

**Titre:** Analyse du temps d'inter-livraison des mises à jour dans un réseau de capteurs sans fil avec récolte d'énergie utilisant la modulation adaptative  
**Title:**

**Auteur:** Chaima Zouine  
**Author:**

**Date:** 2022

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Zouine, C. (2022). Analyse du temps d'inter-livraison des mises à jour dans un réseau de capteurs sans fil avec récolte d'énergie utilisant la modulation adaptative [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
**Citation:** <https://publications.polymtl.ca/10332/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/10332/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Jean-François Frigon  
**Advisors:**

**Programme:** Génie électrique  
**Program:**

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Analyse du temps d'inter-livraison des mises à jour dans un réseau de capteurs  
sans fil avec récolte d'énergie utilisant la modulation adaptative**

**CHAIMA ZOUINE**

Département de génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
Génie électrique

Mai 2022

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Analyse du temps d'inter-livraison des mises à jour dans un réseau de capteurs  
sans fil avec récolte d'énergie utilisant la modulation adaptative**

présenté par **Chaima ZOUINE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Christian CARDINAL**, président

**Jean-François FRIGON**, membre et directeur de recherche

**Brunilde SANZO**, membre

## REMERCIEMENTS

Je souhaite particulièrement remercier mon directeur de recherche Jean-François Frigon pour l'encadrement et le soutien qu'il m'a apporté tout au long de ma maîtrise.

Je tiens à remercier les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté pour lire et évaluer ce mémoire.

Je veux aussi remercier Amina Hentati pour ses conseils et son appui.

Finalement, je remercie ma famille qui m'a soutenu tout au long de mon parcours.

## RÉSUMÉ

Dans un réseau de capteurs sans fil (RCSF), les ressources énergétiques limitées fournies par les batteries peuvent dégrader sa performance et réduire sa durée de vie. Plusieurs solutions qui visent à diminuer la consommation d'énergie, ont été développées. Cependant, il reste toujours un compromis à faire entre la durée de vie du réseau et la qualité de service offerte. Par conséquent, la récolte d'énergie constitue une technologie prometteuse pour les RCSFs. Elle permet aux nœuds de renouveler leurs ressources énergétiques, à partir d'une source d'énergie ambiante, sans besoin d'intervention pour changer ou recharger les batteries. Toutefois, cette technologie rencontre des défis relatifs au caractère aléatoire de l'arrivée de l'énergie. En effet, vu le caractère aléatoire de cette dernière, il se peut que la communication entre un nœud capteur et le collecteur de données soit suspendue pendant un certain temps. Le but de notre projet est d'explorer l'utilisation de la modulation adaptative pour suivre à l'aspect aléatoire de la récolte d'énergie et des variations du canal sans fil, afin d'assurer la régularité de livraison des données et de garantir que l'information au niveau du collecteur de données soit à jour.

Le temps d'inter-livraison est une métrique de délai qui mesure le temps qui sépare deux transmissions successives d'un nœud vers le collecteur de données. Il reflète la régularité des livraisons des données. Dans ce mémoire, on a considéré le problème de minimisation du nombre des événements de violations du temps d'inter-livraison maximal  $U_{max}$ , premièrement pour un système point à point et ensuite pour un système multi-point. Des algorithmes d'ordonnement ont été développés pour résoudre ce problème. Particulièrement, l'information sur l'état du canal est exploitée afin de déterminer le niveau de modulation adéquat et d'ajuster la puissance de transmission.

Les résultats de simulation montrent les bonnes performances des algorithmes proposés. En plus, ils montrent l'amélioration apportée par l'utilisation de la modulation adaptative. Cette dernière s'adapte aux variations du canal ainsi qu'au caractère aléatoire de l'arrivée d'énergie et elle permet d'améliorer l'efficacité énergétique du système et sa performance.

**Mots clés :** Réseau de capteurs sans fil, Récolte d'énergie, Temps d'inter-livraison, Modulation adaptative, Algorithmes d'ordonnement.

## ABSTRACT

The limited energy resources of sensor nodes in WSNs can affect its performance and its lifetime. Many solutions have been proposed to reduce energy consumption of sensor nodes. However, there is always a compromise between the lifetime of the system and its quality of service. Therefore, energy harvesting is a promising solution for WSNs. It allows the node to permanently renew its energy from ambient energy sources, without any need for human intervention. Though, this technology faces some challenges because of the randomness of the energy arrival process. Indeed this randomness can suspend communication between the sensor node and the sink for a while. The aim of this project is to develop an adaptive modulation solution taking into consideration channel and energy harvesting random variations to guarantee a regular data delivery to the sink.

Inter-delivery time is a performance metric that measures time between two successive transmissions from a sensor node to the sink. It reflects the regularity of data delivery. In this work, we propose a transmission strategy to minimize the number of violations of the maximum inter-delivery time  $U_{max}$ , for a point to point and a multi-point to point WSN. To solve this problem, we propose scheduling algorithms using adaptive modulation and exploiting the channel state information so as to determine the appropriate modulation level and to adjust the transmit power. Simulation results show the performance of the proposed algorithms and the improvement brought by the adaptive modulation in the energy efficiency and quality of service of the system.

**Keywords:** Wireless sensor networks, energy harvesting, inter-delivery time, adaptive modulation, scheduling algorithms.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS . . . . .	iii
RÉSUMÉ . . . . .	iv
ABSTRACT . . . . .	v
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	vi
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	ix
LISTE DES FIGURES . . . . .	x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xi
LISTE DES SYMBOLES MATHÉMATIQUES . . . . .	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . .	1
1.1 Contexte général . . . . .	1
1.1.1 Historique des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	1
1.1.2 Exemples d'applications des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	1
1.1.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil . . . . .	3
1.1.4 Structure d'un noeud capteur . . . . .	4
1.2 Motivations et problématique . . . . .	5
1.3 Objectifs de recherche . . . . .	6
1.4 Contributions . . . . .	7
1.5 Plan du mémoire . . . . .	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .	9
2.1 La technologie de récolte d'énergie . . . . .	9
2.1.1 Sources d'énergie ambiante et méthodes de récolte . . . . .	10
2.1.2 Architectures . . . . .	13
2.2 La modulation . . . . .	13
2.2.1 Étude qualitative . . . . .	13
2.2.2 Étude quantitative . . . . .	14
2.2.3 Comparaison . . . . .	15
2.2.4 La modulation adaptative . . . . .	16

2.3	Ordonnancement avec cyclage de service (Duty cycle scheduling) dans les RCSFs-RE . . . . .	18
2.4	Temps d'inter-livraison . . . . .	19
2.5	Conclusion . . . . .	20
CHAPITRE 3 SYSTÈME POINT À POINT . . . . .		22
3.1	Modèle du système . . . . .	22
3.1.1	Atténuation . . . . .	23
3.1.2	La puissance de transmission . . . . .	23
3.1.3	L'énergie consommée totale . . . . .	24
3.1.4	Temps d'inter-livraison . . . . .	26
3.1.5	Formulation du problème . . . . .	27
3.2	Algorithmes proposés . . . . .	28
3.2.1	Algorithmes Déterministes . . . . .	28
3.2.2	Algorithmes randomisés . . . . .	31
3.2.3	Algorithmes de référence . . . . .	34
3.2.4	Analyse asymptotique . . . . .	37
3.3	Résultats de simulations . . . . .	39
3.3.1	Paramètres et méthodologie . . . . .	39
3.3.2	L'énergie consommée totale . . . . .	40
3.3.3	Comparaison en fonction du taux d'arrivée d'énergie . . . . .	41
3.3.4	Comparaison en fonction de l'atténuation moyenne . . . . .	44
3.3.5	Conclusion . . . . .	44
CHAPITRE 4 SYSTÈME MULTIPPOINT À POINT . . . . .		47
4.1	Modèle du système . . . . .	47
4.2	Algorithmes proposés . . . . .	48
4.3	Résultats de simulations . . . . .	48
4.3.1	Paramètres et méthodologie . . . . .	48
4.3.2	Comparaison en fonction du nombre de noeuds $N$ . . . . .	50
4.3.3	Comparaison en fonction du taux de récolte d'énergie . . . . .	53
4.3.4	Comparaison en fonction de l'atténuation moyenne . . . . .	58
4.3.5	Conclusion et discussion . . . . .	60
CHAPITRE 5 CONCLUSION . . . . .		63
5.1	Synthèse des travaux . . . . .	63
5.2	Limitations de la solution proposée . . . . .	64



5.3 Améliorations futures . . . . .	65
RÉFÉRENCES . . . . .	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1:	Comparaison entre les classes de Modulation . . . . .	14
Tableau 2.2:	Valeur optimisée d'énergie par bit $E_b$ . . . . .	15
Tableau 2.3:	Classe de modulation efficace énergétiquement en fonction de la distance . . . . .	16
Tableau 3.1:	Notations . . . . .	28
Tableau 3.2:	Algorithmes . . . . .	37
Tableau 3.3:	Paramètres de simulation . . . . .	39
Tableau 3.4:	Intervalle de confiance : algorithmes proposés . . . . .	40
Tableau 3.5:	Intervalle de confiance : algorithmes de référence . . . . .	41
Tableau 4.1:	$N_{sat}$ . . . . .	50
Tableau 4.2:	Temps de recharge moyen ( $d = 175\text{m}$ ) . . . . .	50
Tableau 4.3:	Temps de recharge moyen ( $d = 200\text{m}$ ) . . . . .	51
Tableau 4.4:	Temps de recharge moyen ( $d = 250\text{m}$ ) . . . . .	51
Tableau 4.5:	Temps de recharge moyen ( $n = 3.5$ et $d = 150\text{m}$ ) . . . . .	51
Tableau 4.6:	Temps de recharge moyen ( $n = 3.5$ et $d = 200\text{m}$ ) . . . . .	51

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	RCSF . . . . .	3
Figure 2.1:	Sources d'énergie ambiante . . . . .	10
Figure 3.1:	RCSF-RE (système point à point) . . . . .	22
Figure 3.2:	Transmetteur . . . . .	24
Figure 3.3:	Le temps d'inter-livraison . . . . .	26
Figure 3.4:	Le temps d'inter-livraison U . . . . .	29
Figure 3.5:	Choix du paramètres $\beta_{PL}$ . . . . .	34
Figure 3.6:	L'énergie consommée en fonction de l'atténuation . . . . .	41
Figure 3.7:	Le nombre de violation en fonction de $e$ ( $d=100m$ ) . . . . .	42
Figure 3.8:	La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation ( $d=100m$ ) . . . . .	43
Figure 3.9:	Le nombre de violation en fonction de $e$ ( $d=175m$ ) . . . . .	44
Figure 3.10:	La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation ( $d=175m$ ) . . . . .	45
Figure 3.11:	Le nombre de violation en fonction du $PL_{dB}$ moyen . . . . .	46
Figure 4.1:	RCSF-RE (système multi-point à point) . . . . .	47
Figure 4.2:	$V_n$ en fonction de $N$ , $d = 175m$ et $e = 7 \cdot 10^{-6}$ . . . . .	52
Figure 4.3:	La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation . . . . .	53
Figure 4.4:	$V_n$ en fonction de $N$ (atténuation forte) . . . . .	54
Figure 4.5:	$V_n$ en fonction de $N$ (atténuation très forte) . . . . .	55
Figure 4.6:	La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation en utilisant M-DMTDA ( $n = 3.5$ , $d = 200m$ et $e = 9 \cdot 10^{-5}$ ) . . . . .	55
Figure 4.7:	$V_n$ en fonction de $e$ pour $N = 12$ . . . . .	56
Figure 4.8:	$V_n$ en fonction de $e$ pour $N = 24$ . . . . .	56
Figure 4.9:	$V_n$ en fonction de $e$ pour $N = 25$ et $d = 175m$ . . . . .	57
Figure 4.10:	$V_n$ en fonction de $e$ pour $N = 35$ et $d = 175m$ . . . . .	57
Figure 4.11:	$V_n$ en fonction de $e$ pour $N = 36$ et $d = 175m$ . . . . .	58
Figure 4.12:	$V_n$ en fonction de $PL_{dB}$ pour $N = 12$ et $e = 7 \cdot 10^{-6}J$ . . . . .	59
Figure 4.13:	$V_n$ en fonction de $PL_{dB}$ pour $N = 12$ et $e = 1 \cdot 10^{-5}J$ . . . . .	59
Figure 4.14:	$V_n$ en fonction de $PL_{dB}$ pour $N = 12$ et $e = 3 \cdot 10^{-5}J$ . . . . .	60
Figure 4.15:	$V_n$ en fonction de $PL_{dB}$ pour $N = 24$ et $e = 1 \cdot 10^{-5}J$ . . . . .	60
Figure 4.16:	$V_n$ en fonction de $PL_{dB}$ pour $e = 1 \cdot 10^{-5}J$ . . . . .	61

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
AM	Amplitude Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CPM	Continuous Phase Modulation
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DC	Direct Current
DLCEA	Deterministic Less Consumed Energy Algorithm
DMTDA	Deterministic Minimum Transmission Delay Algorithm
FSK	Frequency Shift Keying
IT	Intervalle de Temps
MANET	Mobile Ad hoc Network
M-DLCEA	Multi-node Deterministic Less Consumed Energy Algorithm
M-DMTDA	Multi-node Deterministic Minimum Transmission Delay Algorithm
ME	Magneto-electric
MEEG	Mechanical-to-electrical Energy Generator
MFSK	M-ary Frequency Shift Keying
MME	Magneto-Mechano-electric
MPSK	M-ary Phase-Shift Keying
MQAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
MSK	Minimum-Shift Keying
NC-RE	Noeud Capteur avec Récolte d'énergie
PA	Point d'accès (Access Point)
PM	Phase Modulation
PSK	Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RCSF-RE	Réseau de Capteurs Sans Fil avec Récolte d'énergie
RE	Récolte d'énergie
RF	Radio Fréquence
RLCEA	Randomized Less Consumed Energy Algorithm
RMTDA	Randomized Minimum Transmission Delay Algorithm
SNR	Signal to Noise Ratio

UE	User Equipment
WAM	Without Adaptive Modulation
WSN	Wireless Sensor Network

## LISTE DES SYMBOLES MATHÉMATIQUES

$\Rightarrow$	Implique
$[\cdot]$	Partie entière
$\forall$	Quel que soit
$\in$	Appartient à
$\Sigma$	Symbole somme
$\approx$	Presque égale
$\rightarrow$	Tend vers
$\infty$	L'infini
$\ll$	Beaucoup plus petit que
$ z $	Module du nombre complexe $z$
$\arg \min(\cdot)$	Indice du minimum
$\log_{10}(\cdot)$	Logarithme décimal
$\log_2(\cdot)$	Logarithme binaire
$\min(\cdot)$	Minimum de
$\tanh(\cdot)$	Fonction tangente hyperbolique

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Contexte général

#### 1.1.1 Historique des réseaux de capteurs sans fil

Comme plusieurs technologies, les applications militaires ont été la force motrice de la recherche et développement des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Durant la guerre froide, le système de surveillance sonore (SOSUS) a été développé afin de détecter et de suivre les sous-marins soviétiques via des capteurs sonores déployés dans des régions stratégiques au fond de l'océan. Le programme DSN (Distributed Sensor Networks) a été lancé en 1980 par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). La possibilité d'étendre l'Arpanet aux réseaux de capteurs ainsi que quelques recherches sur des éléments comme les systèmes d'exploitation et les techniques de traitement de signal, ont été considérées [1].

#### 1.1.2 Exemples d'applications des réseaux de capteurs sans fil

##### Applications militaires

Les communications sont importantes, dans le domaine militaire, afin de distribuer les commandes, l'information logistique, l'intelligence et les données collectées par les capteurs. Généralement les RCSFs militaires doivent être résistants aux menaces de guerre (brouillage, la radiogoniométrie ou direction finding en anglais...). En plus, ils doivent maintenir la communication dans le temps et le lieu désigné [2]. Dans le domaine militaire, les RCSFs sont déployés dans des régions stratégiques éloignées ou reculées afin de surveiller l'activité militaire. En plus, ils permettent de s'assurer qu'une zone déminée reste sûre ("force protection" en anglais) [3].

##### Applications environnementales

Elles incluent la surveillance du microclimat pour étudier des phénomènes naturels et détecter des problèmes environnementaux, comme les incendies forestiers, les inondations, les séismes et la pollution. Ainsi que la surveillance de la qualité d'eau et des conditions qui affectent les récoltes et le bétail. En outre, parmi les applications environnementales des RCSFs, il y a la détection du mouvement des oiseaux, des insectes et des petits animaux afin d'étudier leurs migrations et d'observer leur diversité [4–6].

## Applications médicales

L'utilisation des RCSFs dans le domaine de santé permet de maintenir une surveillance continue. Par conséquent, elle minimise les recours aux soignants et permet aux personnes qui souffrent de maladies chroniques et aux personnes âgées de vivre une vie indépendante. En effet, parmi les principales catégories des applications médicales des RCSFs on a : [7]

- La surveillance des activités quotidiennes : où le RCSF permet d'identifier les activités quotidiennes des patients et de détecter les conditions étranges.
- La détection de mouvements et de chutes : spécialement adressée aux personnes âgées qui sont susceptibles à des chutes brusques qui peuvent entraîner la mort, aux nourrissons et aux patients qui se remettent d'une opération.
- Les soins médicaux : où le RCSF permet de suivre l'information concernant l'état de santé du patient (ECG, rythme cardiaque, pression artérielle,...).

## Applications industrielles et commerciales

Les RCSFs peuvent être déployés dans des zones de machinerie afin de détecter les modes de vibration qui indiquent un besoin de maintenance. En plus, ils peuvent être utilisés dans le domaine logistique afin de suivre les marchandises (équipées de simples capteurs) durant leur transportation et pour faciliter le suivi des stocks [8]. Ils sont aussi utilisés dans différentes applications de surveillance et de contrôle de l'Industrie 4.0 [9].

## Applications d'amélioration de qualité de vie [10]

Elles incluent :

- Transportation intelligente : L'utilisation des RCSFs dans le domaine de la transportation intelligente permet de fournir des données en temps réel, exactes et précises sur les paramètres du trafic [11]. Par conséquent, elle permet de surveiller le flot du trafic, de réduire la congestion et de détecter les infractions au code de la route. Ce qui améliore la qualité et la sécurité du transport [12].
- Bâtiments intelligents : un bâtiment intelligent est capable de surveiller et de contrôler ses propres fonctionnalités selon sa structure et les conditions de son environnement intérieur et extérieur [12]. En plus, il peut réduire la consommation d'énergie due à une ventilation ou à une climatisation inefficaces tout en augmentant le niveau de confort de ses habitants. En outre, la surveillance des paramètres mécaniques du bâtiment fournie par les RCSFs permet d'améliorer le niveau de sécurité dans les zones sismiques [8].



### 1.1.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

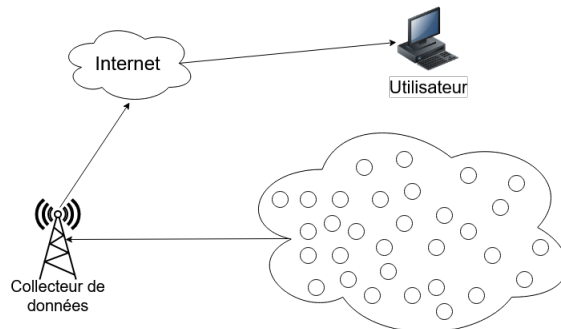


FIGURE 1.1 RCSF

Un réseau de capteurs sans fil est constitué d'un ensemble de noeuds capteurs distribués dans un environnement étudié afin de collecter des données relatives à un phénomène physique (température, humidité, pression...) et de les transmettre à un collecteur de données qui joue le rôle d'une passerelle vers les réseaux externes comme Internet, pour permettre l'acheminement de l'information à l'utilisateur (figure 1.1). La communication entre le collecteur de données et un noeud capteur peut être réalisée via une transmission mono-saut sur une longue distance : il s'agit d'une architecture de réseau mono-saut. Cependant, la transmission sur une longue distance entraîne une consommation énergétique plus importante. Par conséquent, afin d'économiser plus d'énergie, on peut diminuer la distance de transmission en utilisant une communication multi-sauts sur de courtes distances. Dans ce cas le noeud transmet les données capturées à travers un noeud intermédiaire ou plus [13]. On distingue deux architectures de réseaux multi-sauts :

- Architecture Plate : dans un réseau plat, tous les noeuds sont des pairs, ils ont les mêmes compétences de détection et de communication. En effet, vu le grand nombre de noeuds, ce ne serait pas possible d'attribuer une adresse globale à chaque noeud. Par conséquent, le collecteur de données transmet une requête à tous les noeuds via du flooding. Les noeuds qui possèdent l'information appropriée répondent au collecteur de données en utilisant une communication multi-saut et en se servant de ses pairs comme relais [13].
- Architecture Hiérarchique : dans un réseau hiérarchique, les noeuds capteurs sont organisés sous forme de cluster, où les membres mesurent les paramètres étudiés, et transmettent les données vers les cluster-heads, qui servent de relais afin de transmettre les données vers le collecteur de données. Le problème majeur avec ce type d'architecture est le choix du cluster-head et l'organisation du cluster. Plusieurs stratégies ont été proposées dans ce contexte. Le noeud ayant le plus d'énergie peut être

sélectionné comme chef de groupe (cluster-head en anglais) et le réseau peut être organisé en des clusters à saut unique ou des clusters multi-sauts selon la distance qui sépare les membres du cluster au cluster-head [13].

#### 1.1.4 Structure d'un noeud capteur

Un noeud capteur contient 4 unités principales : unité de détection, unité de traitement, unité de transmission (tranceiver) et unité de contrôle d'énergie. Un noeud capteur avec récolte d'énergie contient également un système générateur d'énergie qui permet au noeud de produire de l'énergie électrique à partir d'une source d'énergie ambiante (cellule solaire ou photovoltaïque...).

- L'unité de détection : elle lie le noeud capteur au monde extérieur. Elle contient un transducteur qui permet de traduire le phénomène physique étudié en un signal électrique. Si ce signal est analogique, il doit passer par un convertisseur analogique numérique (ADC) afin qu'il soit compréhensible par l'unité de traitement [14].
- L'unité de traitement : elle contient un micro-processeur et une unité de stockage. Cette dernière comporte une mémoire flash qui contient le code du programme du noeud, et une mémoire vive (RAM) qui contient les données [14]. Les ressources matérielles sont gérées à l'aide d'un système d'exploitation, qui permet l'exécution des protocoles de communication nécessaires pour la transmission des données [15].
- L'unité de transmission : Elle permet au noeud d'effectuer des transmissions et réceptions sur un medium sans fil. Elle est généralement de type radio-fréquence, mais elle peut être de type infra-rouge, ultrason ou inductive [14]. En effet :
  - La communication infra-rouge est moins coûteuse, elle consomme moins d'énergie. En plus, elle est moins sensible aux interférences. Cependant, elle exige une ligne de vue permanente, sans obstacles, entre l'émetteur et le récepteur [5, 14].
  - La communication basée sur le champs d'induction, quant à elle, n'est pas appropriée aux RCSFs étant donné sa portée limitée [14].

Par conséquent, la communication radio est plus adéquate pour un RCSF [14].

L'unité de transmission de type radio-fréquence contient un module radio ou tranceiver sans fil muni d'une antenne. La fréquence de transmission utilisée est généralement dans la bande Industrielle, Scientifique et médicale ISM.

