolaire, et l'article se concentre sur les opérations côté opérateur plutôt que du côté des nœuds. Également, cette proposition nécessite la mise en place d'une infrastructure spécifique du côté opérateur.

Une couche liaison pour les gouverner tous

À l'inverse, dans l'article [91], les auteurs détaillent un protocole de sélection de chemin entre plusieurs couches liaison de données. Une couche de convergence fédère les différentes couches liaison associées aux différentes technologies. Le mécanisme de sélection des liens se veut écologique, et cherche ainsi à minimiser la consommation énergétique ainsi qu'à réduire l'utilisation des fréquences radios. Ce travail se concentre sur la couche liaison de données, et sur l'aspect écologique du protocole, mais ne donne aucune indication vis-à-vis de la gestion des différentes technologies au niveau du routage et de la couche réseau.

Dans la même idée, l'article [92] présente un système pour la gestion des réseaux multitechnologies nommé ORCHESTRA. Ce dernier permet le transfert dynamique entre les différentes technologies des nœuds, grâce ici aussi à l'utilisation d'une couche liaison virtuelle fédérant les couches liaisons des technologies. Du côté opérateur, un contrôleur central gère

[89]: Jeroen FAMAËY, Rafael BERKVEN, Glenn ERGEERTS, Eli De POORTER, Floris Van den ABEËLE, Tomas BOLCKMANS, Jeroen HOEBEKE et Maarten WEYN. « Flexible Multimodal Sub-Gigahertz Communication for Heterogeneous Internet of Things Applications ». In : *IEEE Communications Magazine* 56.7 (2018)

[90]: Jeroen HOEBEKE, Jetmir HAXHIBEQIRI, Bart MOONS, Matthias VAN EEGHEM, Jen ROSSEY, Abdulkadir KARAGAAC et Jeroen FAMAËY. « A Cloud-based Virtual Network Operator for Managing Multimodal LPWA Networks and Devices ». In : *2018 3rd Cloudification of the Internet of Things (CIoT)*. 2018

[91]: Olivier BOUCHET, Abdesselem KORTEBI et Mathieu BOUCHER. « Inter-MAC green path selection for heterogeneous networks ». In : *2012 IEEE Globecom Workshops*. 2012

[92]: Tom DE SCHEPPER, Patrick BOSCH, Ensar ZELJKOVIĆ, Farouk MAHFOUDHI, Jetmir HAXHIBEQIRI, Jeroen HOEBEKE, Jeroen FAMAËY et Steven LATRÉ. « ORCHESTRA : Enabling Inter-Technology Network Management in Heterogeneous Wireless Networks ». In : *IEEE Transactions on Network and Service Management* 15.4 (2018)

les décisions logiques dans le réseau. Cette proposition permet d'offrir un ensemble de couches matérielles virtuellement unifiées pour les couches supérieures de la pile protocolaire, et de partager la charge de travail dans le réseau. Cependant, de la même façon que pour l'article précédent, ce travail se concentre sur la gestion multitechnologique des nœuds au niveau de la couche liaison de données, et très peu d'informations sont offertes concernant la gestion du routage dans un tel réseau.

[93]: Tayyaba IRSHAD, Rafi-us SHAN, Raja Wasim AHMAD, Abbas KHALID et Siti Hafizah AB HAMID. « Multi-Rat Based Adaptive Quality of Service (QoS) Management in WBAN ». In : *Malaysian Journal of Computer Science* 33.4 (2020)

L'article [93] propose une plateforme multitechnologie adaptative pour les réseaux "Wireless Body Area Network" (WBAN). Le but est d'obtenir un réseau à finalité médicale capable d'adapter les technologies utilisées en fonction des caractéristiques des données mesurées par les capteurs. Pour cela, les auteurs définissent une couche de convergence entre les couches liaison de données et réseau, qui offre une interface unifiée et simplifiée par les couches applicatives, un débit adaptatif, etc. Ici encore, ni le routage ni les avantages que peuvent apporter l'utilisation de routes multitechnologies ne sont considérés ou mis à profit.

Adaptabilité et sélection multicritère

[94]: Silki BAGHLA et Savina BANSAL. « Power Consumption-Based Dynamic Network Selection in Heterogeneous Networks ». In : *National Academy Science Letters* 43.1 (2020)

Les auteurs de l'article [94] proposent une méthode de sélection dynamique entre plusieurs technologies. Cette dernière est basée sur la méthode de décision multicritère VIKOR, qui permet de prendre en compte plusieurs facteurs dans la sélection technologique. Le but est d'offrir une méthode de transfert intercellulaire vertical pour les réseaux mobiles. Le principal critère de décision ici est la consommation énergétique des technologies. Cependant, ici, la méthode permet de choisir une technologie à utiliser, mais ne permet pas de choisir une route, la sélection ne prend donc en compte l'aspect multitechnologie que sur un seul saut, limitant ainsi le potentiel des réseaux multitechnologies.

[95]: Alaa AWAD, Amr MOHAMED et Carla-Fabiana CHIASSERINI. « Dynamic Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks : A user-centric scheme for improved delivery ». In : *IEEE Consumer Electronics Magazine* 6.1 (2017)

Dans la même lignée, l'article [95] décrit une méthode de sélection entre plusieurs technologies. Celle-ci se base sur la résolution d'un problème d'optimisation linéaire grâce à une approche de théorie des jeux. La solution prend également en compte de façon dynamique les changements d'importance relative aux critères de sélection, tels que le coût monétaire, la consommation énergétique, etc. Les objectifs monétaires et énergétiques sont spécifiés par l'utilisateur final. De la même façon que la contribution citée précédemment, cette solution ne permet qu'une sélection technologique sans prendre en compte une multiplicité de voisins et de routes.

L'ensemble des travaux sus-mentionnés offrent des propositions pouvant indubitablement accroître la flexibilité et les performances des réseaux de capteurs sans fil. Cependant, ils sont limités, se concentrant respectivement soit sur les couches supérieures de la pile protocolaire soit sur la couche liaison de données. Certaines propositions assouplissent les limites des réseaux de capteurs au prix de l'introduction de nouvelles restrictions, comme la nécessité d'utiliser une infrastructure réseau dédiée, notamment du côté opérateur. Cela n'est pas forcément une option, particulièrement lors de l'utilisation de technologies gérées par des opérateurs externes, telles que Sigfox ou les technologies de la téléphonie mobile.

Le chaînon manquant dans ces propositions semble être une couche réseau conçue spécifiquement pour les réseaux multitechnologies. Ainsi, dans ce chapitre, nous proposons notre protocole de routage, adapté à des nœuds disposant de plusieurs technologies de communication. Celui-ci permet de tirer pleinement parti des possibilités offertes par l'utilisation de multiples technologies, en termes d'adaptabilité, d'amélioration des performances et de résilience aux pannes. De plus, notre proposition ne nécessite pas d'infrastructure dédiée supplémentaire, notamment du côté opérateur, et l'utilisation de nœuds disposant de plusieurs technologies est le seul prérequis.

3.4 Bases et fondations protocolaires

Notre proposition, RODENT, a été conçue pour réaliser le routage dans un modèle de réseau particulier. De plus, nous faisons plusieurs hypothèses sur le fonctionnement et les aptitudes des couches inférieures à la couche réseau dans la pile protocolaire de communication. Au cours de cette section, nous détaillerons le modèle réseau que nous avons considéré, ainsi que les hypothèses sur lesquelles nous nous sommes basés. Nous introduisons également les notations relatives à notre protocole de routage et qui seront utilisées dans le reste ce manuscrit.

3.4.1 Modèle réseau considéré

Au sein des réseaux de capteurs sans fil, les nœuds suivent habituellement un ou plusieurs modèles de communication. Ces modèles reviennent fréquemment, et sont ainsi bien connus et clairement identifiés [96]. Pour la conception de notre protocole, nous sommes partis du principe que les nœuds communiquent en suivant un modèle dit "convergecast", dont on peut voir un modèle sur la figure 3.4. Dans un tel réseau, les nœuds envoient exclusivement des messages à destination d'un puits, et les communications ne transitent pas en sens inverse, ni ne sont destinées à un autre nœud. Les nœuds envoient des messages de données à leurs pairs uniquement pour que ces derniers relayent les informations jusqu'au prochain puits. C'est un modèle de réseau pertinent lorsque que l'on considère notre cas d'utilisation, l'agriculture connectée. Ici, les puits seront les différentes stations de base du réseau, et les nœuds cherchent à relayer les métriques mesurées afin que les informations soient communiquées aux agriculteurs.

Par définition, les nœuds faisant partie d'un réseau multitechnologie sont hétérogènes en termes de technologies de communication. Ainsi, il est possible que pour une même paire de nœuds, plusieurs liens de communication utilisant différentes technologies soient disponibles. Puisque qu'il nous est essentiel que tous les nœuds soient joignables, nous supposons qu'en considérant tous les liens de communication entre les nœuds et ceci indépendamment de la technologie sous-jacente, le réseau forme un graphe connecté.

Les réseaux multitechnologies peuvent potentiellement présenter une topologie multisaut, en fonction des besoins et des possibilités de chaque nœud. Un exemple est visible sur la figure 3.5, où le nœud B n'est

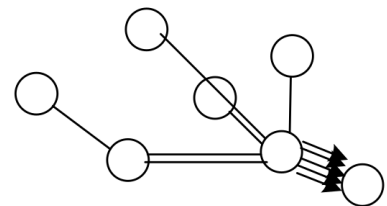


FIGURE 3.4 – Modèle de communication dit "convergecast" [96].

[96]: Nikolaos A. PANTAZIS, Stefanos A. NIKOLIDAKIS et Dimitrios D. VERGADOS. « Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 15.2 (2013)

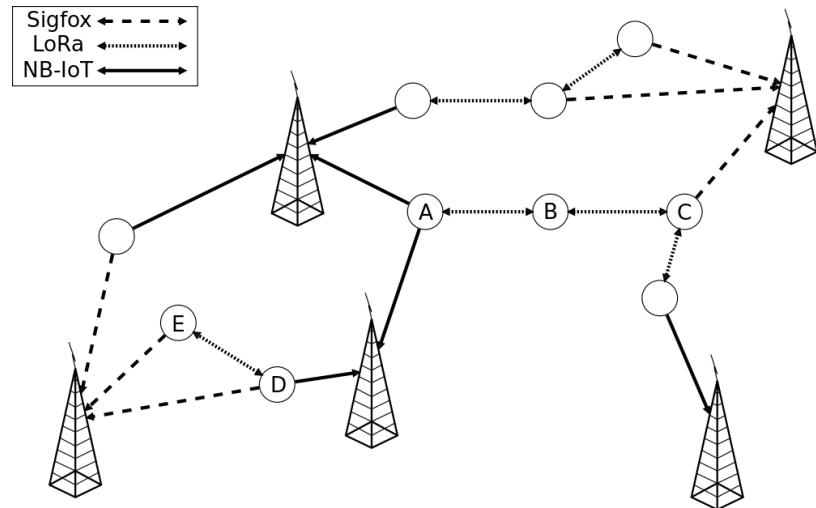


FIGURE 3.5 – Illustration d'un réseau multitechnologie, où chacun des nœuds est capable d'utiliser plusieurs technologies de communication pour joindre ses voisins.

pas à portée directe d'une station de base Sigfox ou NB-IoT. Il peut cependant transférer ses données à ses voisins A ou C via l'utilisation de LoRa, voisins qui pourront par la suite relayer les données de B grâce à l'utilisation d'une technologie de communication différente.

Des nœuds multifonctions et multibesoins

Également, nous laissons aux nœuds la possibilité de participer à un ou plusieurs cas d'utilisation différents. Les nœuds peuvent donc avoir plusieurs fonctions, telles que surveiller les variations de température et une surveillance vidéo simultanée. Dans ce cas, chaque nœud doit être capable de respecter un ou plusieurs ensembles de besoins de communication associés. Par exemple, pour un flux vidéo en temps réel, il est nécessaire d'utiliser une technologie disposant d'un débit suffisamment important, pour garantir un faible délai et une gigue stable. Pour émettre des alarmes, une technologie de communication avec un faible délai et un débit suffisant est requise, pour transmettre les données le plus rapidement possible. La sélection de route doit donc prendre en compte ces éléments et chercher à satisfaire du mieux possible les besoins de communication des nœuds. Le seul prérequis est que l'ensemble des nœuds du réseau doit connaître ces besoins de communication, qui dans notre proposition prennent la forme de vecteurs de besoins.

Afin de sélectionner la route la plus apte, notre protocole de routage va chercher à classer l'ensemble de routes disponibles. Ce classement se fait sur la base des valeurs associées à chacun des attributs considérés. Cependant, en fonction du cas d'utilisation, et des besoins de communication qui en découlent, les attributs n'ont pas la même importance. Pour transmettre un volume conséquent de données, il sera par exemple important de mettre la priorité sur un débit plus élevé. Pour refléter cette importance dans le classement, notre protocole nécessite en entrée un ensemble de poids par cas d'utilisation considéré. Chaque poids sera ainsi associé à un attribut, et représentera son importance relative dans le processus de décision. Nous appelons ces ensembles de poids des vecteurs de besoins, de l'anglais "Requirements Vector".

	Coût énergétique	Coût monétaire	Débit
Station de base Sigfox	12	102	22
Station de base NB-IoT	151	87	174
Noeud voisin E (via LoRa)	37	0	72

TABLE 3.1 – Matrice de lien LM_D .

3.4.2 Hypothèses sur la pile de communication

Les travaux pour une couche liaison de données adaptée aux réseaux multitechnologies sont déjà bien avancés, comme nous l'avons rapidement montré dans la section 3.3. Ainsi, dans nos recherches, nous nous sommes concentrés sur la couche réseau de la pile de communication, et plus spécifiquement sur le routage pour les réseaux multitechnologies. Nous supposons donc que les autres couches de la pile de communication sont constituées de protocoles adaptés aux réseaux multitechnologies. Particulièrement, nous faisons l'hypothèse que les couches physiques et liaisons sont capables d'évaluer la disponibilité, la qualité et la fiabilité des liens entre un nœud et ses voisins, qu'ils soient d'autres nœuds ou des stations de base. Nous supposons que ce processus est réalisable pour chacune des technologies utilisées par les nœuds du réseau multitechnologie. Ainsi, nous considérons que les protocoles des couches inférieures nous fournissent des mesures ou des estimations relatives aux coûts et performances de chacun des liens, tels que le coût énergétique, le débit, etc. Nous pensons que cette hypothèse est viable, car l'estimation de la qualité des liaisons radio dans les réseaux de capteurs sans fil est un sujet particulièrement bien étudié, comme on peut le voir par exemple dans l'article [97].

3.4.3 Notations utilisées

Dans cette sous-section, nous introduisons les notations qui seront utilisées au cours de ce chapitre et dans le reste de ce document.

Nous référons à un nœud i par la notation N_i . Les nœuds qui sont à portée de communication directe de N_i sont appelés nœuds voisins de N_i . L'ensemble des voisins de N_i est appelé voisinage de N_i , et est noté $NBR(i)$. Soit N_j un nœud voisin de N_i , c'est-à-dire tel que $N_j \in NBR(i)$. La notation $NBR(i)_j$ réfère explicitement à N_j en tant que voisin de N_i , et en sus $NBR(i)_j$ à forcément au moins un lien de communication en commun avec N_i . Un tel lien, s'il utilise de façon sous-jacente la technologie x , est noté L_{ij}^x . De la même façon, la route résultante entre N_i et qui passe par le lien L_{ij}^x est notée R_{ij}^x .

Matrices de lien et de route

Notre protocole se base sur une matrice de lien, ou table de liaison, et nous notons LM_i la matrice de lien de N_i . Cette dernière est constituée de deux éléments : les liens entre N_i et $NBR(i)$, ainsi que les attributs qui y sont associés. La taille de LM_i est ainsi directement dépendante de plusieurs facteurs : le nombre d'attributs pris en compte dans le processus, la quantité de nœuds faisant partie de $NBR(i)$ et le nombre de liens de communication existants entre N_i et les nœuds de $NBR(i)$. Pour illustrer cela par l'exemple, au regard de la situation de N_D visible sur

[97]: Nouha BACCOUR, Anis Koubâa, Luca MOTTOLA, Marco Antonio ZÚÑIGA, Habib YOUSSEF, Carlo Alberto BOANO et Mário ALVES. « Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In : *ACM Trans. Sen. Netw.* 8.4 (2012)

TABLE 3.2 – Matrice de route RM_D .

	Coût énergétique	Coût monétaire	Débit	Nombre de sauts
Station de base Sigfox	12	102	22	1
Station de base NB-IoT	151	87	174	1
Noeud voisin E (via LoRa)	49	102	94	2

TABLE 3.3 – Vecteurs de besoins relatifs à plusieurs cas d'utilisation.

	Coût énergétique	Coût monétaire	Débit
$RV_{surveillance}$	0.6	0.3	0.1
RV_{alarme}	0.1	0.1	0.8

la figure 3.5, N_D pourrait présenter une matrice de lien LM_D semblable à celle visible dans le tableau 3.1. Ici, LM_D se compose de tous les liens disponibles entre N_D et ses voisins, ainsi que les attributs associés.

En se basant sur LM_i et sur les informations partagées par $NBR(i)$, N_i est capable de constituer sa matrice de route. Pour N_i , nous notons la matrice de route, ou table de routage, RM_i . RM_i est composée de l'ensemble des attributs considérés dans le processus de routage ainsi que de l'ensemble des routes disponibles et utilisables par N_i . Les attributs composant RM_i sont relatifs aux critères pris en compte dans le routage, comme le nombre de sauts ou les coûts monétaire et énergétique totaux des routes. Pour ici aussi illustrer par l'exemple, N_D tel qu'il est visible sur la figure 3.5 pourrait disposer d'une matrice de route basée sur LM_D et notée RM_D semblable à celle représentée dans le tableau 3.2.

Histoire d'alourdir le tout...

Ce que nous appelons les vecteurs de besoins sont des ensembles de poids, relatifs à des cas d'utilisation particuliers, et dont les valeurs représentent l'importance de chaque attribut dans le processus de décision. Pour le cas d'utilisation y , nous notons RV_y le vecteur de besoins associé. Les poids d'un vecteur de besoins RV_y sont définis de telle sorte que $RV_y \{e_n \in RV_y \mid \sum_{n=1}^{|RV_y|} e_n = 1\}$, c'est-à-dire de façon à ce que la somme des poids d'un vecteur soit égale à un. Pour illustrer cela, deux vecteurs de besoins sont visibles dans le tableau 3.3. Pour l'exemple, on peut voir ici que pour $RV_{surveillance}$, vecteur de besoins relatif à une surveillance régulière générant un volume réduit de données, le poids accordé à l'économie énergétique est plus important que celui accordé au débit. Au final, après classement et sélection des meilleures routes, la meilleure route de N_i pour le cas d'utilisation y est notée BR_i^y .

3.5 Mécanismes et opérations de routage

Notre protocole de routage, RODENT, est conçu pour établir les routes utilisées dans un réseau multitechnologie. Ainsi, sa spécificité est de permettre la sélection et l'utilisation de routes utilisant potentiellement différentes technologies de communication sous-jacentes à chaque saut. Si l'on reprend la classification présentée dans la section 3.2, RODENT est un protocole de routage interne, à vecteur de distances, proactif et de proche en proche. Ce protocole exécute un ensemble de mécanismes et

d'opérations pour assurer le routage multitechnologie. Ainsi, dans cette section, nous allons détailler la structure des paquets utilisés ainsi que les mécanismes de construction, sélection et diffusion des routes, et nous illustrerons le fonctionnement de RODENT avec un exemple.

3.5.1 Déroulement d'un cas d'exemple

Afin d'illustrer le fonctionnement de RODENT par l'exemple, considérons les opérations de N_D et N_E visibles sur la figure 3.5, dont nous avons reproduit une sous-partie dans la figure 3.6 afin de faciliter la lecture. Dans un premier temps, N_D démarre sans aucune connaissance de son environnement. Après quelques opérations d'initialisation, comme le calcul de son identifiant indépendant, N_D commence la constitution de sa matrice de lien. Les couches physiques et liaisons de données de N_D exécutent des protocoles scannant le voisinage de N_D , afin de découvrir les liens disponibles entre N_D et l'ensemble des nœuds et stations de base de $NBR(D)$, et ceci pour chaque technologie de communication. Cela permet de constituer LM_D , que pour l'exemple, nous considérerons similaire au tableau 3.1. La découverte des liens entre un nœud et ses voisins, ainsi que leurs caractéristiques associées, de façon optimisée, et ce, afin de constituer la matrice LM_D , est un sujet de recherche à part entière, que nous n'avons malheureusement pas encore eu l'occasion d'approfondir dans nos travaux.

Une fois LM_D constituée, la couche réseau de N_D prend le relai et se base sur LM_D pour commencer à assembler la matrice de route RM_D . La première étape est de trouver les liens directs entre N_D et des stations de base disponibles dans LM_D . Ces liens sont convertis en route à un saut, et stockés dans la matrice RM_D . Ainsi, N_D se retrouve avec deux routes, à destination des stations de base Sigfox et NB-IoT. N_E pendant ce temps réalise les mêmes opérations, et se retrouve avec une unique route disponible à destination de la station de base Sigfox. Cette route est donc sélectionnée par N_E , qui la partage à son voisinage et commence à l'utiliser pour transférer ses données. Ainsi, N_D est capable de réceptionner la route de N_E grâce à leur lien de communication commun L_{ED}^{LoRa} . De cette façon, N_D est capable de composer une troisième route, en combinant les valeurs associées à la route partagée par $NBR(D)_E$ avec les valeurs associées au lien L_{ED}^{LoRa} disponibles dans LM_D . Pour l'exemple, ici, nous supposons que les valeurs associées aux liens entre la station de base Sigfox et les nœuds N_D et N_E sont similaires. La route résultante est ensuite enregistrée dans RM_D , que nous considérons maintenant similaire au tableau 3.2.

Sélection multicritère des routes les plus adaptées

La prochaine étape est celle de la sélection de route : une meilleure route par vecteur de besoins. Cette sélection s'effectue indépendamment des technologies sous-jacentes utilisées par les routes. À l'inverse, elle prend en compte les besoins de communication des cas d'utilisation et les coûts et performances offerts par chacune des routes disponibles. Pour l'exemple, considérons ici la situation de N_D , avec RM_D semblable au tableau 3.2, et N_D devant respecter les vecteurs de besoins visibles dans le tableau 3.3. Dans le cas de $RV_{surveillance}$, la meilleure route disponible

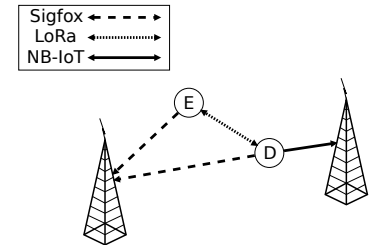


FIGURE 3.6 – Sous-ensemble du réseau multitechnologie visible sur la figure 3.5.

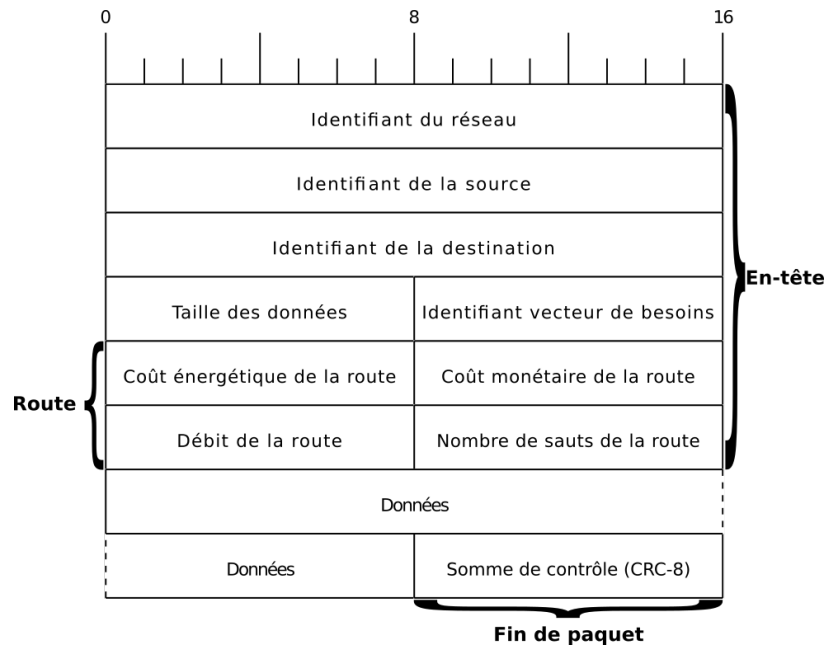


FIGURE 3.7 – Diagramme structurel d'un paquet du protocole de routage RODENT.

pour N_D est celle à destination de la station de base Sigfox, car la priorité pour ce cas d'utilisation est de minimiser le coût énergétique des routes afin d'allonger l'autonomie des nœuds. À l'inverse, la meilleure route pour N_D dans le cas de RV_{alarme} est celle à destination de la station de base NB-IoT. En effet, pour ce cas d'utilisation, la priorité associée au débit et plus importante, afin de raccourcir le temps d'émission des messages d'alarme. Une fois ses meilleures routes sélectionnées, N_D est capable d'adapter l'utilisation de ses routes et de ses technologies en fonction des besoins de communication imposés par les caractéristiques de ses données à transmettre. La maintenance des routes se fait de façon automatique, avec le "piggybacking" des informations de contrôle dans les transferts de données, et un délai d'expiration des routes inactives, que nous allons tous deux détailler dans la section suivante.

