



HAL
open science

Architecture matérielle et protocolaire pour réseaux de capteurs sans fil adaptés à la surveillance environnementale

Guéréguin Der Sylvestre Sidibe

► To cite this version:

Guéréguin Der Sylvestre Sidibe. Architecture matérielle et protocolaire pour réseaux de capteurs sans fil adaptés à la surveillance environnementale. Autre [cs.OH]. Université Clermont Auvergne, 2021. Français. NNT : 2021UCFAC079 . tel-03663270

HAL Id: tel-03663270

<https://theses.hal.science/tel-03663270>

Submitted on 10 May 2022

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

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



UNIVERSITÉ DE CLERMONT AUVERGNE

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR (ED-SPI)

THÈSE

Présentée et soutenue le 30/08/2021 par :
Guéréguin Der Sylvestre SIDIBE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité: Informatique

Architecture matérielle et protocolaire pour réseaux de capteurs sans fil adaptés à la surveillance environnementale

JURY

MME NADJIA KARA	PROFESSEURE À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC	PRÉSIDENTE
M. THIERRY VAL	PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE	RAPPORTEUR
MME NATHALIE MITTON	DIRECTRICE DE RECHERCHE À L'INRIA DE LILLE	RAPPORTEURE
M. TIGUIANE YELEMOU	MCF-HDR À L'UNIVERSITÉ NAZI BONI	EXAMINATEUR
M. JEAN-PIERRE CHANET	INGÉNIEUR DE RECHERCHE, HDR EN INFORMATIQUE À L'INRAE	EXAMINATEUR

Directeur de Thèse :

Michel MISSON - Professeur à l'UCA (Clermont-Ferrand)

Encadrants :

Marie-Françoise SERVAJEAN - MCF à l'UCA (Clermont-Ferrand)

Nadir HAKEM - Professeur associé à l'UQAT (Val-d'Or Canada)

Remerciements

En préambule à ce manuscrit de thèse, je tiens à adresser mes sincères remerciements aux personnes dont l'aide et le soutien ont permis d'aboutir aux présents résultats.

Je remercie tout d'abord le Conseil régional d'Auvergne-Rhône-Alpes et le Fond européen de développement régional (FEDER) qui ont financé cette thèse dans le cadre du programme défi AUDACE. Je remercie le laboratoire LIMOS et tout le personnel administratif pour leur disponibilité.

J'adresse particulièrement à mes directeurs de thèse M. Michel Misson, Mme Marie-Françoise Servajean et M. Nadir Hakem, des remerciements pour m'avoir fait confiance et donné l'opportunité d'effectuer ce travail de thèse riche tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je leur suis reconnaissant pour leur soutien sans faille, leur patience, leur temps et leurs encouragements. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à leurs qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de cette thèse.

Je souhaite remercier vivement tous les membres de mon jury.

Merci à M. Thierry Val et à Mme Nathalie Mitton pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail et d'en être rapporteurs. Leur lecture attentive du manuscrit et leurs précieux conseils ont permis d'améliorer ce travail.

Merci à Mme Nadja Kara d'avoir accepté d'être présidente de mon jury.

Merci à MM. Tiguiane Yélémou et Jean-Pierre Chanet d'avoir accepté d'être examinateurs de mon travail.

Mes remerciements vont également à mes plus proches collaborateurs Raphaël Bidaud et Aurélien Surier pour leur support et aide. Un merci spécial à celles et ceux qui m'ont apporté leur aide pour les préparatifs le jour de la soutenance.

Ce travail de thèse a été l'occasion d'impliquer MM. Lionel Jouve et Guillaume Bouchaud du département Mesures-Physiques de l'IUT pour la réalisation de maquettes d'antennes ainsi que MM. Théophile Decaesteker, Etienne Charpin et Killian Demanget dans le cadre de leur stage effectué dans notre équipe. Merci à eux pour leur contribution.

Je remercie également M. Adrien Wohrer, enseignant de Mathématiques au Département Informatique de l'IUT pour son support quant il s'est agi d'introduire des probabilités dans nos modèles.

Je remercie Mme Frédérique Jacquet, cheffe du département Réseaux et Télécommunications de l'IUT dans lequel j'ai effectué mon enseignement pour son soutien et son aide. Merci à MM. Gérard Chalhoub, François Delobel et Antonio Freitas, ensei-

gnants à l'IUT pour leurs conseils. Merci également à tous les enseignants et personnels administratifs et du service technique de l'IUT de Clermont-Ferrand pour leur soutien.

Un grand merci à tous mes collègues de bureau (Hamadoun Tall, Mouna Karoui, Ali Mamadou Mamadou, Jinpeng Wang) avec lesquels nous avons partagé des moments de joie et de rire.

J'adresse une tendre pensée à mes parents sans qui rien n'aurait été possible et je les remercie ainsi que toute ma famille pour leur soutien sans faille, et leurs encouragements. Pour finir, merci à tous mes amis pour leur amitié et leur soutien.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fils disposent aujourd'hui d'une technologie arrivée à maturité qui leur permet d'être déployés dans de très nombreux domaines applicatifs y compris celui de la surveillance environnementale. Les contraintes énergétiques de ce type de réseaux ont fait émerger deux grandes classes de solutions : celles privilégiant le débit au détriment de la portée des liens radio et celles visant une collecte de données sur de grandes étendues mais avec des débits faibles et contraints.

Il existe néanmoins un domaine applicatif pour lequel la collecte de données est à la fois exigeante en portée des liens radio et en débit supporté. Cette thèse s'adresse à ce domaine, à l'interface des classes de solutions existantes, pour satisfaire des applications nécessitant une collecte fréquente de données devant respecter une contrainte de fraîcheur. Dans cette optique, notre recherche est centrée sur l'usage d'une antenne à faisceau commutable équipant le point de collecte ou puits d'un réseau de capteurs sans fils, permettant d'émuler une topologie en étoile. Chaque nœud autour du point de collecte peut être atteint par au moins une des orientations permises du lobe d'une telle antenne. L'usage de ce type d'antenne a des incidences fortes sur les couches basses (physique et liaison notamment) de la pile protocolaire de cette nouvelle classe de solution. Cette antenne permet en effet d'augmenter la portée radio, d'être plus robuste face aux interférences et aux obstacles sur le trajet du signal, mais cela au détriment de l'intermittence de la connectivité des nœuds de l'étoile. Un nœud est à portée du puits de collecte dans au moins une des topologies partielles induites par l'orientation du lobe de l'antenne, ce point a une incidence forte sur les spécifications de la couche MAC d'un tel réseau.

Les deux principales contributions de cette thèse sont de spécifier d'une part la phase de découverte du voisinage du puits qui doit s'exécuter dans un délai acceptable, et d'autre part de procéder à une collecte fréquente de données contraintes par une date de péremption. Différentes variantes de ces spécifications sont proposées, elles s'inspirent d'un polling selecting groupé (grouped polling). Elles ont été validées partiellement par une approche théorique et plus globalement par une simulation via Cooja/Contiki OS. Les résultats obtenus font la preuve de l'incidence des mécanismes proposés sur la fréquence de la collecte et la fraîcheur des données récoltées.

Mots clés : IEEE 802.15.4, réseaux de capteurs sans fil, protocoles MAC, protocoles de découverte de voisinage, Antenne à faisceau commutable, topologie en étoile, polling selecting, commutation de topologie, collecte de données déterministe.

Abstract

Wireless sensor networks are now a mature technology that can be deployed in a wide range of applications, including environmental monitoring. The energy constraints of this type of network have led to the emergence of two main classes of solutions : those that prioritize throughput at the expense of the range of radio links and those that aim to collect data over large areas but with low and constrained throughputs.

Nevertheless, there is an application domain for which data collection is both demanding in terms of radio link range and supported data rate. This thesis addresses this domain, at the interface of existing solution classes, to satisfy applications requiring frequent data collection that must respect a freshness constraint. In this context, our research focuses on the use of a switchable beam antenna equipping the collection point or sink of a wireless sensor network, allowing to emulate a star topology. Each node around the collection point can be reached by at least one of the allowed lobe orientations of such an antenna. The use of this type of antenna has strong impacts on the lower layers (physical and link in particular) of the protocol stack of this new class of solution. This antenna indeed allows to increase the radio range, to be more robust against interferences and obstacles on the signal path, but this at the expense of the intermittence of the connectivity of the nodes of the star. A node is within range of the sink in at least one of the partial topologies induced by the antenna lobe orientation, this point has a strong impact on the MAC layer specifications of such a network.

The two main contributions of this thesis are to specify on the one hand the discovery phase of the sink neighborhood which must be executed within an acceptable time frame, and on the other hand to proceed to a frequent data collection constrained by an expiration date. Different variants of these specifications are proposed, based on a grouped polling selecting. They have been partially validated by a theoretical approach and more globally by a simulation via Cooja/Contiki OS. The results obtained show the impact of the proposed mechanisms on the frequency of collection and the freshness of the collected data.

Keywords : IEEE 802.15.4, wireless sensor networks, MAC protocols, neighborhood discovery protocols, switchable beam antenna, star topology, polling selecting, topology switching, deterministic data collection.

Table des matières

Résumé	iv
Abstract	v
Liste des figures	xiv
Liste des tableaux	xv
Abréviations	xvi
Introduction	1
Chapitre 1 Contexte et état de l'art	3
1.1 Réseaux de capteurs sans fil	3
1.2 Caractéristiques majeures des RCSF dédiés à la collecte de données . . .	5
1.2.1 Type de trafic	5
1.2.2 Le déploiement des nœuds capteurs	6
1.2.3 Source de déperdition d'énergie	7
1.3 Domaines d'application des RCSF	8
1.3.1 Application militaire	8
1.3.2 Application environnementale	8
1.3.3 Application urbaine	9
1.3.4 Application médicale	9
1.3.5 Application industrielle	9
1.4 Solutions dédiées à la collecte de données	10
1.4.1 Solutions privilégiant le débit	10
1.4.1.1 Solutions basées sur IEEE 802.15.4	10
1.4.1.1.1 ZigBee	11
1.4.1.1.2 6LoWPAN	12
1.4.1.1.3 WirelessHART	13
1.4.1.1.4 ISA100.11a	13
1.4.1.2 Autres solutions	14
1.4.1.2.1 Bluetooth	15
1.4.1.2.2 Z-Wave	16
1.4.1.2.3 ANT	16
1.4.1.2.4 EnOcean	17

1.4.2	Solutions privilégiant la portée	18
1.4.2.1	Wavenis	18
1.4.2.2	Dash7	19
1.4.2.3	LoRaWAN	19
1.4.2.4	Sigfox	21
1.5	Identification d'une classe de besoins non couverts	21
1.6	Conclusion	23
Chapitre 2 Analyse de la problématique de la thèse		24
2.1	Contexte de notre recherche	24
2.1.1	Invariants relatifs à la classe d'applications étudiées	24
2.1.2	Exemple d'application	25
2.1.3	Limites des solutions existantes	26
2.2	Interaction entre trames courtes et méthodes d'accès	30
2.2.1	Approche distribuée	30
2.2.2	Approche centralisée	32
2.2.3	Points communs de la problématique de la transmission de trames courtes sur un médium radio	33
2.3	Identification des leviers	34
2.3.1	Pour une augmentation du débit	34
2.3.1.1	Le multicanal (fréquence et étalement)	34
2.3.1.2	Agrégation	35
2.3.2	Pour une augmentation de la portée	35
2.3.2.1	Le multi-saut	36
2.3.2.2	Usage d'antennes directives	38
2.4	Orientations définies pour notre travail	39
2.5	Conclusion	40
Chapitre 3 Présentation globale de la contribution		41
3.1	Approche topologique	41
3.2	Considérations sur la longueur des liens radio d'un réseau en étoile	43
3.2.1	La solution apportée par un gain de traitement	44
3.2.2	Utilisation d'antennes de manière dissymétrique	44
3.3	Choix de la méthode d'accès	45
3.3.1	Caractéristiques dues à l'usage d'antennes directionnelles	45
3.3.1.1	Problème des terminaux cachés	46
3.3.1.2	Problème des terminaux sourds	46
3.3.2	Classification des protocoles MAC	47
3.3.3	Protocoles mono-canal	47
3.3.3.1	Protocoles MAC avec contention	48

3.3.3.2	Protocoles MAC sans contention	51
3.3.3.3	Protocoles MAC hybrides	52
3.3.3.4	Bilan comparatif	56
3.4	Présentation globale de l’approche proposée	56
3.4.1	Phase de découverte de voisinage du puits	57
3.4.2	Phase de collecte	59
3.5	Démarche de simulation	61
3.5.1	Outil de simulation et modèle de propagation	61
3.5.1.1	Choix de l’outil	61
3.5.1.2	Choix du modèle de propagation	61
3.5.2	Prise en compte des spécificités des antennes utilisées	62
3.5.3	Choix des topologies considérées	62
3.6	Conclusion	63
Chapitre 4	Contribution sur la découverte de voisinage	65
4.1	Énoncé du problème	65
4.2	Description générale	67
4.2.1	Description du système	67
4.2.2	Principe général des algorithmes explorés	68
4.2.2.1	Méthode force brute	69
4.2.2.2	Principe d’optimisation	69
4.2.3	Format des trames	71
4.2.3.1	Message POLL	71
4.2.3.2	Message HELLO	72
4.2.4	Différentes façons de découvrir un nœud	73
4.2.5	Structure de la table de découverte de voisinage du puits	73
4.2.6	Mécanisme de détection de collision	74
4.2.7	Différents états d’un slot de réponse	74
4.3	ANDF : Aloha-like Neighbor Discovery with Feedback	76
4.3.1	Fonctionnement	76
4.3.2	Mise à jour de la probabilité de transmission	78
4.3.3	Réduction du nombres de slots vides	78
4.3.4	Condition d’arrêt	78
4.3.5	Evaluation et analyse des résultats	79
4.3.5.1	Impact du mécanisme de réduction des slots vides et du découpage en round de la découverte	80
4.3.5.2	Impact de la collaboration	80
4.3.5.3	Impact de l’adaptation de la probabilité de transmission	81
4.3.5.4	Bilan sur les résultats de simulation de ANDF	82
4.4	WAYE : Who Are You Enquiry	83

4.4.1	Estimation du nombre de voisins et ajustement du nombre de slots	83
4.4.2	Fin de la découverte	85
4.4.3	Stratégie de réponse des nœuds	86
4.4.4	WAYE+ : Extension du WAYE	87
4.4.5	Evaluation et analyse des résultats	87
4.4.5.1	Impact de la méthode d'estimation	88
4.4.5.2	Impact de la segmentation du temps	90
4.4.5.3	Impact de la collaboration des nœuds lors de la découverte	91
4.4.5.4	Impact des stratégies de réponse des nœuds	92
4.4.5.5	Impact de la directivité de l'antenne du puits	93
4.4.5.6	Table de connectivité et commutation de topologie	94
4.5	Conclusion	95
Chapitre 5 Contribution sur la collecte de données		97
5.1	Identification de la problématique	97
5.2	Méthodes de collecte de données	99
5.2.1	Polling naïf	100
5.2.2	Polling groupé	101
5.2.3	Polling groupé avec extra slot	103
5.2.4	Analyse des méthodes de collecte	106
5.2.4.1	Calcul de la durée d'un cycle de collecte	106
5.2.4.2	Calcul du nombre de nœuds supportés	108
5.2.4.3	Calcul du nombre moyen de trames collectées	109
5.3	Evaluation et analyse des résultats	112
5.3.1	Durée de cycle de collecte	112
5.3.2	Nombre moyen de trames collectées par le puits par cycle de collecte	113
5.3.3	Taux de livraison des trames	115
5.4	Conclusion	116
Conclusion et Perspectives		117
6.1	Conclusion	117
6.2	Perspectives	118
6.2.1	A courts termes	118
6.2.2	A moyens termes	119
6.2.3	A plus longs termes	119
Publications		120
Annexe		121
A.1	Algorithme de découverte de voisinage ANDF	121

A.2	Algorithme de découverte de voisinage WAYE	123
A.3	Algorithme de découverte de voisinage WAYE+	124
A.4	Méthode de génération de topologies utilisée	125
A.5	Antenne	126
A.5.1	Définition générale d'une antenne	126
A.5.2	Antenne directionnelle	127
A.5.3	Antenne à faisceau commutable utilisée	127
A.5.3.1	Généralités	127
A.5.3.2	Effet du nombre de cellules FSS activées	129
A.5.3.3	Prototype réalisé et diagramme de rayonnement	130
Références		132

Liste des figures

1.1	Type de topologies de RCSF	4
1.2	Architecture d'un nœud capteur	4
1.3	Domaines d'application des RCSF	8
1.4	La pile protocolaire IEEE 802.15.4	11
1.5	Couches protocolaires de ZigBee	12
1.6	Réseau Zigbee	12
1.7	Pile protocolaire de 6LoWPAN	13
1.8	Vue d'ensemble d'un réseau 6LoWPAN	13
1.9	Pile protocolaire de WirelessHART	14
1.10	Réseau générique WirelessHART [27]	14
1.11	Pile protocolaire de ISA100.11a	14
1.12	Réseau Bluetooth de type scatternet	15
1.13	Réseau Z-Wave	16
1.14	Couche protocolaire de ANT	17
1.15	Différents rôles d'un nœud ANT [35]	17
1.16	Couche protocolaire Wavenis	19
1.17	Réseau Dash7	20
1.18	Réseau LoRaWAN	20
1.19	Architecture réseau Sigfox	21
1.20	Portée vs Débit des principales technologies de réseaux de collecte de données	22
2.1	Disposition générique des nœuds du type de réseau étudié	24
2.2	Résultats des mesures de débit pour un réseau ZigBee point à point (250 kbit/s) pour des vitesses de transmission (bauds) et longueurs de paquet différentes [46]	26
2.3	Diagramme de l'algorithme du CSMA/CA non slotté de la norme IEEE 802.15.4 [57]	29
2.4	Format de la trame de donnée conforme à la norme IEEE 802.15.4 [58]	29
2.5	Séquencement de l'exécution d'une requête de collecte de mesures d'un nœud avec CSMA/CA non slotté	30
2.6	Séquencement de l'exécution d'une requête de collecte de mesures d'un nœud basé sur le Polling-Selecting	33
2.7	Agrégation de données	36

2.8	Réseau multi-saut avec puits au centre	37
2.9	Résultats de mesures du délai pour un réseau ZigBee (250 kbit/s) en fonction du nombre de sauts [46]	37
2.10	Comparaison des principes de la couverture des antennes omnidirectionnelles et directionnelles	38
2.11	Diagramme de rayonnement de l'antenne choisie	40
3.1	Topologies en étoile, maillées et en arbre : comparaison de délai en fonction de la distance [69]	43
3.2	Zone de couverture du puits équipé d'une antenne directionnelle pour une position donnée du faisceau de l'antenne	45
3.3	Problème du terminal caché dans le cas d'une antenne directionnelle	46
3.4	Problème du terminal sourd dans le cas d'une antenne directionnelle	47
3.5	Classification de protocoles MAC utilisant des antennes directionnelles	47
3.6	Diagramme de rayonnement d'une antenne adaptative multi-faisceau [77]	48
3.7	Processus de réception en parallèle de plusieurs trames [77]	49
3.8	Distribution des nœuds traitée dans [80]	49
3.9	Calendrier d'activité des nœuds en fonction de l'orientation de l'antenne du puits [80]	50
3.10	Diagramme de rayonnement de l'antenne dans DU-MAC [82]	50
3.11	Découpage temporel de DiS-MAC	51
3.12	Structure de la supertrame de PMAC [85]	52
3.13	Formation de groupes dans SAMAC [86]	53
3.14	Structure de la supertrame de DCD-MAC [87]	54
3.15	Exemple de sollicitation des nœuds par le puits	60
3.16	Exemple de séquençement des transmissions entre le puits et les nœuds [98]	60
3.17	Type de topologies considérées	63
4.1	Configuration réseau	66
4.2	Diagramme de rayonnement de l'antenne du puits	66
4.3	Orientation du faisceau de l'antenne	67
4.4	Configuration réseau émulée	67
4.5	Supertrame de la phase de découverte de voisinage	68
4.6	Processus général de découverte de voisinage	71
4.7	Format du message POLL	72
4.8	Format du message HELLO	72
4.9	Résultats possibles pour un slot de temps. Dans cette figure, $S_{x,y}$ signifie le slot sélectionné pour le nœud x au cycle y	75
4.10	Supertrame de ANDF	76
4.11	Activation du premier secteur	77

4.12	Diffusion du POLL dans le secteur activé	77
4.13	Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF, ANDF sans le mécanisme de réduction de slots vides (ISR) et la force brute	81
4.14	Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF et AND (ANDF sans collaboration entre nœuds) . . .	82
4.15	Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF et PND (P-persistent Neighbor Discovery)	82
4.16	Processus général de découverte de voisinage et d'estimation du nombre de voisins	84
4.17	Secteur activé couvrant les nœuds 4, 9 12, 20 et 21	85
4.18	Couverture du secteur 1 et du secteur 2	86
4.19	Comparaison entre WAYE et la méthode force brute pour 24, 48 et 100 nœuds déployés	89
4.20	Comparaison entre WAYE et WAYE sans estimation	90
4.21	Comparaison entre WAYE et CSMA/CA	91
4.22	Comparaison entre WAYE et WAYE+ (WAYE avec collaboration des nœuds lors de la découverte)	92
4.23	Comparaison des différentes stratégies de réponse des nœuds aux sollicitations du puits	93
4.24	WAYE : Comparaison de délais entre l'utilisation d'une antenne à faisceau commutable et d'une antenne omnidirectionnelle au puits	94
4.25	Extrait d'une table de découverte du puits	95
5.1	Exemple de délai de bout en bout avec CSMA/CA slotté pour une configuration en étoile constituée de 4 nœuds capteurs et un puits [111] . . .	99
5.2	Exemple de production de données et de sollicitation du puits	99
5.3	Asynchronisme entre la production de données et la collecte	100
5.4	Exemple d'exécution de la méthode polling naïf	101
5.5	Exemple d'exécution de la méthode polling groupé	103
5.6	Polling groupé : Exemple de perte de réponse de nœud (DRP) ou d'Ack	104
5.7	Exemple d'exécution de la méthode polling groupé avec extra slot : cas favorable d'un nœud subissant une perte de trame	105
5.8	Diagramme de temps : polling naïf (a) polling groupé (b) et polling groupé avec extra slot (c)	107
5.9	Comparaison de NP, GP, GPExtra sur le nombre de trames DRP collectées pour un temps donné	113
5.10	Comparaison de GP et GPExtra en termes de nombre moyen de trames collectées obtenu par simulation et par analyse théorique pour un réseau de 48 nœuds	114

5.11 Comparaison de NP, GP, GPExtra sur le taux de livraison des trames pour un FER donné dans un réseau à 48 nœuds	116
--	-----

Liste des tableaux

1.1	Capacité de traitement et de stockage de certains nœuds capteurs sans fil [1]	5
1.2	Classification par type de trafic [2]	6
1.3	Énergie consommée par état et par module radio [6]	7
1.4	Bandes de fréquences utilisables par IEEE 802.15.4	11
1.5	Comparaison de différentes technologies à courte portée	18
1.6	Comparaison de différentes technologies à longue portée	21
2.1	Exemple d'exigences typiques des réseaux industriels de capteurs sans fil [42]	25
2.2	Satisfaction des besoins	28
2.3	Comparaison entre quelques types d'antennes directionnelles [66]	39
3.1	Comparaison entre topologie en étoile et topologie multi-saut	42
3.2	Comparaison de protocoles MAC pour antennes directionnelles	55
3.3	Valeur du coefficient d'atténuation pour le modèle Path Loss [102]	62
4.1	Paramètres et termes utilisés dans nos protocoles de découverte de voisinage	68
4.2	Table de découverte de voisinage du puits	74
4.3	Compteurs des états des slots d'une requête	75
4.4	Exemple de résultats obtenus sur un round de découverte	77
4.5	Paramètres de simulation de ANDF	79
4.6	Paramètres de simulation de WAYE	88
5.1	Paramètres utilisés dans nos méthodes de collecte	98
5.2	Exemple d'estimation de la durée T_c d'un cycle de collecte en ms avec NP, GP et GPExtra	108
5.3	Impact de la durée de la collecte sur le nombre de nœuds supportés	109
5.4	Valeurs moyennes du nombre de trames collectées et gain pour différents taux d'erreur (FER)	111
5.5	Paramètres de simulation pour la collecte de données	112
5.6	Nombre moyen de trames collectées (ANCF) par cycle pour un réseau de 48 nœuds	115

Abréviations

ACK : Acknowledgment
ADC : Analog to Digital Converter
ANDF : Aloha-like Neighbor Discovery with Feedback
ASK : Amplitude Shift Keying
BER : Bit Error Rate
CCA : Clear Channel Assessment
CRC : Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS : Chirp Spread Spectrum
CTS : Clear To Send
dB : Decibel
DRP : Data Response Frame
DRQ : Data Request Frame
DBPSK : Differential Binary Phase-Shift Keying
FCS : Frame Check Sequence
FDR : Frame Delivery Ratio
FEDER : Fonds Européen de Développement Régional
FER : Frame Error Rate
FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum
FSS : Frequency Selective Surface
GFSK : Gaussian Frequency-Shift Keying
GPS : Global Positioning System
HART : Highway Addressable Remote Transducer Protocol
ICMP : Internet Control Message Protocol
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPv6 : Internet Protocol version 6
IoT : Internet of Things
ITU : International Telecommunication Union
ISA : International Society Automation
ISM : Industrial, Scientific and Medical (radio band)
ITU-T : ITU Telecommunication standardization sector
LRWPAN : Low Rate Wireless Personal Area Network
LPWAN : Low Power Wide Area Network
MAC : Medium Access Control

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output
OS : Operating system
OSI : Open Systems Interconnection
QoS : Quality of Service
RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil
RSSI : Received Signal Strength Indication
RTS : Request To Send
SNR : Signal-to-Noise Ratio
TCP : Transmission Control Protocol
TDMA : Time Division Multiple Access
UDP : User Datagram Protocol
UHF : Ultra High Frequency
UNB : Ultra Narrow Band
WAYE : Who Are You Enquiry
WBAN : Wireless Body Area Network
WSN : Wireless Sensor Network
6LoWPAN : IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks

Introduction

Les progrès technologiques dans la miniaturisation des dispositifs électroniques ont conduit au développement de nœuds capteurs communicants de petite taille, à faible coût, capables de fonctionner avec peu d'énergie (généralement fournie par une batterie) et avec un minimum de puissance de calcul et de stockage. Les nœuds sont déployés dans une zone de captage (ou zone d'intérêt) et coopèrent entre eux via des liaisons sans fil pour former un réseau de capteurs sans fil. Grâce à son fort potentiel, ce type de réseaux de capteurs est au centre de plusieurs types d'applications couvrant des domaines variés tels que : les domaines militaires, industriels, environnementaux, sanitaires, etc . . .

Des efforts technologiques ont été faits afin de proposer des solutions permettant de répondre aux besoins des applications liées à la collecte de données dans les réseaux de capteurs. Chacune des solutions répond à un besoin précis mais dans cette thèse nous nous consacrerons plus particulièrement à la collecte de mesures caractérisées par un délai de validité. L'ensemble des solutions permises par les normes et les technologies existantes peuvent être classées en deux grandes catégories à savoir les solutions qui privilégient le débit mais de courte portée et les solutions qui privilégient la portée au détriment du débit.

Cependant, l'utilisation des réseaux de capteurs sans fils pour les applications de collecte de données dédiées à la surveillance environnementale reste un défi d'aujourd'hui. Ce type d'applications est caractérisé par des déploiements sur de vastes zones et des conditions de propagation qui peuvent être hétérogènes et complexes quand le signal radio se propage à la surface du sol. Les pistes induites par l'émergence de certaines technologies IoT telles que LoRa et SigFox permettent d'envisager des déploiements étendus au détriment des débits offerts pour la collecte. La problématique traitée ici est de reconsidérer cette limite en débit pour les applications de collecte exigeantes à la fois en portée des liens radio et en débit supporté.

Dans cette optique, notre recherche est centrée sur l'usage d'une antenne particulière équipant le puits de collecte au centre d'un réseau de capteurs sans fil organisé selon une topologie en étoile. Il s'agit plus précisément de coupler une antenne à faisceaux commutables avec les couches basses d'un réseau de capteurs sans fils. Ce choix nous impose de travailler en collaboration avec des enseignants chercheurs disposant d'une expertise sur de telles antennes. Ainsi, l'antenne à faisceaux commutables que nous utilisons a été développée par l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Les travaux de cette thèse ont été soutenus financièrement par la Région Auvergne

Rhône-Alpes et le *FEDER* (Fonds européen de développement régional). L'ambition de cette thèse est de contribuer sur le thème : " Architecture matérielle et protocolaire pour réseaux de capteurs sans fil adaptés à la surveillance environnementale ". Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du programme "Projets de recherche" défi AUDA au sein de l'axe Systèmes d'Information et de Communication (SIC) du LIMOS-CNRS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) de l'Université Clermont Auvergne (UCA), en collaboration avec le Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines (LRTCS) de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), sous la direction de Michel Misson et l'encadrement de Marie-Françoise Servajean et de Nadir Hakem (UQAT).

Ce manuscrit est organisé de la manière suivante. Dans le chapitre 1, nous présentons les généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et quelques standards dans le domaine. Le chapitre 2 décrit la problématique de notre thèse. Dans le chapitre 3, nous présentons globalement notre contribution et des travaux de la littérature consacrés aux protocoles MAC et de routage utilisant des antennes directionnelles. Dans le chapitre 4, nous présentons notre première contribution sur la découverte de voisinage du puits équipé d'une antenne à faisceau commutable. Le chapitre 5 détaille et évalue nos méthodes de collecte de données. Enfin, dans le chapitre 6 nous concluons nos travaux et donnons les différentes orientations offertes pour étendre la portée de cette thèse.

Chapitre 1

Contexte et état de l'art

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte dans lequel ce travail de thèse se positionne. Nous décrivons d'abord dans une première partie les réseaux de capteurs d'une manière générale et leurs caractéristiques majeures. Ensuite, nous évoquons les différentes solutions existantes pour la collecte de données et identifions les besoins non couverts. Enfin, nous dressons un inventaire des techniques utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil afin d'augmenter leur débit et celles employées pour étendre la portée de transmission des nœuds capteurs.

1.1 Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une technologie qui connaît toujours un engouement croissant dans le monde de la recherche scientifique et de l'industrie. Un RCSF est un ensemble de nœuds capteurs déployés dans une zone de captage et interconnectés afin d'accomplir une tâche particulière. On trouve ainsi des RCSF utilisés dans la surveillance environnementale pour mesurer certaines propriétés ou conditions physiques comme la température, l'humidité, le mouvement, la vibration ou la pression par exemple. Ils permettent également de transmettre les données recueillies via des liaisons sans fil à un nœud particulier (voire plusieurs), le (ou les) puits. La tâche principale d'un puits va être de se charger de la récolte de ces données. Dans un RCSF, les nœuds sont disposés selon plusieurs topologies comme le montre la figure 1.1. Nous avons la configuration en étoile (figure 1.1.a), la configuration maillée (figure 1.1.b) et enfin la configuration arborescente (figure 1.1.c). Dans la topologie en étoile, les nœuds sont tous à portée du puits, on dit alors à un saut du puits. Ceci permet à celui-ci de collecter directement les données de ces nœuds. Contrairement à la configuration en étoile, dans la topologie maillée ou en arbre, les nœuds ne sont pas tous à portée directe du puits. Dans certains cas, les données des nœuds situés en périphérie du réseau ou hors de portée du puits sont transmises à ce dernier selon une approche multi-saut via une stratégie de routage.

Comme le montre la figure 1.2, un nœud capteur est composé :

- d'une source d'énergie qui fournit l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du nœud capteur ;

Tableau 1.1 – Capacité de traitement et de stockage de certains nœuds capteurs sans fil [1]

Nœud	Processeur	Module radio	Horloge (MHz)	RAM (K)	Flash (K)	EEPROM (K)
TelosB	TI MSP430F1611	Chipcon CC2420	8	10	48	1000
MicaZ	Atmel Atmega 128L	Chipcon CC2420	8	4	128	512
IRIS	Atmel ATmega 1281	Atmel ATRF230	8	8	640	4
BT Node	Atmel ATmega 1281	ZV4002BT/ CC1000	8	4	128	4
SHIMMER	TI MSP430F1611	WML-C46A BT/ CC2420	4 - 8	10	48	-

1.2 Caractéristiques majeures des RCSF dédiés à la collecte de données

Les RCSF étant constitués de nœuds capteurs, ils sont limités par les contraintes imposées par ces derniers telles que : l'énergie, les ressources de stockage et de calcul, la portée de communication. En plus des limitations imposées par les nœuds, les RCSF sont aussi caractérisés par le type d'application visé et la zone de déploiement. Ainsi, nous distinguons une classification des RCSF par type de trafic et par type de déploiement.

1.2.1 Type de trafic

Le type de trafic peut être classifié en fonction de l'application visée, en deux grandes catégories :

a) Les trafics périodiques

Ce type de trafic est utilisé par les applications générant des données de façon régulière. Ces applications peuvent être réparties en deux groupes comme le montre le tableau 1.2 :

- Les applications qui sont sensibles au délai entre l'instant de génération de la donnée et celui de son exploitation par l'application (on parle alors de la fraîcheur des données) : il s'agit des données qui doivent être acheminées dans un délai borné. Les applications de surveillance qui doivent déduire de mesure des relations de cause à effet en font partie. Est-ce la vibration de la pièce qui a fait casser le rivet ou est-ce la brisure du rivet qui a fait vibrer la pièce ?
- Certaines applications se satisfont de données tolérantes au délai, c'est-à-dire pour lesquelles ces données peuvent être remises à l'application sans contrainte de temps particulière.

b) Les trafics asynchrones

Ce type de trafic est employé par les applications dont la génération de données est déclenchée par la survenue d'un événement. Nous pouvons citer par exemple la détection de la brisure du rivet énoncé plus haut dans une application de surveillance. Par abus de langage, on parle aussi de données aléatoires, car il est dif-

ficile d'en prévoir la prochaine occurrence. Il est possible de répartir ces applications en deux groupes comme présenté dans le tableau 1.2 : les applications qui requièrent une certaine priorité et celles qui n'ont pas de priorité recensée. Pour les applications avec priorité, les données doivent être acheminées rapidement dans toute leur intégrité et sans perte [2]. Par contre pour celles qui n'ont pas de priorité, elles sont souvent sans contrainte spécifique associée, on parle alors de «*best effort*» pour dire «on fait au mieux».

Tableau 1.2 – Classification par type de trafic [2]

Type	Contraintes	Application
Périodique	Sensible au délai	Contrôle/Commande, Contrôle industriel, surveillance
	Tolérant au délai	Monitoring
Asynchrone	Avec priorité	Alarme
	Sans priorité (best effort)	Collecte de mesures dans un processus à grande constante de temps

1.2.2 Le déploiement des nœuds capteurs

Le déploiement des nœuds capteurs dans un RCSF dédié à la collecte de données dépend de la stratégie de placement, de l'application visée ou de la zone de captage [3, 4]. Le déploiement des nœuds capteurs peut ainsi être vu selon deux approches : le déploiement statique et le déploiement dynamique. Dans cette section, nous présenterons le déploiement statique. Dans ce type de déploiement, la position des capteurs ne change pas ou presque pas durant tout le fonctionnement du réseau. Le déploiement statique peut lui-même être subdivisé selon deux modèles : le déploiement déterministe et le déploiement aléatoire.

a) Le déploiement déterministe

C'est un déploiement de nœuds capteurs utilisable dans le cas où la zone de captage est connue et accessible. Grâce à ce type de déploiement, les nœuds capteurs sont positionnés à des emplacements choisis, éventuellement avec précision à des endroits prédéterminés. C'est le cas dans une application domotique ou une application agricole, pour lesquelles des capteurs sont déployés à des endroits stratégiques pour recueillir des informations telles que la température ou pour surveiller l'apparition d'évènements critiques (incendie par exemple).

b) Le déploiement aléatoire

Le déploiement aléatoire est utilisé quand un déploiement précis n'est pas nécessaire à l'application ou lorsque la zone de captage est difficile d'accès, empêchant de placer les capteurs avec précision. Nous retrouvons ce type de déploiement pour l'observation d'une zone de conflit, ou la surveillance d'une région exposée à un risque de catastrophes naturelles (tremblement de terre, inondation, feu de forêt, ...) par exemple.

c) Le déploiement dynamique

Dans ce type de déploiement, les nœuds capteurs ne cessent de changer de position

contrairement au statique où les nœuds capteurs demeurent fixes. Le déploiement dynamique peut être associé au déploiement et déplacement de robots, de drones, d'animaux, etc. Dans ce cas, afin que le réseau fonctionne correctement, les nœuds capteurs doivent avoir la possibilité de se déplacer tout en gardant la connectivité du réseau.

1.2.3 Source de déperdition d'énergie

Dans un nœud capteur, le module radio [5] de la figure 1.2 utilisé pour l'émission et la réception de trames est très consommateur d'énergie. Le tableau 1.3 donne une idée de la consommation en énergie de quelques modules radio. Plusieurs facteurs dus aux conditions environnementales ou à la position et à l'état des nœuds peuvent influencer sur la consommation des nœuds. Nous pouvons citer la collision, l'*overhearing*, l'*idle listening* et l'*overemitting* définis ainsi :

- Une collision se produit lorsque deux ou plusieurs trames arrivent à un nœud au même moment. Ces trames ne sont généralement pas décodables car elles sont brouillées mutuellement, ceci rend les émissions correspondantes improductives. Les nœuds concernés par la collision vont dans certains cas, lorsqu'un acquittement est demandé, retransmettre leur trame. Cette retransmission va nécessiter une consommation d'énergie supplémentaire.
- Lorsqu'un nœud reçoit une trame qui ne lui est pas destinée, on parle de *Overhearing*. Le nœud consommera ainsi inutilement de l'énergie pour traiter cette trame.
- L'*Idle listening* est l'état dans lequel un nœud se met en attente d'une trame en écoutant le canal de transmission. Dans cet état, un nœud consomme une énergie comparable à celle en état de réception comme le montre le tableau 1.3.
- L'*Overemitting* arrive lorsqu'un nœud essaie de transmettre ses données à un autre nœud alors que celui-ci n'est pas disponible pour les recevoir.

Tableau 1.3 – Énergie consommée par état et par module radio [6]

État du module radio / Type de module radio	Sommeil	Écoute/Réception	Émission
TI CC1000	0,2 μ A	74 μ A - 7,4 mA	10,4 mA
TI CC2420	0,02 - 426 μ A	18,8 mA	17,4 mA
TI CC2500	400 nA - 160 μ A	13,3 - 19,6 mA	21,2 mA
TI CC2480	0,3 - 190 μ A	26,7 mA	26,9 mA
Atmel AT86RF230	20 nA	15,5 mA	16,5 mA

1.3 Domaines d'application des RCSF

Grâce à la facilité de déploiement, la capacité d'auto-configuration et de coopération, le faible coût des nœuds capteurs, les RCSF sont aujourd'hui largement utilisés dans de très nombreux domaines où des données doivent être collectées (figure 1.3). Nous pouvons citer entre autres le domaine militaire, le domaine médical, le domaine environnemental, le domaine urbain et le domaine industriel.

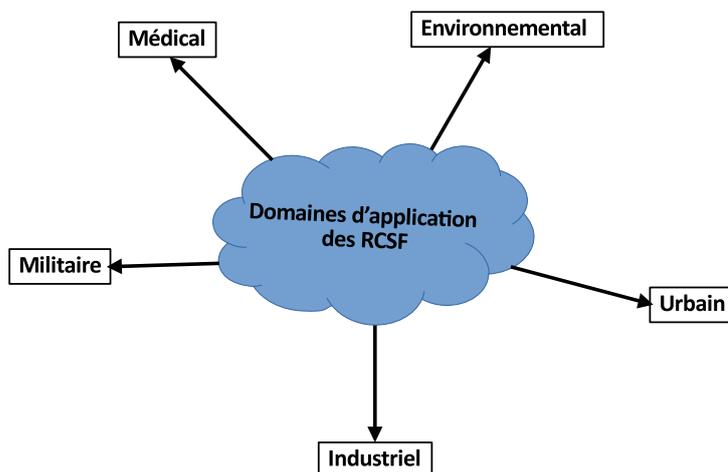


Figure 1.3 – Domaines d'application des RCSF

1.3.1 Application militaire

Le domaine militaire est non seulement le premier domaine d'activité humaine à avoir utilisé les RCSF, mais il est également considéré comme ayant motivé le lancement de la recherche sur les réseaux de capteurs. Un projet typique de recherche a été Smart Dust [7] réalisé à la fin des années 90. Son but a été de développer des nœuds capteurs qui, par leur très petite taille, soient capables d'accomplir des activités d'espionnage. Les progrès technologiques croissants dans la miniaturisation des dispositifs électroniques ont rendu les RCSF capables de soutenir diverses opérations militaires [8]. Celles-ci peuvent être catégorisées en trois groupes à savoir : la surveillance du champ de bataille [9, 10], le suivi du combat [11] et la détection d'intrus [12].

1.3.2 Application environnementale

De nos jours, les catastrophes environnementales, telles que les inondations, les incendies et les séismes semblent de plus en plus fréquentes. Elles génèrent des désastres humains et économiques si bien qu'il est important de mettre en place des systèmes d'aide à l'anticipation et à la prévention. Il en va de même au niveau du contrôle de la pollution de l'air, de l'eau ou des terres. Les applications environnementales peuvent être réparties en cinq catégories :

-
- la surveillance météorologique,
 - la surveillance géologique,
 - la surveillance de l’habitat,
 - la surveillance de la pollution et la surveillance de l’énergie.

L’utilisation des RCSF dans ces types d’applications devient de plus en plus importante et courante, améliorant ainsi l’efficacité des méthodes de contrôle [13]. Les RCSF contribuent au développement de systèmes de réponse aux risques, à la détection de catastrophes naturelles et à la gestion de l’énergie.

1.3.3 Application urbaine

La diversité des capacités de détection offertes par les RCSF permet d’obtenir une quantité et une qualité d’information plus importantes qu’auparavant dans une zone cible, qu’il s’agisse d’une chambre, d’un bâtiment ou d’un espace extérieur. Les RCSF vont être des outils pouvant aider à mesurer des caractéristiques physiques (spatiales et temporelles) de phénomènes dans un environnement urbain. Ils permettent ainsi une mise en œuvre illimitée d’applications. Les plus courantes dans ce domaine concernent les maisons intelligentes [14], les villes intelligentes [15], les systèmes de transport [16] et la surveillance de structures dans le domaine du génie civil [17].

1.3.4 Application médicale

Le progrès dans la miniaturisation des capteurs permet aussi l’utilisation des RCSF dans le secteur de la santé pour répondre aux besoins de soins : les traitements médicaux, le suivi des patients avant et après hospitalisation et les opérations de sauvetage [18]. Les réseaux de capteurs peuvent aussi aider à résoudre d’importants problèmes sociaux, comme la prise en charge de malades chroniques ou l’assistance aux personnes invalides, personnes souffrant de handicaps intellectuels et/ou physiques, le sauvetage de vies, la biosurveillance et les environnements intelligents. Les RCSF sont aussi utilisés pour surveiller des paramètres physiologiques [19]. Ils sont également utilisés, par exemple, pour surveiller les fonctions vitales de personnes âgées ou de personnes ayant des problèmes de santé, que ce soit à leur domicile ou en milieu hospitalier, pour permettre d’alerter des personnels médicaux en cas de problème. Enfin dans le domaine du sport, les RCSF sont utilisés pour analyser différentes mesures physiques collectées chez des athlètes. Les possibilités offertes par un RCSF permettent d’alléger les dispositifs de collecte de données.

1.3.5 Application industrielle

Les RCSF sont de plus en plus utilisés dans de très nombreuses applications industrielles, car ils offrent des possibilités de réductions de coûts/investissements considé-

rables et permettent de développer des fonctionnalités innovantes. Contrairement aux systèmes traditionnels dans le monde industriel qui nécessitent une quantité énorme de câbles pour l'installation de capteurs adéquats, les RCSF permettent de s'affranchir de cette contrainte. Ce gain en liberté est consolidé par des solutions plus légères particulièrement précieuses dans le domaine spatial ou aérien. Les applications des RCSF dans le domaine industriel sont liées à la logistique [20], la robotique [21], le contrôle de processus et la surveillance de l'état des machines [22] principalement.

✎ C'est dans les domaines environnementaux et industriels que la problématique traitée dans cette thèse se justifie pleinement.

1.4 Solutions dédiées à la collecte de données

Différentes solutions techniques, chacune avec ses caractéristiques, ont été imaginées pour répondre aux besoins des applications des réseaux de capteurs dans la collecte de données. Ces solutions peuvent agir sur le débit, la portée, la sécurité et le niveau de consommation d'énergie. Elles sont classées en deux grandes catégories : les solutions à moyen débit et courte portée et les solutions à faible débit et longue portée. Dans cette partie, nous présentons une liste non exhaustive de ces solutions.

1.4.1 Solutions privilégiant le débit

Nous indiquons ici des standards et technologies de communication pour réseaux de capteurs sans fil privilégiant le débit à la portée de la transmission. Beaucoup de ces solutions ont été construites autour de la norme IEEE 802.15.4 qui est spécialement conçue pour des communications sans fil à faible puissance et faible débit. En comparaison, le Wi-Fi (la norme IEEE 802.11) offre un débit de données et une portée plus élevés, mais consomme plus d'énergie, ce qui constitue un inconvénient majeur pour les réseaux de capteurs sans fil. La plupart des technologies pour les réseaux de capteurs sans fil fonctionnent dans une bande de fréquence facilement partageable comme la bande ISM (Industrial, Scientific and Medical radio band). Cette bande de fréquence a été réservée au niveau international pour permettre l'innovation en communication sans être assujettie à la notion de licence. Dans le tableau 1.5, nous présentons une comparaison de certaines technologies de communication sans fil à courte portée.

1.4.1.1 Solutions basées sur IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 [23] est une norme définie par IEEE. Ce standard a été conçu pour gérer les différents mécanismes de communication pour des réseaux sans fil de la famille des LRWPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network) caractérisés par leur faible consommation, leur faible portée et leur faible débit. La norme spécifie uniquement les deux couches les plus basses de la pile protocolaire selon le modèle OSI (Open Sys-

tems Interconnection), à savoir la couche physique (PHY) et la couche liaison incluant les sous-couches d'échange de trames et celle de contrôle d'accès au médium (MAC), comme le montre la figure 1.4. Le tableau 1.4 présente les bandes de fréquence sur lesquelles opère la couche physique du standard IEEE 802.15.4 en fonction de la réglementation dans chaque pays, ainsi que la modulation utilisée et le débit offert. La couche MAC utilise un mécanisme d'accès aléatoire de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) avec deux modes de fonctionnement : le mode suivi de beacon et le mode non suivi de beacon. Le mode suivi de beacon permet aux nœuds d'économiser de l'énergie. Un coordinateur est chargé d'envoyer périodiquement un beacon pour synchroniser l'activité des nœuds. Dans le mode non suivi de beacon, les beacons sont juste utilisés dans la phase de découverte du réseau.

Les couches supérieures et les sous-couches d'interopérabilité de la pile protocolaire sont définies séparément par d'autres architectures telles que ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART et ISA100.11a.

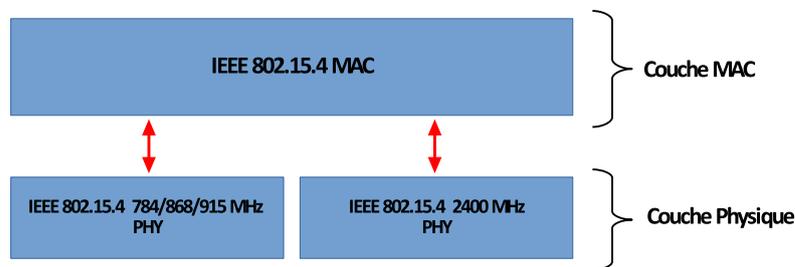


Figure 1.4 – La pile protocolaire IEEE 802.15.4

Tableau 1.4 – Bandes de fréquences utilisables par IEEE 802.15.4

Bande (MHz)	Plage de fréquence (MHz)	Disponibilité	Modulation	Débit max théorique (kbit/s)
750	779-787	Chine	O-QPSK	250
	779-787	Chine	MPSK	250
868	868-868.6	Europe	BPSK	20
915	902-928	Amériques et Australie	BPSK	40
950	950-956	Japon	GFSK	100
	950-956	Japon	BPSK	20
2400	2400-2483,5	Disponible partout	O-QPSK	250

1.4.1.1.1 ZigBee

ZigBee [24] est une technologie de communication sans fil à faible coût et à faible consommation d'énergie développée par la ZigBee Alliance et utilisée dans les applications domotiques et pour les réseaux industriels de contrôle et de télémessure. ZigBee supporte plusieurs topologies (étoile, maillée et pair-à-pair) et adopte les couches PHY et MAC de la norme IEEE 802.15.4 comme partie intégrante. ZigBee ne définit que les couches réseau et application comme illustré par la figure 1.5.

Le standard ZigBee définit trois types de nœud : le coordinateur ZigBee, le routeur et le terminal final. Chaque réseau ZigBee doit être composé d'un coordinateur qui agit

comme un point de collecte et de stockage des données transmises par les terminaux finaux. Le routeur ZigBee agit comme un intermédiaire entre le coordinateur et les terminaux finaux, ce qui permet de faire circuler le trafic du réseau du coordinateur vers les terminaux finaux ou de ces derniers vers le coordinateur comme le montre la figure 1.6.

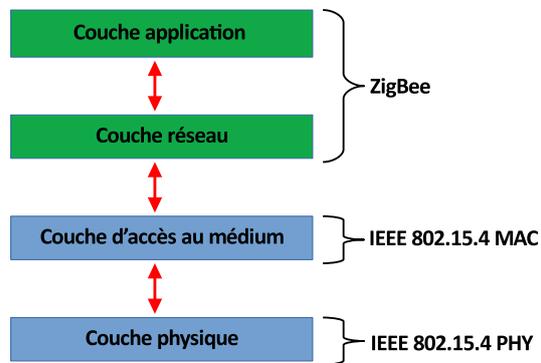


Figure 1.5 – Couches protocolaires de ZigBee

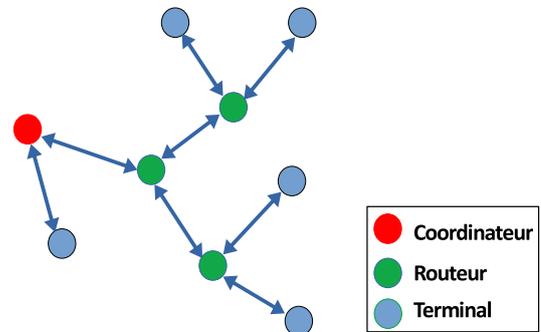


Figure 1.6 – Réseau Zigbee

1.4.1.1.2 6LoWPAN

Le standard 6LoWPAN [25] a été défini dans RFC-4944 par l'IETF (Internet Engineering Task Force). 6LoWPAN définit les mécanismes d'encapsulation et de compression d'en-têtes permettant de transmettre et de recevoir des paquets IPv6 sur des liaisons IEEE 802.15.4 et assure l'interopérabilité avec d'autres dispositifs IP (voir figure 1.8). Le standard 6LoWPAN, tout comme ZigBee adopte la couche physique et la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 (figure 1.7). Il fournit une couche d'adaptation, un nouveau format de paquet et une gestion des adresses pour permettre aux nœuds 6LoWPAN de bénéficier de tous les avantages de la communication et de la gestion IP. Comme la taille des paquets IPv6 est beaucoup plus grande que celle des trames IEEE 802.15.4, une couche d'adaptation est introduite entre la couche MAC et la couche réseau pour optimiser IPv6 sur IEEE 802.15.4. La couche d'adaptation fournit des mécanismes pour la compression, la fragmentation et le réassemblage de l'en-tête des paquets IPv6.