- L'unité de contrôle d'énergie : elle a pour rôle de fournir de l'énergie électrique aux autres composantes du noeud capteur. Cette unité gère aussi le sous système de récolte d'énergie qui permet de recharger la batterie à partir d'une source d'énergie ambiante (photovoltaïque, thermique, piézoélectrique).

## 1.2 Motivations et problématique

Grâce aux avantages apportés par les RCSFs dans leurs différents domaines d'application (médical, industriel...), ils ont gagné une grande importance dans le monde numérique. En plus, leur utilisation dans l'environnement de l'IdO (internet des objets) et des villes intelligentes a stimulé la recherche dans le domaine des RCSFs afin de trouver des solutions aux défis auxquels ils font face [16]. En effet, contrairement aux autres réseaux sans fil traditionnels comme les réseaux cellulaires et MANETs, les RCSFs ont des caractéristiques uniques à savoir : une densité plus élevée de déploiement de noeuds capteurs, la non fiabilité des liaisons sans fil et les contraintes relatives à la consommation énergétique et aux capacités limitées de calcul et de stockage d'un noeud capteur [17]. Cependant, l'augmentation de la durée de vie d'un noeud capteur constitue le défi le plus important que rencontre ce type de réseau [16]. En effet, l'insuffisance des ressources énergétiques fournies par les batteries des noeuds capteurs affaiblit à la fois la durée de vie du réseau ainsi que sa performance [18].

La récolte d'énergie constitue l'une des solutions qui permet de maximiser la durée de vie d'un RCSF. Et contrairement à des solutions traditionnelles qui vise à minimiser la consommation d'énergie, la récolte d'énergie se base sur l'équilibre entre la quantité d'énergie consommée et récoltée [19].

En plus, elle permet de réduire les coûts de maintenance due à la nécessité de recharger ou remplacer les batteries. Par conséquent, elle rend le RCSF plus autonome sans interventions humaines surtout quand il s'agit de zones dangereuses ou inaccessibles [20].

Le concept de récolte d'énergie a vu le jour grâce aux efforts faits afin de réduire les dégâts liés à la pollution environnementale et de trouver des alternatives qui permettent de convertir l'énergie ambiante qui existe dans notre entourage en énergie utilisable. Les RCSFs constituent l'une des applications où la technologie de récolte d'énergie peut être exploitée. L'énergie est extraite au niveau des noeuds capteurs afin de répondre à leurs besoins énergétiques et d'augmenter la durée de vie du réseau [21]. Les sources à partir desquelles l'énergie est obtenue varient selon les applications. Elles peuvent se produire de manière naturelle ou artificielle à partir d'une activité humaine ou d'une autre technologie. Les principales formes d'énergie récoltée sont : l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie photovoltaïque, l'énergie d'écoulement de fluide, l'énergie magnétique et l'énergie radio-fréquence [22].

Quand la source de l'énergie est abondante, le noeud est alimenté de façon continue, donc la communication entre le noeud et le collecteur de données peut être maintenue de façon continue aussi. Cependant, dans des conditions moins favorables, le noeud peut être incapable de transmettre pour une longue durée dû à l'énergie limitée. Ceci dégrade la régularité

de mises à jour de l'information fournie par le noeud. Le défi ici est de trouver la meilleure allocation des ressources qui prend en considération à la fois le caractère aléatoire de l'arrivée de l'énergie et l'exigence liée à la régularité des transmissions, surtout pour des applications en temps réel sensibles au délai.

Avec l'utilisation croissante des applications en temps réel et afin d'évaluer la régularité de l'information, une métrique plus appropriée est nécessaire, surtout que les métriques de qualité de service traditionnelles comme le débit et la latence ne sont pas adéquates pour évaluer l'efficacité des données dans un tel contexte. Il s'agit du temps d'inter-livraison qui reflète la fréquence des mises à jour reçues par le collecteur de données [23]. Le temps d'inter-livraison dans un RCSF-RE multipoint à point, a été étudié dans [24]. Les auteurs proposent une nouvelle métrique appelée "probabilité de violation" qui exprime la probabilité que le temps d'inter-livraison dépasse le temps d'inter-livraison maximal (un paramètre fixé qui reflète l'exigence sur la régularité des mises à jour). En plus ils ont développé une démarche qui repose sur le choix de la taille optimale du condensateur afin de minimiser la probabilité de violation. En effet, ils ont prouvé qu'un condensateur avec une petite capacité diminue le temps de recharge et augmente la fréquence des transmissions mais avec un taux d'erreur de transmission élevé. Contrairement à un condensateur avec une grande capacité qui améliore le taux d'erreur au détriment du temps de recharge. La taille optimale du condensateur est la taille qui permet de faire un compromis entre ces deux enjeux. Dans [25], un problème d'ordonnancement dans un RCSF-RE multipoint à point, a été étudié afin de minimiser le nombre total d'événements de violations de temps d'inter-livraison sur un horizon de temps fini. Des algorithmes hors-ligne et en-ligne, qui prennent en considération à la fois le caractère aléatoire de l'arrivée de l'énergie et le manque de fiabilité du canal sans fil, ont été proposées afin de résoudre le problème.

Ce mémoire répond à la problématique suivant : comment peut-on concevoir des algorithmes d'ordonnancement qui, en exploitant la connaissance de l'état du canal et la modulation adaptative, permettent d'optimiser l'allocation des ressources dans les RCSFs-RE et de garantir la régularité des mises à jour exigées par les applications sensibles au délai ?

### 1.3 Objectifs de recherche

L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier un réseau de capteurs sans fil avec récolte d'énergie, où les variations du canal et l'arrivée de l'énergie sont aléatoires et de développer une solution qui garantit une régularité des mises à jour de l'information fournie par les noeuds capteurs. Ceci via :

- Exploiter la modulation adaptative et la connaissance de l'état du canal afin de ga-

rantir la réussite des transmissions et la bonne gestion des ressources énergétique du noeud capteur.

- Développer des algorithmes d’ordonnancement permettant de minimiser le nombre de violations du temps d’inter-livraison maximal, et de mieux gérer les ressources énergétiques du noeud capteur.
- Évaluer les performances des solutions proposées en les comparant avec des solutions de référence.

## 1.4 Contributions

Ce mémoire étudie un problème d’ordonnancement visant à minimiser le nombre total des événements de violation du temps d’inter-livraison dans un RCSF-RE, en exploitant la modulation adaptative et la connaissance de l’état du canal, et en prenant en considération le caractère aléatoire de l’arrivée de l’énergie. À notre connaissance, la modulation adaptative dans un contexte de RCSF-RE pour améliorer la performance en terme de temps d’inter-livraison n’a pas été étudié dans la littérature.

Afin de répondre à cette problématique, les contributions suivantes sont présentées :

- Concevoir une technique de transmission qui utilise la modulation adaptative et considère à la fois la puissance de transmission, qui dépend du niveau de modulation sélectionné et de l’atténuation du canal, et la puissance utilisée au circuit transmetteur.
- Proposer des algorithmes en-ligne, déterministes et randomisés, pour résoudre le problème d’ordonnancement dans un RCSF-RE point à point et multipoint à point.
- Présenter des résultats de simulations qui évaluent la performance des algorithmes proposés dans différents scénarios, et qui démontrent que ces derniers ont une meilleure performance que celle des algorithmes de référence.

## 1.5 Plan du mémoire

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les RCSFs ainsi que la problématique du projet de recherche, ses objectifs et ses contributions. Le reste du mémoire est organisé comme suit : dans le chapitre suivant, nous présentons l’état de l’art de la problématique énergétique dans les RCSFs et les solutions proposées dans la littérature afin de prolonger la durée de vie des RCSFs dont la technologie de récolte d’énergie fait partie. En plus, ce chapitre présente une étude comparative des classes de modulation. Il présente aussi les différents travaux, effectués précédemment, dans le cadre de la modulation adaptative et de l’ordonnancement. Enfin, il définit les métriques de performance citées dans la

littérature. Dans le chapitre 3 nous étudions le cas d'un RCSFs avec un seul noeud capteur. D'abord, ce chapitre présente le modèle du système, ainsi que les algorithmes proposés et les résultats de simulation qui évaluent leurs performances. Le chapitre 4 est consacré au cas multi-point à point. Il est organisé de la même façon que le chapitre 3 et il présente une étude des performances du système dans différents scénarios. Finalement, le chapitre 5 conclut ce mémoire et présente les limites des solutions proposées et quelques perspectives pour les améliorations futures.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 La technologie de récolte d'énergie

Plusieurs métriques de performance ont été considérées pour les RCSFs. Parmi lesquelles on trouve [26] :

- **L'efficacité énergétique** : c'est un facteur important qui permet de maximiser la durée de vie du réseau.
- **Le passage à l'échelle (scalability)** : c'est la capacité d'extension du réseau, tout en maintenant sa performance.
- **La fiabilité** : c'est une mesure qui exprime la capacité du réseau à détecter et livrer les données de l'environnement étudié à temps, pour assurer un bon fonctionnement du système.
- **La qualité du signal reçu** : c'est une mesure qui reflète la qualité du lien. Il est utilisée pour déterminer l'accessibilité au noeud durant le processus de communication.
- **La latence** : c'est une métrique de délai qui mesure le temps nécessaire pour que les données atteignent leur destination, à travers le réseau.

L'efficacité énergétique constitue l'une des exigences les plus importantes des RCSFs. En effet, couramment les conditions de déploiement, à savoir la densité et le manque d'accessibilité [5], en plus du coût de maintenance, rendent l'intervention pour changer ou recharger les batteries des noeuds capteurs, difficile ou même impossible. Par conséquent, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature afin d'assurer l'efficacité énergétique du réseau, comme le cyclage de service, l'agrégation des données et d'autres approches qui se basent sur l'optimisation de la topologie du réseau [27]. Cependant, la technologie de RE est la seule solution qui permet aux noeuds capteurs de renouveler leurs ressources énergétiques, d'une façon permanente. Cependant, cette dernière approche rencontre des défis à son tour qui accompagnent l'aspect aléatoire de l'arrivée de l'énergie. Par conséquent, afin de profiter de cette technologie pour maximiser la durée de vie du réseau et améliorer sa qualité de service, il faut adapter les solutions proposées aux RCSFs aux variations apportées par la RE. Dans [28], les auteurs proposent une solution pour améliorer la fiabilité de détection et de livraison des données tout en garantissant une transmission en temps réel, dans un RCSF-RE industriel. [29] a considéré, à la fois, les variations de l'arrivée de l'énergie et celles du canal à évanouissement. Les auteurs traitent un problème de lazy scheduling et proposent une heuristique qui vise à optimiser le débit du système ainsi que son efficacité énergétique. [30] considère un problème d'ordonnancement des ressources dans un système de communication

sans fil avec RE et sous une contrainte stricte de délai. La solution proposée ajuste le nombre de paquets à transmettre selon les conditions du canal et la disponibilité de l'énergie au niveau du canal afin de minimiser la perte des paquets. Un problème de minimisation du délai moyen de transmission est considéré dans [31]. Dans ce travail les utilisateurs (UEs) récoltent l'énergie RF à partir d'un point d'accès (PA), puis ils lui transmettent les données. L'approche d'équilibrage d'énergie utilisée consiste en l'utilisation de multi-sauts qui permet aux UEs éloignés et/ou avec peu d'énergie de passer par des UEs intermédiaires afin de transmettre les données au point d'accès. Ceci permet de diminuer la distance entre le transmetteur et le récepteur. Par conséquent, la consommation d'énergie diminue et le débit binaire peut être amélioré. En plus, les UEs avec plus d'énergie ou/et plus proche du point d'accès transmettent leur données directement au point d'accès, en plus des données reçues des autres UEs. Donc, leur énergie est mieux utilisée afin d'améliorer la transmission des données. Dans le reste de cette section, on présente les principales sources et architectures de la technologie de RE.

### 2.1.1 Sources d'énergie ambiante et méthodes de récolte

La récolte d'énergie exploite plusieurs sources d'énergie ambiantes. L'énergie se produit de façon naturelle dans certains cas et de façon artificielle dans d'autres (à partir d'une activité humaine ou d'une autre technologie) [22].

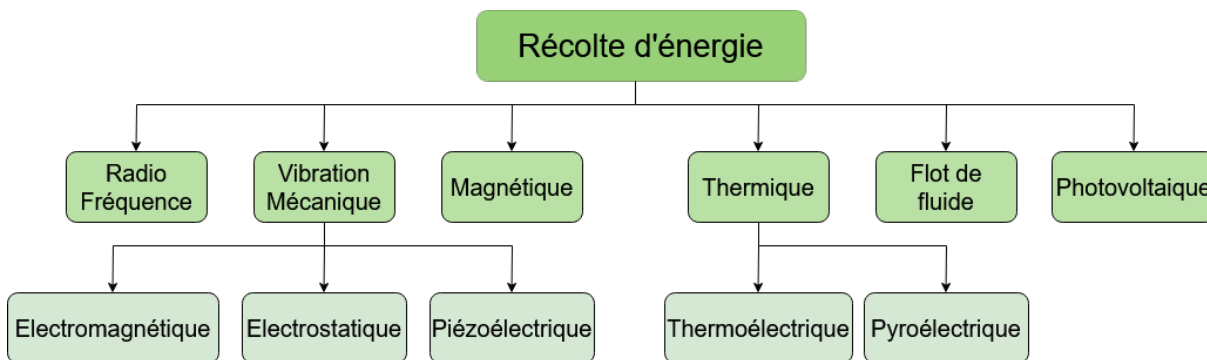


FIGURE 2.1 Sources d'énergie ambiante

#### Vibration Mécanique

L'énergie cinétique, sous forme de vibrations, est convertie en énergie électrique via un générateur électrique approprié (MEEG : Mechanical-to-electrical Energy Generator). Les trois mécanismes principaux de transduction utilisés pour générer l'énergie électrique à partir



des vibrations sont : la transduction électromagnétique, électrostatique et piézoélectrique. En effet, certains MEEGs ont des plages de fonctionnement étroites. Par conséquent, il est important de déterminer les caractéristiques de la source pour découvrir si l'énergie est exploitable. En plus, pour que la récolte d'énergie soit efficace, il faut que le générateur soit en résonance avec la fréquence de la source de vibration. Ceci constitue un défi majeur que rencontre les mécanismes de RE à partir des vibrations [32]. Surtout que l'alignement de fréquence peut être difficile dans certains cas. Généralement, ce problème est résolu en augmentant la plage de fréquences dans laquelle l'énergie peut être récoltée, ou en activant le réglage de la fréquence de résonance. D'autre part, la puissance produite à partir des sources vibratoires est une puissance AC, tandis que les dispositifs microélectroniques et les batteries rechargeables utilisent, généralement une puissance DC. Par conséquent, l'utilisation d'un convertisseur AC-DC est nécessaire, suivi d'un convertisseur DC-DC pour réguler la tension de sortie.

## Énergie Thermique

L'énergie thermique peut être issue d'une source naturelle ou artificielle (géothermique, volcanique, chaleur apportée par le soleil...). Elle est transformée en une forme d'énergie utilisable (mécanique ou électrique). Les récolteurs d'énergie thermique ont une efficacité de conversion d'énergie faible, typiquement autour de 1 à 10 %. Cependant, ils sont fiables et autonomes, ce qui les rend appropriés à l'utilisation dans les régions éloignées et difficiles à atteindre [33]. Les formes les plus communes de la RE thermique pour les RCSFs sont :

- La RE thermoélectrique : elle est basée sur l'effet Seebeck. Un courant électrique est généré en réponse à un gradient de température.
- La RE pyroélectrique : elle est basée sur l'effet pyroélectrique. La variation en température de certains matériaux diélectriques entraîne une variation de polarisation qui peut être utilisée pour générer un courant AC.

## Énergie Photovoltaïque

La récolte de l'énergie se fait via des cellules qui utilisent l'effet photovoltaïque. Ce dernier se produit, généralement, quand certains semi-conducteurs exposés à la lumière et touchés par une quantité suffisante d'énergie, convertissent les rayons lumineux en une puissance DC. L'efficacité d'une cellule photovoltaïque dépend du principe photovoltaïque suivi et du type du matériau utilisé. Par exemple, l'efficacité d'une cellule fait d'un matériau monocristallin est de 15 à 24 % alors que celle obtenue avec un matériau polycristallin est de 14 à 20.4 % [34]. La puissance générée par les cellules photovoltaïques dépend, principalement, de l'intensité

de la lumière et de la température ambiante. Le problème majeur avec ce type de récolteurs est que ces deux derniers paramètres varient régulièrement, ce qui rend le courant et la tension non-constants. Par conséquent, la majorité des récolteurs photovoltaïques utilisent une architecture récolte-stockage-utilisation avec des capacités de stockage supplémentaires. D'autre part, afin de maximiser l'efficacité de conversion d'énergie, la cellule photovoltaïque doit être alignée avec la source de la lumière. Pour cette raison, des suiveurs solaires sont utilisés afin d'aligner la cellule de façon automatique [35].

### **Énergie de Flot de Fluide**

Le flot de l'eau ou de l'air peut être présent partout, à partir du vent, des rivières ou des conduits de ventilation. L'énergie peut être récoltée à partir du flot d'air ou d'eau en utilisant des méthodes similaires, via des turbines et des rotors qui convertissent l'énergie rotationnelle en énergie électrique, en utilisant l'induction électromagnétique ou les méthodes piézoélectriques [36]. En effet, la production de l'énergie électrique à partir d'une source solaire ou d'une source de vent est largement utilisée. Cependant, les turbines sont, généralement, volumineuses par rapport aux exigences des RCSFs. Plusieurs alternatives ont été proposées pour exploiter l'énergie du flot de fluide en microélectronique incluant des méthodes basées sur l'effet triboélectrique et l'utilisation de micro-turbines. L'efficacité de conversion de chaque turbine dépend de la vitesse du flot, mais elle n'augmente pas, nécessairement, quand la vitesse du flot augmente.

### **Énergie Magnétique**

Les méthodes traditionnelles basées sur la loi de Faraday pour capturer un faible champs magnétique, ne sont pas efficaces pour la génération de puissance électrique. Une alternative proposée basée sur des méthodes magnéto-mécano-électriques (MME) a assuré une conversion d'énergie directe prometteuse, d'un faible champs magnétique alternatif de basse fréquence, à un champs électrique. L'utilisation d'un matériau composite magnéto-électrique (ME) permet d'atteindre des valeurs importantes de densité de puissance. En effet, ce dernier génère une charge électrique quand il est soumis même à un faible champs magnétique [37].

### **Énergie RF (Radio Fréquence)**

La récolte d'énergie RF consiste en la réception des ondes radio transmises par l'antenne du dispositif et de les convertir en puissance AC ou DC afin d'alimenter le dispositif. La quantité d'énergie récoltée dépend de la puissance de transmission de la source, du gain de l'antenne

et de la distance entre la source et le récepteur (le dispositif avec RE), puisque l'énergie des ondes RF s'atténue avec la distance. Les noeuds capteurs avec RE radio fréquence utilisent un ou deux émetteur-récepteur (transceiver). Dans le modèle à deux émetteurs-récepteurs, le premier est utilisé pour la RE et le deuxième est utilisé pour la communication. Alors que pour le modèle avec un seul émetteur-récepteur, ce dernier est utilisé pour les deux tâches. Généralement, il est plus avantageux d'utiliser un seul émetteur-récepteur afin de réduire la taille, la complexité et le coût du capteur [38]. Cependant, l'utilisation de plusieurs antennes est bénéfique puisqu'elle permet d'augmenter la quantité d'énergie récoltée.

### 2.1.2 Architectures

On peut distinguer deux principales architectures des systèmes de RE : Récolte-Utilisation et Récolte-Stockage-Utilisation [39].

- Récolte-Utilisation : l'énergie est utilisée juste après sa récolte. Par conséquent, la puissance de sortie du récolteur doit être, continuellement, au dessus du point de fonctionnement minimal. Sinon le noeud est désactivé à cause du manque d'énergie.
- Récolte-Stockage-Utilisation : la production d'énergie électrique se fait à chaque fois que le taux d'arrivée d'énergie de la source est non nulle. L'énergie est stockée par la suite pour l'usage futur dans une batterie rechargeable, un condensateur ou un supercondensateur. Ce dernier a des propriétés se situant entre les batteries rechargeables et les condensateurs réguliers [22]. Le stockage d'énergie peut être utile si : i) l'énergie récoltée est supérieure à l'énergie consommée. Dans ce cas l'énergie stockée peut être utilisée quand le taux d'arrivée de l'énergie diminue ou quand le noeud a besoin d'utiliser une quantité plus importante d'énergie afin d'améliorer la performance du système ; ou ii) l'énergie requise est très importante. Dans ce cas l'énergie se cumule dans l'unité de stockage jusqu'à ce qu'elle atteigne la quantité nécessaire pour le fonctionnement du système.

## 2.2 La modulation

### 2.2.1 Étude qualitative

#### Modulation à enveloppe constant

Pour les applications où l'énergie disponible est très faible, on a besoin que le transmetteur puisse générer un maximum de puissance à sa sortie à partir de la puissance d'entrée. Ceci exige que l'amplificateur opère dans le mode saturation afin de maximiser l'efficacité

de conversion. L'utilisation de ce mode crée une sorte de modulation AM-AM ou AM-PM. En plus, la non-linéarité cause un étalement spectral. Vu l'exigence de maintenir ce dernier inférieur à un certain seuil, la limitation des fluctuations d'amplitude du signal à transmettre devient une nécessité [40]. Compte tenu de ces contraintes causées par la non-linéarité de l'amplificateur, on peut conclure que l'utilisation de modulations qui utilisent l'amplitude exige l'utilisation d'amplificateurs linéaires. Quant aux situations où les ressources énergétiques sont limitées, une modulation à enveloppe constante est une meilleure solution.

### Modulation à phase continue (CPM)

CPM est une méthode de modulation avec mémoire. Ceci résulte du fait que la phase du signal à transmettre est continue d'un intervalle à l'autre. [41]. L'avantage de ce type de modulation par rapport au MPSK (pour  $M=2$  ou  $4$ ), réside dans le fait que ce dernier, à cause de la discontinuité de la phase, a une large bande. D'où la nécessité d'effectuer le filtrage avant la transmission pour le MPSK. Cependant cela engendre un signal à enveloppe non constant [42]. En plus, l'enveloppe du signal généré par CPM est peu affecté par le filtrage, vu que les transitions sont moins brusques. [43]. En d'autres termes, le signal CPM est toujours à enveloppe constante [42]. Donc, CPM a une bonne efficacité spectrale grâce à la continuité de la phase ainsi qu'une bonne efficacité énergétique vu l'enveloppe constante de son signal. CPFSK (Continuous Phase FSK) est une sous-classe de CPM dont la fréquence instantanée est constante sur chaque intervalle de symbole [42].

#### 2.2.2 Étude quantitative

Le tableau 2.1 présente l'expression de la largeur de bande et de l'efficacité spectrale de MPSK, MQAM, MFSK et MSK en fonction du nombre de bits par symbole  $b$  et de la durée de symbole  $T_s$ . Dans [44], les auteurs ont fait une étude comparative entre ces différentes classes de modulations (MPSK, MQAM, MFSK et MSK), sans et avec codage, dans un canal AWGN, afin de trouver le schéma le plus efficace énergétiquement. D'abord ils ont commencé par étudier chaque classe de modulation et de trouver les paramètres optimaux (principalement  $b$  : le nombre de bits par symbole, et  $T_{on}$  : la période d'activité du noeud

TABLEAU 2.1 Comparaison entre les classes de Modulation

Classes de modulation	MPSK	MQAM	MFSK	MSK
Largeur de bande	$\frac{1}{T_s}$	$\frac{1}{T_s}$	$\frac{M}{2T_s}$	$\frac{1}{T_s}$
Efficacité spectrale	$b$	$b$	$\frac{b}{2(b-1)}$	$1$

qui est équivalente au temps de transmission d'un paquet de données) qui optimisent la consommation d'énergie, pour des distances de 10m, 30m et 100m. Puis, ils ont comparé leur performance, en terme de consommation d'énergie. Dans le tableau 2.2 on regroupe les résultats approximatifs de [44]. Ce tableau contient les valeurs de l'énergie par bit  $E_b$  pour les différents classes de modulations, en utilisant les paramètres optimaux, pour trois distances différentes.