3.5.2 Contenu et structure d'un paquet

Notre protocole définit une structure de paquet adaptée à nos besoins, qui est visible sur la figure 3.7. Comme nous pouvons le voir, un paquet est composé de trois parties distinctes : l'en-tête, les données transportées et la fin de paquet. L'en-tête contient les informations de contrôle nécessaires au bon fonctionnement de RODENT et de la diffusion des routes. Le premier champ est l'identifiant de réseau : c'est une valeur codée sur deux octets, partagée par tous les nœuds participant à un même réseau multitechnologie. Cet identifiant permet de différencier les communications d'un réseau RODENT des autres communications potentielles des réseaux environnants. Les deux champs suivants sont respectivement les identifiants des nœuds source et destination. Ces deux valeurs sont également codées sur deux octets chacune. Comme leur nom l'indique, elles permettent d'identifier de façon unique l'émetteur et la destination d'un message. Le quatrième champ contient la taille des données, codée sur un octet, et réfère donc aux nombres d'octets contenus dans la partie données du paquet.

Cas d'utilisation et meilleure route

Le champ suivant contient un identifiant associé à un vecteur de besoins, codé sur un octet. Il permet d'identifier le vecteur de besoins à utiliser pour le routage et relayage du message en question, et indique ainsi le type des données transportées et le cas d'utilisation qui y est associé. Dans l'en-tête, la partie désignée comme route sur la figure 3.7 contient un tableau, lui-même composé des valeurs correspondant à la meilleure route du nœud source du message. Dans l'implémentation de notre prototype, nous nous sommes cantonnés à l'utilisation de quatre métriques. Chacune est codée sur un octet, et correspond respectivement au coût énergétique, coût monétaire, débit et nombre de sauts associés à la route. Le type et le nombre des métriques utilisées ici peuvent bien entendu être modifiés, pour correspondre aux critères à prendre en compte en fonction des multiples cas d'utilisation considérés.

Données et somme de contrôle

La partie suivante du paquet est celle contenant les données transportées par le paquet. Ces données sont relatives au cas d'utilisation indiqué par l'identifiant du vecteur de besoins. Elles prennent la forme d'une série d'octets, série dont la taille est connue grâce au champ taille des données de l'en-tête. La fin et dernière partie du paquet se compose ici d'un seul champ. Ce dernier est codé sur un octet, et contient la somme de contrôle de redondance cyclique correspondant au paquet en question, calculée sur la base d'un polynôme du huitième degré. Il permet de vérifier de s'assurer de l'intégrité des parties en tête et données du paquet, qui pourraient être corrompues lors de la transmission du message.

De façon générale, la structure des paquets RODENT nous permet de transmettre les données dont nous avons besoin pour effectuer le routage, tout en restant d'une taille raisonnable. La taille fixe d'un paquet RODENT est ainsi de neuf octets, auxquels il faut ajouter les données à transmettre, ainsi qu'autant d'octets que d'attributs pris en compte dans la sélection de route, dans notre exemple, quatre.

3.5.3 Réception et construction des routes

Afin de généraliser les opérations de construction des routes, considérons ici le nœud i . N_i , après sa mise sous tension, effectue ses opérations de démarrage et d'initialisation. Après avoir composé sa matrice de lien LM_i , N_i commence la construction de sa matrice de route RM_i . Pour cela, notre protocole se base sur deux jeux de données. Le premier est la matrice de lien LM_i , qui contient l'ensemble des liens entre N_i et son voisinage $NBR(i)$, ainsi que les informations qui y sont associées. Le second est l'ensemble des routes partagées par les nœuds qui composent $NBR(i)$.

Routes unisaut

Dans un premier temps, N_i effectue un parcours de LM_i , afin d'identifier les liens directs entre lui-même et une station de base, comme une antenne NB-IoT. De tels liens permettent en une seule communication, un seul

saut, de faire sortir les données transmises du réseau de capteurs sans fil pour qu'elles soient traitées dans un réseau externe, par exemple pour être mises à disposition des agriculteurs. Ainsi, ces liens peuvent être considérés comme des routes à un saut, et les valeurs associées à ces routes sont directement extraites des valeurs métriques disponibles dans LM_i . Ces routes sont ensuite stockées dans la matrice correspondante : RM_i .

Routes multisaut

La seconde étape de N_i est de composer les routes à plusieurs sauts, c'est-à-dire les routes partagées par les nœuds de $NBR(i)$ et à travers lesquelles N_i sera capable de relayer ses données. Pour l'exemple, imaginons que N_i réceptionne une route de la part de son voisin $NBR(i)_j$, grâce à une technologie de communication x , et qui a transité à travers le lien sous-jacent L_{ij}^x . Pour composer sa nouvelle route, N_i additionne les valeurs des attributs de la route reçue avec les valeurs du lien L_{ij}^x indiquées dans LM_i . La route résultante R_{ij}^x , partant de N_i vers N_j grâce à l'utilisation de la technologie x , est finalement insérée dans la matrice RM_i , prête à être considérée dans le processus de classement et de sélection des routes.

3.5.4 Classement et sélection des routes

Avec les protocoles de routage classiques pour les réseaux de capteurs sans fil, le processus de sélection de la meilleure route est en général relativement simple. Bien souvent, il suffit de choisir la route qui présente le coût ou le rang associé minimal, et la principale métrique optimisée est le nombre de sauts. Cependant, dans un réseau multitechnologie, une route est définie comme une succession d'un ou plusieurs liens, et chacun de ces liens peuvent nécessiter l'utilisation sous-jacente d'une technologie de communication différente du lien précédent. Puisque, comme nous l'avons montré de façon extensive dans le chapitre 2, à chaque technologie est associé différents coûts et performances, la sélection de route dans un réseau multitechnologie se doit de prendre en compte plusieurs critères à la fois. En automatisant la recherche d'un compromis entre les différents critères à optimiser lors de la sélection des routes et des technologies, un réseau multitechnologie sera également capable de répondre à plusieurs cas d'utilisation imposant le respect de différents besoins de communication.

Le mécanisme de classement et de sélection des routes utilisées par RODENT se base sur une méthode de décision multiattribut bien connue, à laquelle le chapitre 4 sera entièrement consacré, c'est pourquoi nous n'en ferons ici qu'une introduction succincte. Pour l'exemple, considérons les opérations du nœud i . Après composition de sa matrice de route, N_i exécute la méthode de classement qui prend en entrée RM_i ainsi qu'un vecteur de besoins RV_y . Il s'agit donc ici de sélectionner la meilleure route BR_i^y pour répondre au cas d'utilisation y . Après le déroulement de son algorithme, la méthode multiattribut résulte en un classement de l'ensemble des routes disponibles dans RM_i , partant de la route la plus adaptée au cas d'utilisation jusqu'à la route qui l'est le moins. Le processus est répété pour chaque cas d'utilisation supporté par N_i afin de sélectionner une meilleure route BR_i^y pour chaque cas d'utilisation y .

supporté par N_i . Le processus est répété pour chaque cas d'utilisation supporté par N_i . Les routes sélectionnées seront ainsi utilisées pour transmettre les données et partagées à $NBR(i)$ pour que ces derniers puissent relayer leurs données via N_i .

3.5.5 Diffusion et propagation des routes

Le partage des routes entre les nœuds dans notre protocole de routage se fait grâce à deux mécanismes : le "piggybacking" et les paquets de contrôle. Dans notre cas, le mécanisme dit de "piggybacking" consiste à transporter les informations nécessaires pour la propagation des routes, et ceci directement dans les paquets qui sont émis dans le but de transférer les données applicatives. Cela nous permet de diffuser les routes sans avoir à utiliser de communications dédiées, qui engendreraient un surcoût énergétique conséquent. Considérons un paquet du protocole RODENT transportant des données relatives au cas d'utilisation y . Comme nous l'avons vu plus tôt avec la structure des paquets, l'en-tête d'un paquet contient un identifiant de vecteur de besoins relatif à y . Également, cet en-tête porte la meilleure route BR_i^y connue par la source du paquet N_i , ainsi que les valeurs des métriques qui lui sont associées. Or, les communications sans fil basées sur les ondes électromagnétiques, par contraste avec les communications filaires, partagent un seul et même support de communication commun, qui généralement est l'air. En conséquence, un nœud est capable d'entendre toutes les communications émises par son voisinage direct, même si elles ne lui sont pas destinées. Cette propriété complexifie habituellement les communications sans fil, car elle induit du bruit et des interférences néfastes pour la qualité des transmissions. Cependant, utilisée à bon escient, elle peut aussi nous offrir la possibilité de transmettre des données à moindre coût. Ici, nous en profitons pour partager les données de contrôle de RODENT. En effet, puisque N_i est capable d'entendre les paquets émis par $NBR(i)$, il est capable de connaître chacune des meilleures routes utilisées par les nœuds de $NBR(i)$. De cette façon, N_i peut mettre à jour de façon opportuniste sa matrice de route RM_i , et profiter du même mécanisme pour partager ses routes lorsqu'il transmet des données. Ce mécanisme nous permet de réduire considérablement la quantité de messages de contrôle que nécessite RODENT, et ainsi de réduire la quantité d'énergie dépensée par les nœuds pour effectuer le routage des paquets.

Expiration et maintien des routes

Une route qui a été partagée peut, dans le temps, devenir invalide, par exemple parce qu'un des nœuds sur le chemin souffre d'une panne énergétique. Dans ce cas, il est important que les autres nœuds du réseau ne continuent pas à utiliser indéfiniment une route non-fonctionnelle. À cette fin, nous associons un délai de validité à chaque route reçue, qui doit être ajusté en fonction de la fréquence des échanges. Lorsqu'un nœud N_i entend une route R_{ij}^x partagée par son voisin $NBR(i)_j$, celle-ci est stockée dans RM_i et le délai est initialisé, puis réinitialisé à chaque fois que N_i entend la réémission de RM_i . Si N_i n'entend plus $NBR(i)_j$ émettre R_{ij}^x , cette dernière finira par expirer et sera retirée de RM_i . La mise à jour et la fréquence de rafraîchissement de la matrice RM_i est un

sujet à part entière, sur lequel nous ne sommes pas concentrés ici, et qui nécessite un approfondissement afin de trouver une solution optimale.

En fonction de leur utilité, toutes les routes ne seront pas utilisées à la même fréquence. Par exemple, une route dédiée à un cas d'utilisation exceptionnel, comme l'émission d'une alarme, sera utilisée rarement, mais doit tout de même être fonctionnelle immédiatement. Afin d'entretenir des routes non ou peu utilisées, $NBR(i)_j$ a la possibilité d'émettre des paquets contrôles dédiés. Pour les paquets de contrôle, nous utilisons des paquets RODENT suivant la même structure que nous avons détaillée plus tôt dans le chapitre, mais avec une partie données vide.

3.6 Adaptativité et méthode de décision multiattribut

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2, les différentes technologies de communication radio présentent des caractéristiques et des performances très variables. Le choix d'une technologie impose donc des compromis, qui limitent les possibilités d'utilisation du réseau de capteurs sans fil concerné. Afin de surmonter une partie de ces limitations, nous avons proposé dans ce chapitre "Routing Over Different Existing Network Technologies" (RODENT). Ce dernier permet d'effectuer le routage dans les réseaux multitechnologies de façon à profiter des avantages que peuvent offrir l'utilisation de routes nécessitant l'utilisation de plusieurs technologies de communication sous-jacentes.

Afin de jauger les capacités de notre proposition, nous avons implémenté et testé expérimentalement notre protocole. Les résultats montrent que RODENT offre une solution flexible et dynamique pour assouplir les contraintes des réseaux de capteurs sans fil et prendre en compte au mieux les besoins de communications associés à différents cas d'utilisation. La conception de notre prototype de réseau multitechnologie sera détaillée dans le chapitre 5, et nous montrerons les résultats obtenus spécifiquement dans la section 5.4.

Dans un réseau utilisant RODENT, les nœuds peuvent choisir parmi toutes les possibilités de communication technologiques à leur disposition, et sont également capables de s'adapter au mieux aux imprévus. En effet, RODENT permet aux nœuds de sélectionner les routes et leurs technologies associées en fonction des coûts et performances associés à chacune des routes, mais prend également en compte les besoins de communication qui découlent du ou des cas d'utilisation choisis pour le réseau. Cela se fait cependant au prix de paquets légèrement plus volumineux, car ils transportent les informations de contrôle de RODENT en permanence. Pour choisir les meilleures routes à utiliser, RODENT se base sur une méthode de sélection multiattribut, qui sera l'objet du chapitre suivant.

Méthode de sélection multiattribut pour les réseaux multitechnologies

4

4.1 Outils d'aide à la décision multicritère

Pour des raisons évidentes de flexibilité et de simplicité d'utilisation, les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil doivent être autonomes. L'utilisation d'une batterie offre une autonomie énergétique, mais il est nécessaire que les nœuds disposent également d'une autonomie décisionnelle. En pratique, cela veut dire que les nœuds doivent être capables de récolter et de communiquer leurs données sans qu'un opérateur extérieur au réseau, comme un agriculteur dans le cas de l'agriculture connectée, n'ait le besoin d'intervenir. Dans les réseaux où plusieurs technologies de communication sont disponibles pour chaque nœud, il est donc également nécessaire que ces derniers gèrent de façon autonome le basculement d'une technologie vers une autre. Cependant, les conditions environnementales changeantes peuvent impacter lourdement la qualité et la fiabilité des liaisons sans fil, particulièrement dans le cas de l'agriculture connectée. En conséquence, si la minimisation de la consommation énergétique est indubitablement primordiale, les nœuds doivent aussi chercher à s'adapter continuellement à leur environnement et leurs besoins de communications pour assurer une continuité de service.

Environnement dynamique et besoins variables

Nous l'avons bien vu au fil du chapitre 2 : de nombreuses technologies de communication sont aujourd'hui disponibles, et chacune présente des caractéristiques variées et offre ainsi des performances différentes des autres en fonction des situations considérées. Si les nœuds des réseaux de capteurs sans fil doivent composer avec des variations environnementales, il serait avantageux d'y opposer la capacité de varier les solutions de communications pour y faire face. Ainsi, dans le chapitre 3, nous avons présenté RODENT, notre protocole de routage conçu spécifiquement pour les réseaux multitechnologies. Sur la base d'une connaissance des liaisons disponibles avec son voisinage immédiat, un nœud utilisant RODENT est capable de constituer sa table de routage indépendamment de la technologie de communication sous-jacente utilisée par chaque route. En fonction de sa table de routage, RODENT permet au nœud de choisir la route et la technologie les plus adaptées à sa situation et ses besoins de communication, et ce, à chaque saut. Pour cela, la sélection doit prendre en compte plusieurs facteurs, relatifs à l'environnement de déploiement du nœud, et au cas d'usage du nœud. En effet, selon l'usage pour lequel un nœud est conçu, le type de données à transmettre peut varier énormément. En conséquence, ce qu'on appelle les besoins de communications, varient avec le type de données, et imposent des contraintes supplémentaires sur la technologie et la route qui peuvent être utilisées. Dans RODENT, le type des données transportées, et les besoins de communication qui y sont associés, sont pris en compte par la considération d'un vecteur de besoins dans le processus de sélection de la meilleure route.

4.1 Outils d'aide à la décision multicritère	59
4.2 Méthodes de décision multiattribut	62
4.2.1 Mécanismes internes de la méthode TOPSIS	63
4.2.2 Limitations de la méthode TOPSIS	64
4.3 Travaux connexes et état de l'art des améliorations	66
4.4 Normalisation simplifiée et méthode de décision optimisée	69
4.5 Estimation de la différence de complexité opérationnelle	71
4.6 Une méthode optimisée pour les réseaux multitechnologies	72

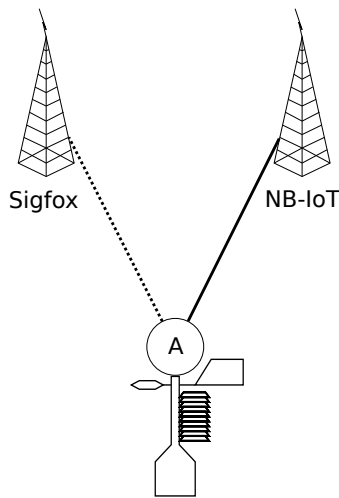


FIGURE 4.1 – La station météo N_A s'occupe de la surveillance météo régulière et envoi des alarmes et cas d'urgence.

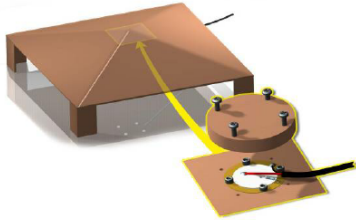


FIGURE 4.2 – Conception assistée par ordinateur d'un disdromètre pour grêle [98].

[98]: John E LANE, David W SHARP, Takis C KASPARIS et Nolan J DOESKEN. « Hail Disdrometer Array for Launch Systems Support ». In : *12th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans and Land Surface*. 2008

Il était une fois, une station météo

Pour bien illustrer cela avec un exemple simple, considérons la station N_A représenté sur la figure 4.1. N_A , déployée pour l'agriculture connectée, collecte en permanence des données numériques relatives à la température et la pluviométrie de la parcelle de terrain qu'elle est chargée de surveiller. Sa priorité étant de minimiser sa consommation énergétique, et étant à portée de communication d'une station de base Sigfox, N_A choisit d'utiliser la technologie Sigfox pour transmettre ses mesures de façon régulière. Brusquement, un orage de grêle éclate, et les cultures les plus fragiles sont à risque d'être dévastées rapidement, en l'espace de quelques minutes. Grâce à l'utilisation d'un disdromètre [98], N_A détecte le risque et veut émettre un message d'alarme pour prévenir l'agriculteur en charge de la parcelle afin que ce dernier couvre ses cultures au plus vite.

La technologie Sigfox dispose de plusieurs avantages tels qu'une très basse consommation énergétique et une longue portée de communication. Cependant, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, Sigfox impose également de très fortes contraintes, parmi lesquelles un débit extrêmement limité de 100 bps ainsi qu'une quantité maximale de message par jour variant de 2 à 140, en fonction de l'abonnement choisi. De plus, il est possible que l'intempérie soudaine amenuise la fiabilité de la communication entre N_A et la station de base Sigfox, puisque les ondes électromagnétiques sont extrêmement sensibles au milieu dans lequel elles transitent. Pour toutes ces raisons, il est probable qu'un message d'alarme émis par N_A par l'intermédiaire de la technologie Sigfox ne soit pas réceptionné suffisamment rapidement pour permettre de minimiser les dégâts sur les cultures.

Or, on peut voir sur la figure 4.1 que N_A semble également être à portée de communication d'une station de base NB-IoT. La technologie NB-IoT, comme vu précédemment dans le chapitre 2, dispose d'un débit plus important, mais impose aussi des coûts énergétiques et économiques plus lourds que ceux de Sigfox. Le type de données transmises par N_A ayant basculé de surveillance à alarme, les besoins de communications et les priorités changent aussi. Ainsi, pour la transmission d'une alarme et dans la situation de N_A , la technologie NB-IoT devrait être favorisée, car moins contrainte vis-à-vis des priorités d'un message d'alarme. Pour automatiser ce processus, il est nécessaire que les nœuds disposent d'outils capables de considérer plusieurs facteurs en même temps dans le processus de décision. De tels outils sont appelés des méthodes d'aide à la décision multicritère.

Aide à la décision multicritère

On peut trouver dans la littérature de nombreux outils et méthodes différents pour réaliser une sélection parmi un ensemble de plusieurs alternatives et sur la base de plusieurs critères. Au sein de cette diversité foisonnante, nous nous sommes particulièrement penchés sur les méthodes de décisions multiattribut, de l'anglais "Multiple Attribute Decision Making" (MADM). Plusieurs méthodes MADM existent, et proposent des fonctionnements différents, mais le principe général est le suivant : à partir d'un ensemble d'alternatives, et sur la base des valeurs

de leurs attributs, en prenant en compte les poids associés à chacun, une méthode MADM établit un classement de l'alternative la plus intéressante à celle qui est la moins intéressante. Une des méthodes MADM parmi les plus utilisées et étudiées est "Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution" (TOPSIS). En une phrase, TOPSIS permet de comparer les alternatives sur la base de leur distance mathématique avec des alternatives théoriques idéales positives et négatives. Ainsi, TOPSIS est particulièrement intéressante, car elle permet de comparer les alternatives sur la base de leur ressemblance avec la meilleure alternative théorique, mais aussi sur la base de leur dissemblance avec la pire alternative théorique.

Une méthode intéressante mais imparfaite

La méthode TOPSIS présente cependant un inconvénient considérable appelé les inversions de rang, de l'anglais "rank reversal". Une inversion de rang se produit lorsque le classement est modifié suite à la suppression d'une alternative du classement. Ceci peut altérer la qualité du classement et conduire à la sélection d'une technologie sous-optimale, comme nous le verrons par l'exemple dans la section 4.2. De plus, des changements de technologie trop nombreux et inutiles saperaient rapidement l'autonomie énergétique des nœuds. Pour enfoncer le clou, si l'on considère l'exécution de la méthode TOPSIS sur du matériel contraint, les calculs nécessaires se trouvent être relativement complexes. Ceci risque de réduire la durée de vie des nœuds et surcharger la mémoire limitée dont ils disposent, augmentant considérablement le risque de pannes.

Afin de pouvoir profiter de la qualité de classement de la méthode TOPSIS sans en payer le prix fort, nous proposons dans ce chapitre un ensemble de modifications à apporter au fonctionnement de la méthode TOPSIS. Notre méthode modifiée basée sur TOPSIS offre un outil de sélection léger et optimisé pour fonctionner avec du matériel contraint. Notre méthode simplifie les calculs de TOPSIS et élimine totalement l'occurrence des inversions de rang, grâce à la modification de l'algorithme de normalisation des valeurs utilisé par TOPSIS. Cela permet également de réduire la complexité de la méthode, ce qui réduit son coût temporel et donc par là même son coût énergétique. La pertinence et les performances de notre approche sont évaluées expérimentalement sur des modules FiPy de Pycom à l'aide du prototype de réseau multitechnologie que nous avons conçu. Les expériences seront présentées dans le chapitre 5, et leurs résultats détaillés dans la section 5.4. Notamment, les résultats montrent une amélioration du temps de calcul d'environ 40% lors de l'utilisation de notre méthode à la place de la méthode TOPSIS. La sélection effectuée par notre méthode est identique à celle de la méthode TOPSIS dans 80% des cas.

Nous avons organisé la suite de ce chapitre de la façon suivante. Dans la section 4.2, nous introduisons un peu de contexte relatif aux méthodes MADM, et détaillons le fonctionnement de la méthode TOPSIS. Ensuite, nous y présentons les limitations intrinsèques au fonctionnement de TOPSIS, comme les inversions de rang. Nous dressons l'état de l'art concernant les travaux connexes qui cherchent à améliorer TOPSIS dans la section 4.3, et expliquons pourquoi ces solutions ne sont pas adaptées à nos besoins. En conséquence, nous présentons dans la section 4.4

notre propre méthode de décision multiattribut optimisée pour notre utilisation, et basée sur la méthode TOPSIS. Afin de quantifier les gains apportés, nous présentons une estimation de la différence de complexité calculatoire entre notre méthode et TOPSIS dans la section 4.5. Pour finir, la section 4.6 récapitule et apporte un point final à ce chapitre.

4.2 Méthodes de décision multiattribut

Pour profiter de toutes les capacités que peuvent offrir les réseaux multitechnologies, nous avons besoin que les nœuds soient capables de sélectionner de façon autonome la meilleure technologie de communication et la meilleure route parmi celles qui sont à leur disposition, et cela, en prenant en compte plusieurs facteurs à la fois. Dans la littérature scientifique, il existe de nombreux outils pour réaliser la sélection d'interface réseau, tels que les fonctions de coûts et d'utilité, les chaînes de Markov, la logique floue, la théorie des jeux, l'exploration de données, la théorie de Dempster-Shafer... Parmi tous ces outils, dans la branche des aides à la décision multicritère, on trouve les méthodes de décision multiattribut, de l'anglais "Multi-Attribute Decision Making (MADM) methods" [99]. Les méthodes MADM sont particulièrement intéressantes, car elles offrent des méthodes plus ou moins simples permettant de comparer et classer plusieurs alternatives, tout en tenant compte des valeurs de chaque attribut, mais aussi de l'importance relative accordée à chacun de ces derniers.

[99]: R. Venkata RAO. « Decision Making in the Manufacturing Environment : Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods ». In : Springer, 2007. Chap. Introduction to Multiple Attribute Decision-making (MADM) Methods

Un petit problème d'indécision

TABLE 4.1 – Problème de décision des méthodes MADM sous la forme d'une matrice de décision.