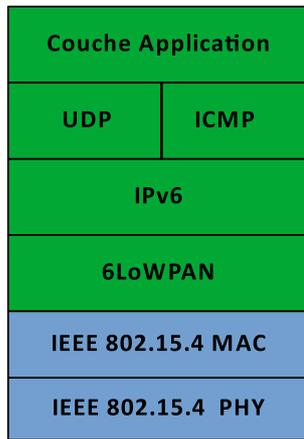


Figure 1.7 – Pile protocolaire de 6LoWPAN

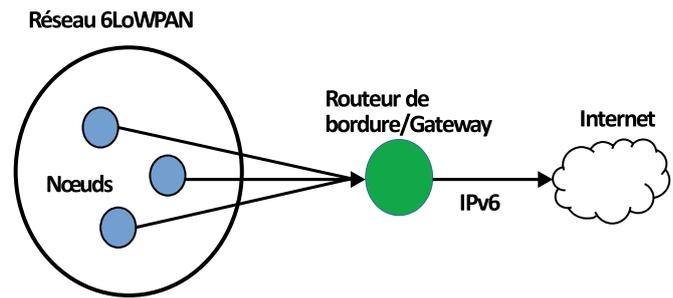


Figure 1.8 – Vue d'ensemble d'un réseau 6LoWPAN

1.4.1.1.3 WirelessHART

WirelessHART [26] est un standard de communication sans fil adapté aux applications industrielles telles que le contrôle de processus. WirelessHART est basé sur le protocole HART. Il utilise la couche physique de IEEE 802.15.4 et définit les autres couches du modèle OSI comme le montre la figure 1.9. Pour respecter certaines exigences des applications industrielles, WirelessHART utilise une approche d'accès au médium basée sur le TDMA, où un slot de temps est de 10 ms. De plus, il emploie le mécanisme de saut de fréquence FHSS pour éviter les interférences avec d'autres réseaux sans fil utilisant la même bande de fréquence. Enfin, il utilise un gestionnaire de réseau central (*network manager* en figure 1.10) qui est responsable de la configuration du réseau, de la planification et de la gestion de la communication entre les dispositifs WirelessHART.

Les principales caractéristiques sont la fiabilité, la sécurité, l'efficacité énergétique, la compatibilité avec les appareils existants. Ce standard supporte les réseaux maillés et en étoile.

1.4.1.1.4 ISA100.11a

ISA100.11a [28] est un standard qui utilise la couche physique de l'IEEE 802.15.4 et fournit les couches MAC, réseau et application (voir figure 1.11). Il est développé par l'ISA et a été spécialement conçu pour répondre aux besoins des applications industrielles. Il prend en charge diverses topologies de réseau, telles que les topologies en étoile et maillées. L'une des principales caractéristiques de la norme ISA100.11a est la faible latence. Il utilise uniquement la bande ISM de 2,4 GHz. Tout comme WirelessHART, il emploie un accès au médium basé sur le TDMA et le saut de fréquence pour accroître la fiabilité et prévenir l'interférence avec d'autres réseaux sans fil utilisant la même bande de fréquence. Cependant, contrairement à WirelessHART, le slot

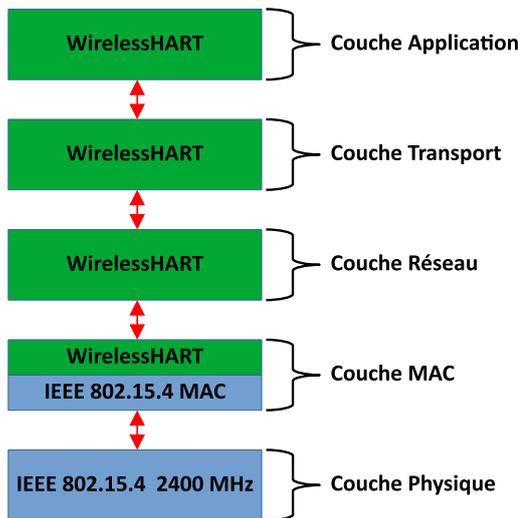


Figure 1.9 – Pile protocolaire de WirelessHART

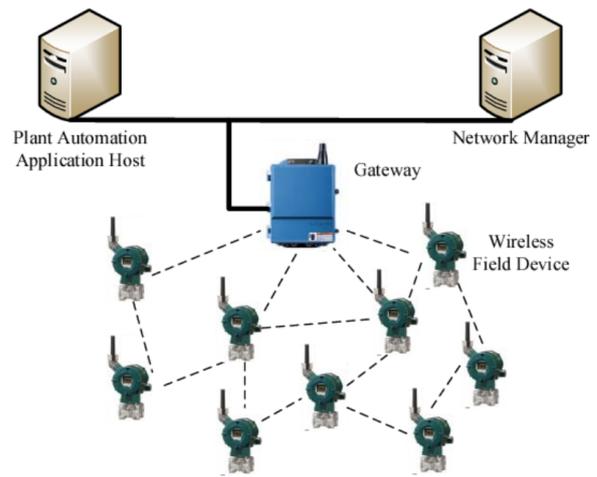


Figure 1.10 – Réseau générique WirelessHART [27]

de temps employé dans ISA100.11a est flexible et configurable par l'utilisateur. La durée de chaque slot de temps varie généralement de 10 à 14 ms. De plus, à la différence de WirelessHART qui définit ses propres couches réseau et de transport, ISA100.11a est basé sur 6LoWPAN. Ceci fait d'ISA100.11a une solution compatible avec IPv6.

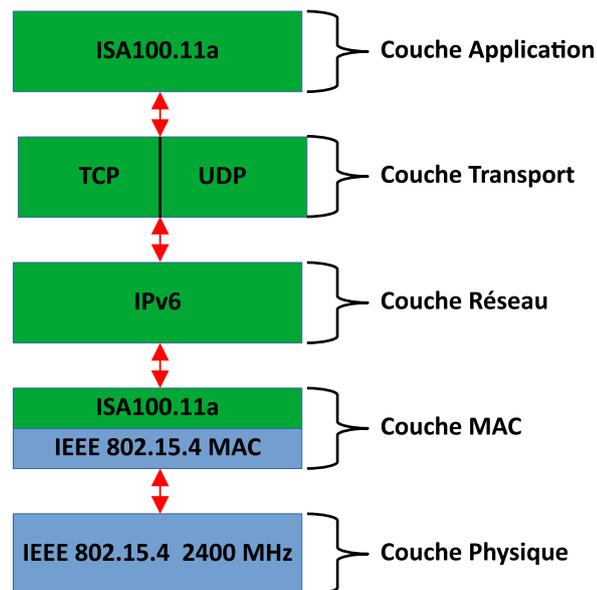


Figure 1.11 – Pile protocolaire de ISA100.11a

1.4.1.2 Autres solutions

Afin de répondre aux besoins croissants des applications des réseaux de capteurs sans fil pour la collecte de données, beaucoup d'autres technologies ont été proposées pour concurrencer celles basées sur le standard IEEE 802.15.4. Nous présentons ici quelques unes d'entre elles.

1.4.1.2.1 Bluetooth

Bluetooth [29] est une norme technologique sans fil à courte portée définie par l'IEEE 802.15.1. Elle est utilisée pour échanger des données entre des dispositifs fixes et mobiles sur de courtes distances en utilisant des ondes radio UHF dans la bande ISM de 2,402 GHz à 2,480 GHz. Bluetooth permet de former des réseaux personnels et est idéalement destiné à remplacer les communications filaires à courte portée (bus et réseaux de terrain). Un réseau Bluetooth appelé piconet est composé d'un nœud maître et de nœuds esclaves. Le maître est chargé d'orchestrer les échanges des esclaves en suivant une politique basée sur le round-robin. Un piconet peut supporter au maximum sept nœuds esclaves actifs simultanément. Pour couvrir plus de nœuds et de surface, plusieurs piconets peuvent être reliés par un nœud esclave qui va jouer le rôle de pont comme le montre la figure 1.12. Afin d'éviter les interférences avec d'autres technologies utilisant la même fréquence (2,4 GHz), le Bluetooth emploie le mécanisme de saut de fréquence FHSS. Le maître du piconet décide de la séquence de saut de fréquence et tous les nœuds esclaves doivent se synchroniser sur cette séquence.

Bluetooth trouve ses utilisations dans de nombreuses applications quotidiennes. Il permet de connecter des accessoires sans fil à un smartphone ou une tablette faisant office de passerelle. Quelques exemples d'applications du Bluetooth sont :

- l'ouverture automatisée d'une porte de garage commandée depuis un téléphone [30];
- l'utilisation d'un moniteur de fréquence cardiaque pour suivre les battements de cœur [31] d'un patient depuis une montre connectée, mais aussi pour envoyer ces enregistrements à une application de santé installée sur le smartphone dudit patient, le téléphone pouvant lui-même être connecté à une borne de surveillance.

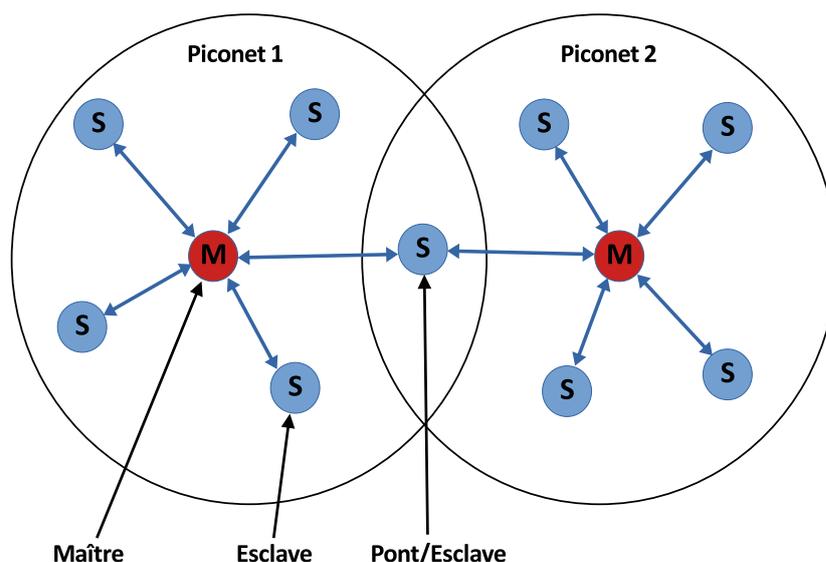


Figure 1.12 – Réseau Bluetooth de type scatternet

1.4.1.2.2 Z-Wave

Le standard de communication Z-Wave [32] a été conçu spécifiquement pour les applications de contrôle de l'habitat. Les spécifications des couches PHY et MAC de Z-Wave sont définies dans la norme ITU-T G.9959. Ce type de réseaux a été développé par Zensys [33] et est actuellement soutenue par la Z-Wave Alliance. L'un des avantages de Z-Wave par rapport à la norme IEEE 802.15.4 est qu'il fonctionne dans la bande de fréquence inférieure à 1 GHz. L'utilisation de cette bande permet à Z-Wave d'être moins sujet aux interférences provenant du Wi-Fi et d'autres technologies sans fil (Bluetooth, ZigBee, etc.) dans la gamme 2,4 GHz. En Europe, la bande 868 MHz utilisée par Z-Wave est limitée par la réglementation européenne pour fonctionner selon un cycle d'activité (*duty cycle*) de 1% ou moins. La technologie Z-Wave prend en charge les réseaux maillés, des débits de données de 9,6 kbit/s et 40 kbit/s et une portée extérieure maximale de 30 m. Le réseau Z-Wave se compose de contrôleurs (un contrôleur principal et un ou plusieurs contrôleurs secondaires) et de nœuds esclaves (figure 1.13). Les contrôleurs sont les nœuds du réseau Z-Wave qui gèrent les commandes de contrôle dans le réseau. Les nœuds esclaves sont les nœuds qui répondent à la commande reçue pour l'exécuter. L'accès au médium des nœuds esclaves est basé sur le mécanisme d'écoute du canal avant transmission. Si le canal est occupé, le nœud utilise un algorithme de backoff aléatoire entre les tentatives de transmission. Les nœuds esclaves peuvent transmettre également les commandes reçues aux autres nœuds du réseau. Cela permet au contrôleur d'établir une communication avec les nœuds qui ne sont pas à portée.

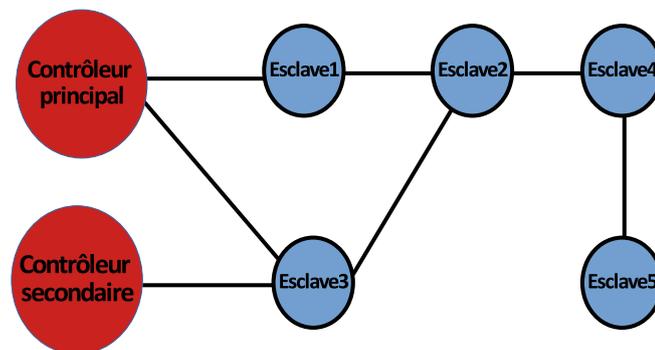


Figure 1.13 – Réseau Z-Wave

1.4.1.2.3 ANT

ANT ou ANT+ [34] est un standard de communication sans fil propriétaire, opérant dans la bande ISM de 2,4 GHz conçu et commercialisé par Dynastream Innovations Inc. Il couvre une large gamme de champs d'applications tels que : la santé, le sport, l'industrie ou la domotique et peut atteindre des débits de 1 Mbit/s et une portée

extérieure maximale de 30 m. ANT définit les couches physique, liaison de données, réseau et transport du modèle OSI (figure 1.14).

ANT définit deux types de nœuds (figure 1.15.a) :

- Le nœud maître, l’initiateur de la communication, est le responsable du contrôle des canaux et l’émetteur des données (l’émetteur primaire). Sa fenêtre de réception est utilisée pour assurer la coexistence de plusieurs maîtres dans le même réseau avec la même fréquence et pour recevoir les données des esclaves ou d’autres maîtres.
- Le nœud esclave est le récepteur primaire d’une trame provenant du maître et est responsable de la synchronisation avec le maître.

De plus dans ANT, un nœud peut jouer les deux rôles (maître et esclave) à la fois comme le montre la figure 1.15.b, ceci permet ainsi à ANT de supporter des topologies complexes.

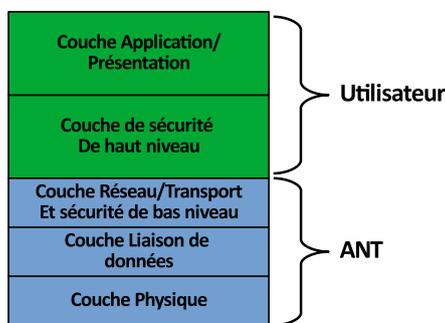


Figure 1.14 – Couche protocolaire de ANT

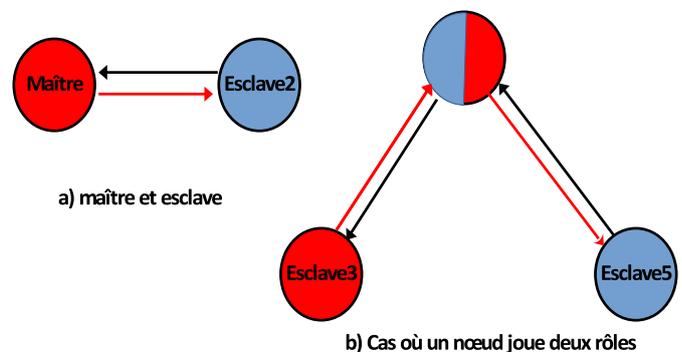


Figure 1.15 – Différents rôles d’un nœud ANT [35]

1.4.1.2.4 EnOcean

EnOcean [36] est un standard de communication sans fil émergent dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil et promu par l’EnOcean Alliance. C’est un standard ouvert normalisé ISO/IEC 14543-3-10, également connu sous le nom de Wireless Short Protocol (WSP). Il est optimisé pour les solutions à très faible consommation d’énergie et la collecte d’énergie. Contrairement aux autres technologies, les nœuds EnOcean n’utilisent pas de batterie mais utilisent plutôt l’énergie de l’environnement immédiat grâce à des supports de collecte d’énergie comme les panneaux solaires. Il opère dans les fréquences autour de 315 MHz et 868 MHz et supporte une portée de transmission allant jusqu’à 30 m à l’intérieur et 300 m à l’extérieur. L’accès au médium dans un réseau EnOcean est basé sur le mécanisme d’écoute de canal avant transmission. Si le canal est occupé, le nœud utilise un algorithme de backoff aléatoire entre les tentatives de transmission. Les nœuds EnOcean sont particulièrement utiles pour les applications à courte portée et moins gourmandes en données, par exemple, les systèmes de verrouillage de porte dans les bâtiments. Nous avons là une solution moyenne portée et faible débit.

Tableau 1.5 – Comparaison de différentes technologies à courte portée

Technologie	Fréquence	Débit max	Portée
ZigBee	868/915 MHz 2,4 GHz	250 kbit/s	10 m - 100 m
6LoWPAN	868/915 MHz 2,4 GHz	250 kbit/s	10 m - 100 m
WirelessHART	2,4 GHz	250 kbit/s	10 m - 100 m
ISA100.11a	2,4 GHz	250 kbit/s	100 m
Z-wave	Sub 1 GHz	40 kbit/s	30 m
ANT	2,4 GHz	1 Mbit/s	30 m
Bluetooth	2,4 GHz	2,1 Mbit/s	10 m - 100 m
EnOcean	315/868 MHz	125 kbit/s	300 m

1.4.2 Solutions privilégiant la portée

Nous présentons ici des technologies de communication pour réseaux sans fil communément nommés LPWAN et privilégiant la portée de la transmission par rapport au débit. Ces solutions offrent des distances de transmission d'un à plusieurs kilomètres et des possibilités de communication à très basse consommation d'énergie. Dans le tableau 1.6, nous présentons une comparaison de certaines de ces technologies. Il est à noter que dans cette section, nous n'aborderons pas des solutions utilisant une infrastructure d'opérateurs de la téléphonie mobile telles que : LTE-MTC, NB-IoT, 5G par exemple.

1.4.2.1 Wavenis

Wavenis [37] est un standard de technologie sans fil à très faible puissance et longue portée développée par Coronis et actuellement promu par la Wavenis Open Standard Alliance. Ce type de réseau est utilisé dans la télémétrie, l'automatisation industrielle, la surveillance à distance des compteurs de services publics, la santé à domicile, le contrôle d'accès et la surveillance de la chaîne du froid. Le standard Wavenis définit les couches physique, liaison de données et réseau, et permet aux utilisateurs d'accéder aux services offerts par Wavenis grâce à l'interface HCI (Host Controller Interface) (voir figure 1.16). Il opère dans les bandes ISM 433, 868 et 915 MHz et ses débits de données sont programmables, de 4,8 kbit/s à 100 kbit/s. La plupart des applications Wavenis communiquent à 19,2 kbit/s. Wavenis utilise le mécanisme FHSS pour réduire l'effet des interférences avec d'autres technologies. La couche MAC de Wavenis fournit une méthode synchronisée et une non synchronisée :

- Dans le cas d'un accès synchronisé, les nœuds emploient un mécanisme combinant le CSMA et le TDMA (que nous détaillerons au chapitre suivant). Dans ce cas, un nœud choisit un slot de temps qui est calculé de manière pseudo-aléatoire, en fonction de son adresse. Avant de transmettre dans ce slot, le nœud vérifie la disponibilité du médium de transmission. Si le médium n'est pas libre, le nœud choisit

un nouveau slot.

— Dans le cas non synchronisé, les nœuds utilisent le CSMA/CA.

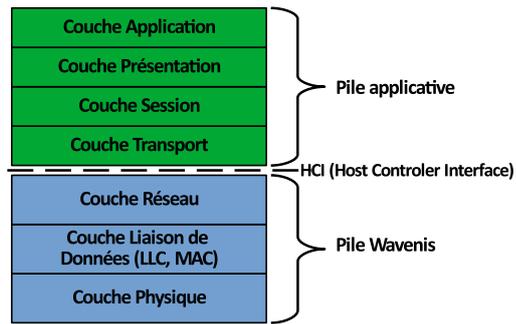


Figure 1.16 – Couche protocolaire Wavenis

1.4.2.2 Dash7

Dash7 [38] est un standard de technologie ouvert pour les réseaux de capteurs sans fil à très faible consommation d'énergie et à longue portée. Il est basé sur la norme ouverte ISO 18000-7 et opère dans la bande ISM 433 MHz, 868 MHz et 915 MHz avec des débits respectifs de 9,6 kbit/s, 55,555 kbit/s, et 166,667 kbit/s. Les principales caractéristiques de ce standard sont une autonomie de batterie de plusieurs années, une portée de communication allant jusqu'à 2 km. Ce type de réseau est utilisé dans plusieurs domaines d'application tels que : la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la gestion des stocks, la surveillance des matières dangereuses, les services avancés de localisation, le compteur intelligent et l'automatisation des bâtiments.

Comme le montre la figure 1.17, un réseau Dash7 se compose d'une passerelle et de terminaux finaux et peut éventuellement contenir des sous-contrôleurs. Une passerelle est un dispositif capable d'écouter en permanence les paquets et de connecter un ou plusieurs réseaux Dash7 à un autre type de réseau, comme internet par exemple. Un terminal final est un simple dispositif (capteur, actionneur) qui transmet ou reçoit des informations. Il est conçu pour consommer moins d'énergie et dormir la plupart du temps. Le sous-contrôleur est similaire à un terminal final et peut être utilisé comme un relais pour les messages entre un terminal final et une passerelle.

1.4.2.3 LoRaWAN

LoRaWAN [39] est un standard ouvert de communication sans fil à bas débit et à faible consommation d'énergie. Il utilise la couche physique LoRa [40] qui emploie une modulation à étalement de spectre de type CSS [18] (Chirp Spread Spectrum). Cette technique d'étalement consiste à coder un symbole sur une séquence de bits plus longue, ce qui agit sur le rapport signal/bruit et réduit les interférences. Ce qui est nécessaire au récepteur pour une réception correcte, sans modifier la largeur de bande de fréquence du signal sans fil. La longueur du code d'étalement peut être modifiée,

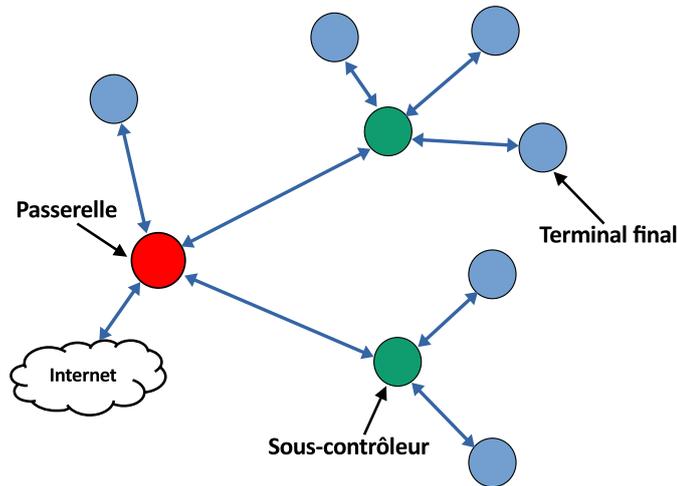


Figure 1.17 – Réseau Dash7

ce qui permet de fournir des débits de données variables et de faire un compromis entre le débit et la portée ou la couverture. Plus le facteur d'étalement est grand plus la portée ou la couverture est grande au détriment du débit.

LoRa opère sur bandes ISM 433, 868 et 915 MHz et permet d'atteindre des portées de transmission de l'ordre de 5 km en zone urbaine et 30 km en zone rurale. Par contre, il offre de faibles débits compris entre 250 bit/s à 50 kbit/s. Un réseau LoRaWAN est disposé en topologie en étoile, dans laquelle une passerelle (*Gateway*) joue le rôle de relais entre le serveur réseau et les nœuds capteurs comme le montre la figure 1.18. La passerelle est connectée au serveur réseau via une liaison IP (3G, Ethernet, Wi-Fi ...). Le serveur réseau est la partie la plus intelligente du réseau LoRaWAN, il est responsable du monitoring des passerelles et des nœuds capteurs, de l'agrégation des messages venant des nœuds, du routage ou du transfert des messages venant des nœuds vers un serveur d'application donné.

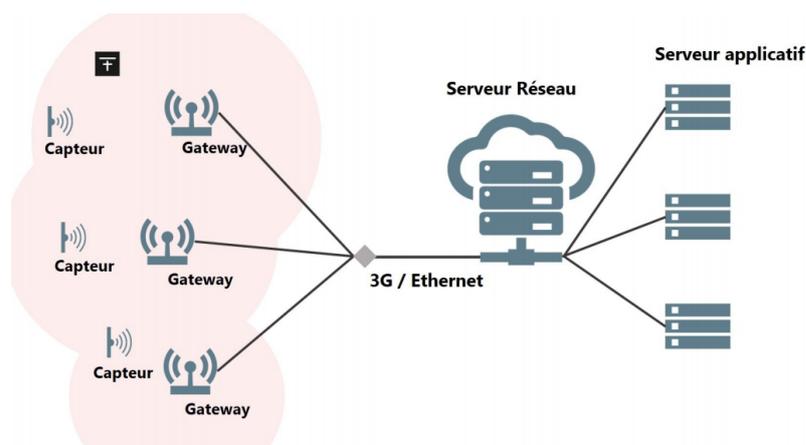


Figure 1.18 – Réseau LoRaWAN

1.4.2.4 Sigfox

Sigfox [41] est un standard de technologie de communication sans fil propriétaire basée sur la technique radio UNB (Ultra Narrow Band). Il opère dans les bandes ISM de 433, 868 et 915 MHz et utilise une modulation DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying) robuste pour les communications à longue portée, et offrant une transmission de données à très faible débit (100 bit/s). Sigfox est basé sur une topologie réseau en étoile pour couvrir une large zone avec un nombre massif de nœuds capteurs utilisant une seule station de base (figure 1.19) et offre des communications à très longue portée soit 10 km en zone urbaine et 50 km en zone rurale. En dépit du nombre considérable de nœuds capteurs pris en charge, Sigfox utilise ALOHA de base comme méthode d'accès et ne met pas en œuvre le processus d'accusé de réception ni aucun mécanisme d'évitement des collisions, ce qui peut réduire le débit du réseau dû aux collisions possibles. Afin d'atténuer l'effet des collisions sur le réseau, Sigfox emploie un mécanisme de saut de fréquence et une approche consistant à envoyer de multiples copies de chaque message. Chaque nœud capteur envoie trois copies identiques de chaque message transmis sur trois canaux différents choisis au hasard. Cela augmente la probabilité de réussite de la transmission et améliore la fiabilité du système.

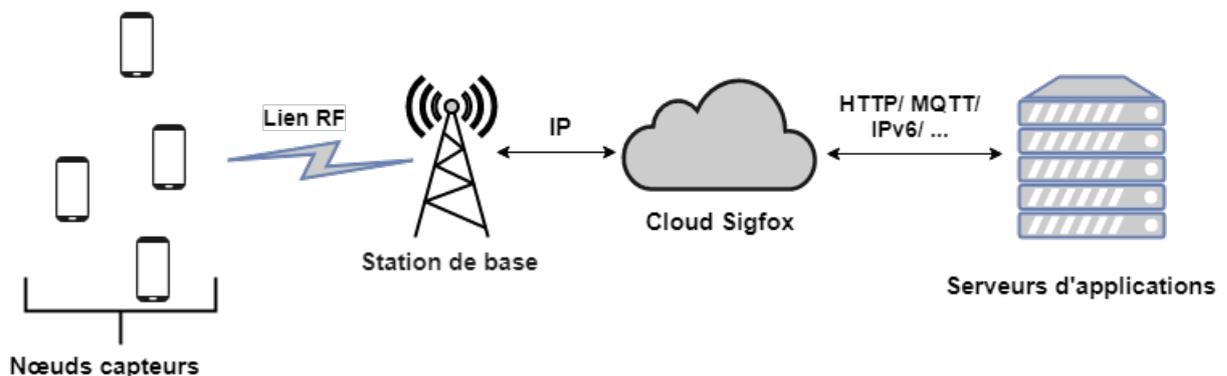


Figure 1.19 – Architecture réseau Sigfox

Tableau 1.6 – Comparaison de différentes technologies à longue portée

Technologie	Fréquence	Débit max	Portée
Wavenis	868 et 915 MHz	100 kbit/s	1 – 4 km
Dash7	433, 868 et 915 MHz	167 kbit/s	2 km
LoRaWAN	433, 868 et 915 MHz	50 kbit/s	5 – 30 km
Sigfox	433, 868 et 915 MHz	100 bit/s	10 – 40 km

1.5 Identification d'une classe de besoins non couverts

En observant la figure 1.20, on constate que les solutions LPWAN telles que LoRaWAN et Sigfox permettent d'atteindre des portées de transmission plus élevées par rapport aux solutions basées sur la norme IEEE 802.15.4, par contre ces solutions

offrent comparativement moins de débit. L'idée est de trouver une solution qui permette de transmettre avec les mêmes débits que celui permis par le standard IEEE 802.15.4 (250 kbit/s) et d'avoir des portées de transmission moyennes de l'ordre de 200 m à 1 km. Une telle solution permettrait de couvrir des espaces comparables à un terrain de foot sans avoir besoin de déployer plusieurs nœuds relais ou routeurs (à portée limitée) pour assurer la couverture. Le sujet de cette thèse participe à trouver une solution pour combler ce vide.

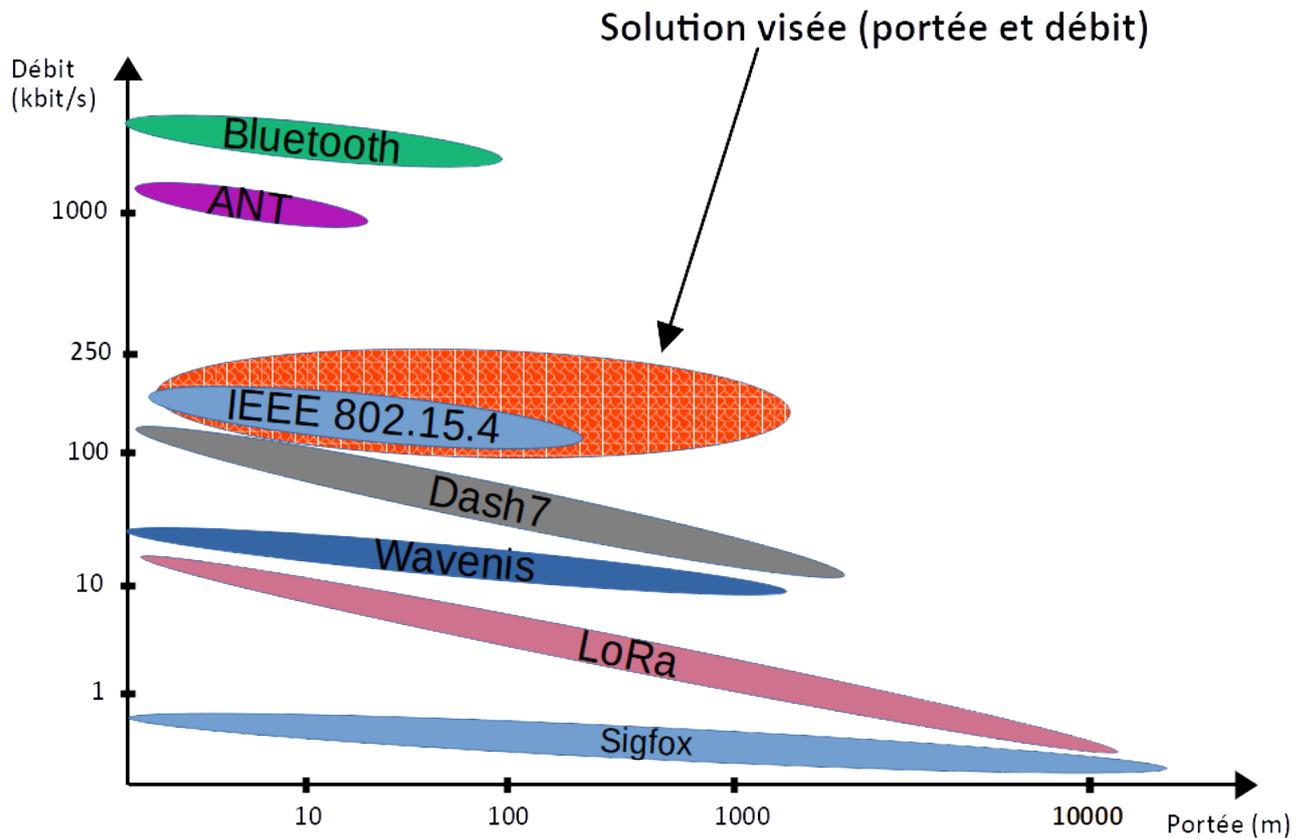


Figure 1.20 – Portée vs Débit des principales technologies de réseaux de collecte de données

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les généralités des réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et quelques exemples de leurs domaines d'application. Ensuite, nous avons présenté différentes solutions standardisées pour les RCSF et nous nous sommes intéressés plus particulièrement à celles dédiées à la collecte de données. Celles-ci peuvent être réparties en deux grandes catégories, à savoir les solutions privilégiant le débit à la portée de transmission, et celles mettant l'accent sur la portée au détriment du débit. A ce jour nous n'avons pas une couverture complète des besoins applicatifs car chacune de ces catégories répond à des besoins précis mais très différents.

La problématique de cette thèse est de pouvoir garantir à la fois débit et portée de transmission. Dans le chapitre suivant, nous allons préciser notre problématique.

Chapitre 2

Analyse de la problématique de la thèse

Dans ce chapitre, nous présentons la problématique de notre travail de thèse et le contexte dans lequel nous nous situons. Nous présentons également les leviers sur lesquels nous allons pouvoir nous appuyer pour proposer dans le chapitre suivant des orientations de solutions.

2.1 Contexte de notre recherche

La problématique étudiée dans ce travail consiste à concevoir une solution de communication robuste pour des classes d'applications de collecte de données dans le domaine environnemental ou industriel et pour lesquelles différentes contraintes doivent être respectées. La première concerne le délai de validité des données collectées, celles-ci pouvant être critiques. La seconde porte sur la zone de déploiement qui peut être vaste, mais surtout être dans des environnements confinés pouvant être eux-mêmes contraints par leur structure, leur forme, leur surface ou leur profondeur (mines, forêts...).

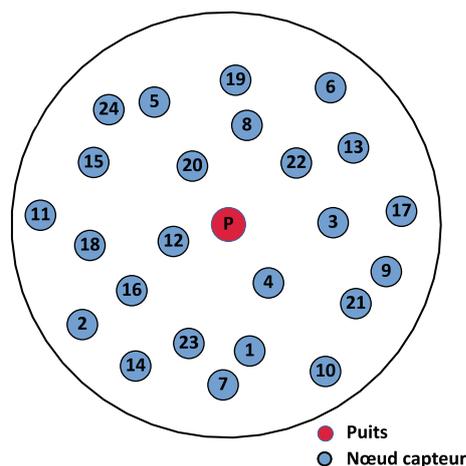


Figure 2.1 – Disposition générique des nœuds du type de réseau étudié

2.1.1 Invariants relatifs à la classe d'applications étudiées

Nous présentons d'abord quels sont les invariants attachés à la classe d'applications sur laquelle nous avons à travailler :

a) **Zone de captage**

Nous considérons une zone de captage étendue de l'ordre de centaines de m².

b) **Type de réseau**

Le réseau est constitué d'une vingtaine à une cinquantaine de nœuds capteurs déployés autour d'un puits. Celui-ci est chargé de la collecte des mesures produites par les nœuds capteurs. Il est placé dans la partie centrale de la zone équipée de nœuds comme le montre la figure 2.1. La disposition des nœuds présentée (ici 24 nœuds) nous servira de référence tout au long de ce travail. La distance entre le puits et chacun de ces nœuds capteurs est de l'ordre de quelques centaines de mètres (jusqu'à 1000 m par exemple). Nous faisons l'hypothèse que le nombre de nœuds est constant et connu du puits.

c) **Production des données**

Les nœuds capteurs produisent des données (mesures, évènements, ...) avec une fréquence précise et *a priori* constante, par exemple 1 mesure/10 ms, 1 mesure/100 ms. La taille des informations produites peut être de quelques octets (1 ou 3 octets typiquement). Ces informations sont issues de la zone surveillée (zone de captage). Certaines données produites nécessitent d'être transmises très rapidement afin d'assurer leur fraîcheur ou leur validité. Elles doivent être acheminées au puits avant un certain délai (des exemples de délai sont donnés dans le tableau 2.1).

d) **Débit escompté**

Nous envisageons de transmettre les données avec des débits permis par les technologies existantes; comme le débit instantané de 250 kbit/s permis par les composants conformes à la norme IEEE 802.15.4 sur la bande de fréquence 2,4 GHz.

Tableau 2.1 – Exemple d'exigences typiques des réseaux industriels de capteurs sans fil [42]

Domaine d'application	Délai
Monitoring et supervision	>500 ms
Systèmes de commande et de régulation	10 - 500 ms
Systèmes de contrôle commande	10 - 250 ms

2.1.2 Exemple d'application

Un exemple typique d'application industrielle est donné en [43], où des nœuds capteurs sans fil ont été employés pour surveiller l'état d'un lanceur de fusée en faisant des mesures périodiques sur ce dernier. Plusieurs types de nœuds sont utilisés avec pour chaque type une fréquence d'échantillonnage précise : les nœuds LR (Low Rate), les nœuds HR (High Rate) et les nœuds VHR (Very High Rate) qui font respectivement 5 mesures/s, 400 mesures/s et 4000 mesures/s. Les mesures ont une taille de 1 octet et doivent être envoyées dans un délai de 200 ms au puits. La taille des données envoyées varie en fonction du nombre de mesures agrégées (voir section 2.3.1.2).

2.1.3 Limites des solutions existantes

Une application avec des contraintes en débit et en fraîcheur des données nécessite que les données soient livrées le plus tôt possible ou au moins dans un délai de transmission borné. Cette contrainte temporelle sur les données mesurées agit sur la longueur des trames envoyées par les nœuds capteurs, comme cela sera montré quand nous parlerons d'agrégation (section 2.2.1.2). Elles sont pour la plupart du temps des trames courtes et cela a une incidence sur le débit utile du réseau [44].

Les mécanismes aléatoires d'accès au médium tels que le CSMA/CA et l'ALOHA ne seront pas retenus car leur nature aléatoire ne permet pas de satisfaire des contraintes temporelles très fortes quand la charge offerte au réseau devient élevée. De plus, le CSMA/CA est sujet à collisions lorsque le nombre de nœuds voulant transmettre augmente, ce qui peut dégrader les performances du réseau. D'autre part, le CSMA/CA de la norme IEEE 802.15.4 n'intègre pas de mécanisme de réservation du canal (RTS/CTS). Cela peut sérieusement affecter le CSMA/CA en raison des problèmes de terminaux cachés et de terminaux sourds qui peuvent augmenter le risque de collision dans le réseau. Il est aussi montré que l'utilisation du CSMA/CA avec des trames courtes provoque la dégradation des performances du réseau en termes de débit et d'utilisation du canal [45]. En observant la figure 2.2, nous constatons que plus la taille des paquets est petite plus le débit utile du réseau est faible.

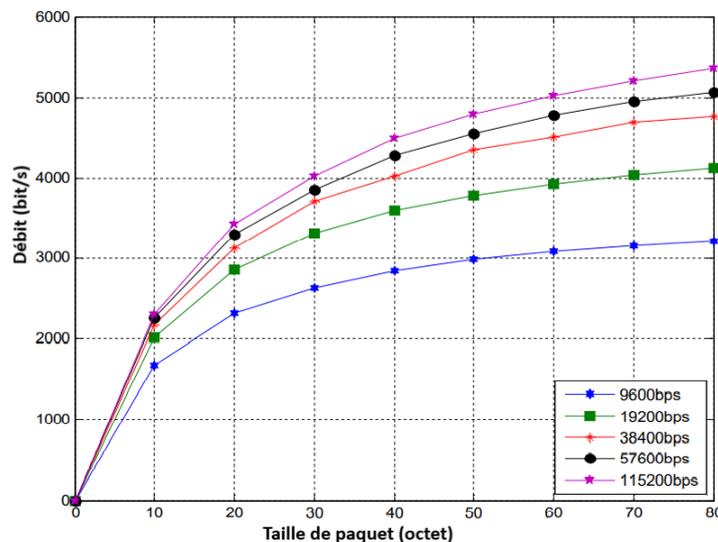


Figure 2.2 – Résultats des mesures de débit pour un réseau ZigBee point à point (250 kbit/s) pour des vitesses de transmission (bauds) et longueurs de paquet différentes [46]

Le mécanisme d'accès pour garantir des délais impartis consiste à orchestrer la transmission des nœuds capteurs en accordant à chacun un créneau ou slot de temps pour envoyer leurs données. Cette orchestration des communications nécessite une entité centrale, le puits dans cette thèse, qui se charge de désigner le nœud capteur qui aura la parole pour un temps donné. Ce point très important sera détaillé à partir du

chapitre 5.

Le tableau 2.2 présente un résumé comparatif de quelques solutions recensées dédiées à la collecte de données en fonction des caractéristiques qu'elles offrent en matière de portée de transmission, de débit, de latence et déterminisme. Chacune des solutions répond à un besoin précis et nous pouvons constater que :

(i) Les solutions telles que Z-Wave et EnOcean ne permettent pas de répondre à notre problématique, ni en débit offert ni en portée couverte.

(ii) Certaines de ces solutions permettent d'obtenir des débits instantanés élevés telles que WirelessHART, ISA100.11a et Bluetooth. De plus elles offrent des transmissions déterministes et emploient un mécanisme de saut de fréquence FHSS afin de réduire l'effet des interférences avec d'autres technologies travaillant dans la même bande de fréquence (2,4 GHz). Cependant, toutes ces solutions bien qu'offrant des débits élevés ne permettent pas de couvrir de larges zones de captage. D'autre part WirelessHART et ISA100.11a ne sont pas des solutions libres, elles sont donc difficilement modifiables. Bluetooth de son côté supporte peu de nœuds capteurs (1 maître et 7 esclaves actifs simultanément dans un piconet). Nous pouvons citer comme solution avec un débit instantané élevé, ANT qui permet aussi des transmissions déterministes, mais tout comme WirelessHART et ISA100.11a, ANT est une solution propriétaire donc difficilement modifiable. Concernant ANT, notons que cette solution ne supporte que des paquets de 8 octets [47]. Ceci peut avoir un effet sur le débit du réseau comme le montre la figure 2.2.

(iii) D'autres solutions telles que LoRa, Sigfox et Dash7 offrent une large couverture de transmission grâce à l'utilisation d'une bande de fréquences de moins de 1 GHz et/ou des techniques de modulation qui permettent de réduire le rapport signal/bruit et les interférences, conditions nécessaires au récepteur pour une réception correcte. Néanmoins, la limitation de leur temps d'activité (*duty cycle*) à 1% ou 0,1% rend ces solutions moins adaptables pour des applications RCSF qui nécessitent des exigences au niveau du temps (tableau 2.1) et sur la quantité des échantillons à envoyer. Par exemple, Sigfox supporte un débit de données de 10 à 1 000 bit/s et une longueur de message de 12 octets, un nœud capteur peut envoyer au maximum 140 messages par jour [48].

 L'objectif fondamental de cette thèse est de proposer une solution robuste et déterministe offrant des débits permis par les composants disponibles (comme ceux du standard IEEE 802.15.4). Cette solution devra aussi couvrir une zone de captage étendue. Nous allons privilégier des mécanismes qui permettent de disposer de nouvelles valeurs pour le couple (portée, débit). Deux autres paramètres : la consommation d'énergie et l'encombrement (le volume de l'antenne) de la solution seront repris dans nos perspectives. Les protocoles proposés sont compatibles avec l'usage d'un réveil cyclique des nœuds et l'encombrement induit par le puits équipé de son antenne est un problème pris en charge dans le cadre d'un partenariat.

Le fait que la collecte de données doit être réalisée à partir de nœuds capteurs en charge de paramètres à mesurer très différents et produits par des fournisseurs divers représente une contrainte forte attachée à ce sujet de thèse. Celle-ci nous conduit à retenir deux positions de principe qui sont :

- Le choix d'une des normes ayant fait la preuve de sa pérennité et son strict respect.
- La volonté de ne pas viser des contraintes de synchronisations «pointues» compte tenu de la diversité des nœuds capteurs (capteurs, hardwares et systèmes d'exploitation embarqués) dont la principale obligation sera le respect de la norme choisie.

Tableau 2.2 – Satisfaction des besoins

Technologie	Références	Longue portée	Débit élevé	Latence faible	Déterministe	Points faibles spécifiques
IEEE802.15.4(2,4 GHz)	[23]	✗	✓	✓	✗ si CSMA/CA	Sert de souche à de nombreuses solutions
IEEE802.15.4(autres bandes)	[23]	✓	✗	✓	✗ si CSMA	Sert de souche à de nombreuses solutions
WirelessHART	[49]	✗	✓	✓	✓	Modifiable difficilement
ISA100.11a	[50]	✗	✓	✓	✓	Modifiable difficilement
Z-Wave	[51]	✗	✗	✓	✗	Modifiable difficilement
ANT	[52]	✗	✓	✓	✓	Modifiable difficilement
EnOcean	[36]	✓	✗	✗	✗	A compléter
Bluetooth	[52]	✗	✓	✓	✓	Supporte peu de nœuds capteurs, pile protocolaire complexe
Wavenis	[53]	✓	✗	✗	✓	Modifiable difficilement
Dash7	[54, 55]	✓	✗	✓	✗	Débit limité par la régulation
LoRaWAN	[55, 56]	✓	✗	✗	✗	Débit limité par la régulation
Sigfox	[55, 56]	✓	✗	✗	✗	Débit limité par la régulation

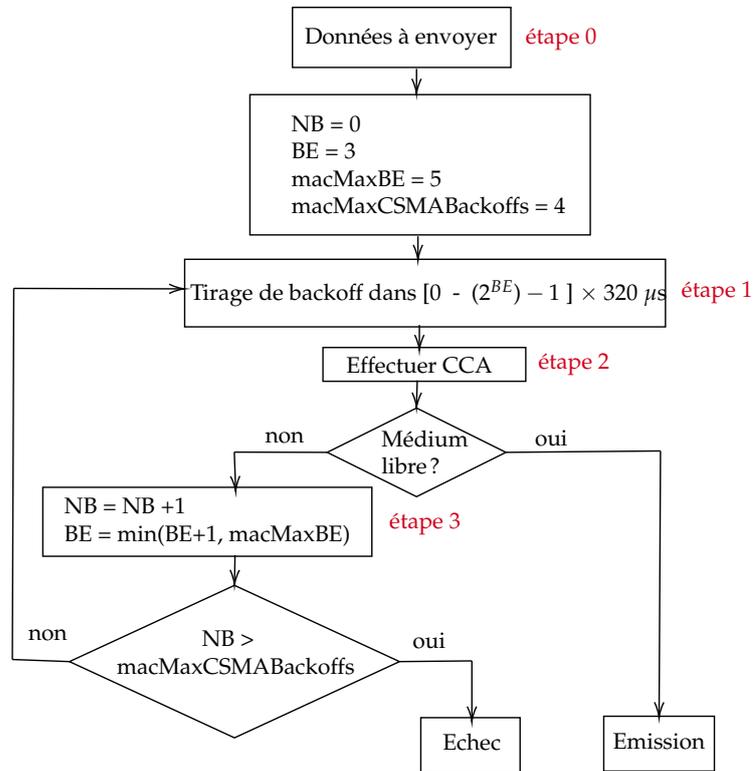


Figure 2.3 – Diagramme de l’algorithme du CSMA/CA non slotté de la norme IEEE 802.15.4 [57]

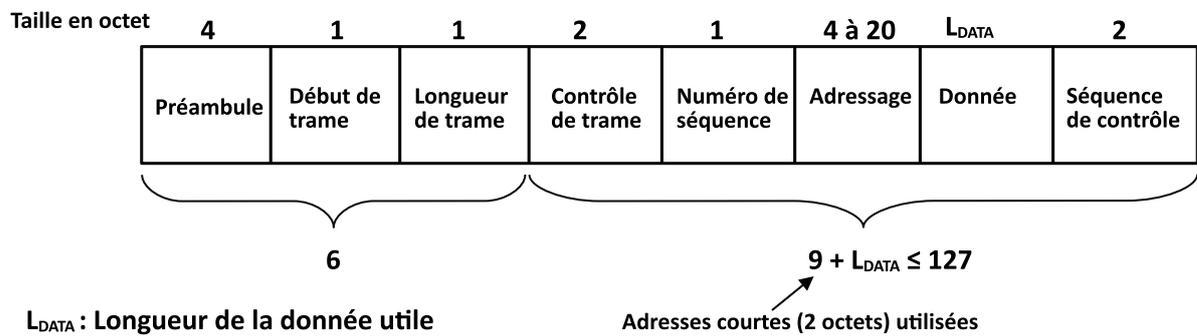


Figure 2.4 – Format de la trame de donnée conforme à la norme IEEE 802.15.4 [58]

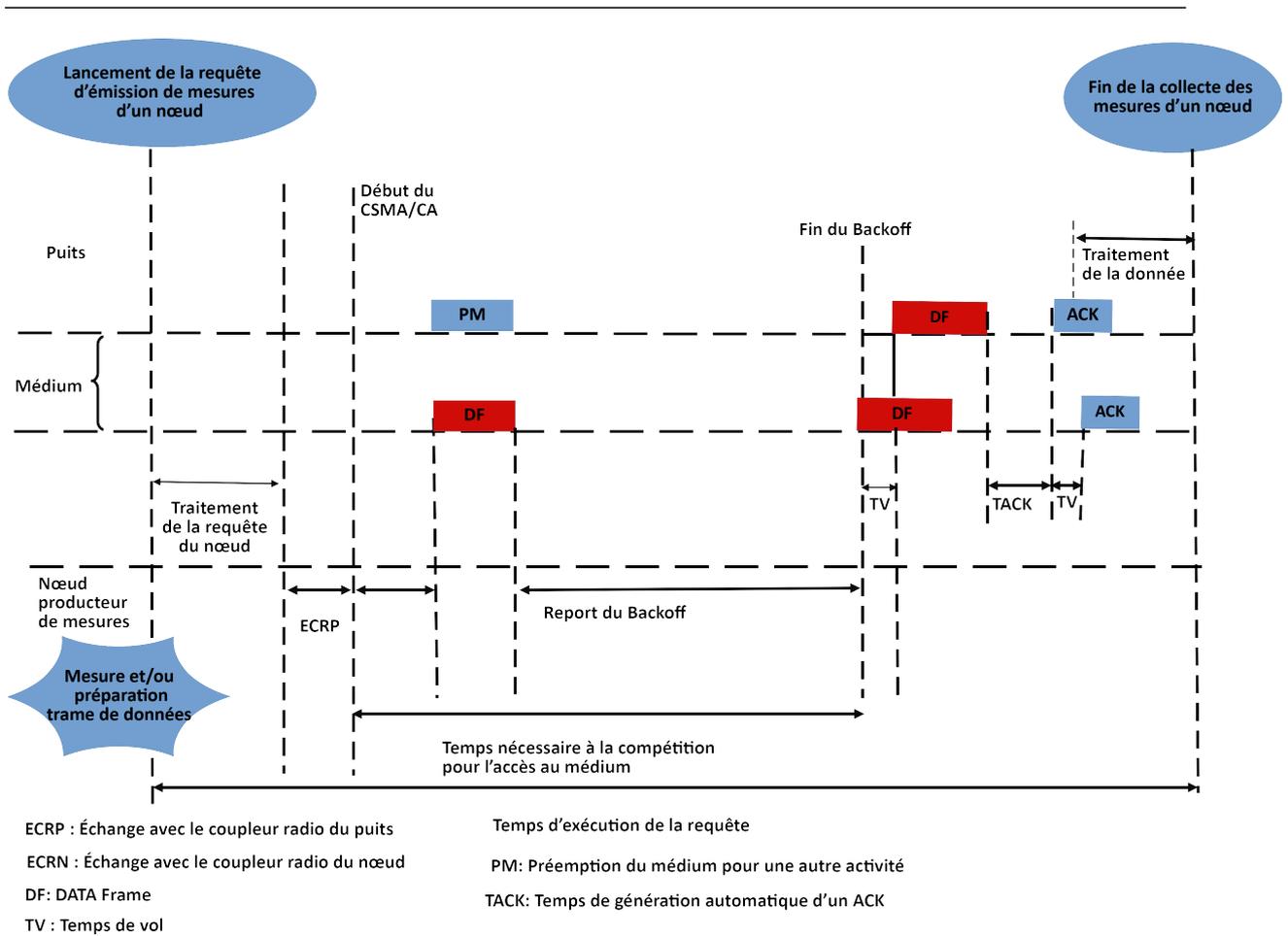


Figure 2.5 – Séquencement de l'exécution d'une requête de collecte de mesures d'un nœud avec CSMA/CA non slotté

2.2 Interaction entre trames courtes et méthodes d'accès

2.2.1 Approche distribuée

Dans les méthodes distribuées telles que le CSMA/CA (figure 2.3), l'accès au médium des nœuds est fait de façon aléatoire. Lorsqu'un nœud a des données à transmettre, il attend pendant un temps appelé *backoff* tiré aléatoirement dans l'intervalle $[0 - (2^{BE}) - 1]$ où *BE* (*Backoff Exponent*) définit la longueur de l'intervalle. A la fin du backoff, si le canal est libre, le nœud transmet sa trame, sinon si le nœud détecte que le canal est occupé par une autre activité comme illustré dans la figure 2.5, il incrémente les paramètres *BE* et *NB* qui représente le nombre de fois où le nœud essaie d'accéder au canal. Si le nombre maximum de tentative d'accès au canal (*macMaxCSMABackoffs*) n'est pas atteint, le nœud tire un nouveau backoff. Selon [59] le temps moyen (T_{ACCESS}) d'accès au médium avec le CSMA/CA non slotté de IEEE 802.15.4 peut être calculé par :

$$T_{ACCESS} = T_{Backoff} + T_{CCA} + T_{Rx \rightarrow Tx} \quad (2.1)$$

avec $T_{Backoff}$ la durée du backoff, T_{CCA} le temps nécessaire pour effectuer un test du canal (CCA) et $T_{Rx \rightarrow Tx}$ le temps pour passer le module radio du mode réception au mode transmission. La norme définit $T_{CCA} = 128 \mu s$ et $T_{Rx \rightarrow Tx} = 192 \mu s$. En considérant que le nœud accède au canal dès la première tentative, le temps moyen T_{ACCESS} d'accès au médium peut être déduit comme suit :

$$T_{ACCESS} = \left(\frac{0+(2^3-1)}{2} \times 320 + 128 + 192 \right) \mu s, \text{ soit } T_{ACCESS} = 1446 \mu s.$$

Nous considérons maintenant une application où les données envoyées par les nœuds sont de l'ordre de 3 octets. La figure 2.5 est une façon de faire l'inventaire des temps élémentaires qui sont nécessaires à l'échange d'une trame suite à un accès au médium de type CSMA/CA. Ces temps élémentaires sont représentés par une succession de segments qui ne sont pas nécessairement dessinés à l'échelle mais ils permettent de comprendre les spécificités des échanges de trames courtes. En négligeant le temps de chargement des données dans le *buffer* du module radio (segments ECRP et ECRN de la figure 2.5) et en tenant compte du format d'une trame présentée dans la figure 2.4, le temps T_{DATA} pour transmettre une telle trame avec un débit 250 kbit/s peut être calculé comme suit :

$$T_{DATA} = \frac{(6+9+3) \times 8 \times 1000000}{250000} \mu s, \text{ ainsi } T_{DATA} = 576 \mu s.$$

Nous venons d'estimer T_{DATA} et T_{ACCESS} qui représentent deux segments temporels majeurs dans l'estimation du temps d'exécution de la requête de collecte d'une trame courte pour un partage du médium géré par CSMA/CA. Nous constatons par ces calculs que pour envoyer une donnée de 3 octets, le nœud passe en moyenne plus de temps à attendre l'accès au canal, soit au moins deux fois le temps de transmission de la donnée elle-même.