Dans [45], les auteurs ont fait une étude comparative entre MPSK, MFSK et MQAM en fonction de la distance, dans un canal AWGN, pour deux types de liens A (noeud-collecteur de données) et B (noeud-noeud); afin de déterminer la classe de modulation qui permet une meilleure conservation de l'énergie. Le tableau 2.3 présente les résultats obtenus pour le lien de type A, puisque pour notre cas, on a considéré une communication à saut unique (communication directe entre le noeud source et le collecteur de données).

### 2.2.3 Comparaison

Dans cette section, on présente une comparaison entre les classes de modulations suivantes : MQAM, MPSK, MFSK et MSK. En plus, on considère que l'énergie consommée contient deux composantes : l'énergie de circuit et l'énergie de transmission.

- L'expression de la largeur de bande pour MFSK dépend de  $M = 2^b$  (le nombre de symboles), contrairement à MPSK et MQAM (tableau 2.1). Par conséquent elle devient plus large quand  $M$  augmente.
- L'efficacité spectral de MFSK diminue lorsque  $b$  augmente, le maximum est obtenu lorsque  $b=1$  ou  $b=2$ ; dans ce cas on aura une valeur d'efficacité spectrale égale à 1bit/s/Hz.
- la transmission en utilisant MFSK est plus lente, donc le temps de transmission est plus grand et la consommation d'énergie au niveau circuit est plus importante. Par conséquent, l'utilisation de MFSK peut être utile, en terme d'efficacité énergétique, pour une transmission sur de longues distances (où l'énergie de transmission est dominante contrairement aux petites distances où l'énergie de circuit est dominante) [45].
- M-ary modulation dans le cas de QAM et PSK permet d'améliorer l'efficacité spectrale

TABLEAU 2.2 Valeur optimisée d'énergie par bit  $E_b$

Classes de modulation	MQAM	MPSK	MFSK	MSK
$E_b(dB)/10m$	-27	-23	-18	-32
$E_b(dB)/30m$	-23	-21	-18	-31
$E_b(dB)/100m$	-13	-16	-16	-24

TABLEAU 2.3 Classe de modulation efficace énergétiquement en fonction de la distance

Distance $d$	classe de modulation qui consomme moins d'énergie
$d \leq 31m$	MQAM
$31m < d \leq 73m$	MPSK
$d > 73m$	MFSK

et de diminuer le temps de transmission. Cependant il consomme plus d'énergie de transmission.

- MSK en étant un CPFSK dont les signaux sont orthogonaux, permet d'assurer le maximum d'efficacité spectrale qu'on peut avoir en utilisant FSK. En plus, puisqu'il est à phase continue et à enveloppe constant, il assure une excellente efficacité énergétique.
- D'après les résultats de [45], MPSK et MQAM sont très similaires. Cependant, selon [46], MQAM s'adapte plus aux changements du canal. En plus, il est plus résistant au bruit ; mais il est un peu plus compliqué que MPSK.

## Conclusion

Après cette étude comparative, on peut conclure que MSK est plus approprié aux RCSFs où les noeuds sont munis de batteries non rechargeables, ou si les distances entre les noeuds et le collecteur de données sont très longues. En effet, MSK permet de diminuer la consommation d'énergie. Par conséquent, MSK peut être un bon choix si la maximisation de la durée de vie du réseau est la première priorité du système et si les noeuds ne peuvent pas renouveler leurs ressources énergétiques de façon autonome. Cependant, dans notre cas, cela est possible grâce à la récolte d'énergie. Donc, la priorité du système est de créer un équilibre entre l'énergie consommée et l'énergie récoltée, et de s'adapter aux variations de cette dernière, en plus des variations du canal sans fil. Donc, le choix le plus approprié dans notre cas est MQAM. Surtout que dans le cas multi-point, il serait avantageux d'utiliser un niveau élevé, s'il est possible, afin de réduire la durée d'occupation du canal.

### 2.2.4 La modulation adaptative

Dans [47], les auteurs visent à diminuer le nombre de retransmissions d'un paquet afin d'augmenter la durée de vie du réseau, en utilisant l'intensité du signal (signal strength en anglais). L'intensité du signal est proportionnelle au SNR, et elle est obtenue à partir un filtre Wiener optimal. Selon la valeur de l'intensité du signal, on aura 3 états possibles du canal : bien, modéré, et très mauvais ("good", "moderate", "very bad"). Chaque état correspond à une stra-

tégie appropriée contenant le codage et la classe de modulation adéquats. Cependant, cette correspondance ne peut être appliquée pour les RCSFs-RE, car pour prendre la décision il faut prendre en compte, non seulement l'état de canal, mais aussi l'énergie disponible dans la batterie.

Dans [48] les auteurs proposent un algorithme hors-ligne de maximisation de débit, pour un RCSF point à point. En effet, ils considèrent que le transmetteur reçoit l'information sur l'état du canal (CSI) auprès du récepteur au début de l'IT, sous forme d'un bit. Si ce dernier est égale à 0 alors, le nœud ne doit pas transmettre durant cet IT, sinon le transmetteur détermine le niveau de modulation optimal et effectue la transmission. Ensuite le transmetteur informe le récepteur du niveau choisi pour qu'il puisse faire la démodulation. Contrairement au cas du MQAM adaptative traditionnel, où chaque état de canal est associé à un niveau de modulation optimal sans prendre en considération l'énergie résiduelle et l'énergie récoltée. Dans ce cas le transmetteur n'a pas besoin de transmettre le niveau choisi au récepteur et tant que ce dernier connaît le gain du canal, il peut le déterminer directement. En plus, l'algorithme optimal proposé détermine le seuil que doit respecter le gain du canal ainsi que les niveaux de MQAM à utiliser, durant un horizon de temps fini. Les auteurs de [49], quand à eux, ont proposé un algorithme en-ligne; ce dernier se base sur les résultats de l'algorithme hors-ligne comme données d'entraînement, pour calculer la matrice de probabilité pour les différents niveaux de MQAM. En utilisant la matrice probabilité, il détermine le niveau de modulation qui maximise le débit, et qui respecte la contraintes du système. La performance de l'algorithme est améliorée par un facteur d'ajustement. Les résultats de simulation montrent que la performance de la solution proposée surpasse celle de 64-QAM mais elle est inférieure à celle de l'algorithme hors-ligne.

Le problème de maximisation du débit dans un système avec RE est considéré aussi dans [50]. En effet, les auteurs proposent une stratégie de transmission pour un système point à point avec RE, qui permet d'ajuster la puissance de transmission et le niveau de modulation selon l'information obtenue sur l'arrivée de l'énergie, l'état de la batterie et le gain du canal. Cette stratégie de transmission est trouvée en utilisant un DQN (deep Q-network). Ce dernier n'exige aucune connaissance sur la RE et sur le paramètre du canal, à priori. D'autre part, [51] utilise la théorie d'optimisation de Lyapunov afin de maximiser le débit binaire brut moyen. En effet, le type de modulation et la puissance de transmission sont ajustés selon l'état du canal et de la batterie. En plus, dans ce travail, deux classes différentes de modulations ont été utilisées, à savoir MQAM et MPSK.

### 2.3 Ordonnement avec cyclage de service (Duty cycle scheduling) dans les RCSFs-RE

Le protocole MAC est important afin d'équilibrer la consommation énergétique dans un RCSF-RE. En effet, l'ordonnement basé sur le cyclage de service a pour objectif, la minimisation de la période d'activité du noeud (wake-up period). Par conséquent, il permet de créer cet équilibre et d'atteindre une efficacité énergétique dans les RCSFs-RE [52]. Un ordonnancement dynamique basé sur le cyclage de service pour un système de surveillance forestier est présenté dans [53]. Les noeuds sont organisés sous formes de niveaux concentriques autour du collecteur de données, et le cycle de service est ajusté selon le taux de récolte d'énergie. La solution proposée dans [54] repose sur la transmission d'énergie sans fil à partir d'un point de recharge. Cependant, un noeud ne peut récolter de l'énergie que lorsque son énergie résiduelle est inférieure à sa consommation énergétique. Si l'énergie disponible au niveau du capteur reste insuffisante même après la récolte d'énergie, le noeud passe au mode sommeil (sleep-state), pour éviter un épuisement précoce d'énergie. Une solution pour maintenir le débit dans un RCSF-RE avec une topologie en arbre, est présentée dans [55]. [52] propose une solution basée sur un modèle de régression linéaire pour calculer la période d'activité et de sommeil du noeud en se référant au comportement passé de récolte et de consommation d'énergie. L'optimisation de la qualité de service dans un RCSF-RE est abordée dans [56]. La solution proposée utilise différents cycles de service, et vise à maintenir le niveau de qualité de service exigé par l'utilisateur tant que la récolte d'énergie le permet. Dans le cas contraire, ce niveau est réduit progressivement jusqu'à l'état inactif (idle state). Par conséquent, la condition de neutralité d'énergie est assurée et le noeud demeure disponible. Une analyse de performance (délai de paquets et débit du réseau) dans un RCSF-RE à saut unique est présentée dans [57]. L'accès au canal est géré par un algorithme CSMA/CA dans un protocole de cyclage de service synchrone. Un cycle est défini comme étant l'intervalle de temps qui inclut une période de synchronisation (d'échange de message d'ordonnement), une période d'échange de données (consacrée pour la transmission des données) et une période de sommeil (où le noeud est inactif). À chaque cycle, les noeuds actifs entrent en compétition pour l'accès au canal. En plus, un noeud est considéré actif s'il a des paquets dans sa queue de données et de l'énergie dans sa batterie. Quand la transmission se termine le noeud passe au mode sommeil. Si une collision se produit durant un cycle donné, le noeud peut réessayer au cycle suivant.



## 2.4 Temps d'inter-livraison

Durant les dernières années, les applications temps réel des réseaux sans fil ont augmenté. Le trafic temps réel a souvent, plusieurs exigences de qualité de service en plus du débit, comme le délai bout en bout et la régularité du temps d'inter-service (ou temps d'inter-livraison) [58]. Cette métrique est importante pour les systèmes de contrôle où le système doit agir selon les informations transmises à partir des noeuds capteurs. En effet, dans un tel cas la diminution du délai de bout en bout ne répond pas aux exigences du système puisqu'un grand écart entre deux paquets livrés de données mesurées par le capteur peut engendrer un mauvais contrôle du système ou même une instabilité [23].

L'aspect périodique des transmissions des paquets dans les réseaux véhiculaires est souligné dans [59]. [58] propose une stratégie d'ordonnancement du type poids-maximal (maximum-weight en anglais) afin d'améliorer les performances du système en terme de régularité ainsi qu'en terme de débit dans un canal à évanouissement. La mesure du poids utilisée combine la longueur de la queue et une mesure nommée "time-since-last-service" qui reflète la régularité de service. Une extension de la solution pour les réseaux multi-sauts est proposée dans [60]. Dans [61], les auteurs ont considéré un système qui contient  $N$  utilisateurs qui partagent  $K$  canaux, et visent à ordonnancer les noeuds (capteurs et actionneurs d'automobiles) autour du point d'accès afin de garantir la régularité de service. Le problème est formulé sous forme d'un "Restless Multiarmed Bandit Problem", son objectif est de faire un compromis entre le débit et la régularité de service. Un système cyber-physique est considéré dans [62], la solution proposée vise à répondre aux exigences de régularité du temps d'inter-livraison et d'efficacité énergétique, en introduisant un paramètre d'efficacité énergétique. Ce dernier permet de faire un compromis entre ces deux objectifs contradictoires. [23] a proposé un algorithme d'ordonnancement qui vise à minimiser la valeur de l'espérance de la déviation du temps d'inter-livraison d'un seuil donné. Un RCSF-RE est considéré dans [63]. Il s'agit d'un système point à point où le noeud capteur transmet des informations sur l'état de l'environnement surveillé sur un canal à évanouissement. Les auteurs ont donné l'expression de la fonction de masse des deux métriques de performance suivantes : i) l'âge de mise à jour (update age) qui reflète la fraîcheur des information et ii) le cycle de mise à jour (update cycle) qui reflète la fréquence des mises à jour. Le cas multi-point à point est considéré dans [25]. L'auteur a proposé une métrique de performance qui permet d'évaluer la régularité des transmissions, à savoir le nombre de violations du temps d'inter-livraison. En effet, un événement de violation se produit si la durée entre deux transmissions successives réussies dépasse un seuil donné. Des algorithmes en-ligne et hors-ligne ont été proposés afin de minimiser le nombre d'événements de violations du temps d'inter-livraison sur un horizon de temps fini.

## 2.5 Conclusion

Le problème de minimisation du nombre d'événements de violations du temps d'inter-livraison est considéré dans ce mémoire aussi. Cependant, dans notre cas, on combine la modulation adaptative aux stratégies d'ordonnancement afin de garantir la flexibilité nécessaire au système. Ceci en considérant les variations aléatoires de l'état du canal et de l'arrivée de l'énergie, qui peuvent dégrader la fiabilité du système dans le cas d'un évanouissement profond ou d'une faible récolte d'énergie. De plus, nous prenons en considération non seulement la puissance de transmission du noeud capteur, mais aussi la puissance du circuit transmetteur. Par conséquent, afin de réduire la consommation énergétique au niveau d'un noeud capteur, on a adopté une stratégie de cyclage de service :

- Dans le cas point à point : le noeud se réveille aux intervalles de temps (ITs) sélectionnées par l'algorithme d'ordonnancement. En effet, on a introduit une fonction  $u$  qui calcule le temps écoulé depuis la dernière transmission. La solution présentée vise à maximiser le temps d'inter-livraison tout en respectant le seuil fixé  $U_{max}$ . Ceci permet d'économiser plus d'énergie sans détériorer la performance du système. Les algorithmes déterministes présentés dans ce mémoire, se basent sur la fonction  $u$  et sur l'énergie disponible afin de sélectionner les ITs où le noeud capteur peut initier une transmission. Afin d'améliorer la performance du système on a introduit une autre fonction  $Pr_t$ . Cette fonction prend en considération la fonction  $u$  et l'atténuation du canal et calcule la probabilité de transmission à un IT donné. Les algorithmes d'ordonnancement randomisés se basent sur cette probabilité pour sélectionner un IT, mais sous la condition que le noeud ait suffisamment d'énergie pour transmettre. En outre, le noeud demeure actif durant toute la transmission puis il retourne au mode arrêt à l'IT suivant.
- Dans le cas multi-point à point, le noeud se réveille à la demande. En effet, les algorithmes d'ordonnancement utilisés sont des algorithmes centralisés qui se basent sur la fonction  $u$ . Le noeud avec la valeur maximale de  $u$  et qui a suffisamment d'énergie pour transmettre est sélectionné. Il reste actif durant la transmission puis retourne au mode arrêt.

D'autre part, la connaissance de l'état de canal, supposée parfaite, permet d'ajuster la puissance de transmission. Par conséquent, la transmission est toujours réussie, ce qui permet d'éliminer la consommation énergétique due aux transmissions échouées, et la valeur de SNR moyen est fixe pour un niveau donné de modulation. En plus, l'information sur l'état de canal affecte le choix du niveau de modulation. En effet, on a adopté deux critères de choix du niveau de modulation :

- Le premier, en exploitant la valeur de l'atténuation il choisit le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie afin de diminuer le temps de recharge.
- Le deuxième choisit le niveau de modulation qui permet de minimiser le temps de transmission. Mais sous la contrainte que l'énergie consommée est inférieure à l'énergie disponible. Par conséquent, il est influencé par l'atténuation dont l'énergie consommée dépend et de l'énergie disponible au niveau du noeud.

Afin de démontrer l'amélioration apportée par la modulation adaptative, on compare les algorithmes avec modulation adaptative, à des algorithmes sans modulation adaptative (avec un niveau de modulation fixe). En conclusion, nous combinons la modulation adaptative à des stratégies d'ordonnancement avec cyclage de service afin d'équilibrer la consommation d'énergie et de garantir une régularité des transmissions (minimiser le nombre de violations du temps d'inter-livraison maximal), dans un RCSF-RE point à point et multi-point à point.

## CHAPITRE 3 SYSTÈME POINT À POINT

### 3.1 Modèle du système



FIGURE 3.1 RCSF-RE (système point à point)

Dans ce chapitre, on considère un RCSF contenant un capteur sans fil avec récolte d'énergie qui communique avec un collecteur de données non-récolteur d'énergie. Le noeud capteur est séparé du collecteur de données par une distance  $d$ . On considère que le canal entre le transmetteur et le récepteur est un canal Rayleigh. L'atténuation linéaire et en dB sont notées respectivement  $PL$  et  $PL_{dB}$ , leurs expressions sont données à la sous-section 3.1.1, et la puissance du signal reçu au niveau du collecteur de données est notée  $P_r$ . Le système évolue sur des intervalles de temps (IT) indexés par  $j = 1, 2, \dots, T$ , où la durée d'un IT est  $\tau$  secondes. La quantité d'énergie récoltée à chaque IT est une variable aléatoire qui suit une loi exponentielle [63] de moyenne  $e$ . On suppose que la capacité de la batterie est infinie et on note  $B(j)$  et  $E(j)$  respectivement le niveau de la batterie et l'énergie récoltée à l'IT  $j$ . La récolte d'énergie se fait en parallèle des autres opérations (i.e, la détection et la transmission), en utilisant 2 unités de stockages d'énergie [64]. En plus, on considère que la quantité d'énergie  $E(j)$  récoltée à l'IT  $j$  peut être utilisée à l'IT  $j + 1$ , et on néglige la consommation d'énergie due à la détection.

Le noeud capteur génère des paquets de longueurs fixes  $L$  et les transmet immédiatement vers le collecteur de données aux ITs sélectionnés pour transmettre. La transmission dure  $t_{on}^M$  ITs, où  $M$  est le niveau de modulation choisi. Le noeud capteur est capable d'adapter le niveau de modulation  $M$  en se basant sur l'information qu'il a sur l'état du canal. On assume que cet état est connu parfaitement et ne nécessite pas d'énergie de mesure. La puissance de transmission  $P_t$  varie selon le niveau de modulation  $M$  et la valeur de l'atténuation  $PL$ . La liste des niveaux de modulation possibles  $\mathcal{M} = \{1, 4, 16, 64, 256\}$  contient des niveaux de MQAM avec constellation rectangulaire et le niveau  $M = 1$  qui présente le cas où il n'y a pas de transmission. Le temps de cohérence du canal est supposé être égale au temps

de transmission maximal  $t_{max}$ , correspondant au niveau  $M = 4$ . Le noeud fonctionne selon 3 modes : mode actif, mode arrêt et mode transition, afin de diminuer la consommation d'énergie [44]. En plus, on considère à la fois la puissance de circuit transmetteur et la puissance de transmission, l'expression de l'énergie consommée totale est donnée dans la sous-section 3.1.3.

On fixe le temps d'inter-livraison maximal à une valeur  $U_{max}$  IT. Cette valeur exprime la fréquence des mises à jour exigée ( $\frac{1}{U_{max}}$  mises à jour/IT) pour maintenir un bon suivi de l'état de l'environnement étudié. Une violation se produit quand le temps d'inter-livraison  $U$  dépasse  $U_{max}$ . On note  $u_s = U_{max} - t_{max}$ .

### 3.1.1 Atténuation

On considère un canal de transmission de Rayleigh. L'expression de l'atténuation en  $dB$  est donnée par :

$$PL_{dB} = PL_{dB}^0 + 10n \log_{10}(d) - X_r(dB) \quad (3.1)$$

et en linéaire par :

$$PL = 10^{\frac{PL_{dB}}{10}} \quad (3.2)$$

où :  $n$  : exposant de l'atténuation

$d$  : distance qui sépare le noeud et le collecteur de données

$PL_{dB}^0$  est l'atténuation en espace libre, pour une distance de référence  $d_0 = 1m$ , une fréquence de porteuse  $f_c$  (2.45GHz) ( $c$  est la vitesse de la lumière) et est égale à :

$$PL_{dB}^0 = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi \cdot d_0 \cdot f_c}{c}\right) \quad (3.3)$$

$X_r(dB) = 10 \log_{10}(|X|^2)$  : composante aléatoire qui modélise la perte due à l'évanouissement avec :  $X = y + iz$  où  $y$  et  $z$  sont deux variables aléatoires gaussiennes de moyenne 0 et de variance 1/2.

On note  $PL_{dB}^m$  l'atténuation moyenne en dB, avec :  $PL_{dB}^m = PL_{dB}^0 + 10n \log_{10}(d)$

### 3.1.2 La puissance de transmission

On donne la formule de la puissance reçue requise dans un canal Rayleigh, en fonction de la probabilité d'erreur  $P_e$  désirée et du niveau de modulation  $M$  utilisé, à partir des équations (13) et (20) de [65] :

$$P_r = \frac{8(M-1)(r-0.5)^2 N_0 W N_f}{3b(1-4(r-0.5)^2)} \quad (3.4)$$

avec :

$$r = \frac{P_e b \sqrt{M}}{4(\sqrt{M} - 1)} \quad (3.5)$$

où :  $M$  est le niveau de modulation,  $b = \log_2(M)$ ,  $N_0 = \sigma^2$  est la densité de puissance du bruit AWGN et  $N_f$  est la figure du bruit du récepteur. Étant donné la relation entre la puissance transmise et la puissance reçue :

$$P_t = P_r * PL \quad (3.6)$$

on a l'expression de la puissance de transmission  $P_t$  requise en fonction du niveau de modulation  $M$  et de l'atténuation  $PL$  :

$$P_t = \frac{8(M - 1)(r - 0.5)^2 N_0 W N_f PL}{3b(1 - 4(r - 0.5)^2)} \quad (3.7)$$

### 3.1.3 L'énergie consommée totale

#### La puissance du circuit transmetteur

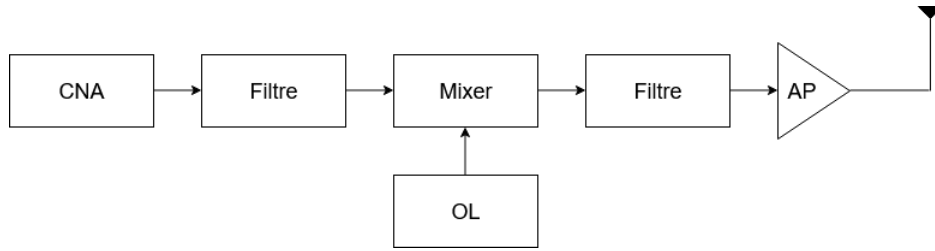


FIGURE 3.2 Transmetteur

Le circuit transmetteur contient un convertisseur numérique-analogique (CNA), un filtre, un mixer, un oscillateur local (OL) et un amplificateur de puissance (AP) (figure 3.2). Étant donné la classe de modulation choisie (MQAM), on peut écrire l'expression de la puissance du circuit transmetteur (sans prendre en considération l'amplificateur)  $P_{tx}$  sous la forme suivante :

$$P_{tx} = P_{CNA} + P_{filt} + P_{syn} + P_{mixer} \quad (3.8)$$

On a la puissance consommée par l'amplificateur  $P_{PA}$  :

$$P_{PA} = \alpha.P_t = \left(\frac{\epsilon}{\nu} - 1\right).P_t \quad (3.9)$$

où :  $\nu$  l'efficacité de drain (drain efficiency en anglais) de l'amplificateur et  $\epsilon$  représente le rapport crête à moyenne (Peak to Average Ratio en anglais) qui dépend de la modulation : pour MQAM  $\epsilon = 3 \cdot \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}+1}$ .