	P_1	P_2	...	P_m
	w_1	w_2	...	w_m
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
...
A_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}

Toutes les méthodes de décision multiattribut cherchent à résoudre un problème commun : le problème de décision. Le problème de décision est couramment posé sous la forme d'une matrice de décision, de façon semblable à la matrice visible dans le tableau 4.1. Une matrice de décision se compose de trois ensembles. L'ensemble $A = \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ se compose des différentes alternatives à comparer et à classer au cours du processus de décision. L'ensemble $P = \{P_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$ liste tous les attributs associés aux alternatives et qui sont considérés dans la résolution du problème. Finalement, l'ensemble $W = \{w_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$ contient les poids associés à chacun des attributs, c'est-à-dire leur importance dans le processus de comparaison. Tout cela se prête très bien à la sélection de route, où A devient l'ensemble des routes à comparer, P l'ensemble des attributs à considérer, tels que le débit, le coût énergétique, etc., et W l'ensemble des besoins de communication à respecter, en fonction de la priorité des différents attributs.

Le principe des méthodes MADM est donc de prendre en entrée une matrice de décision, composée des trois ensembles A , P et W . Plusieurs opérations sont ensuite appliquées sur la matrice, puis les alternatives sont classées en fonction des scores qu'elles obtiennent. Il existe un certain nombre de méthodes MADM différentes, et leurs algorithmes de classement varient. Parmi les plus connues, nous pouvons citer "Simple Additive Weighting" (SAW), "Weighting Product" (WP), "Analytical Hierarchy Process" (AHP) et "Gray Relational Analysis" (GRA). En

particulier, la méthode qui nous intéresse ici est "Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution" (TOPSIS) [100].

4.2.1 Mécanismes internes de la méthode TOPSIS

Le principe de TOPSIS est dans un premier temps de composer deux alternatives théoriques. L'alternative positive compile toutes les meilleures valeurs que l'on peut trouver pour chaque attribut P_i de l'ensemble des alternatives considérées A . Son pendant sombre, l'alternative négative, regroupe les pires valeurs de chaque attribut P_i des alternatives de l'ensemble A . TOPSIS calcule ensuite les distances mathématiques entre chaque alternative et ces deux alternatives théoriques. En fonction des deux résultats de l'étape précédente, TOPSIS calcule ensuite la proximité relative avec la solution parfaite pour chaque alternative. Les alternatives sont ensuite classées selon le score de proximité obtenu, de la proximité maximale à la proximité minimale.

Pour illustrer cela, nous pouvons voir une représentation graphique du fonctionnement de la méthode TOPSIS dans la figure 4.3. Dans ce cas, nous avons une matrice de décision composée des ensembles $A = \{A_1, A_2, A_3\}$ et $P = \{P_1, P_2\}$. Les attributs P_1 et P_2 sont tous les deux ascendants, c'est-à-dire que plus leur valeur est élevée, mieux c'est. Nous pouvons omettre l'ensemble W dans cet exemple. Comme expliqué précédemment, l'alternative positive A^+ se compose des meilleures valeurs des attributs de l'ensemble P , dans ce cas les valeurs maximales de P_1 et P_2 qui sont aussi celles de l'alternative A_1 . À l'inverse, l'alternative négative A^- contient les pires valeurs des attributs de P , ici les valeurs minimales de P_1 et P_2 , qui sont aussi les valeurs de l'alternative A_2 . Ensuite, les distances S_i^+ et S_i^- entre chaque alternative A_i et les alternatives A^+ et A^- sont calculées. Finalement, la proximité relative entre chaque A_i et la solution idéale est calculée, et les alternatives de A sont classées en fonction. Dans notre exemple, il est évident que le classement résultant sera le suivant : $[A_1, A_3, A_2]$.

[100]: Ching-Lai HWANG et Kwangsun YOON. *Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications*. New York : Springer-Verlag, 1981

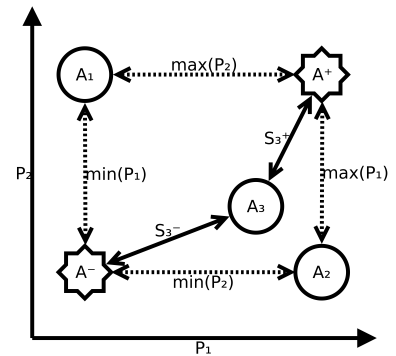


FIGURE 4.3 – Représentation graphique de la méthode TOPSIS exécutée pour une matrice de décision contenant trois alternatives A_1, A_2 et A_3 offrant chacune deux attributs P_1 et P_2 .

Le diable se cache dans les détails

Pour bien mettre en lumière les problématiques qui touchent la méthode TOPSIS classique, il nous est nécessaire de jeter un œil dans les entrailles de la méthode. Nous allons donc détailler ici, dans l'ordre, chacune des étapes de l'algorithme utilisé par TOPSIS et les équations qui leur sont associées.

1. La toute première étape est de faire en sorte que les valeurs des différents attributs soient comparables. En effet, on ne peut pas comparer des valeurs, par exemple, de débit et de coût énergétique directement, puisque les unités sont totalement différentes. Les valeurs x_{ij} de chaque attribut P_i de la matrice de décision considérée sont donc normalisées, selon l'équation 4.1.
2. Les valeurs résultantes r_{ij} sont normalisées, et maintenant comprises entre 0 et 1. Ensuite, selon les valeurs de l'ensemble W , ces valeurs sont pondérées, selon l'équation 4.2. C'est cette étape qui permet de prendre en compte l'importance de chaque attribut dans le processus de décision.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (4.1)$$

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} A^+ &= [v_1^+ \dots v_m^+] \\ A^- &= [v_1^- \dots v_m^-] \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} v_j^+ &= \text{Argmax}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \\ v_j^- &= \text{Argmin}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} v_j^+ &= \text{Argmin}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \\ v_j^- &= \text{Argmax}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^+ - v_{ij})^2} \\ S_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^- - v_{ij})^2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (4.7)$$

3. L'étape suivante consiste à la construction des alternatives positive et négative A^+ et A^- . Ces alternatives compilent les valeurs extrêmes parmi les valeurs des attributs de P , selon l'équation 4.3, et serviront à la comparaison entre les différentes alternatives de l'ensemble A .
4. Il nous faut distinguer deux sortes d'attributs. La performance offerte par certains attributs s'améliore au fur et à mesure que leurs valeurs augmentent, nous les appelons donc des attributs ascendants. Par exemple, le débit est meilleur quand il est plus important, c'est donc un attribut ascendant. À l'inverse, d'autres attributs sont meilleurs lorsque leurs valeurs baissent, nous les appelons donc des attributs descendants. Le délai est plus intéressant lorsqu'il est faible, c'est donc un attribut descendant. Les valeurs des attributs des alternatives A^+ et A^- sont déterminées en fonction du type des attributs considérés. Pour les attributs ascendants, l'équation 4.4 est utilisée, tandis que pour les attributs descendants, elle est remplacée par l'équation 4.5.
5. Les alternatives A^+ et A^- sont maintenant connues, la prochaine étape est donc de positionner chaque alternative A_i par rapport à ces deux dernières. Ainsi, pour chaque alternative A_i , la distance avec A^+ ainsi que la distance avec A^- , respectivement S_i^+ et S_i^- , sont calculées selon l'équation 4.6.
6. Pour finir, sur la base des résultats du calcul de S_i^+ et S_i^- , la proximité relative de la solution parfaite pour chaque alternative A_i est calculée selon l'équation 4.7. Les différentes alternatives sont ensuite classées en fonction de leur score C_i .

Lorsque la méthode TOPSIS est utilisée pour effectuer la sélection de route, la route A_x en tête de classement, c'est-à-dire celle qui dispose de la valeur C_x la plus élevée, est la route disponible pour le nœud concerné qui répond au mieux aux besoins de communication considérés.

4.2.2 Limitations de la méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS permet de classer les alternatives non seulement sur la base de leur ressemblance avec la meilleure alternative possible, mais aussi en fonction de leur dissemblance avec la pire alternative possible. Cependant, la méthode TOPSIS n'est pas parfaite, et souffre d'un problème particulier qu'on appelle les inversions de rang, de l'anglais "rank reversal". Une inversion de rang a un risque d'arriver à chaque fois qu'une alternative est retirée du classement, et ce même si les valeurs des attributs ne changent pas. La qualité et la pertinence du classement peuvent en être altérées, ce qui résulte en des changements technologiques coûteux et inutiles.

La cause des inversions de rang se trouve dans l'algorithme de normalisation qui est utilisé pour normaliser les valeurs des attributs, et que nous avons vu dans l'équation 4.1. Cette méthode, qui est des fois désignée sous le nom de normalisation Euclidienne, calcule les valeurs normalisées d'un attribut donné en se basant sur la totalité des valeurs de toutes les alternatives, pour l'attribut en question. Si A , l'ensemble des alternatives considérées, change, il est logique que le résultat de l'équation de normalisation 4.1 change également. De fil en aiguille, si les valeurs

	P_1	P_2	P_3
A_1	1.024537	7.828443	8.650221
A_2	4.226149	0.09865402	4.673396
A_3	8.026353	5.455392	2.536936
A_4	1.700537	1.398855	0.7656412

TABLE 4.2 – Matrice de décision factice pour illustrer le problème des inversions de rang.

normalisées ne sont pas les mêmes, alors à la fin, le classement peut également être différent. Cette méthode de normalisation est commune à plusieurs des méthodes MADM, en conséquence, les inversions de rang sont un problème qui touche également les autres méthodes, et choisir simplement une autre méthode ne permettrait donc pas forcément de résoudre le souci. Pour qu'une méthode de classement soit idéale, il faudrait que le fait de retirer une alternative d'un classement n'altère en aucun cas l'ordre de classement des alternatives restantes.

Vous reprendrez bien un petit exemple ?

Les inversions de rang sont un problème qui peut paraître quelque peu obscur, nous allons donc dérouler un exemple afin de tenter d'éclaircir nos propos. Considérons une matrice de décision factice, remplie de façon aléatoire, représentée dans le tableau 4.2. Lorsque que l'on exécute la méthode TOPSIS en lui fournissant en entrée cette matrice de décision, et en accordant un poids équivalent à chacun des attributs, après déroulement de l'algorithme que nous avons détaillé plus tôt, le classement résultant est le suivant $[A_1, A_3, A_2, A_4]$. Maintenant, reprenons la matrice de décision du tableau 4.2, mais ôtons-en l'alternative A_4 . Cette alternative ne fera évidemment plus partie du classement, et nous pouvons nous attendre à ce que le classement obtenu après exécution de la méthode TOPSIS reste similaire, mais simplement sans A_4 , de cette façon : $[A_1, A_3, A_2]$. Cependant, si l'on exécute la méthode TOPSIS sur cette matrice, le classement que nous obtenons en sortie est le suivant : $[A_3, A_1, A_2]$. Sans trop que l'on sache pourquoi, les alternatives A_1 et A_3 ont échangé leurs places dans le classement : elles ont inversé leurs rangs.

Si les inversions de rang peuvent être un problème négligeable, voire hypothétique, selon l'utilisation de la méthode TOPSIS, ça ne l'est absolument pas dans le cas qui nous intéresse. Si l'on applique cet exemple à la sélection de route, la route A_4 pourrait disparaître de l'ensemble A pour diverses raisons, comme une panne du nœud qui la partage. Ici, on voit au classement que la route A_1 aurait été la route sélectionnée et utilisée, la perte de la route A_4 ne devrait donc rien changer pour le nœud que l'on considère. Cependant, la perte de la route A_4 produit une inversion de rang, et en conséquence la route sélectionnée ensuite serait la route A_3 . Ce changement de route induit potentiellement un changement de technologie de communication, qui a un coût temporel et énergétique. Mais puisque les valeurs des attributs associés à chaque route n'ont pas changé, les gains qui découleraient de la nouvelle sélection seraient probablement virtuellement inexistantes.

Multitechnologies = multigalères

Si nous considérons de plus l'utilisation de la méthode TOPSIS dans des réseaux de capteurs sans fil multitechnologies, les soucis se multiplient. En effet, la qualité des liens de communication des technologies sans fil dépend fortement de facteurs environnementaux et atmosphériques. Ces derniers varient grandement au cours d'une année, autant à l'échelle des jours que des saisons. La fréquence de ces événements est généralement dépendante de facteurs externes, qui sont bien souvent imprévisibles. Si la qualité d'un lien décroît trop, il peut devenir inutilisable, ce qui rendrait les routes qui en dépendent totalement caduques. Lorsque des routes sont perdues, il y a un risque d'inversion de rang comme nous l'avons montré dans l'exemple précédent. Or, qui dit multiplicité technologique, dit multiplicité de liens, et donc multiplicité de routes. Plus on considère de routes, plus il est probable et fréquent que certaines routes deviennent indisponibles ou soient instables. Ce qui, évidemment, augmente la probabilité d'inversion de rang. Dans ce sens, nous montrerons expérimentalement dans le chapitre 5 que le taux d'occurrence des inversions de rang lors de l'utilisation de la méthode TOPSIS peut rapidement devenir conséquent en fonction des caractéristiques de la matrice de décision considérée, et notamment en fonction de sa taille.

Une seconde limitation de la méthode TOPSIS qu'il est pertinent de mentionner est sa relative complexité calculatoire. Si cette dernière est somme toute dérisoire par rapport aux capacités de calcul d'un ordinateur commun, il en va tout autrement lorsque l'on considère les nœuds des réseaux de capteurs sans fil. Le matériel embarqué dans ce type de nœud est généralement fortement limité, certes en énergie disponible, mais également en puissance de calcul et en mémoire de stockage. Pour illustrer l'ordre de grandeur, un processeur classique d'ordinateur portable, par exemple un Intel® Core™ i7-8650U, dispose de quatre cœurs qui peuvent atteindre une fréquence maximale de 4.20 GHz. Par contraste, le processeur des modules FiPy de Pycom [101] possède deux cœurs qui peuvent atteindre une fréquence maximale de 240 MHz, ce qui est plutôt performant pour des nœuds dédiés aux réseaux de capteurs sans fil. Considérant du matériel contraint, les étapes algorithmiques de la méthode TOPSIS telles que nous les avons détaillées au cours de cette section imposent des calculs complexes, qui nécessitent de nombreuses opérations et des accès mémoire fréquents. En conséquence, une exécution fréquente de la méthode TOPSIS pour effectuer la sélection de route aurait au long terme un effet délétère sur la durée de vie des nœuds.

[101]: ESP32 series datasheet. Version 3.3. Espressif Systems. 2020

4.3 Travaux connexes et état de l'art des améliorations

Les inversions de rang sont une limitation bien connue des méthodes MADM, et notamment de la méthode TOPSIS. D'autres chercheurs s'y sont déjà frottés, et ont proposé diverses modifications et améliorations pour réduire l'impact de ces inversions. Dans cette section, nous listons et présentons ces travaux. La plupart des travaux cités ici ciblent une

utilisation proche de la nôtre : la sélection de l'interface de communication.

Il n'y a pas de place pour deux alternatives dans cette matrice

Pour commencer, les auteurs de l'article [102] proposent une méthode de sélection basée sur une méthode TOPSIS modifiée. Le but ici est de proposer un moyen de choisir une technologie de communication parmi un ensemble disponible. Cela se fait à l'aide de la méthode TOPSIS, en se basant sur les caractéristiques et performances de chacune des technologies considérées. Cependant, la proposition ici n'est pas simplement d'utiliser TOPSIS une seule fois par sélection, mais de façon itérative. L'idée est la suivante : les inversions de rang peuvent changer le classement des technologies, et il est ainsi difficile de savoir quelle technologie est la plus adaptée : l'ancienne ou la nouvelle tête de classement ? Les auteurs proposent donc d'exécuter TOPSIS, puis de retirer de la matrice de décision et du classement l'alternative qui sera la moins bien classée. Ces deux opérations sont répétées, jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une seule alternative dans le classement, alternative qui sera sélectionnée. Cette proposition offre une solution de sélection technologique qui outre-passe les inversions de rang en recommençant les calculs jusqu'à ce que les inversions ne soient plus un problème. Cependant, elle n'est pas vraiment adaptée aux contraintes avec lesquelles nous devons composer. Exécuter plusieurs fois la méthode pour réaliser une unique sélection a un coût non-négligeable en temps et en énergie. De plus, dans cet article, les auteurs utilisent TOPSIS pour la sélection technologique uniquement, ce qui réduit le nombre de possibilités à considérer. Dans notre cas, nous voulons appliquer la méthode à la sélection de route, et les possibilités peuvent être bien plus nombreuses, augmentant encore plus le coût d'une méthode itérative.

Améliorer et raffiner la méthode

L'article [103] présente une hybridation de la méthode TOPSIS avec la logique floue. La logique floue [104] est utilisée ici afin d'associer des valeurs numériques à des attributs incertains. Ces valeurs peuvent ainsi être intégrées dans le processus de classement des méthodes MADM, comme montré dans cet article avec les méthodes SAW et TOPSIS. Le but étant de proposer une méthode de sélection technologique afin d'effectuer le transfert intercellulaire entre plusieurs alternatives. Cela ne résout cependant pas les problèmes causés par l'apparition des inversions de rang.

Plusieurs méthodes de classement alternatives sont proposées dans l'article [105], afin de réaliser la sélection de technologie de communication. Ces dernières se basent sur TOPSIS, en utilisant des algorithmes de normalisation différents, afin de réduire l'impact des inversions de rang. L'idée principale est de remplacer la méthode de normalisation dite Euclidienne par une méthode alternative. Cette alternative normalise les valeurs des attributs en les comparant aux valeurs minimales et maximales de l'ensemble des valeurs pour un attribut donné. Cela réduit grandement le nombre d'occurrences des inversions de rang, mais ne les

[102]: Farooq BARI et Victor LEUNG. « Multi-Attribute Network Selection by Iterative TOPSIS for Heterogeneous Wireless Access ». In : *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. 2007

[103]: Wenhui ZHANG. « Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks ». In : *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No. 04TH8733)*. T. 2. 2004

[104]: Aspexit, *La logique floue ou l'extension de la logique classique*. <https://www.aspexit.com/la-logique-floue-ou-l'extension-de-la-logique-classique/>. Accessible au 02-07-2021.

[105]: Mohamed Abdelkrim SENOUCI, Muhammad Sajid MUSHTAQ, Said HOCEINI et Abdelhamid MELLOUK. « TOPSIS-based dynamic approach for mobile network interface selection ». In : *Computer Networks* 107.2 (2016)

[106]: Ali JAHAN, Morteza YAZDANI et K. EDWARDS. « TOPSIS-RTCID for range target-based criteria and interval data ». In : *International Journal of Production Management and Engineering* 9.1 (2021)

[107]: Lincoln Herbert TEIXEIRA et Árpád HUSZÁK. « Preemptive Network Selection for V2V Communication ». In : *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2019

[108]: Igor BISIO et Andrea SCIARRONE. « Fast Multiattribute Network Selection Technique for Vertical Handover in Heterogeneous Emergency Communication Systems ». In : *Wireless Communications and Mobile Computing* 2019 (2019)

élimine pas totalement pour autant. En effet, dans le cas où l'alternative offrant la valeur minimale ou maximale d'un des attributs considérés vient à être retirée de la matrice de décision, le référentiel de normalisation sera modifié, ce qui ouvre la porte aux inversions de rang.

Dans la même idée, il est proposé dans l'article [106] une nouvelle méthode de décision basée sur TOPSIS. Le but est ici d'offrir un nouvel outil pour assister les décisions dans les problèmes de conception d'ingénierie. Celle-ci se base sur un nouveau mécanisme de normalisation, qui élimine lors de la normalisation d'une alternative sa dépendance par rapport aux autres alternatives. Cela permet d'éviter les inversions de rang causées par la méthode TOPSIS, mais au prix d'une complexité calculatoire accrue.

Une méthode de décision populaire

Soit dit en passant, il est intéressant de remarquer que la méthode TOPSIS est utilisée dans plusieurs types de réseaux très différents. Par exemple, dans l'article [107], les auteurs présentent un algorithme pour la sélection de l'interface de communication basé sur la méthode TOPSIS, afin d'effectuer une sélection de technologie dans les réseaux de communication de véhicule-à-véhicule. Ou encore, dans l'article [108], qui détaille une méthode pour la sélection de l'interface de communication rapide basée sur TOPSIS, afin d'effectuer le transfert intercellulaire d'une technologie à l'autre dans des réseaux de communication d'urgence hétérogènes.

De façon générale, les propositions sus-mentionnées d'améliorations et de modifications à apporter à la méthode TOPSIS permettent de réduire la fréquence des occurrences des inversions de rang. Cela ne semble cependant pas suffisant pour totalement éliminer ce problème, car même si les inversions sont moins fréquentes, à l'inverse l'utilisation d'une matrice de décision plus volumineuse en augmente la fréquence, comme dans le cas de la sélection de route. Certaines modifications augmentent aussi considérablement la complexité calculatoire de la méthode. Cela augmenterait le laps de temps nécessaire à une exécution de TOPSIS et donc directement la consommation énergétique des nœuds sur le long terme, réduisant la durée de vie de ces derniers.

Malgré nos recherches, nous n'avons pas trouvé de proposition qui permettrait de résoudre entièrement le problème des inversions de rang pour les méthodes MADM. En outre, nous avons besoin d'une méthode qui soit respectueuse des contraintes imposées par le matériel utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil, en terme d'énergie et de puissance de calcul. C'est pourquoi nous proposons dans la section suivante une méthode personnalisée pour le classement et la sélection de route conçue pour les réseaux multitechnologies. Cette méthode se base sur la méthode TOPSIS, et permet non seulement d'éliminer totalement les inversions de rang, mais profite aussi d'une complexité calculatoire et temporelle réduite.

4.4 Normalisation simplifiée et méthode de décision optimisée

Comme nous l'avons rapidement expliqué dans la section 4.2, les inversions de rang sont un des principaux problèmes de la méthode TOPSIS pour notre utilisation. Elles peuvent se produire lorsque l'ensemble des alternatives considérées est modifié, et ainsi causer des changements technologiques coûteux. La cause des inversions de rang se trouve dans l'algorithme de normalisation de la méthode TOPSIS, qui normalise les valeurs en fonction de l'ensemble des valeurs associées à un même attribut. Aussi, les différentes étapes de la méthode, et notamment celle de la normalisation, sont relativement complexes pour du matériel contraint, ce qui à la longue risque d'impacter la longévité des nœuds. Il semble donc logique de s'attaquer à la méthode de normalisation utilisée, et de chercher à la simplifier. Dans cette section, nous détaillons donc notre propre méthode de normalisation. Celle-ci offre une complexité réduite par rapport à une normalisation dite Euclidienne. De plus, elle élimine totalement le problème des inversions de rang.

Et si on stabilisait notre référentiel ?

Voici le constat : la cause de l'inversion de rang est le fait de prendre en compte les autres alternatives dans le calcul des valeurs normalisées. Cela offre un référentiel de normalisation qui est instable, puisque ce dernier change à chaque modification de la matrice de décision. Pour éliminer les inversions de rang, nous avons donc besoin d'utiliser un référentiel de normalisation stable, qui ne changerait pas au fil du temps. Ainsi, le calcul des valeurs normalisées pour une alternative donnée ne se fera plus en fonction de l'ensemble des valeurs des autres alternatives. Notre idée principale est la suivante : lors de l'utilisation de nœuds équipés avec plusieurs technologies, chaque nœud dispose d'un ensemble de technologies qui sont fixes. Celles-ci ne changeront a priori pas en plein milieu du fonctionnement du réseau, et chacune de ces technologies disposent en fonction de l'implémentation logicielle et du matériel utilisé de coûts et de performances minimaux et maximaux qui sont fixes. C'est donc ces bornes maximales et minimales que nous proposons d'utiliser comme référentiel dans notre méthode de normalisation. Cela permet non seulement d'éliminer les inversions de rang, car le référentiel ne change pas, mais simplifie également les calculs qu'il est nécessaire d'effectuer pour dérouler les étapes restantes de la méthode de décision.

Normaliser, c'est facile !

Ainsi, nous proposons de remplacer l'équation 4.1, qui est utilisée pour la normalisation, par l'algorithme 1 de normalisation bornée. Pour cela, nous définissons l'ensemble $B = \{B_j^+, B_j^- \mid j = 1, 2, \dots, m\}$, qui se compose des bornes supérieures et inférieures de chaque attribut j , tel que $\forall x \in B, 0 < x < +\infty$. Dans cette normalisation bornée, chaque valeur x_{ij} est normalisée en étant divisée avec la borne supérieure ou inférieure de l'attribut j . Le choix de la borne utilisée dépend du type de l'attribut

Algorithme 1 : Normalisation bornée

Entrée : x_{ij} la valeur brute de chaque attribut j de chaque candidat i
pour chaque attribut P_j **faire**
 si P_j est un attribut montant **alors**
 B_j^+ est la borne supérieure de P_j
 $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{B_j^+}$
 sinon si P_j est un attribut descendant **alors**
 B_j^- est la borne inférieure de P_j
 $r_{ij} = \frac{B_j^-}{x_{ij}}$
 fin si
fin pour
retourne r_{ij} la valeur normalisée de x_{ij}

considéré. Les attributs ascendants sont divisés par leur borne supérieure, tandis que les attributs descendants divisent leur borne inférieure.