Considérons le débit utile, c'est-à-dire la quantité de données remise à l'application de collecte. Nous constatons les choses suivantes :

A cause du format de la trame 802.15.4 défini dans la figure 2.4, la donnée utile (c'est-à-dire 3 octets) ne représente qu'environ 17% de la trame totale envoyée. En considérant l'estimation qui vient d'être faite, cette transmission de 3 octets a coûté un temps supérieur à 2 ms, ce qui fait un débit utile inférieur à 12 kbits/s. Si le réseau devient chargé, le médium sera souvent détecté occupé, ce qui aura pour effet d'augmenter le T_{ACCESS} et donc de réduire ce débit. Ce constat nous met sur la piste d'une agrégation des données à la source qui sera développée plus loin, ceci pour viser une occupation plus optimale de la bande passante.

Considérons maintenant le déterminisme, c'est-à-dire la confiance que nous pouvons accorder à l'émission d'une trame par ce mécanisme. Si le médium devient très sollicité par de nombreuses transmissions de trames de différents nœuds, pour ne pas contribuer à un effet d'avalanche, ce mécanisme propose d'abandonner l'émission de la trame courante après trois tentatives infructueuses d'émission (cf. figure 2.3). Des mesures faites dans notre équipe ont montré que la fréquence des envois devient problématique (pertes de trames) quand les émissions ne sont pas séparées par un temps

minimum de 15 ms (rapport interne [60]). Ce constat nous indique que CSMA/CA est par conception non déterministe quand le réseau est chargé.

2.2.2 Approche centralisée

Pour éviter une compétition orchestrée par un processus aléatoire réparti, une solution très ancienne et robuste consiste à utiliser «un Maître» qui pilote les échanges. Une topologie en étoile convient très bien pour que le cœur de l'étoile, dans ce travail le puits, sollicite selon un ordre qu'il maîtrise les nœuds à sa portée pour que chacun puisse répondre dans un time slot donné, et ceci sans risque de collision. La figure 2.6 illustre ce mécanisme générique appelé aussi Polling-Selecting. Le nœud N_i visé par la collecte est sollicité par une requête que nous appellerons dans ce document *Data Request* (DRQ), il s'agit d'une trame courte adressée à N_i . Celle-ci une fois reçue et décodée provoque soit la réalisation de la mesure, soit la prise en compte d'une mesure déjà réalisée pour fabriquer la trame de réponse que nous appellerons *Data Response* (DRP).

Le temps d'exécution de la requête est donc plus long que celui de la figure 2.5 car composé de plus de segments temporels élémentaires (figure 2.6). L'intérêt vient du fait qu'aucun des segments considérés n'a une durée variable dépendant d'un tirage au sort dans une fenêtre dont la largeur dépend de la charge du médium. Si nous estimons à partir des mêmes bases de calcul utilisées précédemment pour l'échange d'une trame de 3 octets, que ce temps d'exécution est de 4 ms au moins, le débit utile passe en dessous du seuil de 6 kbit/s.

Considérons maintenant le déterminisme. L'accès au médium étant orchestré par un Maître, cela nous protège des risques de collisions. Cette solution est donc par conception plus déterministe. Néanmoins il faut prendre en considération qu'un réseau de capteurs sans fil doit être constitué de nœuds dont le choix est souvent piloté par la grandeur mesurée. Ceci explique le fait qu'ils soient d'origines diverses, c'est-à-dire que le hardware de la partie réseau de nœud et le système d'exploitation « temps réel » embarqué soient différents. La conséquence se traduit sur la longueur du segment « temps de réactivité » de notre figure 2.6. Cela a un impact sur la durée d'un time slot qui doit inclure des gardes temporelles qui conviennent à toutes les situations (tous les types de nœuds). Nous expliquons ainsi le choix de 10 ms fait par WirelessHART et les choix que nous ferons pour la longueur des time slots dans nos simulations.

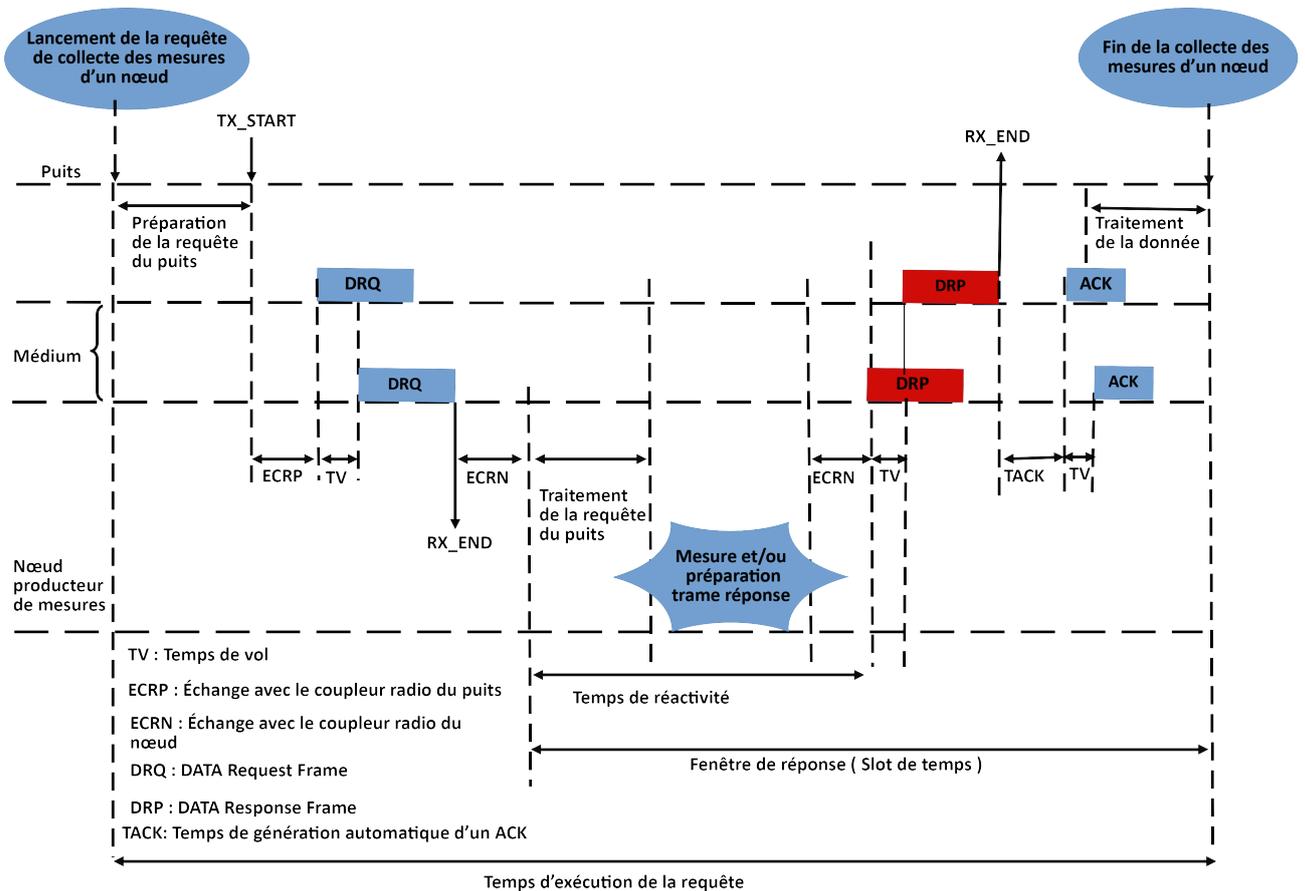


Figure 2.6 – Séquencement de l'exécution d'une requête de collecte de mesures d'un nœud basé sur le Polling-Selecting

2.2.3 Points communs de la problématique de la transmission de trames courtes sur un médium radio

Le format d'une trame de la norme 802.15.4 (cf. figure 2.4) nous a permis de montrer qu'une charge utile de 3 octets représentait 17% de la longueur de la trame. Cette hypothèse de 3 octets est un cas limite mais c'est bien l'objet de notre étude, alors que dans la bibliographie les trames courtes sont généralement considérées quand la charge utile est de 30 ou de 50 octets, conditions pour avoir des performances attractives. A ce chiffre s'ajoutent des segments temporels qui peuvent :

- Etre de taille largement variable dans le cas du CSMA/CA ;
- Etre longs et de taille dépendant de la réactivité du nœud visé par la collecte.

👉 Ceci nous incite dans les deux cas aux actions suivantes :

- Procéder aux mesures avec une base de temps indépendante des activités réseaux ;
- Gérer dans une file d'attente les mesures prêtes à l'envoi ;
- Procéder à une agrégation à la source pour que la charge utile soit plus conséquente.

Ceci constitue les pistes suivies dans ce travail.

2.3 Identification des leviers

2.3.1 Pour une augmentation du débit

N'ayant pas la capacité de contribuer au niveau du signal, nous avons néanmoins identifié deux façons d'augmenter le débit.

2.3.1.1 Le multicanal (fréquence et étalement)

Considérons un réseau de collecte de données constitué de plusieurs nœuds capteurs partageant le même canal de transmission pour les échanges. Dans ce type de réseau, les interférences et les collisions s'avèrent être un problème. Ces deux phénomènes peuvent conduire à des pertes de trames et ainsi réduire le débit du réseau. Afin d'optimiser l'utilisation de la bande passante, plusieurs solutions et études ont été faites, basées sur l'emploi du multicanal pour réduire les interférences et les collisions. Selon [61], les méthodes d'accès au médium (MAC) basées sur le multicanal peuvent être classées en trois groupes en fonction de la politique d'affectation des canaux aux nœuds : les méthodes d'affectation statique, celles avec affectation semi-dynamique et celles avec affectation dynamique des canaux.

a) MAC avec affectation statique des canaux

Dans ces méthodes, lors de la phase d'initialisation du réseau, les nœuds sont regroupés en clusters et à chaque cluster est attribué un canal distinct.

b) MAC avec affectation semi-dynamique des canaux

L'idée principale de ces méthodes est d'attribuer lors de la phase d'initialisation du réseau un canal à chaque nœud et de permettre à ce dernier de passer d'un canal disponible à un autre pour communiquer avec ses voisins. Dans ces types de méthodes, l'attribution des canaux n'est pas fixe comme dans le cas des méthodes statiques, ainsi les conditions du trafic de données ou le niveau d'interférences peuvent déclencher le processus de réattribution des canaux.

c) MAC avec affectation dynamique des canaux

Dans cette approche, pour chaque transmission, les nœuds peuvent changer de canal. Le changement de canal peut être fait par chaque nœud en se basant sur l'état du canal. Pour ce faire il est donc nécessaire de disposer de plusieurs canaux (bandes de fréquence disjointes ou codes d'étalement orthogonaux) pour viser une augmentation de débit au détriment de la bande passante consommée.

Le multi-canal est une solution qui exploite plusieurs canaux en parallèle, nous allons voir maintenant un levier qui permet de lutter contre les effets des trames courtes sur un seul canal.

2.3.1.2 Agrégation

L'agrégation est une technique qui permet de combiner ou de juxtaposer plusieurs données afin d'en réduire le volume et de moins encombrer le médium. Cette technique permet d'avoir des trames longues et ainsi permet de remédier à l'impact des trames courtes sur le débit comme montré dans la section 2.2. Il existe deux types principaux de techniques d'agrégation qui sont :

a) Agrégation au niveau routage

L'agrégation des données est une technique utilisée pour agréger des données provenant de nœuds en amont par un nœud intermédiaire qui se chargera d'acheminer le paquet ainsi agrégé vers une destination commune comme le montre la figure 2.7a. L'objectif principal de l'agrégation de données est de collecter et d'agréger les données de manière efficace afin d'améliorer la durée de vie ainsi que le débit utile du réseau. Cependant, pour des applications nécessitant une fraîcheur des données, les méthodes d'agrégation ne sont pas praticables car elles peuvent augmenter considérablement le délai de transmission des données [62].

b) Agrégation au niveau source

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les données mesurées par les nœuds capteurs sont de petite taille. Envoyer des données de petite taille, fréquemment, peut engendrer une forte consommation d'énergie inutile et diminuer le débit utile du réseau. Pour améliorer les performances du réseau en termes de débit utile, les nœuds agrègent au fur et à mesure leurs données captées pour envoyer des trames un peu plus longues (figure 2.7b) [43]. Mais cela peut s'avérer coûteux en délai. Par exemple, prenons une application dont les données ont une durée de validité de 100 ms et qui sont produites à chaque 10 ms. Dans cette application, les données ne pourront être gardées que pendant une durée inférieure à 100 ms, ce qui va limiter le nombre de données agrégées dans la trame des nœuds.

2.3.2 Pour une augmentation de la portée

Dans un réseau de capteurs sans fil, la puissance à disposition de l'émetteur est limitée par les contraintes énergétiques. Cette caractéristique générale induit une limite en portée de transmission. Aussi pour couvrir une surface étendue, plusieurs méthodes existent. Nous pouvons citer :

- l'augmentation de la puissance de transmission des nœuds ;
- l'utilisation d'un système de relayage d'informations entre les nœuds (multi-saut) ;
- l'utilisation d'antennes avec un gain élevé ou la focalisation de l'énergie rayonnée par l'antenne.

Les nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fil étant des dispositifs contraints en énergie, augmenter leur puissance de transmission n'est pas une bonne idée. L'augmentation de la puissance de transmission entraîne une forte consommation d'énergie

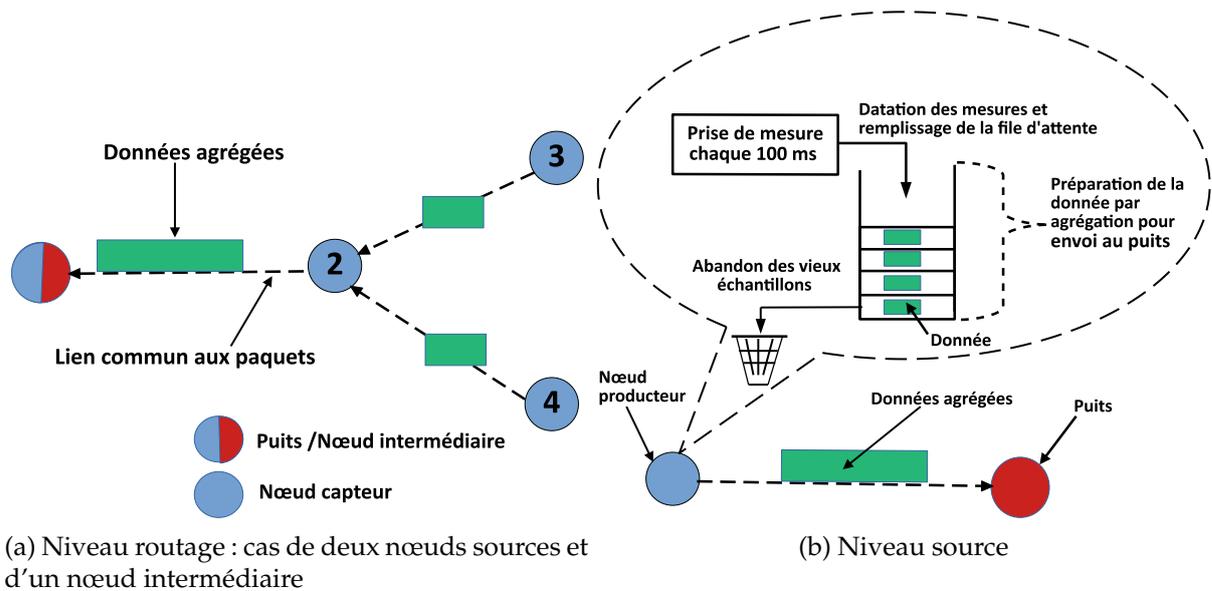


Figure 2.7 – Agrégation de données

et la diminution de la durée de vie du nœud. Un effet secondaire résultant de ce choix est la pollution électromagnétique de l'espace qui empêche une réutilisation optimisée des ressources. L'utilisation d'un canal génère des interférences qui rendent difficile l'usage d'une couverture cellulaire dense. On parle de facteur de réutilisation des ressources limité.

Nous présentons donc les méthodes basées sur le multi-saut et les antennes directives et/ou à gain élevé proposées pour les réseaux de capteurs sans fil.

2.3.2.1 Le multi-saut

Le multi-saut permet d'étendre la zone de couverture d'un réseau de capteur sans fil. L'idée principale est de déployer plusieurs nœuds capteurs dans la zone de couverture de telle façon que les nœuds soient à portée les uns des autres ou qu'un nœud soit à portée d'au moins un autre nœud. Ainsi, lorsqu'un nœud éloigné et hors couverture du puits (ou du nœud destinataire de l'information) a des données à transmettre, il choisit un nœud voisin à qui il confie ses données comme le montre la figure 2.8. Ce nœud est alors le prochain saut vers la destination. Plusieurs critères existent pour choisir le prochain saut comme par exemple :

- le nombre de sauts (*hop count*) minimal vers la destination [63]
- le nœud voisin disposant de la plus grande énergie résiduelle [64]
- le nœud voisin avec la file d'attente de paquets la moins encombrée [65].

Cette approche de multi-saut permet certes de transmettre sur une zone de couverture plus importante que celle assurée par une étoile avec des nœuds de portée équivalente, en revanche elle engendre une augmentation du délai de bout à bout. Il est aussi montré que les nœuds proches du puits peuvent subir un encombrement de

leur file d'attente [65], ce qui peut entraîner des pertes de paquets et réduire le débit du réseau. La figure 2.9 est donnée à titre d'exemple pour montrer l'incidence du nombre de sauts subis par un paquet sur le temps nécessaire à son transit. Nous observons qu'avec une configuration à un saut les délais de transmission sont faibles par rapport à ceux des configurations à 2 ou plusieurs sauts. Ceci s'explique par le fait que pour le cas d'un saut, les données sont transmises directement à la destination sans passer par des nœuds relais et donc dans leur file d'attente. Nous observons aussi que plus les paquets sont grands plus les délais augmentent.

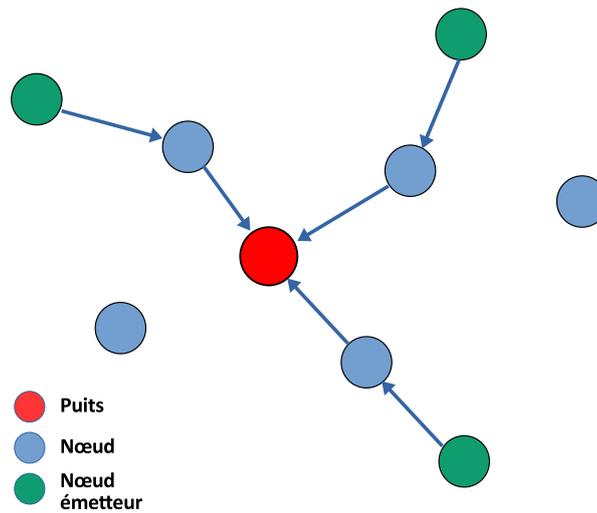


Figure 2.8 – Réseau multi-saut avec puits au centre

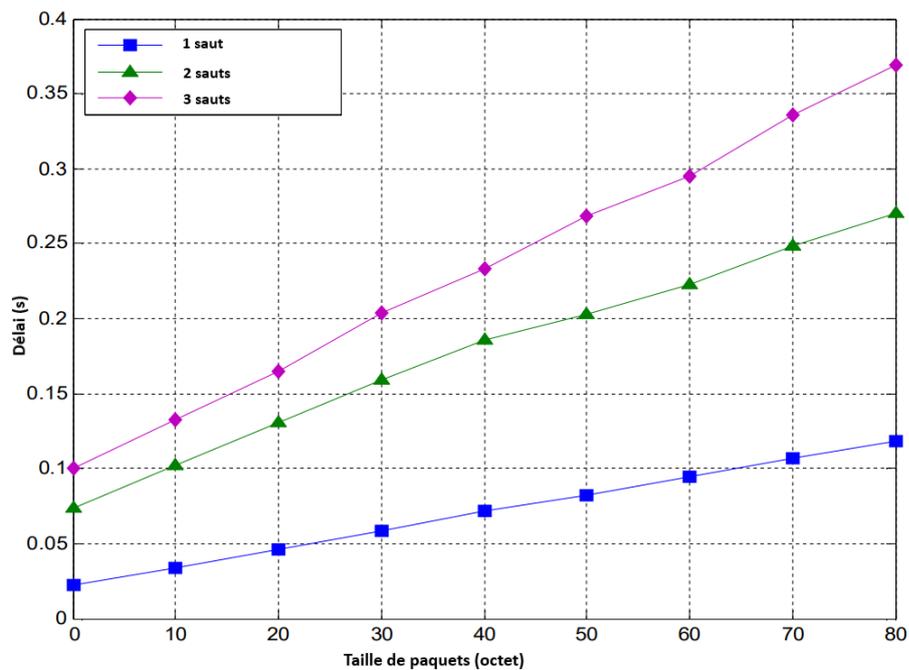


Figure 2.9 – Résultats de mesures du délai pour un réseau ZigBee (250 kbit/s) en fonction du nombre de sauts [46]

2.3.2.2 Usage d'antennes directives

En communication radio une antenne est qualifiée d'omnidirectionnelle quand elle peut être assimilée à une antenne «idéale» émettant un signal radio dans toutes les directions. L'énergie rayonnée est supposée éclairer la surface intérieure d'une sphère. Ceci est une hypothèse simplificatrice très couramment retenue dans le monde des réseaux de capteurs sans fil. C'est pourquoi beaucoup de méthodes dans les réseaux sans fil tels que les protocoles MAC, les protocoles de routage sont conçus en supposant l'existence de ce type d'antennes. Les antennes omnidirectionnelles permettent de couvrir une surface dans le plan assimilable à la surface d'un disque à la différence des antennes directives qui couvrent une portion de cet espace. Cependant, à puissance rayonnée équivalente, les antennes directives permettent de focaliser le signal radio dans une direction donnée et de la porter plus loin (voir figure 2.10) sans augmenter sa consommation d'énergie.

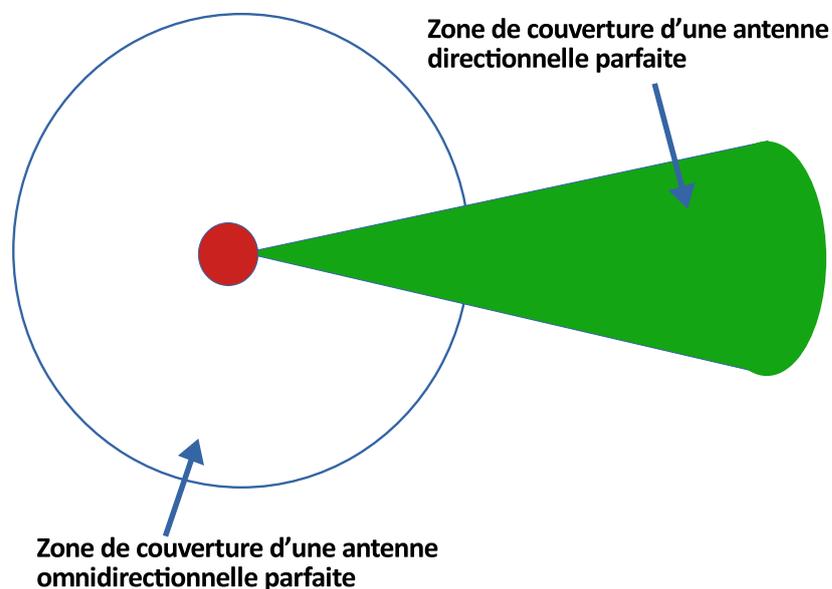


Figure 2.10 – Comparaison des principes de la couverture des antennes omnidirectionnelles et directionnelles

Différents types d'antenne directive existent : les systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), les systèmes déphasés, les systèmes à faisceau commutable et les systèmes adaptatifs aussi appelés antennes intelligentes [66].

1. Le MIMO est une technique de multiplexage utilisée dans certains réseaux sans fil, les réseaux mobiles et les radars permettant de transférer des données à de plus longues portées et avec un débit plus élevé. Cette technique permet des échanges simultanés.
2. Le système déphasé est un système composé d'un ensemble d'éléments rayonnant ayant chacun un déphaseur. L'onde émise par chacun des éléments entre en interférence avec celle des autres. Le faisceau est produit par la somme des diffé-

rentes interférences constructives produites et peut être orienté vers une direction spécifique en faisant varier la phase du signal entre les éléments.

3. Le système à faisceau commutable est un système dont le diagramme de rayonnement peut être sélectionné parmi un nombre prédéfini de diagrammes fixes permettant de choisir certaines directions.
4. Le système adaptatif peut être défini comme étant un ensemble d'antennes relié à un processeur de traitement du signal qui peut adapter le diagramme de rayonnement des antennes en privilégiant une direction désirée et en atténuant les directions des interférences.

Le tableau 2.3 présente un récapitulatif des différents types d'antennes, leurs avantages et leurs inconvénients. Nous constatons que le système à faisceau commutable est simple à mettre en place et présente une complexité faible. Ces caractéristiques font des systèmes à faisceau commutable, une solution adaptable et compatible au besoin énergétique des réseaux de capteurs sans fil.

Tableau 2.3 – Comparaison entre quelques types d'antennes directionnelles [66]

Mode	Avantages	Inconvénients
MIMO	Débits très importants	Très complexe Coût énergétique
Système déphasé	Simple à implémenter	Complexité moyenne Localisation requise
Système à faisceau commutable	Simple à implémenter	Configuration limitée Localisation requise Faible gain entre les lobes
Système adaptatif	Grande capacité	Algorithmes complexes Coût élevé Préférable pour les liaisons sans obstacles (LOS : Line Of Sight)

2.4 Orientations définies pour notre travail

1. Pour répondre à nos objectifs, nous avons fait un certain nombre de choix technologiques. Nous avons opté pour une configuration en étoile avec des longues portée de transmission entre le puits et chacun des nœuds capteurs afin de nous soustraire des problèmes de latence rencontrés avec les réseaux multi-saut. L'accès des nœuds au médium sera contrôlé par le puits.
2. Pour les considérations longues portées, nous avons choisi d'équiper le puits avec une antenne à faisceau commutable constituée de K orientations (secteurs). Son diagramme de rayonnement issu des mesures faites à partir d'une antenne prototype est donné dans la figure 2.11. Cette antenne permet aussi, avec sa capacité à focaliser le signal dans une direction étroite, d'augmenter le rapport signal

sur bruit (SNR : Signal-to-Noise Ratio) [67], de réduire les interférences et d'augmenter le débit du réseau.

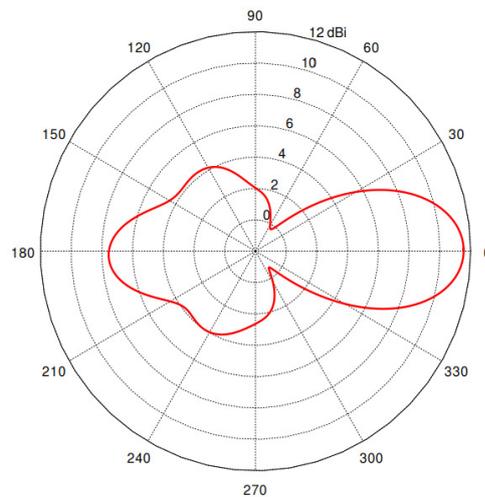


Figure 2.11 – Diagramme de rayonnement de l'antenne choisie

3. Le type d'applications que nous visons a pour caractéristique principale d'avoir une contrainte temporelle au niveau des données produites par les nœuds capteurs.
4. Nous utiliserons une agrégation à la source des données produites, c'est-à-dire une agrégation au niveau des nœuds capteurs afin d'améliorer le débit utile dans le réseau. Cette agrégation est faite tout en veillant à la validité des données.
5. Même si la solution présentée ici offre des perspectives très intéressantes quant à l'énergie consommée, ce critère n'a pas été le critère dominant de notre démarche.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la problématique traitée dans cette thèse et les limites des solutions existantes pour satisfaire pleinement nos besoins. Nous avons ensuite exploré des pistes et identifié des leviers pour répondre à nos objectifs centrés sur la collecte de mesures éventuellement associées à une durée de validité, tant au niveau débit que portée. Nous avons ainsi montré l'intérêt d'une agrégation des données à la source et avons présenté les orientations retenues pour la suite.

C'est dans le chapitre suivant que nous justifierons nos choix (topologie retenue, antenne à faisceau commutable, méthode d'accès, ...), et parlerons également des travaux déjà réalisés dans le domaine des réseaux sans fil avec antennes directives. Nous présenterons également les différentes phases de fonctionnement de notre solution et la démarche adoptée pour l'évaluation de notre contribution.

Chapitre 3

Présentation globale de la contribution

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation globale de notre contribution. Nous parlerons d'abord de notre choix topologique, du choix de l'utilisation d'une antenne directionnelle au niveau du puits et du choix de la méthode d'accès utilisée. Ensuite, nous décrirons les principales phases de fonctionnement de la solution retenue. Enfin, nous détaillerons la démarche d'évaluation de notre proposition.

3.1 Approche topologique

Les réseaux sans fil, dont les réseaux dédiés à la collecte de données comme montré dans le chapitre 1 section 1.1, s'organisent selon deux grands types de configuration topologique qui définissent la façon dont est associé un nouveau nœud à un réseau existant selon les liens radio opérationnels disponibles. Un lien radio sera qualifié d'opérationnel si les performances qu'il permet d'obtenir sont conformes à la qualité de service attendue. Le plus souvent, il s'agit d'un taux d'erreurs «trame» FER (*Frame Error Rate*) ou «bit» BER (*Bit Error Rate*). Usuellement, il est admis que ces taux d'erreurs sont dépendants de l'énergie reçue par le destinataire de l'information et du bruit dans la bande de fréquence utilisée. L'énergie reçue par le destinataire est modélisée au niveau signal par un bilan de liaison qui exprime la relation entre la puissance émise et la puissance reçue en fonction des différents facteurs qui influent sur sa dispersion : la distance parcourue par le signal, le type d'antenne et les obstacles rencontrés. Aussi, si un nœud source (N_i) veut échanger des informations avec le nœud puits (P), il existe deux possibilités :

- soit un lien opérationnel entre N_i et P existe (figure 1.1.a)
- soit un ou plusieurs nœuds intermédiaires peuvent servir de relais pour retransmettre cette information en direction de P (figure 1.1.b ou figure 1.1.c)

Nous allons donc considérer les types de nœud suivants : les nœuds capteurs producteurs de données, les nœuds relais ayant des capacités de routage et les nœuds puits chargés de la collecte des données pour leur traitement et/ou leur transmission à une entité distante. Dans la plupart des cas de la bibliographie le nœud puits est unique. Nous sommes maintenant en mesure d'introduire les deux topologies de base qui caractérisent les solutions de réseaux de capteurs en faisant l'hypothèse d'un nœud

puits unique. Les topologies supportées sont celles utilisant une approche de communication à un saut (figure 1.1. a) et celles basées sur des communications multi-sauts (figure 1.1.b ou figure 1.1.c).

Dans une topologie en étoile (ou à un saut), tous les nœuds producteurs de données disposent d'un lien opérationnel avec le nœud puits. Le puits qui est alors au cœur de l'étoile a la capacité d'orchestrer les échanges nœud-puits. Il assure donc le bon fonctionnement et les communications dans le réseau. Cette topologie est caractérisée par sa facilité de mise en place.

Dans une topologie multi-saut, certains nœuds du réseau peuvent assurer le relais des communications pour les acheminer jusqu'à leur destination. Cette topologie permet grâce aux relais de couvrir de grande surface (au-delà de la surface permise par la longueur d'un lien radio) sans agir sur la puissance émise.

Pour justifier notre choix nous allons nous appuyer sur une brève synthèse exprimée sous la forme d'un tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Comparaison entre topologie en étoile et topologie multi-saut

Topologie	Couverture	Déploiement	Point critique	Autres spécificités
Étoile	Limitée par la longueur d'un lien radio (la portée)	Aisé	Critique pour le puits (cœur de l'étoile)	Routage implicite (1)
Multi-saut	Limitée par le nombre maximum de sauts autorisés	Nécessite une stratégie de routage	Critique pour tous les nœuds relais et pour le puits	Consommation importante de bande passante (2) et le temps de transit peut être important (3)

(1) L'information est à portée directe du puits.

(2) L'information est émise plusieurs fois quand elle est relayée, ce qui conduit à augmenter la charge soumise au réseau et à risquer des congestions [65]. Des solutions consistant à utiliser plusieurs canaux fréquentiels sont décrites dans la littérature et ont été aussi traitées dans notre équipe de recherche, mais en raison de leur complexité, elles ne seront pas retenues dans notre étude [61].

(3) Quand la fraîcheur (le délai de livraison) de l'information est critique le relayage peut induire un temps de transit long et variable selon la méthode d'accès et la charge du réseau. Dans [68], il est montré que le délai dans un réseau multi-saut est plus important que dans un réseau en étoile.

Dans [69], les auteurs ont réalisé la comparaison de délai de transmission des données de trois topologies (en étoile, maillée, arborescente) sur des modules Xbee serie 2. La figure 3.1 présente les résultats obtenus et nous pouvons constater que les meilleurs délais sont offerts par la topologie en étoile.

Pour se soustraire des problèmes de gestion de congestion des réseaux de capteurs sans fil multi-saut et avoir un réseau facilement déployable et gérable, les nouvelles solutions dans l'Internet des Objets comme LoRa [40], SigFox [41] ont plutôt retenu des topologies en étoile étendue [70] pour le déploiement de la technologie sans fil des réseaux de capteurs. Ce choix de topologie en étoile est une tendance qui s'impose dans

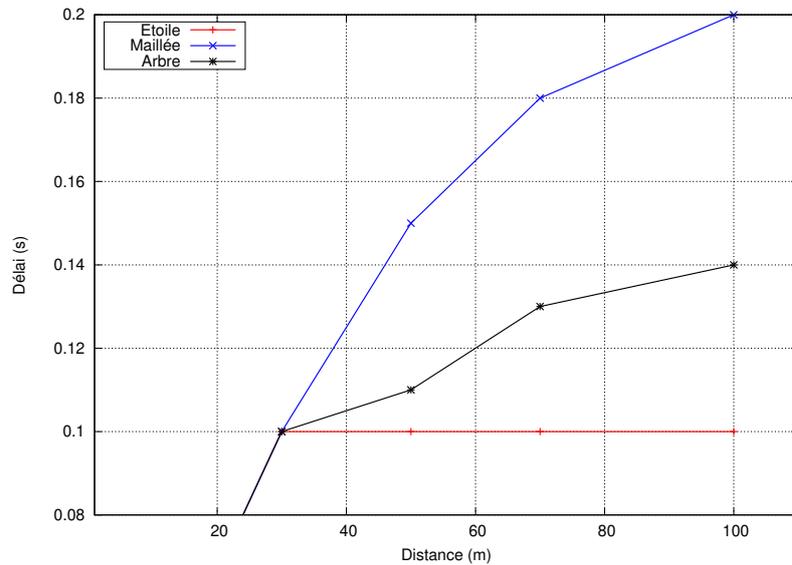


Figure 3.1 – Topologies en étoile, maillées et en arbre : comparaison de délai en fonction de la distance [69]

le domaine de la collecte des données par sa facilité de déploiement et sa robustesse importante. Nous avons retenu ce choix topologique pour notre contribution.

3.2 Considérations sur la longueur des liens radio d'un réseau en étoile

Le point faible d'une topologie en étoile est qu'elle est dépendante de la longueur des liens radio, aussi appelée la portée. Si nous revenons au bilan de liaison introduit dans le paragraphe précédent nous pouvons le préciser à l'aide de la formule suivante :

$$P_r = P_t + \sum Gain - PL(f, d, ..) \quad (3.1)$$

Avec pour cette forme logarithmique P_r : étant la puissance reçue,

P_t : étant la puissance de l'émetteur,

$\sum Gain$: étant la somme des gains des antennes et/ou de traitement (*processing gain*),

PL : étant la perte en chemin (ou *Path Loss*) qui dépend principalement de f et de d ,

f : étant la fréquence utilisée pour la modulation du signal,

d : étant la distance parcourue par le signal ou par simplicité la distance entre l'émetteur et le récepteur si en LOS (Line-Of-Sight).

Des précisions concernant PL seront données dans la suite. Dans le chapitre 1, il a été introduit le fait que les éléments qui constituent un réseau de capteurs sont contraints énergétiquement et que la bande passante utilisée dépend de réglementations et de composants conformes à des normes. Dans l'équation 3.1, il est possible de constater que la somme des gains permet de compenser une augmentation de la perte

en chemin due à une augmentation de la longueur du lien radio. Pour traiter le point faible de la solution en étoile, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux différents gains. Dans les solutions usuelles des réseaux de capteurs sans fil, les nœuds sont équipés d'une antenne gravée ou d'une antenne de type fouet dont le gain est faible (typiquement 0 ou 1 dBi), ceci pour des raisons de coût et d'encombrement.

3.2.1 La solution apportée par un gain de traitement

Augmenter la portée et/ou rendre plus robuste un lien radio numérique est un objectif qui se réalise à partir des années 1950 pour des applications militaires grâce à l'usage de nouveaux codages de l'information et en particulier l'étalement dans le spectre ou *Spread Spectrum*. L'énergie utilisée pour porter l'information est dispersée par un hachage particulier réalisé à partir d'un motif d'étalement (ou *Spreading Factor*). La transmission d'informations binaires est réalisée à partir de symboles permettant un décodage plus efficace. Le gain ainsi réalisé est un gain de traitement. Quand les motifs de hachage satisfont à des propriétés mathématiques particulières qui font référence aux fonctions de Walsh, ils permettent de définir des canaux dits orthogonaux, c'est-à-dire qui peuvent cohabiter en un même lieu. La longueur du motif de hachage a un impact direct sur la bande passante nécessaire pour porter le signal. Quand cette bande passante est fixée (bande ISM par exemple), plus le motif de hachage est grand plus le débit utile est faible et plus la portée est grande. Dans le monde de la collecte de données, la naissance du codage CSS (*Chirp Spread Spectrum*) dans les années 2000 (une forme particulière de l'étalement dans le spectre) a permis l'émergence de solution bas débit mais longue portée. La technologie correspondante connue sous le nom de LoRa est à la base du protocole LoRaWAN exploité pour des solutions basées sur une topologie en étoile pour l'internet des objets [39]. Ce protocole avantage l'économie d'énergie et la portée plutôt que le débit et les délais.

3.2.2 Utilisation d'antennes de manière dissymétrique

Les antennes directionnelles permettent d'augmenter la partie $\Sigma Gain$ du bilan de liaison présenté dans l'équation (3.1). L'augmentation des gains permet l'augmentation de la puissance reçue (P_r). Ainsi la portée de transmission se retrouve augmentée également.

 Dans notre contribution, nous avons décidé d'équiper uniquement le puits d'une antenne directionnelle et d'équiper les nœuds capteurs d'antennes omnidirectionnelles pour comme le montre la figure 3.2, ceci permet de bénéficier des avantages apportés par les antennes directionnelles tels que l'augmentation de la capacité du réseau et l'augmentation de la portée de transmission. Ce choix permet de garder la complexité du réseau seulement au niveau du puits, d'être moins coûteux et d'être compatible avec le matériel existant. L'objet de cette recherche consiste à proposer une solution

qui ne concerne que la partie logicielle des nœuds pour qu'ils puissent fonctionner avec le puits équipé d'une antenne à faisceau commutable.

Ce choix nous impose de travailler en collaboration avec des enseignants chercheurs disposant d'une expertise sur de telles antennes. Ainsi, l'antenne à faisceau commutable que nous utilisons a été développée par l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Elle est basée sur la technologie FSS (*Frequency Selective Surface*) et est présentée dans [71] (voir Annexe A.5).

L'intérêt d'utiliser une antenne directionnelle au cœur d'une étoile a été également montré dans [72]. L'article analyse les performances de l'utilisation d'une antenne omnidirectionnelle et d'une antenne à faisceau commutable dans un environnement intérieur (*indoor*). Les auteurs ont montré que par rapport à l'utilisation d'une antenne omnidirectionnelle, l'utilisation d'une antenne à faisceau commutable améliore les performances du BER d'environ 2 dB en cas de visibilité directe et de 6 dB en cas de visibilité non directe.

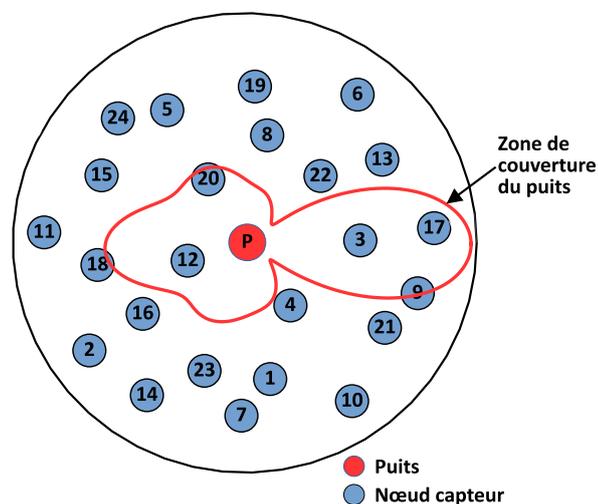


Figure 3.2 – Zone de couverture du puits équipé d'une antenne directionnelle pour une position donnée du faisceau de l'antenne

3.3 Choix de la méthode d'accès

3.3.1 Caractéristiques dues à l'usage d'antennes directionnelles

Les antennes directionnelles apportent certains avantages, tels que l'augmentation de la portée de transmission [73, 74], l'augmentation de la durée de vie du réseau [75] et l'augmentation de la capacité du réseau en termes de débit. Cependant, pour des méthodes d'accès type CSMA/CA, l'utilisation des antennes directionnelles peut engendrer ou aggraver certains problèmes connus dans les réseaux sans fil tels que le problème des terminaux sourds [74] et le problème des terminaux cachés [76].

Dans la bibliographie, le lobe d'une antenne directionnelle est souvent représenté à

l'aide d'un triangle sur les figures 3.3, 3.4 et 3.11

3.3.1.1 Problème des terminaux cachés

Le problème des terminaux cachés est un problème de transmission qui survient lorsque deux stations ou plus qui sont hors de portée l'une de l'autre, émettent simultanément vers un destinataire commun. Un exemple est illustré dans la figure 3.3 où le destinataire commun est le puits. Dans cet exemple, les nœuds A et B sont couverts par le faisceau du puits mais hors de portée l'un de l'autre. Le nœud A n'étant pas à portée du nœud B ne sera pas capable de détecter les activités du nœud B. Lorsque le nœud B est en train de transmettre ses données, le nœud A peut décider de transmettre à son tour, ceci va générer une collision au niveau du puits.

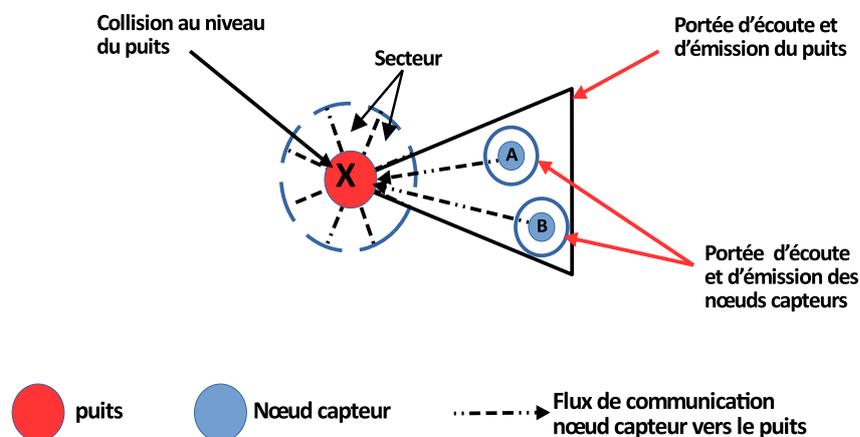


Figure 3.3 – Problème du terminal caché dans le cas d'une antenne directionnelle

3.3.1.2 Problème des terminaux sourds

Le problème de terminaux sourds se produit lorsque l'émetteur ne parvient pas à communiquer avec le récepteur prévu, car l'antenne de ce dernier est orientée dans une autre direction. La figure 3.4 dépeint un exemple de ce problème. Dans cette illustration, le puits oriente le faisceau de son antenne vers le nœud B et devient incapable de recevoir les messages envoyés par le nœud A. Dans ce cas, le puits est dit sourd aux transmissions du nœud A.

Ces problèmes peuvent impacter sérieusement les performances de certains mécanismes tels que le CSMA/CA qui est conçu pour bien fonctionner lorsque les nœuds sont capables de détecter l'occupation du médium.

👉 Afin de résoudre ces différents problèmes susmentionnés et de bénéficier pleinement des avantages apportés par les antennes directionnelles, de nombreux protocoles ont été proposés.

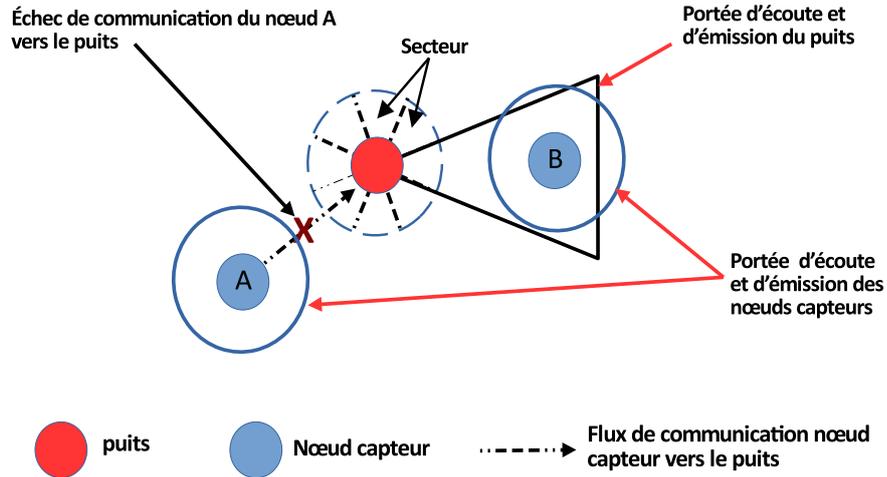


Figure 3.4 – Problème du terminal sourd dans le cas d’une antenne directionnelle

3.3.2 Classification des protocoles MAC

Différentes propositions de protocole ont été faites pour l’accès au médium et peuvent être classées en deux grands groupes comme le montre la figure 3.5 : les protocoles basés sur l’utilisation d’un canal généralement fréquentiel (mono-canal) et ceux utilisant plusieurs canaux (multi-canal). Les protocoles MAC mono-canaux peuvent à leur tour être regroupés en protocoles dont l’accès au médium est basé sur la contention, les protocoles sans contention et les protocoles combinant ces deux notions (hybrides).

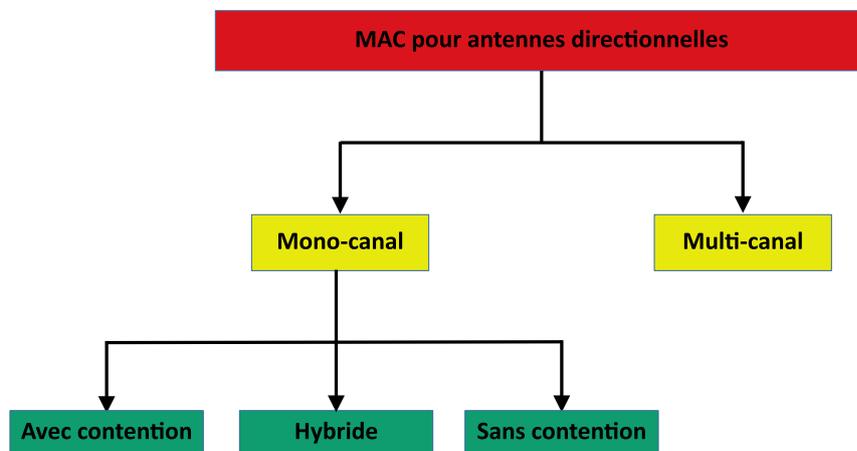


Figure 3.5 – Classification de protocoles MAC utilisant des antennes directionnelles

Dans le cadre de cette thèse, nous allons nous focaliser sur les protocoles mono-canaux, objet de cette étude.

3.3.3 Protocoles mono-canal

Nous présentons ici quelques protocoles proposés pour mieux exploiter les avantages liés à l’utilisation des antennes directionnelles et utilisant un seul canal fréquentiel.