## Le temps de transmission

On définit le temps de transmission  $t_{on}^M$  en fonction du niveau de modulation  $M$  et du taux de transmission de symboles  $R$  :

$$t_{on}^M = \frac{L}{\log_2(M) \cdot R} \quad (3.10)$$

On note  $t_{min}$  le temps de transmission minimal qui correspond au 256 QAM,  $t_{max}$  est le temps de transmission maximal qui correspond au 4QAM, et on a :  $t_{min} \leq t_{on}^M \leq t_{max}; \forall M \in \mathcal{M}$

## Les modes d'activité d'un noeud capteur

Un noeud capteur avec récolte d'énergie contient 4 unités principales : unité de détection, unité de traitement, unité de transmission (tranceiver), unité de contrôle d'énergie et un système générateur d'énergie. On néglige l'énergie consommée par l'unité de détection et l'unité de traitement et on ne prend en compte que l'énergie consommée par l'unité de transmission. Puisque la communication est à saut unique (la transmission des données se fait directement du noeud vers le collecteur de données), alors, on ne tiendra compte que de la consommation d'énergie du circuit transmetteur. D'autre part, on considère que le noeud est actif seulement durant la transmission. Par conséquent, le noeud capteur fonctionne selon trois modes possibles :

- Mode actif : le mode durant lequel le noeud transmet les données au collecteur. L'énergie consommée durant ce mode est constituée de deux composantes : la première est due à la puissance de transmission et la deuxième est due à la puissance du circuit transmetteur :  $(P_t + (P_{PA} + P_{tx})) \cdot T_{on}^M$
- Mode arrêt : le mode durant lequel le noeud est inactif. L'énergie consommée durant ce mode est supposée être nulle. Ce mode permet au noeud de consommer moins d'énergie [44].
- Mode transition : il s'agit de la transition du noeud du mode arrêt au mode actif. L'énergie consommée durant ce mode est supposée constante pour un matériel spécifique :  $E_{tr}$ . Cette énergie est consommée principalement par le synthétiseur de fréquence du circuit transmetteur.

Par conséquent, l'énergie consommée totale dans un cycle est la somme des énergies consommées durant les modes d'opération du noeud. Elle peut être écrite sous la forme suivante : [44]

$$E_c = (P_t + P_{PA} + P_{tx}) \cdot T_{on}^M + E_{tr} \quad (3.11)$$

d'où :

$$E_c = (\alpha + 1).P_t.T_{on}^M + P_{tx}.T_{on}^M + E_{tr} \quad (3.12)$$

### L'énergie consommée totale

Puisque l'énergie du mode transition est constante pour un matériel spécifique, on pose  $E_{tr} = C_2$ . En plus, puisque la puissance de circuit est constante pour tous les niveaux de modulation MQAM, on pose  $P_{tx} = C_1$ . On donne l'expression simplifiée de l'énergie consommée totale :

$$E_c = (C_1 + (\alpha + 1).P_t).T_{on}^M + C_2 \quad (3.13)$$

#### 3.1.4 Temps d'inter-livraison

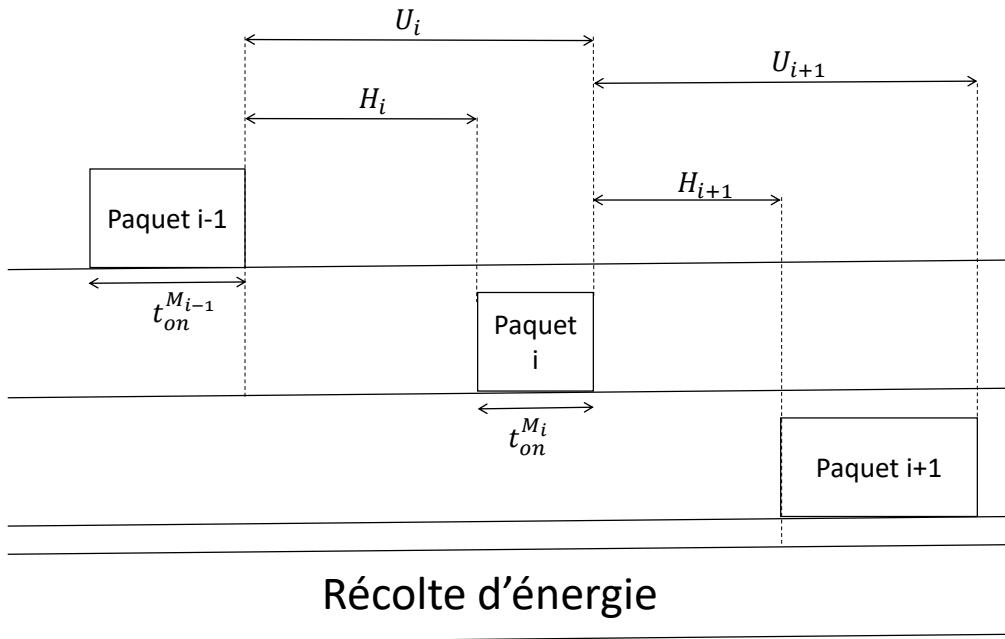


FIGURE 3.3 Le temps d'inter-livraison

Le temps d'inter-livraison est le temps qui sépare deux transmissions successives (la puissance de transmission est choisie de façon à garantir la réussite de la transmission). Comme le montre la figure 3.3, le temps d'inter-livraison relatif à la  $i^{\text{ème}}$  transmission peut être écrit sous la forme suivante :

$$U_i = H_i + t_{on}^{M_i} \quad (3.14)$$



où :  $t_{on}^{M_i}$  est le temps de transmission correspondant au niveau de modulation  $M_i$ , et  $H_i$  est le temps nécessaire avant que le noeud retransmette une nouvelle mise à jour au collecteur de données. En effet, puisque la récolte d'énergie est supposée être faite en parallèle des autres fonctions du noeud capteur, et vu que la batterie n'est pas nécessairement vide après chaque transmission, le temps  $H_i$  dépend :

- de l'énergie consommée  $E_c$ , autrement dit, du niveau de modulation et de la valeur de l'atténuation au début de la transmission.
- du temps nécessaire pour que la batterie atteigne un niveau permettant de transmettre avec la puissance de transmission choisie, et donc du taux de récolte d'énergie.
- de l'algorithme d'ordonnancement, ie : il se peut que la recharge de la batterie soit terminée mais que l'algorithme exige un temps d'attente supplémentaire afin de mieux gérer les ressources énergétiques du noeud (section 3.2).

Un événement de violation se produit à chaque fois que le noeud ne parvient pas à transmettre une nouvelle mise à jour au collecteur de données pour  $U_{max}$  ITs consécutifs. On définit le nombre de violations  $V_i$  relative au temps d'inter-livraison  $U_i$  :

$$V_i = \left\lfloor \frac{U_i - 1}{U_{max}} \right\rfloor, \quad (3.15)$$

On note  $l$  le nombre total de transmissions sur l'horizon de temps  $T$ , et on définit le nombre de violations total  $V$  sur  $T$  :

$$V = \begin{cases} \sum_{i=1}^l V_i & \text{si } l > 0, \\ \left\lfloor \frac{T}{U_{max}} \right\rfloor & \text{si } l = 0, \end{cases} \quad (3.16)$$

Et on a le nombre de violations normalisé  $V_n$  :

$$V_n = \frac{V}{\left\lfloor \frac{T}{U_{max}} \right\rfloor}, \quad (3.17)$$

Pour plus de commodité, nous résumons les principales notations utilisées dans le tableau 3.1.

### 3.1.5 Formulation du problème

L'objectif du problème est de choisir les moments de transmission et le niveau de modulation pour minimiser le nombre de violations total sur un horizon de temps  $T$ . En effet, le choix de l'algorithme d'ordonnancement et du niveau de modulation adéquat permet de mieux gérer les ressources énergétiques du noeud, en tenant en considération le caractère aléatoire de l'arrivée de l'énergie et en se basant sur l'information sur l'état du canal.

TABLEAU 3.1 Notations

Notation	Description
$M$	Niveau de modulation
$E_c$	Énergie consommée totale
$PL, PL_{dB}$	Atténuation linéaire, Atténuation en dB
$t_{on}^{M_i}$	Temps de transmission de la $i^{\text{ème}}$ transmission
$U_i$	temps d'inter-livraison relatif à la $i^{\text{ème}}$ transmission
$V, V_n$	Nombre de violations, Nombre de violations normalisé
$B$	Niveau de la batterie du noeud au début de l'IT
$E$	L'énergie récoltée durant 1 IT
$U_{max}$	Temps d'inter-livraison maximal
$W$	Bande passante du canal
$N_0$	Densité spectrale de puissance du bruit AWGN
$N_f$	Facteur de bruit du récepteur

## Définitions

On définit  $x(j)$  à l'IT  $j$  :

$$x(j) = \begin{cases} 1 & \text{si le noeud commence la transmission à l'IT } j \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (3.18)$$

On a  $l$  le nombre total de transmissions durant  $T$  et  $t_i, i \in \{1, 2, \dots, l\}$ , est l'IT où le collecteur de données reçoit au complet le  $i^{\text{ème}}$  paquet.  $U_i$  est le temps d'inter-livraison qui sépare les transmissions  $i - 1$  et  $i$ . On initialise  $t_0 = 1$  on définit aussi la fonction  $u_i(j)$  à l'IT  $j$  :

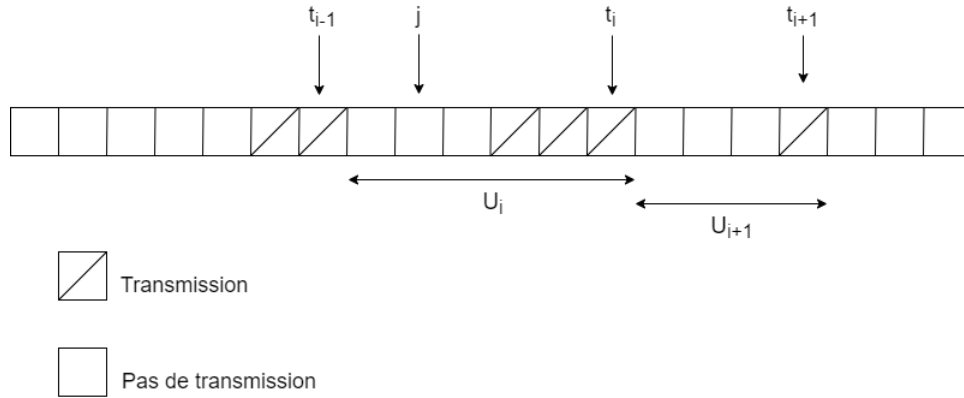
$$u_i(j) = \begin{cases} j - t_{i-1} & \text{si } j \in \{t_{i-1}, \dots, t_i - 1\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.19)$$

Puis, on définit  $u(j) = \sum_{i=1}^l u_i(j)$  qui indique à tout instant  $j$  le temps écoulé depuis la dernière réception d'un paquet.

## 3.2 Algorithmes proposés

### 3.2.1 Algorithmes Déterministes

Les algorithmes déterministes proposés sont basés sur la fonction  $u(j)$ . En effet, ils visent à diminuer le nombre total des transmissions afin d'économiser l'utilisation de l'énergie, mais sans provoquer de violations. D'où l'utilisation de la valeur du seuil  $u_s = U_{max} - t_{max}$ , ( $U_{max}$  :

FIGURE 3.4 Le temps d'inter-livraison  $U$ 

temps d'inter-livraison maximal,  $t_{max}$  : temps de transmission maximal correspondant au niveau de modulation minimal 4QAM). Par conséquent, même avec le niveau inférieur, le noeud ne va pas dépasser  $U_{max}$  s'il possède suffisamment d'énergie pour transmettre.

La différence entre les deux algorithmes déterministes proposés repose sur le critère de choix du niveau de modulation. En effet, l'algorithme DMTDA (Deterministic Minimum Transmission Delay Algorithm) sélectionne le niveau de modulation le plus élevé dont l'énergie consommée correspondante est inférieure à l'énergie disponible dans la batterie. Cet algorithme permet de diminuer le temps de transmission.

Contrairement au DMTDA, l'algorithme DLCEA (Deterministic Less Consumed Energy Algorithm) choisit le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie afin de réduire la consommation d'énergie et de conserver plus d'énergie pour des utilisations futures. En effet, le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie n'est pas nécessairement le niveau inférieur. Il peut être même le niveau supérieur, car il dépend de la valeur de l'atténuation au moment de la transmission et de l'énergie consommée par le circuit transmetteur. Si l'atténuation est faible la puissance de circuit domine la puissance de transmission. Dans ce cas le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie est le niveau supérieur puisqu'il a un temps de transmission plus faible.

En résumé, puisque le temps d'inter-livraison est affecté par le temps de recharge de la batterie et le délai de transmission, on a pensé à minimiser le temps de transmission dans l'algorithme DMTDA et à diminuer le temps de recharge de la batterie dans l'algorithme DLCEA. En effet, le choix du niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie permet de cumuler plus d'énergie dans la batterie et de l'utiliser dans les futures transmissions, surtout si l'arrivée de l'énergie devient plus faible, sans avoir besoin d'attendre une longue durée pour que le noeud aie suffisamment d'énergie pour transmettre.

Afin d'améliorer la performance des deux algorithmes, on a ajouté un critère supplémentaire

qui dépend de  $u(j)$ . En effet, transmettre quand  $u(j) = u_s$  est largement suffisant pour empêcher qu'une violation se produise. Ce qui permet de maximiser le temps d'inter-livraison sans produire de violations. En plus, la diminution du nombre de transmissions permet de conserver plus d'énergie.

---

**Algorithme 1** : Le pseudo-code de DMTDA à l'IT  $j$ .

---

**Entrées** :  $B(j-1)$ ,  $E(j-1)$ ,  $PL(j)$ ,  $u(j)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

- 1  $B(j) \leftarrow B(j-1) + E(j-1)$
- 2  $x(j) \leftarrow 0$
- 3 **si** ( $u(j) \geq u_s$ ) **et** ( $I=1$ ) **alors**
- 4      $Liste \leftarrow M, \forall M \in \{1, 4, 16, 64, 256\}$  avec  $E_c(M, PL(j)) \leq B_j$   
       // le niveau  $M = 1$  signifie pas de transmission, avec:  
        $E_c(1, PL(j)) = 0 \quad \forall PL(j)$
- 5     **si**  $Liste \neq \{1\}$  **alors**
- 6          $M^* \leftarrow \arg \min_M (t_{on}(M))$
- 7          $x(j) \leftarrow 1$
- 8         Calculer  $P_t^{M^*}$
- 9         Calculer  $t_{on}^{M^*}$
- 10         $B(j) \leftarrow B(j) - x(j) \cdot ((C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t + C_2)$
- 11         $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 12         $I \leftarrow 0$
- 13 **sinon**
- 14     **si** ( $I=0$ ) **alors**
- 15          $B(j) \leftarrow B(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t$
- 16          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 17         **si**  $t_{on}^{M^*} = 0$  **alors**
- 18              $I \leftarrow 1$
- 19              $P_t^{M^*} \leftarrow 0$
- 20              $u(j) \leftarrow 0$
- 21     **sinon**
- 22          $M^* \leftarrow 1$
- 23  $u(j+1) \leftarrow u(j) + 1$

**Sorties** :  $B(j)$ ,  $u(j+1)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

---

La description détaillée des algorithmes proposés est donnée dans ce qui suit : Au début de l'IT  $j$ , le niveau de la batterie est mis à jour en additionnant la quantité d'énergie  $E(j-1)$  récoltée durant l'IT précédent (le niveau de la batterie est initialisé à 0 :  $B(j=1) = 0$ ). Ensuite, l'algorithme vérifie si la fonction  $u(j)$  a atteint le seuil  $u_s$ , et si aucune transmission n'est en cours ( $I = 1$ ). Si les deux conditions précédentes sont vérifiées, l'algorithme choisit

le niveau de modulation optimal selon un critère donné :

- L'algorithme MTDA (déterministe et randomisée) sélectionne les niveaux de modulation dont l'énergie consommée est inférieure au niveau de la batterie, parmi ces niveaux MTDA choisit le niveau  $M$  avec le temps de transmission minimal. Si le niveau sélectionné est égale à 1, l'énergie disponible au niveau de la batterie n'est pas suffisante pour effectuer la transmission avec aucun des quatre niveaux de modulation.
- L'algorithme LCEA (déterministe et randomisée) sélectionne le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie selon la valeur de l'atténuation à l'IT  $j$ . Si l'énergie consommée correspondante à ce niveau est supérieure à l'énergie disponible dans la batterie, le noeud ne transmettra pas. Sinon, le noeud transmet avec le niveau de modulation choisi.

L'algorithme calcule, par la suite, la puissance de transmission correspondante au niveau de modulation choisi et à la valeur de l'atténuation à l'IT  $j$ . La consommation énergétique au premier IT de chaque transmission contient l'énergie due à la transmission en plus de l'énergie du mode transition :  $C_2$  (ligne 10). Pour les autres ITs du mode actif l'expression de l'énergie consommée ne contient pas la composante  $C_2$  (ligne 15). À la fin de la transmission la fonction  $u(j)$  est mise à 0 et elle s'incrémente à la fin de chaque IT.

### 3.2.2 Algorithmes randomisés

Les algorithmes randomisés ont pour but d'apporter une amélioration concernant le critère  $u(j) = u_s$ . En effet, ce critère permet de diminuer le nombre de transmissions. Cependant, il ne prend pas en considération l'état du canal, alors que ce dernier affecte le choix du niveau de modulation et l'énergie totale consommée. Donc, si au moment de la transmission l'atténuation est importante, même avec le niveau inférieur de modulation, la quantité d'énergie requise reste considérable. En plus, puisque l'énergie consommée dépend non seulement du niveau de modulation  $M$ , mais aussi de la valeur de l'atténuation, alors l'énergie consommée peut être très différente même avec le même niveau de modulation si l'état de canal change. Ceci entraîne plus de consommation énergétique mais sans aucune amélioration de la qualité du signal reçu (même SNR).

Les algorithmes randomisés se basent sur la fonction  $Pr_t$ , qui prend en considération la valeur de  $u(j)$  et de l'atténuation. À chaque IT  $j$ , le noeud peut transmettre avec une probabilité  $p = Pr_t(u, PL_{dB})$  avec  $u$  et  $PL_{dB}$  sont respectivement, les valeurs de la fonction  $u(j)$  et de l'atténuation en  $dB$  à l'IT  $j$ .

Le choix des paramètres de la fonction  $Pr_t$  repose sur deux conditions :

- rendre le choix du moment de transmission plus flexible de telle façon à permettre une

---

**Algorithme 2** : Le pseudo-code de DLCEA à l'IT  $j$ .

---

**Entrées** :  $B(j-1)$ ,  $E(j-1)$ ,  $PL(j)$ ,  $u(j)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

- 1  $B(j) \leftarrow B(j-1) + E(j-1)$
- 2  $x(j) \leftarrow 0$
- 3 **si** ( $u(j) \geq u_s$ ) **et** ( $I=1$ ) **alors**
- 4      $M^* \leftarrow \arg \min_M (E_c(M, PL(j)))$
- 5     **si**  $E_c(M^*, PL(j)) \leq B(j)$  **alors**
- 6          $x(j) \leftarrow 1$
- 7         Calculer  $P_t^{M^*}$
- 8         Calculer  $t_{on}^{M^*}$
- 9          $B(j) \leftarrow B(j) - x(j) \cdot ((C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t + C_2)$
- 10          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 11          $I \leftarrow 0$
- 12     **sinon**
- 13          $M^* \leftarrow 1$
- // le niveau  $M = 1$  signifie pas de transmission, avec:  
            $E_c(1, PL(j)) = 0 \forall PL(j)$
- 14 **sinon**
- 15     **si** ( $I=0$ ) **alors**
- 16          $B(j) \leftarrow B(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t$
- 17          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 18         **si**  $t_{on}^{M^*} = 0$  **alors**
- 19              $I \leftarrow 1$
- 20              $P_t^{M^*} \leftarrow 0$
- 21              $u(j) \leftarrow 0$
- 22     **sinon**
- 23          $M^* \leftarrow 1$
- 24  $u(j+1) \leftarrow u(j) + 1$

**Sorties** :  $B(j)$ ,  $u(j+1)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

---

transmission même avant que  $u(j)$  soit égale à  $u_s$  si l'état de canal est suffisamment bonne.

- retarder la transmission le plus possible, afin de diminuer le nombre des transmissions (mais sans que  $u(j)$  dépasse  $u_s$ ).

La fonction  $Pr_t$  à l'IT  $j$  est donnée par l'expression suivante :

$$Pr_t(u, PL_{dB}) = 0.5 * \tanh\left(\left(1 - \gamma_{u,pl}\right) - \frac{u_s - u}{u_s}\right) * \beta_u) + 0.5, \quad (3.20)$$

où  $\gamma_{u,pl}$  est une fonction de  $PL_{dB}$  :

$$\gamma_{u,pl}(PL_{dB}) = \Delta_{\gamma,u} * \tanh(\beta_{pl} * (PL_{dB} - PL_{dB}^m)) + \gamma_u, \quad (3.21)$$

$\tanh(\cdot)$  est la fonction tangente hyperbolique et  $PL_{dB}^m$  indique la valeur moyenne de l'atténuation en dB. Les paramètres :  $\Delta_{\gamma,u}$ ,  $\beta_u$ ,  $\gamma_u$  et  $\beta_{pl}$  utilisés dans les équations 3.20 et 3.21 sont des paramètres de réglage utilisés afin d'adapter la fonction au comportement désiré du système. Les valeurs de ces paramètres sont déterminées via l'analyse suivante :

La valeur de la fonction (la probabilité de transmission) augmente si  $u$  augmente et/ou l'atténuation (en dB) diminue. En effet, à l'IT  $j$  :

- $Pr_t(j) \rightarrow 0$  si  $u(j) < \frac{2 \cdot u_s}{3}$  afin de réduire le nombre de transmissions et de conserver plus d'énergie.
- $Pr_t(j) \rightarrow 1$  si  $u(j) \rightarrow u_s$  afin d'empêcher la production d'une violation.

Ces deux conditions sont utilisées afin de déterminer la valeur des paramètres de réglage :

$$\begin{cases} Pr_t(u = u_s, PL_{dB}) \geq 0.999 & \forall PL_{dB} \\ Pr_t(u < \frac{2 \cdot u_s}{3}, PL_{dB}) \leq 0.001 & \forall PL_{dB} \end{cases} \quad (3.22)$$

Puisque  $\gamma_{uPL}$  est une fonction croissante de l'atténuation  $PL_{dB}$ , il suffit de vérifier la première condition pour la valeur maximale de  $\gamma_{uPL}$ , et de vérifier la deuxième pour la valeur minimale de  $\gamma_{uPL}$ . Par conséquent, les conditions deviennent :

$$\begin{cases} \beta_u - \beta_u^* \Delta_{\gamma,u} - \beta_u^* \gamma_u \geq 3.45. & (1) \\ 2/3 \beta_u + \beta_u * \Delta_{\gamma,u} - \beta_u^* \gamma_u \leq -3.45 & (2) \end{cases} \quad (3.23)$$

(1)-(2)  $\Rightarrow \beta_u * (\frac{1}{6} - \Delta_{\gamma,u}) \geq 3.45$ ; avec :  $\Delta_{\gamma,u} < \frac{1}{6}, \beta_u > 0$

On prend :  $\Delta_{\gamma,u} = \frac{1}{12}$ .