Puisque l'ensemble B est stable, les valeurs normalisées des alternatives ne seront pas altérées par le retrait d'une autre alternative de la matrice de décision. Non seulement, ceci efface totalement le problème des inversions de rang, mais ça permet également de réduire la complexité algorithmique des étapes de la méthode. Pour montrer cela, considérons une matrice de décision composée de n alternatives et de m attributs. L'équation 4.1 nécessite de calculer le dénominateur $\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}$, et cette opération est répétée pour chaque valeur de j , et donc pour m attributs. Cette étape en remplacée par l'algorithme 1, qui réduit le nombre d'opérations à effectuer à une simple division entre une borne et une valeur. Puisque l'on utilise des bornes qui sont connues et fixes, nous pouvons simplifier certaines des étapes suivantes.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (4.1 \text{ bis})$$

$$\begin{aligned} v_j^+ &= \text{Argmax}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \\ v_j^- &= \text{Argmin}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (4.4 \text{ bis})$$

$$\begin{aligned} v_j^+ &= \text{Argmin}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \\ v_j^- &= \text{Argmax}\{v_{ij}, i = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (4.5 \text{ bis})$$

$$\begin{aligned} v_j^+ &= 1 \\ v_j^- &= 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} A^+ &= [v_1^+ \dots v_m^+] \\ A^- &= [v_1^- \dots v_m^-] \end{aligned} \quad (4.3 \text{ bis})$$

$$\begin{aligned} A^+ &= [1 \dots 1] \\ A^- &= [0 \dots 0] \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^+ - v_{ij})^2} \quad (4.6 \text{ bis})$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_j^- - v_{ij})^2}$$

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (1 - v_{ij})^2} \\ S_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^m v_{ij}^2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Plus stable et plus simple

Pour commencer, la méthode TOPSIS utilise l'équation 4.3 afin de déterminer les alternatives théoriques positive et négative, qui sont utilisées pour la comparaison de chacune des alternatives de la matrice de décision. Les valeurs qui composent ces alternatives sont les valeurs extrêmes de l'ensemble des valeurs de toutes les alternatives pour l'attribut considéré, et sont déterminées selon les équations 4.4 et 4.5 respectivement pour les attributs ascendants et les attributs descendants. Ces étapes nécessitent de nombreuses opérations de comparaison entre les valeurs, afin de déterminer les valeurs extrêmes. Mais en remplaçant l'algorithme de normalisation avec notre normalisation bornée, cela simplifie la détermination des alternatives théoriques. En effet, les bornes maximales et minimales sont fixes, donc les valeurs normalisées de ces bornes sont pour tous les attributs respectivement égales à 1 et 0. Nous pouvons donc remplacer les équations 4.4 et 4.5 par l'équation 4.8. En conséquence, la détermination des alternatives théoriques telle qu'elle est réalisée dans l'équation 4.3 montre que les alternatives A^+ et A^- sont dans notre cas statiques, et l'on peut donc remplacer l'équation 4.3 par l'équation 4.9. Pour finir, puisque les alternatives théoriques sont connues et statiques, nous savons que $v_j^+ = 1$ et $v_j^- = 0$ pour chaque attribut j . En conséquence,

le calcul des distances qui est réalisé selon l'équation 4.6 peut se simplifier par l'équation 4.10.

L'ensemble de ces modifications simplifie la méthode de décision. Logiquement, la complexité calculatoire ainsi que le coût temporel d'exécution de la méthode réduisent également. En plus de cela, en raison de la stabilité du nouveau référentiel de normalisation, les inversions de rang ne sont plus un problème avec lequel il est nécessaire de composer. Si l'on reprend notre exemple de la section 4.2, et la matrice de décision du tableau 4.2, après exécution de notre méthode, le classement résultant est $[A_1, A_3, A_2, A_4]$. L'exécution de la même méthode, avec la même matrice de décision, moins l'alternative A_4 , donne le classement suivant : $[A_1, A_3, A_2]$. Nous n'observons donc plus d'inversion de rang.

Nous avons implémenté et évalué expérimentalement cette proposition, et la configuration des expériences ainsi que leurs résultats seront détaillés dans le chapitre 5, spécifiquement section 5.4. Maintenant, afin de mettre en évidence la réduction de complexité calculatoire, nous présentons dans la section suivante une estimation de la différence en nombre d'opérations entre la méthode TOPSIS et notre méthode personnalisée.

4.5 Estimation de la différence de complexité opérationnelle

Les modifications que nous proposons d'apporter à l'algorithme de normalisation utilisé par la méthode TOPSIS permettent non seulement d'éliminer le problème des inversions de rang, mais également de réduire la complexité calculatoire globale des opérations de la méthode. Pour comparer et quantifier cette réduction de complexité, nous présentons ici une estimation de la différence de complexité entre la méthode TOPSIS et notre méthode simplifiée. Pour cela, la notation grand O [109] est un outil couramment utilisé. Cependant, elle n'est pertinente que lorsque l'on considère des jeux de données relativement volumineux, ce qui n'est pas notre cas ici. À la place, nous avons donc fait le choix de quantifier le nombre d'opérations économisées entre l'exécution de la méthode TOPSIS et celle de notre méthode personnalisée.

Ce que nous appelons une opération est l'exécution d'une des quatre opérations arithmétiques de base : l'addition, la soustraction, la multiplication et la division. À cet ensemble, nous ajoutons également l'exécution d'une racine carrée et la comparaison de deux valeurs, qui seront donc toutes deux comptabilisées comme une seule opération. Évidemment, c'est une estimation relativement large, car le calcul d'une racine carrée par un processeur est souvent décomposé en plusieurs petites opérations. Mais la méthode de décomposition varie en fonction du matériel utilisé, et puisqu'il existe de nombreuses méthodes différentes [110], nous pensons qu'il n'est pas pertinent d'associer un coût opérationnel précis à l'exécution d'une racine carrée.

Pour estimer la différence de complexité, considérons l'utilisation des méthodes de décision avec en entrée une matrice de décision composée de n alternatives et m attributs. En faisant le décompte, on voit que l'équation de normalisation 4.1 nécessite au minimum l'exécution de

[109]: Irif, Notation grand O. <https://www.irif.fr/~carton/Enseignement/Complexite/ENS/Cours/MasterInfo/grandO.html>. Accessible au 02-07-2021.

[110]: Paul HSIEH. Square Roots. <http://www.azillionmonkeys.com/qed/sqroot.html>. Accessible au 02-07-2021.

$3nm$ opérations. En comparaison, l'algorithme de normalisation bornée 1 que nous proposons, nécessite nm opérations. Son utilisation nous permet ainsi d'économiser $2nm$ opérations. L'utilisation de notre algorithme de normalisation permet également de simplifier les autres étapes de la méthode de décision. Ainsi, remplacer l'utilisation des équations 4.3, 4.4 et 4.5 par les équations 4.9 et 4.8 permet d'éviter l'algorithme min-max utilisé pour déterminer les alternatives théoriques, puisqu'avec notre méthode, ces alternatives sont statiques. L'algorithme min-max est équivalent à $2(mn - 1)$ opérations, que nous évitons donc avec notre proposition. Pour finir, remplacer le calcul des distances mathématiques entre l'ensemble des alternatives considérées et les alternatives théoriques, qui sont déterminées par l'utilisation de l'équation 4.6, par l'équation 4.10, permet d'économiser nm opérations. Après calcul du total et factorisation, nous pouvons affirmer que notre proposition permet d'économiser $5mn - 2$ par rapport à la méthode TOPSIS classique, et ce, à chaque exécution de la méthode.

4.6 Une méthode optimisée pour les réseaux multitechnologies

Dans le chapitre 3, nous avons présenté RODENT, notre protocole de routage pour les réseaux multitechnologies. Dans ce genre de réseaux, les nœuds disposent d'une multiplicité technologique, qu'il est nécessaire de prendre en compte de façon efficace dans le mécanisme de sélection des routes afin de profiter au maximum des possibilités qu'offrent les réseaux multitechnologies. Pour cela, RODENT a besoin d'un mécanisme de classement et de sélection capable de prendre en compte les différentes caractéristiques offertes par plusieurs routes, qui utilisent des technologies variées. Pour pouvoir avoir plusieurs cas d'utilisation au sein d'un même réseau, il faut également que ce mécanisme soit capable de répondre au mieux aux besoins de communication variés imposés par les différents cas d'utilisation considérés.

Les méthodes de décision multiattribut sont pour cela des outils intéressants, car elles permettent de comparer et classer plusieurs alternatives en prenant en compte plusieurs critères dans le processus. Particulièrement, la méthode TOPSIS offre une approche performante, car elle propose de classer les alternatives non pas seulement sur leur proximité relative avec la meilleure solution, mais aussi en fonction de l'éloignement de chaque alternative avec la pire solution. Cependant, la méthode TOPSIS n'est pas exempte de défauts. Si on considère son exécution fréquente sur du matériel contraint, sa relative complexité risque de saper les réserves d'énergie des nœuds sur le long terme. En effet, les réseaux multitechnologies se composent de nœuds alimentés par des batteries, et donc fortement limités énergiquement parlant. De plus, à cause de la méthode de normalisation utilisée par la méthode TOPSIS, des inversions de rang peuvent se produire dans le classement des alternatives, ce qui risque de conduire à des basculements d'une technologie à une autre, qui sont coûteux temporellement et énergiquement, et n'apportent pas pour autant de réelle plus-value à la qualité des communications.

Un classement stable et rapide

Afin d'offrir une solution à ces deux problématiques, nous avons proposé dans ce chapitre une méthode de décision multiattribut alternative, basée sur la méthode TOPSIS. Notre proposition utilise un algorithme qui normalise les valeurs de la matrice de décision en fonction de bornes maximales et minimales associées à chacun des attributs considérés. Cela permet de résoudre totalement le problème des inversions de rang, car le référentiel de normalisation est stabilisé. Cet algorithme offre également une complexité calculatoire réduite par rapport à l'algorithme utilisé par la méthode TOPSIS. Cela permet non seulement de réduire le coût de la normalisation, mais également de simplifier les étapes restantes de la méthode de décision, nous permettant ainsi d'économiser $5mn - 2$ opérations par rapport à la méthode TOPSIS. Nous présenterons les détails de l'évaluation expérimentale de la performance de notre approche dans le chapitre 5, spécifiquement dans la section 5.4. Celle-ci montre une réduction du temps de calcul d'environ 40%, ainsi qu'une sélection similaire à celle de la méthode TOPSIS dans environ 80% des expériences. Ceci permet directement aux nœuds de réduire leur consommation énergétique, puisque le temps gagné peut être du temps passé en mode veille.

L'iniquité des réseaux multisaut

Si les réseaux multitechnologies permettent de surmonter certaines limitations causées par l'utilisation d'une unique technologie de communication, ils doivent cependant faire face aux problèmes intrinsèques des réseaux multisaut au même titre que tout réseau de capteurs sans fil. Particulièrement, l'effet entonnoir répartit la charge de travail de façon inéquitable dans le réseau. Afin de mitiger les conséquences néfastes de cet effet, nous proposons dans le chapitre 6 une méthode de réduction des données adaptées à notre protocole de routage.

Évaluation expérimentale des réseaux multitechnologies

5

5.1 Pourquoi expérimenter avant de simuler

Au fil des chapitres précédents, nous avons détaillé nos propositions pour la conception des réseaux multitechnologies. Dans le chapitre 3, nous avons présenté le fonctionnement de notre protocole de routage multitechnologies. Ensuite, dans le chapitre 4, nous nous sommes concentrés sur la méthode de sélection multiattribut utilisée par RODENT. Si ces propositions semblent pertinentes sur le papier, il est bien évidemment nécessaire de s'assurer des performances qu'elles offrent, par l'intermédiaire de tests.

Le modus operandi classique pour s'assurer de la pertinence d'une approche est de tester cette dernière dans un premier temps par simulation, puis par expérimentation. Cependant, pour de nombreuses raisons, nous avons choisi d'évaluer nos propositions en commençant par les expériences. Les simulateurs sont d'excellents outils pour réaliser des tests en variant l'environnement, les modèles de communications et le nombre de nœuds considérés, tout cela à moindre coût. Cependant, lors du déploiement réel d'un réseau de capteurs sans fil, de nombreux imprévus peuvent fortement impacter le comportement du réseau : aléas météorologiques, environnement dynamique, réflexion ou obstruction des communications, etc. À plus forte raison, l'utilisation de multiples technologies dans un même réseau, chacune offrant des caractéristiques différentes, démultiplie les complications qui peuvent survenir. Souvent, les simulateurs simplifient ces conditions externes, et ne permettent ainsi pas toujours d'obtenir des résultats proches de ceux obtenus par expérimentation.

Vérifier la faisabilité

Également, malgré l'existence de nombreux simulateurs réseau, il ne semble pas exister de simulateur approprié pour tester les réseaux multitechnologies, où chaque nœud disposerait de plusieurs technologies de communication utilisées de façon conjointe. Développer un nouveau simulateur ou un module pour un simulateur existant serait très coûteux temporellement parlant. De part le temps limité pour réaliser ces travaux, et notre collaboration avec l'entreprise Sencrop, nous voulions donc nous assurer au plus vite de la faisabilité réelle d'un prototype de réseau multitechnologie. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'évaluer nos propositions à travers des expérimentations, réalisées grâce à des nœuds multitechnologies sur lesquels nous avons implémenté les algorithmes que nous avons décrits dans les chapitres précédents.

Dans ce chapitre, nous présentons donc les informations relatives aux évaluations expérimentales que nous avons réalisées afin de valider la pertinence et les performances de notre approche. Dans un premier temps, nous détaillons l'implémentation de nos propositions dans la section 5.2, c'est-à-dire les caractéristiques des outils logiciels et matériels

5.1 Pourquoi expérimenter avant de simuler	75
5.2 Implémentation expérimentale	76
5.2.1 Modules et autres matériels utilisés	76
5.2.2 Fonctionnement des micrologiciels	77
5.3 Configuration expérimentale	79
5.3.1 Organisation physique des expériences	79
5.3.2 Scénario d'utilisation reproduit	79
5.3.3 Évaluation de la méthode de décision	82
5.4 Résultats expérimentaux	82
5.4.1 Topologie et routage	83
5.4.2 Ratio de livraison des paquets	84
5.4.3 Fréquence d'inversion des rangs	85
5.4.4 Temps d'exécution des méthodes de décision	86
5.4.5 Réduction de la consommation énergétique	87
5.5 Un prototype imparfait, mais fonctionnel	88

que nous avons utilisés au cours de nos expériences. Ensuite, dans la section 5.3, nous verrons la configuration physique de notre réseau et le scénario que nous avons cherché à reproduire au travers de nos expériences. La section 5.4 présente ensuite les résultats que nous avons obtenus au cours de ces dernières. Nous nous pencherons notamment sur la topologie réseau obtenue, le ratio de livraison des paquets observés et le temps d'exécution de notre méthode de décision. Pour finir, la section 5.5 récapitule et conclut ce chapitre.

5.2 Implémentation expérimentale

Afin de vérifier que la conception d'un réseau multitechnologie est faisable, et que nos propositions sont pertinentes pour optimiser le fonctionnement de tels réseaux, il nous était nécessaire de réaliser une implémentation de ces dernières. Nous avons choisi d'utiliser des modules FiPy de Pycom pour cela, qui ont la spécificité de disposer de plusieurs technologies de communication sans fil qui peuvent être utilisées de façon simultanée. Pour les besoins de nos expériences, nous avons également besoin d'une première station de base capable de réceptionner et traiter les messages qui utilisent la technologie WiFi, ainsi que d'une seconde station de base pour la technologie LoRa.

Dans cette section, nous détaillons les différents matériels que nous avons utilisés pour nos expériences. Également, nous introduisons sommairement la production logicielle que nous avons réalisée ainsi que son fonctionnement.

5.2.1 Modules et autres matériels utilisés



FIGURE 5.1 – Illustration d'un module FiPy de Pycom [84], disposant de six technologies de communication sans fil.

[84]: *FiPy specsheet*. Version 1.0. Pycom. 2018

[101]: *ESP32 series datasheet*. Version 3.3. Espressif Systems. 2020

Les modules FiPy de Pycom [84] sont des nœuds relativement bien adaptés aux réseaux de capteurs sans fil. Une illustration de ces derniers est visible dans la figure 5.1. Ils sont constitués de matériel commun dans les réseaux de capteurs sans fil : processeur ESP32 [101], mémoire de stockage limitée, taille réduite, etc. Leur spécificité se trouve au niveau de la communication sans fil. En effet, ces nœuds disposent d'un ensemble de technologies plutôt intéressant, dont voici le détail : WiFi, LoRa, Sigfox, LTE-M, NB-IoT et "Bluetooth Low Energy" (BLE). Chacune de ces technologies offre des performances et des possibilités différentes, ce qui fait des FiPy des nœuds très polyvalents technologiquement parlant, et donc des candidats parfaits pour nos expériences.

Les nœuds FiPy offrent une interface physique limitée, sous la forme de deux rangées de connecteurs, quelques boutons et d'autres connecteurs pour des antennes externes. Afin de pouvoir les interfacier facilement avec d'autres équipements électroniques, il est possible d'utiliser des cartes d'extensions qui s'interfacent avec les FiPy grâce aux deux rangées de connecteurs disponibles. Ces cartes d'extension disposent d'un port micro-USB, et facilitent ainsi la programmation des modules FiPy. Nous avons ainsi utilisé de façon interchangeable les cartes d'extension Pytrack et Pysense, en fonction de nos besoins. Une carte d'extension Pytrack [111], telle que visible dans la figure 5.2, ajoute en plus des capteurs de positionnement, tels qu'un accéléromètre et un récepteur GPS. Une carte

[111]: *Pytrack specsheet*. Pycom. 2017

d'extension Pysense [112] dispose, elle, de capteurs de surveillance, pour la luminosité, l'humidité, etc.

Matériel des stations de base

Dans notre scénario expérimental, que nous décrivons dans la section 5.3, nous avons prévu que les nœuds communiquent avec deux stations de base, une utilisant la technologie WiFi, et une seconde la technologie LoRa. Pour jouer le rôle de notre station de base WiFi, nous utilisons un dongle Edimax EW-7811Un [113]. Ce dernier se connecte facilement à un ordinateur central grâce à une interface USB, et offre une interface de communication WiFi utilisable par l'ordinateur maître. La deuxième station de base utilise la technologie LoRa, et pour endosser cette responsabilité nous utilisons une carte B-L072Z-LRWAN1 [114]. Cette carte dispose d'une unité de calcul dédiée et d'autres modules la rendant indépendante de l'ordinateur principal. Elle dispose d'un port micro-USB que nous utilisons pour fournir l'alimentation nécessaire à la carte et récupérer les informations écrites par la carte sur sa sortie standard. Afin de connecter et d'alimenter les cinq FiPy et les deux stations de base que nous utiliserons dans nos expériences, ces équipements sont tous connectés à un unique hub USB Tripp Lite U223-007 [115], disposant de sept ports USB. Ce hub USB est à son tour connecté à un ordinateur principal, de marque et modèle Dell Latitude 5590. Ce dernier fournit une alimentation aux différents équipements, collecte les données et analyse les résultats expérimentaux.

5.2.2 Fonctionnement des micrologiciels

Les nœuds FiPy se basent sur un processeur ESP32, souvent utilisé dans les systèmes contraints. Ces processeurs disposent d'une chaîne de compilation offrant les outils nécessaires pour programmer le micrologiciel des nœuds en langage C. Afin d'accélérer le prototypage et le développement, un portage de MicroPython [116] peut-être utilisé en tant que micrologiciel, ce qui permet de programmer le comportement des nœuds en langage Python, et de disposer d'une base de code permettant de simplifier les opérations embarquées de bas niveau. Nous avons ainsi programmé nos propositions en MicroPython, et nous allons décrire ici de façon succincte le comportement d'un nœud qui utilise notre implémentation de RODENT.

Considérons ici le nœud i , noté N_i . Immédiatement après sa mise sous tension, N_i calcule son identifiant unique, sur la base d'un identifiant constructeur unique à chaque module FiPy. Cet identifiant sera utilisé lors de toutes les communications que N_i effectuera avec son voisinage. La matrice de lien de N_i , notée LM_i , est pour l'instant implémentée de façon statique, car comme indiqué dans le chapitre 3, nous faisons l'hypothèse que N_i dispose d'une méthode pour préalablement découvrir son voisinage. Sur la base de LM_i , N_i initialise ses interfaces de communication et construit ses routes unisaut, qu'il stocke dans sa matrice de route RM_i . N_i rentre ensuite dans la boucle principale, qui effectue les opérations suivantes :

[112]: *Pysense specsheet*. Pycom. 2020

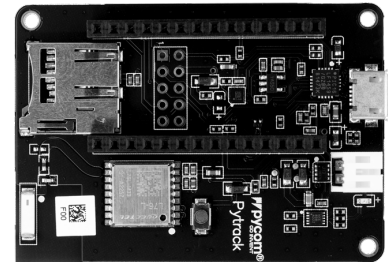


FIGURE 5.2 – Shield Pytrack de Pycom [111], offrant des outils pour localiser les nœuds.

[113]: *EW-7811Un Datasheet*. Edimax. 2015

[114]: *UM2115 User manual*. Rev 5. STMicroelectronics. 2018

[115]: *7-Port USB 2.0 Hub, U223-007*. Tripp Lite. 2021

[116]: *The MicroPython project*. <https://github.com/pycom/pycom-micropython-sigfox>. Accessible au 02-07-2021.

TABLE 5.1 – Vecteurs de besoins $RV_{surveillance}$ et RV_{alarme} .

	Coût énergétique	Coût monétaire	Débit
$RV_{surveillance}$	0.6	0.3	0.1
RV_{alarme}	0.1	0.1	0.8

1. pour chaque cas d'utilisation y , N_i dispose d'un vecteur de besoins associé RV_y , et sélectionne ainsi une meilleure route BR_i^y pour chaque utilisation considérée.
2. la prochaine mesure à transmettre est ajoutée à la fin de la queue de transmission.
3. chacun des paquets de la queue de transmission est envoyé, un par un, en utilisant la meilleure route BR_i^y en fonction du cas d'utilisation associé y , et ce, jusqu'à que la queue de transmission soit vide.

Simultanément, N_i est à l'écoute des messages envoyés par ses voisins. Lors de la réception d'un paquet de $NBR(i)_j$, une interruption est déclenchée, et le paquet est décodé. La meilleure route BR_j^y est stockée ou mise à jour dans RM_i , et si le paquet doit être relayé par N_i , il est ajouté à la fin de la queue de transmission de ce dernier. La queue de transmission dispose d'une taille maximale, que nous avons arbitrairement fixée à dix paquets. À l'émission de chaque paquet, N_i affiche ses caractéristiques sur son port série. Cela nous permet de collecter les informations nécessaires au traitement des résultats à la fin des expériences. Pour illustrer l'adaptation automatique du réseau selon les différents cas d'utilisation, nous utilisons deux vecteurs de besoins : $RV_{surveillance}$ et RV_{alarme} . Ces deux derniers sont visibles dans le tableau 5.1. Les cartes d'extension sur lesquelles sont montés les FiPy disposent d'un bouton programmable, et lors d'un appui sur ce dernier, N_i bascule entre les deux cas d'utilisation considérés.

Micrologiciel des stations de base

Penchons-nous rapidement sur le micrologiciel avec lesquels nos deux stations de base fonctionnent. Le rôle de la station de base LoRa est endossé par une carte indépendante, basée sur un microcontrôleur STM32L072CZ. Avec la chaîne de compilation adaptée, ce dernier est programmable en langage C. Le fonctionnement du micrologiciel est simpliste : la station de base LoRa est en écoute permanente des communications environnantes. Lors de la réception d'un paquet, celui-ci est décodé et son identifiant réseau est vérifié. Si ce dernier correspond avec l'identifiant réseau connu par la station de base, alors c'est un paquet RODENT. Le paquet en question est déballé, et ses caractéristiques sont écrites sur le port série de la carte.

Concernant la station de base WiFi, c'est cette fois un simple dongle WiFi qui est utilisé. Ce dernier offre une interface réseau WiFi à l'ordinateur principal, qui l'utilise pour jouer le rôle de station de base. Le micrologiciel est donc exécuté par l'ordinateur principal. Nous avons implémenté ce micrologiciel en langage Python, et son fonctionnement est analogue à celui de la station de base LoRa : écoute permanente des communications WiFi, vérification de l'identifiant réseau et affichage sur la sortie standard des caractéristiques des paquets réceptionnés.

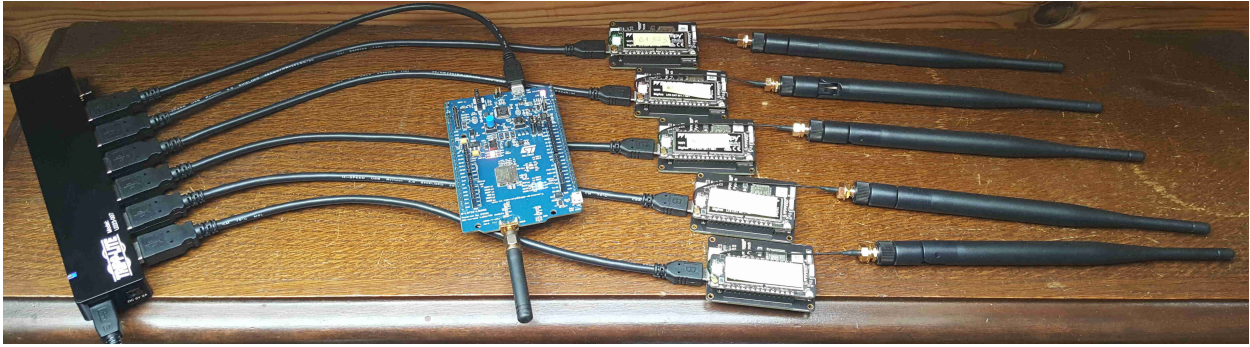


FIGURE 5.3 – Branchement et positionnement du matériel expérimental.