3.3.3.1 Protocoles MAC avec contention

Dans [77], les auteurs ont proposé un protocole MAC pour les WBAN (*Wireless Body Area Networks*) basé sur une topologie en étoile où le coordinateur est équipé d'une antenne adaptative multi-faisceau. L'antenne utilisée a la particularité de gérer plusieurs faisceaux en parallèle (cf. figure 3.6) et de pouvoir décoder des trames arrivant simultanément avec un léger décalage comme indiqué la figure 3.7. Ceci permet au coordinateur de pouvoir établir des communications sur chacun de ses faisceaux en même temps. Le protocole associé est basé sur l'Aloha slotté, le temps est divisé en slots de temps. Dans chaque slot, le coordinateur peut recevoir plusieurs messages envoyés par les nœuds autour de l'étoile de façon simultanée comme montré dans la figure 3.7. Les auteurs ont montré que l'utilisation d'une antenne adaptative multifaisceaux au niveau du coordinateur permet de réduire le temps d'accès des nœuds au coordinateur pour l'envoi de messages urgents.

De telles antennes permettant des multi-réceptions nécessitent un processus de traitement de données complexe et n'est pas adaptable pour les réseaux capteurs sans fil avec des nœuds limités en ressource de calcul. De plus dans l'évaluation de cette solution, les trames de données employées sont plutôt longues car leur taille moyenne est de 128 octets ce qui peut augmenter le temps de transmission des données dans un réseau de capteurs.

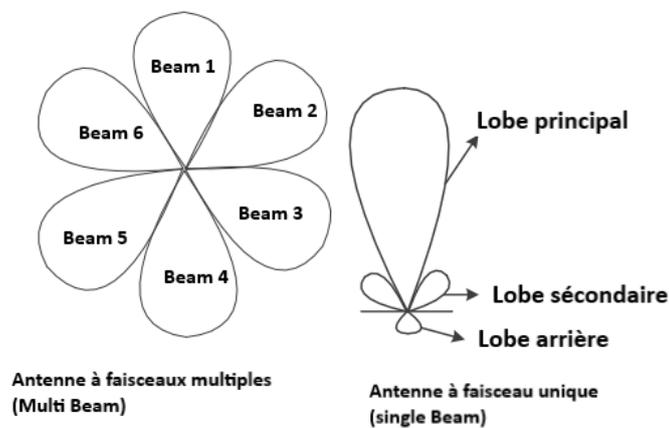


Figure 3.6 – Diagramme de rayonnement d'une antenne adaptative multi-faisceau [77]

Schandy et al. [78] ont introduit de nouvelles optimisations de la pile protocolaire afin d'exploiter pleinement les avantages liés à l'utilisation d'antennes directionnelles. Ils ont adapté la méthode d'accès au médium, le protocole de routage et les mécanismes de découverte de voisinage pour supporter des communications directionnelles. Ils ont proposé DirMac, un protocole MAC qui prend entièrement en charge les communications directionnelles basé sur ContikiMac [79] pour l'implémentation. Trois différentes méthodes heuristiques (BestDir, MinDir et OptDir) ont été proposées pour optimiser les performances des protocoles. L'évaluation proposée a montré que des

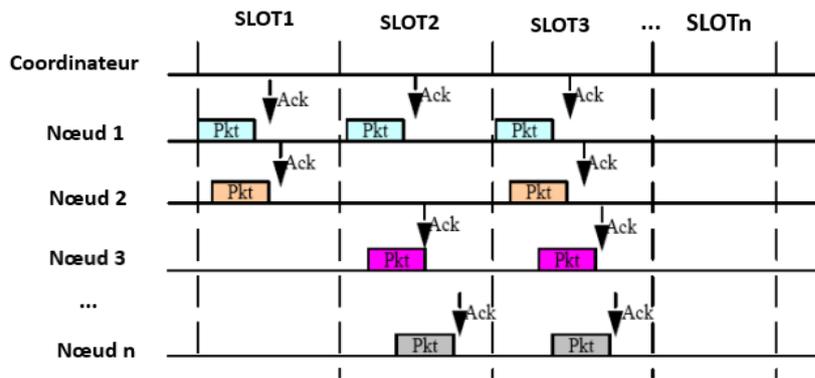


Figure 3.7 – Processus de réception en parallèle de plusieurs trames [77]

optimisations au niveau des couches MAC et de routage sont nécessaires afin de bénéficier pleinement des avantages de l'utilisation d'antennes directionnelles pour une application de collecte. Cependant, les calculs des heuristiques proposées sont effectués hors ligne en utilisant les informations issues lors de la découverte de voisinage. Aussi, DirMac ne supporte pas de trafic élevé et n'assure pas des transmissions déterministes.

Dans [80], DAaS (Directional Antenna at Sink) est un protocole proposé pour étendre la durée de vie des réseaux de capteurs sans fils. DAaS est un protocole à économie d'énergie basé sur S-MAC [81] qui utilise une antenne à faisceau commutable au niveau du puits afin d'augmenter la portée et le nombre de nœuds (relais) à un saut du puits (figure 3.8).

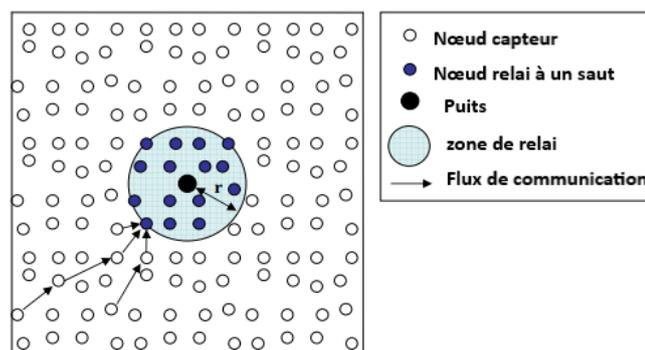


Figure 3.8 – Distribution des nœuds traitée dans [80]

Dans DAaS, le puits détermine son calendrier (SBPS : Sink Beam Pattern Scheduling) d'activité en tenant compte du temps de rotation des secteurs (*beams*) de son antenne comme illustré par la figure 3.9. Il diffuse ce calendrier à ses nœuds voisins (relais). Les nœuds relais fixent leur activité en fonction du calendrier du secteur dans lequel ils se trouvent. A leur tour, les nœuds relais calculent leur calendrier et le diffusent dans leur voisinage. Un nœud non relais qui reçoit plusieurs calendriers de différents nœuds, va suivre tous ces calendriers.

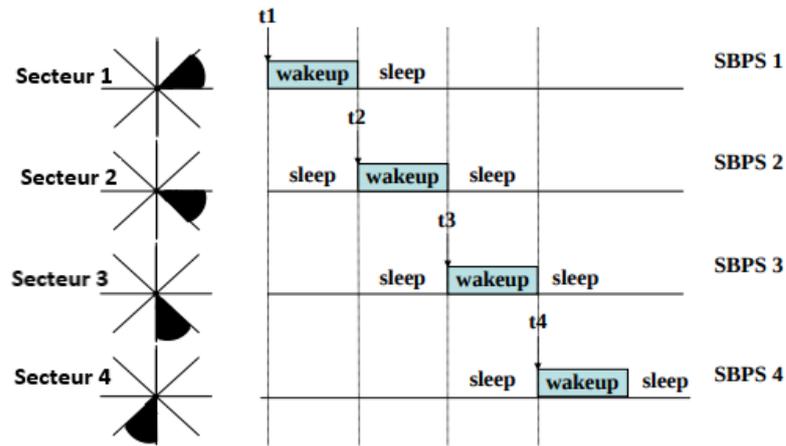


Figure 3.9 – Calendrier d’activité des nœuds en fonction de l’orientation de l’antenne du puits [80]

DU-MAC (Directional Ultra Wide Band MAC) [82] est un protocole proposé pour les réseaux de capteurs sans fil ultra Wide Band (UWB) où toutes les communications sont directionnelles. Dans DU-MAC, les noeuds dans un état idle font tourner continuellement leur antenne sur les 360 degrés. Un mécanisme de découverte nommé *directional blind discovery*, permet à un noeud de découvrir son voisinage. Si un noeud souhaite échanger avec un voisin, il envoie de façon répétitive des préambules dans la direction de ce voisin pendant une durée T correspondant au temps nécessaire à un noeud en état idle de tourner autour de son antenne. Si le voisin reçoit le préambule, il bloque la rotation de son antenne jusqu’à la fin de l’échange indiquée par la transmission d’un Ack. Cependant, DU-MAC utilise une couverture directionnelle-omni qui limite la portée de la transmission directionnelle à celle d’une antenne omnidirectionnelle comme le montre la figure 3.10.

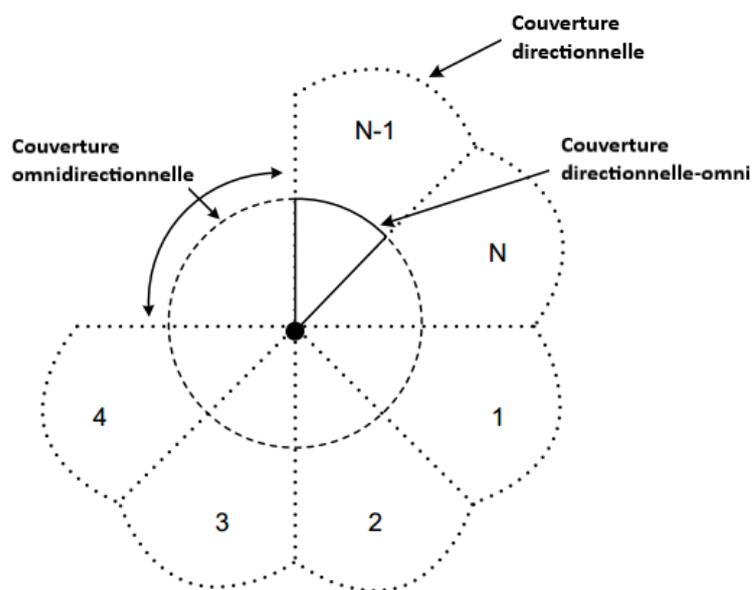


Figure 3.10 – Diagramme de rayonnement de l’antenne dans DU-MAC [82]

3.3.3.2 Protocoles MAC sans contention

DiS-MAC (Directional scheduled MAC) [83] est un protocole proposé pour les réseaux de capteurs sans fils synchronisés disposés sous forme linéaire où les nœuds utilisent des antennes directionnelles. Dans Dis-Mac le temps d'activité des nœuds est divisé en deux parties T1 et T2 comme le montre la figure 3.11. Pendant la partie T1, les nœuds impairs transmettent leurs trames aux nœuds pairs. A T2, les pairs envoient leurs trames aux nœuds impairs. Toutes les transmissions suivent le sens de circulation du trafic qui va du nœud situé à l'extrémité au puits.

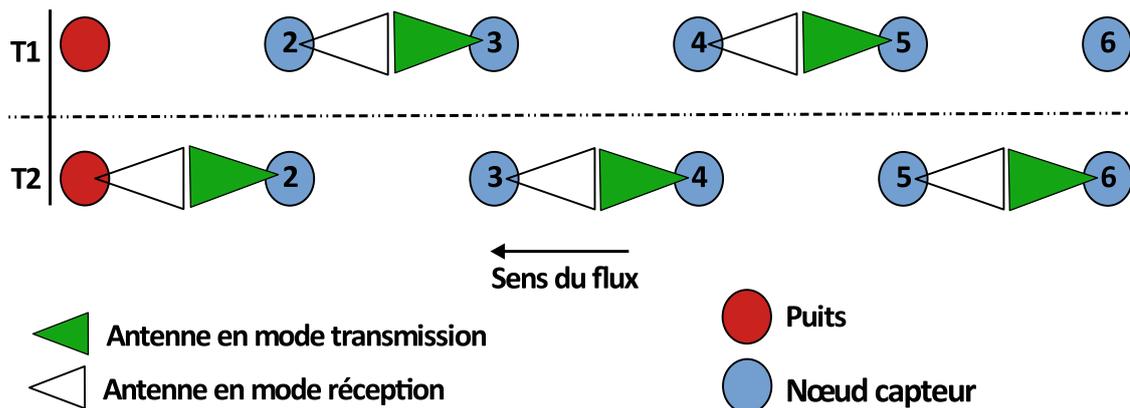


Figure 3.11 – Découpage temporel de DiS-MAC

Un protocole MAC (DA-MAC) a été proposé dans [84] pour utiliser les antennes directionnelles dans un RCSF. Ce protocole fonctionne en deux phases : une première phase où les nœuds découvrent leur voisinage et calculent un échéancier de transmissions directionnelles avec leurs voisins et une seconde phase pour la transmission de paquets. Durant la première phase, les nœuds se découvrent entre eux en utilisant des communications omnidirectionnelles. Une fois la découverte faite, chaque nœud calcule localement un échéancier de transmission et échange ses informations avec ses voisins en accédant au canal grâce au CSMA/CA usuel. Ce processus d'échange continue sur plusieurs cycles jusqu'à ce que l'échéancier de chaque nœud se stabilise. Une fois la stabilité atteinte, les nœuds entrent dans la seconde phase et utilisent des communications directionnelles pour le reste du fonctionnement du réseau.

Dans ce protocole, le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des échéanciers peut être très long et difficile à borner. De plus, le calcul local de l'échéancier pour chaque nœud est une opération difficile en raison de la complexité des nœuds capteurs, des capacités de traitement et des tailles de mémoire limitées. Aussi, en plus des antennes directionnelles, ce protocole suppose également la disponibilité d'une antenne omnidirectionnelle pour la phase de découverte de voisinage.

PMAC (Polling Based Mac Protocol) [85] a été proposé pour les réseaux mobiles sans fil ad hoc, où chaque nœud découvre son voisinage à un saut. Le protocole pro-

pose un mécanisme qui planifie les communications directionnelles entre les noeuds capteurs. PMAC divise le temps en une supertrame. Chaque trame est divisée en 3 segments comme le montre la figure 3.12 :

- Un segment recherche (Search) pour permettre aux nœuds de découvrir des nouveaux voisins. Deux nœuds qui se découvrent vont s'accorder sur un slot libre dans le segment de Polling dans lequel ils vont communiquer périodiquement.
- Un segment de Polling que les nœuds vont utiliser pour maintenir le lien avec les voisins découverts et échanger la planification des transactions de données dans le segment de transfert de données.
- Un segment de transfert plus long que les deux autres segments est utilisé pour la transmission des données.

Afin de découvrir de nouveaux voisins, les nœuds pointent leur antenne dans une direction choisie aléatoirement dans chaque slot pendant le segment recherche. Ce mécanisme peut nécessiter un temps important pour permettre aux nœuds de se découvrir tous.

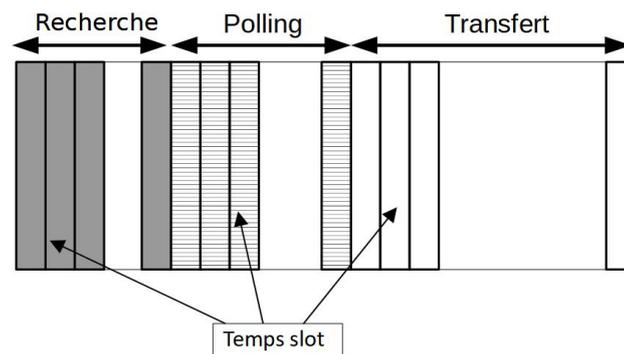


Figure 3.12 – Structure de la supertrame de PMAC [85]

3.3.3.3 Protocoles MAC hybrides

SAMAC (Sectorized-Antenna Medium Access Control) est une pile protocolaire complète (*full stack*) proposée dans [86] pour des réseaux de capteurs sans fil où tous les nœuds disposent d'une antenne sectorielle ou d'une antenne à faisceaux commutés. Après la découverte de voisinage, le puits utilise les différentes informations récoltées pour :

- la création de la table de routage ;
- la formation des groupes comme illustré par la figure 3.13. Un groupe étant composé d'un ensemble de nœuds partageant le même temps slot ;
- le calcul de l'échéancier de communication des différents groupes formés ;

— la diffusion de l'échéancier sur l'ensemble du réseau.

Dans SAMAC, afin de réduire la longueur de la supertrame, le puits alloue uniquement un temps de communication aux groupes selon la méthode TDMA. Les nœuds à l'intérieur de chaque groupe accèdent au canal en utilisant CSMA/CA. La construction des groupes (segmentation) permet à SAMAC de réduire la contention entre les nœuds dans le réseau.

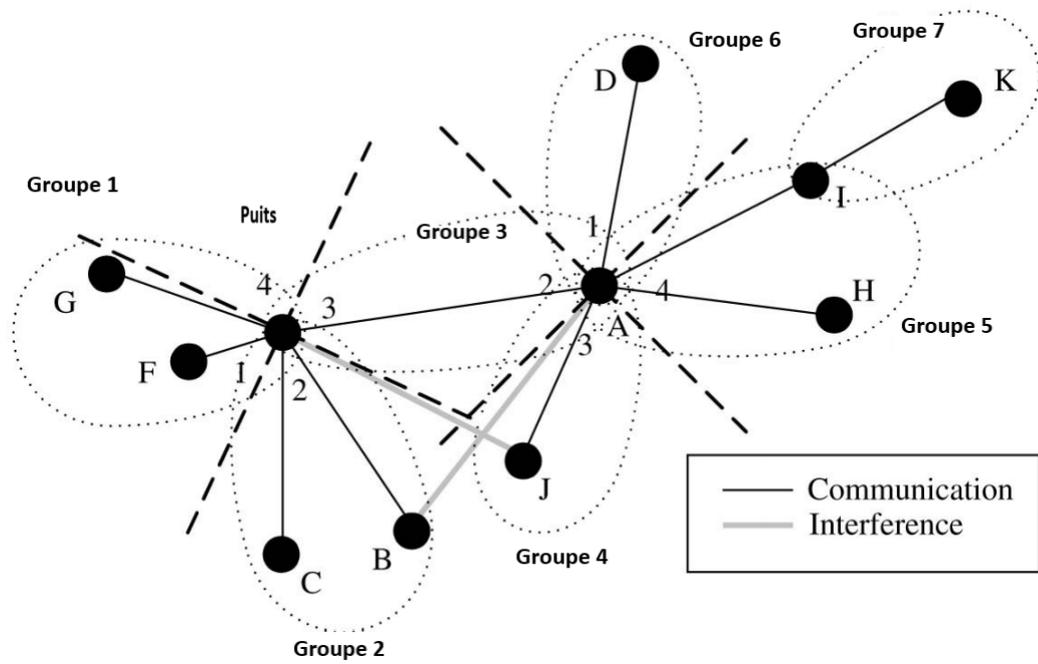


Figure 3.13 – Formation de groupes dans SAMAC [86]

Dans [87] les auteurs ont proposé DCD-MAC, un protocole orienté économie d'énergie pour un réseau de capteurs sans fil à structure arborescente. Dans DCD-MAC, tous les nœuds sont supposés synchronisés avec leurs voisins et connaissent également le prochain saut vers le puits. DCD-MAC divise le temps d'accès au canal en trames et l'activité des nœuds capteurs alternent périodiquement leur activité entre l'état actif et l'état passif. Chaque trame comporte trois phases : la synchronisation, l'allocation et le transfert de données. Chaque phase comporte un nombre fixe de temps slots (notés par n_1 , n_2 et n_3 respectivement), comme le montre la figure 3.14.

Durant la phase de synchronisation, chaque temps slot est subdivisé en quatre sous-slots : P1, P2, S1 et S2. Dans le premier sous-slot P1, chaque nœud transmet un signal (*pilot tone*) à son nœud parent en mode directionnel s'il a des données à transmettre; sinon, il attend de recevoir un signal de l'un de ses nœuds enfants en mode omnidirectionnel. Lorsqu'un signal est reçu par un nœud parent, ce dernier répond avec un autre signal dans le sous-slot P2. Ensuite, le nœud enfant et son nœud parent échangent le nombre requis de temps slots pour la phase de transfert de données et s'accordent un temps slot libre en commun dans la phase d'allocation pendant les sous-slots S1 et S2. Chaque temps slot dans la phase d'allocation est divisé à son tour en deux sous-slots :

A1 et A2. Dans le sous-slot A1, le nœud enfant envoie la liste de ses slots libres à son nœud parent; dans le sous-slot A2, le nœud parent renvoie la liste des slots alloués à partir de ses propres slots libres et de ceux du nœud enfant. Enfin, pendant la phase de transfert des données, le nœud enfant et le nœud parent transmettent les données dans les slots alloués en utilisant le mécanisme de réservation de canal RTS/CTS afin de réduire les risques de collisions.

Cette solution nécessite à la fois des antennes directionnelles et omnidirectionnelles mais aussi des synchronisations temporelles délicates.

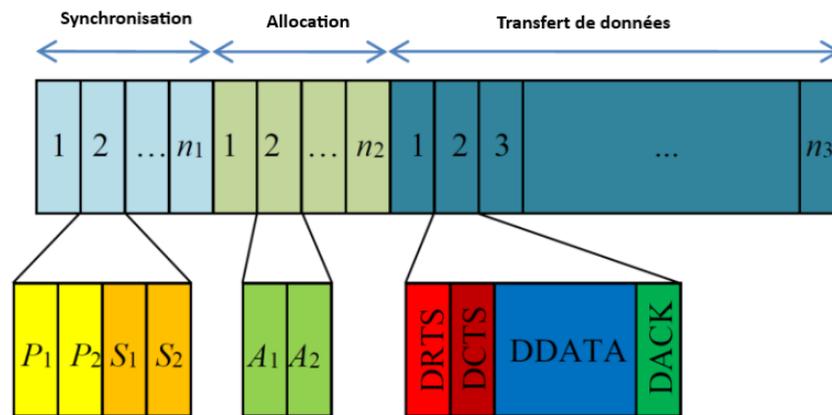


Figure 3.14 – Structure de la supertrame de DCD-MAC [87]

Dans [88], un protocole à économie d'énergie HEC-MAC couplant le mécanisme du *duty cycle* et l'utilisation d'antennes à faisceaux commutés a été proposé. HEC-MAC est constitué de deux grandes phases :

- une première phase de démarrage du réseau (*network start up*) durant laquelle chaque nœud choisit un temps de transmission (qu'il utilisera périodiquement pour transmettre ses données) puis découvre la localisation de ses voisins et par quel secteur il peut les atteindre.
- Une deuxième phase appelée régime permanent (*Steady state*), pendant laquelle les informations recueillies lors du démarrage du réseau sont utilisées pour optimiser les transmissions.

Dans HEC-MAC, les nœuds ne sont réveillés que lorsqu'une communication doit avoir lieu et seul le secteur d'antenne concerné est activé.

Cependant, les auteurs ne précisent pas le mécanisme qui permet aux nœuds équipés d'une antenne à faisceau commutable de communiquer pendant la phase d'échange durant le temps de transmission choisi.

Tableau 3.2 – Comparaison de protocoles MAC pour antennes directionnelles

Topologie	Références	Synchronisation des échanges	Déterminisme des échanges	Protocole de découverte de voisinage	Taille des données échangées (octet)	Taille du réseau en simulation (nombre de nœuds)	Zone de couverture	Type d'antennes
Topologie en étoile	Dir_BAN MAC [77]	oui	non	non	128	25	2 m x 1 m	Antennes à faisceaux multiples
	PMAC [85]	oui	non	oui	512	40	1000 m x 1000 m	Antennes à faisceaux commutés
	DU-MAC [82]	non	non	oui	127	dizaine	20 m x 20 m	Antennes à faisceaux commutés
Topologie linéaire	DiS-MAC [83]	oui	oui	non	6,25 - 68,75	2 - 50	250 m entre les nœuds	Antennes directionnelles
Topologie multi-saut	DirMac [78]	non	non	oui	44	10 - 30	100 m x 100 m	Antennes à faisceaux commutés (SPIDA antenna)
	DAas [80]	oui	non	–	80	144	120 m x 120 m	Antennes à faisceaux commutés
	DA-MAC [84]	oui	non	non	-	200	400 m x 400 m	Antennes sectorielles (6 secteurs) et Antennes omnidirectionnelles (pour la phase de découverte de voisinage)
	SAMAC [86]	oui	non	oui	40	100	100 m x 100 m	Antennes à faisceaux commutés
	DCD-MAC [87]	oui	oui	oui	64	100 - 1000	1000 m x 1000 m	Antennes sectorielles et Antennes omnidirectionnelles (pour la phase de découverte de voisinage)
	HEC-MAC [88]	oui	non	non	60	16 - 36	100 m x 100 m	Antennes à faisceaux commutés

3.3.3.4 Bilan comparatif

Le tableau 3.2 permet une comparaison entre des protocoles que nous avons présentés. Nous pouvons observer des protocoles [80, 84, 86, 87, 88] utilisant une configuration réseau basée sur le multi-saut. Ces protocoles vont hériter des problèmes de latence rencontrés avec cette topologie multi-saut et ne pourront pas satisfaire les besoins de certaines applications dont les données ont une contrainte temporelle (c'est-à-dire qu'elles doivent être délivrées le plus rapidement possible). La majorité des propositions présentées ont été faites pour des configurations où tous les nœuds sont équipés d'une antenne directionnelle, ce qui peut s'avérer complexe dans leur mise en place car ils nécessitent de repenser tous les protocoles MAC et routages existants. Dans [77] et [80], seul le puits est équipé d'une antenne directionnelle et les autres nœuds utilisent des antennes omnidirectionnelles.

Cependant, dans ces deux propositions [77, 80], l'accès au médium des nœuds se fait en utilisant une approche aléatoire. L'augmentation de la portée des liens radio permet au puits de couvrir plus de nœuds qui potentiellement peuvent être hors de portée les uns des autres, ce qui peut rendre inefficace certaines méthodes telles que le CSMA/CA comme montré dans la section 3.3.1. De plus, la nature aléatoire du CSMA/CA le rend moins efficace pour des transmissions déterministes requises pour des applications industrielles et pour des transmissions de trames courtes.

La taille des trames utilisée dans [77, 80, 82, 85] est grande pour un réseau de capteurs. Pour des classes comme celle décrite dans [43] où par exemple les mesures sont de 1 octet et sont prises à chaque 200 ms, si ces mesures doivent être acheminées au puits dans un délai de 500 ms, alors des tailles de 80 octets pour les trames sont impossibles à satisfaire.

Dans notre contribution, pour bénéficier de portées radio longues, une antenne directionnelle est montée seulement au niveau du puits qui porte également toute l'intelligence du réseau. La collecte des mesures sera basée sur une approche déterministe afin de satisfaire les contraintes temporelles des mesures. Nous présenterons notre contribution dans les sections qui vont suivre.

3.4 Présentation globale de l'approche proposée

Pour la collecte de données dans un réseau de capteurs sans fil en étoile, avant le processus de collecte lui-même, nous proposons d'abord une démarche préalable de découverte de voisinage. Dans le domaine des RCSF, le voisinage d'un nœud est la connaissance de l'ensemble des liens opérationnels que ce nœud possède pour échanger avec ses voisins. Un voisinage est généralement défini à un saut quand ce nœud dispose d'un lien partagé avec un voisin, deux sauts si l'échange doit impliquer un nœud intermédiaire à un saut. Cette connaissance est usuellement stockée par les nœuds au moyen de tables de voisinage.

C'est pourquoi nous proposons de généraliser la définition d'une table de voisinage comme la liste des voisins et des orientations de l'antenne qui permettent de les atteindre. Cette table devient alors une table de connectivité. Il est donc important que le puits connaisse la liste de ses voisins à un saut mais surtout il est très important qu'il sache comment disposer d'un lien opérationnel car l'étoile est une topologie émulée. Le fait qu'un nœud autre que le puits connaisse son voisinage n'a pas d'intérêt direct pour la collecte.

3.4.1 Phase de découverte de voisinage du puits

L'un des problèmes majeurs qui survient lorsqu'on utilise une antenne directionnelle est de savoir comment découvrir tous les liens de communication possibles avec les nœuds voisins. Le but principal de cette phase est de permettre au puits équipé d'une antenne à faisceau commutable de connaître son voisinage, de savoir dans quelle(s) direction(s) pointer le faisceau pour communiquer avec un nœud capteur donné de l'étoile. A l'issue de cette phase, le puits dispose d'une table de correspondance secteurs et nœuds capteurs. Celle-ci est usuellement appelée table de connectivité, et sera utilisée par le puits pour construire un échancier utilisé à phase de collecte de données.

Dans la littérature des réseaux sans fils utilisant des antennes directionnelles, plusieurs travaux ont été réalisés en considérant la découverte de voisinage comme un problème à part entière.

Dans [89], les auteurs ont comparé deux mécanismes de découverte de voisinage : l'un utilisant des antennes directionnelles et l'autre des antennes omnidirectionnelles. Ils ont constaté essentiellement deux choses :

- La topologie réseau obtenue lors de la découverte de voisinage pour un réseau exploitant des antennes directionnelles est intéressante et plus riche. En effet elle est plus complète quant au nombre de nœuds découverts en raison de la portée de ces antennes qui permettent au message utilisé pour la découverte de parcourir plus de distance et d'atteindre plus de nœuds.
- L'usage de telles antennes rend la méthode d'accès CSMA inadaptée en raison des collisions.

Des algorithmes probabilistes de découverte de voisinage ont été proposés dans [90] pour des réseaux équipés d'antennes directionnelles. Les auteurs ont discuté de l'interaction entre la largeur du faisceau des antennes et le temps Δt consacré à un nœud pour découvrir ses voisins. Il s'agit de trouver un compromis entre ces deux paramètres pour le processus de découverte du voisinage : lorsque le temps Δt est petit, il est montré qu'un faisceau large est préférable car il permet à un grand nombre

de nœuds d'être couverts et d'être découverts. Cependant, si le temps Δt est grand, des faisceaux plus étroits constituent un bon choix. Un faisceau d'une grande largeur couvre une zone de transmission plus grande et augmente la connectivité. Ceci a pour conséquences :

- de causer un plus grand risque de collisions des échanges du processus de découverte qu'un faisceau de largeur moindre ;
- mais de présenter l'avantage de permettre à un plus grand nombre de nœuds de recevoir simultanément les échanges nécessaires à leur découverte.

Les auteurs de [91] ont proposé un protocole de découverte de voisinage avec détection de collisions exploitant des antennes directionnelles basé sur un mécanisme de négociation en deux étapes (*two way handshake*). Dans leur protocole, le temps de découverte est divisé en créneaux temporels (slots), et les nœuds sont supposés être synchronisés. Chaque slot est divisé en deux compartiments, et la durée de chacun d'eux est égale au temps nécessaire pour transmettre (ou recevoir) un paquet de découverte du processus de découverte. Au début de chaque slot, un nœud transmet avec une probabilité P_t ou écoute avec une probabilité $(1 - P_t)$ dans une direction choisie aléatoirement. Ce choix aléatoire de direction peut entraîner des temps de découverte longs si le faisceau de l'antenne des nœuds est étroit.

Dans [92, 93], deux protocoles de découverte de voisinage (SAND et QSAND) ont été proposés. Ces protocoles ne nécessitent ni information de localisation ni synchronisation temporelle des nœuds. Le fonctionnement de ces protocoles est fait de telle sorte qu'un seul nœud à la fois procède à la découverte de ses potentiels voisins. Une fois sa découverte finie, ce nœud passe la main pour qu'un autre nœud procède à son tour. La sérialisation de ce processus de découverte est réalisée en utilisant le mécanisme de circulation d'un jeton qui permet au nœud qui le détient d'exécuter sa part du processus. Ce processus de découverte prend fin lorsque le jeton revient au nœud initiateur (le puits) de la phase de découverte.

DANDi (*Dynamic Asynchronous Neighbor Discovery protocol for Directional Antennas*) a été proposé dans [94] et est basé sur le mécanisme de sérialisation de SAND [92]. DANDi incorpore une méthode de détection de collisions et un mécanisme dynamique de résolution de collisions. Le processus de découverte est organisé en round. Au début de chaque round le nœud, qui découvre ses voisins, envoie un message de sondage qui contient le nombre de slots de temps accordés pour la réponse des nœuds voisins. En fonction de l'usage fait de chaque slot à la fin du round, le nœud qui découvre ses voisins peut grâce au mécanisme de résolution de collisions déterminer si un round supplémentaire est nécessaire ou pas.

Un protocole collaboratif de découverte de voisinage pour les réseaux de capteurs utilisant des antennes directionnelles est proposé dans [95], pour lequel les nœuds peuvent échanger les informations de découverte avec d'autres voisins. Les auteurs ont montré par simulations que grâce à la collaboration entre les nœuds, le délai de découverte est considérablement réduit.

✎ Dans la plupart des protocoles cités, tous les nœuds du réseau sont équipés d'une antenne directionnelle. Dans notre travail, seul le puits est équipé d'une antenne à faisceau commutable, ceci pour permettre à notre solution d'être compatible avec le matériel (nœuds capteurs) existant sur le marché. Pour les protocoles de découverte basés sur la sérialisation, le temps nécessaire au puits pour découvrir tous les nœuds peut être considérable si la densité du réseau est élevée. Le choix que nous avons fait d'exploiter une topologie en étoile permet de réduire le temps nécessaire pour découvrir tous les nœuds à un saut de ce réseau, car la sérialisation de la découverte est orchestrée par le puits d'une part et la découverte de voisinage des nœuds capteurs n'est pas nécessaire à la collecte des données d'autre part. Les différentes variantes de notre approche seront présentées au chapitre 4.

A la fin de la phase de découverte le puits dispose des informations nécessaires au pilotage de la connectivité de l'étoile, c'est-à-dire qu'il sait (à partir d'une table de connectivité) quelle est ou quelles sont les orientations de son antenne qui lui permettent d'atteindre un nœud donné.

3.4.2 Phase de collecte

Une fois la phase de découverte de voisinage terminée, le puits dispose grâce au contenu de la table de connectivité de l'ensemble des solutions qui permettent d'atteindre un nœud donné. Si pour un nœud N_i donné cette solution est unique, le choix de l'orientation de l'antenne correspondante s'impose. Dans le cas où le nœud N_i peut être atteint de différentes façons (il appartient à plusieurs secteurs, c'est-à-dire à dire plusieurs topologies temporaires), un choix est à faire. Les critères qui conduisent à ce choix sont multiples. Il peut s'agir par exemple de choisir systématiquement le lien radio de meilleure qualité ou d'optimiser le temps de collecte ou de l'énergie des nœuds. L'ensemble des solutions permet au puits d'établir ensuite un échancier qui va être utilisé pour interroger régulièrement les nœuds capteurs pour collecter leurs données. Une telle collecte régulière, et pour des applications avec une contrainte de livraison des données, est basée sur le mécanisme de Polling-Selecting.

Le Polling-Selecting est un terme générique qui désigne une classe de protocoles utilisables pour des topologies de réseaux en étoile (typiquement les dispositifs de contrôles d'accès). Dans ce type de protocoles, un nœud (généralement le puits) exécute régulièrement un échancier pour interroger (Polling), voire passer la main (Selecting) aux nœuds situés aux extrémités des branches comme illustré par la figure 3.15. La robustesse de ce type de solutions repose sur celle de son organe central. Les

contraintes de latence et de débit sont prises en compte au niveau de l'ordonnancement exécuté au cœur de l'étoile. Ce mécanisme a influencé le séquençement des échanges de Bluetooth, où le Maître orchestre les échanges avec jusqu'à 7 de ses Esclaves actifs comme dans [96]. Dans [97], le mécanisme de polling a été employé pour la collecte de données pour une application industrielle utilisant les réseaux de capteurs sans fils.

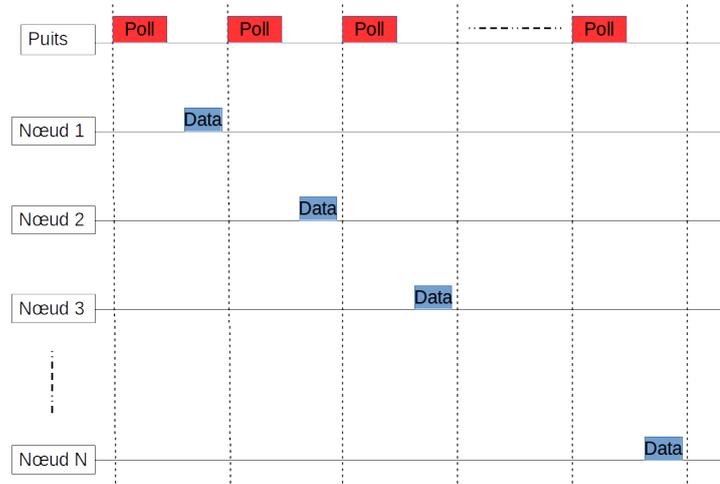


Figure 3.15 – Exemple de sollicitation des nœuds par le puits

Un protocole MAC basé sur le principe de polling a été proposé dans [98] pour un réseau en étoile constitué d'un nœud central (master qui joue le rôle de puits et de chargeur) et de nœuds capteurs. Dans [98], comme le montre la figure 3.16, le master peut à la fois interroger les nœuds capteurs pour collecter leurs données ou les recharger si leur niveau d'énergie tombe en dessous d'un seuil prédéfini. Le nœud sollicité par le master inclut dans sa réponse son niveau énergie, ce qui permettra au puits de savoir quand le recharger.

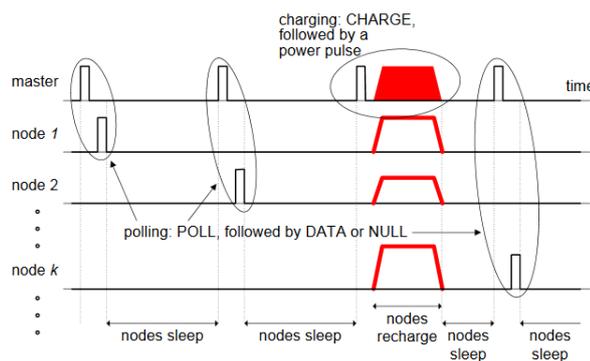


Figure 3.16 – Exemple de séquençement des transmissions entre le puits et les nœuds [98]

3.5 Démarche de simulation

Dans cette section, nous décrirons les différentes méthodes outils et paramètres considérés pour évaluer notre contribution.

3.5.1 Outil de simulation et modèle de propagation

3.5.1.1 Choix de l'outil

Plusieurs travaux ont été évalués en utilisant des simulateurs réseau tels que NS-2, NS-3, OMNET++/CASTALIA. Mais l'inconvénient majeur de ces simulateurs est qu'ils ne permettent pas d'émuler le comportement du matériel et/ou du système d'exploitation. Pour ces raisons, nous avons choisi Cooja.

Cooja est un simulateur de réseau basé sur Java et capable d'émuler plusieurs plateformes. Il supporte notamment les plateformes telosB, z-mote, micaz, etc... Il est beaucoup utilisé pour simuler des nœuds capteurs exécutant les systèmes Contiki OS [99], TinyOS [100], et RIOT OS [101]. Par défaut, Cooja ne prend en charge que les antennes omnidirectionnelles à diagramme de rayonnement fixe. Nous avons dû modifier son comportement en intégrant le diagramme de rayonnement de l'antenne à faisceaux commutés développée par l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue qui est basée sur la technologie FSS [71].

Nos différentes contributions ont été implémentées en utilisant le système d'exploitation Contiki OS. Contiki est un système d'exploitation léger à code source ouvert conçu pour fonctionner sur des dispositifs matériels limités en mémoire, en bande passante de communication et en puissance de traitement. Contiki est développé en C, il est donc hautement portable sur différentes architectures comme la MSP430 de Texas Instruments.

3.5.1.2 Choix du modèle de propagation

Nous avons utilisé le modèle de propagation *Log-normal Shadowing* qui est une extension du modèle *Log-distance Path Loss*. Le modèle Log-normal Shadowing permet d'estimer la puissance reçue en fonction de la distance d et aussi du coefficient d'atténuation de propagation η qui donne une idée de la nature et du nombre d'obstacles rencontrés dans l'environnement entre l'émetteur et le récepteur. Le modèle *Log-distance Path Loss* ne tient pas compte des fluctuations de l'environnement dues à des déplacements d'obstacles à un instant donné par exemple. Pour introduire les variations environnementales, le modèle de Log-normal Shadowing ajoute un facteur correctif sous la forme d'une variable aléatoire X_σ qui suit une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'un écart type σ dB :

$$X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Ainsi la puissance reçue en fonction de la distance $P_r(d)$ se formule comme suit :

$$P_r(d)[dB] = P_r(d_0)[dB] + 10 * \eta \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + P_t + G_N + G_P(\theta) + X_\sigma \quad (3.2)$$

Avec $P_r(d_0)$: Puissance de référence à la distance d_0 (en général $d_0 = 1$ m)

P_t : la puissance transmise

θ : angle en degré entre le lien radio et l'axe du lobe de l'antenne du puits

G_P : gain de l'antenne du puits en fonction de l'angle θ

G_N : gain de l'antenne d'un nœud (par défaut 0 ou 1 dBi)

Dans cette thèse, nous cherchons à simuler le comportement de notre solution dans un environnement confiné et avec des obstacles. Pour le choix de la valeur η a été fait en s'inspirant des travaux de thèse de Sabri Benferhat [102]. Les valeurs de η en fonction du type de l'environnement sont présentées dans le tableau 3.3. Nous avons choisi l'exposant $\eta = 2, 3$ dans nos différentes simulations.

Tableau 3.3 – Valeur du coefficient d'atténuation pour le modèle Path Loss [102]

Environnements	η
Espace libre	2
Zone urbaine	2,7 à 3,5
Zone urbaine avec diffraction	3 à 5
Immeuble sans obstacle	1,6 à 1,8
Immeuble avec obstacles	4 à 6
En intérieur avec obstacles	2 à 3

3.5.2 Prise en compte des spécificités des antennes utilisées

Dans nos travaux de simulation, les antennes omnidirectionnelles sont considérées comme parfaites. C'est le modèle de propagation qui vient d'être présenté qui compense cette vision idéale des choses. Pour l'antenne directionnelle du puits, considérons ce qui se passe pour le nœud N_i localisé en (x, y) en coordonnées cartésiennes et (R, α) en coordonnées polaires. En fonction de l'orientation du lobe de l'antenne actif, un angle θ est calculé en fonction de α . Cet angle nous permet de considérer le gain de l'antenne dans cette direction à partir d'un tableau de points issu de la figure 4.2 qui sera présentée dans le chapitre suivant. Ceci nous permet de renseigner $G_P(\theta)$ dans la formule (3.2).

3.5.3 Choix des topologies considérées

Dans nos différentes simulations, nous considérons une certaine topologie réseau. Pour obtenir un jeu de topologies, certaines règles sont utilisées pour les générer. Les nœuds sont répartis sur une zone de déploiement générique carrée qui est divisée en

quatre quadrants. Le positionnement aléatoire des nœuds est utilisé pour rester proche d'un positionnement réaliste. Cependant, pour éviter d'avoir des endroits moins couverts que d'autres, des superpositions et des nœuds trop éloignés les uns des autres, nous imposons certaines contraintes :

1. un nouveau nœud est déployé à une distance minimale des nœuds déjà positionnés
2. la répartition des nœuds dans les quatre quadrants (cf. figure 3.17) doit être équilibrée.

Un exemple d'application de ces deux règles de filtrage est donné à la figure 3.17 pour 40 nœuds déployés sur une surface de 300 mètres carrés.

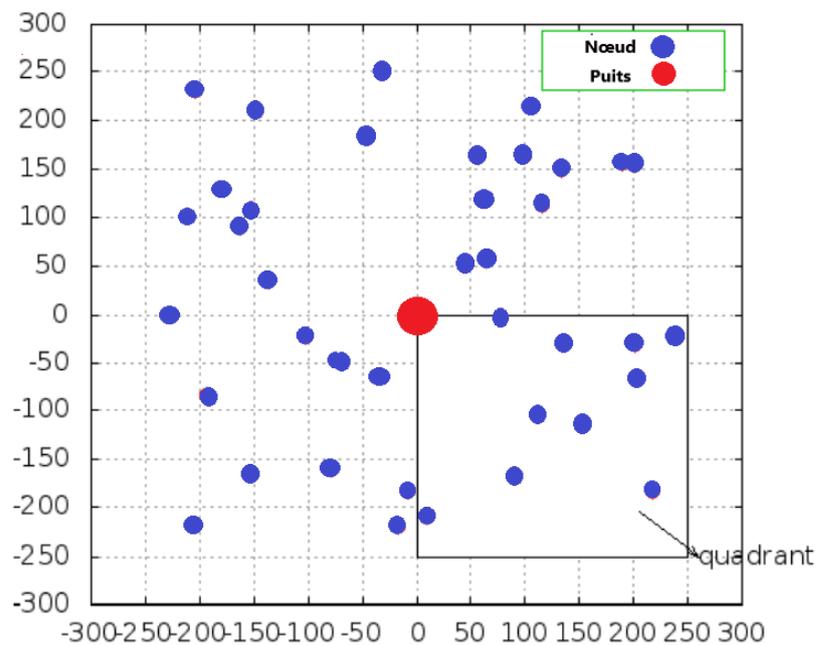


Figure 3.17 – Type de topologies considérées

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit et justifié les orientations de ce travail. Il s'agit d'abord et principalement de notre choix topologique original qui résulte du couplage d'une antenne directionnelle au nœud puits, au cœur d'une étoile; les autres nœuds capteurs restant équipés d'une antenne omnidirectionnelle. Aussi, nous avons fait une étude non exhaustive de travaux réalisés sur les méthodes d'accès exploitant des antennes directionnelles, puis nous avons justifié notre choix de la méthode d'accès utilisée. Ensuite, nous avons présenté les principales phases de fonctionnement de notre proposition : découverte de voisinage du puits et principes de collecte des données. Enfin, nous avons décrit la démarche retenue pour évaluer notre proposition.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la partie de notre contribution qui se consacre à la découverte des voisins du puits équipé d'une antenne à faisceau commutable.

Chapitre 4

Contribution sur la découverte de voisinage

Ce chapitre décrit le processus de découverte du voisinage du puits d'une étoile équipé d'une antenne à faisceau commutable. L'objectif est de permettre au puits de savoir dans quelle direction il doit orienter son antenne pour communiquer avec un nœud donné. Nous allons présenter nos algorithmes de découverte de voisins, basés sur le principe de question-réponse (POLLing selecting) ANDF (Aloha-like Neighbor Discovery with Feedback) , WAYE (Who Are You Enquiry) et WAYE+. WAYE+ étant une extension de WAYE.

4.1 Énoncé du problème

Le but de ce travail est de montrer l'importance d'effectuer la découverte de voisinage dans un réseau en étoile dont le puits est équipé d'une antenne à commutation de faisceau. Considérons la figure 4.1 qui représente le type de topologie de réseau auquel nous avons à faire. Il est possible d'avoir des liaisons radio longues avec des débits de données élevés en augmentant la puissance de transmission ou en utilisant un type d'antenne spécifique, comme une antenne directionnelle. Dans le monde des RCSF, l'énergie est un élément crucial; par conséquent, l'augmentation de la puissance de transmission peut ne pas être une bonne solution. Les antennes directionnelles ont la capacité de concentrer l'énergie de transmission dans une direction donnée sans avoir à utiliser plus de puissance. Elles constituent une bonne option lorsqu'une transmission à longue distance est nécessaire.

Pour notre travail, nous avons choisi une antenne à faisceau commutable avec un diagramme de rayonnement élémentaire comme illustré sur la figure 4.2. L'utilisation d'une antenne à faisceau commutable permet d'assurer une portée de transmission intéressante tout en préservant les meilleurs débits de données permis par les technologies RCSF et d'économie d'énergie disponibles.

La spécificité de cette solution est la connectivité partielle due au fait qu'à chaque instant, et pour chaque orientation de l'antenne ou secteur, on ne dispose que d'une partition particulière de la topologie souhaitée. Pour atteindre n'importe quel nœud ou pour émuler le comportement d'une antenne omnidirectionnelle, il est nécessaire de diriger le faisceau de l'antenne comme le montre la figure 4.3. Chaque direction du faisceau de l'antenne ne couvre que certains nœuds et forme une sous-topologie. La to-

pologie globale (figure 4.4) est composée de sous-topologies créées par chaque orientation du faisceau. Le défi consiste à identifier toutes les sous-topologies auxquelles appartient un nœud particulier afin de l'atteindre.

En observant les figures 4.1 et 4.2, nous pouvons constater par exemple que le nœud 12 pourrait être découvert dans l'orientation de l'antenne définie dans la figure 4.2 alors qu'il n'est pas localisé dans le lobe principal de l'antenne du puits. Ceci, combiné aux conditions de propagation du signal dans le réseau, fait que le nombre de nœuds que le puits va découvrir dans chaque secteur est variable et difficile à prévoir. Certains nœuds (à proximité du puits) seront découverts plus souvent et d'autres par contre situés à l'extrémité de la couverture seront très peu souvent découverts. Ceci a un impact sur les algorithmes de découverte de voisinage. La forme des lobes de l'antenne du puits (figure 4.2) fait que certains nœuds à proximité du puits seront découverts dans le lobe principal et dans les lobes secondaires de l'antenne, ceci nous permet de supposer que les nœuds sont découverts en moyenne 2 ou 3 fois. Par exemple, pour un réseau de N nœuds et K secteurs (antenne du puits), nous avons en moyenne (\hat{W}) nœuds découverts par secteur. Empiriquement, nous estimons cette moyenne par secteur à partir de $\hat{W} = \frac{2 \times N}{K}$. Ce nombre \hat{W} nous servira comme paramètre initial pour le démarrage de nos algorithmes de découverte.

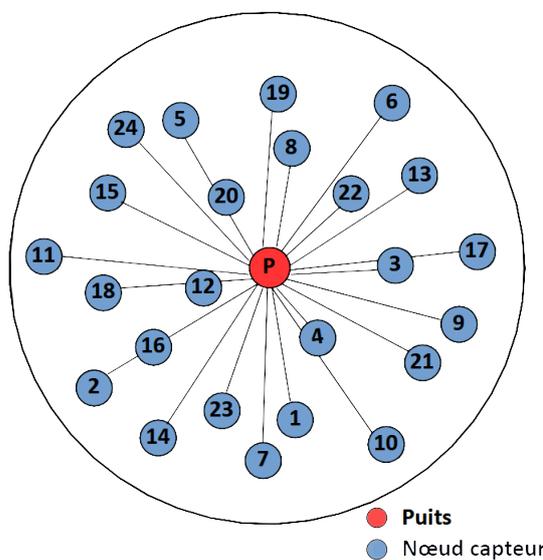


Figure 4.1 – Configuration réseau

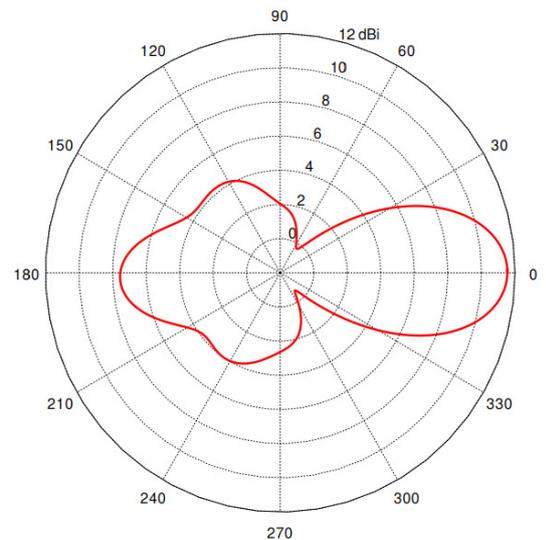


Figure 4.2 – Diagramme de rayonnement de l'antenne du puits

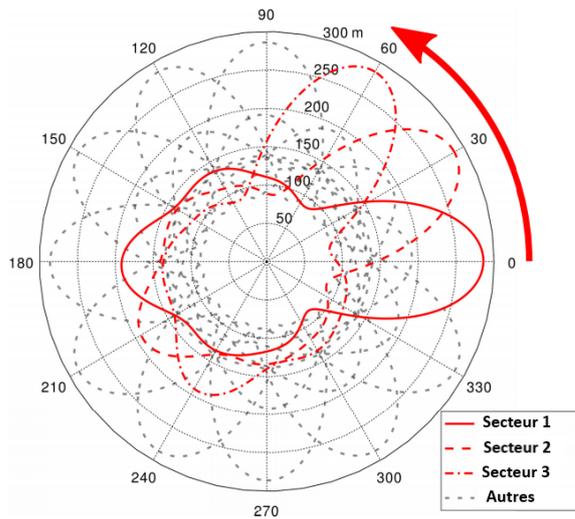


Figure 4.3 – Orientation du faisceau de l'antenne

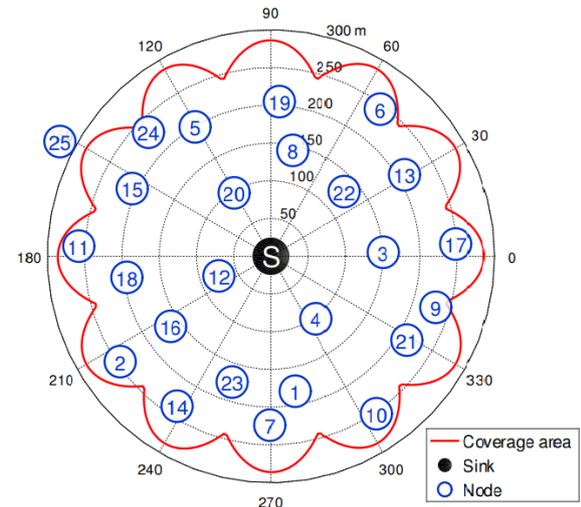


Figure 4.4 – Configuration réseau émulée

4.2 Description générale

Dans cette section, nous présentons de manière générale la description de notre système et le fonctionnement de nos protocoles de découverte de voisinage. Nous allons identifier, à partir d'un cas générique que nous appellerons «force brute», différents leviers qui nous permettront de minimiser le temps nécessaire à cette découverte. Nous présenterons ensuite comme des variantes d'un mécanisme générique nos contributions à ce niveau que nous évaluerons entre-elles. Pour cela, nous allons également détailler le format des différentes trames de données utilisées et la structure de la table de connectivité.