Si on considère le cas d'égalité, on conclut les relations suivantes entre les paramètres :

$$\begin{cases} \beta_u * (\frac{1}{6} - \Delta_{\gamma,u}) = 3.45 \\ \gamma_u = \frac{3.45 + (\frac{2}{3}\beta_u + \beta_u \cdot \Delta_{\gamma,u})}{\beta_u} \end{cases} \quad (3.24)$$

Les valeurs de  $\beta_u$  et  $\gamma_u$  sont calculées à partir de la valeur de  $\Delta_{\gamma,u}$  :  $\beta_u = 41.4$  et  $\gamma_u = \frac{5}{6}$ . La valeur optimale de  $\beta_{PL}$  est déduite à partir de la courbe suivante :

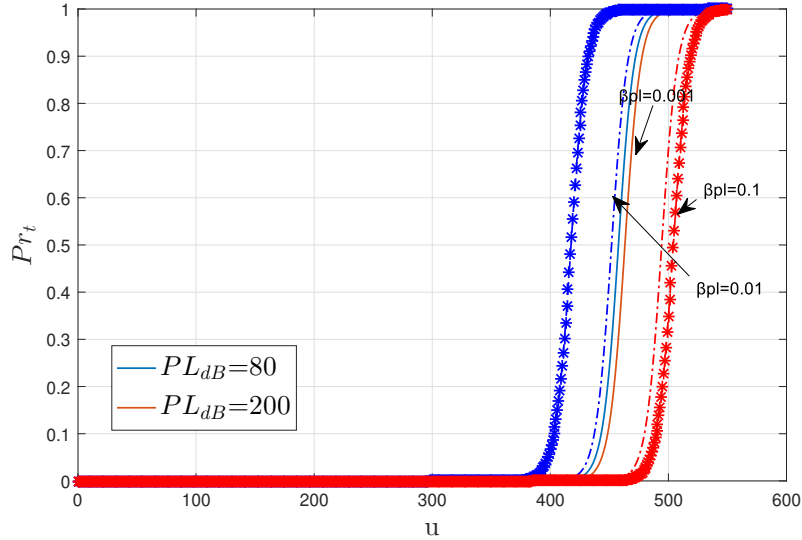


FIGURE 3.5 Choix du paramètres  $\beta_{PL}$

D'après les courbes de la figure 3.5, on constate que si  $\beta_{PL}$  est petite, les courbes pour les deux valeurs de PL sont proches, et vice versa. Par conséquent, la valeur choisie est  $\beta_{PL} = 0.01$ .

La description des algorithmes randomisés est similaire à celle des algorithmes déterministes sauf que dans le cas de RMTDA et de RLCEA, l'algorithme met à jour la valeur de  $p$  qui correspond à l'image de  $u$  et de l'atténuation à l'IT  $j$ , avec la fonction  $Pr_t$ , et si le noeud est en mode arrêt ( $I = 1$ ), la probabilité de transmission à l'IT  $j$  est égale à  $p$ .

### 3.2.3 Algorithmes de référence

L'algorithme de référence WAM (Without Adaptive Modulation) est similaire aux algorithmes DMTDA et DLCEA, sauf que cet algorithme utilise un niveau de modulation  $M$  fixe, avec  $M \in \{4, 16, 64, 256\}$ .

Nous résumons les principales différences entre les algorithmes proposés et les algorithmes de référence dans le tableau 3.2.



---

**Algorithme 3** : Le pseudo-code de RMTDA à l'IT  $j$ .
 

---

**Entrées** :  $B(j-1)$ ,  $E(j-1)$ ,  $PL(j)$ ,  $u(j)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

- 1  $B(j) \leftarrow B(j-1) + E(j-1)$
- 2  $x(j) \leftarrow 0$
- 3 Calculer  $p = Pr_t(u(j), PL_{dB}(j))$
- 4  $a \leftarrow rand(1)$
- 5 **si** ( $a \leq p$ ) **et** ( $I=1$ ) **alors**
- 6      $Liste \leftarrow M, \forall M \in \{1, 4, 16, 64, 256\}$  avec  $E_c(M, PL(j)) \leq B_j$   
       // le niveau  $M=1$  signifie pas de transmission, avec:  
        $E_c(1, PL(j)) = 0 \quad \forall PL(j)$
- 7     **si**  $Liste \neq \{1\}$  **alors**
- 8          $M^* \leftarrow \underset{M}{\arg \min}(t_{on}(M))$
- 9          $x(j) \leftarrow 1$
- 10         Calculer  $P_t^{M^*}$
- 11         Calculer  $t_{on}^{M^*}$
- 12          $B(j) \leftarrow B(j) - x(j) \cdot \left( (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t + C_2 \right)$
- 13          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 14          $I \leftarrow 0$
- 15 **sinon**
- 16     **si** ( $I=0$ ) **alors**
- 17          $B(j) \leftarrow B(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t$
- 18          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 19         **si**  $t_{on}^{M^*} = 0$  **alors**
- 20              $I \leftarrow 1$
- 21              $P_t^{M^*} \leftarrow 0$
- 22              $u(j) \leftarrow 0$
- 23     **sinon**
- 24          $M^* \leftarrow 1$
- 25  $u(j+1) \leftarrow u(j) + 1$

**Sorties** :  $B(j)$ ,  $u(j+1)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

---

---

**Algorithme 4** : Le pseudo-code de RLCEA à l'IT  $j$ .
 

---

**Entrées** :  $B(j-1)$ ,  $E(j-1)$ ,  $PL(j)$ ,  $u(j)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

- 1  $B(j) \leftarrow B(j-1) + E(j-1)$
- 2  $x(j) \leftarrow 0$
- 3 Calculer  $p = Pr_t(u(j), PL_{dB}(j))$
- 4  $a \leftarrow rand(1)$
- 5 **si** ( $a \leq p$ ) **et** ( $I=1$ ) **alors**
- 6      $M^* \leftarrow \arg \min_M (E_c(M, PL(j)))$
- 7     **si**  $E_c(M^*, PL(j)) \leq B(j)$  **alors**
- 8          $x(j) \leftarrow 1$
- 9         Calculer  $P_t^{M^*}$
- 10        Calculer  $t_{on}^{M^*}$
- 11         $B(j) \leftarrow B(j) - x(j) \cdot ((C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t + C_2)$
- 12         $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 13         $I \leftarrow 0$
- 14     **sinon**
- 15          $M^* \leftarrow 1$
- // le niveau  $M=1$  signifie pas de transmission, avec:  
           $E_c(1, PL(j)) = 0 \quad \forall PL(j)$
- 16 **sinon**
- 17     **si** ( $I=0$ ) **alors**
- 18          $B(j) \leftarrow B(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t$
- 19          $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 20         **si**  $t_{on}^{M^*} = 0$  **alors**
- 21              $I \leftarrow 1$
- 22              $P_t^{M^*} \leftarrow 0$
- 23              $u(j) \leftarrow 0$
- 24         **sinon**
- 25              $M^* \leftarrow 1$
- 26  $u(j+1) \leftarrow u(j) + 1$

**Sorties** :  $B(j)$ ,  $u(j+1)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

---

TABLEAU 3.2 Algorithmes

Algorithme	Choix de l'intervalle de temps $j$	Choix du niveau de modulation $M^*$
<b>DLCEA</b>	$u(j) = u_s$	minimiser l'énergie consommée
<b>DMTDA</b>	$u(j) = u_s$	minimiser le temps de transmission
<b>RLCEA</b>	avec une probabilité $p(j)$	minimiser l'énergie consommée
<b>RMTDA</b>	avec une probabilité $p(j)$	minimiser le temps de transmission
<b>WAM-MQAM</b>	$u(j) = u_s$	niveau de modulation $M$ fixe

### 3.2.4 Analyse asymptotique

La quantité d'énergie récoltée à chaque intervalle de temps suit une loi exponentielle de moyenne  $e$ . Donc, le nombre d'ITs nécessaire afin de cumuler une quantité égale à  $E_c(M, PL)$  (requis pour pouvoir transmettre un paquet de donnée avec le niveau de modulation  $M$  quand la valeur de l'atténuation est égale à  $PL$ ) suit une loi Poisson de moyenne  $\tau = \left\lfloor \frac{E_c(M, PL)}{e} \right\rfloor + 1$ . On a  $\delta t$  est la durée d'un intervalle de temps, et on note  $\rho = \frac{e}{\delta t}$  le taux d'arrivée d'énergie moyen. Dans cette section on compare le comportement du système, en utilisant les algorithmes proposés et les algorithmes de référence, pour les deux cas suivants : i) énergie insuffisante  $\rho \rightarrow 0$ . ii) énergie abondante  $\rho \rightarrow \infty$ .

#### Algorithme WAM-MQAM (le niveau de modulation $M$ est fixe)

- Quand  $\rho \rightarrow \infty$  le temps de recharge  $\tau_i$  nécessaire pour la transmission  $i$ , est très faible ; d'où  $\tau_i \ll u_s$ . Donc, le noeud transmet le paquet  $i$  une fois qu'on a  $u(j) = u_s$ . Par conséquent, dans ce cas on a  $H_i = u_s$  et  $U_i = H_i + t_{on}^M = u_s + t_{on}^M$ , d'où,  $u_s + t_m \leq U_i \leq u_s + t_M < U_{max}, \forall i \in \{1, 2, \dots, l\}$  et  $V = \sum_{i=1}^l \left\lfloor \frac{U_i - 1}{U_{max}} \right\rfloor = \sum_{i=1}^l \left\lfloor \frac{u_s + t_{on}^M - 1}{U_{max}} \right\rfloor = 0$  ; puisque  $u_s + t_{on}^M \leq u_s + t_M = U_{max}, \forall M \in \mathcal{M}$
- Quand  $\rho \rightarrow 0$  le temps de recharge  $\tau_i$  nécessaire pour la transmission  $i$ , est très grand ; d'où  $\tau_i \gg u_s$ . Donc,  $H_i = \tau_i - t_{on}^M$  (la batterie est supposée être vide après chaque transmission), où  $t_m \leq t_{on}^M \leq t_M \ll \tau_i$  ; d'où  $H_i \approx \tau_i$  ;  $H_i$  dans ce cas est le temps de recharge, et  $U_i = H_i + t_{on}^M \approx H_i \approx \tau_i$ . Donc,  $\rho \rightarrow 0 \implies U_i \rightarrow T$  et  $l \rightarrow 1$  ; en plus,  $V \rightarrow \left\lfloor \frac{T}{U_{max}} \right\rfloor$  d'où  $V_n \rightarrow 1$

#### DMTDA

- Quand  $\rho \rightarrow \infty$  le temps de recharge  $\tau_i$  nécessaire pour la transmission  $i$ , est très faible ; d'où  $\tau_i \ll u_s$ . Dans ce cas,  $H_i = u_s$  et  $U_i = u_s + t_{on}^M$ . En plus, le niveau de modulation sélectionné est le niveau le plus élevé  $M = M_{max}$ , puisque l'énergie est abondante

---

**Algorithme 5** : Le pseudo-code de WAM à l'IT  $j$ .
 

---

**Entrées** :  $B(j-1)$ ,  $E(j-1)$ ,  $PL(j)$ ,  $u(j)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

- 1  $B(j) \leftarrow B(j-1) + E(j-1)$
- 2  $x(j) \leftarrow 0$
- 3 **si** ( $u(j) \geq u_s$ ) **et** ( $I=1$ ) **alors**
- 4     **si**  $E_c(M, PL(j)) \leq B(j)$  **alors**
- 5          $x(j) \leftarrow 1$
- 6         Calculer  $P_t^M$
- 7         Calculer  $t_{on}^M$
- 8          $B(j) \leftarrow B(j) - x(j) \cdot \left( (C_1 + (1 + \alpha) P_t^M) \cdot \delta t + C_2 \right)$
- 9          $t_{on}^M \leftarrow t_{on}^M - 1$
- 10          $I \leftarrow 0$
- 11 **sinon**
- 12     **si** ( $I=0$ ) **alors**
- 13          $B(j) \leftarrow B(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^M) \cdot \delta t$
- 14          $t_{on}^M \leftarrow t_{on}^M - 1$
- 15         **si**  $t_{on}^M = 0$  **alors**
- 16              $I \leftarrow 1$
- 17              $P_t^M \leftarrow 0$
- 18              $u(j) \leftarrow 0$
- 19  $u(j+1) \leftarrow u(j) + 1$

**Sorties** :  $B(j)$ ,  $u(j+1)$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $I$

---

(le noeud est supposé avoir suffisamment d'énergie pour choisir le niveau supérieur même s'il est le niveau qui consomme le plus d'énergie). Donc  $t_{on}^{M_i} = t_m \forall i \in 1 \dots l$ , d'où  $U_i = u_s + t_m = U_{max} - t_M + t_m < U_{max} \forall i \in 1, 2, \dots, l$ . Donc,  $l = \lfloor \frac{T}{u_s + t_m} \rfloor$  et  $V = \sum_{i=1}^l \lfloor \frac{U_i - 1}{U_{max}} \rfloor = \sum_{i=1}^l \lfloor \frac{u_s + t_m - 1}{U_{max}} \rfloor = 0$

- Quand la valeur de  $\rho$  est très faible,  $\tau_i \gg u_s$  et  $H_i \approx \tau_i$ . En plus, le niveau de modulation sélectionné est le niveau qui consomme le moins d'énergie. Donc, DMTDA et DLCEA ont le même comportement pour les petites valeurs de  $\rho$ , et on a :  $\rho \rightarrow 0 \implies \tau_i \rightarrow T$  et  $V_n \rightarrow 1$ .

### DLCEA

- Comme dans le cas de DMTDA, quand  $\rho \rightarrow \infty$ ,  $H_i = u_s$  et  $V_n \rightarrow 0$ . La seule différence consiste sur le choix du niveau de modulation. Dans ce cas, il s'agit du niveau qui consomme le moins d'énergie, et on a :  $U_i = u_s + t_{on}^{M_i}$ . Où  $M_i$  dépend de l'atténuation.
- Quand la valeur de  $\rho \rightarrow 0$ , DLCEA et DMTDA ont le même comportement et  $V_n \rightarrow 1$ . En plus, le noeud tend à transmettre quand le canal est bon, puisque l'énergie requise

atteint sa valeur minimale. Par conséquent, les niveaux de modulation les plus utilisés sont les niveaux supérieurs (ceci est confirmé par les résultats de simulations dans la section suivante).

**Les algorithmes randomisés** Les algorithmes randomisés ont pour but d'améliorer la performance du système, en profitant des moments où le canal est bon, pour économiser plus d'énergie.

- Quand l'énergie est abondante,  $H_i \leq u_s$  (selon l'état du canal). Donc  $U_i = H_i + t_{on}^{M_i} \leq u_s + t_{on}^{M_i} < U_{max}$ . D'où, si  $\rho \rightarrow \infty$ ,  $V_n \rightarrow 0$ .
- Quand  $\rho$  est très faible,  $\tau_i \gg u_s$ , d'où  $Pr_t = 1$  avant que la batterie soit rechargée. Par conséquent, dans ce cas les algorithmes randomisés et déterministes ont le même comportement.

### 3.3 Résultats de simulations

Dans cette section, la performance des algorithmes proposés, en terme de nombres de violations du temps d'inter-livraison, est évaluée et comparée aux algorithmes de référence, via les résultats de simulations.

#### 3.3.1 Paramètres et méthodologie

Les paramètres utilisés sont groupés dans le tableau 3.3.

On considère un système composé d'un noeud capteur avec récolte d'énergie, éloigné du collecteur de données d'une distance  $d$ . L'exposant de l'atténuation est  $n = 2.7$  et la distance de référence est  $d_0 = 1m$ . Le canal suit une loi Rayleigh complexe de moyenne nulle et de variance unitaire. Le taux de récolte d'énergie est  $\rho = e/IT$ . La durée d'un intervalle de temps IT est  $\delta t = 10^{-3}s$ . Le temps d'inter-livraison maximal est fixé à  $U_{max} = 600$  IT. Les résultats sont obtenus en utilisant 1000 simulations de Monte-Carlo sur un horizon temporel  $T = 100000$  IT chacune. La mesure de performance utilisée est le nombre de violations

TABLEAU 3.3 Paramètres de simulation

$R = 10^4$ symboles/s	$n = 2.7$	$L = 10^3$ bits
$N_0/2 = 3.981 \cdot 10^{-21}$ W/Hz	$N_f = 10; \nu = 0.35$	$C_1 = P_{tx} = 98.2mW$
$C_2 = E_{tr} = 0.25 \cdot 10^{-6}$ J	$P_e = 10^{-3}$	$\delta t = 10^{-3}$ s
$W = 10^4$ Hz	$\Delta_{\gamma,u} = 1/12$	$U_{max} = 600$ IT
$\beta_u = 41.4$	$\gamma_u = 5/6$	$\beta_{pl} = 0.01$

normalisé  $V_n = \frac{V}{U_{max}}$  où  $V$  est le nombre total de violations sur l'horizon de temps  $T$ . Les algorithmes proposés sont comparés aux algorithmes de référence, dans les trois cas suivants :

- En variant le taux de récolte d'énergie, avec  $d = 100$  m (faible atténuation).
- En variant le taux de récolte d'énergie, avec  $d = 175$  m (forte atténuation).
- En variant l'atténuation moyenne, avec  $e = 10^{-5}$  J

La largeur de l'intervalle de confiance  $\Delta_{IC}$  correspondant à un niveau de confiance de 95% dépend de  $s$  le nombre de simulations de Monte-Carlo et de  $v$  l'écart type de  $V_n$  sur les  $s$  simulations, et on a :

$$\Delta_{IC} = 2 \times 1.96 \times \frac{v}{\sqrt{s}} \quad (3.25)$$

Les tableaux 3.4 et 3.5 présente la moyenne du nombre de violations normalisé  $\bar{V}_n$  et  $\Delta_{IC}$  pour  $e = 7 \times 10^{-6}$  et un nombre de simulations  $s = 1000$ . Les valeurs des intervalles de confiance  $\Delta_{IC}$  étant de moins que 10% de la valeur moyenne de  $V_n$  nous indiquent que la valeur choisie de  $s$  est appropriée pour obtenir des résultats significatifs.

### 3.3.2 L'énergie consommée totale

La figure 3.6 présente les variations de l'énergie consommée en fonction de la valeur de l'atténuation. En effet, pour les faibles valeurs de l'atténuation les niveaux de modulation les plus élevés de modulation consomment moins d'énergie, contrairement aux valeurs plus importantes de l'atténuation où les niveaux les moins élevés consomment le moins d'énergie. Ceci est dû au fait que pour les petites valeurs de l'atténuation la puissance de circuit est dominante. Par conséquent, le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie est le niveau qui a le temps de transmission le plus faible, puisque la puissance de circuit est fixe quelque soit le niveau de modulation sélectionné. Mais quand la valeur de l'atténuation augmente la puissance de transmission devient dominante. L'énergie consommée, dans ce cas, dépend du temps de transmission et de la puissance de transmission. Comme le montre la figure, sur le premier intervalle le 256QAM consomment le moins d'énergie, sur le deuxième intervalle 64QAM devient le niveau avec l'énergie minimale et ainsi de suite. Ceci peut être expliqué par le fait que la différence entre les temps de transmission de 256QAM et de 64QAM devient moins importante que la différence entre les puissances de transmission de ces deux

TABLEAU 3.4 Intervalle de confiance : algorithmes proposés

Algorithme	DMTDA	DLCEA	RMTDA	RLCEA
$\bar{V}_n$	0.1089	0.0310	0.0244	0.0146
$\Delta_{IC}$	0.0032	0.0031	0.0015	0.0012

TABLEAU 3.5 Intervalle de confiance : algorithmes de référence

Algorithme	WAM-4QAM	WAM-16QAM	WAM-64QAM	WAM-256QAM
$V_n$	0.7745	0.0431	0.0935	0.3411
$\Delta_{IC}$	$5.89 \times 10^{-4}$	0.0031	0.0040	0.0430

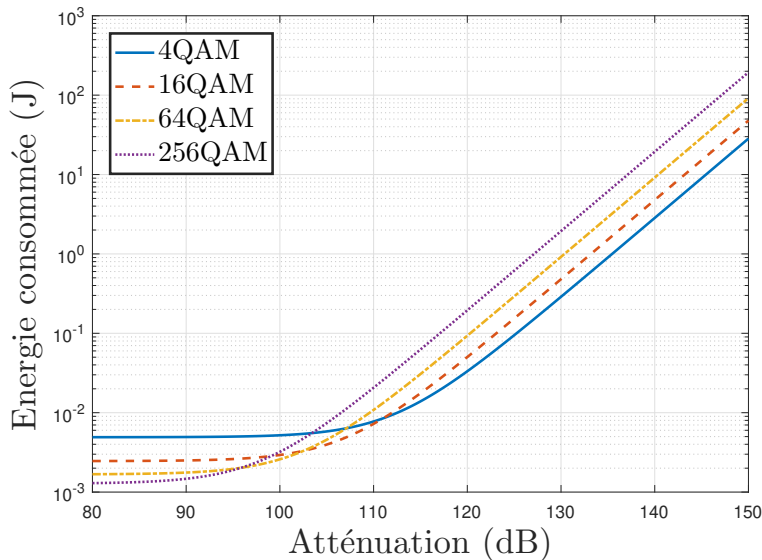


FIGURE 3.6 L'énergie consommée en fonction de l'atténuation

niveaux. Donc pour chaque valeur d'atténuation on a un niveau de modulation optimal en terme d'efficacité énergétique, et qui n'est pas nécessairement le niveau le plus bas. Le même phénomène se produit entre les niveaux de modulation lorsque l'atténuation augmente.