5.3 Configuration expérimentale

Afin de vérifier la faisabilité de notre approche et les performances de nos propositions, nous avons choisi de concevoir un prototype et d'effectuer des expériences avec du matériel réel. Nos expériences se sont déroulées dans un environnement non contrôlé et avec une configuration physique des nœuds particulière. Ces mêmes nœuds ont été configurés pour suivre un scénario spécifique, cherchant à reproduire une utilisation pour l'agriculture connectée. Dans cette section, nous montrons la configuration physique dans laquelle les expériences se sont déroulées, et nous décrivons le scénario que nous avons considéré ainsi que le rôle de chaque nœud dans ce scénario.

5.3.1 Organisation physique des expériences

Comme nous l'avons expliqué dans la section 5.2, chacun des nœuds, et chacune des stations de base, sont tous et toutes connectés à un unique hub USB. Ce dernier est à son tour relié à l'ordinateur principal, ce qui permet de fournir une alimentation aux différents équipements ainsi que de récolter les données nécessaires au traitement des résultats expérimentaux. Nous pouvons donc également noter que tous les équipements sont alimentés au même instant, et démarrent donc simultanément. Nous pouvons voir dans la figure 5.3 une photo du positionnement et du branchement de tous les équipements. Ces derniers sont restés statiques durant les expériences, et non pas non plus été déplacés entre les différentes réitérations des expériences. Le hub USB est connecté à l'ordinateur principal, qui enregistre en permanence la sortie standard de la station de base WiFi et les ports série des nœuds et de la station de base LoRa, ce qui permet par la suite de calculer les résultats des expériences.

5.3.2 Scénario d'utilisation reproduit

Avec nos expériences, nous avons cherché à reproduire un réseau conçu pour la surveillance à distance de cultures agricoles variées. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 1, l'agriculture connectée offre une aide aux agriculteurs dans leur travail quotidien, mais les exploitations agricoles sont des environnements relativement hostiles aux communications sans fil. Ainsi, les réseaux multitechnologies permettraient de

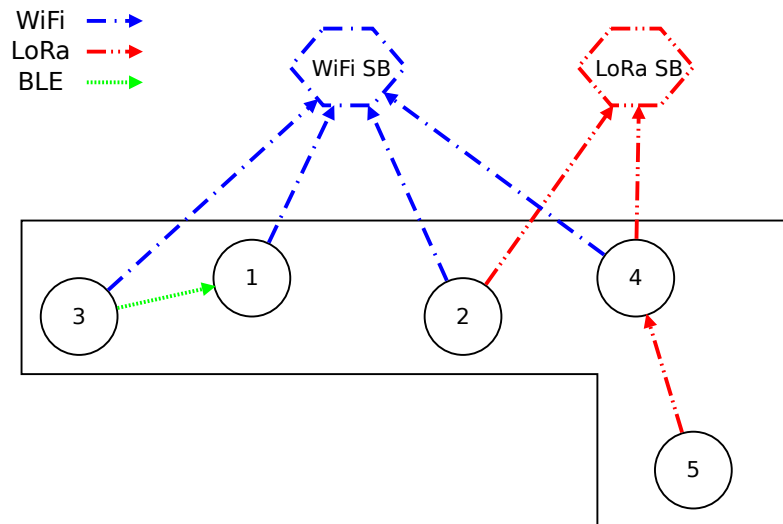


FIGURE 5.4 – Topologie logique de notre réseau multitechnologie, reproduisant un scénario de surveillance de cultures agricoles.

réduire l'impact néfaste de plusieurs contraintes, en offrant aux nœuds différentes possibilités technologiques pour la communication sans fil.

Dans notre scénario, les cinq nœuds que nous utilisons sont déployés dans un même champ, et sont partiellement co-localisés afin de pouvoir relayer leurs données jusqu'aux stations de base. L'organisation logique de ces nœuds, des stations de base, et les liens que tous partagent, sont visibles dans la figure 5.4. Nous partons du principe que ces nœuds enregistrent tout simplement la température ambiante, et communiquent cette information régulièrement à l'agriculteur en charge de la parcelle de terrain considérée. Leur première priorité, qui correspond au cas d'utilisation surveillance, est de limiter les coûts énergétiques et monétaires de la communication sans fil. Cependant, si leurs mesures montrent des valeurs inquiétantes, comme une température beaucoup trop basse, ils doivent également être à même d'émettre un message d'alarme, dont la priorité est d'arriver rapidement à destination.

Un théâtre où chacun doit jouer son rôle

De toutes les technologies de communication dont disposent les modules FiPy, nous avons choisi de nous en tenir à l'utilisation de la moitié. Les technologies Sigfox, LTE-M et NB-IoT, sont des technologies qui fonctionnent exclusivement sur un modèle opérateur. Expérimenter avec ces dernières serait donc bien plus complexe : nécessité d'un abonnement, d'une couverture réseau, difficultés de récupération des résultats expérimentaux, etc. C'est pourquoi nous avons choisi ici d'utiliser exclusivement les technologies WiFi, LoRa et BLE, qui sont libres d'utilisation, nous permettant ainsi de déployer nos propres stations de base.

L'idée principale de notre scénario est la suivante : si les nœuds utilisent dans un premier temps uniquement la technologie WiFi, l'activation de RODENT leur permet de profiter de leur multiplicité technologique. Les liens LoRa et BLE étant plus intéressants énergiquement parlant que les liens WiFi, ils seront choisis pour émettre les données de surveillance régulière. À l'inverse, lorsqu'un nœud émet des messages d'alarmes,

l'utilisation de la technologie WiFi, qui offre un débit supérieur, sera favorisée. Pour mettre en valeur les avantages qu'offre l'utilisation de notre protocole de routage, chacun des nœuds N_i visibles sur la figure 5.4 se trouve dans une situation différente.

- N_1 sert de nœud témoin, et dispose d'un unique lien avec la station de base WiFi. Ainsi, son routage ne changera pas en fonction de l'état d'activation du protocole RODENT.
- N_2 dispose d'un lien avec la station de base WiFi, mais également d'un second avec la station de base LoRa. Il préférera ce dernier pour la transmission des données régulières lorsque RODENT est activé.
- N_3 a également la possibilité de communiquer directement avec la station de base WiFi. Mais lorsque RODENT est activé, il a une seconde option : relayer ses données à son voisin N_1 , grâce à l'utilisation de la technologie BLE, afin de réduire le coût énergétique de la communication sans fil de N_3 .
- N_4 est chargé de surveiller des cultures particulièrement sensibles au gel. Il a donc besoin de deux routes différentes, une pour envoyer des données de surveillance régulière à moindre coût, et une pour transmettre des données de façon la plus rapide possible. Pour cela, il dispose de deux liens, vers les deux stations de base LoRa et WiFi, qu'il peut utiliser de façon interchangeable lorsque que RODENT est actif.
- N_5 se trouve, lui, dans une situation particulièrement problématique. Déployé trop loin des stations de base, N_5 est incapable de communiquer directement avec ces dernières. Les exploitations agricoles se trouvent souvent dans des zones rurales, et présentent une végétation dense, c'est pourquoi les zones blanches et l'isolation des nœuds ne sont pas à négliger. Lorsque RODENT est actif, N_5 a la possibilité de transférer ses données à son voisin N_4 , en utilisant la technologie LoRa. Par la suite, N_4 sera capable de relayer ces données en utilisant ces liens avec les stations de base WiFi et LoRa, en fonction du type de données émis par N_5 .

Différents types d'expériences

Nous avons expérimenté selon trois ensembles de conditions différentes :

1. RODENT est inactif. Dans ce cas, les nœuds n'utilisent qu'une seule technologie de communication, ici le WiFi. Les nœuds n'ont donc pas la possibilité de changer de technologie, ni de s'adapter à leurs différents besoins de communication. Les liens utilisant la technologie WiFi sont visibles en bleu sur la figure 5.4.
2. RODENT est actif. Ainsi, les nœuds peuvent utiliser la technologie WiFi, mais également les technologies LoRa et BLE. Ils sont donc capables de basculer d'une technologie à une autre en fonction de leurs besoins de communication. Les liens utilisant les technologies LoRa et BLE sont respectivement visibles en rouge et en vert sur la figure 5.4.
3. Dans notre implémentation, nous utilisons les technologies LoRa et BLE de façon détournée, ce qui cause des pertes de paquets. Afin

de comprendre ces pertes, nous avons testé des expériences où RODENT est actif, mais où les transmissions sont répétées. Chaque message LoRa est envoyé deux fois, et chaque message BLE trois fois. Plus de détails seront donnés dans la section 5.4.

Une vidéo de démonstration d'une expérience utilisant RODENT est disponible en ligne [117].

[117]: *Démonstration en vidéo d'un prototype de réseau multitechnologie basé sur RODENT.*
<http://chercheurs.lille.inria.fr/bfoubert/ressources/rodent.mp4>.
 Accessible au 02-07-2021.

5.3.3 Évaluation de la méthode de décision

Notre protocole de routage RODENT utilise une méthode de décision personnalisée afin de sélectionner les routes les plus adaptées aux besoins individuels des nœuds. Nous avons décrit cette méthode en détail dans le chapitre 4. Dans un premier temps, nous voulions vérifier la fréquence d'apparition des inversions de rang lors de l'utilisation de la méthode TOPSIS. Pour cette expérience, un module construit une matrice de décision aléatoire et de taille variable, exécute la méthode TOPSIS, puis retire une alternative du classement aléatoirement. La méthode de classement est de nouveau exécutée, et les classements résultants sont comparés : si l'ordre des alternatives restantes est modifié, alors il y a eu inversion de rang.

Ensuite, afin de nous assurer des performances de notre méthode personnalisée, nous avons comparé les résultats expérimentaux que nous obtenons en utilisant la méthode TOPSIS et notre méthode. Pour cela, nous avons implémenté les deux algorithmes correspondant en MicroPython sur les modules FiPy. Lors d'une expérience, un module construit une matrice de décision aléatoire de taille variable puis exécute la méthode TOPSIS tout en mesurant le temps d'exécution. Dans un second type d'expériences, le même module recommence les mêmes opérations, mais utilise cette fois-ci notre méthode personnalisée. Nous verrons les résultats obtenus dans la section suivante.

5.4 Résultats expérimentaux

Pour l'évaluation du protocole RODENT, nous nous sommes concentrés sur l'observation de la topologie du réseau et la mesure du ratio de réception des paquets. L'observation de la topologie consiste à relever quelles routes sont utilisées par quels nœuds. Le ratio de livraison des paquets, de l'anglais "Packet Delivery Ratio" (PDR), se calcule en divisant le nombre de paquets reçus par le nombre de paquets envoyés. Mesurer le taux de livraison nous permet de vérifier le bon fonctionnement des communications et de détecter les éventuelles difficultés. Dans ces expériences, chacun des nœuds émet une nouvelle mesure après une période de temps choisie aléatoirement dans un intervalle de 2 à 4 secondes, et cette période change à chaque nouvel envoi. Nous considérons une population de 20 expériences, d'une durée de 10 minutes chacune. La taille de la population considérée nous semble pertinente, car les résultats montrent un faible écart-type. Également, la durée de chaque expérience est suffisante, car le réseau se stabilise après l'échange de quelques messages.

Nous ne comparons ici pas directement les résultats obtenus par RODENT avec ceux des travaux connexes, car notre approche diffère grandement de ces derniers, et qu'il semble difficile de mesurer l'accroissement de la flexibilité du réseau, autrement qu'en le démontrant par l'exemple. Concernant l'évaluation de notre méthode de décision, nous avons mesuré la fréquence des inversions de rang, ainsi que le temps d'exécution de la méthode TOPSIS et de notre méthode personnalisée. Nous considérons pour cela une population de 7000 expériences, et ce, pour chacune des tailles de matrices que nous avons testées. Aussi, la consommation énergétique étant un point névralgique dans les réseaux de capteurs sans fil, nous y accorderons une sous-section. Dans cette section, nous présentons la totalité des résultats expérimentaux que nous avons obtenus.

5.4.1 Topologie et routage

La principale conséquence attendue de l'utilisation de RODENT est de voir un changement automatique de la topologie de routage en fonction des besoins des nœuds. Ainsi, pour chaque nœud, lorsque RODENT est activé, nous pouvons observer les modifications suivantes, représentées sur la figure 5.5.

- N_1 est le nœud témoin, et donc comme attendu, l'activation de RODENT ne change pas du tout son routage, puisqu'il dispose d'un unique chemin à destination de la station de base WiFi.
- N_2 envoie des données de surveillance de façon régulière. Son principal objectif est donc de minimiser les coûts énergétiques et monétaires de la communication sans fil, ce qu'il fait en sélectionnant la route à destination de la station de base LoRa, moins coûteuse que la route utilisant la technologie WiFi.
- N_3 de même, cherche à minimiser les coûts associés à ses communications. Il choisit donc d'utiliser la route à destination de la station de base WiFi, mais passant par le lien utilisant la technologie BLE qu'il a en commun avec son voisin N_1 . À son tour, N_1 relayera les données de N_3 à la station de base WiFi. Cela permet à N_3 de réduire sa consommation énergétique, cependant cela augmente logiquement celle de N_1 . Mais grâce à la méthode d'estimation des données décrite dans le chapitre 6, il est possible de réduire le surcoût énergétique de N_1 .
- N_4 envoie régulièrement des données de surveillance, en utilisant sa route à destination de la station de base LoRa, ce qui lui permet de réduire sa consommation énergétique par rapport à l'utilisation de la technologie WiFi. À l'inverse, lorsque N_4 a besoin d'envoyer un message d'alarme, il change de route et de technologie, pour communiquer avec la station de base WiFi. Si les coûts de cette technologie sont plus élevés, elle offre également un débit bien supérieur à celui de LoRa, permettant ainsi de transmettre un message urgent de façon beaucoup plus rapide.
- N_5 est trop loin pour avoir une connectivité directe avec les stations de base LoRa et WiFi. Dans un réseau n'utilisant que la technologie WiFi, il ne serait donc pas capable d'envoyer ses données à bon port. Lorsque RODENT est activé, cela lui permet d'utiliser une seconde technologie, et ainsi de transmettre ses données à son voisin N_4 . N_5 dispose de deux routes, en fonction du type de données qu'il

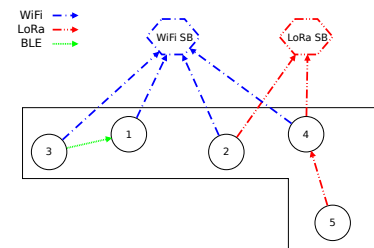


FIGURE 5.5 – Rappel de la topologie logique de notre réseau multitechnologique, visible en figure 5.4.

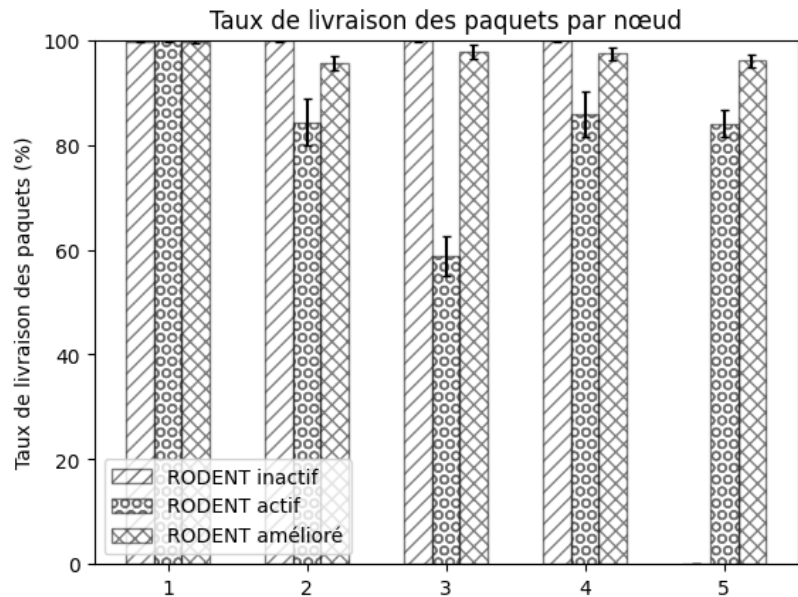


FIGURE 5.6 – Taux de livraison mesuré pour chaque nœud. Les barres d’erreurs représentent les écarts type, et les différentes colonnes correspondent à chacun des trois types d’expériences.

veut transmettre. Toutes les deux passent par N_4 , mais ce dernier relayera les messages de surveillance de N_5 à la station de base LoRa, tandis que les messages d’alarmes seront relayés à la station de base WiFi, afin de respecter au mieux les besoins de N_5 .

Nous pouvons donc voir que, comme prévu, RODENT permet aux nœuds de s’adapter au mieux à leurs différents besoins de communication. Il permet également aux nœuds de relayer leurs données à un voisin, afin de mieux respecter leurs besoins, ou de palier un défaut de couverture.

5.4.2 Ratio de livraison des paquets

Le ratio de livraison des paquets, de l’anglais "Packet Delivery Ratio" (PDR), correspond au total des paquets reçus sur le total des paquets envoyés. Pour chacun des nœuds de notre réseau, nous pouvons voir les taux de livraison moyens associés sur la figure 5.6. L’écart-type mesuré est visible sur chaque colonne avec la barre d’erreur associée, et pour chaque nœud sont visibles trois colonnes, chacune correspondant aux résultats observés pour les trois types d’expériences que nous avons décrites dans la section 5.3. Nous pouvons ainsi remarquer les choses suivantes :

- N_1 étant le nœud témoin, son taux de livraison ne change pas, sa route et la technologie qu’il utilise restant les mêmes dans les différentes expériences.
- N_5 a un taux de livraison nul lorsque RODENT est inactif, ce qui est attendu puisqu’il est isolé et incapable d’envoyer le moindre paquet à destination.
- N_2 , N_4 et N_5 atteignent tous les trois un taux de livraison d’environ 80% lorsque RODENT est actif, c’est-à-dire, lorsqu’ils utilisent la technologie LoRa.
- N_3 atteint un faible taux de livraison lorsque RODENT est actif, c’est-à-dire, lorsqu’il utilise la technologie BLE pour relayer ses données à son voisin N_1 .

- N_2 , N_3 , N_4 et N_5 atteignent un taux de livraison supérieur à 95% lorsque RODENT amélioré est actif, c'est-à-dire, lorsque les messages LoRa sont émis deux fois et les messages BLE trois fois.

Houston, we've had a problem here

Nous observons donc globalement une augmentation du taux de perte lors de l'utilisation de notre implémentation de RODENT. Nous pensons que ces résultats sont dus à plusieurs facteurs, tous liés à notre implémentation et au matériel utilisé. En effet, nous utilisons les trois technologies WiFi, LoRa et BLE de façon détournée afin de parvenir à nos fins. En sus d'une couche physique spécifique, ces technologies se basent normalement sur une couche liaison de données qui est propre à chacune. Dans nos expériences, nous utilisons les technologies WiFi et LoRa en mode "RAW", c'est-à-dire sans gestion de la couche liaison particulière, ce qui augmente le risque de collision. La technologie BLE n'est pas conçue pour envoyer des messages uniques, mais fonctionne avec un système d'abonnement et de services. Pour reproduire des transmissions uniques, nous avons détourné l'utilisation des messages de type "advertisement" de la technologie BLE. Mais cela ne peut pas être la seule explication, car la qualité des liaisons WiFi devrait également être impactée de la même façon.

Les résultats obtenus lors de l'utilisation du protocole RODENT en version "améliorée" montrent bien que la réémission des messages suffit à compenser les pertes, ce qui indique probablement un problème de réception des messages. Notre environnement de test n'étant a priori pas particulièrement surchargé de communications LoRa et BLE, les interférences ne jouent probablement qu'un faible rôle dans ce problème. Notre principale hypothèse est que ces pertes sont dues au matériel utilisé : la station de base WiFi est, en effet, gérée par l'ordinateur principal, tandis que la station de base LoRa et le récepteur BLE sont des cartes indépendantes, disposant de capacités moindres, notamment en termes de fréquence de réception. La réémission des messages n'étant pas une alternative valable dans les réseaux contraints, il s'agit là d'un problème d'ingénierie que nous aimerions approfondir à l'avenir.

5.4.3 Fréquence d'inversion des rangs

Lorsque nous nous sommes attaqués au problème des inversions de rang qui touchent les méthodes de décision multiattribut, nous voulions dans un premier temps vérifier la fréquence de ces inversions, afin de nous assurer qu'elles ne soient pas tout simplement suffisamment rares pour être négligées. Nous avons donc effectué des expériences ayant pour but de quantifier la prévalence des inversions de rang lors de l'utilisation de la méthode TOPSIS, et ce, pour l'utilisation de matrices de décision de tailles variées.

Les résultats obtenus sont visibles sur la figure 5.7, qui représente la proportion des expériences qui mènent à une inversion de rang, en fonction de l'ordre des matrices de décisions carrées considérées. Nous pouvons immédiatement remarquer que la fréquence des inversions de rang est fortement corrélée avec la taille des matrices de décision. La

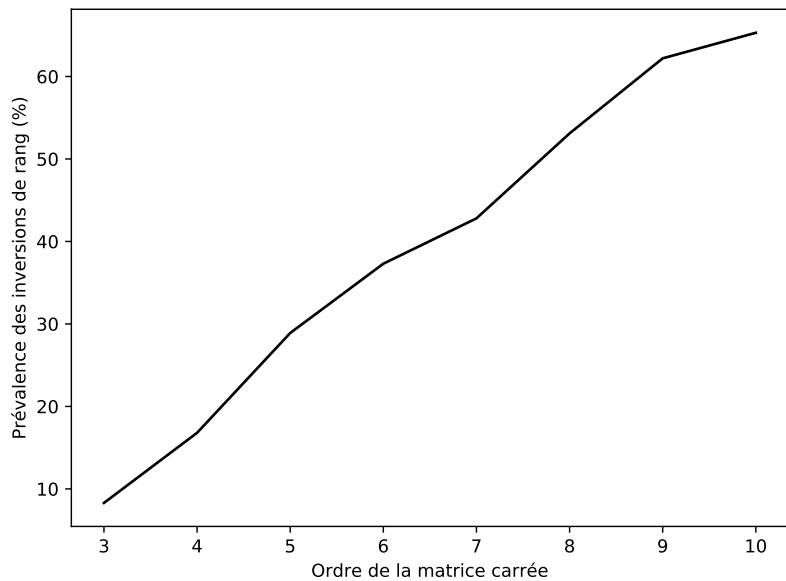


FIGURE 5.7 – Prévalence des inversions de rang en fonction de l'ordre de la matrice carrée de décision.

tendance générale étant que plus la matrice de décision est large, plus les inversions de rang sont fréquentes.

Au vu des résultats, nous nous sommes contentés de tester des matrices allant jusqu'à une taille de 10×10 . En effet, nous pouvons voir que même avec des matrices de petite taille, par exemple 5×5 , une inversion de rang se produit déjà dans environ 30% des cas. Comme expliqué précédemment, les inversions de rang risquent de causer des changements de route et de technologie de communication inutiles, diminuant ainsi la longévité énergétique des nœuds. Si nous considérons des réseaux de dimensions encore plus importantes, les matrices de route seront encore plus larges. Des matrices plus larges impliqueraient une fréquence accrue d'inversion des rangs, et nous ne pouvons donc pas négliger ce problème. C'est pourquoi nous avons conçu la proposition que nous avons détaillée dans le chapitre 4 de façon à ce que les inversions de rang ne puissent plus se produire.

5.4.4 Temps d'exécution des méthodes de décision

Pour comparer les performances de la méthode TOPSIS et celles de notre méthode personnalisée, nous avons réalisé des expériences dans lesquelles nous mesurons le temps d'exécution nécessaire à chacune des méthodes. Également, nous avons comparé les classements résultants de ces méthodes, afin de déterminer le niveau de similarité entre les deux. Il est important de noter que la méthode TOPSIS ne peut pas être considérée comme un référentiel de comparaison absolu pour estimer la qualité d'une méthode de classement. En effet, il n'existe actuellement pas de moyen de concevoir un classement "parfait", et donc pas de référentiel parfait avec lequel comparer de nouvelles propositions. Néanmoins, le consensus est que TOPSIS produit un classement de qualité, et cette méthode est donc couramment utilisée comme élément de comparaison.