4.2.1 Description du système

Dans cette section, nous considérons notre configuration de réseau sans fil générique : en étoile comme le montre la figure 4.1, où le nœud central P (puits) est équipé d'une antenne directionnelle à faisceau commutable. Les nœuds capteurs déployés de manière aléatoire autour du puits utilisent des antennes omnidirectionnelles et plusieurs nœuds capteurs peuvent se trouver à portée les uns des autres. De plus, les hypothèses suivantes sont faites pour ce travail :

1. le puits connaît le nombre total de nœuds du réseau ;
2. chaque nœud possède un identifiant unique (ID) ;
3. le processus de découverte est initié et arrêté par une requête du puits ;
4. le puits a la capacité de détecter les collisions ;
5. le temps est divisé en plusieurs intervalles de temps constituant une supertrame et est géré par le puits ;

6. la topologie du réseau est supposée rester stable pendant la durée du processus de découverte.

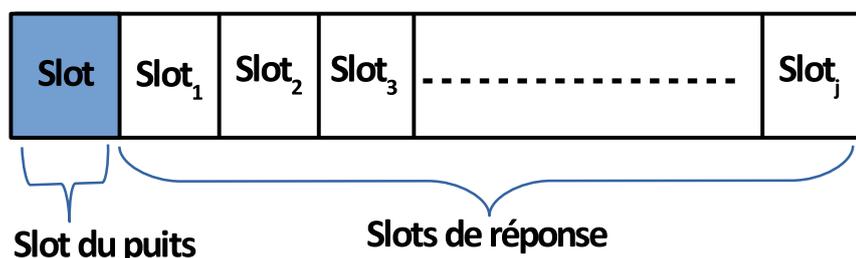
Le tableau 4.1 présente les différents paramètres et termes utilisés dans ce document, ils sont communs à toutes les variantes de nos méthodes de découverte.

Tableau 4.1 – Paramètres et termes utilisés dans nos protocoles de découverte de voisinage

Paramètres	Définition
P_t	Probabilité de transmission
N	Nombre de nœuds capteurs déployés dans le réseau dont les identifiants (ID) vont de 1 à N
K	Nombre de secteurs (orientation) de l'antenne du puits ($K = 12$)
NS	Nombre de slots de temps alloués par le puits pour la réponse des nœuds capteurs

4.2.2 Principe général des algorithmes explorés

Nous avons montré dans le chapitre précédent que les antennes directionnelles pouvaient aggraver des problèmes connus dans les réseaux sans fil tels que les problèmes de terminaux cachés et de terminaux sourds. Ces phénomènes peuvent rendre inefficace le CSMA/CA qui est conçu pour fonctionner avec des antennes omnidirectionnelles. C'est la raison pour laquelle nous ne retiendrons pas les méthodes de découverte de voisinage utilisées dans le domaine des réseaux sans fil et basées sur l'émission aléatoire de messages de signalement HELLO [103]. Afin d'éviter les collisions très fréquentes dues au CSMA/CA avec notre usage dissymétrique des antennes, la phase de découverte se base sur un découpage temporel de type TDMA constitué de supertrames composées chacune d'un certain nombre de slots de temps, comme le montre la figure 4.5. Ce découpage du temps est géré par le puits. Dans chaque supertrame, nous avons un slot utilisé par le puits pour envoyer sa requête de sollicitation suivie par plusieurs slots dédiés à la réponse (au signalement) des nœuds.



Slot du puits : utilisé pour envoyer la commande POLL du puits

Slots de réponse : utilisés par les nœuds pour envoyer leur HELLO pour se signaler

Figure 4.5 – Supertrame de la phase de découverte de voisinage

4.2.2.1 Méthode force brute

Une façon intuitive et simpliste pour le puits de faire la découverte de ses voisins est de considérer qu'il connaît le nombre (N) de ses voisins mais pas leur répartition dans les différents secteurs (K secteurs) de son antenne. Ainsi dans chacun de ses secteurs, la supertrame initiée par le puits est composée d'un slot utilisé par le puits lui-même et de $NS = N$ slots de réponse correspondant au nombre de nœuds voisins afin que chaque nœud puisse se positionner dans un slot en fonction de son identifiant. Par exemple, considérons un nœud N_i , qui dans la phase de découverte reste toujours actif dans l'attente de recevoir une requête de puits. A chaque fois que le nœud N_i reçoit une requête de découverte, il se synchronise sur l'instant de sa réception et attend le i^{eme} slot pour se signaler par une trame que nous appellerons HELLO. Nous constatons que lorsque le nombre de nœuds (N) est élevé, cette méthode nécessitera une synchronisation précise et délicate des nœuds. Si nous considérons le cas $N=48$ parmi les configurations visées par cette étude, le 48^{me} nœud doit être encore correctement synchronisé sur la requête qu'il a reçue du puits, après un temps estimé à 48 slots de temps. La synchronisation temporelle de l'ensemble des nœuds d'un réseau de capteurs sans fil est connue comme un problème complexe qui ne rentre pas dans le cadre de cette étude. Nous avons néanmoins identifié une faiblesse à cette solution. De plus, étant donné que tous les nœuds ne sont pas localisés dans ce secteur, les slots alloués par le puits ne seront pas tous remplis par les nœuds. Nous avons introduit une densité moyenne de nœuds par secteur \hat{W} de l'ordre de $(2 \times N)/K$, ce qui pour une topologie de 48 nœuds capteurs nous donne 8 nœuds par secteur. Avec cette hypothèse nous constatons que 40 slots de la supertrame ne seront pas renseignés. Ceci engendre un gaspillage de temps. Cette approche sera appelée méthode force brute, elle sera utilisée comme base de comparaison. Au total avec cette approche, le puits alloue $NS = K \times (1 + N)$ slots pour la réponse des nœuds lors d'une découverte sur l'ensemble de l'étoile émulée. Le nombre de slots non renseignés étant de l'ordre de $N \times (K - 2)$ soit 480 slots dans le cas évoqué ici.

4.2.2.2 Principe d'optimisation

La méthode force brute engendre un gaspillage de slots et nécessite une synchronisation délicate pour les RCSF. Afin de minimiser le nombre de slots distribués et pallier le problème de synchronisation des nœuds, le processus de découverte va être organisé à partir d'une supertrame beaucoup plus courte car avec moins de slots alloués. Un slot porté par la supertrame ne sera pas la propriété d'un nœud particulier, il serait renseigné selon les principes suivants :

Concernant la requête de découverte initiée par le puits pour le secteur k

- le puits déclare dans sa requête les nœuds qu'il connaît déjà dans le secteur k ;
- il déclare le nombre de slots mis à disposition des nœuds de ce secteur qui n'ont

pas été identifiés ;

- il diffuse les paramètres nécessaires à l'exécution de la politique d'accès aux slots proposés.

Concernant la réaction des nœuds

- seul les nœuds non encore identifiés dans le secteur k sont autorisés à répondre ;
- pour ce faire ils doivent respecter la politique d'accès au slot en tenant compte des paramètres indiqués par le puits.

Concernant l'arrêt de la découverte dans le secteur k

- dès que la requête de découverte se traduit par aucune réaction des nœuds (aucune nouvelle trame HELLO), le processus passe au secteur suivant sur l'ensemble des secteurs de l'antenne.

Ces principes généraux gouvernent différentes variantes qui se distinguent par

- la façon de gérer le nombre de slots alloués,
- la politique respectée par les nœuds non identifiés pour renseigner ces slots,
- et l'éventuelle coopération assurée par les nœuds.

Ces principes sont appliqués sur une succession de requêtes appelée classiquement rounds jusqu'à ce que l'identification de nouveaux nœuds devienne infructueuse. La figure 4.6. est une représentation générique des principes qui viennent d'être introduits. Le découpage de la découverte en rounds permet d'éviter un grand nombre de slots dans une même supertrame ce qui relaxe la contrainte de synchronisation. Nous allons montrer que les différentes variantes que nous proposons permettent d'éviter un gaspillage de temps comme dans le cas de la méthode force brute.

Concrètement, pour chaque round, la découverte est déclenchée par une requête POLL (sollicitation) du puits qui contient le nombre de slots de temps alloués pour la réponse des nœuds capteurs non identifiés dans le secteur. Le nombre initial de slots accordés est déterminé par la valeur moyenne (\hat{W}) de nœuds dans un secteur présentée dans la section 4.1. Si à l'issue du round, le puits n'a pas découvert tous les nœuds capteurs localisés dans le secteur où le POLL a été envoyé, un nouveau round est accordé. Dans le cas contraire, le puits passe au secteur suivant. Le processus de découverte prend fin lorsque le puits aura sondé tous ses secteurs.

De ce principe d'optimisation, nous avons proposé deux méthodes ANDF et WAYE. Dans ANDF, l'accès des nœuds aux slots se fait en utilisant une probabilité P_t qui définit si un nœud peut se signaler dans un slot ou pas. Aussi, ANDF utilise un principe d'établissement de communication en trois étapes (*Three-Way Handshake*) comme le modèle TCP (*Transmission Control Protocol*). Après l'envoi de requête de découverte, lorsque le puits reçoit une réponse d'un nœud, il lui envoie un message d'acquittement, ceci permettant un établissement de connexion en trois étapes. Dans le cas de WAYE, les nœuds se signalent en tirant aléatoirement un slot parmi les slots accordés

par le puits. De plus, l’acquiescement des réponses des nœuds se fait par le puits de manière implicite à travers sa requête de découverte, ceci permet d’optimiser plus le temps de découverte en évitant le mécanisme de Three-Way Handshake employé dans ANDF.

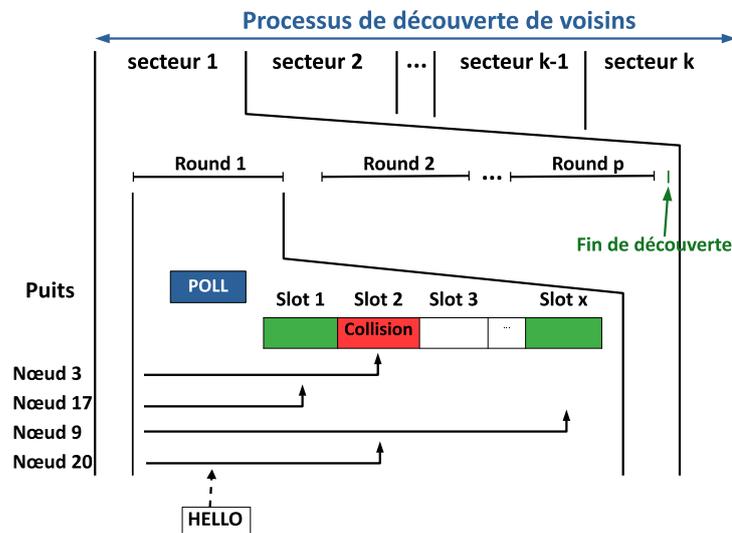


Figure 4.6 – Processus général de découverte de voisinage

4.2.3 Format des trames

Les trames utilisées par WAYE et ANDF sont conformes au standard IEEE 802.15.4 et sont de deux types. Les types de trames sont (1) le type POLL pour les sollicitations du puits pour déclencher la phase de découverte et (2) le type HELLO pour indiquer que la trame est une réponse d’un nœud capteur suite à la sollicitation du puits.

4.2.3.1 Message POLL

La requête POLL contient un certain nombre d’informations utiles comme indiqué dans la figure 4.7 qui sont :

- N° Cycle : indique le numéro du cycle de découverte de voisinage (dans notre cas, vont être sondées durant un cycle toutes les orientations de l’antenne du puits). Ce paramètre correspond au démarrage d’un nouveau cycle de découverte durant lequel tous les nœuds sont sollicités pour se faire connaître.
- N° Secteur : indique la position du faisceau de l’antenne. Ceci permet à un nœud joignable de répondre via ce faisceau. Le puits enregistre alors pour ce round, le numéro du secteur où il est joignable. Ce processus est réitéré sur plusieurs faisceaux.
- N° Round : indique le round actuel, c’est-à-dire le nombre de fois que la trame POLL a été transmise pour cette position de faisceau et pour ce cycle. Ce paramètre est utile pour déduire des pertes de trames ou d’acquiescements.

- NB Slots : indique le nombre de slots associés à un round. Ce paramètre permet d'ajuster la longueur de la phase de collecte des HELLO.
- P : indique le seuil de probabilité qui définit si un nœud non connu peut tenter de se faire connaître lors de ce round ; paramètre utilisé dans ANDF.
- DiscoveredID : une liste qui contient les identifiants (ID) des nœuds capteurs déjà découverts par le puits dans le secteur activé ; ce paramètre est utilisé dans WAYE et est initialement vide.

N° Cycle	N° Secteur	N° Round	NB Slot	P	DiscoveredID
----------	------------	----------	---------	---	--------------

Figure 4.7 – Format du message POLL

4.2.3.2 Message HELLO

La trame de réponse HELLO d'un nœud contient les informations suivantes présentées dans la figure 4.8 :

- ID Nœud : indique l'adresse logique du nœud.
- N° Cycle : indique le cycle pour lequel le nœud doit se faire connaître.
- N° Secteur : indique le secteur dans lequel l'antenne a émis la trame POLL et dans lequel se trouve le nœud qui doit répondre.
- N° Round : retourne le numéro du round dans lequel le nœud cherche à se faire connaître par l'envoi d'un HELLO.
- N° Slot : indique le slot dans lequel le nœud a placé sa trame HELLO.
- RSSI : valeur du RSSI caractérisant la requête POLL reçue par le nœud.
- DiscoveredID : une liste qui contient les identifiants (id) des voisins que ce nœud a pu détecter (par écoute de leur HELLO). Ce champ est utilisé dans ANDF et WAYE+ et initialement vide.

ID Nœud	N° Cycle	N° Secteur	N° Round	N° Slot	RSSI	DiscoveredID
---------	----------	------------	----------	---------	------	--------------

Figure 4.8 – Format du message HELLO

4.2.4 Différentes façons de découvrir un nœud

Dans nos différents protocoles de découverte de voisinage, il existe deux manières par lesquelles le puits peut découvrir un nœud quelconque. Il s'agit de la découverte directe et celle indirecte comme décrite dans [104].

- La découverte directe est faite lorsque le puits découvre un nœud à travers la réception de réponse HELLO de ce dernier.
- La découverte indirecte que nous appellerons collaboration entre les nœuds dans ce document, se produit lorsque le puits arrive à découvrir un ou plusieurs nœuds à travers une réponse HELLO correctement reçue. L'environnement de propagation du signal n'étant pas parfait, il arrive que des réponses HELLO des nœuds ne soient pas reçues ou qu'une collision entre elles entraîne leur perte. Par exemple dans la figure 4.6, les nœuds 3 et 20 transmettent simultanément leur réponse dans le même slot, ce qui engendre une collision au niveau du puits. Si le nœud 9 est à portée radio du nœud 3, dans le slot 1, il peut écouter la transmission du HELLO de ce nœud et ajouter l'identifiant 3 dans son message de réponse. Dans le slot 4, lorsque le puits recevra correctement le HELLO du nœud 9, il pourra ainsi découvrir à la fois le nœud 9 et le nœud 3.

4.2.5 Structure de la table de découverte de voisinage du puits

La table de découverte de voisinage est une structure utilisée dans les réseaux en général pour garder en mémoire tous les nœuds voisins connus d'un nœud. Dans le cas général, celle-ci permet au nœud de sélectionner un voisin approprié vers lequel il va envoyer ses données pour les acheminer vers une destination précise. Dans notre cas, le puits, étant équipé d'une antenne constituée de plusieurs orientations ou secteurs, va découvrir et enregistrer dans une table de découverte (tableau 4.2) tous les identifiants des nœuds localisés dans chacun des secteurs ainsi que le degré de qualité (RSSI) avec lequel il entend ces nœuds. Cette table, par la suite, va permettre au puits de prendre la décision optimale sur la façon de contacter un nœud donné c'est-à-dire, le secteur par lequel les communications puits-nœuds fournissent les meilleures qualités de lien ($RSSI_{Down}$ et $RSSI_{Up}$). Dans ce cas, ce secteur sera indiqué par le champ «Meilleur secteur» à 1 dans le tableau 4.2. La valeur de ce champ sera déterminée grâce aux valeurs de $RSSI_{Down}$ et $RSSI_{Up}$ avant la phase de collecte de données. $RSSI_{Down}$ est la valeur du RSSI mesurée par le nœud lors de la réception du POLL du puits et sera incluse dans sa trame HELLO. Le puits à son tour lors la réception du HELLO, va mesurer le RSSI avec lequel il le reçoit, cette valeur sera appelée $RSSI_{Up}$. Ainsi, le puits aura dans sa table un indicateur de la qualité du lien dans le deux sens.

 Malgré tout, le puits pourra chercher le meilleur compromis entre atteindre un nœud avec une communication optimale ou atteindre un nœud avec une qualité moindre de communication mais sans un changement de secteur.

Tableau 4.2 – Table de découverte de voisinage du puits

secteur	ID nœud	$RSSI_{Down}$	$RSSI_{Up}$	Meilleur secteur

4.2.6 Mécanisme de détection de collision

La détection de collision est un mécanisme clé dans WAYE et ANDF permettant de faire de la résolution dynamique de collisions entre les nœuds pendant la phase de découverte. Ce mécanisme a aussi été utilisé dans [94] pour la résolution de collisions. Plusieurs méthodes de détection de collision existent dans la littérature. Dans [105], trois méthodes de détection de collisions sont présentées, à savoir la méthode basée sur le monitoring régulier du RSSI, la méthode basée sur CRC (*Cyclic Redundancy Check*) et celle basée sur le CCA. Il est montré que la détection de collisions basée sur CCA offre plus de meilleurs que les autres méthodes sur des modules radio CC2420.

En nous basant sur les résultats obtenus dans [105], nous avons opté pour l'emploi d'une méthode de détection de collisions basée sur le CCA. Ainsi, le puits après l'envoi de sa commande POLL, va se mettre à tester le canal régulièrement sur chacun des slots de temps accordés pour la réponse des nœuds. S'il détecte une transmission sur le canal dans un slot et qu'à la fin de ce slot il ne reçoit pas un HELLO venant d'un nœud, il considère qu'il y a eu une collision.

4.2.7 Différents états d'un slot de réponse

Dans WAYE et ANDF, l'état des slots de réponse est important car il va permettre de prendre des décisions quant à la poursuite de la découverte ou pas. La figure 4.9 montre comment les slots de réponse de la supertrame sont remplis par les nœuds pendant le processus de découverte. Dans chaque slot de réponse, il y a trois situations différentes possibles :

- "Slot avec collision" se produit lorsque deux ou plusieurs nœuds tentent de répondre dans le même slot. Le puits utilise le mécanisme de détection décrit plus haut pour détecter les collisions. Par exemple dans la figure 4.9 , les nœuds 3, 6 et 10 choisissent le slot 1 et envoient leur HELLO au même moment ce qui engendre une collision au niveau du puits. Le slot 1 sera alors marqué comme slot avec collision ;
- "Slot utile", lorsque le puits a correctement reçu une réponse HELLO provenant d'un nœud dans le slot. Dans l'exemple donné, les slot 2 et 4 sont utiles car le puits a pu recevoir des HELLO respectivement du nœud 11 et du nœud 13 ;
- "Slot vide" se produit lorsqu'aucun nœud n'a choisi le slot, comme par exemple le slot 3 dans la figure 4.9. C'est à dire que dans ce slot, le puits ne détecte aucune transmission.

Au cours d'un round, le puits surveille l'usage fait des slots proposés dans sa dernière requête en comptabilisant à l'aide de trois compteurs (présentés dans le tableau 4.3) les situations que nous avons décrites ci-dessus. Ces variables seront utilisées dans :

1. ANDF pour réduire le nombre de slots accordés pour le prochain round,
2. WAYE pour estimer le nombre de nœuds restant à découvrir et allouer des slots en concordance,
3. Dans toutes nos variantes pour détecter la fin de la découverte dans le secteur.

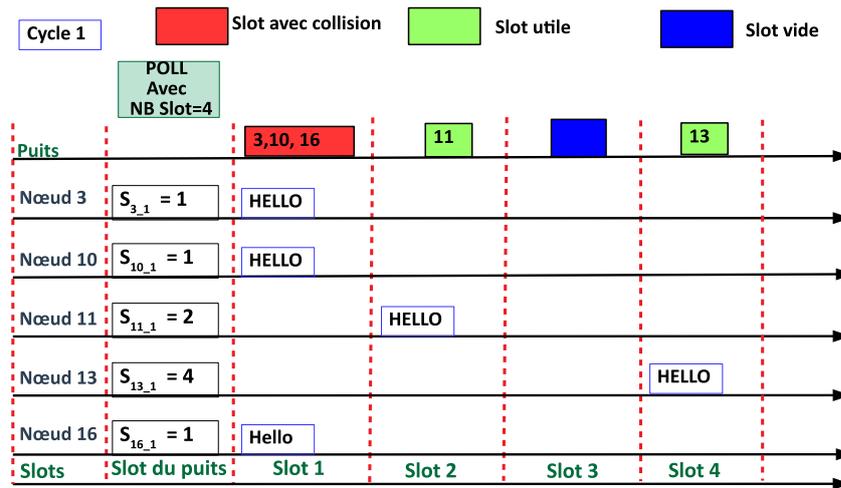


Figure 4.9 – Résultats possibles pour un slot de temps. Dans cette figure, $S_{x,y}$ signifie le slot sélectionné pour le nœud x au cycle y

Tableau 4.3 – Compteurs des états des slots d'une requête

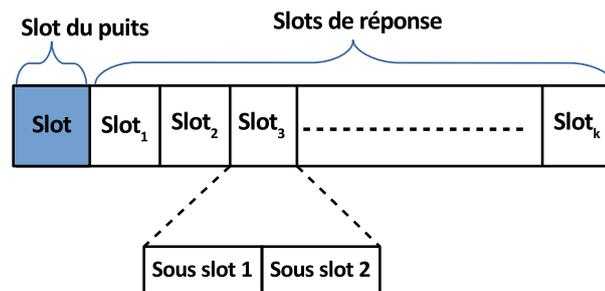
S_0	Nombre de slots vides
S_1	Nombre de slots utiles
S_2^*	Nombre de slots avec collision

4.3 ANDF : Aloha-like Neighbor Discovery with Feedback

ANDF est protocole de découverte de voisinage de type p -Persistent [106]. ANDF est un algorithme aléatoire dont le temps est découpé en plusieurs slots qui fonctionnent comme suit. Dans chaque slot de temps, un nœud peut décider :

- de transmettre avec une probabilité P_t ,
- d’écouter avec une probabilité $1 - P_t$.

Un nœud en mode de transmission dans un slot est découvert, si dans ce même slot, aucun autre nœud n’est en mode de transmission ; sinon des collisions peuvent se produire. Dans ANDF, nous considérons que le puits connaît le nombre total de nœuds déployés dans son environnement mais ne connaît pas la distribution des nœuds dans chaque secteur. De plus, chaque slot dédié à la réponse des nœuds de la supertrame est subdivisé en deux sous slots comme illustré dans la figure 4.10 pour permettre des acquittements.



Slot du puits : utilisé pour envoyer la commande POLL du puits

Slots de réponse : utilisés par les nœuds pour envoyer leur HELLO

Figure 4.10 – Supertrame de ANDF

4.3.1 Fonctionnement

Au début du processus de découverte, le puits active son premier secteur (figure 4.11) et diffuse un POLL vers ses nœuds voisins potentiels situés dans la zone de couverture du secteur activé (figure 4.12). Le message POLL contient le numéro du secteur actuel (*secteur 1*), le numéro du round actuel (*round 1*) et le nombre de slots alloués ($NS = 4$) pour la réponse des nœuds capteurs. Il reste dans le secteur sélectionné jusqu’à ce qu’il découvre tous les nœuds voisins situés dans la zone couverte par ce secteur, puis il passe au secteur suivant. Pour chaque round (lignes 12 à 24 de l’algorithme de l’annexe A.1.1), pour chaque slot, dans le sous-slot 1, si le puits reçoit un HELLO d’un nœud, il ajoute l’identifiant de ce nœud dans son message d’acquittement (Ack) et met à jour le nombre de slots utiles (S_1). Si par contre, il détecte une collision dans le sous slot 1, il met à jour le nombre de slots avec collision (S_2^*). Sinon, il met à jour le nombre

de slots vides (S_0). Le puits envoie un Ack dans le sous slot 2 si un HELLO est reçu dans le sous slot 1. Par exemple, soit le tableau 4.4 qui donne le résultat d'un round avec 4 slots accordés pour la réponse des nœuds. Dans le premier slot, le puits a reçu correctement le HELLO du nœud 17 et met $S_1 = 1$. Dans le slot 3, aucun HELLO n'est reçu et aucune transmission n'est détectée, le puits met $S_0 = 1$. Dans les slots 2 et 4, plusieurs nœuds ont transmis leur HELLO simultanément, ce qui génère une collision au niveau du puits dans chacun des deux slots d'où $S_2^* = 2$.

Tableau 4.4 – Exemple de résultats obtenus sur un round de découverte

Slot	1	2	3	4
Nœuds	17	3 et 9		12, 18 et 20
Etat	Slot utile	Slot avec collision	Slot vide	Slot avec collision

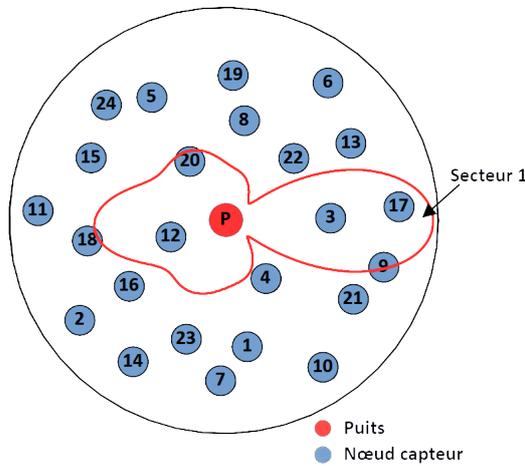


Figure 4.11 – Activation du premier secteur

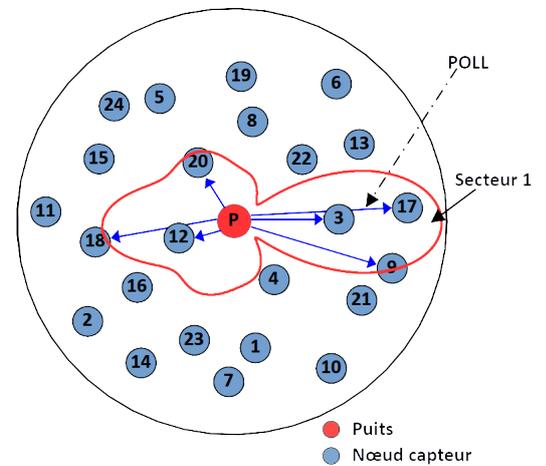


Figure 4.12 – Diffusion du POLL dans le secteur activé

Un nœud capteur, qui reçoit le POLL du puits, que nous appelons nœud couvert et qui n'a pas encore été découvert, peut répondre comme le montre l'algorithme de l'annexe A.1.2 (lignes 13 à 19). Pour chaque slot de temps alloué, chaque nœud couvert :

1. transmet avec une probabilité P_t dans le sous slot 1 ou retarde sa transmission jusqu'au slot suivant avec une probabilité $1 - P_t$.
2. dans le sous-slot 2, le nœud qui a transmis un HELLO, attend un Ack du puits.

Si un nœud qui a transmis dans le sous-slot 1 est acquitté par le puits, alors il considère qu'il a été découvert et ne répond plus aux prochains POLL relatifs au secteur dans lequel il a été découvert. Sinon, il détermine le nombre de nœuds déjà découverts et met à jour la probabilité de transmission en conséquence, comme indiqué dans l'algorithme de l'annexe A.1.2 (ligne 34). Cette méthode d'acquiescement du puits permet de réduire le nombre de nœuds qui vont concourir pour l'accès aux slots, ce qui va réduire la probabilité de collision comme indiqué dans [104] et [107]. Dans chaque slot, un nœud qui n'est pas en mode transmission, écoute la transmission des autres nœuds. S'il reçoit

un HELLO d'un nœud qui est à proximité, il ajoute l'identifiant de ce nœud dans le payload (charge utile) de son propre HELLO. Il enverra son message incluant les identifiants découverts au puits, lorsqu'il aura plus de chance dans les prochains slots ou dans un prochain round. S'il reçoit une trame Ack au lieu d'un message de réponse, il détermine également le nombre de nœuds déjà découverts par le puits et met à jour la probabilité de transmission en conséquence, comme indiqué dans l'algorithme A.1.2 (ligne 40).

4.3.2 Mise à jour de la probabilité de transmission

Dans [108], chaque nœud connaît le nombre de tous ses voisins et calcule $P_t = \frac{1}{N-C}$, où C est le nombre de voisins découverts et N le nombre de nœuds voisins. Contrairement à [108], dans notre travail, les nœuds capteurs ne connaissent pas le nombre exact de leurs voisins, mais ils connaissent le nombre total de nœuds autour du puits et le nombre de secteurs de l'antenne du puits. Soit la variable i le nombre de nœuds capteurs découverts par le puits dans chaque secteur. Au début de chaque sondage de secteur, la variable $i = 0$. Les nœuds déterminent i en utilisant les données du Ack reçu du puits. Chaque nœud calcule la probabilité de transmission P_t en fonction du nombre moyen (M) de nœuds restant à découvrir par le puits dans chaque secteur, $M = \frac{N-i}{K}$ et la probabilité de transmission est calculée comme suit : $P_t = \min\{\frac{1}{M}, 1\}$

4.3.3 Réduction du nombres de slots vides

A travers des simulations, nous avons observé que la plupart des slots vides sont produits dans les derniers rounds, cette remarque a également été faite dans [109]. Afin de réduire autant que possible les slots inactifs, ce qui se produit dans les derniers rounds, à la fin de chaque tour, si le puits observe que le nombre de slots inactifs est au moins égal à la moitié des slots alloués et qu'il n'y a pas de slot avec collision ($S_0 \geq NS \times \frac{1}{2}$ et $S_2^* = 0$), ou que le nombre de créneaux réussis est supérieur ou égal à 75% des créneaux alloués et qu'il n'y a pas de créneau en collision ($S_1 \geq NS \times \frac{3}{4}$ et $S_2^* = 0$), il décide de réduire de moitié le nombre de slots alloués pour le prochain tour comme indiqué dans l'algorithme de l'annexe A.1.1 (ligne 34).

4.3.4 Condition d'arrêt

Dans notre travail, nous faisons l'hypothèse que les trames émises par le puits sont reçues. Soit S l'ensemble des secteurs de l'antenne du puits, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ avec $Card(S) = K$ et soit R l'ensemble des rounds accordés à un secteur, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$. Le $Card(R)$ peut être différent d'un secteur à un autre. Soit $S_0(s, r)$ le nombre de slots vides lors du round r dans le secteur s et $NS(s, r)$ le nombre de slots alloués pour la réponse des nœuds pour le round r dans le secteur s .

Définissons la fonction *Sonde* dans l'ensemble S telle que : Soit n un entier naturel.

$$Sonde(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \text{ est sondé par le puits} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Un secteur s est considéré comme sondé, si le puits a découvert tous les nœuds voisins dans ce secteur. Pour un secteur s donné, si après un round r , le puits observe que le nombre de slots vides est égal au nombre de slots alloués ($S_0(s, r) = NS(s, r)$), cela signifie qu'aucun nœud n'a répondu parce que tous les nœuds ont été découverts ou en raison des politiques de probabilité de transmission P_t . Pour s'assurer que tous les nœuds capteurs ont été découverts, le puits envoie un nouveau POLL. Lorsque les nœuds capteurs reçoivent ce POLL avec un seul slot alloué, ils accèdent à ce slot avec $P_t = 1$ et répondent s'ils ne sont pas encore découverts. À la fin de ce round, si aucun nœud ne répond, le puits considère qu'il a découvert tous les voisins et passe au secteur suivant. Nous avons pour ce secteur s , la relation suivante :

$$Sonde(s) = 1 \text{ alors } \exists r \in R \text{ tel que } NS(s, r) = 1, P_t = 1 \text{ et } S_0(s, r) = NS(s, r)$$

Le processus de découverte se termine lorsque le puits a sondé tous ses secteurs pour découvrir ses voisins c'est-à-dire : $\forall s \in S, Sonde(s) = 1$

4.3.5 Evaluation et analyse des résultats

Nous avons évalué ANDF par simulation en utilisant Cooja décrit dans la section 3.5. Nous avons étudié l'impact de notre mécanisme de réduction des slots vides, de la collaboration des nœuds et du puits pendant la découverte et de la probabilité de transmission, sur le temps que prend le puits pour découvrir tous ses voisins. Les simulations ont été effectuées en faisant varier la taille du réseau qui correspond au nombre de nœuds (24, 34, 44) autour du puits, et chaque résultat présenté est une moyenne de trente (30) simulations différentes pour chaque scénario. Les paramètres de simulation utilisés dans cette partie sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Paramètres de simulation de ANDF

Paramètres	Valeurs
Zone de déploiement des nœuds	300 m x 300 m
Seuil de réception	-85 dBm
Seuil de capture	3 dB
Nombre de nœuds	24, 34 et 44
Nombre de simulations par scénario	30
Durée d'un slot de réponse	12,5 ms
Taille de la supertrame	5
Types d'antenne	Antenne à faisceau commutable (puits)
	Antennes omnidirectionnelle (nœuds capteurs)

4.3.5.1 Impact du mécanisme de réduction des slots vides et du découpage en round de la découverte

Dans cette section, nous cherchons à évaluer l'impact du mécanisme de réduction des slots sur le temps mis par le puits pour découvrir tous ses voisins en exécutant ANDF. La figure 4.13 montre la comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF, ANDF sans le mécanisme de réduction de slots vides (ISR : *Idle Slots Reduction*) et la force brute. Nous pouvons voir que sans le mécanisme de réduction des slots vides, le puits prend plus de temps pour découvrir tous ses nœuds voisins. Le mécanisme de réduction des slots vides que nous avons intégré permet de réduire significativement le nombre de slots vides et donc le délai de découverte. Sans le mécanisme de réduction de slots vides, pour chaque round le puits alloue le même nombre de slots pour la réponse, ce qui peut s'avérer inefficace vers la fin de la découverte dans chaque secteur (c'est-à-dire lorsque presque tous les nœuds sont découverts). En effet, beaucoup de slots seront alloués et ne seront jamais utilisés par les nœuds, ceci va augmenter le temps de découverte.

En observant la figure 4.13, nous constatons que la force brute enregistre les délais de découverte les plus longs. Cela est dû au fait que dans la méthode force brute, le puits alloue dans chaque secteur un nombre de slots de réponse correspondant au nombre total des nœuds dans le réseau. Tous les nœuds n'étant pas dans le même secteur, réserver un nombre de slots correspondant au nombre total de nœuds dans le réseau peut engendrer un gaspillage de slot. Ce qui peut s'avérer coûteux en termes de temps pris par le puits pour découvrir tous ses voisins. Par contre dans ANDF et ISR, la découverte est organisée en rounds avec un nombre limité de slots alloués par le puits pour permettre aux nœuds de concourir pour l'accès aux slots. Si à l'issue d'un round tous les nœuds ne sont pas découverts par le puits, un nouveau round avec toujours un nombre limité de slots est accordé. Cette organisation en rounds permet à ANDF et ISR de minimiser le nombre total de slots alloués par le puits.

Dans la section qui suit, nous verrons comment la collaboration des nœuds a un impact sur le temps de découverte du puits.

4.3.5.2 Impact de la collaboration

La figure 4.14 montre le délai moyen mis par le puits pour découvrir tous ses nœuds voisins avec ANDF et avec AND (une version de ANDF sans la collaboration des nœuds). Nous constatons qu'avec ANDF, le puits prend moins de temps pour découvrir tous ses voisins qu'avec AND. Avec AND, pour un round donné, certains nœuds peuvent entrer en collision sur tous les slots alloués et leurs messages de réponse seront perdus. Ainsi pour découvrir les nœuds concernés par les collisions, le puits va accorder d'autres rounds supplémentaires. Cette opération va se poursuivre jusqu'à ce que tous les nœuds soient découverts et va augmenter le temps que le puits va mettre pour découvrir tous ses voisins. Par contre avec ANDF, lorsqu'un nœud n'est

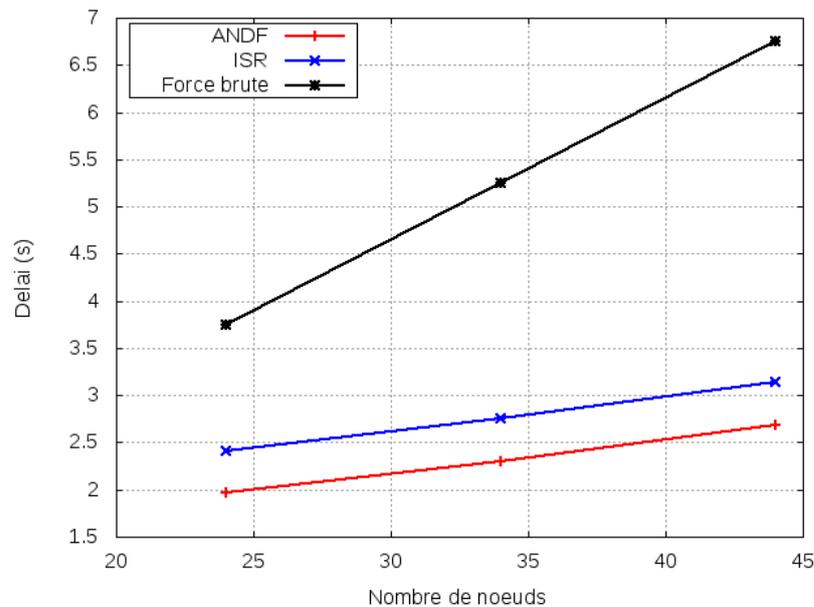


Figure 4.13 – Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF, ANDF sans le mécanisme de réduction de slots vides (ISR) et la force brute

pas en mode de transmission, il se met à écouter les transmissions des autres nœuds. Lorsqu’il reçoit les messages de réponse de ses voisins (les nœuds qui sont à sa portée radio), il inclut l’identifiant de chaque nœud dans son message de réponse. Une fois dans un slot, ce nœud enverra son message au puits. Ainsi si le puits reçoit le message, il pourra découvrir en plus du nœud qui a envoyé le message d’autres nœuds dont le puits n’aurait éventuellement pas pu recevoir les réponses. Cette collaboration mise en place dans ANDF permet de réduire le temps que le puits prend pour découvrir tous ses voisins. Dans la suite, nous présenterons l’impact de la probabilité de transmission sur le délai de découverte du puits.

4.3.5.3 Impact de l’adaptation de la probabilité de transmission

Pour évaluer l’impact de probabilité de transmission sur le délai de découverte du puits, nous avons comparé ANDF avec PND [109] qui est un protocole de découverte en temps slotté. Il a une fonction d’estimation du nombre de voisins d’un nœud pour mettre à jour la probabilité de transmission de ce nœud dans chaque slot afin de contrôler le nombre de nœuds pouvant accéder à un slot. Nous constatons grâce à la figure 4.15 que notre méthode ANDF permet au puits de découvrir tous ses voisins en un délai plus court qu’avec PND. En effet, en plus de la probabilité pour contrôler l’accès des nœuds au slot, ANDF utilise la collaboration entre les nœuds, ce qui peut accélérer le temps de découverte.

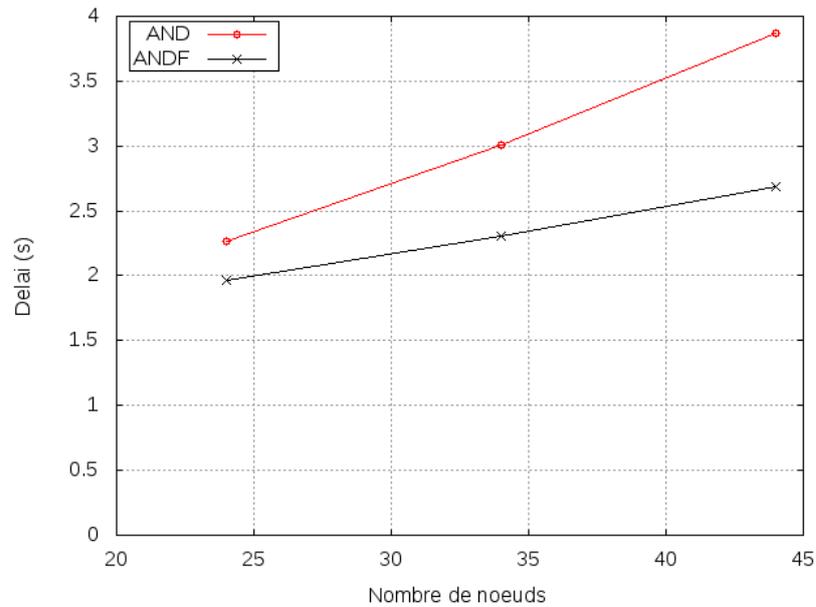


Figure 4.14 – Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF et AND (ANDF sans collaboration entre nœuds)

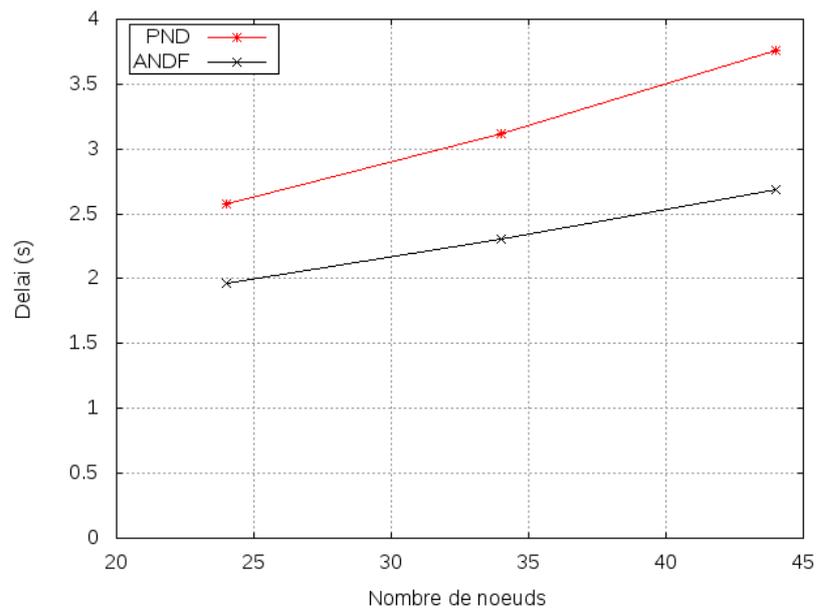


Figure 4.15 – Comparaison du temps mis pour la découverte de tous les voisins du puits entre ANDF et PND (P-persistent Neighbor Discovery)

4.3.5.4 Bilan sur les résultats de simulation de ANDF

ANDF est un protocole de découverte qui permet au puits de découvrir son voisinage. ANDF utilise un découpage du temps en slot et l'accès à chaque slot se fait grâce à une probabilité de transmission qui est mise à jour régulièrement en fonction de l'état des slots. L'un des inconvénients de ANDF est la longueur des slots de temps. En effet, un slot doit être en mesure de contenir la trame de réponse HELLO des nœuds et du message Ack du puits. D'autre part, le fait que pour chaque round le puits doit envoyer son POLL et envoyer un Ack dans chaque slot utile, peut augmenter le *overhead*

dans le réseau.

4.4 WAYE : Who Are You Enquiry

WAYE (voir algorithme de l'annexe A.2.1) fonctionne comme ANDF à la différence que les slots de temps dans WAYE ne sont pas divisés en deux sous slots et que l'accès au slot par les nœuds n'est pas réglementé par une probabilité comme dans le cas de ANDF. De plus, dans WAYE l'acquiescement des réponses des nœuds se fait de façon implicite dans le message POLL (comme décrit dans la section 4.2.3.1 qui présente la structure du POLL) qui peut contenir les identifiants des nœuds déjà découverts par le puits. Lorsque les nœuds reçoivent un POLL du puits, chacun d'eux choisit aléatoirement un unique slot dans lequel il va transmettre sa réponse comme le montre l'algorithme de l'annexe A.2.2. Dans chaque secteur et pour chaque round de découverte, après l'envoi de son message de sollicitation POLL, le puits se met à surveiller l'état de chacun des slots alloués. Grâce à l'observation de l'état des slots, le puits met à jour la valeur des variables S_0 , S_1 , S_2^* qui sont initialisées à zéro au début de chaque round.

- Si le slot est vide, S_0 est incrémentée à 1.
- Si dans le slot le puits détecte une collision, il incrémente S_2^* de 1.
- Si par contre le puits a reçu correctement une réponse HELLO dans le slot, il ajoute 1 à la valeur de S_1 .

Par exemple dans la figure 4.16, pour le round 1 le puits a accordé 5 slots pour la réponse des nœuds. Nous pouvons constater à l'issue de ce round :

- Dans les slot 1, 3 et 5, le puits a reçu correctement les HELLO des nœuds 12, 20 et 21 et met $S_1 = 3$.
- Dans le slot 4, aucun nœud n'a choisi ce slot donc aucune transmission détectée par le puits qui met alors $S_0 = 1$.
- Dans le slot 2, plusieurs nœuds ont transmis leur HELLO simultanément, ce qui génère une collision au niveau du puits. Dans ce cas $S_2^* = 1$.

Les valeurs de S_0 , S_1 et S_2^* vont permettre au puits à la fin du round d'estimer le nombre de ses voisins localisés dans le secteur où la découverte a lieu. Grâce à la valeur estimée du nombre de voisins comme vu ci-après en 4.4.1, le puits peut décider de la fin de la découverte dans le secteur courant et passer au secteur suivant, ou de faire d'autres rounds de découverte dans le secteur.

4.4.1 Estimation du nombre de voisins et ajustement du nombre de slots

Pendant le processus de découverte, dans chaque secteur à la fin de chaque round comme le montre la figure 4.16, le puits va exploiter les valeurs S_1 et S_2^* pour détermi-

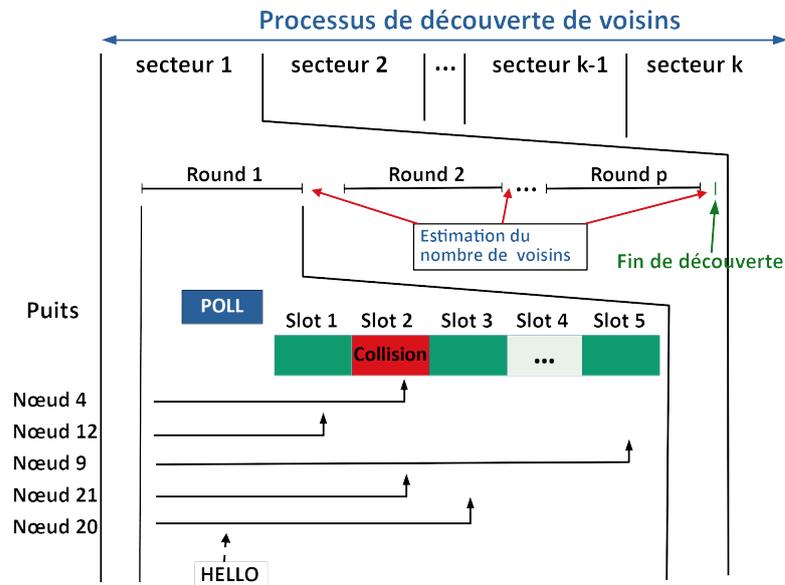


Figure 4.16 – Processus général de découverte de voisinage et d’estimation du nombre de voisins

ner un nombre approximatif (*Estimation*) de ses potentiels voisins situés dans la couverture du secteur activé comme par exemple dans la figure 4.17. Pour estimer ce nombre, nous avons proposé une formule qui s’est révélée identique à celle définie dans [110]. Ceci nous a permis de retenir [110].

$$Estimation = S_1 + D \times S_2^* \quad (4.1)$$

D correspond au nombre moyen de nœuds qui sont rentrés en collision dans un slot.

Nous sommes conscients que dans [108] les auteurs ont calculé ce coefficient pour un nombre de slots et un nombre de compétiteurs (objets RFID) grands par rapport à nos hypothèses de travail. Il nous reste donc à inscrire dans nos perspectives une démarche d’évaluation pour affiner ce coefficient au fait que notre nombre de slots est petit (typiquement 4) et notre nombre de noeuds à découvrir est bien inférieur à 100. Conscients de cette différence, nous retenons cette valeur pour développer notre démarche.

Dans WAYE, le nombre de slots alloués par le puits peut varier d’un round à un autre en raison du nombre de nœuds restant à découvrir ($nbNonDcouvert$). Grâce à la valeur estimée du nombre (*Estimation*) de nœuds voisins, le puits va s’en servir pour déterminer le nombre de nœuds qui ne sont pas encore découverts comme $nbNonDcouvert = Estimation - S_1$ soit $NbNonDcouvert = 2.3922 \times S_2^*$. Au prochain round, le puits va réserver un nombre de slots égal au nombre de nœuds restant à découvrir. Si nous reprenons l’exemple donné précédemment où $S_0 = 1$, $S_1 = 3$ et $S_2^* = 1$, $Estimation = 3 + 1 \times 2.3922$. Le nombre de nœuds estimés [*Estimation*] = 5 et $NbNonDcouvert = 5 - 3 = 2$. Donc pour le round suivant, le puits va allouer 2 slots pour la réponse des nœuds.

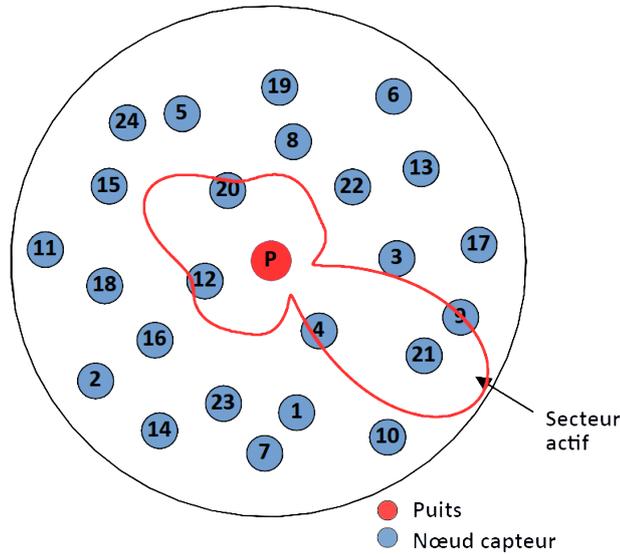


Figure 4.17 – Secteur activé couvrant les nœuds 4, 9 12, 20 et 21

4.4.2 Fin de la découverte

Nous allons reprendre ici la démarche présentée en 4.3.4. Soit S l'ensemble des secteurs de l'antenne du puits, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ avec $Card(S) = K$ et soit R l'ensemble des rounds accordés dans un secteur, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$. Le $Card(R)$ peut être différent d'un secteur à un autre.