### 3.3.3 Comparaison en fonction du taux d'arrivée d'énergie

#### Faible atténuation

Dans la figure 3.7, on compare la performance des algorithmes proposés aux algorithmes de référence en terme de  $V_n$  quand le taux d'arrivée d'énergie varie, avec  $d = 100$  m. D'abord, on constate que WAM-64QAM surpasse les autres algorithmes WAM. Ceci peut être expliqué à partir des résultats de la figure 3.6. En effet, sachant que la valeur de l'atténuation moyenne à cette distance est  $PL_{dB}^m = 94.22$  dB, le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie est 64QAM ou 256QAM, selon la valeur de la composante aléatoire de l'atténuation. D'autre part la figure montre que RLCEA surpasse les autres algorithmes. En effet, RMTDA et DMTDA permettent de réduire le temps de transmission, mais pas néces-

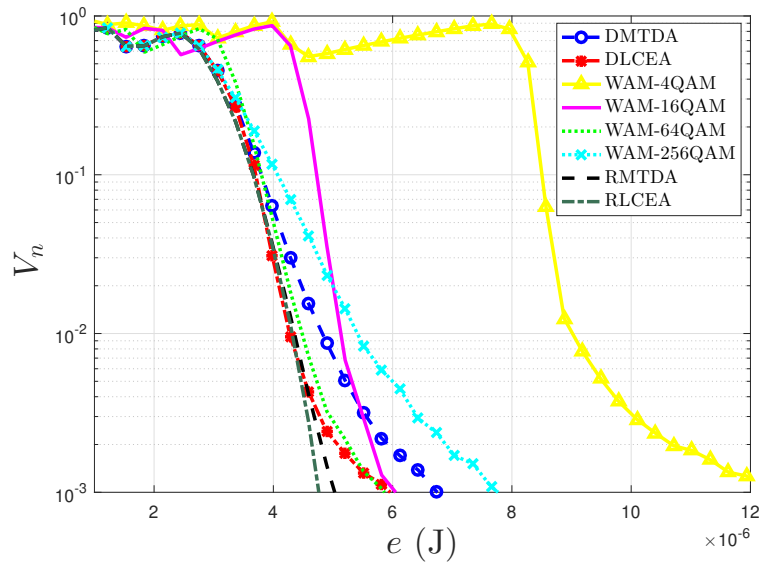


FIGURE 3.7 Le nombre de violation en fonction de  $e$  ( $d=100\text{m}$ )

sairement le temps d'inter-livraison. En plus, l'énergie économisée par DLCEA et RLCEA peut être utilisée quand le taux de récolte d'énergie diminue, ce qui réduit le nombre de violations, contrairement au cas de DMTDA et de RMTDA. En outre, les algorithmes randomisés surpassent les algorithmes déterministes, car ils sont plus flexibles et favorisent la transmission quand l'atténuation est faible, ce qui permet à la fois de diminuer le nombre de violations et d'économiser plus d'énergie pour de futures utilisations.

La figure 3.8 compare la fréquence d'utilisation des 4 niveaux de QAM pour DMTDA, DLCEA, RMTDA et RLCEA. D'abord, on constate que le 4QAM est le niveau le moins utilisé par les quatre algorithmes. En effet, pour cette valeur d'atténuation moyenne, 4QAM est le niveau qui consomme le plus d'énergie (figure 3.6). En plus, pour les faibles valeurs de  $e$ , le noeud est poussé à transmettre aux instants où l'état de canal est bon, et où le 256QAM consomme le moins d'énergie. D'autre part, on constate que pour DMTDA et RMTDA, le 256QAM est le niveau le plus utilisé puisque l'atténuation moyenne est faible. Cependant, dans le cas de DLCEA et RLCEA, quand la valeur de  $e$  augmente les fréquences d'utilisation de 64QAM et 256QAM deviennent presque égales.

### Forte atténuation

Cette fois-ci on évalue la performance des algorithmes quand  $d = 175 \text{ m}$  ( $PL_{dB}^m = 100.78 \text{ dB}$ ). La figure 3.9 montre que RLCEA surpasse les autres algorithmes même avec une forte atténuation. Les conclusions sont similaires au cas précédent (avec atténuation faible), sauf



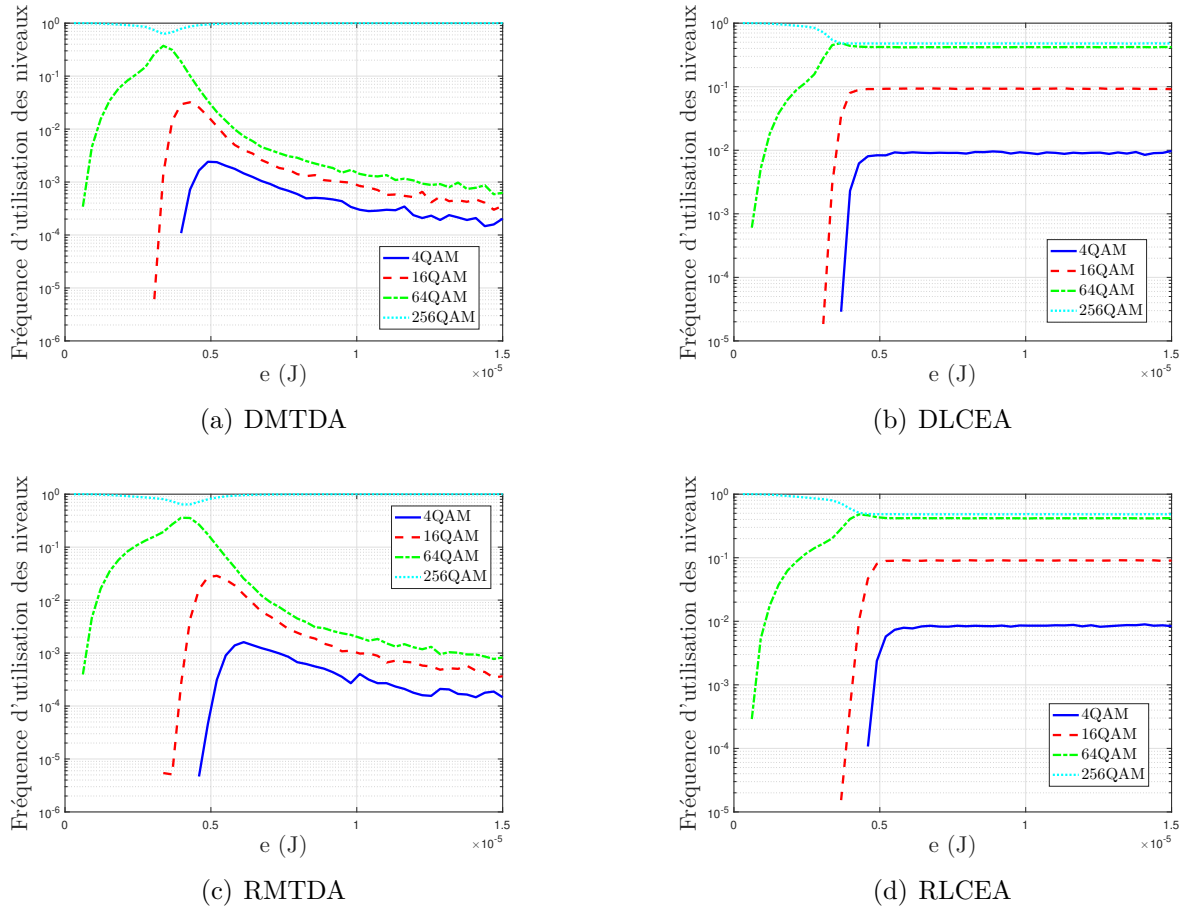


FIGURE 3.8 La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation ( $d=100m$ )

pour les algorithmes WAMs. En effet, dans ce cas, WAM-16QAM a la meilleure performance d'entre les algorithmes WAMs. En plus, le WAM-256QAM devient beaucoup moins performant, contrairement aux algorithmes proposés qui ont été moins affectés par la variation de la valeur de l'atténuation moyenne. Ce qui prouve l'amélioration apportée par l'utilisation de la modulation adaptative.

La figure 3.10 montre que les algorithmes ont le même comportement que dans le cas précédent mais le choix des niveaux de modulation varie. En effet, pour les faibles valeurs de  $e$ , le niveau de modulation le plus utilisé est 64QAM et non 256QAM. En plus, quand  $e$  augmente, DLCEA et RLCEA utilisent principalement 16QAM et 64QAM. Toutefois 256QAM est toujours le niveau le plus utilisé par DMTDA et RMTDA, quand le taux de récolte d'énergie est suffisamment grand.

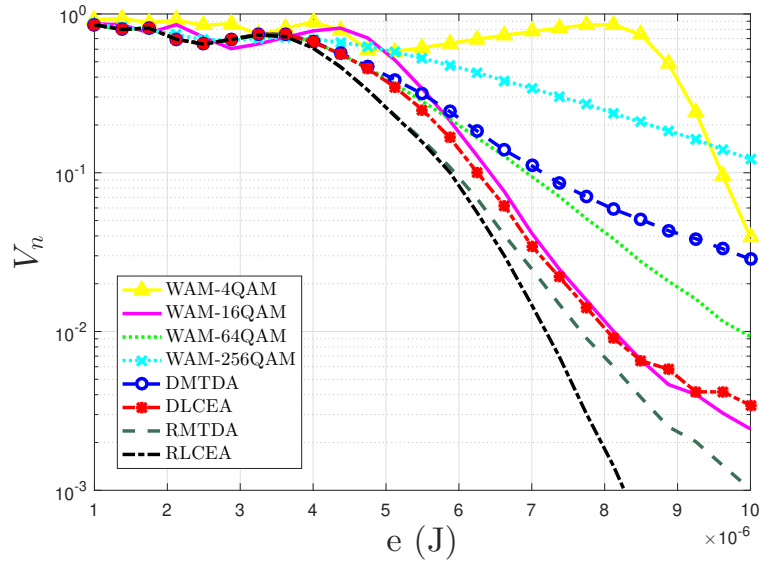


FIGURE 3.9 Le nombre de violation en fonction de  $e$  ( $d=175\text{m}$ )

### 3.3.4 Comparaison en fonction de l'atténuation moyenne

Dans la figure 3.11 on compare la performance des algorithmes en terme de  $V_n$ , en fonction de l'atténuation moyenne pour  $e = 10^{-5}$  J. On remarque que pour cette valeur de  $e$ , WAM-16QAM a la meilleure performance parmi les algorithmes WAMs quelque soit la valeur de l'atténuation moyenne. En plus, on constate que RLCEA surpasse les autres algorithmes puisqu'il permet d'économiser plus d'énergie que les autres algorithmes.

### 3.3.5 Conclusion

D'après les résultats présentés, on conclut que :

- En considérant la puissance du circuit transmetteur en plus de la puissance de transmission, le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie n'est pas nécessairement le niveau inférieur, mais il dépend de la valeur de l'atténuation.
- La performance des algorithmes avec modulation fixe (WAM) varie considérablement quand la valeur de l'atténuation moyenne change (dans ce cas on a changé la distance  $d$ ), contrairement aux algorithmes avec modulation adaptative. Particulièrement l'algorithme RLCEA maintient une bonne performance dans les deux cas étudiés ( $d = 100\text{m}$  et  $d = 175\text{m}$ ).
- $V_n$  tend vers 1 si le temps de recharge est supérieur à  $U_{max}$  ; à cause d'une forte l'atténuation ou d'un faible taux d'arrivée d'énergie.

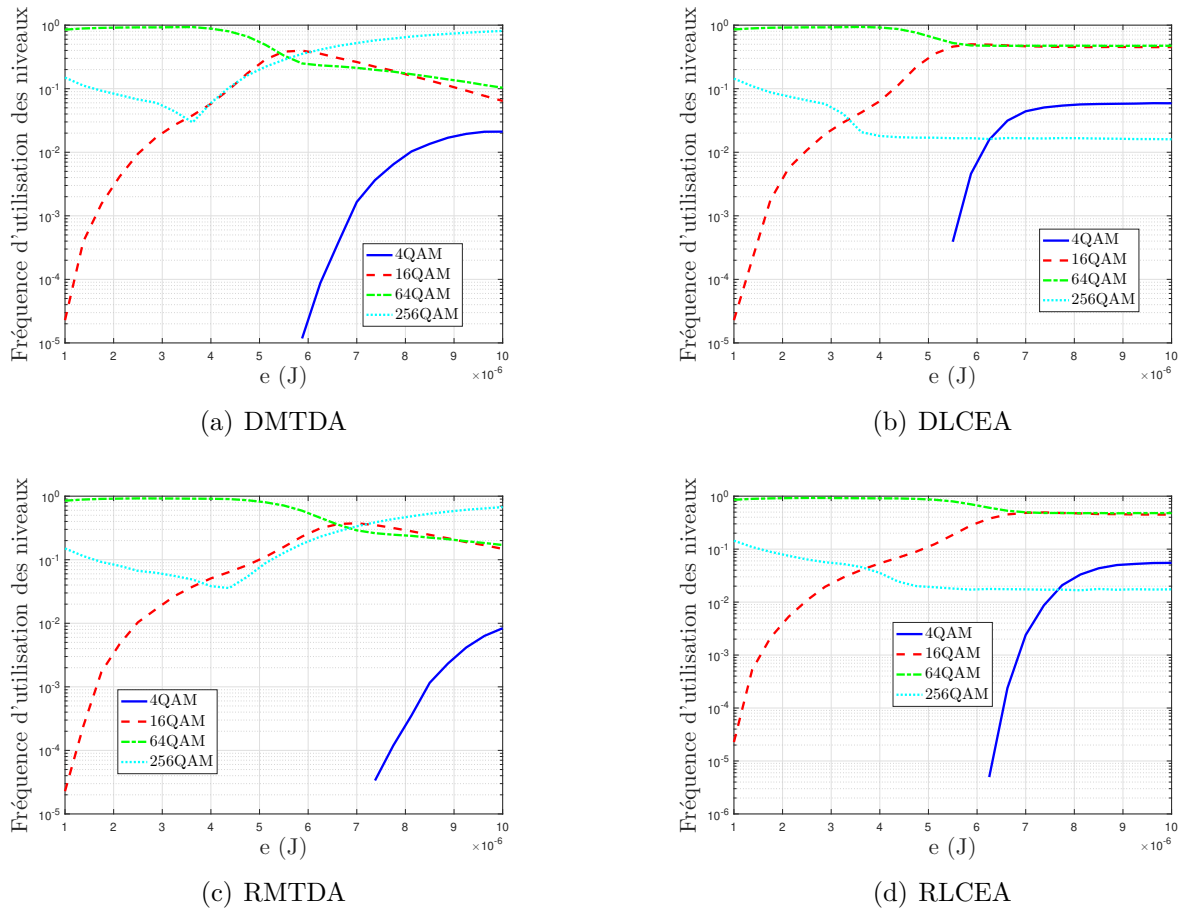


FIGURE 3.10 La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation ( $d=175m$ )

- On constate 2 causes de surconsommation inefficace d'énergie :
  - La fréquence des transmissions est supérieure à la valeur exigée. Par conséquent l'énergie résiduelle diminue ce qui peut affecter les transmissions futures.
  - La puissance de transmission est très élevée sans améliorer la qualité du signal reçu à cause d'un évanouissement profond.

Le premier problème est résolu via la fonction  $u(j)$ . Cependant, cette dernière ne résout pas le deuxième. D'où l'introduction de la fonction  $Pr_t$ .

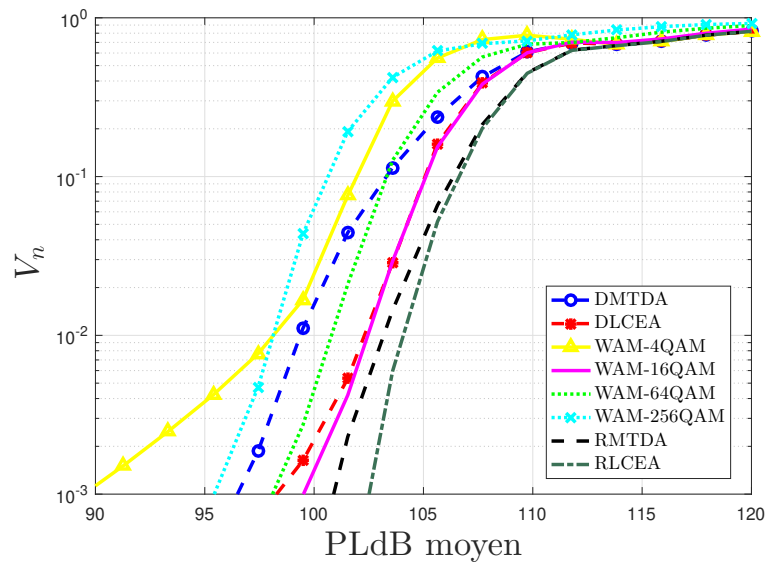


FIGURE 3.11 Le nombre de violation en fonction du  $PLdB$  moyen

## CHAPITRE 4 SYSTÈME MULTIPOINT À POINT

### 4.1 Modèle du système

Dans ce chapitre, on considère tel qu'illustré à la figure 4.1 un RCSF composé de  $N$  capteurs sans fil avec récolte d'énergie qui communiquent avec un collecteur de données non-récolteur d'énergie. Les noeuds capteurs sont disséminés dans l'environnement à étudier afin d'acquérir des données concernant un paramètre donné et de les transmettre au collecteur de données. Ce dernier, en se basant sur les données reçues, met à jour l'information concernant l'état de l'environnement étudié. Les processus d'arrivée d'énergie des noeuds capteurs sont indépendants. La distance qui sépare le capteur  $k$  du collecteur de données est dénotée  $d_k$ . On considère que le canal entre le noeud  $k$  et le collecteur de données est un canal Rayleigh, et on note  $PL_k$  l'atténuation du canal. Les canaux entre les noeuds capteurs et le collecteur de données sont indépendants. L'approche d'ordonnancement utilisée est l'approche centralisée. Lorsqu'un noeud est sélectionné, il génère un nouveau paquet et il le transmet immédiatement au collecteur de données. Les autres hypothèses concernant le fonctionnement de chaque noeud capteur sont similaires au cas point à point.

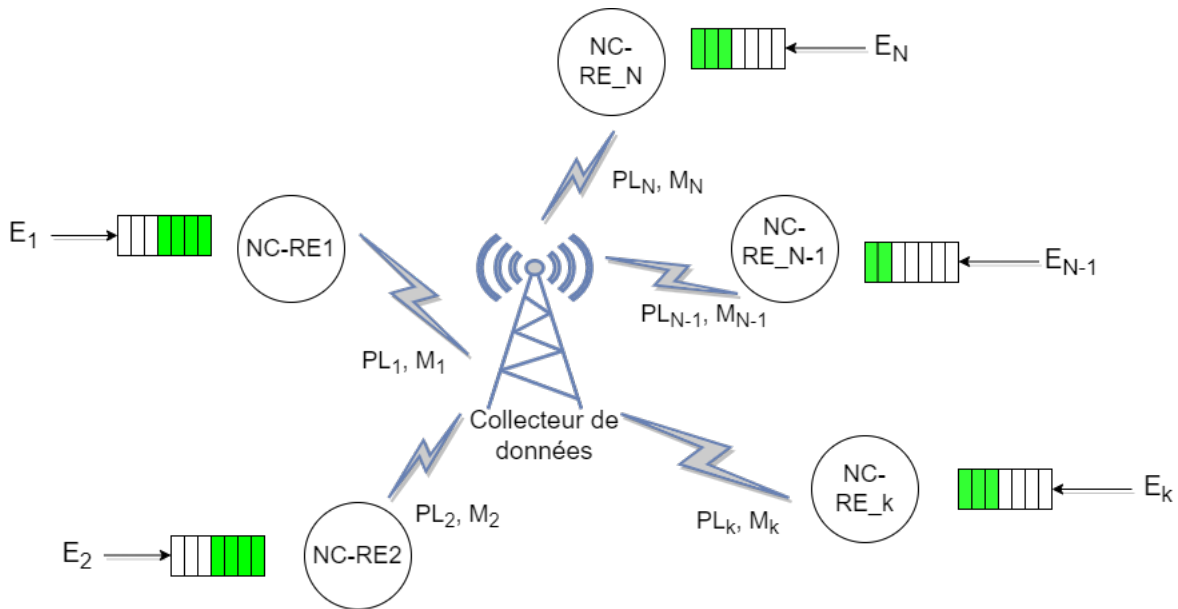


FIGURE 4.1 RCSF-RE (système multi-point à point)

## 4.2 Algorithmes proposés

Dans cette section on propose une extension des algorithmes déterministes proposés dans le chapitre précédent. En effet, dans ce cas, l'extension des algorithmes randomisés n'apporte aucune amélioration puisque le canal sera occupé même dans le cas d'un évanouissement profond, quand  $N$  est assez important. En plus, dans ce chapitre le problème principal est la saturation due aux grands nombres de noeuds. L'extension de l'algorithme DMTDA est noté M-DMTDA (multi-node DMTDA). Son pseudo-code est donné dans l'algorithme 6. La première étape de M-DMTDA consiste à déterminer le noeud qui va transmettre. En effet, le critère du choix du noeud est  $u(j)$ , comme dans le cas point à point. Le noeud avec la plus grande valeur de  $u(j)$  est prioritaire. Cependant, un noeud n'est ordonnancé que s'il est capable de transmettre au moins avec un seul niveau de modulation (le niveau qui consomme le moins d'énergie). L'extension des algorithmes WAM (M-WAM) et de DLCEA (M-DLCEA) se base sur le même principe. En plus, le critère du choix du niveau de modulation dans M-DLCEA est similaire au cas point à point.

## 4.3 Résultats de simulations

### 4.3.1 Paramètres et méthodologie

On considère le cas où  $d_k = d, \forall k \in 1, 2 \dots N$ , et on note  $PL_{dB}^m$  l'atténuation moyenne (qui a la même valeur, dans ce cas, pour tous les noeuds). La durée d'un intervalle de temps est  $\delta t = 10^{-3}s$ . Le temps d'inter-livraison maximal est fixé à  $U_{max} = 600$  IT. Les résultats sont obtenus en utilisant une seule simulation sur un horizon temporel  $T = \min(N \times 100000, 1000000)$  IT. La mesure de performance utilisée est la moyenne du vecteur de nombre de violations normalisé des  $N$  noeuds sur l'horizon  $T$ , notée  $V_n$ . Les algorithmes proposés sont comparés aux algorithmes de référence, dans les cas suivants :

- En variant le nombre de noeuds  $N$ , avec  $e$  et  $PL_{dB}^m$  sont fixes.
- En variant le taux de récolte d'énergie  $e/IT$ , avec  $N$  et  $PL_{dB}^m$  sont fixes.
- En variant l'atténuation moyenne  $PL_{dB}^m$  (qui est dans ce cas la même pour tous les noeuds capteurs), avec  $e$  et  $N$  sont fixes.

---

**Algorithme 6** : Le pseudo-code de M-DMTDA à l'IT  $j$ .
 

---

**Entrées** :  $k^*$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $t_{on}^{M^*}$ ,  $B_k(j-1)$ ,  $E_k(j-1)$ ,  $PL_k(j)$ ,  $u_k(j)$ ,  $I_k$  pour chaque noeud  $k$

- 1  $C \leftarrow \{1, \dots, N\}$
- 2 **pour**  $k \leftarrow 1$  **to**  $N$  **faire**
- 3    $B_k(j) \leftarrow B_k(j-1) + E_k(j-1)$
- 4    $x_k(j) \leftarrow 0$
- 5 **si**  $I_{k^*} = 0$  **alors**
- 6    $B_{k^*}(j) \leftarrow B_{k^*}(j) - (C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t$
- 7    $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 8 **tant que**  $(C \neq \emptyset)$  &  $(\min_k(I_k) = 1)$  **faire**
- 9    $k^* \leftarrow \arg \max_C(u_k)$
- 10    $Liste \leftarrow M, \forall M \in \{1, 4, 16, 64, 256\}$  avec  $E_c(M, PL_{k^*}) \leq B_{k^*}$
- 11   **si**  $Liste \neq \{1\}$  **alors**
- 12      $M^* \leftarrow \arg \min_M(t_{on}(M))$
- 13      $x_{k^*} \leftarrow 1$
- 14     Calculer  $P_t^{M^*}$
- 15     Calculer  $t_{on}^{M^*}$
- 16      $B_{k^*}(j) \leftarrow B_{k^*}(j) - x_{k^*}(j) \cdot ((C_1 + (1 + \alpha) P_t^{M^*}) \cdot \delta t + C_2)$
- 17      $t_{on}^{M^*} \leftarrow t_{on}^{M^*} - 1$
- 18      $I_{k^*} \leftarrow 0$
- 19   **sinon**
- 20      $C \leftarrow C \setminus \{k^*\}$
- 21  $u_{k^*}(j+1) \leftarrow u_{k^*}(j) + 1$

**Sorties** :  $k^*$ ,  $P_t^{M^*}$ ,  $t_{on}^{M^*}$ ,  $B_k(j)$ ,  $u_k(j+1)$ ,  $I_k$  pour chaque noeud  $k$

---

### Saturation

On note  $N_{sat}$  le nombre de noeuds à partir duquel le système est saturé. Il dépend du temps de transmission (donc du niveau de modulation  $M$ ) et de  $U_{max}$  :

$$N_{sat} = \left\lfloor \frac{U_{max}}{t_{on}^M} \right\rfloor + 1 \quad (4.1)$$

En effet, à  $N = \left\lfloor \frac{U_{max}}{t_{on}^M} \right\rfloor$  le canal devient complètement occupé, et on note  $N_{max} = \left\lfloor \frac{U_{max}}{t_{on}^M} \right\rfloor$  le nombre maximal des noeuds qui peuvent transmettre durant une période  $U_{max}$ .