Les résultats en temps d'exécution, pour chaque méthode, sont visibles sur la figure 5.8, en fonction de la taille des matrices de décision carrées

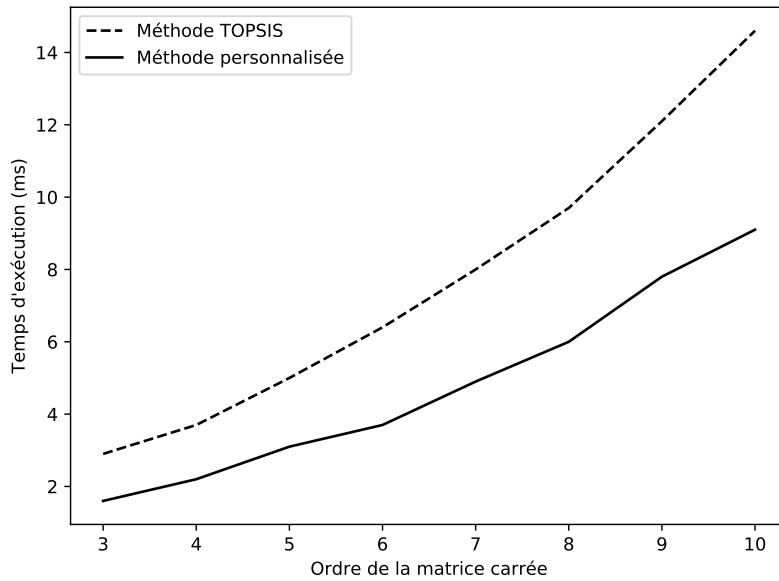


FIGURE 5.8 – Temps d'exécution en millisecondes des méthodes de décision en fonction de l'ordre de la matrice de décision.

considérées. Lors de l'utilisation de notre méthode, nous constatons une accélération moyenne du temps de calcul de 38% par rapport au temps d'exécution de la méthode TOPSIS. Dans le même temps, notre méthode offre une similarité dans la sélection de route avec la méthode TOPSIS pour 82% des expériences réalisées. La sélection réalisée dans les 18% des expériences restantes ne peut pas être qualifiée de "pire", puisque que cela dépend des applications et de ce qui est attendu ou nécessaire. Le classement est ainsi seulement différent de celui de TOPSIS que nous utilisons comme référence.

Si nous nous concentrons sur les résultats obtenus pour des matrices de taille 5×5 , avec les résultats arrondis à deux décimales, le temps d'exécution moyen de la méthode TOPSIS classique est de 4,79 ms, tandis que le temps d'exécution moyen de notre méthode personnalisée est de 2,96 ms. Cela signifie que les nœuds pourraient bénéficier de périodes de veille plus longues de 1,83 ms si l'on utilise notre méthode à la place de la méthode TOPSIS. L'écart-type est de 0,05 ms, et les intervalles de confiance sont de $\pm 2.76 \times 10^{-3}$ ms et $\pm 2.48 \times 10^{-3}$ respectivement pour la méthode TOPSIS classique et pour notre méthode personnalisée, avec un niveau de confiance de 99.999%. Le classement de matrices de décision de tailles supérieures montre des résultats analogues.

5.4.5 Réduction de la consommation énergétique

Mesurer la consommation énergétique des modules FiPy au niveau matériel est pour le moins hasardeux. En effet, ces modules sont relativement récents, et souffrent encore de quelques problèmes de conception qui ont tendance à fausser les mesures [118]. C'est pourquoi nous avons choisi d'estimer l'économie énergétique des nœuds, en nous basant sur les taux de consommation annoncés dans la documentation technique des composants des FiPy [84, 101]. L'intensité du courant nécessaire pour alimenter et utiliser en mode transmission chacune des technologies que nous utilisons dans nos expériences sont représentées dans la figure 5.9. Nous pouvons voir que les technologies WiFi, BLE et LoRa des nœuds

[118]: Thomas ANDERSÉN. « Energy-Efficient Adaptive Sensing in Low Power Wide Area Networks ». Mém. de mast. Norwegian University of Science et Technology, 2018

[84]: *FiPy specsheet*. Version 1.0. Pycom. 2018

[101]: *ESP32 series datasheet*. Version 3.3. Espressif Systems. 2020

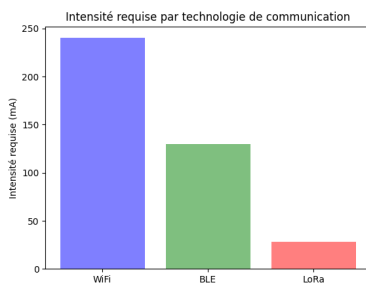


FIGURE 5.9 – Intensité de courant nécessaire pour utiliser les différentes technologies sans fil des nœuds FiPy [84, 101].

FiPy demandent respectivement une intensité de 240 mA, 130 mA et 28 mA.

En règle générale, la technologie WiFi offre des débits bien supérieurs à la technologie BLE, mais dans le cas des nœuds FiPy, les deux technologies offrent ici un débit de 1 Mbps. Nous utilisons la technologie LoRa avec un facteur d'étalement de 7, une largeur de bande de 125 KHz et un ratio d'encodage de 4 : 5, ce qui nous offre un débit d'environ 5,47 Kbps. Le débit de la technologie LoRa étant beaucoup plus faible, cela conduit à des durées de transmission supérieures à celles qu'offrent les technologies WiFi et BLE, pour un même volume de données. En même temps, les technologies WiFi et BLE nécessitent, lors d'une utilisation normale, un trafic de contrôle beaucoup plus conséquent que la technologie LoRa, ce qui devrait au long terme permettre à la technologie LoRa de consommer moins d'énergie que les deux autres.

Par rapport à la méthode de décision, considérons une matrice de décision de dimension 5×5 . En se basant sur les valeurs de la documentation technique du processeur utilisé par les modules FiPy [101], et en considérant une consommation maximale du processeur de 68 mA et un voltage de 3,6 V, l'utilisation de notre méthode de décision à la place de la méthode TOPSIS permettrait d'économiser approximativement 448 μ J par classement effectué.

5.5 Un prototype imparfait, mais fonctionnel

Au fil de ce chapitre, nous avons présenté les expériences que nous avons réalisées, leur configuration ainsi que leurs résultats. Nous avons conçu un prototype fonctionnel de réseau multitechnologie, dans lesquels des nœuds FiPy utilisent le protocole RODENT pour émettre leurs données à destination de deux stations de base WiFi et LoRa. À travers notre scénario expérimental, nous avons cherché à reproduire une utilisation d'un réseau pour l'agriculture connectée, où chaque nœud serait déployé dans une zone différente d'une exploitation agricole afin de surveiller l'évolution de la température ambiante de la parcelle en question. Chacun des cinq nœuds FiPy que nous utilisons se trouve dans une situation différente des autres, mettant ainsi en lumière les avantages apportés par l'utilisation de RODENT et des réseaux multitechnologies.

Ainsi, nous avons vu par l'expérience que l'utilisation des réseaux multitechnologies et du protocole RODENT permet d'accroître la flexibilité du réseau, autorisant des changements topologiques mais aussi technologiques pendant le fonctionnement du réseau. L'adaptation automatique des nœuds permet aussi de rendre le réseau plus résistant aux pannes. De plus, des nœuds collectant et partageant différentes sortes de données pour différents usages peuvent se côtoyer dans un même réseau, car le choix de route et de technologie sera fait en fonction des besoins de communication de chaque nœud. D'après nos mesures de taux de livraison des paquets, les gains sus mentionnés viennent cependant au prix d'une augmentation du taux de pertes. En revanche, nous pensons qu'il s'agit là d'un problème d'implémentation et non pas de conception de notre protocole de routage. Des efforts d'ingénierie supplémentaires

pour peaufiner la gestion du système matériel et logiciel du prototype devraient permettre à terme d'effacer cette augmentation des pertes.

Notre méthode de décision personnalisée est utilisée par RODENT pour sélectionner la route, et montre, à la différence de la méthode TOPSIS, une résistance aux inversions de rang. La réduction de la complexité calculatoire de la méthode permet également de réduire le temps d'exécution de cette dernière, et donc de réduire son coût énergétique. RODENT, en permettant de sélectionner la technologie la plus économe lorsque que cela est la priorité, permet ainsi de réduire la consommation globale du réseau de capteurs sans fil.

La Covid, c'est nul

Afin de tester notre prototype en conditions réelles, nous avions prévu de réaliser plusieurs collaborations. L'implémentation de nos propositions dans les stations météo de Sencrop aurait dû nous permettre de vérifier les performances atteignables et détecter d'éventuels problèmes de conception, grâce à des expériences dans des exploitations agricoles comme des champs de pommes de terre. De même, une collaboration avec l'université de Stellenbosch en Afrique du Sud, dans le cadre du projet Agrinet, aurait dû nous permettre d'évaluer notre proposition dans les vignes expérimentales de l'université, et par là même, d'évaluer les différences de performances en fonction des variations du climat et de la végétation. Malheureusement, la crise sanitaire mondiale en a décidé autrement, et nous ne pouvons qu'espérer poursuivre nos plans dans un avenir proche.

6.1 Convergence des communications et effet entonnoir

Dans un réseau multisaut, tous les nœuds ne sont pas forcément capables de communiquer directement, c'est-à-dire en un seul saut, avec la station de base, ou un autre nœud puits du réseau. Pour palier cela, il est possible pour les nœuds d'un tel réseau de transférer leurs données à leurs voisins, afin que ces derniers relayent les messages jusqu'à leur destination. Et ainsi de suite, de proche en proche, les messages peuvent être réceptionnés et réémis par plusieurs nœuds avant d'arriver à bon port, d'où l'appellation de réseau multisaut. Une des principales limitations de ce fonctionnement est que les communications du réseau vont converger vers le, ou les nœuds puits du réseau. Cela est d'autant plus vrai lorsque que l'on considère un modèle de trafic dit "convergecast", où le trajet des messages se fait exclusivement des nœuds vers les stations de base ou puits du réseau.

Journée classée noire dans le sens des départs

Cette convergence des communications est connue sous le nom d'effet entonnoir, de l'anglais "funneling effect". La conséquence de cet effet est que, de façon générale, les nœuds les plus proches des puits dans le réseau relayent plus de messages que les nœuds qui en sont éloignés. La charge de travail est donc répartie de façon inégale, et pour un nœud donné, la retransmission des messages de ses voisins a un coût énergétique qui peut rapidement devenir très important. S'il y a iniquité de dépense énergétique, alors certains nœuds tomberont en panne plus rapidement que les autres. Lorsque cela arrive, s'il n'existe pas de chemin secondaire pour continuer à acheminer les données jusqu'à leur destination, la totalité du réseau s'en retrouve paralysée. Pour l'exemple, nous pouvons voir dans la figure 6.1 une illustration de l'effet entonnoir dans un cas extrême. Dans la suite de ce chapitre, la notation N_i réfère au nœud i . Dans ce réseau, N_A est le seul nœud capable de joindre une station de base. Les autres nœuds du réseau relayent donc leurs messages jusqu'à N_A , qui fait de même jusqu'à la station de base. Si l'on fait l'hypothèse que les nœuds émettent tous individuellement une quantité de données équivalente, N_A doit, en plus de son propre trafic, assumer la charge de la totalité du trafic des autres nœuds. Dans ce cas, N_A risque d'épuiser sa réserve d'énergie rapidement, et quand cela arrivera, les nœuds ne seront plus capables d'acheminer leurs messages à bon port.

L'effet entonnoir est une limitation classique des réseaux multisauts, et celle-ci a probablement participé à l'engouement de ces dernières années que l'on a pu observer envers les technologies de communication longue portée. En effet, un des avantages de ces technologies est de simplifier l'organisation du réseau via une topologie dite en étoile, où chaque nœud est capable d'atteindre une station de base en un seul saut.

- 6.1 Convergence des communications et effet entonnoir . . . 91
- 6.2 Travaux connexes et réduction de données 93
- 6.3 Coefficient de corrélation de Pearson 94
- 6.4 Algorithme de réduction de données 95
- 6.5 Réduction de données le long d'une route 97
- 6.6 Corrélation et estimation en chaîne pour une réduction efficace 100

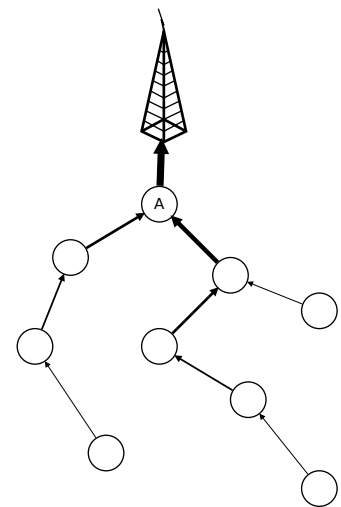


FIGURE 6.1 – Illustration de l'effet entonnoir, où N_A est la clé de voûte du réseau, et relaye les messages de tous les autres nœuds du réseau.

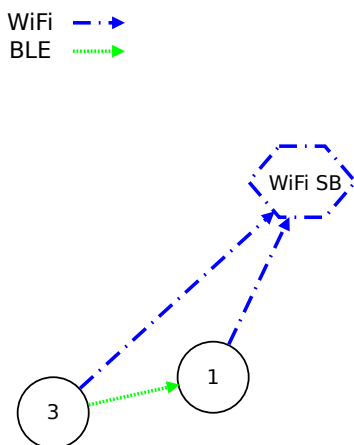


FIGURE 6.2 – Sous-partie de notre réseau expérimental, où N_3 décide de transférer ses données à N_1 aux dépens de ce dernier.

Avec RODENT, nous proposons d'utiliser les différentes technologies de communication de façon conjointe. Ainsi, les nœuds sont capables de s'organiser en réseau multisaut, pour palier un défaut de couverture, ou utiliser des chemins plus adaptés à leurs besoins de communications. Dans un réseau RODENT, un nœud sélectionne les routes qui lui semble les plus intéressantes d'un point de vue local, c'est-à-dire en ne prenant en compte que ses propres besoins. Cela peut parfois se faire au détriment des autres nœuds, puisque les nœuds de la route concernés devront relayer plus de trafic, et donc dépenser plus d'énergie.

C'est quelque chose que nous avons pu observer lors de nos expériences, que nous avons décrites dans le chapitre 5. Dans la figure 6.2, nous pouvons voir une sous-partie du réseau expérimental que nous avons décrit dans la section 5.3, et qui est visible dans sa totalité dans la figure 5.4. Ici, N_3 dispose de deux routes, toutes deux à destination de la station de base Wi-Fi. L'une emprunte un lien Wi-Fi direct entre N_3 et la station de base, l'autre nécessite le relai des messages de N_3 à son voisin N_1 , qui relayera les messages ensuite à la station de base. Nous partons ici du principe que la seconde route offre un coût énergétique inférieur à la première, car le lien entre N_1 et la station de base offre un coût inférieur au lien entre N_3 et la station de base, parce que N_1 est plus proche de la station et qu'il peut joindre cette dernière en émettant un signal de puissance réduite. La seconde route, du point de vue de N_3 , est plus intéressante lorsque ce dernier cherche à minimiser sa consommation énergétique. En revanche, cela est handicapant du point de vue de N_1 , et double le nombre de ses transmissions.

Et si on jouait aux devinettes ?

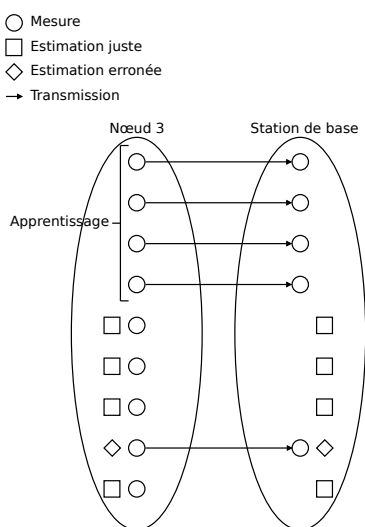


FIGURE 6.3 – Illustration de la réduction des données de N_3 . La station de base estime les valeurs de mesures de N_3 en fonction des mesures de N_1 . En cas d'erreur, N_3 envoie un message de correction.

Afin de mitiger les conséquences néfastes de l'effet entonnoir et la surcharge de travail des nœuds situés au bout des routes, nous proposons dans ce chapitre d'utiliser une méthode d'estimation des données basée sur la corrélation des variables mesurées. Pour reprendre l'exemple de la figure 6.2, l'idée est que si les variables que mesurent N_1 et N_3 sont corrélées, alors la station de base devrait être capable d'estimer les prochaines mesures de N_3 , en fonction des mesures de N_1 et de la tendance observée. Une illustration de ce fonctionnement est visible sur la figure 6.3. De son côté, N_3 exécute la même méthode d'estimation, pour connaître les estimations que calcule la station de base. Si les estimations sont correctes, N_3 n'a donc pas besoin d'envoyer ses mesures, permettant ainsi une réduction des données efficace. Dans le cas contraire, N_3 enverra la dernière mesure réelle, afin de corriger la fausse estimation. À cette fin, nous nous basons sur le calcul du coefficient de corrélation de Pearson, afin de déterminer à quel point les variables mesurées sont corrélées. Enfin, nous proposons de prendre en compte l'efficacité de la réduction de données d'une route en compte dans RODENT et son processus de sélection de route, sous la forme d'un attribut correspondant au taux de réduction atteint.

Ainsi, la suite de ce chapitre est organisée de la façon suivante. Dans la section 6.2, nous présentons les travaux connexes sur le sujet de la réduction de données dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, la section 6.3 détaille le principe et la façon de calculer le coefficient de corrélation de Pearson. Nous expliquons et montrons par l'exemple le

fonctionnement de notre algorithme de réduction des données dans la section 6.4. Rapidement, nous expliquons comment appliquer la réduction de données tout au long d'une route et de quelle façon nous comptons intégrer le taux de réduction d'une route dans le processus de sélection des routes de RODENT dans la section 6.5. Pour finir, la section 6.6 récapitule et conclue ce chapitre.

6.2 Travaux connexes et réduction de données

La réduction de la quantité des données transmises peut se faire de plusieurs façons : détermination de la tendance, algorithmes d'apprentissage automatique, etc. Dans cette section, nous donnons un aperçu des travaux connexes au sujet de la réduction de données dans les réseaux de capteurs sans fil.

Les auteurs de [36] proposent une méthode de réduction de données, basée sur la corrélation de différentes variables mesurées par un même nœud. La corrélation des variables considérées est déterminée par l'utilisation d'une méthode d'inférence dite bayésienne [119]. Dans les expériences décrites, cela est utilisé pour ne transmettre que les mesures de pression atmosphérique, à partir desquelles les mesures de températures sont estimées. Cela permet de réduire la quantité de données envoyées par les nœuds, mais ces travaux ne considèrent pas la corrélation entre plusieurs nœuds ni la réduction sur plusieurs sauts.

Dans l'article [120], les auteurs détaillent un système de réduction de trafic basé sur deux méthodes. La première propose d'adapter automatiquement la quantité de données envoyée par les nœuds en fonction de la variance de ces dernières. En bref, seulement les changements significatifs dans les mesures devraient être communiqués, tandis que des changements négligeables n'ont pas besoin d'être envoyés. La seconde méthode consiste pour le puits du réseau à estimer les mesures des capteurs, afin que ces derniers n'aient pas besoin de transmettre leurs données. Les capteurs calculent l'estimation faite par le puits de la même façon, et si la mesure est trop différente de l'estimation, ils envoient un message de correction. Ce système permet une réduction des données efficace, mais ne considère pas non plus la réduction de données sur plusieurs sauts. En regardant les travaux de la littérature, nous pouvons voir que notre approche de réduction multisaut est unique.

Estimation multisaut pour les réseaux multisauts

Il existe de nombreuses méthodes de corrélation qui sont utilisées pour la réduction des données, comme on peut le voir dans l'article [121]. Cependant, de la même façon que les travaux que nous avons susmentionnés, il n'existe pas de système de réduction de données sur plusieurs sauts. Ainsi, nous proposons dans ce chapitre une méthode originale pour combler ce manque. Cette dernière se base sur le calcul du coefficient de Pearson, afin de déterminer la corrélation des variables mesurées par différents nœuds. En cas de forte corrélation, des nœuds qui feraient partie de la même route seront, grâce à notre méthode, capables de réduire considérablement le nombre de messages relayés, et ainsi de

[36]: Usman RAZA, Parag KULKARNI et Mahesh SOORIYABANDARA. « Low Power Wide Area Networks : An Overview ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19.2 (2017)

[119]: *Techno-science, Inférence bayésienne - Définition et Explications*. <https://www.techno-science.net/definition/6368.html>. Accessible au 02-07-2021.

[120]: Gaby TAYEB, Abdallah MAKHOUL, David LAIYMANI et JACQUES DEMERJIAN. « A distributed real-time data prediction and adaptive sensing approach for wireless sensor networks ». In : *Pervasive and Mobile Computing* 49 (2018)

[121]: G. RAJESH et Ashvini CHATURVEDI. « Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks ». In : *Computer Networks* 164 (2019)

mitiger efficacement les dégâts que peuvent causer la convergence des communications vers les puits du réseau.

6.3 Coefficient de corrélation de Pearson

[122]: Université de Liège, *Corrélation de Pearson*. http://www.biostat.ulg.ac.be/pages/Site_r/corr_pearson.html. Accessible au 02-07-2021.

Le coefficient de corrélation de Pearson [122], ou Bravais-Pearson, reflète l'existence, ou non, d'une relation linéaire entre deux variables. En fonction de sa valeur, il indique de quelle façon les deux variables considérées varient. Un coefficient qui est compris dans l'intervalle $]0, 1]$ indique une corrélation positive, et donc que les deux variables varient dans le même sens. À l'inverse, un coefficient qui est compris dans l'intervalle $[-1, 0[$ indique une corrélation négative, dans quel cas les variables varient en sens inverse, c'est-à-dire que lorsque l'une augmente, l'autre diminue, et vice-versa. Un coefficient de valeur 0 indique quant à lui une relation de corrélation non-existante entre les variables considérées.

Si l'on considère deux variables réelles X et Y , nous notons le coefficient de corrélation entre X et Y ρ_{XY} . Ce dernier est défini comme le rapport entre la covariance de X et Y et le produit de leurs écarts types. La covariance est définie comme la moyenne du produit des écarts à la moyenne, et ainsi, pour n valeurs discrètes de X et Y , la formule classique pour le calcul de ρ_{XY} est représentée dans l'équation 6.1.

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6.1)$$

$$\rho_{XY} = \cos \alpha = \frac{\vec{X} \cdot \vec{Y}}{\|\vec{X}\| \cdot \|\vec{Y}\|} \quad (6.2)$$

$$P_{XY} = \rho_{XY}^2 \times 100 \quad (6.3)$$

Si l'on considère nos deux variables X et Y comme deux vecteurs \vec{X} et \vec{Y} dans un espace à n dimensions, nous pouvons utiliser une interprétation géométrique de la corrélation, où le coefficient ρ_{XY} est égal au cosinus de l'angle α entre \vec{X} et \vec{Y} . En partant de la formule du cosinus entre deux vecteurs, nous obtenons l'équation 6.2, qui est équivalente à l'équation 6.1, et nous permet de calculer ρ_{XY} . Pour finir, nous définissons P_{XY} le pourcentage de corrélation entre X et Y , calculé selon l'équation 6.3.

Un coup il fait froid, un coup il fait chaud

Pour dérouler un exemple, considérons deux variables TA et TB , que sont les températures de deux zones quelconques. Les deux vecteurs \vec{TA} et \vec{TB} , contiennent tous deux un sous-ensemble des températures mesurées en deux endroits différents. Considérons les vecteurs visibles dans l'équation 6.4. Selon l'équation 6.2, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \vec{TA} &= \{2, 3, 5, 8, 13, 21\} \\ \vec{TB} &= \{2.8, 4.8, 7, 12.8, 18.2, 33.6\} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\rho_{TATB} = \frac{1099.6}{2\sqrt{178}\sqrt{1703.92}} \approx 0.9983$$

En conséquence, nous obtenons un taux de corrélation $P_{TATB} = 99\%$, ce qui indique une très forte corrélation entre TA et TB , dans quel cas, il est possible d'estimer l'une en fonction de l'autre.

6.4 Algorithme de réduction de données

Le coefficient de corrélation de Pearson, calculé selon la méthode que nous avons expliquée dans la section 6.3, permet de déterminer le degré de corrélation entre deux variables. Dans le cas des réseaux de capteurs sans fil, nous considérons les variables comme deux phénomènes mesurés par deux nœuds indépendants. Si les mesures de ces phénomènes sont fortement corrélées, alors, en fonction du coefficient de corrélation, et de l'ensemble des mesures, il est possible de prédire les mesures suivantes. Par exemple, dans une même zone, il est probable que les mesures de température de plusieurs nœuds soient corrélées. Généralement, la température et la pression atmosphérique sont aussi corrélées. Dans cette section, nous détaillons notre méthode de prédiction des données.

Complétez cette suite logique

Considérons deux variables mesurées, dont X et Y sont respectivement les ensembles des mesures récoltées, chacun de taille n . Sur la base des jeux de données que l'on connaît, nous pouvons calculer le ratio moyen entre X et Y selon l'équation 6.5, et que l'on note R_{XY} . À partir des valeurs connues jusqu'à maintenant, il nous est ensuite possible d'estimer la prochaine mesure qui sera ajoutée à l'ensemble Y , en fonction de la prochaine mesure ajoutée à l'ensemble X et selon l'équation 6.6.