Soit $S_0(s, r)$ le nombre de slots vides lors du round r dans le secteur s et $NS(s, r)$ le nombre de slots alloués pour la réponse des nœuds pour le round r dans le secteur s . Définissons la fonction *Sonde* dans l'ensemble S telle que : Soit n un entier naturel.

$$Sonde(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \text{ est sondé par le puits} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Un secteur s est considéré sondé, si le puits a découvert tous les nœuds voisins localisés dans ce secteur. Le processus de découverte étant organisé en plusieurs rounds dans chaque secteur, si après un round r donné le puits observe que le nombre de slots libres ($S_0(s, r)$) est égal au nombre de slots alloués ($NS(s, r)$), alors il initialise un nouveau round avec un seul slot alloué. Si à l'issue de ce dernier round, le puits n'a reçu aucune réponse et/ou n'a détecté aucune collision, il considère qu'il a découvert tous les voisins et passe au secteur suivant. Pour ce secteur s , la relation suivante peut être faite :

$$Sonde(s) = 1 \text{ alors } \exists r \in R \text{ tel que } NS(s, r) = 1 \text{ et } S_0(s, r) = NS(s, r)$$

Le processus de découverte se termine lorsque le puits a sondé tous ses secteurs pour découvrir ses voisins c'est-à-dire : $\forall s \in S, Sonde(s) = 1$

4.4.3 Stratégie de réponse des nœuds

Lorsqu'un nœud reçoit une sollicitation POLL du puits et qu'il n'est pas encore découvert, il choisit aléatoirement un slot parmi les slots alloués par le puits puis transmet sa réponse HELLO dans le slot sélectionné. Si un nœud découvert reçoit la demande POLL, trois cas peuvent être envisagés lorsque le puits est équipé d'une antenne à faisceau commuté, car un nœud peut être vu dans plus d'un secteur comme illustré dans la figure 4.18 qui montre que les nœuds 9, 12 et 20 se trouvent dans les secteurs 1 et 2 qui correspondent à deux orientations du faisceau de l'antenne du puits.

Ces différents cas de réponse sont :

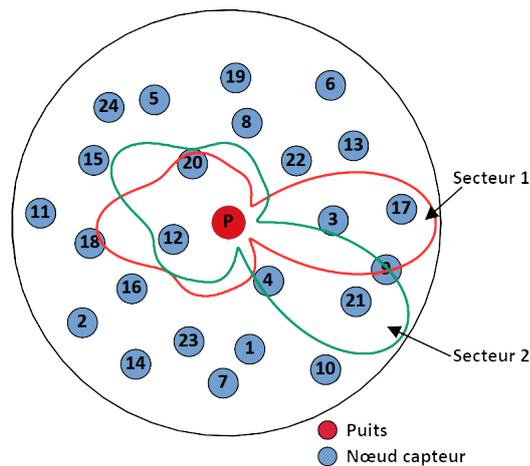


Figure 4.18 – Couverture du secteur 1 et du secteur 2

- Si le POLL concerne le sondage d'un autre secteur différent de celui dans lequel il est découvert, le nœud répond à la sollicitation du puits. Dans cette stratégie, à la fin de découverte, le puits dispose de plusieurs choix (secteurs) pour atteindre un nœud donnée. Par exemple dans la figure 4.5.3, le nœud 9 pourrait être atteint soit par le secteur 1, soit par le secteur 2.
- Si un nœud est découvert dans un secteur, il ne répond plus à aucune sollicitation du puits. Cette stratégie peut permettre au puits de découvrir partiellement son voisinage dans un délai plus court. Cependant, le puits ne disposera plus de plusieurs façons d'atteindre un nœud donné. De plus, rien ne garantit que le secteur dans lequel un nœud est découvert est le secteur qui offre les meilleures conditions pour l'atteindre.
- Si le POLL concerne le sondage d'un autre secteur différent de celui dans lequel il est découvert et que le RSSI par lequel il est reçu par le nœud est supérieur au RSSI enregistré précédemment pour le POLL du secteur précédent, alors le nœud répond à la sollicitation du puits. Ce cas aide le puits à enregistrer uniquement le meilleur lien vers un nœud dans sa table de découverte.

4.4.4 WAYE+ : Extension du WAYE

WAYE+ (voir algorithme de l'annexe A.3.1) est une extension du protocole WAYE précédemment présenté. Dans WAYE+, les nœuds appliquent le principe de collaboration comme dans ANDF. Au cours de la découverte, lorsqu'un nœud reçoit une sollicitation du puits, il choisit un slot de temps parmi ceux accordés par le puits. En attendant le slot pour pouvoir transmettre sa réponse, le nœud écoute son voisinage. Si le nœud reçoit des réponses de ses voisins dans les slots qui précèdent le sien, il inclut dans son message de réponse les identifiants des nœuds ayant envoyé les HELLO (algorithme A.3.2 ligne 16). Dans son slot, le nœud va transmettre son HELLO au puits. Grâce à cette collaboration, si le HELLO du nœud ayant collecté les identifiants de ses voisins est correctement reçu, le puits découvre à la fois le nœud et les autres nœuds recensés par ce dernier s'ils ne sont pas déjà découverts. Cette collaboration permet d'accélérer le processus de découverte par le puits.

A la fin de la phase de découverte, pour les nœuds qui ont été découverts via d'autres nœuds, le puits va revisiter tous les secteurs où ses nœuds sont localisés et les solliciter individuellement pour déterminer les valeurs $RSSI_{Down}$ et $RSSI_{Up}$ afin de garnir sa table de découverte. Ceci montre l'intérêt de cette variante.

4.4.5 Evaluation et analyse des résultats

Sauf spécification de notre part, les performances de WAYE ont été évaluées au moyen de simulations réalisées avec le simulateur Cooja (voir section 3.5). Nous avons évalué les performances en termes de temps nécessaire au puits pour découvrir tous ses nœuds voisins. Dans ce manuscrit, nous allons évaluer l'impact sur le temps total de la découverte des voisins du puits selon certaines considérations utilisées :

- le mécanisme d'estimation du nombre de voisins du puits restant à découvrir ;
- le découpage du temps en supertrames constituées de plusieurs slots ;
- la collaboration des nœuds pendant la phase de découverte, c'est-à-dire le fait qu'un nœud puisse déclarer les nœuds qu'il connaît au puits ;
- les différents façons dont un nœud répond aux sollicitations du puits qu'il reçoit,
- la directivité de l'antenne du puits.

Les simulations ont été effectuées en faisant varier la taille du réseau qui correspond au nombre de nœuds (24, 34, 44) autour du puits, et chaque résultat présenté est une moyenne sur trente simulations différentes pour chaque scénario. Les paramètres de simulation utilisés dans cette partie sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 – Paramètres de simulation de WAYE

Paramètres	Valeurs
Zone de déploiement des nœuds	300 m x 300 m
Seuil de réception	-85 dBm
Nombre de nœuds	24, 34 et 44
Nombre de simulations par scénario	30
Durée d'un slot de réponse	8 ms
Taille initiale de la supertrame	5
Types d'antenne	Antenne à faisceau commutable (puits)
	Antennes omnidirectionnelle (nœuds capteurs)

4.4.5.1 Impact de la méthode d'estimation

Détermination du nombre de slots consommés

Dans cette partie, nous avons utilisé un simulateur que nous avons développé en C. Nous avons exécuté 10 000 simulations sur chacune des topologies. Nous avons ensuite comparé notre protocole de découverte WAYE avec un protocole de découverte basé sur la méthode force brute. Nous rappelons que la méthode force brute consiste à allouer dans chaque secteur (orientation de l'antenne) un nombre de slots de réponse correspondant au nombre de nœuds capteurs autour du puits. Ceci va permettre à chaque nœud de se poser sur un slot correspondant à son identifiant (ID). Par exemple si l'antenne du puits comporte $K = 12$ secteurs et $N = 24$ nœuds déployés, le puits va accorder dans chaque round 24 slots pour la réponse des nœuds. Le nombre total des slots alloués dans ce cas sera de $K \times N = 12 \times 24 = 288$.

La figure 4.19 montre que, pour un nombre différent de nœuds, notre méthode WAYE consomme moins de slots que la méthode force brute. Par exemple (figure 4.19.a) pour 24 nœuds, WAYE alloue un nombre de slots compris entre 150 et 210 contre 300 pour la méthode force brute. Cela s'explique par le fait que, lors de la phase de découverte, pour chaque round, WAYE fait une estimation du nombre de voisins du puits restant à découvrir et alloue en conséquence un nombre de slots correspondant à cette estimation. Ceci permet d'allouer efficacement les slots aux nœuds et d'éviter d'allouer plus de slots que nécessaire. Dans un réseau, tous les nœuds peuvent ne pas être déployés dans le même secteur, accorder un nombre de slots égal au nombre de nœuds dans le réseau reviendrait à consommer inutilement du temps.

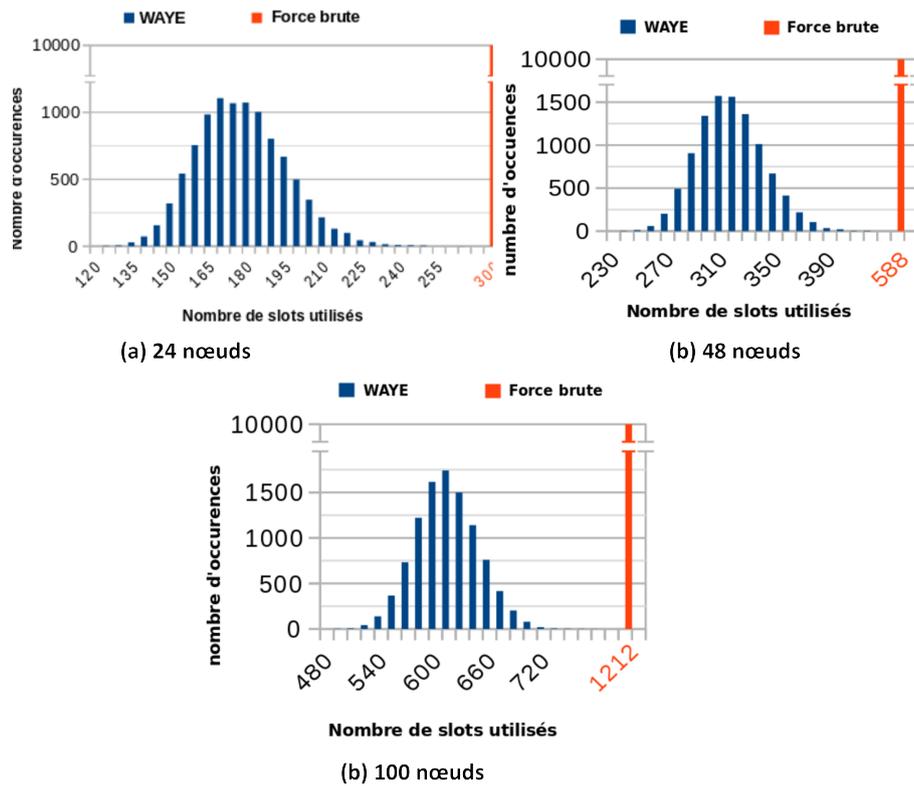


Figure 4.19 – Comparaison entre WAVE et la méthode force brute pour 24, 48 et 100 nœuds déployés

Comparaison entre WAVE et WAVE sans estimation

Nous allons maintenant montrer comment la méthode d'estimation du nombre de voisins autour du puits impacte le temps nécessaire que ce dernier prend pour la phase de découverte. Nous allons comparer notre protocole WAVE avec et sans mécanisme d'estimation, en termes de temps mis par le puits pour découvrir ses voisins. La version de WAVE sans estimation sera appelée dans ce document WAVE-. La figure 4.20 montre que le puits met moins de temps pour découvrir ses voisins avec WAVE qu'avec WAVE-. Pour 44 nœuds à découvrir, WAVE permet de réduire le temps de découverte obtenu avec WAVE- de 37%. WAVE permet d'ajuster le nombre de slots par rapport au nombre de nœuds restant à découvrir dans chaque round. Grâce à ce mécanisme, le puits évite d'accorder des slots qui ne seront pas utilisés dans certains rounds où il ne reste plus de nœuds à découvrir. Contrairement à WAVE, dans WAVE- le puits réserve toujours le même nombre de slots pour la réponse des nœuds. Ceci a pour conséquence d'allouer des slots dans les derniers rounds qui ne seront pas fructueux. Vers la fin de la découverte dans chaque secteur, c'est-à-dire pendant les derniers rounds, presque tous les nœuds localisés dans ce secteur sont découverts. Dans la section qui suit, nous présentons l'effet de la segmentation du temps en plusieurs slots gérée par le puits.

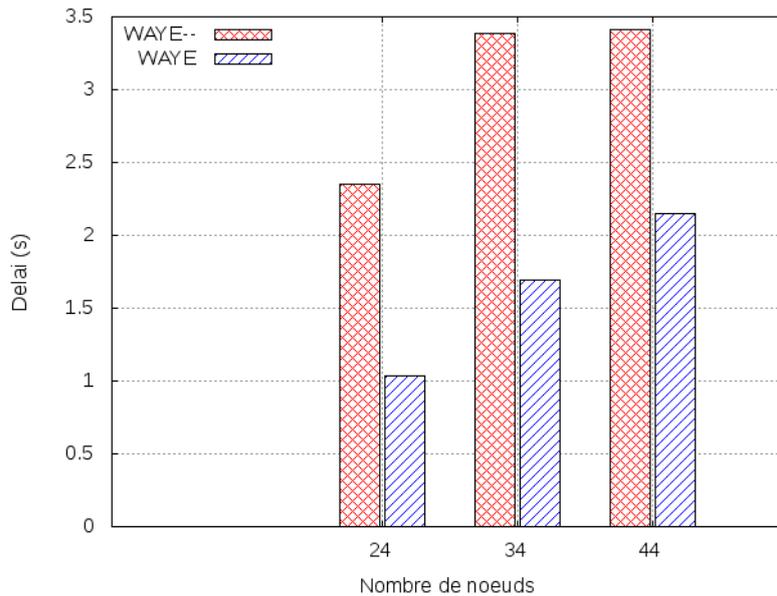


Figure 4.20 – Comparaison entre WAVE et WAVE sans estimation

4.4.5.2 Impact de la segmentation du temps

Dans ce paragraphe, nous étudions l'effet du découpage du temps en supertrames constituées de plusieurs slots. Pour ce faire, nous évaluons le temps nécessaire au puits pour découvrir tous ses voisins d'une part avec WAVE et d'autre part avec la méthode CSMA/CA non slotté. La figure 4.21 présente le délai de découverte des voisins du puits en utilisant WAVE et CSMA/CA avec une antenne directionnelle. Ces résultats montrent que WAVE est également plus performant que CSMA/CA avec antenne directionnelle sur le puits. La bonne performance de WAVE est due d'une part à la réduction des interférences et des collisions entre les nœuds entourant le puits grâce au fait que les faisceaux couvrent environ 1/12 (si 12 secteurs) de la zone de collision pour chaque orientation; et d'autre part, grâce à l'optimisation du nombre de slots alloués dans chaque orientation du faisceau. Les slots alloués sont plus proches du nombre de nœuds à découvrir dans chaque secteur, ce qui permet d'éviter de gaspiller certains slots et réduire le temps de découverte. Dans la section suivante, nous présentons l'apport de la collaboration des nœuds dans l'amélioration du temps de la découverte du puits.

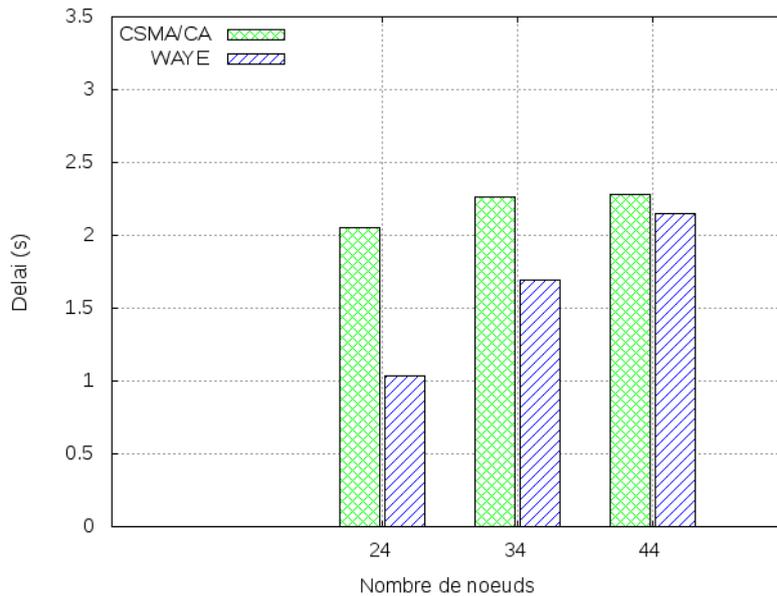


Figure 4.21 – Comparaison entre WAYE et CSMA/CA

4.4.5.3 Impact de la collaboration des nœuds lors de la découverte

Pour évaluer l'impact de la collaboration des nœuds, nous allons comparer WAYE et WAYE+. WAYE+ est une amélioration de WAYE grâce à l'introduction de la collaboration des nœuds lors de la phase de découverte de voisinage du puits. Nous pouvons voir sur la figure 4.22 que les délais obtenus avec WAYE+ sont meilleurs que ceux avec WAYE. Par exemple, pour 44 nœuds à découvrir, le puits met en moyenne 1,5 seconde avec WAYE+ contre environ 2,15 secondes avec WAYE. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à travers une seule réception HELLO qui peut contenir les identifiants (ID) d'autres nœuds, le puits peut découvrir plus de nœuds en même temps et les acquitter. Cela permet de diminuer le nombre de nœuds qui restent en compétition pour l'accès au slot dans un round. Cette collaboration permet donc au puits de découvrir rapidement tous ses voisins. Nous discuterons dans la section qui suit de l'impact des différentes manières offertes à un nœud pour répondre à une sollicitation du puits après être découvert.

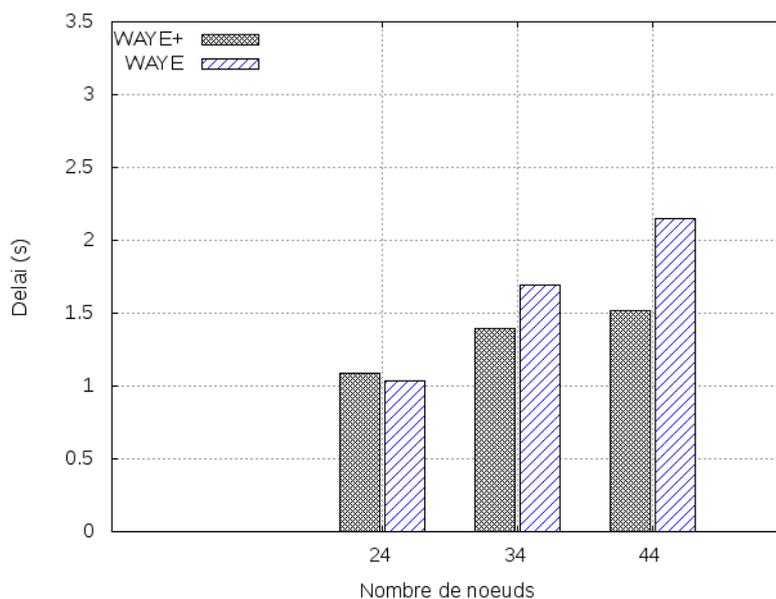


Figure 4.22 – Comparaison entre WAYE et WAYE+ (WAYE avec collaboration des nœuds lors de la découverte)

4.4.5.4 Impact des stratégies de réponse des nœuds

Comme décrit dans la section 4.4.3, lorsqu'un nœud est déjà découvert dans un secteur par le puits, lorsqu'il reçoit une sollicitation (POLL) du puits dans le secteur suivant trois cas de réponse peuvent être envisagés :

- le nœud répond à la sollicitation (WAYE),
- le nœud, une fois découvert ne répond plus à aucune sollicitation du puits (WAYE1),
- le nœud répond si seulement si le RSSI avec lequel le POLL a été reçu est supérieur au RSSI du POLL dans le secteur où a été découvert (WAYE2).

Nous allons étudier l'impact de ces différentes stratégies de réponse des nœuds sur le temps de découverte du puits. La figure 4.23 montre que WAYE nécessite plus de temps que WAYE1 et WAYE2. Enfin dans WAYE, le fait qu'un nœud réponde plusieurs fois à des sollicitations du puits cela ne permet pas de réduire le nombre de nœuds en compétition dans un secteur. Par exemple, un nœud qui est découvert dans plus de deux secteurs va entrer en compétition avec les autres pour l'accès aux slots dans chacun de ces secteurs. Cela peut augmenter le temps nécessaire pour la découverte car dans certains cas, le puits aura accordé à un nœud au moins un nombre de slots correspondant au nombre de secteurs dans lesquels il est vu.

La stratégie WAYE1 offre le temps de découverte le plus rapide. Car lorsqu'il est découvert dans un secteur donné, il ne répondra plus à aucune autre sollicitation reçue du puits, donc ne participera plus à aucune compétition pour accéder à un slot. Dans WAYE2, pour l'accès aux slots, le nœud réagit seulement si le RSSI avec lequel le POLL est reçu est supérieur au RSSI dans le secteur où il a été découvert, ce qui permet de réduire le nombre de nœuds en compétition dans chaque secteur et donc de réduire le

temps de découverte.

Cependant la stratégie WAYE permet au puits de disposer de plusieurs façons de contacter un nœud donné dans sa table de découverte. Grâce à cette panoplie de choix, le puits pourra optimiser les sous topologies, c'est-à-dire le nombre de nœuds qui seront considérés comme membres de chaque secteur. Dans la section suivante, nous présentons l'impact de la directivité de l'antenne du puits sur le délai de découverte.

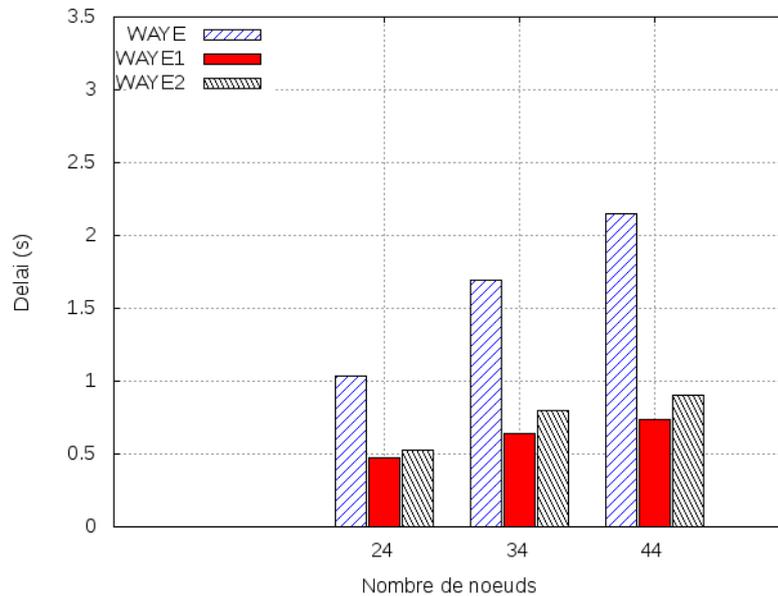


Figure 4.23 – Comparaison des différentes stratégies de réponse des nœuds aux sollicitations du puits

4.4.5.5 Impact de la directivité de l'antenne du puits

Pour évaluer l'impact de la directivité de l'antenne du puits, nous comparons les délais de découverte avec WAYE lorsque le puits est équipé d'une antenne à faisceau commutable et lorsqu'il est pourvu d'une antenne omnidirectionnelle (WAYE-OMNI).

La figure 4.24 présente les délais de découverte obtenus à partir de WAYE-OMNI et WAYE, WAYE1 et WAYE2. Nous pouvons voir que le délai est plus court donc avec WAYE-OMNI qu'avec WAYE ou WAYE2. Par contre, lorsque le nombre de nœuds augmente, pour 44 nœuds, WAYE-OMNI et WAYE1 atteignent des délais similaires. En utilisant une antenne omnidirectionnelle, le puits peut couvrir tous ses nœuds voisins en même temps avec une seule sollicitation (POLL). Dans WAYE-OMNI, lorsqu'un nœud est découvert par le puits, il ne répond plus aux autres sollicitations du puits. Grâce à cela, à la fin du processus de découverte, le nombre de découvertes faites par le puits est égal au nombre de ses voisins dans le réseau. Dans les stratégies WAYE et WAYE2, étant donné que les secteurs de l'antenne à faisceau commutable se chevauchent, certains nœuds peuvent être situés dans plus d'un secteur et être découverts plusieurs fois par le puits. A la fin du processus de découverte, le nombre de découvertes faites

par le puits est supérieur au nombre réel de ses voisins dans le réseau, ceci entraînera une augmentation du temps que le puits mettra pour effectuer toutes les découvertes.

WAYE1 atteint la performance de WAYE-OMNI lorsque le nombre de nœuds est élevé. La raison en est que, dans WAYE1, lorsqu'un nœud est découvert une fois, il ne répond plus à aucune sollicitation du puits. A la fin du processus, le nombre de découvertes faites par le puits est bien égal au nombre de nœuds voisins du puits. De plus, la directivité de l'antenne à faisceau commuté aide à réduire le taux de collision dans chaque secteur.

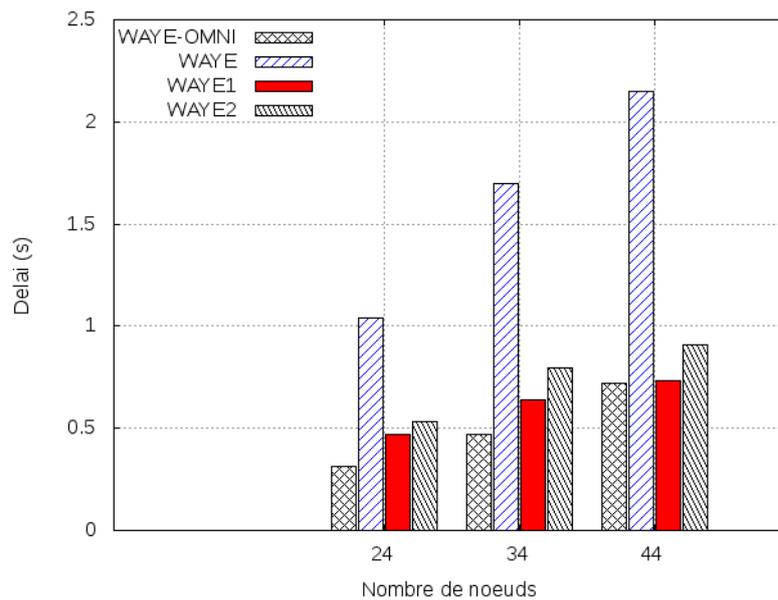


Figure 4.24 – WAYE : Comparaison de délais entre l'utilisation d'une antenne à faisceau commutable et d'une antenne omnidirectionnelle au puits

4.4.5.6 Table de connectivité et commutation de topologie

Une fois la phase de découverte de voisinage terminée, marquée par le sondage de tous les secteurs, le puits dispose d'une table de connectivité dont la structure est présentée dans la section 4.2.3.4. Grâce à cette table, le puits détermine pour chaque nœud le secteur (appelé meilleur secteur) qui permet de l'atteindre dans les meilleures conditions. Un nœud pouvant être découvert dans plusieurs secteurs, plusieurs stratégies peuvent être définies en fonction des contraintes de QoS et/ou d'optimisation souhaitées telles que les meilleurs liens (qualité de lien) ou le moins de commutations de faisceaux possible de l'antenne du puits. En employant un critère basé la qualité des liens, le meilleur secteur est calculé en utilisant les $RSSI_{Down}$ et $RSSI_{Up}$ enregistrés dans la table comme suit : Pour tout nœud N_i , il existe un secteur k tel que que la $|\frac{RSSI_{Down_k} + RSSI_{Up_k}}{2}|$ est le minimum, alors ce secteur k est marqué meilleur secteur.

Grâce à la détermination du meilleur secteur pour chaque nœud, pour contacter un nœud donné, le puits va faire de la commutation de topologies. Une topologie correspond à une orientation de l'antenne du puits, c'est-à-dire à un secteur, et est formée

par le puits et les nœuds qui ont ce secteur pour meilleur secteur comme le montre la figure 4.25. La commutation de topologies consiste à aller d'une topologie à une autre en fonction du nœud cible.

Nous pouvons voir la configuration globale comme une topologie d'étoiles avec chaque étoile formée par un secteur (orientation de l'antenne) du puits et des nœuds qui y sont couverts.

Secteur(degré)	ID nœud	RSSI _{Down}	RSSI _{Up}	Meilleur secteur
0	9	-84	-84	1
0	21	-79	-80	0
0	7	-79	-78	0
0	23	-78	-78	1
0	10	-82	-84	1
0	2	-82	-83	0
0	14	-84	-84	0
30	18	-80	-80	1
30	23	-84	-84	0
30	21	-72	-71	1
30	15	-76	-78	1
30	16	-79	-79	1
30	14	-83	-82	1
30	2	-84	-83	0
30	7	-76	-73	1
30	4	-79	-76	1
60	18	-83	-82	0
60	4	-84	-84	0
60	6	-78	-80	1
60	10	-83	-83	0
60	2	-80	-80	1
60	21	-83	-82	0
60	15	-81	-82	0
60	16	-83	-83	0
60	12	-84	-84	1
60	13	-82	-84	1
60	7	-79	-80	0

Figure 4.25 – Extrait d'une table de découverte du puits

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité une contribution forte de cette thèse qui concerne une émulation de topologie en étoile via une commutation de topologies partielles pilotée par une antenne à faisceau commutable. Cette contribution induit la nécessité

de faire ce que nous avons appelé une découverte de voisinage du puits, qui est en fait l'identification de toutes les solutions de connectivité induites par l'antenne du puits. Nous avons présenté une métrique à partir de ce que nous avons appelé la méthode «force brute», méthode générique commune aux variantes présentées pour réaliser cette découverte. Nous avons donc spécifié différentes variantes de la méthode de découverte de voisinage que sont outre la méthode force brute : la méthode ANDF et la méthode WAYE. La méthode force brute est simple et intuitive mais requiert une synchronisation temporelle des nœuds capteurs délicate. Aussi, cette solution s'avère être coûteuse en termes de temps de découverte. Afin d'optimiser ce temps de découverte de voisinage et d'éviter d'avoir les nœuds synchronisés sur une longue période, les méthodes ANDF et WAYE ont été proposées. Dans ANDF, le mécanisme de communication basé sur un échange en trois étapes entre le puits et les nœuds peut surcharger le réseau et faire que le temps de découverte soit long par rapport à celui de WAYE. Car contrairement à la méthode WAYE qui utilise un acquittement groupé et contenu dans la demande de signalisation du puits, avec la méthode ANDF, pour chaque réponse des nœuds, le puits doit envoyer un message d'acquiescement. A la fin de cette phase de découverte de voisinage du puits, ce dernier connaît la connectivité de toutes les topologies partielles induites par son antenne. Ces informations constituent le contenu de sa table de découverte.

Dans la suite de ce document, nous utiliserons ces informations obtenues à travers WAYE pour interroger les nœuds dans la phase de collecte de données.

Chapitre 5

Contribution sur la collecte de données

Les réseaux de capteurs sans fil suscitent un intérêt croissant pour les applications industrielles et/ou environnementales, les systèmes de contrôle des avions et la surveillance des patients dans les hôpitaux, en raison des nombreux avantages qu'ils offrent, tels que leur facilité d'installation, de maintenance et leur faible coût d'achat. Ces applications nécessitent souvent des transmissions déterministes et une fréquence régulière dans la collecte des données. Elles sont généralement déployées dans des environnements à propagation radio difficile. Dans ce type d'applications, la pertinence des mesures collectées nécessite souvent une livraison rapide, avec un défi important pour combiner efficacité et fiabilité.

Dans cette thèse, pour satisfaire l'exigence de déterminisme, nous proposons 3 mécanismes de collecte de données basés sur des stratégies de polling selecting à savoir le polling naïf (*NP : Naive Polling*), le polling groupé (*GP : Grouped Polling*) et le polling groupé avec extra slot (*GPEXtra : Grouped Polling with extra slot*). Pour ces trois mécanismes, le processus de collecte est déclenché par des sollicitations périodiques du puits destinées aux nœuds couverts par les topologies partielles permises par les orientations de l'antenne équipant le puits.

Le but est de pouvoir collecter régulièrement et rapidement des données contraintes en temps, c'est-à-dire qui sont valides pendant une durée bien déterminée. Ces données sont produites par des nœuds capteurs déployés souvent dans un environnement à propagation radio fortement perturbée.

5.1 Identification de la problématique

Nous considérons dans cette thèse une classe d'applications où les nœuds capteurs sont à portée via le pilotage de la directivité de l'antenne du puits. Le puits est chargé de collecter régulièrement les données produites à une fréquence précise. Les nœuds surveillent leur environnement et produisent régulièrement des mesures de petite taille (typiquement de 1 ou 2 octets) qui sont éventuellement associées à la date de leur production (ce qui nous amène à une charge utile de 3 octets par mesure). Ces échantillons sont stockés dans la file d'attente des nœuds. La date de production d'un échantillon permet de déterminer la durée pendant laquelle l'échantillon est toujours valide. Au bout de cette durée de validité, si l'échantillon n'est pas transmis à sa

destination (le puits dans notre cas), il est détruit par le nœud producteur.

Comme nous l'avons introduit dans le chapitre 2, des mesures de petites tailles nous incitent à pratiquer l'agrégation à la source. Nous allons montrer par un exemple que la contrainte de fraîcheur des données a un impact fort sur la marge d'agrégation. La figure 5.2 illustre un exemple d'application où les nœuds produisent des mesures à chaque 100 ms et sont régulièrement interrogés par le puits à une fréquence de 500 ms qui correspond à la durée de validité des mesures dans cet exemple. Les mesures sont déclenchées à partir de l'horloge locale des nœuds et sont mises dans leur file d'attente. Elles sont supposées être transmises avant une échéance correspondant à la contrainte de fraîcheur. Une donnée trop vieille est purgée car il est inutile de consommer de la bande passante et de l'énergie pour elle. Le nombre maximal de mesures que peut prendre en compte un nœud est fonction de la fréquence de production (100 ms) et de la durée de validité de chaque mesure (500 ms), soit $\frac{500}{100} = 5$ échantillons. En supposant que chaque mesure fait 3 octets, les trames transmises par les nœuds porteront en moyenne $5 \times 3 = 15$ octets de données utiles.

Aussi, cette caractéristique pour ces trames nous permet d'envisager des slots de temps de petite taille, de l'ordre de 5 à 10 ms pour la réponse des nœuds. Car plus la taille d'une trame est petite, plus le délai de sa transmission est petit comme le montre la figure 5.1.

Dans la suite nous détaillerons nos différentes méthodes de collecte de données basées sur le mécanisme de polling-selecting. Le tableau 5.1 recense les différents paramètres considérés dans cette contribution.

Tableau 5.1 – Paramètres utilisés dans nos méthodes de collecte

Paramètres	Définition
DRQ	Data Request Frame (trame de requête de collecte du puits)
DRP	Data Response Frame (trame de réponse des nœuds)
Ack	Trame d'acquiescement
N	Nombre de nœuds déployés autour du puits
$K = 12$	Nombre de secteurs de l'antenne du puits
NSV	Nombre de Secteurs Visités par le puits pendant la collecte
T_s	Durée du slot de réponse des nœuds
T_g	Temps de garde entre deux DRQ
T_c	Durée d'un cycle de collecte
Tr_q	Durée d'une trame DRQ (Slot du puits)
FER	Frame Error Rate (Taux d'erreur trame)
FDR	Frame Delivery Ratio (Taux de livraison trame)
$RFER$	Residual Frame Error rate (Taux d'erreurs résiduelles de trame)

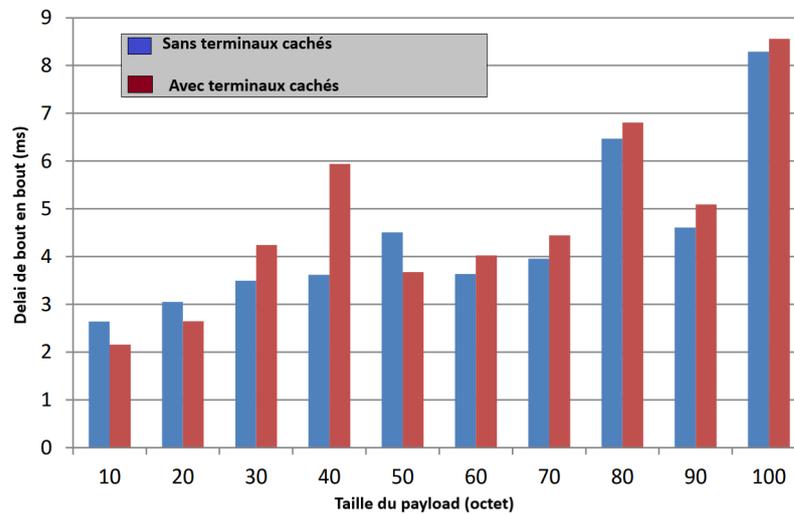


Figure 5.1 – Exemple de délai de bout en bout avec CSMA/CA slotté pour une configuration en étoile constituée de 4 nœuds capteurs et un puits [111]

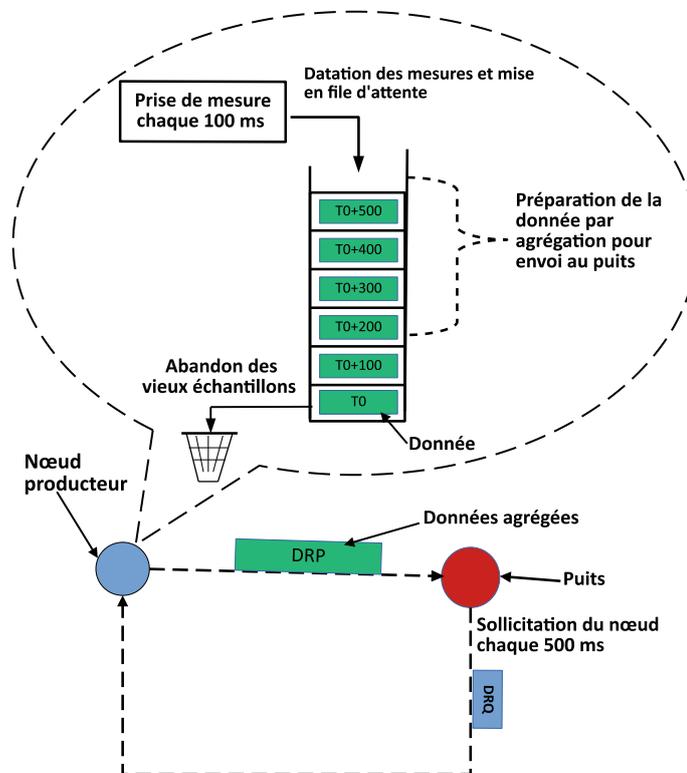


Figure 5.2 – Exemple de production de données et de sollicitation du puits

5.2 Méthodes de collecte de données

Les mécanismes de collecte de données présentés dans cette section sont basés sur une politique de Polling-selecting initiée par le puits. La collecte de données est organisée en cycle.

Le cycle de collecte consiste à collecter les données de tous les nœuds en sondant tous les secteurs nécessaires à cette collecte, dans notre cas il s'agit des secteurs qui

offrent des meilleurs liens. Nous désignerons par "meilleurs nœuds" tous les nœuds d'un secteur qui réalisent le meilleur lien avec le puits.

Dans chaque secteur, le puits diffuse périodiquement des DRQ (Data Request Frame) aux nœuds. Chaque DRQ contient l'information sur la séquence selon laquelle les nœuds sollicités transmettent leur DRP (Data Response Frame). Lorsqu'un nœud reçoit une DRQ, il agrège tous les échantillons de sa file d'attente et place les données agrégées dans sa DRP, comme le montre la figure 5.3.

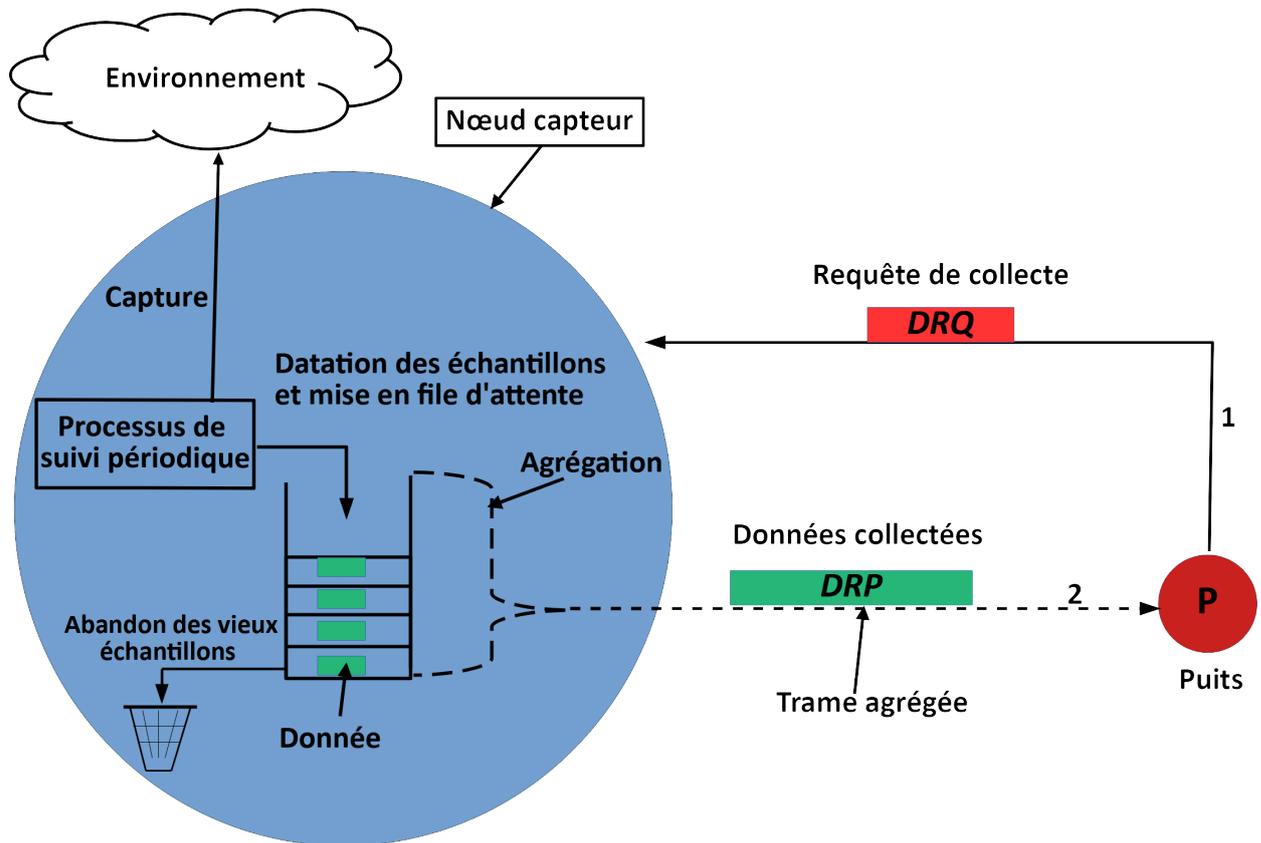


Figure 5.3 – Asynchronisme entre la production de données et la collecte

5.2.1 Polling naïf

Pour collecter les données produites par les nœuds capteurs de manière régulière, ce type de polling consiste à accorder un temps de parole individuellement à chaque nœud afin qu'il puisse envoyer ses données. Cette façon d'interroger les nœuds est décrite dans la figure 5.4. Dans cette méthode de collecte, pour chaque cycle de collecte et pour chaque secteur, le puits sollicite individuellement chacun des nœuds selon une stratégie conforme à des contraintes de QoS et/ou d'optimisation : meilleurs liens, le moins de commutations de faisceaux possible ...

Cette sollicitation se fait en envoyant une requête de collecte DRQ à chaque nœud comme le montre la figure 5.4. Si un nœud reçoit la commande DRQ, il envoie son DRP au puits et attend l'Ack. Si un Ack est reçu, le nœud retire ses échantillons de

sa file d'attente, sinon, il les conserve tant qu'ils sont toujours valides, c'est-à-dire que leur durée de validité n'est pas expirée. Puis il tente à nouveau de les envoyer lors du prochain cycle de collecte. Cette méthode de collecte bien que simple à mettre en place, génère beaucoup de surcharge (overhead) dans le réseau, ce qui a pour effet d'augmenter le temps que met le puits pour interroger tous les nœuds. Car pour chaque réponse DRP (chaque nœud), le puits envoie une commande DRQ. En considérant un réseau composé de N nœuds, si nous faisons l'hypothèse que la commutation de faisceaux prend un temps négligeable pour interroger tous les nœuds, le puits mettra un temps T_{c_x} défini comme suit :

$$T_{c_x} = N \times (\text{durée_de_DRQ} + \text{durée_de_DRP}) \quad (5.1)$$

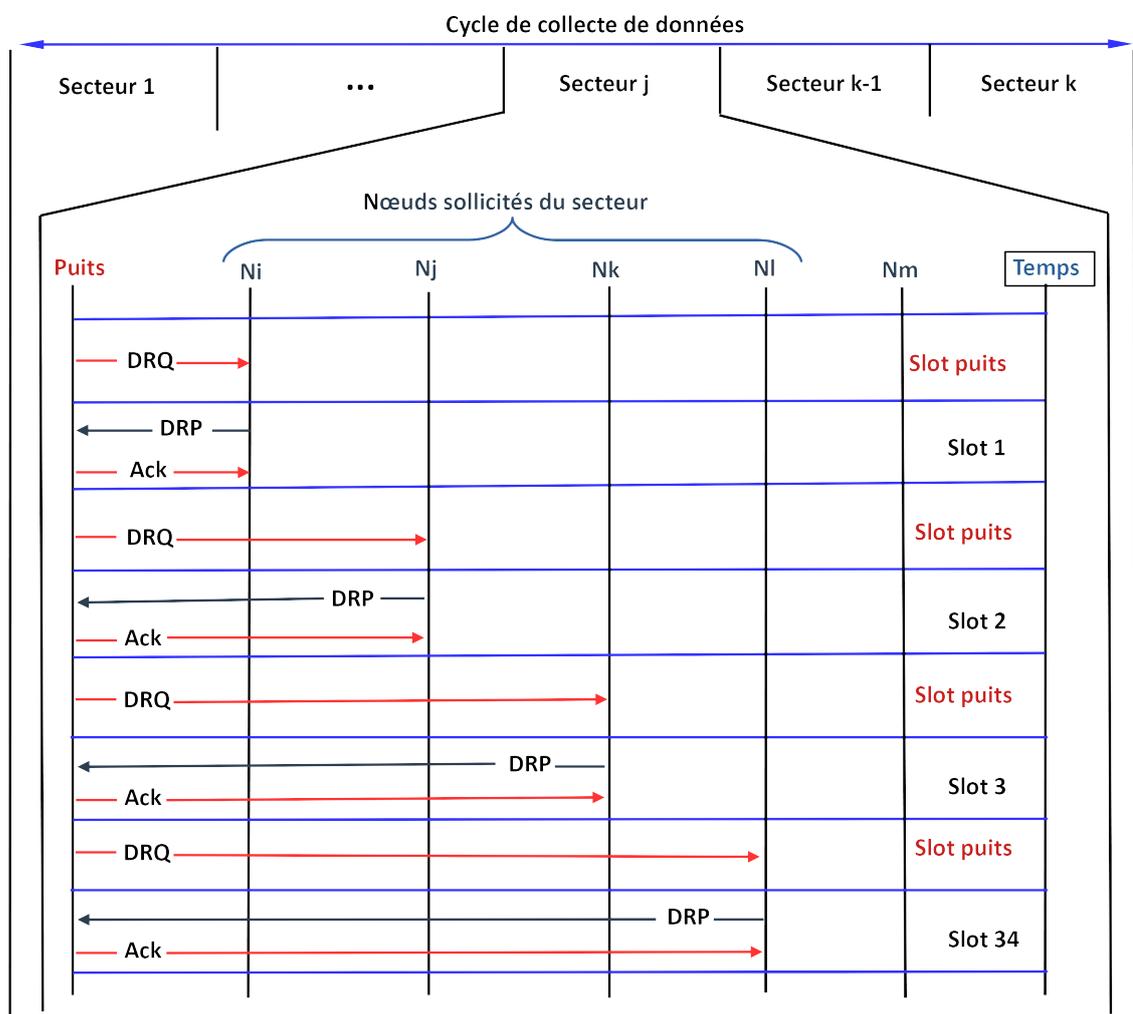


Figure 5.4 – Exemple d'exécution de la méthode polling naïf

5.2.2 Polling groupé

Pour minimiser la durée d'un cycle de collecte c'est-à-dire le temps mis par le puits pour interroger tous les nœuds capteurs, nous proposons la méthode du polling

groupé. Dans cette méthode, contrairement à la méthode polling naïf, le puits n'interroge plus individuellement chacun des nœuds sollicités dans un secteur. De fait la méthode polling naïf nécessite plus de temps pour interroger tous les nœuds. Pour solliciter tous les nœuds plus fréquemment il faut réduire Tc_x . Pour ce faire, il est possible d'utiliser une requête qui sollicite un lot de nœuds choisis parmi les nœuds couverts par une orientation de l'antenne donnée. Notre choix portera sur les meilleurs nœuds, c'est-à-dire les nœuds qui sont atteignables avec les meilleures qualités de lien dans une orientation. Dans chaque secteur avec des nœuds sollicités, le puits diffuse une seule requête DRQ contenant les informations sur les nœuds sollicités dans ce secteur et la séquence selon laquelle ils doivent envoyer leur réponse. Comme le montre la figure 5.5, après la réception de la commande du puits, chaque nœud se positionne dans son slot réservé et transmet sa réponse DRP. Le puits acquitte la réponse de chaque nœud dans son slot si sa réponse DRP est correctement reçue. La mutualisation de l'interrogation des nœuds apportée par la méthode polling groupé permet de réduire l'overhead du cycle de collecte donc sa durée par rapport à celle de la méthode polling naïf. Pour un réseau de N nœuds, si nous considérons que les nœuds sollicités sont localisés dans $NSV \leq K$ secteurs, le puits nécessitera Tc_y défini ainsi :

$$Tc_y = N \times (\text{durée_de_DRQ}) + NSV \times (\text{durée_de_DRP}) \quad (5.2)$$

Comme $NSV < N$, nous pouvons en déduire que $Tc_y < Tc_x$, c'est-à-dire que le polling groupé prend moins de temps pour interroger tous les nœuds que le polling naïf.

Cependant ni le polling groupé ni le polling naïf n'offrent un mécanisme qui permet à un nœud de retransmettre sa trame en cas de non réception d'Ack du puits, due à une perte occasionnée par des fluctuations de l'environnement de propagation.