Le tableau suivant donne les valeurs de  $N_{sat}$  pour chaque niveau de modulation utilisé :

TABLEAU 4.1  $N_{sat}$ 

$M$	$t_{on}^M$ (en IT)	$N_{sat}$
4QAM	50	13
16QAM	25	25
64QAM	17	36
256QAM	13	47

### 4.3.2 Comparaison en fonction du nombre de noeuds $N$

#### Choix des paramètres

Dans cette partie on évalue la performance des algorithmes en fonction de  $N$ , pour les valeurs de l'atténuation suivantes :

- $PL_{dB}^m = 100.78$  ( $d = 175\text{m}$ ) et  $PL_{dB}^m = 102.35$  ( $d = 200\text{m}$ ) : pour ces deux valeurs de l'atténuation, 64QAM consomme le moins d'énergie suivi du 16QAM. Alors que, 4QAM est le niveau qui consomme plus d'énergie.
- $PL_{dB}^m = 104.96$  ( $d = 250\text{m}$ ) : pour cette valeur de l'atténuation, 16QAM consomme le moins d'énergie suivi du 64QAM. Alors que, 256QAM est le niveau qui consomme plus d'énergie.
- $PL_{dB}^m = 116,38$  ( $n = 3.5$  et  $d = 150\text{m}$ ) et  $PL_{dB}^m = 120,756$  ( $n = 3.5$  et  $d = 200\text{m}$ ) : pour ces deux valeurs de l'atténuation, le niveau de modulation le plus élevé consomme plus d'énergie.

On calcule pour chaque niveau de modulation l'énergie consommée moyenne  $E_c^m$  (qui correspond à l'atténuation moyenne), et on calcule, par la suite le temps de recharge moyen  $C_m$  (en IT) nécessaire pour récolter cette quantité d'énergie :  $C_m = \left\lfloor \frac{E_c^m}{e} \right\rfloor + 1$

Les résultats sont résumés dans les tableaux 4.2-4.6, la valeur du paramètre  $e$  est choisie de telle façon à avoir un temps de recharge raisonnable.

TABLEAU 4.2 Temps de recharge moyen ( $d = 175\text{m}$ )

Niveau	$E_c^m$	Temps de recharge moyen $C_m$		
		$e = 6 \cdot 10^{-6}$	$e = 7 \cdot 10^{-6}$	$e = 8 \cdot 10^{-6}$
4QAM	0.0052	867	743	650
16QAM	0.003	500	429	375
64QAM	0.0028	467	400	350
256QAM	0.0036	600	515	450



TABLEAU 4.3 Temps de recharge moyen ( $d = 200\text{m}$ )

Niveau	$E_c^m$	Temps de recharge moyen $C_m$		
		$e = 6 \cdot 10^{-6}$	$e = 7 \cdot 10^{-6}$	$e = 8 \cdot 10^{-6}$
4QAM	0.0054	900	772	675
16QAM	0.0033	550	472	413
64QAM	0.0032	534	458	400
256QAM	0.0046	767	658	575

TABLEAU 4.4 Temps de recharge moyen ( $d = 250\text{m}$ )

Niveau	$E_c^m$	Temps de recharge moyen $C_m$		
		$e = 7 \cdot 10^{-6}$	$e = 8 \cdot 10^{-6}$	$e = 9 \cdot 10^{-6}$
4QAM	0.0058	829	725	645
16QAM	0.004	572	500	445
64QAM	0.0045	643	563	500
256QAM	0.0074	1058	925	823

TABLEAU 4.5 Temps de recharge moyen ( $n = 3.5$  et  $d = 150\text{m}$ )

Niveau	$E_c^m$	Temps de recharge moyen $C_m$		
		$e = 3 \cdot 10^{-5}$	$e = 6 \cdot 10^{-5}$	$e = 9 \cdot 10^{-5}$
4QAM	0.0172	574	287	192
16QAM	0.0232	774	387	258
64QAM	0.0415	1384	692	462
256QAM	0.0855	2850	1425	950

TABLEAU 4.6 Temps de recharge moyen ( $n = 3.5$  et  $d = 200\text{m}$ )

Niveau	$E_c^m$	Temps de recharge moyen $C_m$		
		$e = 7 \cdot 10^{-5}$	$e = 9 \cdot 10^{-5}$	$e = 2 \cdot 10^{-4}$
4QAM	0,0387	553	430	194
16QAM	0,0593	848	659	297
64QAM	0,1107	1582	1230	554
256QAM	0,2318	3312	2576	1159

### Atténuation modérée

La figure 4.2 montre la performance pour une atténuation moyenne  $PL_{dB}^m = 100.78$ . Cette valeur est la même pour tous les noeuds, contrairement à la valeur de l'atténuation qui varie d'un noeud à l'autre puisque les canaux entre les noeuds capteurs et le collecteur de données sont indépendants. Pour les faibles valeurs de  $N$ , M-DMTDA a un comportement similaire à celui de M-DLCEA. En effet, quand  $N$  est petit les transmissions deviennent plus fréquentes. Par conséquent, le niveau de modulation sélectionné par M-DMTDA est le niveau qui consomme le moins d'énergie. Quand  $N$  augmente chaque noeud attendra plus de temps avant de pouvoir accéder au canal, et donc il aura plus de temps pour recharger sa batterie et il sera capable de choisir un niveau supérieur. Par conséquent, on constate que quand  $N$  augmente la fréquence d'utilisation de 256QAM augmente et celle de 64QAM diminue (figure 4.3). D'autre part, on constate que la performance de M-DMTDA est proche de celle de M-WAM<sub>64QAM</sub>, alors que la performance de M-DLCEA est proche de celle de M-WAM<sub>16QAM</sub>. En plus, on constate que M-WAM<sub>64QAM</sub> surpasse les autres algorithmes M-WAM. En effet, avec M-WAM<sub>16QAM</sub> le système se sature avant (à  $N=25$ ). D'autre part, 4QAM et 256QAM consomme plus d'énergie vu la valeur de l'atténuation.

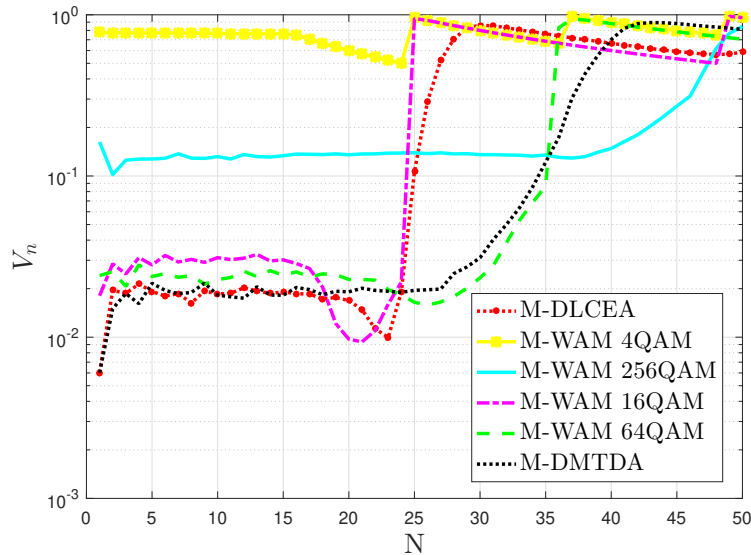
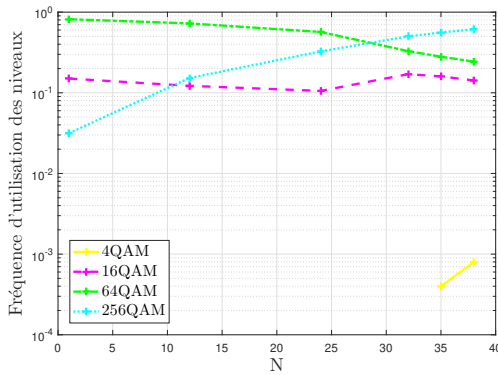
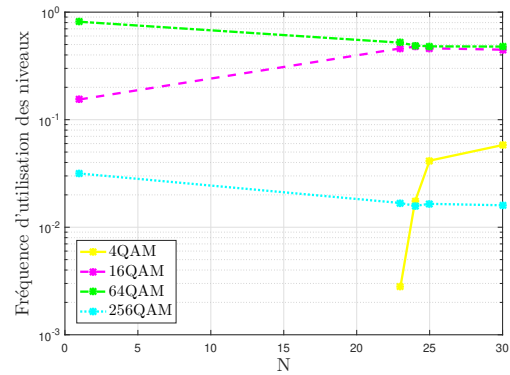


FIGURE 4.2  $V_n$  en fonction de  $N$ ,  $d = 175\text{m}$  et  $e = 7 \cdot 10^{-6}$



(a) M-DMTDA



(b) M-DLCEA

FIGURE 4.3 La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation

### Atténuation forte

Dans ce cas, on constate une diminution de la performance quand la valeur de l'atténuation moyenne augmente. Cependant, le comportement des différents algorithmes reste le même, et on a les mêmes remarques que pour le cas précédent (avec atténuation moyenne).

### Atténuation très forte

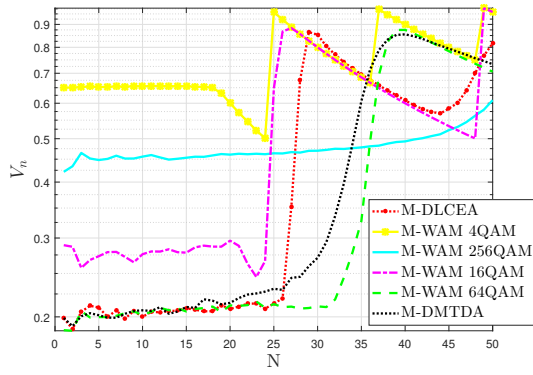
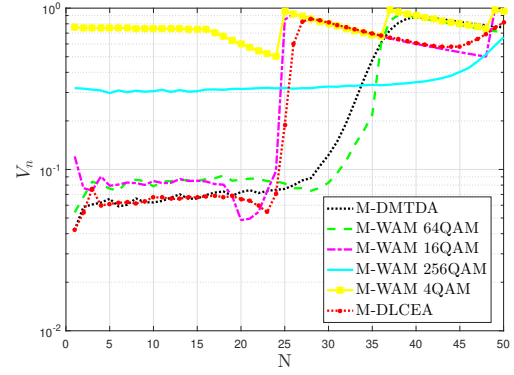
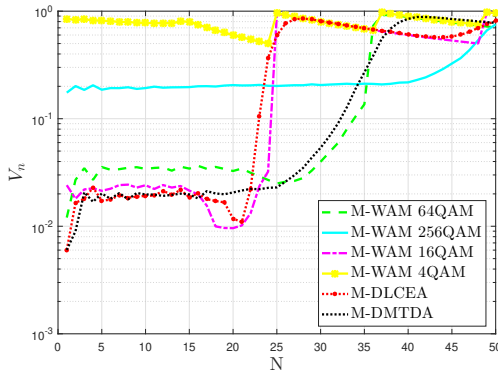
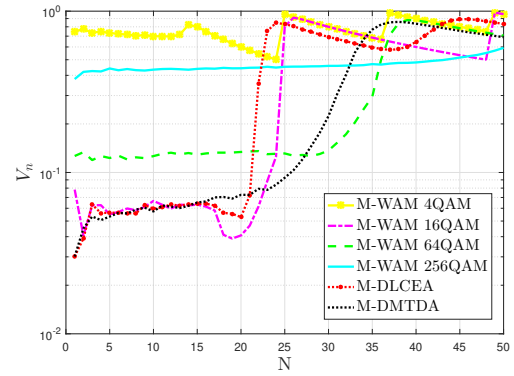
Dans ce cas, on n'augmente pas seulement  $d$  mais  $n$  aussi. Pour les valeurs choisies dans la figure 4.5, 4QAM est le niveau qui consomme le moins d'énergie. Par conséquent,  $M\text{-WAM}_{4QAM}$ , surpasse les autres algorithmes M-WAM avant sa saturation (à  $N=13$ ). En plus, on constate que la courbe de M-DLCEA est presque identique à celle de  $M\text{-WAM}_{4QAM}$ . Contrairement à M-DMTDA qui a un comportement différent que celui observé dans les deux cas précédents. En effet, dans ce cas les fréquences d'utilisation des niveaux de modulation varient considérablement et deviennent plus proches quand la valeur de  $N$  augmente (figure 4.6).

### 4.3.3 Comparaison en fonction du taux de récolte d'énergie

#### N=12

À  $N = 12$  aucun niveau de modulation n'est saturé. On compare la performance des algorithmes pour deux valeurs différentes de  $d$  :

- Quand  $d = 100\text{m}$  (figure 4.7(a)), la performance de M-DMTDA et M-DLCEA est proche de celle de  $M\text{-WAM}_{64QAM}$  et  $M\text{-WAM}_{256QAM}$ . En plus, ces deux derniers sur-

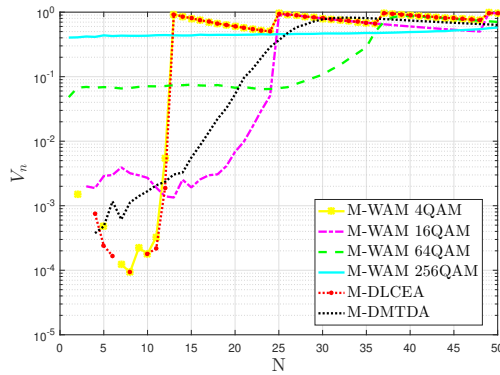
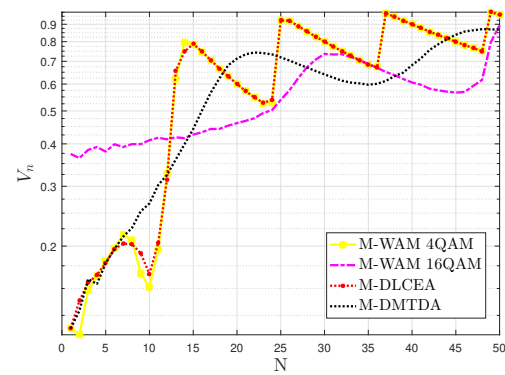
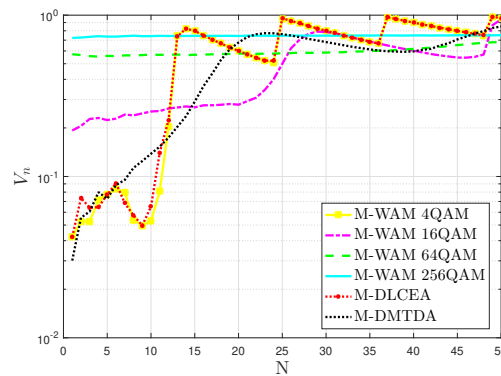
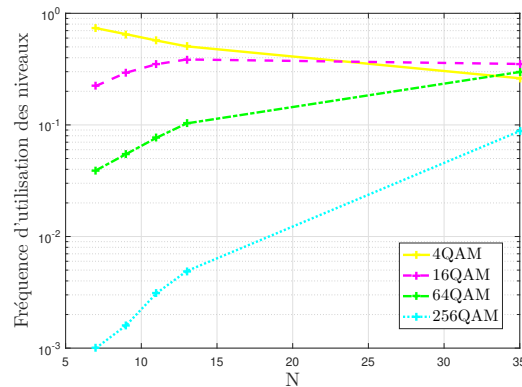
(a)  $d = 200\text{m}$  et  $e = 6 \cdot 10^{-6}$ (b)  $d = 200\text{m}$  et  $e = 7 \cdot 10^{-6}$ (c)  $d = 200\text{m}$  et  $e = 8 \cdot 10^{-6}$ (d)  $d = 250\text{m}$  et  $e = 9 \cdot 10^{-6}$ FIGURE 4.4  $V_n$  en fonction de  $N$  (atténuation forte)

passent les autres algorithmes M-WAM.

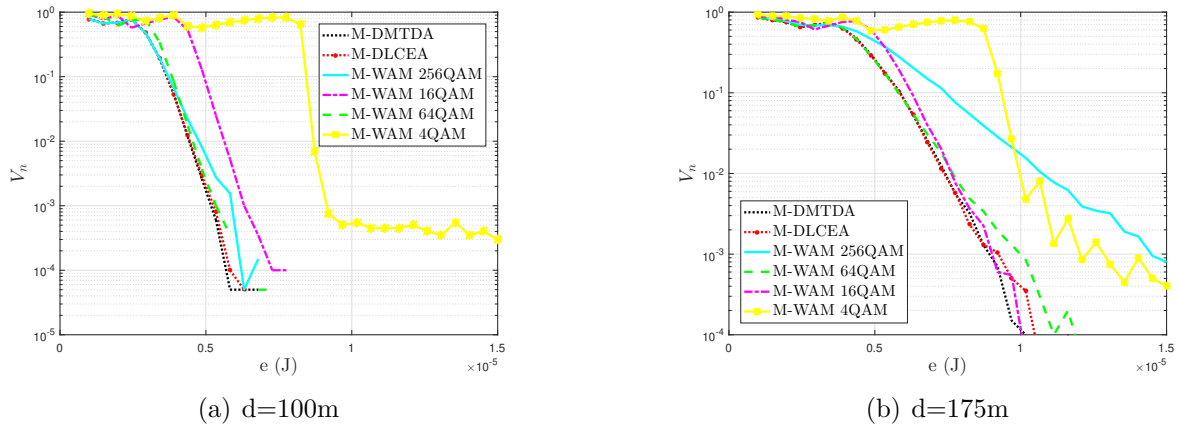
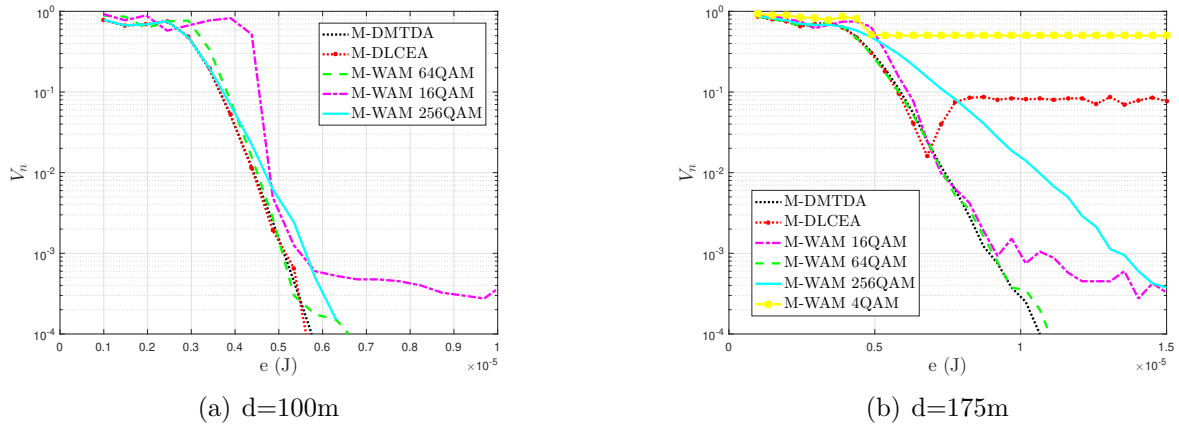
- Quand  $d = 175\text{m}$  (figure 4.7(b)),  $M\text{-WAM}_{16QAM}$  et  $M\text{-WAM}_{64QAM}$  ont la meilleure performance entre les algorithmes M-WAM. Leur performance est proche de celle de M-DMTDA et M-DLCEA.

## N=24

À  $N = 24$  un seul niveau est saturé, à savoir 4QAM (figure 4.8(b)). Dans ce cas on a les mêmes remarques que le cas précédent ( $N = 12$ ) sauf que pour  $d = 175\text{m}$ , la courbe de M-DLCEA ne tend pas vers 0 quand la valeur de  $e$  augmente (figure 4.8). En effet, ceci est dû à l'utilisation du niveau saturé (4QAM) quand la valeur de l'atténuation est très élevée.

(a)  $n = 3.5$ ,  $d = 150\text{m}$  et  $e = 9 \cdot 10^{-5}$ (b)  $n = 3.5$ ,  $d = 200\text{m}$  et  $e = 7 \cdot 10^{-5}$ (c)  $n = 3.5$ ,  $d = 200\text{m}$  et  $e = 9 \cdot 10^{-5}$ FIGURE 4.5  $V_n$  en fonction de  $N$  (atténuation très forte)FIGURE 4.6 La fréquence d'utilisation des niveaux de modulation en utilisant M-DMTDA ( $n = 3.5$ ,  $d = 200\text{m}$  et  $e = 9 \cdot 10^{-5}$ )**N=25**

À partir de cette valeur de  $N$  4QAM et 16QAM sont saturés. On compare la performance pour  $d = 175\text{m}$ . En effet, la comparaison avec  $d = 100\text{m}$  devient moins pertinente car les

FIGURE 4.7  $V_n$  en fonction de  $e$  pour  $N = 12$ FIGURE 4.8  $V_n$  en fonction de  $e$  pour  $N = 24$ 

niveaux supérieurs seront dominants. Comme le montre la figure 4.9, la courbe de M-DMTDA est presque identique à celle de M-WAM<sub>64QAM</sub>. En plus, la courbe de M-DLCEA ne tend pas vers 0 comme dans le cas précédent, sauf que cette fois-ci la courbe tend vers une valeur plus élevée, vu que la fréquence d'utilisation des niveaux de modulation saturés a augmenté.

### N=35

Dans ce cas il s'agit du nombre maximal de noeud avant la saturation de 64QAM. D'après la figure 4.10, on constate que M-WAM<sub>64QAM</sub> surpasse les autres algorithmes. Toutefois, sa performance est proche de celle de M-WAM<sub>256QAM</sub> et M-DMTDA. En plus, on remarque que M-DLCEA est déjà saturé.