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i}}{n} \quad (6.5)$$

$$y_{n+1}^p = y_n + (x_{n+1} - x_n) \times R_{XY} \times \rho_{XY}^2 \quad (6.6)$$

Pour illustrer la réduction de données grâce à leur estimation, considérons par exemple les deux nœuds visibles dans la figure 6.4. Faisons l'hypothèse que N_A dispose de tous les paramètres nécessaires à l'estimation de la prochaine mesure de N_B , selon l'équation 6.6. Dans ce cas, N_B n'a pas besoin de faire relayer ses mesures par N_A , puisque la station de base, et n'importe quel autre équipement situé plus loin dans le réseau et disposant des paramètres nécessaires, sont capables de déduire les mesures de N_B , en fonction des mesures de N_A . Cependant, il ne s'agit là que d'estimations, et ces dernières peuvent donc être sujettes à l'erreur. Afin de s'assurer que les estimations sont suffisamment précises, il est nécessaire de disposer d'un mécanisme qui permettrait à N_B de signaler qu'une mesure et son estimation ne correspondent pas.

Pour cela, faisons l'hypothèse que N_B dispose, de même que N_A , des informations nécessaires à l'estimation de la prochaine mesure de N_B , ici encore selon l'équation 6.6. Dans ce cas, N_B est capable de connaître la même estimation que celle calculée par N_A . Il sera donc capable de comparer sa mesure et son estimation, et si jamais cette dernière se révèle faussée, il suffit à N_B d'envoyer un message à N_A afin de signaler l'estimation erronée ainsi que la mesure réelle.

Une estimation terriblement bornée!

Afin de déterminer si oui ou non une estimation est correcte, il nous est nécessaire de fixer une limite entre un niveau d'imprécision qui est acceptable et un autre qui ne l'est plus. Pour cela, nous définissons une

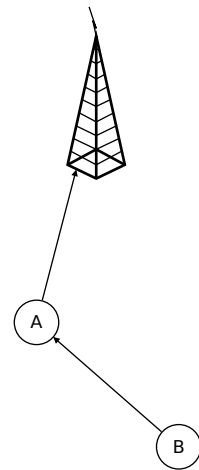


FIGURE 6.4 – Scénario minimaliste de réduction des données, où les mesures de N_B peuvent être estimées en fonction des mesures de N_A . Lorsque les estimations sont justes, il n'y a ainsi pas besoin de faire remonter les mesures de N_B .

borne inférieure B^- et une borne supérieure B^+ . Si l'on considère les ensembles de mesures X et Y , et notons y_{n+1} la prochaine mesure réelle, ces bornes sont respectivement déterminées selon les équations 6.7 et 6.8. De cette façon, la prochaine valeur estimée de l'ensemble Y , que nous notons y_{n+1}^ρ , doit être telle que $B^- < y_{n+1}^\rho < B^+$. Dans le cas contraire, il est nécessaire de corriger l'estimation erronée par l'envoi de la mesure réelle. Dans un tel cas, en considérant la figure 6.4, N_B enverrait la mesure réelle de correction à la station de base en passant par N_A .

$$B^- = \left(\frac{1 - \rho_{XY}}{2} + \rho_{XY} \right) \times y_{n+1} \quad (6.7)$$

$$B^+ = \left(\frac{1 - \rho_{XY}}{2} + 1 \right) \times y_{n+1} \quad (6.8)$$

C'est reparti pour un exemple

Reprenons maintenant les exemples que nous avons présentés dans la section 6.3 et dans la figure 6.4 depuis le début. Ainsi, considérons que N_A et N_B mesurent tous deux la température en deux endroits différents. N_A constitue l'ensemble TA de ses mesures tandis que N_B fait de même pour l'ensemble TB . N_A est logiquement capable de connaître l'ensemble des valeurs de TB , puisque N_B fait transiter ses messages par N_A . Dans le sens inverse, afin que N_B puisse connaître les valeurs de TA , nous proposons d'utiliser un mécanisme d'écoute analogue à celui utilisé par RODENT pour la dissémination des informations de routage, que nous avons détaillé dans le chapitre 3, section 3.5. En effet, puisque N_A envoie ses messages à destination de la station de base, et que $N_B \in NBR(N_A)$, N_B est capable d'entendre de façon opportuniste les communications de N_A , et ainsi de connaître les mesures qui composent l'ensemble TA .

Soient TA et TB dans l'état dans lequel nous avons laissé les vecteurs \vec{TA} et \vec{TB} à la fin de la section 6.3, c'est-à-dire tels que visible dans l'équation 6.9. Comme nous l'avons vu dans la section 6.3, nous avons le coefficient de corrélation de ces deux ensembles tel que :

$$\begin{aligned} TA &= \{2, 3, 5, 8, 13, 21\} \\ TB &= \{2.8, 4.8, 7, 12.8, 18.2, 33.6\} \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\rho_{TATB} = \frac{1099.6}{2\sqrt{178}\sqrt{1703.92}} \approx 0.9983$$

Selon l'équation 6.5, nous pouvons calculer le ratio moyen des ensembles tel que :

$$R_{TATB} = 1.5$$

Admettons maintenant que la prochaine mesure de N_A soit telle que $TA_6 = 34$. N_A peut donc estimer la prochaine mesure de N_B selon l'équation 6.6, et ainsi nous obtenons :

$$TB_6^\rho = TB_5 + (TA_6 - TA_5) \times R_{TATB} \times \rho_{TATB}^2 \approx 53.0346$$

N_B de son côté réalise les mêmes opérations, et relève sa prochaine mesure de température que nous considérons telle que $TB_6 = 53$. Les bornes calculées par N_B pour vérifier la précision de l'estimation TB_6^ρ sont déterminées selon les équations 6.7 et 6.8, telles que :

$$B^- \approx 52.9555$$

$$B^+ \approx 53.0445$$

Dans ce cas, nous avons donc $B^- < TB_6^p < B^+$, et l'estimation étant suffisamment précise, N_B n'envoie pas de message ni pour communiquer sa mesure ni pour corriger l'estimation, ce qui permet à N_B d'économiser le coût énergétique de la transmission de TB_6 , ainsi qu'à N_A d'économiser le coût de la réception et de la retransmission de TB_6 . Dans le cas contraire, si TB_6^p n'était pas compris entre B^- et B^+ , alors N_B enverrait un message à destination de la station de base et passant par N_A , afin de partager TB_6 .

6.5 Réduction de données le long d'une route

L'algorithme que nous venons de détailler dans la section 6.4 permet l'estimation et la réduction de données entre deux nœuds. Dans l'idée, il serait possible de faire la même chose le long d'une route : l'équipement final qui collecte les données, pourrait en se basant sur les mesures du dernier nœud d'une route, estimer les mesures du nœud précédent, et en fonction de ces estimations, estimer les mesures du nœud d'avant, et ainsi de suite. Dans la pratique, ce n'est pas aussi simple, puisqu'il faut non seulement disposer d'un certain nombre de paramètres afin de pouvoir calculer les estimations, mais il faut également que les nœuds dont les mesures sont estimées soient capables de corriger les erreurs de précision des estimations lorsque cela est nécessaire. Au prix de quelques concessions, il est cependant possible de concevoir un système de prédiction qui permette de répartir de façon équitable la consommation énergétique des nœuds le long d'une route. Ainsi, dans cette section, nous allons détailler l'algorithme que nous proposons pour réduire les données le long d'une route.

Quel silence...

Reprenons l'exemple de la figure 6.4, et ajoutons-y N_C , tel que visible sur la figure 6.5. À chaque nœud N_A , N_B et N_C , nous associons respectivement les ensembles de mesures TA , TB et TC . Comme nous l'avons expliqué dans la section 6.4, N_A est capable d'estimer les mesures de N_B . De la même façon, N_B est capable d'estimer les mesures que N_A fera, car il entend les données de TA qui sont transmises à la station de base. N_B est donc capable de corriger les estimations imprécises, en envoyant et en faisant relayer sa vraie mesure par N_A .

Durant la période d'initialisation de la méthode d'estimation, les valeurs sont envoyées de façon toute à fait classique. C'est-à-dire que N_B envoie ses données à N_A qui les relaye à la station de base. Après un certain nombre de données collectées, le coefficient de corrélation est calculé, et la réduction de données est ensuite effective. Durant cette période, un équipement situé plus haut dans le réseau, comme la station de base, reçoit les valeurs de TA et de TB , et un tel équipement est donc capable de calculer ρ_{TAB} au même titre que N_A , afin d'estimer les prochaines mesures de N_B , grâce à la méthode décrite dans la section 6.4.

Cependant, pour estimer les valeurs de TC , le système actuel ne fonctionne pas. N_B est capable d'estimer les mesures de N_C en fonction de ses propres mesures. Mais pour nous assurer de la précision de ces

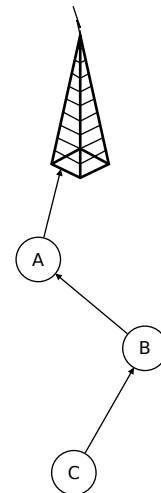


FIGURE 6.5 – Scénario minimaliste de réduction des données le long d'une route. Les mesures de N_B peuvent être estimées en fonction des mesures de N_A , et celles de N_C en fonction des estimations des mesures de N_B .

estimations, N_C doit faire de même, mais pour cela, ce dernier a besoin de connaître les dernières mesures de N_B . Or, si N_B profite de la réduction de donnée, il n'envoie plus ses données à N_A .

Réduction en chaîne!

Afin de palier cette problématique, le mécanisme que nous proposons est le suivant : le long d'une route, chaque nœud envoie à ses voisins l'estimation de ses propres mesures, en fonction des mesures ou de l'estimation de ces dernières que fait le nœud un saut plus proche de la fin de la route. Il ne s'agit cependant là pas de messages à router jusqu'à une autre destination, mais bel et bien de messages destinés uniquement aux nœuds du voisinage. De cette façon, chaque nœud n'aura qu'à assumer la consommation énergétique de la transmission de ses propres estimations ou mesures, et de ce fait, l'accumulation du trafic due à l'effet entonnoir disparaît. Il est important de noter, qu'à part pour le nœud le plus proche de la sortie du réseau, tous les autres nœuds envoient bien leurs estimations et non pas leurs mesures. L'envoi des mesures réelles permettrait bien sûr de réduire l'accumulation des erreurs d'estimation, cependant un équipement situé plus haut dans le réseau estimera les valeurs des nœuds éloignés en fonction des estimations calculées en chaîne, elles-mêmes calculées à partir des mesures réelles que lui envoie le nœud le plus proche de la sortie du réseau, et il est nécessaire que les nœuds, de leur côté, fassent de même pour connaître l'estimation de leurs valeurs, afin de les comparer avec leurs mesures réelles.

Pour clarifier cela, reprenons notre exemple de la figure 6.5. Lorsque la réduction de données est effective, le fonctionnement que nous proposons est le suivant : N_A envoie ses mesures réelles à la station de base. Cette dernière, en fonction des valeurs de TA et des valeurs de TB collectées pendant la phase d'initialisation, est capable d'estimer les prochaines mesures de N_B . N_B de son côté, entend les valeurs de TA , calcule l'estimation qui sera faite de ses mesures, et envoie un message de correction si jamais elles sont fausses. La station de base, sur la base des valeurs de TB et TC acquises pendant la phase d'initialisation, et en fonction des estimations des valeurs de TB , estime les valeurs de TC . N_B de son côté envoie les estimations de ses propres mesures de l'ensemble TB , qu'il calcule afin d'en vérifier la précision, et ces estimations sont reçues par N_C . Ainsi, N_C est capable de calculer l'estimation de ses propres mesures en fonction des estimations de TB , c'est-à-dire de la même façon que la station de base les calculera, et si ces estimations ne collent pas avec les mesures réelles de N_C , ce dernier sera capable d'envoyer un message de correction, qui sera relayé par N_B , puis N_A , jusqu'à la station de base.

Pour généraliser, considérons une route qui transite depuis un nœud N_i jusqu'à un nœud N_j , qui à son tour relayera les données en dehors du réseau considéré, par exemple en les transmettant à une station de base. Après la phase d'initialisation, et lorsque la réduction de données est effective, N_j continuera à transmettre ses mesures, qui seront entendues par $NBR(j)$. En fonction, le prochain nœud sur la route N_{j-1} estimera ses mesures, et enverra ces estimations à la place de ses mesures réelles à $NBR(j-1)$, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre N_i . La méthode correspondante qui sera déroulée par les nœuds est visible dans l'algorithme 2. De

Algorithme 2 : Estimation en chaîne

Entrée : un noeud i noté N_i ; BR_i meilleure route de N_i ; N_{i-1} prochain saut de BR_i ; S le nombre de sauts de BR_i ; $T_i = \{T_{i_k} | k = 1, 2, \dots, j\}$ l'ensemble des mesures de N_i

pour N_i **faire**
 mesurer $T_{i_{j+1}}$
 si $S = 1$ **alors**
 émettre $T_{i_{j+1}}$ pour relai via BR_i
 sinon si $S > 1$ **alors**
 calculer B_{j+1}^- et B_{j+1}^+ en fonction de $T_{i_{j+1}}$
 si $S = 2$ **alors**
 estimer $T_{i_{j+1}}^p$ à partir de $T(i-1)_{j+1}$
 sinon si $S > 2$ **alors**
 estimer $T_{i_{j+1}}^p$ à partir de $T(i-1)_{j+1}^p$
 fin si
 si $B_{j+1}^- < T_{i_{j+1}} < B_{j+1}^+$ **alors**
 émettre $T_{i_{j+1}}^p$ à destination de $NBR(i)$
 sinon
 émettre $T_{i_{j+1}}$ pour relai via BR_i
 fin si
 fin si
fin pour

cette façon, les nœuds n'ont plus besoin de relayer leurs messages, à part les messages de correction, et les routes de communications deviendront ainsi plus ou moins "virtuelles".

Intégration dans le routage

Le niveau de corrélation partagé par les nœuds d'une même route est une indication directe de l'économie énergétique qu'une route offrira. Ainsi, il semble intéressant de prendre en compte cette métrique lors de la sélection des meilleures routes dans notre protocole de routage RODENT, que nous avons détaillé dans le chapitre 3. Ce protocole se base sur une méthode de sélection multiattribut, telle que nous l'avons présentée dans le chapitre 4. Cette méthode permet de considérer, peu ou prou, n'importe quel attribut dans le processus de classement et de sélection des routes.

En conséquence, nous proposons logiquement de prendre en compte le taux de réduction qu'offre une route en tant qu'attribut parmi ceux considérés dans la matrice de décision. Pour cela, nous pouvons soit utiliser la moyenne du coefficient de Pearson entre les paires de nœuds qui composent la route, soit un taux de réduction moyen. Pour cette dernière option, il suffirait de faire la moyenne des taux de réduction de chaque paire de nœuds. Ce taux de réduction est un simple ratio entre le nombre des valeurs mesurées et celles qui sont envoyées pour correction des estimations. Il est noté TR_{ij} pour la paire de nœuds N_i et N_j , et se calcule selon l'équation 6.10.

$$TR_{ij} = \left(1 - \frac{\text{nombre de valeurs envoyées}}{\text{nombre de valeurs mesurées}}\right) \times 100 \quad (6.10)$$

6.6 Corrélation et estimation en chaîne pour une réduction efficace

Les réseaux multisauts permettent aux nœuds de faire transiter leurs données de saut en saut, jusqu'à la destination visée. Cependant, dans un réseau de capteurs sans fil, il est courant que les nœuds envoient leurs messages à destination d'un sous-ensemble réduit de nœuds, que l'on appelle des puits. La convergence des communications vers ces puits cause de la congestion, et introduit des iniquités de consommation énergétique, car les nœuds qui relayent le plus de messages épuisent leurs réserves énergétiques plus rapidement. Cet effet entonnoir est bien connu, et les réseaux multitechnologies, qui permettent d'utiliser des routes multisauts, y sont sensibles au même titre.

Dans le but de mitiger les conséquences néfastes de cet effet, nous avons proposé dans ce chapitre une méthode de réduction des données. Cette méthode se base sur le calcul du coefficient de Pearson, qui permet de déterminer à quel point deux variables mesurées sont corrélées. Lorsque ces dernières sont fortement corrélées, nous proposons d'utiliser un algorithme de réduction des données, qui permet, en fonction des mesures d'une seule des deux variables, d'estimer les valeurs de la seconde. De cette façon, deux nœuds qui collecteraient des mesures fortement corrélées n'auraient pas tous les deux besoin de transmettre leurs données, car il serait possible pour un équipement tiers de recalculer le second ensemble de valeurs en fonction du premier. Afin de s'assurer que les estimations sont suffisamment précises, le nœud en charge de la mesure des valeurs estimées calcule les estimations selon la même méthode, et si la mesure réelle est en dehors des bornes calculées, il envoie un message de correction, afin que la mesure réelle soit prise en compte.

Afin d'appliquer la réduction des données non pas uniquement entre deux nœuds, mais aussi tout le long d'une route, nous proposons une méthode permettant de calculer les estimations en chaîne. Dans ce cas, un équipement tiers serait capable d'estimer en chaîne les mesures de tous les nœuds d'une même route en se basant uniquement sur les mesures réelles d'un seul nœud, qui serait le dernier nœud de la route, c'est-à-dire le plus proche de la sortie du réseau. Dans le sens inverse, afin de s'assurer de la précision des estimations, les autres nœuds de la route considérée calculent l'estimation de leurs mesures en fonction des estimations partagées par le nœud un saut plus loin dans la route, et si les estimations sont trop éloignées, envoient un message de correction. Ce mécanisme permet de réduire la quantité de données qui transite dans un réseau multisaut de façon efficace, et en conséquence, cela réduit la surcharge de travail et de consommation énergétique qui découle du relai des messages jusqu'à destination. Nous sommes actuellement en pleine implémentation de ce mécanisme afin de le tester expérimentalement, grâce au prototype de réseau multitechnologie que nous avons présenté dans le chapitre 5.

7.1 Récapitulatif de nos travaux

Dans le chapitre 1, nous avons introduit le contexte relatif aux réseaux informatiques. Les réseaux sans fil en particulier, nécessitent l'utilisation de technologies de communication dédiées, car ils font face à des contraintes différentes de celles des réseaux filaires. Ces contraintes sont particulièrement exacerbées lorsque l'on considère les réseaux de capteurs sans fil. En effet, puisqu'ils sont composés de nœuds embarquant du matériel limité, leurs capacités sont fortement restreintes, et de tels réseaux doivent donc disposer de solutions matérielles et logiques adaptées, afin d'optimiser leur fonctionnement. De plus, les nœuds fonctionnant sur batterie, une des principales priorités est de dépenser l'énergie des nœuds le plus parcimonieusement possible, afin d'allonger la durée de vie du réseau, et ce, sans pour autant dégrader la qualité de l'information remontée. Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans de nombreux cas d'application différents, comme l'étude de la faune et de la flore. Nous nous intéressons dans nos travaux particulièrement à l'agriculture connectée, où les réseaux de capteurs sans fil permettent de collecter et de transmettre des informations agronomiques cruciales aux agriculteurs, et ce, de façon autonome.

Des technologies à foison

Habituellement, dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds partagent tous une seule et même technologie de communication sans fil. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, il existe de nombreuses technologies de communication sans fil. Chacune de ces technologies dispose de caractéristiques variées, et elles offrent donc toutes des performances différentes, en fonction de l'utilisation du réseau de capteurs. Lors de la conception d'un réseau, il est donc nécessaire de faire un compromis sur les capacités des technologies, en fonction de la taille des données à transmettre, de l'environnement, etc. En conséquence, les réseaux de capteurs sans fil manquent très souvent de souplesse, et lorsque l'environnement de communication ou les caractéristiques des données changent, il est alors difficile d'adapter le réseau en conséquence.

Afin de surmonter une partie de ces limitations, nous proposons de concevoir des réseaux multitechnologies. L'idée directrice étant, qu'en disposant de plusieurs technologies de communication, les nœuds seraient capables de s'adapter à différents environnements et imprévus, ainsi que de choisir les meilleures possibilités de communication parmi celles à leur disposition, en fonction du type de données transmises. Le matériel nécessaire à la conception de nœuds multitechnologies est déjà disponible sur le marché, et ce, à grande échelle. Mais afin d'être capable de gérer au mieux la multiplicité technologique des nœuds, il est nécessaire d'utiliser des outils logiques adaptés, de sorte que les nœuds

7.1 Récapitulatif de nos travaux	101
7.2 Discussion des propositions	103
7.3 Perspectives et travaux futurs	105

répondent au mieux à leurs différents besoins, et ce, de façon totalement autonome.

Diffusion et sélection des meilleurs chemins

C'est dans cette optique que nous avons proposé, dans le chapitre 3, un protocole de routage dédié aux réseaux multitechnologies. Notre protocole, "Routing Over Different Existing Network Technologies" (RODENT) permet de gérer le routage des nœuds qui utilisent plusieurs "Radio Access Technology" (RAT). Grâce à RODENT, les nœuds sont capables de construire et de diffuser des routes qui nécessitent l'utilisation sous-jacente de plusieurs technologies de communication différentes. RODENT minimise les communications de contrôle, en insérant les informations nécessaires au partage des routes directement dans les paquets destinés à la transmission des données mesurées par les nœuds. Les meilleures routes sont ensuite choisies en fonction des cas d'utilisation des nœuds, et des besoins auxquels chacun de ces nœuds doivent répondre.

À cet effet, RODENT utilise une méthode de sélection multiattribut personnalisée, que nous avons détaillée dans le chapitre 4. Cette dernière est basée sur la méthode de décision multiattribut bien connue "Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution" (TOPSIS), qui permet de comparer les différentes alternatives en fonction de leur distance mathématique par rapport à la meilleure et à la pire solution possible. La méthode TOPSIS étant limitée par des inversions de rang et des calculs complexes, nous avons conçu une méthode personnalisée qui empêche les inversions de rang et mitige la complexité calculatoire de la conception du classement.

Conclusions expérimentales

Nous avons implémenté et testé expérimentalement les deux propositions sus-mentionnées, grâce à l'utilisation de modules FiPy de Pycom. Ces expériences et leurs résultats ont été détaillés dans le chapitre 5. À travers de ces expériences, nous avons vu que :

- RODENT permet d'accroître la flexibilité et l'adaptabilité du réseau, grâce à l'utilisation de routes multitechnologies.
- Notre méthode de sélection de route offre un moyen de choisir les meilleures routes, et ce, de façon plus performante et plus stable que la méthode TOPSIS.

Réduction en chaîne

RODENT permet ainsi d'utiliser des routes multitechnologies et multi-sauts. Cependant, les réseaux multisauts font face à certaines limitations intrinsèques à leur principe de fonctionnement. Particulièrement, le fait que les nœuds aient à relayer les messages de leurs voisins impose une consommation énergétique non-négligeable. De façon générale, les nœuds proches des puits, ou "sorties" du réseau, ont tendance à dépenser une quantité d'énergie plus importante pour relayer les messages du réseau que les nœuds qui en sont éloignés. Cet effet "entonnoir" distribue

la charge de travail de façon inégale dans le réseau, et les nœuds qui dépendent plus d'énergie seront plus rapidement en panne, ce qui rendra les routes qu'ils maintiennent inutilisables. Afin de mitiger cet effet néfaste, nous avons proposé dans le chapitre 6 une méthode d'estimation des données, en fonction de la corrélation des variables mesurées par différents nœuds d'une même route. Grâce aux estimations, les nœuds n'envoient pas systématiquement leurs données tout au long de la route de communication, économisant par là même la consommation énergétique qui découlerait de ces transmissions. Le taux de corrélation peut être pris en compte par RODENT dans le processus de sélection des routes, afin de choisir les routes qui minimisent les communications.

Dans ce chapitre, nous apportons une conclusion globale à ce document. Nous discutons dans la section 7.2 de nos différentes propositions, de leurs avantages, mais aussi de leurs limitations. Enfin, dans la section 7.3, nous présentons les perspectives et les sujets de recherche que nous pensons qu'il est intéressant d'approfondir, afin d'optimiser le fonctionnement des réseaux multitechnologies.

7.2 Discussion des propositions

Les chapitres 3, 4 et 6 présentent les différents outils que nous proposons d'utiliser pour la gestion des réseaux multitechnologies. Dans cette section, nous discutons chacune de nos propositions, afin de mettre en lumière autant leurs avantages que leurs limitations.

Et si on augmente l'échelle du réseau pour le routage ?

Le chapitre 3 de ce document présente RODENT, un protocole de routage pour les réseaux multitechnologies. Il permet, à un moindre coût, d'utiliser des routes nécessitant différentes technologies de communication. Un des principaux risques de l'utilisation de plusieurs technologies par nœud, est de multiplier le nombre de routes disponibles, et d'ainsi faire exploser la quantité de trafic de contrôle. RODENT évite ce problème, grâce à l'utilisation des messages de données pour partager les données de contrôle. De plus, chaque nœud ne partage qu'une seule meilleure route par cas d'utilisation considéré, ce qui permet de conserver une taille raisonnable de paquet, et de limiter la quantité d'information de contrôle à envoyer.

RODENT fait tout de même face à certaines limitations. Premièrement, il faut noter que, dans notre cas, la taille des paquets RODENT reste raisonnable, parce que l'on considère une quantité limitée d'attributs dans le processus de sélection des routes. Plus d'attributs seront considérés, plus la partie de contrôle ajoutée aux paquets de données sera volumineuse. À terme, et en fonction de la fréquence des données mesurées, il sera donc nécessaire d'étudier quelle approche est la plus économe : l'ajout des informations de contrôle dans les messages de données ou l'utilisation de messages dédiés, potentiellement moins fréquents, au prix d'une réactivité amoindrie.