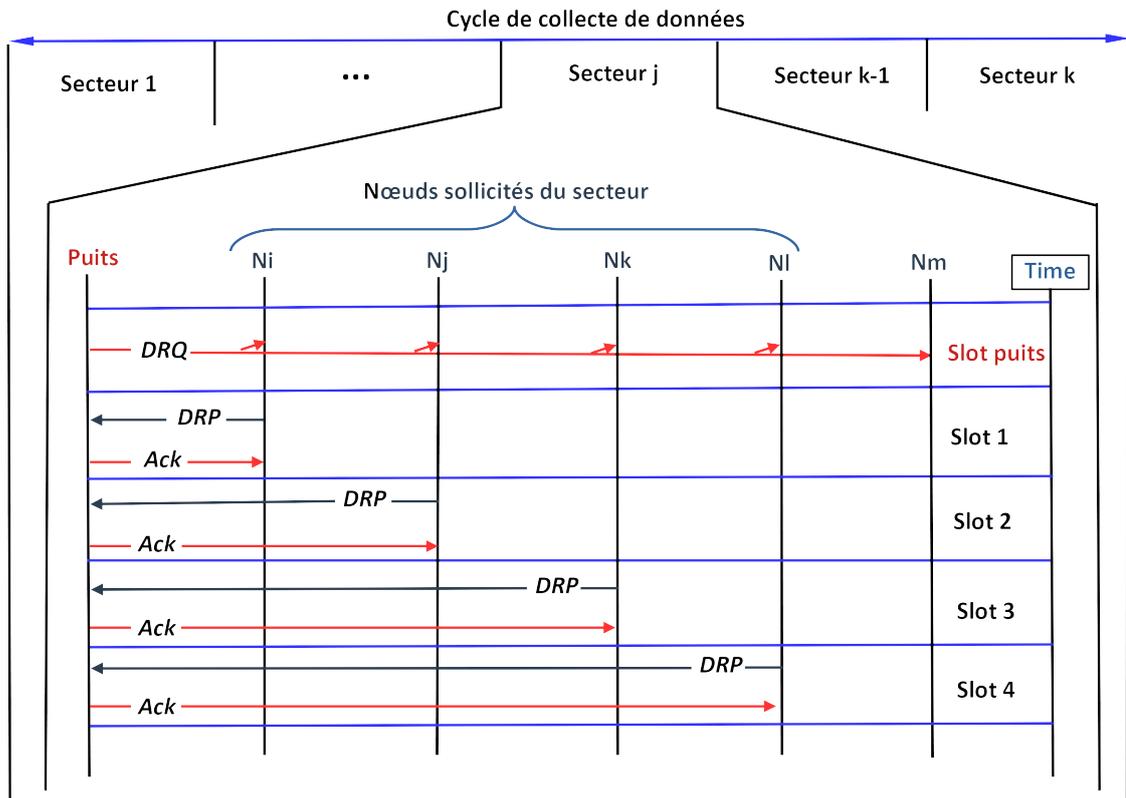


Figure 5.5 – Exemple d'exécution de la méthode polling groupé

5.2.3 Polling groupé avec extra slot

La figure 5.6 représente un scénario qui correspond à la collecte des informations des nœuds i , j , k et l durant laquelle la trame de réponse (DRP) de N_k n'arrive pas au puits et l'acquiescement de la trame DRP de N_j n'arrive pas à sa destination. Ceci représente les deux cas de dysfonctionnement de cette collecte, si nous faisons l'hypothèse que la trame de requête (DRQ) est toujours bien reçue par les nœuds sollicités dans cette sous-topologie définie par cette orientation d'antenne. Nous reviendrons sur cette hypothèse simplificatrice dans nos perspectives.

Les nœuds N_j et N_k savent que l'échange de leur trame DRP n'a été correctement réalisé à la suite de l'expiration du temporisateur associé à la gestion du slot de temps que le puits leur avait alloué (respectivement slot j et slot k).

Considérons le cas 1 mis en avant dans la figure 5.6. La trame DRP(N_j) est bien reçue par le puits sans être acquiescée. Les échantillons de mesures portés par cette trame sont bien reçus, ils ne sont pas exposés à l'obsolescence. Ceci étant, cette trame n'étant pas acquiescée, ces échantillons restent dans la file d'attente du nœud N_j . Nous avons alors deux cas à considérer :

- Si ces mesures ne sont pas contraintes par un critère de fraîcheur qui les empêchent d'attendre la prochaine collecte, elles resteront dans la file d'attente et seront agrégées aux mesures plus récentes avant d'être transmises. Le fait d'augmenter la charge utile (payload) de la trame n'a pas d'incidence critique pour

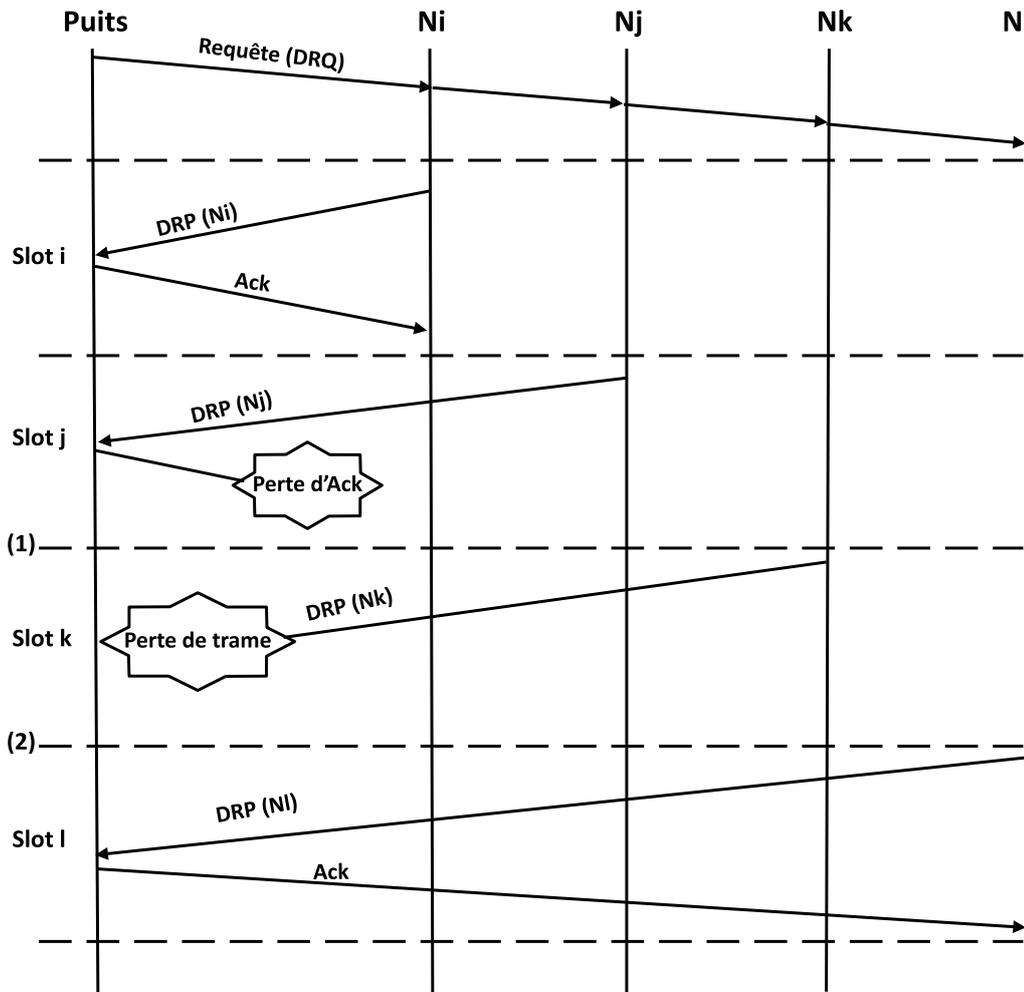


Figure 5.6 – Polling groupé : Exemple de perte de réponse de nœud (DRP) ou d’Ack

l’échange comme nous l’avons analysé dans le chapitre 2. C’est au niveau du puits que seront filtrés les échantillons reçus de façons multiples, problème bien connu dans les protocoles d’échange de trames.

- Si la durée de vie de ces informations ne leur permet pas d’attendre la prochaine collecte, elles sont alors automatiquement supprimées car devenues obsolètes. Ce cas n’a donc aucune conséquence sur la qualité de la collecte.

Considérons maintenant le cas 2 mis en avant dans de la figure 5.6.

- Si ces mesures ne sont pas contraintes par un critère de fraîcheur qui les empêchent d’attendre la prochaine collecte, nous nous retrouvons exactement dans le cas précédent, ces informations resteront dans la file d’attente et seront agrégées aux mesures plus récentes avant d’être transmises une nouvelle fois.
- Si la durée de vie de ces informations ne leur permet pas d’attendre la prochaine collecte elles sont alors automatiquement supprimées car devenues obsolètes. Ces échantillons de mesures sont perdus et c’est le cas critique de cette analyse pour lequel nous allons étudier une parade.

Pour compenser les effets des pertes que nous venons de décrire nous ne pou-

vons pas utiliser des techniques comme ARQ de Bluetooth car le codage des trames ne permet pas d'utiliser proprement des acquittements négatifs (NACK). La solution que nous allons développer repose sur le fait suivant : si le puits n'a pas directement conscience des cas 1 et 2, les deux nœuds N_j et N_k ont, grâce à la gestion d'un temporisateur, connaissance de l'existence d'une défaillance. Nous venons de démontrer que seul le dernier cas est critique et c'est pour celui-là que nous allons proposer une variante appelée polling avec extra slot. Le nœud k a donc conscience que ces données contraintes par une date de fraîcheur n'ont pas été transmises correctement. Ces données seront soit obsolètes soit détruites d'ici la prochaine collecte. L'idée est d'utiliser un mécanisme connu dans les échanges Maître-Esclave de Bluetooth et celui des RCSF qui consiste à utiliser un slot de temps de secours (ou extra-slot) [112].

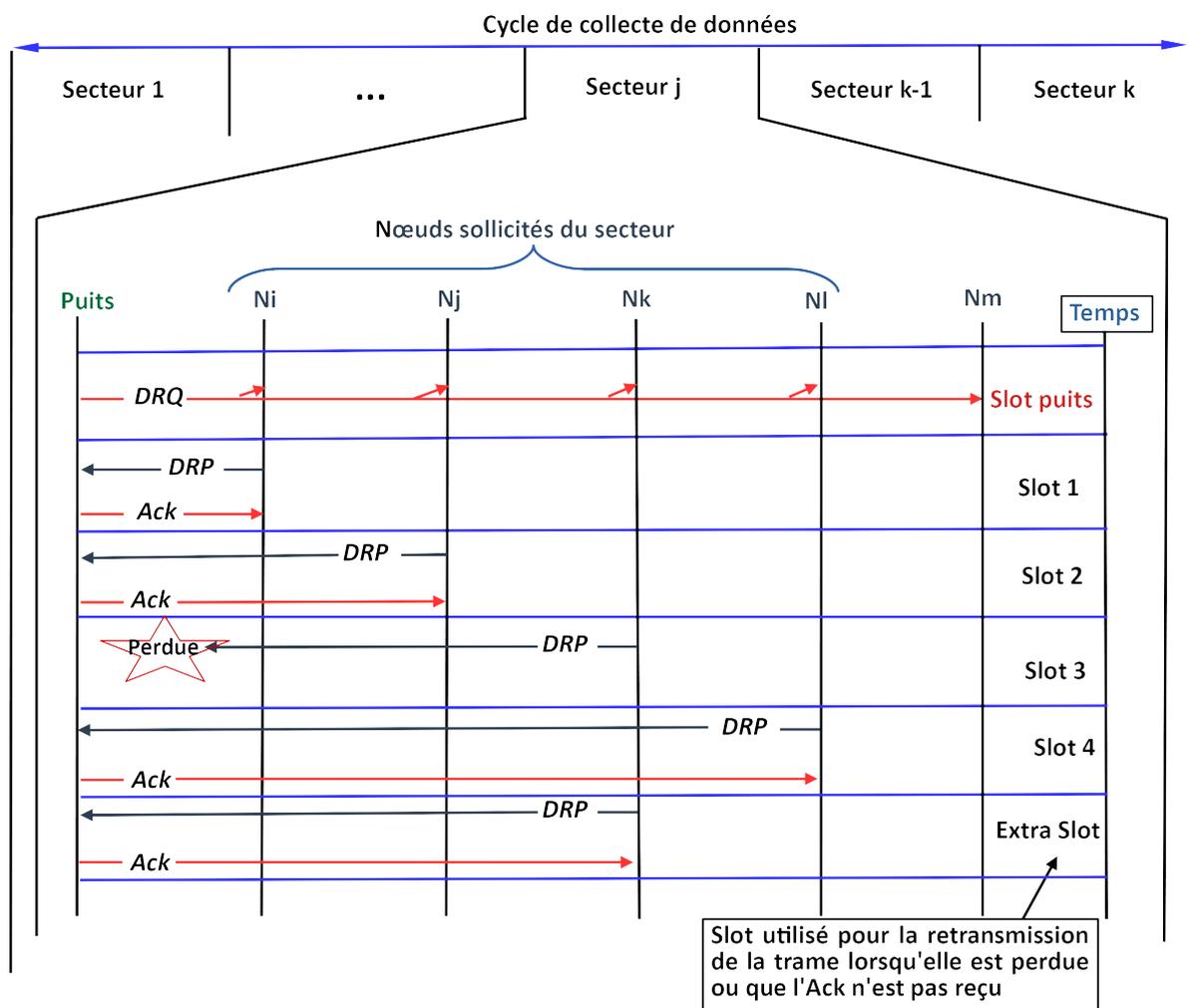


Figure 5.7 – Exemple d'exécution de la méthode polling groupé avec extra slot : cas favorable d'un nœud subissant une perte de trame

Le principe de la méthode polling groupé avec extra slot proposée consiste, en plus des slots alloués aux nœuds sollicités d'un secteur, à réserver un slot supplémentaire appelé extra slot comme illustré dans la figure 5.7. Cet extra slot sera à la disposition des nœuds qui se trouvent dans la situation du nœud N_k , c'est-à-dire une non confirmation d'un échange de trames pour des données sensibles au délais. Ainsi, grâce au

polling groupé avec extra slot, toute trame critique se voit proposer deux solutions : un slot de temps (TDMA) dédié mais aussi un second slot de temps partagé avec tous les nœuds ayant détecté un défaut d'acquiescement.

Dans la suite et dans nos propositions protocolaires et leur évaluation, nous ferons l'hypothèse simplificatrice que tous les nœuds ont de telles données. Nous nous plaçons donc dans un cas défavorable qui nous ménage des possibilités d'optimisation. Dans la section suivante, nous présenterons une étude analytique pour évaluer les performances de nos différentes méthodes de collecte de données en termes du temps requis pour un nombre donné de nœuds capteurs par le puits pour solliciter les données de ces derniers.

5.2.4 Analyse des méthodes de collecte

Dans cette section, pour les trois méthodes de collecte (NP, GP, GPExtra), nous verrons comment calculer (i) le temps (T_c) nécessaire au puits pour collecter des données de tous les nœuds, (ii) le nombre de nœuds pouvant être supportés par NP, GP et GPExtra pour une durée d'un cycle de collecte souhaitée, (iii) le gain apporté par l'utilisation d'un extra slot dans la méthode polling groupé en considérant différents taux d'erreur trame (FER).

5.2.4.1 Calcul de la durée d'un cycle de collecte

Dans cette partie, nous estimerons la durée d'un cycle de collecte (T_c) à travers les différents éléments présentés dans la figure 5.8 qui illustre le diagramme d'exécution de trois méthodes de collecte (NP, GP, Extra). Le T_c peut alors être défini comme le temps nécessaire au puits pour collecter les données de tous les nœuds capteurs situés dans tous ses secteurs. Cette durée (T_c) dépend du nombre N de nœuds capteurs, de la durée d'un slot T_s de réponse, du nombre NSV de secteurs restés de l'antenne du puits c'est-à-dire les secteurs qui ont des nœuds à solliciter, de la durée Trq de la commande DRQ et du temps de garde Tg entre chaque DRQ. Pour l'estimation de T_c , nous supposons que, sont négligeables :

- (i) le temps nécessaire pour passer d'un secteur au suivant,
- (ii) ainsi que le temps de traitement et les délais induits par le système d'exploitation (OS).

Dans les applications numériques de cette section, nous allons considérer $NSV = 12$, $NSV = 10$ et $NSV = 8$.

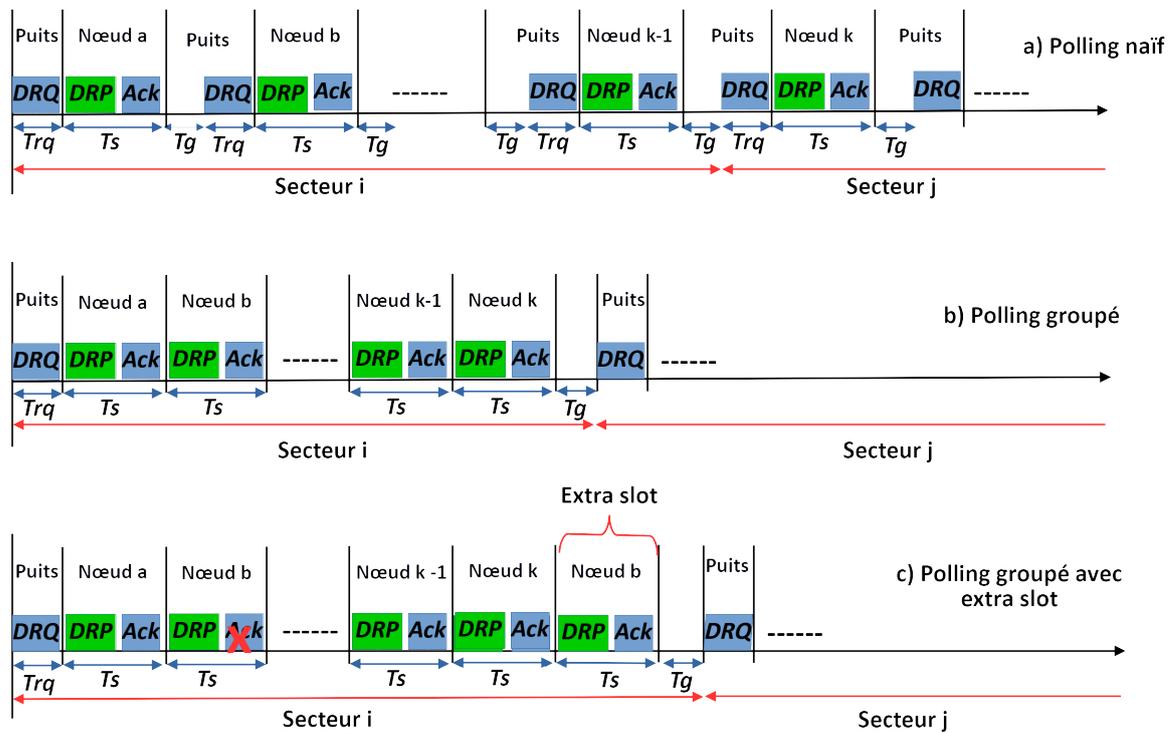


Figure 5.8 – Diagramme de temps : polling naïf (a) polling groupé (b) et polling groupé avec extra slot (c)

— T_c dans le cas du polling naïf (NP)

En observant la figure 5.8(a), nous constatons que pour collecter les données d'un nœud quelconque, le puits a besoin d'envoyer une requête DRQ qui dure Trq , de réserver un slot pour la réponse du nœud et un temps de garde Tg . Ainsi, le puits a besoin en termes de temps $(Ts + Trq + Tg)$ pour effectuer cette tâche. Pour effectuer un cycle complet de collecte, c'est-à-dire interroger N nœuds présents dans le réseau, la durée T_c minimale est définie comme suit :

$$T_c \geq N \times (Ts + Trq + Tg) \quad (5.3)$$

— T_c dans le cas du polling groupé (GP)

Dans la figure 5.8(b), nous pouvons observer que dans chaque secteur, le puits a besoin d'une seule commande DRQ qui prend Trq , d'un nombre de slots alloués correspondant au nombre de nœuds à solliciter dans le secteur et d'un temps de garde Tg . Pour interroger tous les nœuds dans tous ses secteurs à visiter (NVS), la durée T_c minimale requise par le puits est définie comme suit :

$$T_c \geq N \times (Ts) + NVS \times (Trq + Tg) \quad (5.4)$$

— T_c dans le cas du polling groupé avec extra slot (GPExtra)

Dans la figure 5.8(c), nous pouvons observer que la méthode GPExtra est presque

similaire à la méthode GP en terme de comportement. La seule différence entre GPExtra et GP est que dans GPExtra pour chaque secteur, le puits ajoute un slot supplémentaire aux slots réservés aux nœuds. Ainsi, la durée T_c minimale requise est alors définie par :

$$T_c \geq N \times (T_s) + NSV \times (Trq + Tg + T_s) \quad (5.5)$$

Exemple d'application numérique

Considérons un exemple d'application composée de $N \in \{28, 38, 48\}$ et considérons les valeurs suivantes $T_s = 5 \text{ ms}$, $Trq = 3,6 \text{ ms}$, $Tg = 1 \text{ ms}$. La durée minimale T_c pour trois méthodes de collecte peut être calculée en utilisant les équations (5.3), (5.4) and (5.5). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 5.2, nous pouvons remarquer que la durée T_c obtenue avec la méthode NP est longue et ne dépend pas du nombre NSV de secteurs. Ceci s'explique par le fait qu'avec NP le puits doit solliciter individuellement chaque nœud par une requête DRQ à la différence de GP et GPExtra où il n'envoie qu'une seule requête pour interroger éventuellement plusieurs les nœuds dans un secteur. Avec GP et GPExtra si le nombre NSV de secteurs visités pendant la collecte diminue, le temps d'un cycle de collecte diminue aussi, car le puits met moins de temps pour interroger tous les nœuds.

Tableau 5.2 – Exemple d'estimation de la durée T_c d'un cycle de collecte en ms avec NP, GP et GPExtra

	$NSV = 12$			$NSV = 10$			$NSV = 8$		
	NP	GP	GPExtra	NP	GP	GPExtra	NP	GP	GPExtra
28 nœuds	268,8	195,2	255,2	268,8	160	236	268,8	176,8	216,8
38 nœuds	364,8	245,2	305,2	364,8	236	286	364,8	226,8	266,8
48 nœuds	460,8	295,2	355,2	460,8	286	336	460,8	276,8	316,8

5.2.4.2 Calcul du nombre de nœuds supportés

Dans cette section, nous présentons l'estimation du nombre maximum (\hat{N}) de nœuds capteurs que NP, GP et GPExtra peuvent supporter lorsque la durée du cycle de collecte requise T_c est donnée en fonction des besoins de l'application visée. En utilisant les équations (5.3), (5.4) et (5.5), nous pouvons déduire les équations pour déterminer (\hat{N}) pour NP, GP et GPExtra. Les équations d'estimation de (\hat{N}) sont définies comme suit :

— Cas de NP

$$\hat{N} = \lfloor \frac{T_c}{T_s + Trq + Tg} \rfloor \quad (5.6)$$

— Cas de GP

$$\hat{N} = \lfloor \frac{Tc - NSV \times (Trq + Tg)}{Ts} \rfloor \quad (5.7)$$

— Cas de GPExtra

$$\hat{N} = \lfloor \frac{Tc - NSV \times (Trq + Tg + Ts)}{Ts} \rfloor \quad (5.8)$$

Exemple d'application numérique

Soit une application qui a besoin d'un cycle de collecte $Tc = 250 \text{ ms}$ et considérons les paramètres suivant $Ts = 5 \text{ ms}$, $Treq = 3,6 \text{ ms}$, $Tg = 1 \text{ ms}$. Considérons également $NSV = K = 12$, $NSV = 10$ et $NSV = 8$. Les nombres maximum \hat{N} obtenus pour NP, GP et GPExtra sont présentés dans le tableau 5.3. En observant les résultats pour une même durée Tc , nous constatons que lorsque le nombre de secteurs visités (NSV) diminue, les méthodes GP et GPExtra permettent de supporter plus de nœuds que la méthode polling naïf.

Tableau 5.3 – Impact de la durée de la collecte sur le nombre de nœuds supportés

	$NSV = 12$			$NSV = 10$			$NSV = 8$		
	NP	GP	GPExtra	NP	GP	GPExtra	NP	GP	GPExtra
\hat{N}	26	39	27	26	41	31	26	43	35

5.2.4.3 Calcul du nombre moyen de trames collectées

Dans cette section, nous allons analyser mathématiquement le gain apporté par l'utilisation d'un slot supplémentaire dans la méthode polling groupé. Afin de simplifier l'analyse, nous faisons les hypothèses suivantes :

- les requêtes du puits sont toujours reçues par tous les noeuds sollicités couverts par une orientation de l'antenne;
- le taux d'erreur trame (FER) est constant et homogène sur l'ensemble des liens (puits-noeud).

Considérons AN_i^g , AN_i^e les nombres moyens de réponses DRP collectées dans le secteur i par le puits avec respectivement GP et GPExtra. Soit $P_r = 1 - FER$ la probabilité qu'une réponse DRP soit correctement reçue par le puits dans un slot.

Dans les méthodes polling groupé (GP et GPExtra), dans chaque secteur, le puits alloue un nombre M_i de slots qui correspond au nombre de nœuds à solliciter. La probabilité P_k de recevoir correctement des réponses DRP dans k slots parmi M_i est définie comme suit :

$$P_k = \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \quad (5.9)$$

Avec $k \in [0, M_i]$

Grâce la probabilité P_k , les nombres moyens AN_i^g et AN_i^e peuvent ainsi être calculés :

1. Cas de GP

$$AN_i^g = \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \quad (5.10)$$

Le nombre total ($ANCF^g$) de DRP collectées par le puits avec GP au cours d'un cycle complet peut être déduit en faisant la somme des nombres moyens (AN_i^g) de chaque secteur i .

$$\begin{aligned} ANCF^g &= \sum_{i=1}^K AN_i^g \\ &= \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \end{aligned} \quad (5.11)$$

2. Cas de GPExtra

Dans GPExtra, le nombre moyen de DRP collectées (AN_i^e) dans un secteur i est calculé en prenant en compte le nombre moyen de DRP collectées dans les M_i premiers slots alloués comme dans GP et le nombre moyen dans le slot supplémentaire. AN_i^e est définie comme suit :

$$\begin{aligned} AN_i^e &= \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \\ &\quad + P_r \binom{M_i}{M_i - 1} \cdot P_r^{M_i - 1} (1 - P_r) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Comme dans le cas de GP, le nombre total ($ANCF^e$) de DRP collectées par le puits avec GPExtra au cours d'un cycle complet peut aussi être calculé en faisant la somme des nombres moyen (AN_i^e) de chaque secteur i .

$$\begin{aligned} ANCF^e &= \sum_{i=1}^K AN_i^e \\ &= \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} + \\ &\quad \sum_{i=1}^K P_r \binom{M_i}{M_i - 1} \cdot P_r^{M_i - 1} (1 - P_r) \end{aligned} \quad (5.13)$$

3. Gain apporté par l'extra slot

Le gain (G) apporté par l'utilisation d'un extra slot dans la méthode polling groupé est la différence entre $ANCF^e$ et $ANCF^g$ et est défini comme suit :

$$\begin{aligned}
G &= ANCF^e - ANCF^g \\
&= \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \\
&\quad + \sum_{i=1}^K P_r \binom{M_i}{M_i - 1} \cdot P_r^{M_i - 1} (1 - P_r) \\
&\quad - \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^{M_i} k \binom{M_i}{k} \cdot P_r^k (1 - P_r)^{M_i - k} \\
&= \sum_{i=1}^K P_r \binom{M_i}{M_i - 1} \cdot P_r^{M_i - 1} (1 - P_r)
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Nous constatons $G > 0$, ceci nous amène à conclure que l'utilisation d'un seul extra slot améliore les performances des méthodes de collecte basées sur le polling groupé.

Exemple d'application numérique

Considérons un réseau de 48 nœuds et faisons l'hypothèse simplificatrice que ces nœuds à solliciter sont équitablement répartis dans les K ($K = 12$) secteurs de l'antenne du puits. Chaque secteur a alors $M = 48/12 = 4$ nœuds sollicités et calculons les nombres moyens $ANCF^g$, $ANCF^e$ et le gain G en utilisant les équations (5.11), (5.13) et (5.14). Les valeurs calculées sont présentées dans le tableau 5.4 pour différents taux d'erreur trame. Grâce aux résultats dans le tableau, nous observons que l'utilisation de l'extra slot permet d'améliorer la performance de la collecte. En effet, grâce à l'extra slot un nœud dont la trame qui n'a pas réussi son échange, a une autre chance de retransmettre sa réponse au puits.

Tableau 5.4 – Valeurs moyennes du nombre de trames collectées et gain pour différents taux d'erreur (FER)

FER	$ANCF^g$	$ANCF^e$	G
1%	47,52	47,9808	0,4608
5%	45,6	47,5548	1,9548

5.3 Evaluation et analyse des résultats

Nous avons également évalué le gain de notre méthode de polling groupé avec extra slot (GPExtra) au moyen d'une simulation utilisant le simulateur Cooja conçu pour émuler des réseaux de capteurs fonctionnant sous le système d'exploitation Contiki. Ceci permet d'avoir des comportements réalistes des nœuds (voir section 3.5). Les simulations ont été effectuées en utilisant la couche physique de la norme IEEE 802.15.4. Les configurations utilisées dans ce travail de simulation sont basées sur le jeu de paramètres donné dans le tableau 5.5. Chaque valeur de résultat présentée dans ce document est la moyenne de 20 simulations différentes utilisant le même nombre de nœuds. Nous avons évalué l'efficacité des différentes méthodes de collecte NP, GP et GPExtra en termes de durée du cycle de collecte, du nombre moyen de trames collectées par le puits par cycle de collecte, et du taux de livraison des trames (FDR : *Frame Delivery Rate*).

Tableau 5.5 – Paramètres de simulation pour la collecte de données

Paramètres	Valeur
Zone de couverture	250 m × 250 m
Seuil de réception	-86 dBm
Durée d'un slot	5 ms
FER	1% et 5% (voir Annexe A.4)
Fréquence de production de données des nœuds	10 échantillons/s
Nombre de nœuds capteurs	28, 38 et 48
Type d'antenne	Antenne à faisceau commutable (puits)
	Antennes omnidirectionnelles (nœuds capteurs)

5.3.1 Durée de cycle de collecte

Dans nos différentes méthodes de collecte (NP, GP et GPExtra), les nœuds capteurs ne transmettent leur trame que lorsqu'ils sont interrogés par le puits. La figure 5.9 présente le nombre de trames envoyées par les nœuds pendant une durée de collecte fixée à 10 s. Le nombre de trames envoyées par les nœuds reflète la durée du cycle de collecte. Si pour une méthode de collecte, le nombre de trames envoyées par les nœuds est élevé par rapport aux autres méthodes, cela signale que la durée de son cycle de collecte est plus courte. En observant la figure 5.9, nous constatons que pour des configurations de 38 et 48 nœuds, le nombre de trames transmises (par les nœuds) obtenu avec NP, est inférieur à ceux obtenus avec GP et GPExtra. Cela signifie qu'avec NP plus le nombre de nœuds est grand, plus le puits prend du temps pour interroger tous les nœuds. Ceci s'explique par le fait que dans un cycle, le puits doit envoyer une commande DRQ individuellement à chaque nœud. Par conséquent, la durée du cycle est plus longue, alors qu'avec GP et GPExtra, le puits n'a besoin que d'une seule requête

DRQ pour interroger tous les nœuds à solliciter de chaque secteur. De cette façon, la durée du cycle de collecte se trouve réduite. Dans les exemples numériques présentés dans le tableau 5.2, nous pouvons voir que pour 48 nœuds, la durée du cycle de collecte avec NP est de 460,8 ms, alors qu'elle est de 295,2 ms et de 355,2 ms respectivement avec GP et GPExtra. Ces exemples numériques confirment les résultats obtenus par la simulation.

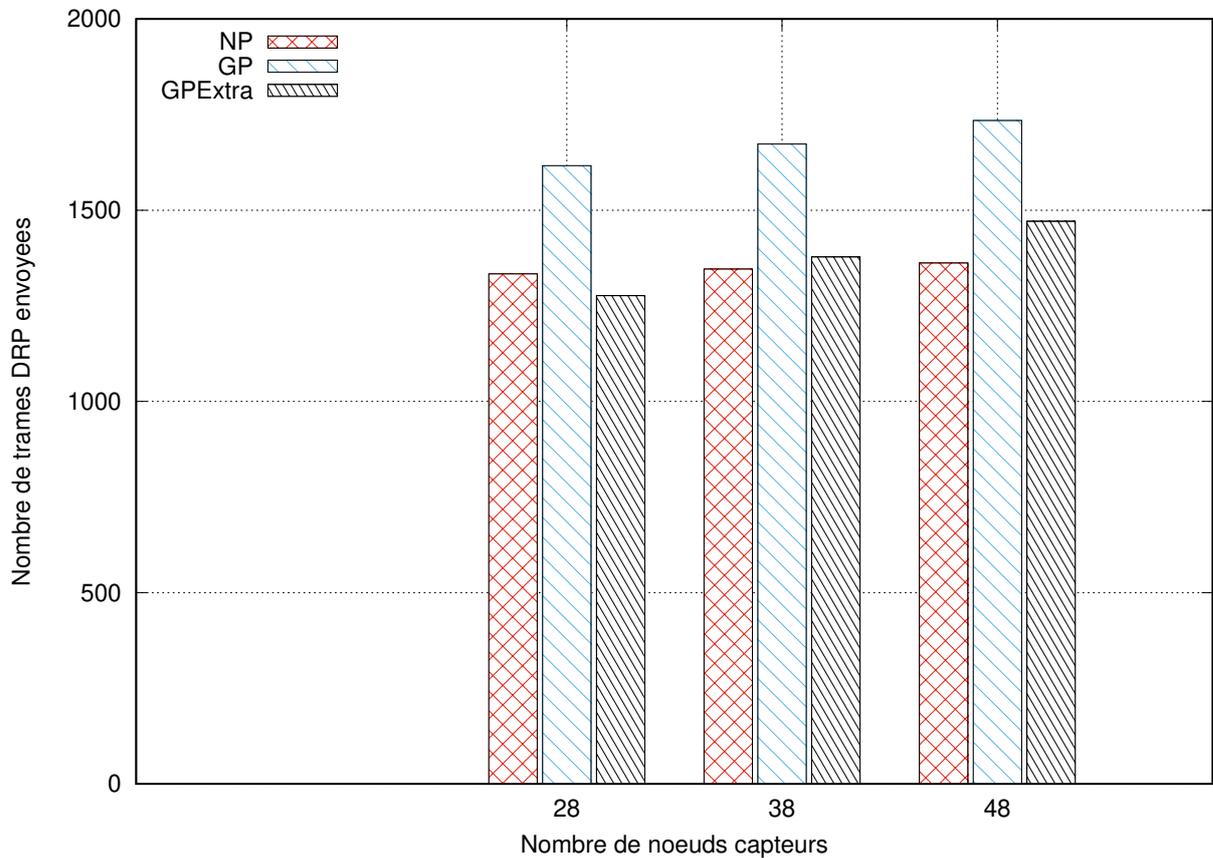


Figure 5.9 – Comparaison de NP, GP, GPExtra sur le nombre de trames DRP collectées pour un temps donné

5.3.2 Nombre moyen de trames collectées par le puits par cycle de collecte

Dans cette section, nous comparons GP et GPExtra en terme du nombre moyen de trames collectées obtenu par analyse théorique et par simulation pour un cycle donné. Tous les résultats sont obtenus en considérant deux valeurs choisies du taux d'erreur de trame (FER). Les résultats de l'analyse théorique sont obtenus à partir tableau 5.4. A partir de la figure 5.10 et du tableau 5.6 qui représente les valeurs en ordonnée, nous constatons que les résultats obtenus grâce à la simulation suivent l'allure des résultats issus de l'analyse théorique. Dans les deux cas (simulation et analyse théorique), GPExtra permet d'avoir des valeurs moyennes de trames collectées par puits plus élevées. La performance de GPExtra en termes de nombre moyen de trames collectées est

encore plus grande lorsque le taux d'erreur trame est de 5%. En effet, pour 48 nœuds et un FER de 5%, le nombre moyen de trames collectées par le puits est de 45,24 avec GPExtra contre 42,96 avec GP en simulation. La raison en est qu'avec GPExtra, lorsqu'un nœud n'est pas acquitté par le puits, il a une seconde chance pour retransmettre sa réponse dans le slot supplémentaire. Ce mécanisme de retransmission permet de récupérer les pertes de trames dues à l'instabilité du médium. Les pertes de trames sont plus nombreuses lorsque le FER est élevé.

Si l'intérêt de l'usage de ce slot supplémentaire augmente à cause d'un taux d'erreur élevé, le risque de collisions dans ce slot augmente et rend ce mécanisme improductif et coûteux en nombre de slots alloués.

La différence observée entre les résultats de l'analyse théorique et ceux des simulations est due au fait que dans l'analyse théorique, seules les pertes de réponse RP des nœuds sont prises en compte dans l'analyse du nombre moyen de trames collectées. Alors que dans les simulations, les commandes DRQ, l'Ack du puits et les réponses DRP des nœuds peuvent toutes subir des pertes. Les pertes de DRQ peuvent diminuer le nombre moyen de trames collectées au niveau du puits car les nœuds envoient leur DRP uniquement lorsqu'ils sont interrogés par le puits, ceci est un inconvénient des méthodes pollings groupés.

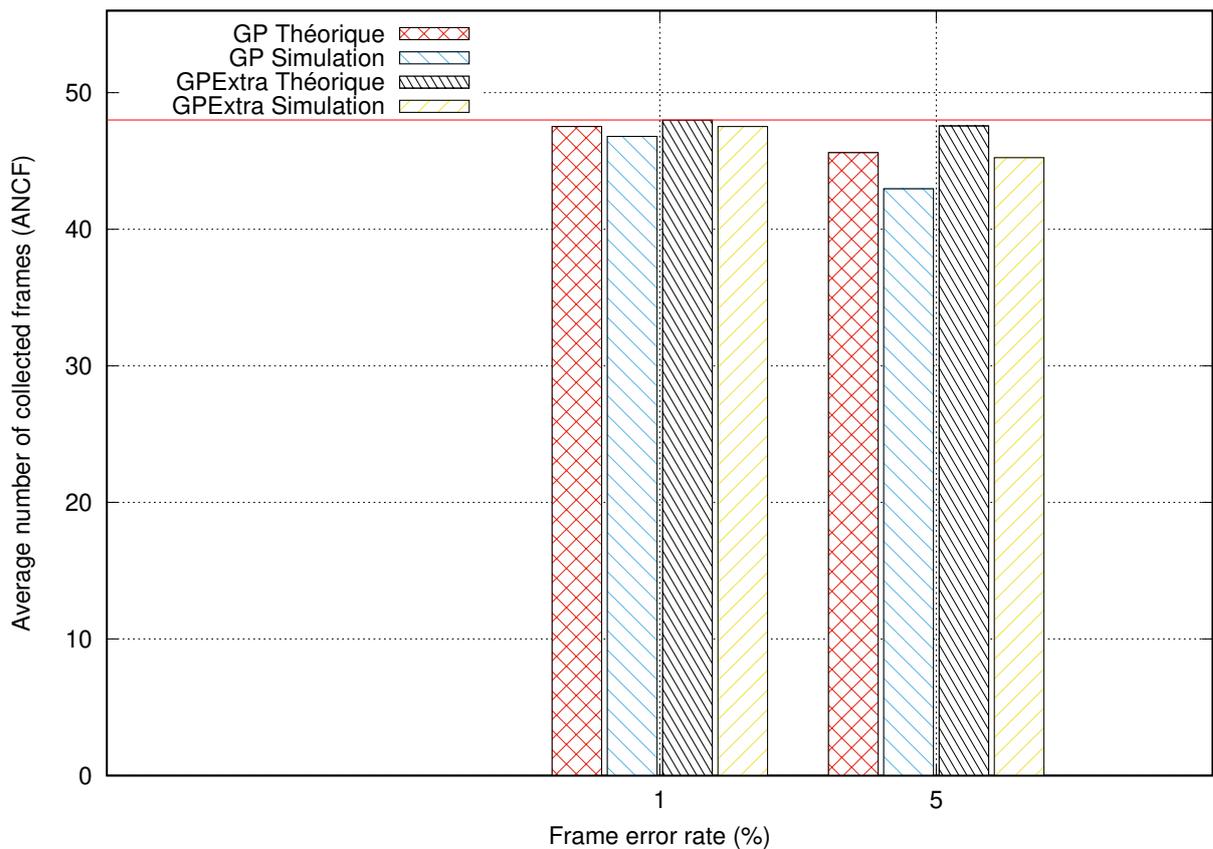


Figure 5.10 – Comparaison de GP et GPExtra en termes de nombre moyen de trames collectées obtenu par simulation et par analyse théorique pour un réseau de 48 nœuds

Tableau 5.6 – Nombre moyen de trames collectées (ANCF) par cycle pour un réseau de 48 nœuds

FER	Average number of collected frame (ANCF)			
	GP simulation	GP analyse théorique	GPEXtra simulation	GPEXtra analyse théorique
1%	46,8	47,52	47,52	47,9808
5%	42,96	45,6	45,24	47,5548

5.3.3 Taux de livraison des trames

Notre objectif est de garantir une collecte de données déterministe, c'est-à-dire que nous voulons recevoir un maximum de trames qui satisfont à une contrainte de temps définie par une limite de fraîcheur. Pour ce faire notre solution se base sur une méthode de polling avec emploi d'un extra slot qui permet d'avoir un cycle de collecte régulier. L'extra slot permet de rattraper une certaine partie des trames perdues, l'objectif étant de rendre le taux d'erreurs résiduelles de trame (RFER) négligeable.

Concrètement, nous définissons le FDR comme le rapport entre le nombre total de trames reçues par le puits et le nombre total de trames envoyées par les nœuds, et le RFER comme étant le taux de trames perdues qui n'ont pas pu être rattrapées. Le FDR donne une idée de l'efficacité d'une méthode de collecte pour transmettre avec succès les données des nœuds vers le puits. Dans la figure 5.11, nous comparons les performances de nos trois méthodes de collecte (NP, GP et GPEXtra) pour deux valeurs représentatives du FER (1% et 5%). Nous pouvons observer que NP et GP atteignent presque le même FDR. Nous remarquons également que GPEXtra obtient un FDR plus élevé que NP et GP, et cette différence est encore plus marquée lorsque le FER est de 5%. Pour un FER de 1%, le RFER obtenu par GPEXtra est quasiment négligeable et pour un FER de 5%, valeur élevée pour un réseau local, GPEXtra permet d'avoir un RFER de 0,6%. Ceci d'autant plus que nous avons considéré que toutes les mesures générées étaient contraintes par une date de validité, augmentant ainsi la concurrence pour l'usage de l'extra slot.

Le mécanisme de retransmission fourni par GPEXtra aide à améliorer le FDR en donnant aux nœuds qui n'ont pas reçu l'acquittement attendu émis par le puits un autre essai dans le slot supplémentaire. Cette amélioration diminue le nombre de trames perdues du aux fluctuations de l'environnement de propagation. Même pour un réseau avec un FER de 5%, le RFER obtenu avec GPEXtra est inférieur à 1%.

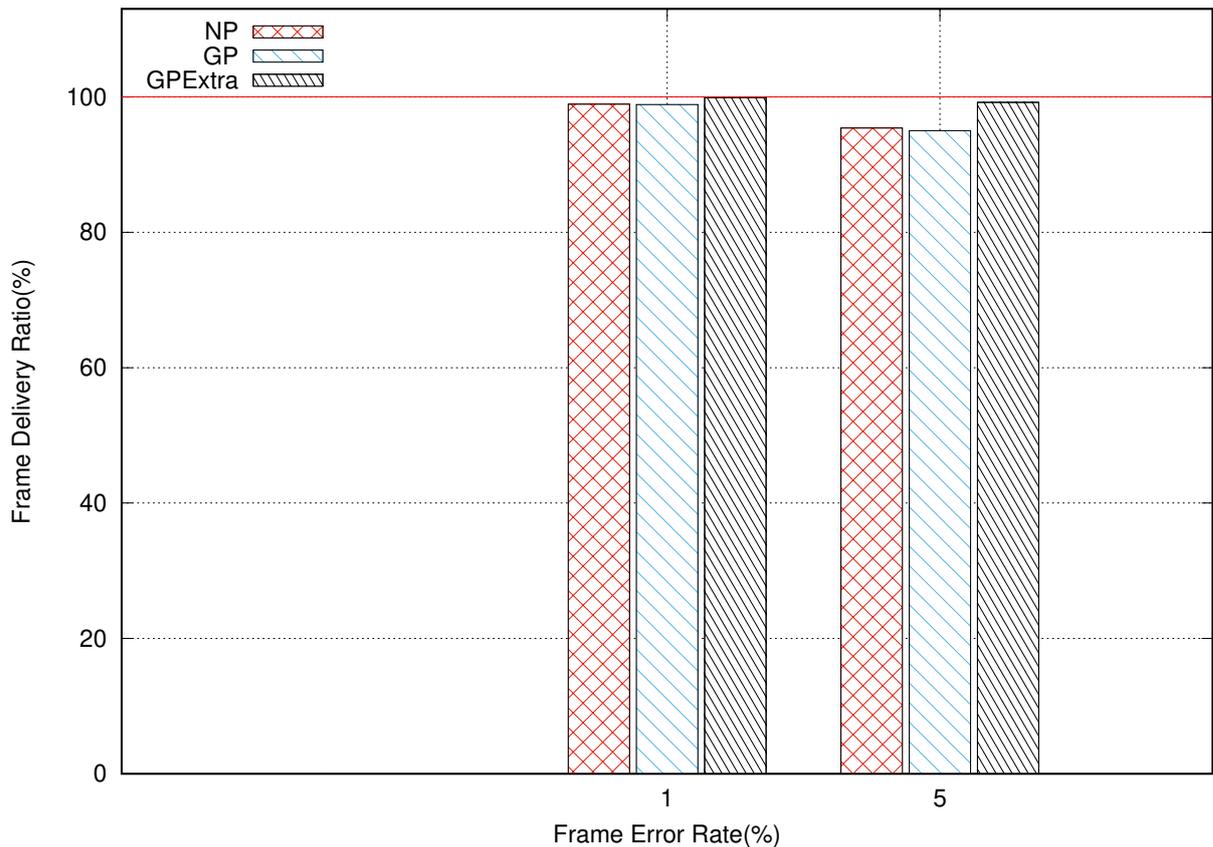


Figure 5.11 – Comparaison de NP, GP, GPExtra sur le taux de livraison des trames pour un FER donné dans un réseau à 48 nœuds

5.4 Conclusion

Ce chapitre a constitué la deuxième contribution forte de cette thèse. Il s’agissait de répondre au problème de la collecte de mesures contraintes par un délai de validité et à ses spécificités présentées précédemment. Nous avons proposé trois méthodes de collecte de données toutes initiées par le puits et basées sur la stratégie du polling selecting. Ces méthodes permettent de garantir une collecte rapide et quasi déterministe. La première méthode NP, la plus lente, consiste à interroger individuellement chaque nœud par le puits. Afin de réduire le délai de la collecte, dans la seconde méthode GP, le puits utilise une seule requête pour interroger à la fois tous les nœuds sélectionnés selon un critère bien défini dans un secteur. Cette requête contient la liste des nœuds et l’ordre selon lequel ils doivent transmettre leur réponse. Enfin, pour tenir compte de la possibilité de perte des réponses des nœuds et des contraintes de validité des mesures, la dernière méthode GPExtra incorpore un slot supplémentaire utilisé par les nœuds non acquittés pour retransmettre leur réponse.

Les résultats analytiques et de simulation ont montré que même pour un taux d’erreur trame élevé (FER = 5%), la méthode GPExtra offre plus d’efficacité en termes de taux de livraison des trames.

Conclusion et Perspectives

Dans cette thèse, nous nous sommes consacrés à la recherche de solutions pour des applications industrielles ou environnementales pouvant servir une large zone de couverture, des débits permis par les composants conformes à la norme IEEE 802.15.4 et assurer une faible latence aux données récoltées.

6.1 Conclusion

Pour ce faire, nous avons retenu une configuration en étoile où seulement le puits est équipé d'une antenne directionnelle. L'usage d'une antenne à faisceau commutable nous permet d'augmenter la capacité du réseau et la portée des liens radio au prix d'une connectivité intermittente qui faut piloter pour émuler les services d'une étoile. Cette solution présente l'avantage de concentrer les spécificités de cette approche au niveau du puits et de rester compatible avec les solutions hardware des nœuds capteurs existants. La directivité de l'antenne par le puits nous amène à considérer un ensemble de topologies partielles de l'étoile, chacune associée à une orientation de son faisceau. Nous avons donc à faire face à la gestion d'une commutation de topologies qui a un impact fort sur les couches basses de la pile protocolaire des réseaux de capteurs. Le couplage d'une antenne à faisceau commutable au puits d'une étoile conduit nécessairement à découvrir ces différentes topologies, cette tâche s'apparente à une extension d'une découverte de voisinage pour laquelle nous avons proposé plusieurs variantes de protocole basées sur un principe de découpage temporel. Le puits alloue des créneaux temporels pour que les nœuds non découverts puissent se signaler. Ce principe général a permis de décliner plusieurs variantes qui réalisent toutes une découverte complète des nœuds en moins de temps qu'il n'en faut à une méthode dite «force brute» qui nous sert de référence.

Ces protocoles partagent le même but principal : permettre au puits de connaître son voisinage et de savoir dans quelle(s) direction(s) pointer le faisceau de son antenne pour communiquer avec un nœud capteur donné de l'étoile. A l'issue de la phase de découverte, le puits dispose d'une table de correspondance secteur et nœud capteur. Celle-ci est usuellement appelée table de découverte ou table de connectivité, elle sera utilisée par le puits pour construire un échancier pour la phase de collecte de données.

Après la phase de découverte de voisinage, la phase de collecte de données est la seconde problématique abordée dans cette thèse. Cette dernière s'appuie sur les informations contenues dans la table de découverte pour établir une liaison opération-

nelle avec chacun des nœuds. Le domaine applicatif auquel nous nous adressons ici concerne la collecte de données constituées d'échantillons de mesures de petite taille associés à une durée de validité (contrainte de fraîcheur).

Nous avons considéré comme hypothèse simplificatrice que tous les nœuds de l'étoile produisaient des mesures à la même fréquence et ceci de façon asynchrone par rapport aux activités du réseau. Chaque nœud stocke ses mesures dans une file d'attente jusqu'à ce qu'elles soient transmises convenablement au puits ou qu'elles aient dépassé une date de péremption. Le puits vient collecter le contenu de ces files d'attente sur la base d'un protocole de polling selecting. Nos travaux confirment le fait que la collecte d'information portée par des trames courtes se traduit par des débits applicatifs faibles, ceci malgré l'usage d'une technique d'agrégation à la source. Pour accélérer cette collecte une version de polling groupé a été proposée alors que pour augmenter la régularité du cycle de collecte et pour minimiser le taux d'erreurs résiduelles de trame, nous avons fait appel à l'usage d'un intervalle de temps supplémentaire ou extra slot. Une approche formelle et un travail de simulation sont venus conforter nos démarches quand le taux d'erreurs trames est inférieur à 5%. La régularité du cycle de collecte ainsi obtenue nous permet d'imaginer appliquer des stratégies d'économie d'énergie aux nœuds de façon à ce qu'ils «dorment» une grande partie du cycle en activant la notion de duty cycle disponible dans les composants de la norme 802.15.4. Ceci fait le lien avec nos perspectives.

6.2 Perspectives

6.2.1 A courts termes

Outre l'implémentation d'une stratégie de réveil synchronisée sur la phase de collecte pilotée par le puits pour économiser l'énergie, nos autres perspectives ont déjà été suggérées dans ce mémoire de thèse. Il s'agit essentiellement de remettre en question les hypothèses simplificatrices qui ont été retenues.

Concernant le fait que la production de mesures est commune à tous les nœuds capteurs. Selon les applications il est possible d'identifier des nœuds capteurs qui n'ont pas la même façon de produire des données (fréquence et taille). Ceci a un impact sur l'ordonnancement des requêtes de collecte, point qui n'a pas été développé ici.

Concernant la QoS attachée à l'application il est aussi possible que certains échantillons soient associés à une contraintes de fraîcheur et d'autres pas, cette différenciation de service sera à considérer aussi.