Également, si la taille des paquets reste raisonnable pour la majorité des technologies, elle est déjà trop importante pour une technologie aussi

limitée que Sigfox, qui n'autorise que 12 octets de données par message. Il sera donc nécessaire d'étudier la compression des données, afin de réduire encore plus la taille des paquets.

Pour finir, nous ne considérons pas ici la découverte des nœuds voisins, et l'estimation de la qualité des liens disponibles avec ces derniers. Afin de construire les matrices de liens de façon efficace, il est nécessaire de concevoir un mécanisme optimisé pour les réseaux multitechnologies. Sinon, le risque est que la découverte du voisinage en utilisant plusieurs technologies de consommation augmente fortement la consommation énergétique des nœuds.

Sélection de route et définition des bornes et des poids

RODENT se base sur une méthode de sélection des routes détaillée dans le chapitre 4. Celle-ci, basée sur la méthode TOPSIS, permet à un nœud de classer toutes les routes stockées dans sa matrice de routage. Les besoins de communications, relatifs au cas d'utilisation considéré, sont pris en compte par la pondération des caractéristiques de chaque route selon un vecteur de besoins associé. Notre méthode personnalisée, par rapport à la méthode TOPSIS, nous permet d'accélérer le processus de sélection et d'éviter les inversions de rang. Pour cela, la normalisation des valeurs de la matrice de route se fait selon des bornes maximales et minimales fixes, et définies pour chaque attribut considéré.

La première question qui se pose est, de quelle façon définir ces bornes? En effet, s'il est relativement simple de borner les attributs d'un seul nœud, il est plus complexe de borner les attributs d'une route. L'utilisation de bornes trop grandes par rapport aux valeurs réelles, risque de gommer les petites différences que peuvent présenter plusieurs alternatives, pour un même attribut. Ce que nous proposons actuellement est de définir des bornes fixes pour chaque technologie, et les bornes maximales et minimales parmi ces dernières seront pondérées par le nombre de sauts de la route considérée. Cette solution n'est probablement pas optimale, et il est donc nécessaire d'approfondir le sujet.

Secondement, la définition des vecteurs de besoins utilisés pour pondérer les valeurs des matrices de décision, demande également une attention particulière. Pour des cas d'utilisation simplistes, la détermination des vecteurs de besoins est triviale. Mais lorsque l'on considère des cas d'utilisation complexes, il peut être difficile de déterminer quel attribut est plus important que les autres, et à quel point. C'est un sujet de recherche sur lequel nous aimerions nous pencher plus en détails.

Réduire les données sans amplifier les imprécisions

Afin de mitiger les effets de la convergence des communications dans les réseaux multisauts, nous avons proposé dans le chapitre 6 une méthode d'estimation des mesures se basant sur la corrélation des variables mesurées par les nœuds. En se basant sur les mesures d'un seul nœud, il est possible pour un équipement collectant les données d'estimer en chaîne les différentes mesures de plusieurs nœuds le long d'une route. Les nœuds de leur côté, grâce à la diffusion de leurs estimations, sont capables de calculer les estimations les concernant et de les comparer à

leurs mesures réelles. Si l'écart entre les deux est trop important, il suffit alors au nœud concerné d'envoyer un message classique à destination de l'équipement de collecte pour corriger les estimations erronées.

Forcément, le premier point qui inquiète, est la diffusion et l'amplification des erreurs d'estimation. Une estimation juste, basée sur des mesures réelles, aura probablement une petite marge d'erreur, qui sera acceptable. Cependant, si les mesures du prochain nœud sont estimées à leur tour en fonction des estimations du nœud précédent, et qu'il y a, là aussi, une légère imprécision, le résultat s'éloignera de plus en plus des mesures réelles de saut en saut le long de la route considérée. Notre méthode permet de calculer et de détecter ces erreurs, ainsi que de les corriger par l'envoi des mesures réelles. Il est cependant nécessaire de vérifier dans quelles proportions ces erreurs se propagent, en fonction de la variance de mesures et la longueur des routes considérées. À cette fin, nous sommes actuellement en train d'implémenter notre proposition pour l'évaluer expérimentalement dans notre prototype de réseau multitechnologie.

Également, se pose la question de l'initialisation du système de réduction. Celui-ci est simpliste lorsque que l'on utilise une route bien définie : les nœuds envoient leurs données de façon classique, ces dernières sont relayées, et cela, jusqu'à ce que l'on atteigne un certain nombre de mesures collectées, qui sera considéré suffisant pour déterminer un coefficient de corrélation pertinent entre les variables mesurées. Cependant, si l'on souhaite faire l'inverse, c'est-à-dire choisir notre route en fonction du taux de réduction qu'elle offre, il nous faut, pour un nœud donné, être capable de calculer son coefficient de corrélation avec chacun de ses voisins, et donc entendre et retenir un ensemble de mesures de taille conséquente pour chacun. Le tableau prend des proportions encore plus imposantes si l'on considère la cohabitation de différents cas d'usage dans le réseau, car qui dit types de données différents, dit corrélations différentes. Ainsi, collecter un échantillon de taille pertinente, pour chacun des voisins d'un nœud, et chacun des cas d'utilisation du réseau, pourrait être difficile si l'on considère les capacités de stockage limitées des nœuds qui composent habituellement les réseaux de capteurs sans fil. Il est ainsi nécessaire d'approfondir l'étude de cette problématique, et du passage à l'échelle de notre méthode de réduction, et c'est ce à quoi nous comptons nous atteler à la suite de nos expérimentations.

7.3 Perspectives et travaux futurs

En plus des limitations que nous avons mentionnées dans la section 7.2, nous voulons approfondir plusieurs sujets de recherche, sur lesquels nous sommes déjà plus ou moins actifs.

Comme expliqué précédemment, nous avons besoin d'une méthode de découverte du voisinage et d'estimation des caractéristiques des liens, qui soit optimisée pour les réseaux multitechnologies. En effet, laisser plusieurs technologies en écoute permanente aurait un coût énergétique beaucoup trop important. Nous avons commencé à investiguer la conception d'une méthode adaptée aux réseaux multitechnologies pour cet usage. Celle-ci aurait besoin d'une synchronisation forte entre les différents nœuds d'un même réseau. Or, le matériel utilisé pour les

réseaux de capteurs sans fil est généralement très limité. C'est pourquoi nous avons entamé des expériences ayant pour but de mesurer la dérive des horloges internes des nœuds, et ce, pour plusieurs types communs de nœuds.

Nous cherchons également à améliorer notre prototype de réseau multi-technologie, afin d'améliorer ses performances, et de pouvoir mesurer précisément les économies énergétiques que nos propositions permettent de réaliser. Comme expliqué à la fin du chapitre 5, nous espérons pouvoir, dans un avenir proche, tester expérimentalement notre prototype dans plusieurs environnements d'utilisation réels. Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de l'équipe projet Agrinet, du LIRIMA. Nos partenaires au sein de ce projet travaillent d'autres aspects de l'agriculture connectée, tels que la conception de nouveaux capteurs, etc. À terme, nous voulons intégrer toutes nos propositions dans un système complet, disposant d'outils matériels et logiques spécifiques ayant pour but d'offrir une aide à la décision aux agriculteurs.

Un système de communication unifié

À cette fin, il sera nécessaire d'étudier l'interopérabilité des différentes couches réseau et protocoles proposés. De notre point de vue, la principale difficulté sera de garder la consommation énergétique d'un tel système dans des proportions acceptables, à cause de la multiplicité des capteurs, des technologies, et de la forte complexité du système. Or, la consommation énergétique est très dépendante du matériel utilisé, et nous pensons qu'il ne sera rapidement plus suffisant d'empiler les différentes briques matérielles et logiques, mais nécessaire de concevoir une plateforme unifiée. Pour des raisons d'efficacité, il serait intéressant de chercher à flouer, voir effacer les lignes de démarcation qui existent entre les différentes couches réseaux, protocoles et technologies de communication. Les recherches qui s'intéressent aux radios intelligentes, de l'anglais "cognitive radio", semblent être une piste prometteuse dans cette direction. Ainsi, plutôt que de combiner différentes technologies de communication, l'idée serait de disposer d'une interface radio configurable et programmable dynamiquement. On peut ainsi rêver d'une radio unique dont on pourrait modifier la fréquence, la modulation, etc., en fonction des différents besoins de communications. Cependant, au-delà du défi scientifique et d'ingénierie que cela représente, il y a aussi des questions de marché, de propriété intellectuelle, etc., pour lesquelles il sera nécessaire de trouver un terrain d'entente entre le monde académique et le monde industriel.

Bibliographie

- [9] « IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. » In : *IEEE Std 802.11* (2020), p. 1-4379 (cf. p. 4, 28).
- [14] « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks ». In : *IEEE Std 802.15.4* (2020), p. 1-800 (cf. p. 5, 28, 41).
- [19] Falko DRESSLER et al. « From radio telemetry to ultra-low-power sensor networks : tracking bats in the wild ». In : *IEEE Communications Magazine* 54.1 (2016), p. 129-135 (cf. p. 6).
- [20] Abdelmalik BACHIR et al. « MAC Essentials for Wireless Sensor Networks ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 12.2 (2010), p. 222-248 (cf. p. 6).
- [36] Usman RAZA, Parag KULKARNI et Mahesh SOORIYABANDARA. « Low Power Wide Area Networks : An Overview ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19.2 (2017), p. 855-873 (cf. p. 19, 93).
- [37] Joseph FINNEGAN et Stephen BROWN. « A Comparative Survey of LPWA Networking ». In : (2018) (cf. p. 19).
- [38] Qahhar Muhammad QADIR et al. « Low power wide area networks : a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 77454-77473 (cf. p. 19).
- [39] Mncedisi BEMBE et al. « A survey on low-power wide area networks for IoT applications ». In : *Telecommunication Systems* 71.2 (2019), p. 249-274 (cf. p. 19).
- [40] Rashmi Sharan SINHA, Yiqiao WEI et Seung-Hoon HWANG. « A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT ». In : *ICT Express* 3.1 (2017), p. 14-21 (cf. p. 19).
- [41] Augustine IKPEHAI et al. « Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things : A Comparative Review ». In : *IEEE Internet of Things Journal* 6.2 (2019), p. 2225-2240 (cf. p. 19).
- [42] Noushin POURSAFAR, Md Eshrat E ALAHI et Subhas MUKHOPADHYAY. « Long-range wireless technologies for IoT applications : A review ». In : *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*. 2017, p. 1-6 (cf. p. 19).
- [43] GLOBAL MOBILE SUPPLIERS ASSOCIATION (GSA). *Evolution from LTE to 5G : Global Market Status*. Rapp. tech. Nov. 2018 (cf. p. 20).
- [49] GSMA. *5G Spectrum GSMA Public Policy Position*. Rapp. tech. 2019 (cf. p. 23).
- [50] Olof LIBERG et al. « Chapter 10 - 5G and the Internet of Things ». In : *Cellular Internet of Things*. 2018, p. 361-366 (cf. p. 23).
- [57] Jetmir HAXHIBEQIRI et al. « LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment : Case study ». In : *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2017, p. 1-8 (cf. p. 25).
- [58] Ibrahim AMADOU, Brandon FOUBERT et Nathalie MITTON. « LoRa in a haystack : a study of the LoRa signal behavior ». In : *WiMob 2019 - 15th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. Barcelona, Spain, oct. 2019 (cf. p. 25).
- [72] « IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 5 : Physical Layer Specifications for Low Energy, Critical Infrastructure Monitoring Networks. » In : *IEEE Std 802.15.4k* (2013), p. 1-149 (cf. p. 28).
- [73] « IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - Amendment 3 : Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks. » In : *IEEE Std 802.15.4g* (2012), p. 1-252 (cf. p. 28).

- [74] « IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2 : Sub 1 GHz License Exempt Operation. » In : *IEEE Std 802.11ah* (2016), p. 1-594 (cf. p. 28).
- [84] *FiPy specsheet*. Version 1.0. Pycom. 2018 (cf. p. 43, 76, 87, 88).
- [85] Y. REKHTER, T. LI et S. HARES. *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. RFC 4271. 2006 (cf. p. 44).
- [86] International Telecommunication UNION. *Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks*. Recommendation ITU-T G.9903. 2017 (cf. p. 46).
- [87] T. WINTER et al. *RPL : IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. RFC 6550. 2012 (cf. p. 46).
- [88] T. CLAUSEN et P. JACQUET. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. RFC 3626. 2003 (cf. p. 46).
- [89] Jeroen FAMAHEY et al. « Flexible Multimodal Sub-Gigahertz Communication for Heterogeneous Internet of Things Applications ». In : *IEEE Communications Magazine* 56.7 (2018), p. 146-153 (cf. p. 47).
- [90] Jeroen HOEBEKE et al. « A Cloud-based Virtual Network Operator for Managing Multimodal LPWA Networks and Devices ». In : *2018 3rd Cloudification of the Internet of Things (CIoT)*. 2018, p. 1-8 (cf. p. 47).
- [91] Olivier BOUCHET, Abdesslem KORTEBI et Mathieu BOUCHER. « Inter-MAC green path selection for heterogeneous networks ». In : *2012 IEEE Globecom Workshops*. 2012, p. 487-491 (cf. p. 47).
- [92] Tom DE SCHEPPER et al. « ORCHESTRA : Enabling Inter-Technology Network Management in Heterogeneous Wireless Networks ». In : *IEEE Transactions on Network and Service Management* 15.4 (2018), p. 1733-1746 (cf. p. 47).
- [93] Tayyaba IRSHAD et al. « Multi-Rat Based Adaptive Quality of Service (QoS) Management in WBAN ». In : *Malaysian Journal of Computer Science* 33.4 (2020), p. 252-269 (cf. p. 48).
- [94] Silki BAGHLA et Savina BANSAL. « Power Consumption-Based Dynamic Network Selection in Heterogeneous Networks ». In : *National Academy Science Letters* 43.1 (2020), p. 33-36 (cf. p. 48).
- [95] Alaa AWAD, Amr MOHAMED et Carla-Fabiana CHIASSERINI. « Dynamic Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks : A user-centric scheme for improved delivery ». In : *IEEE Consumer Electronics Magazine* 6.1 (2017), p. 53-60 (cf. p. 48).
- [96] Nikolaos A. PANTAZIS, Stefanos A. NIKOLIDAKIS et Dimitrios D. VERGADOS. « Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 15.2 (2013) (cf. p. 49).
- [97] Nouha BACCOUR et al. « Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In : *ACM Trans. Sen. Netw.* 8.4 (2012) (cf. p. 51).
- [98] John E LANE et al. « Hail Disdrometer Array for Launch Systems Support ». In : *12th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans and Land Surface*. 2008 (cf. p. 60).
- [99] R. Venkata RAO. « Decision Making in the Manufacturing Environment : Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods ». In : Springer, 2007. Chap. Introduction to Multiple Attribute Decision-making (MADM) Methods, p. 27-41 (cf. p. 62).
- [100] Ching-Lai HWANG et Kwangsun YOON. *Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications*. New York : Springer-Verlag, 1981 (cf. p. 63).
- [101] *ESP32 series datasheet*. Version 3.3. Espressif Systems. 2020 (cf. p. 66, 76, 87, 88).
- [102] FAROOQ BARI et Victor LEUNG. « Multi-Attribute Network Selection by Iterative TOPSIS for Heterogeneous Wireless Access ». In : *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. 2007, p. 808-812 (cf. p. 67).
- [103] Wenhui ZHANG. « Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks ». In : *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No.04TH8733)*. T. 2. 2004, 653-658 Vol.2 (cf. p. 67).
- [105] Mohamed Abdelkrim SENOUCI et al. « TOPSIS-based dynamic approach for mobile network interface selection ». In : *Computer Networks* 107.2 (2016), p. 304-314 (cf. p. 67).

- [106] Ali JAHAN, Morteza YAZDANI et K. EDWARDS. « TOPSIS-RTCID for range target-based criteria and interval data ». In : *International Journal of Production Management and Engineering* 9.1 (2021), p. 1-14 (cf. p. 68).
- [107] Lincoln Herbert TEIXEIRA et Árpád HUSZÁK. « Preemptive Network Selection for V2V Communication ». In : *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2019, p. 436-439. DOI : [10.1109/TSP.2019.8768821](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.8768821) (cf. p. 68).
- [108] Igor BISIO et Andrea SCIARRONE. « Fast Multiattribute Network Selection Technique for Vertical Handover in Heterogeneous Emergency Communication Systems ». In : *Wireless Communications and Mobile Computing* 2019 (2019), p. 1-17 (cf. p. 68).
- [111] *Pytrack specsheet*. Pycom. 2017 (cf. p. 76, 77).
- [112] *Pysense specsheet*. Pycom. 2020 (cf. p. 77).
- [113] *EW-7811Un Datasheet*. Edimax. 2015 (cf. p. 77).
- [114] *UM2115 User manual*. Rev 5. STMicroelectronics. 2018 (cf. p. 77).
- [115] *7-Port USB 2.0 Hub, U223-007*. Tripp Lite. 2021 (cf. p. 77).
- [118] Thomas ANDERSÉN. « Energy-Efficient Adaptive Sensing in Low Power Wide Area Networks ». Mém. de mast. Norwegian University of Science et Technology, 2018 (cf. p. 87).
- [120] Gaby TAYEB et al. « A distributed real-time data prediction and adaptive sensing approach for wireless sensor networks ». In : *Pervasive and Mobile Computing* 49 (2018), p. 62-75 (cf. p. 93).
- [121] G. RAJESH et Ashvini CHATURVEDI. « Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks ». In : *Computer Networks* 164 (2019), p. 106902 (cf. p. 93).

Webographie

- [1] *Futura sciences, Internet : qu'est-ce que c'est ?* <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-internet-3983/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 1).
- [2] *CCM, TCP/IP.* <https://www.commentcamarche.net/contents/539-tcp-ip>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 1).
- [3] *The Opte Project.* <https://www.opte.org/the-internet>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 1).
- [4] *Cisco, Qu'est-ce qu'un réseau sans fil ?* https://www.cisco.com/c/fr_fr/solutions/small-business/resource-center/networking/wireless-network.html. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 1).
- [5] *FrameIP, Modèle OSI.* <https://www.frameip.com/osi/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 2).
- [6] *Wikipédia, Salle de classe.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Salle_de_classe. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 2).
- [7] *MieuxEnseigner, Les douze façons de lever la main en cours.* <https://www.mieuxenseigner.com/lemagazine/les-douze-facons-de-lever-la-main-en-cours/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 3).
- [8] *Wikipédia, Radio access technology.* https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_access_technology. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 4).
- [10] *Wikipédia, Wi-Fi.* <https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 4).
- [11] *Wikipédia, Bluetooth.* <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 4).
- [12] *3rd Generation Partnership Project.* <https://www.3gpp.org/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 4).
- [13] *Wikipédia, 4G.* <https://fr.wikipedia.org/wiki/4G>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 5).
- [15] *Connectivity Standards Alliance, Zigbee.* <https://zigbeealliance.org/fr/solution/zigbee/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 5).
- [16] *Wikipédia, Wireless Personal Area Network.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Wireless_Personal_Area_Network. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 5).
- [17] *Nazim AGOULMINE. Techniques de l'ingénieur, Body Area Networks : les réseaux à la conquête du corps humain.* <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/body-area-networks-les-reseaux-a-la-conquete-du-corps-humain-11039/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 5).
- [18] *Wikipédia, Réseau de capteurs sans fil.* https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 5).
- [21] *Sencrop.* <https://sencrop.com/fr/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 7, 8).
- [22] *Wikipédia, Zea mays.* <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 9).
- [32] *Wikipédia, Nomadisme numérique.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Nomadisme_num%C3%A9rique. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 17).
- [33] *The Things Network, LoRa World Record Broken : 832km/517mi using 25mW.* <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 17).
- [34] *Wikipédia, Bande industrielle, scientifique et médicale.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Bande_industrielle,_scientifique_et_m%C3%A9dicale. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 18).
- [35] *Wikipédia, Fréquences de téléphonie mobile en France.* https://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9quences_de_t%C3%A9l%C3%A9phonie_mobile_en_France. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 18).
- [44] *3GPP, Release 13.* <https://www.3gpp.org/release-13>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 21).

- [45] GSMA, *Mobile IoT Deployments Map*. <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 21).
- [46] Orange, *Couverture LTE-M*. <https://www.orange-business.com/fr/reseau-LTE-M>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 22).
- [47] Heimar LECHT, *2G and 3G networks are shutting down globally?!* <https://1ot.mobi/blog/2g-and-3g-networks-are-shutting-down-globally>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 23).
- [48] *5G – The high-speed mobile network of the future*. <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/mobile-communication-5g/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 23).
- [51] Wikipédia, *Four à micro-ondes*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_%C3%A0_micro-ondes. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 23).
- [52] Sigfox, *Coverage*. <https://www.sigfox.com/en/coverage>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 24).
- [53] Sigfox. <https://www.sigfox.com>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 24).
- [54] Semtech *LoRa Technology Overview*. <https://www.semtech.com/lora>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 25).
- [55] *LoRaWAN, Coverage & Operator Maps*. <https://lora-alliance.org/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 25, 26).
- [56] *Firmware updates over low-power wide area networks*. <https://www.thethingsnetwork.org/article/firmware-updates-over-low-power-wide-area-networks>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 25).
- [59] Orange, *Couverture LoRa*. <https://www.orange-business.com/fr/reseau-iot>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 25).
- [60] *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 26).
- [61] *Ingenu*. <https://www.ingenu.com/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 26).
- [62] *RPMA technology*. <https://www.ingenu.com/technology/rpma/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 26).
- [63] *Weightless*. <https://www.ubiik.com/weightless-sig>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 26).
- [64] *Link Labs, What is Weightless?* <https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [65] *Nwave*. <https://www.nwave.io/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [66] *Weightless-P system specification*. https://pro-bee-user-content-eu-west-1.s3.amazonaws.com/public/users/Integrators/929cb090-e779-401a-b06c-c629ff6b0fea/ap-cambridgestartuplimi/Weightless-P_v1.03.pdf. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [67] *Ubiik, FOTA : Weightless-P vs. LoRaWAN*. <https://www.ubiik.com/post/2017/03/28/fota-weightless-p-vs-lorawan>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [68] *Ubiik*. <https://www.ubiik.com/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [69] *Telensa*. <https://www.telensa.com/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [70] *Telensa, Ultra Narrow Band (UNB) Smart City Network*. https://info.telensa.com/hubfs/Resources%20page%20files/datasheet_telensa_planet_network.pdf. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 27).
- [71] *DASH7 Alliance*. <https://dash7-alliance.org/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 28).
- [75] *Qowisio*. <https://www.qowisio.com/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 29).
- [76] *WAVIoT*. <https://waviot.com/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 29).
- [77] *Telecom Design, TD1204 Datasheet*. https://github.com/Telecom-Design/Documentation_TD_RF_Module/raw/master/TD1204%20Datasheet.pdf. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 31).
- [78] *Ubiik, Weightless End Device Module Evaluation Board Datasheet*. https://89d40fcb-7f56-4ec2-b6a2-6a84dcfb24ba.filesusr.com/ugd/3e61aa_7fc0f76b9d824eae81ef58e417af42db.pdf. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 31).
- [79] *Semtech, SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet*. <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1272-1277619.pdf>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 31).

- [80] Digi, *XBee 3 Cellular LTE-M/NB-IoT Modem Datasheet*. https://www.digi.com/resources/library/data-sheets/ds_xbee3-cellular-lte-m-nb-iot. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 31, 37).
- [81] Harald NAUMANN. *NB-IoT versus SIGFOX, LoRaWAN, and Weightless – power / energy the inconvenient truth*. <https://www.gsm-modem.de/M2M/iot-university/nb-iot-power-consumption/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 32).
- [82] Brian RAY. *Link Labs, Cost of Building With LPWAN Technologies*. <https://www.link-labs.com/blog/costs-in-iot-lte-m-vs.-nb-iot-vs.-sigfox-vs.-lora>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 34).
- [83] *Hologram*. <https://hologram.io/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 34).
- [104] *Aspexit, La logique floue ou l'extension de la logique classique*. <https://www.aspexit.com/la-logique-floue-ou-lextension-de-la-logique-classique/>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 67).
- [109] *Irif, Notation grand O*. <https://www.irif.fr/~carton/Enseignement/Complexite/ENS/Cours/MasterInfo/grandO.html>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 71).
- [110] Paul HSIEH. *Square Roots*. <http://www.azillionmonkeys.com/qed/sqroot.html>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 71).
- [116] *The MicroPython project*. <https://github.com/pycom/pycom-micropython-sigfox>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 77).
- [117] *Démonstration en vidéo d'un prototype de réseau multitechnologie basé sur RODENT*. <http://chercheurs.lille.inria.fr/bfoubert/ressources/rodent.mp4>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 82).
- [119] *Techno-science, Inférence bayésienne - Définition et Explications*. <https://www.techno-science.net/definition/6368.html>. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 93).
- [122] *Université de Liège, Corrélation de Pearson*. http://www.biostat.ulg.ac.be/pages/Site_r/corr_pearson.html. Accessible au 02-07-2021. (cf. p. 94).