Concernant le fait que les trames de requêtes soient supposées atteindre tous les nœuds sollicités dans un secteur, ce point est le plus avancé de nos perspectives. En effet notre équipe de recherche se consacre à rendre robuste les trames de requête et les trames de pilotage des actionneurs du réseau. Les principales pistes explorées pour

cela reposent sur le mode *promiscuous* des modules radio et l'usage d'un code auto correcteur appliqué à tous les champs de ces trames.

Concernant les performances en débit et en énergie nous avons montré que la façon de visiter les secteurs d'une telle étoile avait un impact fort sur ces deux paramètres. La façon de grouper les nœuds sollicités pour utiliser des liens radio de qualité acceptable et pour minimiser le temps de cycle de collecte est à formaliser en fonction de la QoS visée.

6.2.2 A moyens termes

Une implémentation partielle a été faite grâce au choix de l'outil Cooja dans notre travail de simulation. Cet effort devrait être poursuivi pour montrer que cette solution est adaptable aux différentes générations de nœuds capteurs qui n'exécutent pas tous le même OS embarqué et/ou qui n'ont pas tous la même réactivité.

6.2.3 A plus longs termes

Les topologies en étoile conforteront leur succès actuel s'il est possible de concilier grande portée et débit élevé. Le couplage d'une antenne directive aux protocoles couches basses d'un nœud puits est une perspective qui repose sur une expertise transversale qui inclut la conception des antennes et des protocoles, le codage de l'information, l'ordonnancement et les systèmes embarqués notamment. Nous avons donc face à nous un champ ouvert qui laisse de la place à l'innovation aussi bien pour des applications environnementales qu'industrielles.

Publications

Conférences

1. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, BIDAUD, Raphaël, SERVAJEAN, Marie-Françoise, et al. Evaluation of the interest of an extra-slot for a grouped polling-selecting method. In : 2020 IEEE 39th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). IEEE, 2020. p. 1-8.
2. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, TALL, Hamadoun, BIDAUD, Raphaël, et al. Topology Discovery Delay Evaluation in Star Topology Network with Switched-Beam Antenna Sink. In : International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless. Springer, Cham, 2019. p. 62-73.
3. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, BIDAUD, Raphaël, SERVAJEAN, Marie Françoise, et al. Neighborhood Discovery Approach in WSN for Star Topology Using a Switched Beam Antenna. In : 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2019. p. 1-6.
4. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, SERVAJEAN, Marie-Françoise, et MISSON, Michel. Aloha-like Neighbor Discovery in a WSN Star Topology using a Sink-side Beam Antenna. In : 2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). IEEE, 2019. p. 722-728.
5. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, TALL, Hamadoun, SERVAJEAN, Marie-Françoise, et al. Performance Evaluation of Neighbor Discovery Algorithms in a Star WSN : Switched beam antenna vs omnidirectional antenna at the Sink. In : 2019 8th International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN). IEEE, 2019. p. 1-6.
6. SIDIBE, Guéréguin Der Sylvestre, SURIER, Aurélien, BIDAUD, Raphaël, et al. Use of a switched beam antenna in a star wireless sensor network for data collection : neighbor discovery problem. In : 2019 IEEE international conference on wireless for space and extreme environments (WiSEE). IEEE, 2019. p. 21-26.

Annexe

A.1 Algorithme de découverte de voisinage ANDF

```
1 K Nombre de secteurs de l'antenne du puits
2 nbslot_init Nombre initial de slots alloués
3 roundCourant Round courant
4 secteurCourant  $\leftarrow 1$  Orientation actuelle de l'antenne
5 end  $\leftarrow 0$ 
6 tant que secteurCourant  $\leq K$  faire
7   roundCourant  $\leftarrow 1$ 
8   NS  $\leftarrow$  nbslot_init
9   répéter
10    Diffusion de POLL avec secteurCourant, roundCourant and NS
11     $S_0 \leftarrow 0, S_1 \leftarrow 0, S_2 \leftarrow 0$ 
12    pour chaque slot alloué faire
13      Attente de HELLO dans le sous-slot 1
14      si HELLO reçu alors
15        Mettre à jour de la table de découverte
16        Préparation du message d'acquiescement
17        Envoi d'Ack dans le sous-slot 2
18         $S_1 \leftarrow S_1 + 1$ 
19      sinon
20        si Collision détectée alors
21           $S_2 \leftarrow S_2 + 1$ 
22        sinon
23           $S_0 \leftarrow S_0 + 1$ 
24        fin
25      fin
26    fin
27    si  $S_0 = NS$  alors
28      NS  $\leftarrow 1$ 
29      end  $\leftarrow 1$ 
30    sinon
31      end  $\leftarrow 0$ 
32      si  $S_0 \geq \lceil NS \times \frac{1}{2} \rceil$  et  $S_2 = 0$  ou  $S_1 \geq \lceil NS \times \frac{3}{4} \rceil$  et  $S_2 = 0$ 
33      alors
34        NS  $\leftarrow \frac{\#SLOT}{2}$ 
35      sinon
36        NS  $\leftarrow \#SLOT$ 
37      fin
38    fin
39    roundCourant  $\leftarrow$  roundCourant + 1
40  jusqu'à  $S_0 = NS$  et end = 1;
41  secteurCourant  $\leftarrow$  secteurCourant + 1
42 fin
```

Algorithm A.1.1 – ANDF : Processus de sondage du puits

```

1 secteurPrecedent ← -1, acquitte ← 0,  $P_t$  Probabilité de transmission
2 i Nombre de noeuds déjà découvert par le puits
3 tant que vrai faire
4   si POLL reçu alors
5     Récupérer secteurCourant, roundCourant, NS
6     si secteurCourant != secteurPrecedent alors
7       | SecteurPrecedent ← secteurCourant, acquitte ← 0; i ← 0;  $P_t$  ←  $\frac{K}{N}$ 
8     fin
9     si NS = 1 alors
10      |  $P_t$  ← 1.0
11    fin
12    si acquitte != 1 alors
13      pour slot ← 1 à NS faire
14        p ← random(0, 1.0)
15        si p <  $P_t$  alors
16          | passer en mode transmission
17        sinon
18          | passer en mode écoute
19        fin
20        si sub-slot 1 et mode transmission alors
21          | Envoyer HELLO et attendre acquittement
22        fin
23        si sub-slot 1 et mode écoute alors
24          | Retarder ma transmission, essayer dans le prochain slot et
25          | écouter la transmission des autres noeuds.
26          if Hello reçu then
27            | Enregistrer l'ID du noeud source et l'ajouter à mon HELLO
28          end
29        fin
30        si sub-slot 2 et mode transmission alors
31          si Je suis acquitté alors
32            | acquitte ← 1
33          sinon
34            | Mettre à jour de i en fonction du nombre de noeuds
35            | découverts par le puits
36             $M = \frac{N-i}{K}; P_t = \min\{\frac{1}{M}, 1\}$ 
37          fin
38        fin
39        si sub-slot 2 et mode écoute alors
40          si Acquittement reçu alors
41            | Mettre à jour de i en fonction du nombre de noeuds
42            | découverts par le puits
43             $M = \frac{N-i}{K}; P_t = \min\{\frac{1}{M}, 1\}$ 
44          fin
45        fin
46      fin
47    fin
48  fin

```

Algorithm A.1.2 – ANDF : Processus de réponse des noeuds capteurs

A.2 Algorithme de découverte de voisinage WAYE

```
1 K Nombre de secteurs de l'antenne du puits
2 nbslot_init Nombre initial de slots alloués
3 roundCourant Round courant
4 secteurCourant ← 1 Orientation actuelle de l'antenne
5 tant que secteurCourant ≤ K faire
6   nb_slot_de_reponse ← nbslot_init
7   roundCourant ← 1
8   répéter
9     Diffusion de POLL avec, secteurCourant, roundCourant et
10    nb_slot_de_reponse
11    S0 ← 0, S1 ← 0, S2* ← 0
12    pour chaque slot alloué faire
13      si HELLO reçu alors
14        Mettre à jour de la table de découverte
15        S1 ← S1 + 1
16      sinon
17        si Collision détectée alors
18          S2* ← S2* + 1
19        sinon
20          S0 ← S0 + 1
21        fin
22      fin
23    Estimer nombre de noeuds restant à découvrir grâce à S0, S1 and S2*
24    nb_slot_de_reponse ← nombre de noeuds restant à découvrir
25    roundCourant ← roundCourant + 1
26  jusqu'à nombre de noeuds restant à découvrir > 0;
27  roundCourant ← roundCourant + 1
28 fin
```

Algorithm A.2.1 – WAYE : Processus de sondage du puits

```
1 secteurPrecedent ← -1
2 tant que vrai faire
3   si POLL reçu alors
4     Lire secteurCourant, roundCourant et nb_slot_de_reponse
5     si secteurCourant ≠ secteurPrecedent alors
6       si Je suis déjà découvert par le puits alors
7         secteurPrecedent ← secteurCourant
8       sinon
9         mon_slot ← random(0, nb_slot_de_reponse - 1)
10        Attendre mon_slot
11        si dans mon_slot alors
12          Envoyer mon HELLO au puits
13        fin
14      fin
15    fin
16  fin
17 fin
```

Algorithm A.2.2 – WAYE : Processus de réponse des noeuds capteurs

A.3 Algorithme de découverte de voisinage WAYE+

```
1 K Nombre de secteurs de l'antenne du puits
2 nbslot_init Nombre initial de slots alloués
3 roundCourant Round courant
4 secteurCourant  $\leftarrow$  1 Orientation actuelle de l'antenne
5 liste_des_noeuds_connus  $\leftarrow$  {} Liste des noeuds connus du puits
6 tant que secteurCourant  $\leq$  K faire
7   nb_slot_de_reponse  $\leftarrow$  nbslot_init
8   roundCourant  $\leftarrow$  1
9   répéter
10    Diffusion de POLL avec, secteurCourant, roundCourant,
11    nb_slot_de_reponse et liste_des_noeuds_connus
12    S0  $\leftarrow$  0, S1  $\leftarrow$  0, S2*  $\leftarrow$  0
13    pour chaque slot alloué faire
14      si HELLO reçu alors
15        Mettre à jour de la table de découverte
16        Mettre à jour de la liste liste_des_noeuds_connus
17        S1  $\leftarrow$  S1 + 1
18      sinon
19        si Collision détectée alors
20          S2*  $\leftarrow$  S2* + 1
21        sinon
22          S0  $\leftarrow$  S0 + 1
23        fin
24      fin
25    fin
26    Estimer nombre de noeuds restant à découvrir grâce à S0, S1 and S2*
27    nb_slot_de_reponse  $\leftarrow$  nombre de noeuds restant à découvrir
28    roundCourant  $\leftarrow$  roundCourant + 1
29    jusqu'à nombre de noeuds restant à découvrir  $>$  0;
30    secteurCourant  $\leftarrow$  secteurCourant + 1
31 fin
```

Algorithm A.3.1 – WAYE+ : Processus de sondage du puits

```

1 secteurPrecedent ← -1
2 liste_des_voisins_connus ← {} Liste des noeuds voisins connus
3 tant que true faire
4   si POLL reçu alors
5     Lire secteurCourant, roundCourant et nb_slot_de_reponse et
6     liste_des_noeuds_connus
7     si secteurCourant != secteurPrecedent alors
8       si Je suis connu du puits alors
9         secteurPrecedent ← secteurCourant
10      sinon
11        mon_slot ← random(0, nb_slot_de_reponse - 1)
12        Attendre mon_slot
13        si dans mon_slot alors
14          Envoyer mon HELLO avec la liste_des_voisins_connus
15        sinon
16          si HELLO reçu alors
17            Mettre à jour liste_des_voisins_connus
18          fin
19        fin
20      fin
21    fin
22 fin

```

Algorithm A.3.2 – WAYE+ : Processus de réponse des noeuds capteurs

A.4 Méthode de génération de topologies utilisée

Pour valider notre approche par simulation, nous avons généré un ensemble de topologies en étoile ayant un taux d'erreur trames (FER) donné. Pour cela nous jouons avec l'aspect aléatoire du modèle de propagation choisi. Nous avons utilisé le modèle de propagation Log-normal Shadowing, et nous allons expliquer la démarche qui nous a conduit à un ensemble de topologies.. Les principales étapes sont les suivantes : Tout d'abord, nous avons choisi la taille de la topologie (nombre de nœuds de capteurs) à répartir dans une représentation 2D. Le puits est situé au centre de cette zone. Pour chaque nœud N_i , les coordonnées (X_{ni}, Y_{ni}) sont dessinées et le modèle de propagation est utilisé pour estimer la qualité du lien (N_i, Puits) c'est-à-dire la puissance reçue aux extrémités de ce lien. Ce modèle est inspiré de celui communément utilisé dans les simulations réalisées via Castalia [113], cet outil a la particularité d'introduire deux niveaux de composantes aléatoires pour produire la puissance reçue.

Soit le modèle Log-normal Shadowing ci-après définissant la puissance reçue (P_r) en fonction de la distance d et θ l'orientation du lien (N_i, Puits) dans le lobe de l'antenne à faisceau commutable, tel que :

$$P_r(d)[dB] = P_r(d_0)[dB] + 10 * \eta \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + P_t + G_N + G_P(\theta) + X_\sigma \quad (\text{voir chapitre 3})$$

La composante X_σ sera constituée de deux sous composantes X_{σ_1} et X_{σ_2} ($X_\sigma = X_{\sigma_1} + X_{\sigma_2}$).

X_{σ_1} est utilisée pour prendre en compte pour chaque lien (Ni, Puits) de la topologie l'impact des conditions de propagation du signal. Une fois cette valeur corrective choisie, pour le lien entre le puits et le nœud Ni, la valeur X_{σ_1} ne bouge plus durant le reste de la simulation. X_{σ_2} est utilisée pour prendre en compte l'instabilité d'un lien donné. Ces deux composantes sont généralement données par une distribution gaussienne avec respectivement deux écarts-types :

- (i) σ_1 pour X_{σ_1} prenant en compte les obstacles induisant un effet d'ombre ou de guidage (shadowing et canyoning effects) . Pour une topologie donnée, chaque lien garde la même valeur de correction.
- (ii) σ_2 une la valeur obtenue pour X_{σ_2} prenant en compte l'instabilité de chaque lien radio. Cette valeur de correction est mise à jour à chaque transmission. C'est une façon classique qui permet de modéliser les pertes d'acquittement.

Pour sélectionner une topologie aléatoire en étoile avec un taux d'erreur trame de 1%, nous modulons l'écart-type pour X_{σ_2} en fonction du taux d'erreur trames observé avec le polling naïf. La topologie est sélectionnée si le taux d'erreur trame est dans un intervalle considéré comme [0.99% 1.01%] avec une valeur acceptable pour X_{σ_2} (moins de 2 dB par exemple). Dans le cas contraire, cette topologie n'est pas retenue et le processus de génération est relancé.

A.5 Antenne

A.5.1 Définition générale d'une antenne

Une antenne peut être définie comme un dispositif qui convertit un signal électrique en une onde électromagnétique et vice-versa. L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique, et ses caractéristiques de rendement, gain et diagramme de rayonnement influencent directement les performances, la qualité et la portée du système. Une onde électromagnétique est une vibration (de faible énergie dans notre domaine), découlant de l'association d'un champ électrique et d'un champ magnétique, variables dans le temps comme illustré par la figure A.5.1. Elle a la capacité de se propager dans l'air et dans le vide, ainsi que de transporter des informations.

En fonction de la représentation graphique de la répartition de la puissance rayonnée ou reçue par l'antenne (diagramme de rayonnement), nous distinguons les antennes omnidirectionnelles et les antennes directionnelles (figure A.5.2). Connecter à un transmetteur radio, une antenne omnidirectionnelle rayonne la puissance de façon uniforme dans toutes les directions tandis qu'avec une antenne directionnelle, la puissance est majoritairement orientée dans une direction donnée. La figure A.5.2 est

une représentation simplifiée de la façon dont ces deux types d'antennes dispersent ou focalisent l'énergie.

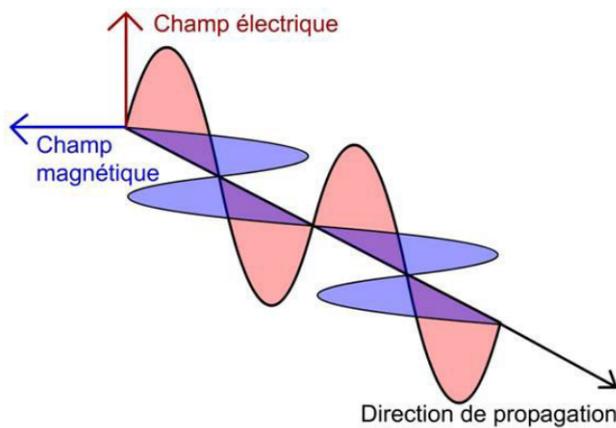


Figure A.5.1 – Représentation d'une onde électromagnétique

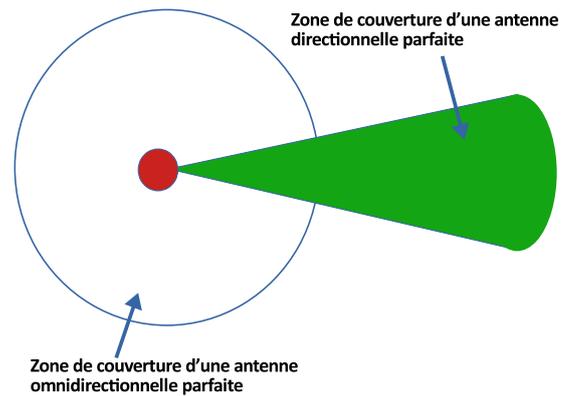


Figure A.5.2 – Comparaison des principes de la couverture des antennes omnidirectionnelle et directionnelles

A.5.2 Antenne directionnelle

Pour réaliser la directivité, les antennes directionnelles se basent sur la reconfiguration du diagramme de rayonnement. Nous distinguons deux manières principales d'implémenter l'adaptation d'antennes dont le diagramme de rayonnement peut être reconfiguré dynamiquement :

- les antennes à faisceau commutable (figure A.5.3), basées sur l'usage d'un commutateur qui permet de choisir l'orientation du diagramme ;
- et les antennes adaptatives (figure A.5.4), basées sur l'usage d'un traitement de signal permettant de configurer le diagramme d'antenne pour maximiser généralement le rapport signal sur bruit (le bruit pouvant être produit par un dispositif se comportant comme un brouilleur comme illustré figure A.5.4).

Une antenne adaptative est une antenne qui utilise un algorithme d'adaptation permettant de modifier automatiquement le diagramme de l'antenne pour maximiser le rapport signal sur bruit. Une antenne à faisceau commutable est constituée d'un certain nombre de faisceaux fixes correspondant chacun à une direction. Dans la section qui suit, nous nous intéressons plus particulièrement à ce type d'antenne utilisé dans nos travaux de thèse et mieux adapté aux besoins des réseaux de capteurs.

A.5.3 Antenne à faisceau commutable utilisée

A.5.3.1 Généralités

L'antenne utilisée dans cette thèse est de forme cylindrique et est composée de 12 cellules déposées uniformément sur un cylindre autour d'une antenne de type dipôle

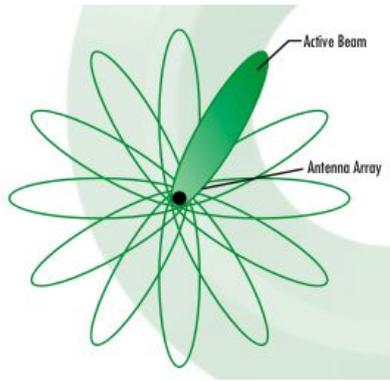


Figure A.5.3 – Antenne à faisceau commutable [114]

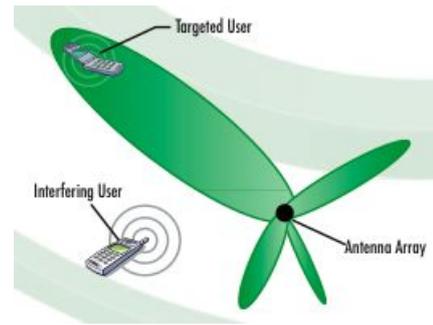


Figure A.5.4 – Antenne adaptative [114]

placée au centre comme le montre la figure A.5.5. Chaque cellule comporte, un élément dit Frequency Selective Surface (FSS) [115] qui se comporte soit comme un élément réflecteur, soit comme un transmetteur d'une fréquence radio selon la polarisation d'une diode connectée en série avec celui-ci. Ainsi, lorsque la diode est en circuit ouvert ou désactivée (OFF), la cellule est en mode réflecteur et lorsque la diode est en circuit fermé ou activée (ON) la cellule est en mode transmission ou transparent (figure A.5.6). Ici le terme transparent veut dire que l'onde radio le traverse contrairement au mode réflecteur, qui réfléchit cette même onde.

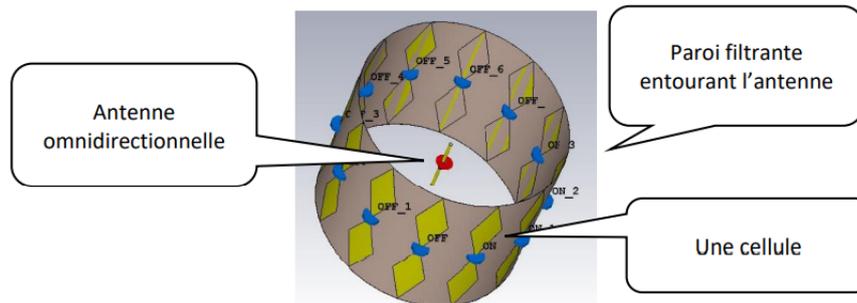


Figure A.5.5 – Antenne à faisceau commutable basée sur la technologie FSS [116]

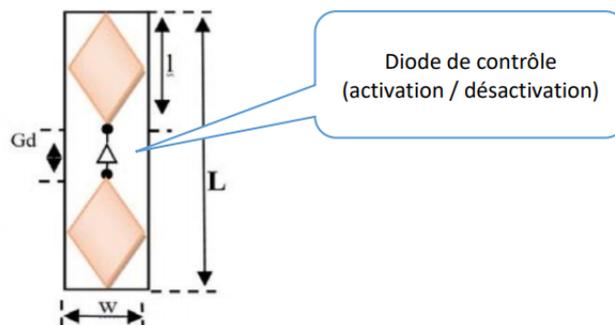


Figure A.5.6 – Représentation d'une cellule FSS [116]

Pour réaliser un faisceau directif (figure A.5.7), une partie des cellules FSS sur le cylindre est configurée en mode réflecteur, tandis que l'autre partie est mise en mode transparent pour les ondes émanant du dipôle et celles réfléchies par l'autre

partie opaque (réflectrice). Par interaction constructive entre ces ondes, on obtient un rayonnement directif devant le réflecteur. Par conséquent, le faisceau directif est transformé en un faisceau directionnel à haut gain. Pour balayer la direction du rayonnement, la partie transparente du réflecteur est déplacée autour du cylindre en activant/désactivant séquentiellement les cellules FSS. Grâce à cette technique, le motif peut facilement balayer en azimut (dans le plan horizontal) avec un certain pas dicté par le nombre d'éléments actifs sur la circonférence du cylindre.

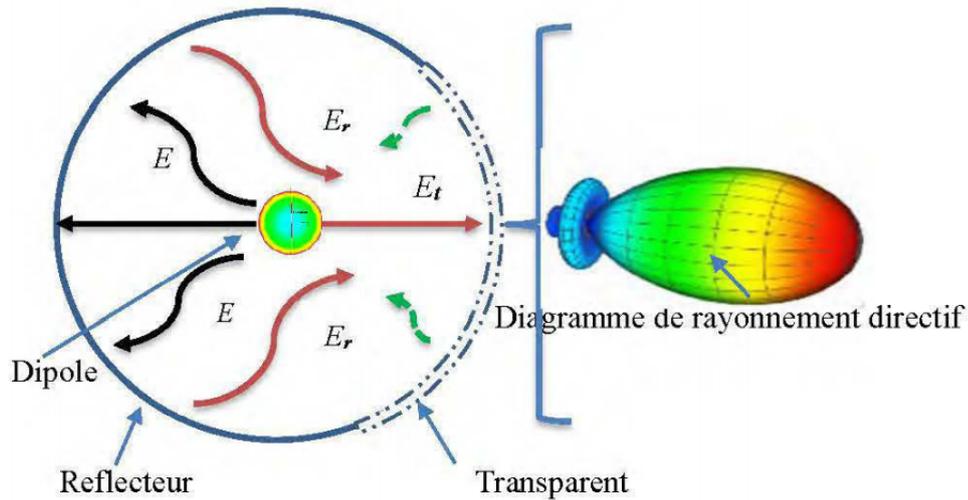


Figure A.5.7 – Formation d'un faisceau directionnel [117]

A.5.3.2 Effet du nombre de cellules FSS activées

La largeur du faisceau directionnel dépend du nombre de cellules FSS mises en mode transparent c'est-à-dire le nombre de diodes activées de façon consécutive comme illustré par la figure A.5.8. La figure A.5.10 présente les diagrammes de rayonnement en fonction du nombre de diodes activées consécutivement. Nous constatons que la forme du diagramme de rayonnement est déterminée par le nombre de cellules mises en mode transparent (diodes activées).

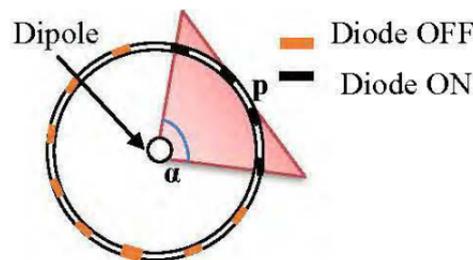


Figure A.5.8 – Angle d'ouverture de la structure rayonnante [117]

Les résultats obtenus par simulation avec l'outil CST Studio suite [118] montrent que pour 4 cellules activées consécutivement, la largeur faisceau est de l'ordre de 30° et le gain maximal dans le lobe principal est d'environ 14 dB.

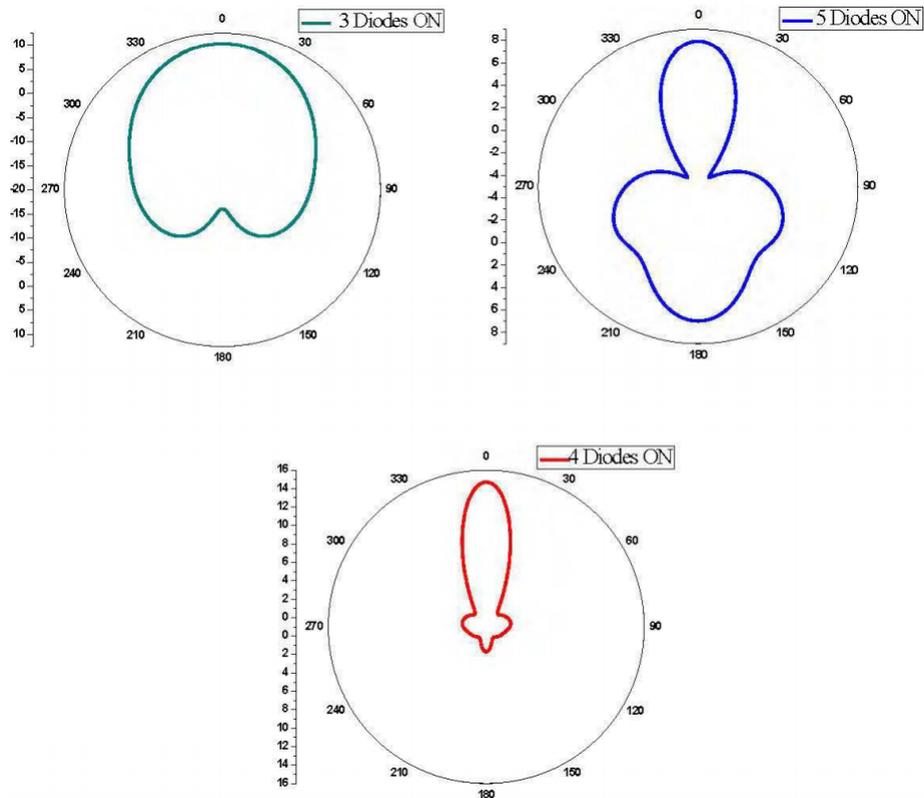


Figure A.5.9 – Diagramme de rayonnement en fonction de l’angle d’ouverture (nombre de diodes activées) [117]

A.5.3.3 Prototype réalisé et diagramme de rayonnement

Une fois les différents paramètres optimaux obtenus par simulation, un prototype de l’antenne considérée a été réalisé et présenté dans la figure A.5.10. Ce prototype a été testé et mesuré pour valider les résultats de la simulation tels que l’adaptation et le diagramme de rayonnement. Cette conception ainsi que tous les processus de mesures ont été effectués à l’Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et au Laboratoire de Recherche Télébec en Communications Souterraines (LRTCS) à Val d’Or, Québec. Le diagramme de rayonnement obtenu est présenté dans la figure A.5.11.



Figure A.5.10 – Banc de mesures du prototype de l'antenne réalisé [117]

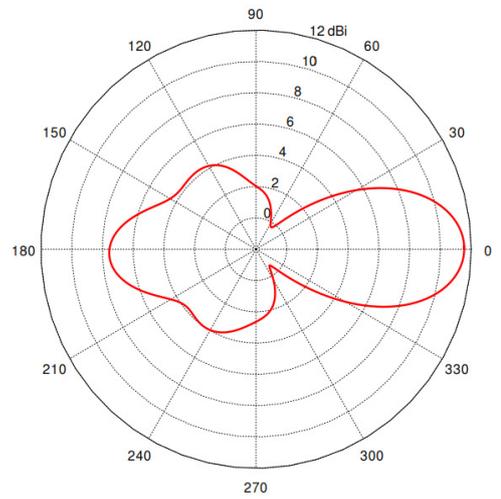


Figure A.5.11 – Diagramme de rayonnement obtenu par expérimentation

Références

- [1] Michael Healy, Thomas Newe, and Elfed Lewis. Wireless sensor node hardware : A review. In *SENSORS, 2008 IEEE*, pages 621–624. IEEE, 2008.
- [2] JaeHyun Kim, MyungJune Youn, HahnEarl Jeon, and Jaiyong Lee. Comparison of traffic dependent wireless sensor network protocols. In *2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 81–86. IEEE, 2010.
- [3] Nejah Nasri, Sami Mnasri, and Thierry Val. 3d node deployment strategies prediction in wireless sensors network. *International Journal of Electronics*, 107(5) :808–838, 2020.
- [4] Haitao Zhang and Cuiping Liu. A review on node deployment of wireless sensor network. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 9(6) :378, 2012.
- [5] Victor Shnayder, Mark Hempstead, Bor-rong Chen, Geoff Werner Allen, and Matt Welsh. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 188–200, 2004.
- [6] Michael Johnson, Michael Healy, Pepijn Van de Ven, Martin J Hayes, John Nelson, Thomas Newe, and Elfed Lewis. A comparative review of wireless sensor network mote technologies. In *SENSORS, 2009 IEEE*, pages 1439–1442. IEEE, 2009.
- [7] Brett Warneke, Matt Last, Brian Liebowitz, and Kristofer SJ Pister. Smart dust : Communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer*, 34(1) :44–51, 2001.
- [8] Milica Pejanović Đurišić, Zhilbert Tafa, Goran Dimić, and Veljko Milutinović. A survey of military applications of wireless sensor networks. In *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*, pages 196–199. IEEE, 2012.
- [9] Tatiana Bokareva, Wen Hu, Salil Kanhere, Branko Ristic, Neil Gordon, Travis Bessell, Mark Rutten, and Sanjay Jha. Wireless sensor networks for battlefield surveillance. In *Proceedings of the land warfare conference*, pages 1–8. Citeseer, 2006.
- [10] Jonathan P Towle, David Herold, Ryan Johnson, and Harold Vincent. Low-cost acoustic sensors for littoral anti-submarine warfare (asw). In *Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VI*, volume 6538, page 653814. International Society for Optics and Photonics, 2007.

-
- [11] Michael Scanlon, Christian Reiff, and Latasha Solomon. Aerostat acoustic payload for transient and helicopter detection. In *Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VI*, volume 6538, page 65380H. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [12] B Rippin. Pearls of wisdom wireless networks of miniaturized sensors. In *Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications XIV*, volume 8388, page 83880H. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [13] Priyanka Rawat, Kamal Deep Singh, Hakima Chaouchi, and Jean Marie Bonnin. Wireless sensor networks : a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of supercomputing*, 68(1) :1–48, 2014.
- [14] SK Wang, SP Chew, MT Jusoh, A Khairunissa, KY Leong, and AA Azid. Wsn based indoor air quality monitoring in classrooms. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1808, page 020063. AIP Publishing LLC, 2017.
- [15] Shalli Rani, R Maheswar, GR Kanagachidambaresan, and P Jayarajan. *Integration of WSN and IoT for Smart Cities*. Springer, 2020.
- [16] Iván Corredor, A García, José-F Martínez, and Pedro López. Wireless sensor network-based system for measuring and monitoring road traffic. *6th Collaborative Electronic Communications and eCommerce Technology and Research (COLLECTeR 2008)*, Madrid, Spain, 2008.
- [17] Deepa Phanish, Paul Garver, Ghaith Matakah, Tal Landes, Fu Shen, Jesse Dumond, Randal Abler, Dapeng Zhu, Xinjun Dong, Yang Wang, et al. A wireless sensor network for monitoring the structural health of a football stadium. In *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 471–477. IEEE, 2015.
- [18] John A Stankovic, Quihia Cao, T Doan, Lei Fang, Zhijun He, R Kiran, S Lin, S Son, R Stoleru, and A Wood. Wireless sensor networks for in-home healthcare : Potential and challenges. In *High confidence medical device software and systems (HCMDSS) workshop*, volume 2005, 2005.
- [19] Reza S Dilmaghani, Hossein Bobarshad, Mohammad Ghavami, Sabrieh Choobkar, and Charles Wolfe. Wireless sensor networks for monitoring physiological signals of multiple patients. *IEEE Transactions on biomedical circuits and systems*, 5(4) :347–356, 2011.
- [20] Hanyue Zhang and Shijuan Yang. Research on application of wsn in cold chain logistics' warehousing and transportation. In *China Academic Conference on Printing & Packaging and Media Technology*, pages 589–598. Springer, 2016.
- [21] Zhenwang Yao and Kamal Gupta. Distributed roadmaps for robot navigation in sensor networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(5) :997–1004, 2011.
-

-
- [22] Husnain Saeed, Salman Ali, Sidra Rashid, Saad Qaisar, and Emad Felemban. Reliable monitoring of oil and gas pipelines using wireless sensor network (wsn)—remong. In *2014 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE)*, pages 230–235. IEEE, 2014.
- [23] IEEE Standards Association et al. Ieee std 802.15. 4-2011, ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4 : Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans), 2011.
- [24] ZigBee Alliance. Zigbee alliance. wpan industry group, 2010.
- [25] Geoff Mulligan. The 6lowpan architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, pages 78–82, 2007.
- [26] Deji Chen, Mark Nixon, and Aloysius Mok. Why wirelesshart. In *WirelessHART™*, pages 195–199. Springer, 2010.
- [27] Seung Ho Hong, Yue Min Ding, Xiao Hui Li, Zhe Luo, and Jong Beom Kim. An energy-balancing graph-routing algorithm for wirelesshart networks. In *2015 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, pages 239–245. IEEE, 2015.
- [28] ISA ISA100. 100.11 a-2009 : Wireless systems for industrial automation : Process control and related applications. *International Society of Automation : Research Triangle Park, NC, USA*, 2009.
- [29] Chatschik Bisdikian. An overview of the bluetooth wireless technology. *IEEE Communications magazine*, 39(12) :86–94, 2001.
- [30] Josh Potts and Somsak Sukittanon. Exploiting bluetooth on android mobile devices for home security application. In *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon*, pages 1–4. IEEE, 2012.
- [31] Amit A Levy, James Hong, Laurynas Riliskis, Philip Levis, and Keith Winstein. Beetle : Flexible communication for bluetooth low energy. In *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pages 111–122, 2016.
- [32] Z-wave, "z-wave,". http://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/. Accessed : 2021-02-01.
- [33] Zensys, "zensys,". <http://www.zen-sys.com/>. Accessed : 2021-02-01.
- [34] Ant, "ant technology,". <https://www.dynastream.com/solutions/ant-wireless>. Accessed : 2021-02-01.
- [35] Sabri Khssibi, Hanen Idoudi, Adrien Van Den Bossche, Thierry Val, and Leila Azouz Saidane. Presentation and analysis of a new technology for low-power wireless sensor network. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications*, 3(1) :pp–75, 2013.
-

-
- [36] EnOcean, "enocean,". <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting-wireless/>. Accessed : 2021-02-01.
- [37] Wavenis, "wavenis data sheet,". <https://dash7-alliance.org/>. Accessed : 2021-02-01.
- [38] Dash7, "dash7, ". http://www-coronis-com.dyn.elster.com/downloads/Wavenis_Data_Sheet_A4_CS5.pdf. Accessed : 2021-02-01.
- [39] Alper Yegin, Thorsten Kramp, Pierre Dufour, Rohit Gupta, Ramez Soss, Olivier Hersent, Derek Hunt, and Nicolas Sornin. Lorawan protocol : specifications, security, and capabilities. In *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, pages 37–63. Elsevier, 2020.
- [40] Lora, "lora, ". <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>. Accessed : 2021-02-01.
- [41] Sigfox - the global communications service provider for the internet of things (iot). <https://www.sigfox.com/en>. Accessed : 2021-02-01.
- [42] Johan Åkerberg, Mikael Gidlund, and Mats Björkman. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. In *2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pages 410–415. IEEE, 2011.
- [43] Gerard Chalhoub, Marie-Caroline Deux, Badr Rmili, and Michel Misson. Multi-channel wireless sensor network for heavy-lift launch vehicles. *Acta Astronautica*, 158 :68–75, 2019.
- [44] Javier del Prado Pavon and SN Shankar. Impact of frame size, number of stations and mobility on the throughput performance of ieee 802.11 e. In *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No. 04TH8733)*, volume 2, pages 789–795. IEEE, 2004.
- [45] Jiliang Wang, Wei Dong, Mo Li, and Yunhao Liu. Stagger : Improving channel utilization for convergecast in wireless sensor networks. In *2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, pages 452–460. IEEE, 2013.
- [46] Rajeev Piyare and Seong-ro Lee. Performance analysis of xbee zb module based wireless sensor networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(4) :1615–1621, 2013.
- [47] Nathirulla Sherif. Time synchronization in ant wireless low power sensor network, 2011.
- [48] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment : Sigfox, lorawan, and nb-iot. In *2018 ieee international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops)*, pages 197–202. IEEE, 2018.
-

-
- [49] Stig Petersen and Simon Carlsen. Performance evaluation of wireless hART for factory automation. In *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pages 1–9. IEEE, 2009.
- [50] Waqas Ikram, Niklas Jansson, Trygve Harvei, Niels Aakvaag, Ivar Halvorsen, Stig Petersen, Simon Carlsen, and Nina F Thornhill. Wireless communication in process control loop : Requirements analysis, industry practices and experimental evaluation. In *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–8. IEEE, 2014.
- [51] Carles Gomez and Josep Paradells. Wireless home automation networks : A survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6) :92–101, 2010.
- [52] Oleh Horyachyy. Comparison of wireless communication technologies used in a smart home : Analysis of wireless sensor node based on arduino in home automation scenario, 2017.
- [53] Mohammad Ghamari, Balazs Janko, R Simon Sherratt, William Harwin, Robert Piechocki, and Cinna Soltanpur. A survey on wireless body area networks for ehealthcare systems in residential environments. *Sensors*, 16(6) :831, 2016.
- [54] Wael Ayoub, Abed Ellatif Samhat, Fabienne Nouvel, Mohamad Mroue, and Jean-Christophe Prévotet. Internet of mobile things : Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2) :1561–1581, 2018.
- [55] Martijn Saelens, Jeroen Hoebeke, Adnan Shahid, and Eli De Poorter. Impact of eu duty cycle and transmission power limitations for sub-ghz lpwan srds : An overview and future challenges. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1) :1–32, 2019.
- [56] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, 5(1) :1–7, 2019.
- [57] Sanatan Mohanty. *Energy Efficient Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks and Performance Evaluation of Quality of Service for IEEE 802.15. 4 Networks*. PhD thesis, 2010.
- [58] Adrien Van Den Bossche. *Proposition d’une nouvelle méthode d’accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*. PhD thesis, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2007.
- [59] Ben Lauwens, Bart Scheers, and Antoine Van de Capelle. Performance analysis of unslotted csma/ca in wireless networks. *Telecommunication Systems*, 44(1) :109–123, 2010.
- [60] Aurélien Surier, Etienne Charpin, Téophile Decaestecker, Guéréguin Der Sylvestre Sidibé, Antonio Freitas, Marie-Françoise Servajean, and Michel Misson.
-

-
- Plateforme d'évaluation de performances de collecte de données de noeuds 802.15.4 dans un réseau en étoile. *Rapport interne*, 2021.
- [61] Hamadoun Tall. *Load balancing in multichannel data collection wireless sensor networks*. PhD thesis, Clermont Auvergne, 2018.
- [62] Kemal Akkaya, Murat Demirbas, and R Savas Aygun. The impact of data aggregation on the performance of wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(2) :171–193, 2008.
- [63] Sana Messous, Nouredine Liouane, Alain Pegatoquet, and Michel Auguin. Hop-based routing protocol based on energy efficient minimum spanning tree for wireless sensor network. In *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET)*, pages 421–426. IEEE, 2018.
- [64] Millad Ghane and Amir Rajabzadeh. Remaining-energy based routing protocol for wireless sensor network. In *2010 15th CSI International Symposium on Computer Architecture and Digital Systems*, pages 67–73. IEEE, 2010.
- [65] Hamadoun Tall, Gerard Chalhoub, and Michel Misson. Colba : a collaborative load balancing algorithm to avoid queue overflow in wsns. In *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, pages 682–687. IEEE, 2015.
- [66] Zouhair Jaber. *Conception d'une antenne intelligente à faisceau commutable assistée par un système de localisation des mobiles*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2008.
- [67] Reza Malekian and Abdul Hanan Abdullah. A novel approach to improve signal to noise ratio based on sector antenna in radio networks. In *2012 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pages 250–253. IEEE, 2012.
- [68] Subuh Pramono, Arisa Olivia Putri, Endro Warsito, and S Budi Basuki. Comparative analysis of star topology and multihop topology outdoor propagation based on quality of service (qos) of wireless sensor network (wsn). In *2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Commnetsat)*, pages 152–157. IEEE, 2017.
- [69] Sigit Sojjoyo and Ahmad Ashari. Analysis of zigbee data transmission on wireless sensor network topology. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl*, 8(9) :145–151, 2017.
- [70] Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi. Long-range communications in unlicensed bands : The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5) :60–67, 2016.
- [71] Muamba Mukendi Leingthone and Nadir Hakem. A reconfigurable beam switching antenna using active cylindrical fss structure. In *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pages 2339–2340. IEEE, 2017.
-

-
- [72] Shao-Hua Chu, Hsin-Piao Lin, and Ding-Bing Lin. Performance enhancement by using switch-beam smart antenna in 802.11 a wlan system. In *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005.*, pages 1001–1005. IEEE, 2005.
- [73] Romit Roy Choudhury, Xue Yang, Ram Ramanathan, and Nitin H Vaidya. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 59–70, 2002.
- [74] Ram Ramanathan. On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 95–105, 2001.
- [75] Jaekyu Cho, Jeongkeun Lee, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi. Directional antenna at sink (daas) to prolong network lifetime in wireless sensor networks. In *12th European Wireless Conference 2006-Enabling Technologies for Wireless Multimedia Communications*, pages 1–5. VDE, 2006.
- [76] Ram Ramanathan, Jason Redi, Cesar Santivanez, David Wiggins, and Stephen Polit. Ad hoc networking with directional antennas : a complete system solution. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 23(3) :496–506, 2005.
- [77] Md Hussain, Md Alam, Kyung Sup Kwak, et al. Directional mac approach for wireless body area networks. *Sensors*, 11(1) :771–784, 2011.
- [78] Javier Schandy, Simon Olofsson, Leonardo Steinfeld, and Thiemo Voigt. Improving sensor network convergecast performance with directional antennas. In *EWSN*, pages 13–22, 2019.
- [79] Adam Dunkels. The contikimac radio duty cycling protocol, 2011.
- [80] Jaekyu Cho, Jeongkeun Lee, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi. Directional antenna at sink (daas) to prolong network lifetime in wireless sensor networks. In *12th European Wireless Conference 2006-Enabling Technologies for Wireless Multimedia Communications*, pages 1–5. VDE, 2006.
- [81] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.
- [82] Eirini Karapistoli, Ioannis Gragopoulos, Ioannis Tsetsinas, and Fotini-Niovi Pavlidou. A mac protocol for low-rate uwb wireless sensor networks using directional antennas. *Computer Networks*, 53(7) :961–972, 2009.
- [83] Theodora Karveli, Konstantinos Voulgaris, Mohammad Ghavami, and AH Aghvami. A collision-free scheduling scheme for sensor networks arranged in linear topologies and using directional antennas. In *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)*, pages 18–22. IEEE, 2008.
-

-
- [84] Shen Zhang and Amitava Datta. A directional-antenna based mac protocol for wireless sensor networks. In *International Conference on Computational Science and Its Applications*, pages 686–695. Springer, 2005.
- [85] Gentian Jakllari, Wenjie Luo, and Srikanth V Krishnamurthy. An integrated neighbor discovery and mac protocol for ad hoc networks using directional antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(3) :1114–1024, 2007.
- [86] Emad Felemban, Serdar Vural, Robert Murawski, Eylem Ekici, Kangwoo Lee, Youngbag Moon, and Sangjoon Park. Samac : A cross-layer communication protocol for sensor networks with sectored antennas. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(8) :1072–1088, 2010.
- [87] Fernaz Narin Nur, Seiina Sharmin, Md Abdur Razzaque, and Md Shariful Islam. A duty cycle directional mac protocol for wireless sensor networks. In *2015 International Conference on Networking Systems and Security (NSysS)*, pages 1–9. IEEE, 2015.
- [88] Luca Mainetti, Vincenzo Mighali, and Luigi Patrono. Hec-mac : a hybrid energy-aware cross-layer mac protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(4) :536794, 2015.
- [89] Ram Ramanathan. On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 95–105, 2001.
- [90] Sudarshan Vasudevan, Jim Kurose, and Don Towsley. On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas. In *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 4, pages 2502–2512. IEEE, 2005.
- [91] Btissam El Khamlichi, Duy HN Nguyen, Jamal El Abbadi, Nathaniel W Rowe, and Sunil Kumar. Collision-aware neighbor discovery with directional antennas. In *2018 international conference on computing, networking and communications (ICNC)*, pages 220–225. IEEE, 2018.
- [92] Emad Felemban, Robert Murawski, Eylem Ekici, Sangjoon Park, Kangwoo Lee, Juderk Park, and Zeeshan Hameed. Sand : Sectored-antenna neighbor discovery protocol for wireless networks. In *2010 7th annual IEEE communications society conference on sensor, mesh and ad hoc communications and networks (SECON)*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [93] Nicolás Gammarano, Javier Schandy, and Leonardo Steinfeld. Q-sand : A quick neighbor discovery protocol for wireless networks with sectored antennas. In *2018 ninth argentine symposium and conference on embedded systems (CASE)*, pages 19–24. IEEE, 2018.
- [94] Nicolás Gammarano, Javier Schandy, and Leonardo Steinfeld. Reducing neighbor discovery time in sensor networks with directional antennas using dyna-

-
- mic contention resolution. *Design automation for embedded systems*, 24(4) :223–247, 2020.
- [95] Femaz Narin Nur, Selina Sharmin, Md Ahsan Habib, Md Abdur Razzaque, and Md Shariful Islam. Collaborative neighbor discovery in directional wireless sensor networks. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 1097–1100. IEEE, 2016.
- [96] Yeng-Zhong Lee, Rohit Kapoor, and Mario Gerla. An efficient and fair polling scheme for bluetooth. In *MILCOM 2002. Proceedings*, volume 2, pages 1062–1068. IEEE, 2002.
- [97] Yuichi Igarashi, Ryo Nakano, and Naoki Wakamiya. A polling-based transmission scheme using a network traffic uniformity metric for industrial iot applications. *Sensors*, 19(1) :187, 2019.
- [98] Vojislav B Mišić and Jelena Mišić. A polling mac for wireless sensor networks with rf recharging of sensor nodes. In *2014 27th Biennial Symposium on Communications (QBSC)*, pages 76–80. IEEE, 2014.
- [99] Fredrik Österlind. A sensor network simulator for the contiki os. *SICS Research Report*, 2006.
- [100] Philip Levis, Samuel Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, Eric Brewer, et al. Tinyos : An operating system for sensor networks. In *Ambient intelligence*, pages 115–148. Springer, 2005.
- [101] Emmanuel Baccelli, Oliver Hahm, Mesut Günes, Matthias Wählisch, and Thomas C Schmidt. Riot os : Towards an os for the internet of things. In *2013 IEEE conference on computer communications workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 79–80. IEEE, 2013.
- [102] Sabri Benferhat. *Simulation des conditions de trafic intracellulaire d’un réseau sans fil en milieu industriel par un modèle de propagation composite*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2009.
- [103] Gérard Chalhoub. *MaCARI : une méthode d’accès déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2009.
- [104] Femaz Narin Nur, Selina Sharmin, Md Ahsan Habib, Md Abdur Razzaque, and Md Shariful Islam. Collaborative neighbor discovery in directional wireless sensor networks. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 1097–1100. IEEE, 2016.
- [105] Murat Demirbas, Onur Soysal, and Muzammil Hussain. A singlehop collaborative feedback primitive for wireless sensor networks. In *IEEE INFOCOM 2008-The 27th Conference on Computer Communications*, pages 2047–2055. IEEE, 2008.
-

-
- [106] Kiran Anna and Mostafa Bassiouni. A new framework for qos provisioning in wlans using p-persistent 802.11 mac. *Computer communications*, 31(17) :4035–4048, 2008.
- [107] Ramin Khalili, Dennis L Goeckel, Don Towsley, and Ananthram Swami. Neighbor discovery with reception status feedback to transmitters. In *2010 Proceedings Ieee Infocom*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [108] Sudarshan Vasudevan, Donald Towsley, Dennis Goeckel, and Ramin Khalili. Neighbor discovery in wireless networks and the coupon collector’s problem. In *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 181–192, 2009.
- [109] Kyunghwi Kim, Heejun Roh, Wonjun Lee, Sinjae Lee, and Ding-Zhu Du. Pnd : ap-persistent neighbor discovery protocol in wireless networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(7) :650–662, 2013.
- [110] Jae-Ryong Cha and Jae-Hyun Kim. Novel anti-collision algorithms for fast object identification in rfid system. In *11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS’05)*, volume 2, pages 63–67. IEEE, 2005.
- [111] Muhamad Syamsu Iqbal. *Performance of IEEE 802.15. 4 beaconless-enabled protocol for low data rate ad hoc wireless sensor networks*. PhD thesis, Brunel University London, 2016.
- [112] Ridha Soua, Erwan Livolant, and Pascale Minet. An adaptive strategy for an optimized collision-free slot assignment in multichannel wireless sensor networks. *Journal of sensor and actuator networks*, 2(3) :449–485, 2013.
- [113] Athanassios Boulis. *Castalia. Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks User Manual Online*, 2009.
- [114] Sra. <http://www.mjoler.info/research/sra>. Accessed : 2021-08-09.
- [115] Te-Kao Wu. Frequency selective surfaces. *Encyclopedia RF Microw Eng.*, 1995.
- [116] Aurélien SURIER GAROFALO. *Réalisation d’un état de l’art sur les antennes à commutations de faisceaux et intégration d’un circuit de commande dans une surface selective en fréquence active*. Master’s thesis, POLYTECH GRENOBLE, 2019.
- [117] Mukendi Leigthone Muamba. *Adaptive switched beam reconfigurable antenna for wireless sensor network applications*. PhD thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2018.
- [118] Cst studio suite , "cst studio suite, ". <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/cst-studio-suite/>. Accessed : 2021-08-09.