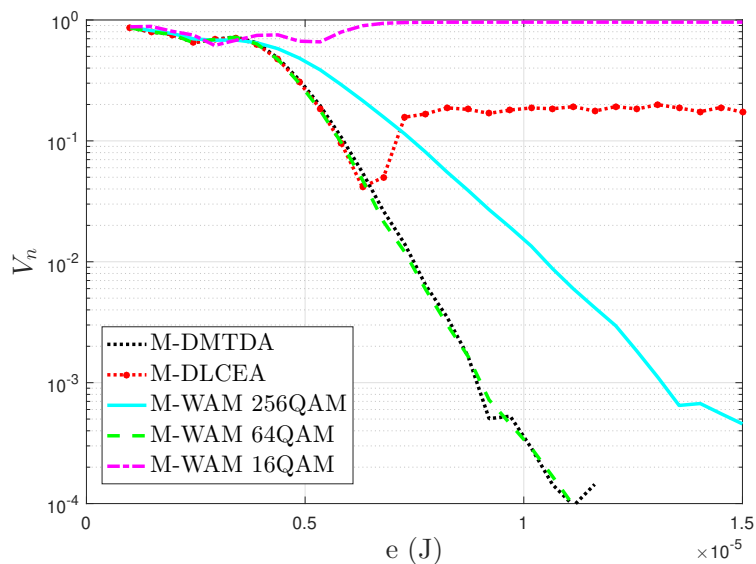


FIGURE 4.9  $V_n$  en fonction de  $e$  pour  $N = 25$  et  $d = 175\text{m}$

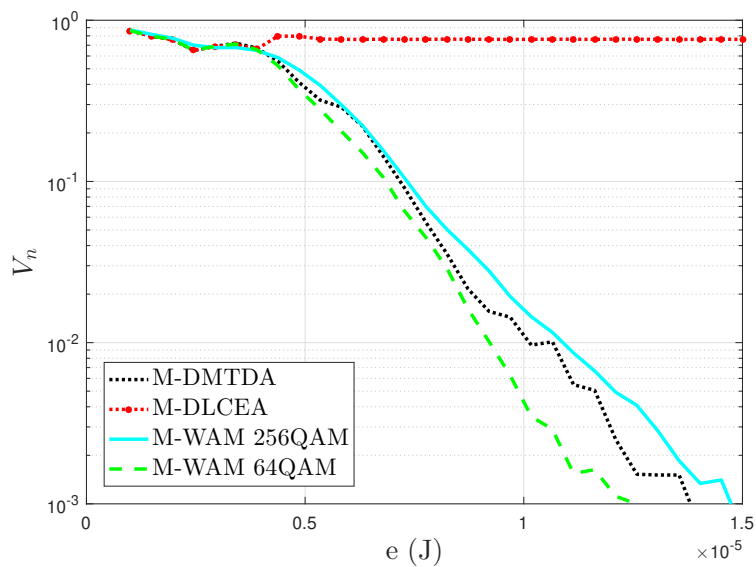


FIGURE 4.10  $V_n$  en fonction de  $e$  pour  $N = 35$  et  $d = 175\text{m}$

### N=36

Dans ce cas, M-DMTDA et M-WAM<sub>256QAM</sub> surpassent les autres algorithmes et M-WAM<sub>64QAM</sub> devient saturé. En plus, si on compare la figure 4.11 à la figure 4.10 on constate que la performance des algorithmes M-WAM se dégrade de façon brusque à la saturation.

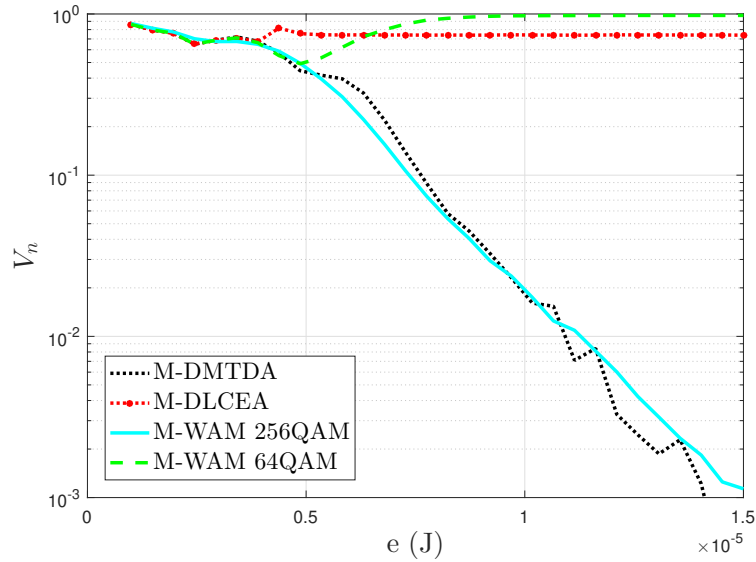


FIGURE 4.11  $V_n$  en fonction de  $e$  pour  $N = 36$  et  $d = 175\text{m}$

#### 4.3.4 Comparaison en fonction de l'atténuation moyenne

On prend  $N = 12$ , et on compare la performance des algorithmes pour 3 différentes valeurs de  $e$ . On constate, d'après les figures 4.12, 4.13 et 4.14 que M-DLCEA et M-DMTDA ont la meilleure performance dans les trois scénarios. En plus, la performance de M-WAM<sub>16QAM</sub> reste proche de leur performance dans les trois cas. En effet, la performance des algorithmes M-WAM est affectée par la valeur de l'atténuation et de la fréquence des transmissions. En d'autres termes quand  $e$  augmente la fréquence des transmissions augmente.

D'autre part, on remarque que pour  $e = 7 \cdot 10^{-6}\text{J}$  (figure 4.12), la courbe de M-WAM<sub>4QAM</sub> tend vers 1, même pour les faibles valeurs de l'atténuation. Ceci est dû au fait que le temps de recharge correspondant à cette valeur de  $e$  est supérieur au temps d'inter-livraison maximal.

Ensuite, on prend  $N = 24$ , si on compare les résultats de la figure 4.15 à ceux de la figure 4.13, on remarque que la courbe de M-WAM<sub>4QAM</sub> tend vers 1, cette fois-ci, à cause de la saturation. En plus, la performance de M-DLCEA diminue significativement, à cause de l'utilisation du 4QAM (figure 4.16(a)), contrairement à M-DMTDA et aux autres algorithmes M-WAM qui ont une performance très proche de celle du cas avec  $N = 12$  (figure 4.16). En effet, puisque le taux d'arrivée d'énergie est le même dans ces deux cas, le nombre de transmissions sur l'horizon de temps  $T$  est le même. En d'autres termes, chaque noeud transmet deux fois plus dans le cas où  $N = 12$  que dans le cas  $N = 24$ . Cependant, ces transmissions ne sont pas nécessaires pour garantir que le temps d'inter-livraison ne dépasse pas  $U_{max}$ . D'autre part,



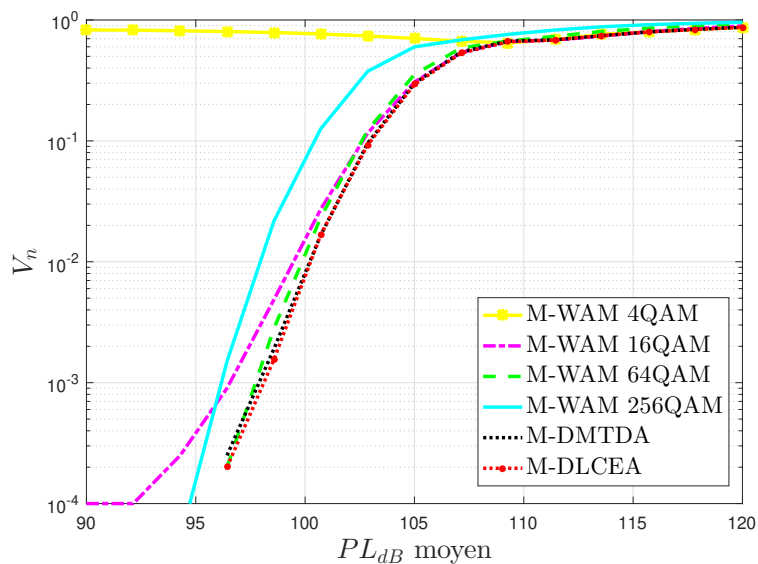


FIGURE 4.12  $V_n$  en fonction de  $PL_{dB}$  pour  $N = 12$  et  $e = 7 \cdot 10^{-6} J$

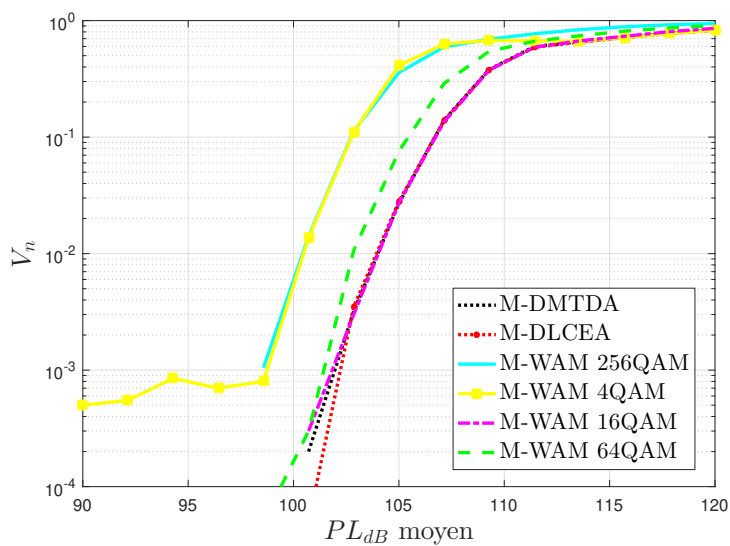


FIGURE 4.13  $V_n$  en fonction de  $PL_{dB}$  pour  $N = 12$  et  $e = 1 \cdot 10^{-5} J$

quand l'atténuation moyenne devient très forte  $V_n$  tend vers 1 car la puissance de transmission devient très grande. Par conséquent, le temps de recharge devient plus grand que  $U_{max}$ .

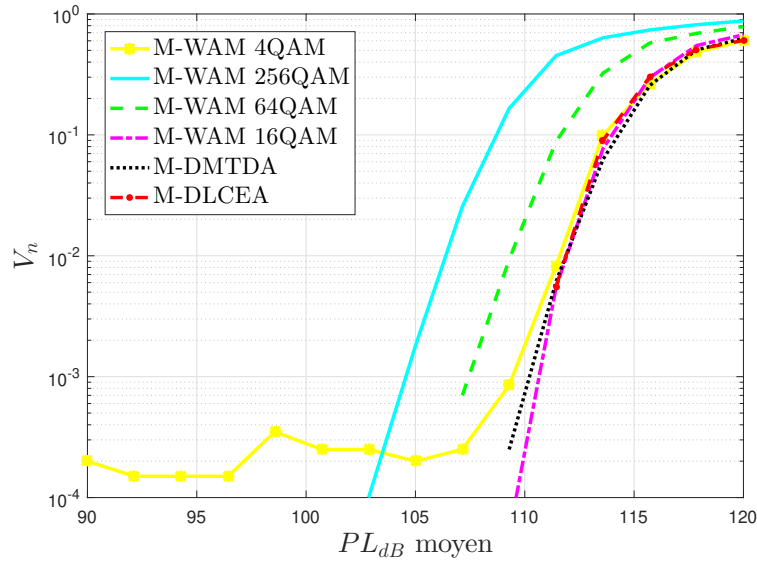


FIGURE 4.14  $V_n$  en fonction de  $PL_{dB}$  pour  $N = 12$  et  $e = 3 \cdot 10^{-5}J$

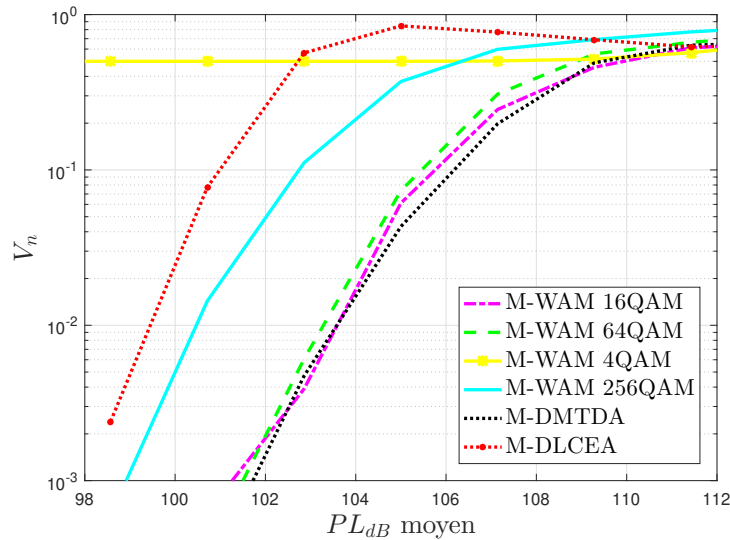


FIGURE 4.15  $V_n$  en fonction de  $PL_{dB}$  pour  $N = 24$  et  $e = 1 \cdot 10^{-5}J$

### 4.3.5 Conclusion et discussion

D'après les résultats présentés précédemment, on conclut que l'algorithme M-DMTDA maintient une bonne performance dans l'ensemble des scénarios traités, contrairement aux autres algorithmes. En effet, les algorithmes avec modulation fixe peuvent avoir une bonne performance dans certaines conditions spécifiques, à savoir :

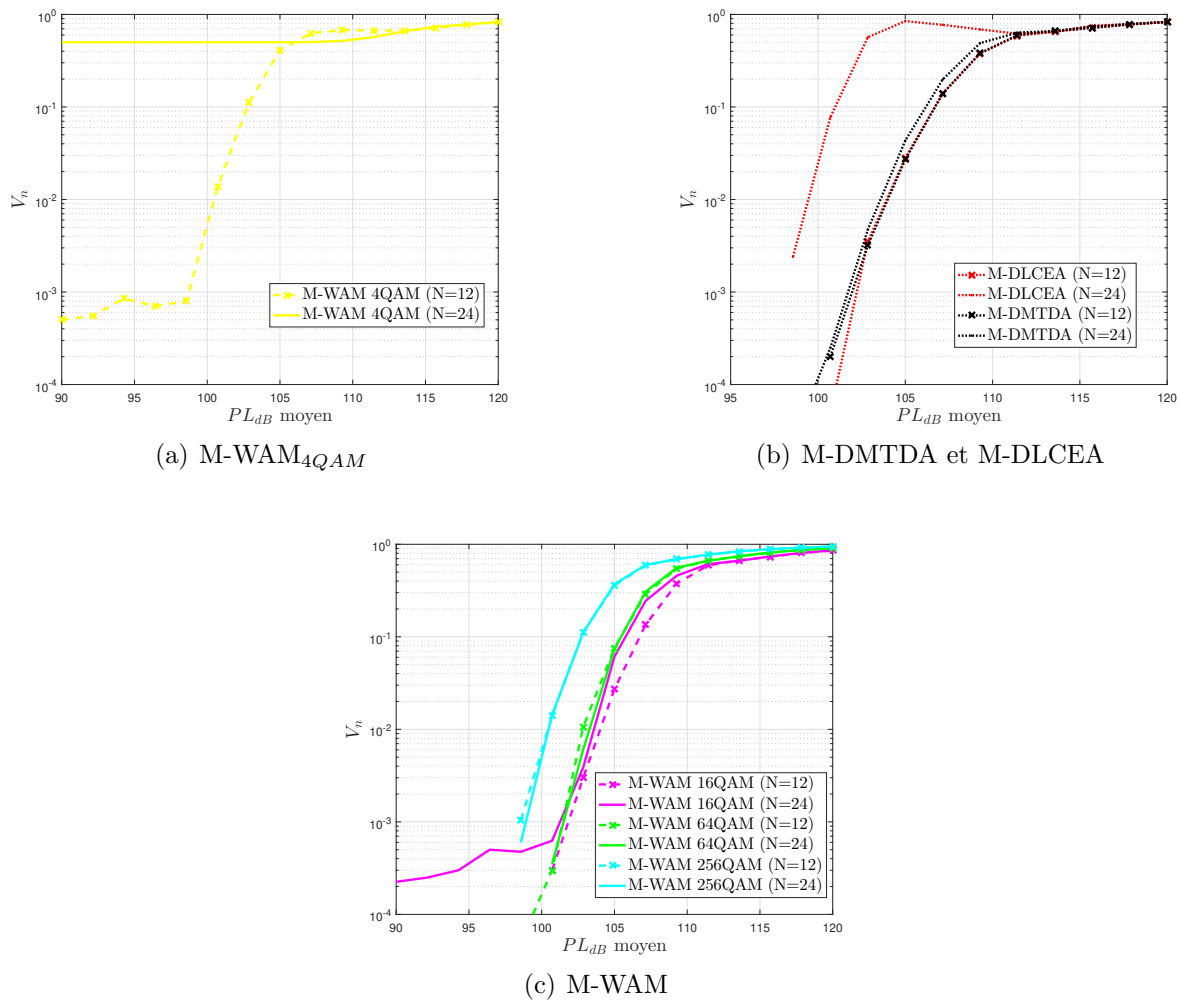


FIGURE 4.16  $V_n$  en fonction de  $PL_{dB}$  pour  $e = 1 \cdot 10^{-5}J$

- une valeur d'atténuation qui garantit une énergie consommée acceptable.
- un taux d'arrivée d'énergie qui garantit que le temps de recharge soit inférieur au temps d'inter-livraison maximal.
- un nombre de noeud  $N < N_{sat}$  pour que le système ne soit pas saturé.

Ceci est dû à :

- 1) Les variations du canal ne sont pas assez importantes pour avoir des valeurs d'atténuations qui favorisent plus de deux niveaux de modulation au maximum.
- 2) La différence entre les temps de recharge des niveaux de modulation, pour un taux d'arrivée d'énergie et une valeur d'atténuation donnés, est importante. Par conséquent, le noeud favorise un ou deux niveaux principalement durant la transmission.

En effet, les algorithmes M-WAM ont la meilleure performance quand  $N = N_{max} = N_{sat} - 1$ . Quand  $N < N_{max}$ , les transmissions, d'un noeud donné, sont plus fréquentes. Par conséquent,  $V_n$  ne varie pas considérablement avant  $N_{sat}$  où la valeur de  $V_n$  augmente brusquement.

D'autre part, pour les faibles valeurs de  $N$ , les performances de M-DLCEA et M-DMTDA sont très proches. En effet, dans ce cas, les transmissions sont très fréquentes, ce qui fait que M-DMTDA tend à utiliser le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie (puisqu'il demande un temps de recharge plus faible).

Cependant quand  $N$  augmente, le problème de saturation devient le problème majeur dans le cas multi-point. L'algorithme M-DLCEA ne permet pas de résoudre ce problème. En effet, même l'algorithme M-DMTDA ne propose pas une solution qui élimine complètement le problème de saturation. Toutefois, choisir un niveau de modulation supérieur permet d'augmenter  $N_{sat}$ . Par conséquent, si l'atténuation est forte, la performance de M-DLCEA se dégrade et le système se sature rapidement, puisque les niveaux de modulation qui consomment moins d'énergie sont les niveaux les moins élevés.

Un événement de violation se produit à cause de l'une des trois raisons suivantes :

- Le temps de recharge est plus grand que  $U_{max}$ , à cause d'une valeur élevée de la puissance de transmission ou d'un taux de récolte d'énergie faible.
- Les transmissions sont très fréquentes, ceci se produit pour les faibles valeurs de  $N$ .
- Le système est saturé, où le noeud ne peut pas transmettre car le canal est occupé, ceci se produit pour  $N \geq N_{sat}$ . On note  $V_k^{sat}(N)$  la composante de  $V_k$  due à la saturation, du noeud  $k$ , pour un système de  $N$  noeuds, où  $V_k^{sat}(N)$  dépend de  $N$  et de la fréquence d'utilisation des niveaux de modulation.

Dans le cas de M-WAM<sub>4QAM</sub> et de M-WAM<sub>16QAM</sub>, elle peut être exprimée sous la forme suivante :

$$V_k^{sat}(N) \approx \alpha_k X_M(N) \quad (4.2)$$

Où :  $\alpha_k = \sum_{j=1}^T x_k(j)$  : le nombre total des transmissions du noeud  $k$  et la fonction  $X_M(N)$  est donnée par :

$$X_M(N) = \left\lfloor \frac{N-1}{N_{max}} \right\rfloor \quad (4.3)$$

En effet, cette composante explique pourquoi la courbe de M-DLCEA ne tend pas vers 0, même quand la valeur de  $e$  devient assez grande (figure 4.8(b)).

## CHAPITRE 5 CONCLUSION

### 5.1 Synthèse des travaux

Dans ce mémoire, nous avons étudié un RCSF-RE, où les noeuds capteurs avec récolte d'énergie communiquent avec un collecteur de données non-récolteur d'énergie afin de transmettre des mises à jour régulières sur l'état de l'environnement étudié. D'abord, le mémoire présente une introduction générale sur les RCSFs. En effet, la contrainte énergétique est un problème majeur que rencontre les RCSFs, surtout avec la difficulté de changer ou recharger les batteries des noeuds. Par conséquent, la récolte d'énergie constitue une technologie prometteuse pour les RCSFs. Elle présente une solution qui permet de maximiser la durée de vie du réseau. En plus, elle peut contribuer à améliorer sa performance. Ensuite, une brève revue de littérature sur la récolte d'énergie, la modulation, l'ordonnancement à cyclage de service et le temps d'inter-livraison est présentée. En effet, le temps d'inter-livraison est une métrique de performance qui reflète la régularité des livraisons des données. L'objectif de ce travail est de minimiser le nombre d'événements de violations du temps d'inter-livraison maximal. À cette fin, on exploite la modulation adaptative, qui permet d'améliorer la flexibilité du système, surtout en présence des variations du canal et des quantités d'énergie récoltées en fonction du temps. En plus de l'ordonnancement avec cyclage de service qui permet, à son tour, d'économiser la consommation d'énergie en mettant les noeuds en mode arrêt s'ils ne sont pas en train de transmettre.

Premièrement, nous avons considéré un système point à point. La transmission se fait sur un canal Rayleigh. La puissance de transmission est ajustée selon la valeur de l'atténuation. Une fonction  $u(j)$  qui calcule le temps écoulé depuis la fin de la dernière transmission est utilisée, par les algorithmes déterministes, afin de sélectionner l'IT où commence la prochaine transmission. Alors que les algorithmes randomisés se basent sur une fonction qui dépend à la fois de  $u(j)$  et de la valeur de l'atténuation, pour calculer la probabilité de transmission à chaque IT (sous la condition de disponibilité d'énergie dans la batterie du noeud capteur). Le choix du niveau de modulation repose sur deux critères différents, le premier vise à minimiser l'énergie consommée (les algorithmes LCEAs), alors que le deuxième vise à minimiser le temps de transmission en prenant en considération l'énergie disponible dans la batterie (les algorithmes MTDAs).

Une étude du cas multi-point est présentée par la suite. Dans ce cas le réseau contient  $N$  noeuds capteurs qui rivalisent pour accéder au canal sans fil. L'algorithme d'ordonnancement sélectionne le noeud avec la valeur maximale de  $u(j)$ . Des extensions des différentes solutions proposées pour le cas point à point ont été présentés.

Les algorithmes proposés ont été comparés à des algorithmes avec modulation fixe. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme RLCEA surpasse les autres algorithmes, dans le cas point à point. En effet, cet algorithme permet d'économiser l'énergie pour l'usage futur, par quatre moyens différents : i) retourner au mode arrêt après chaque transmission ; ii) diminuer le nombre de transmission, en retardant la transmission le maximum possible, mais sans dépasser  $U_{max}$  ; iii) choisir le niveau de modulation qui consomme le moins d'énergie ; et iv) favoriser la transmission quand l'état du canal est bonne. Finalement, les résultats de simulations du cas multi-point ont montré que l'algorithme M-DMTDA présente une bonne adaptabilité dans les différents scénarios présentés. En plus, ce dernier surpasse l'algorithme M-DLCEA. Ceci est dû à la saturation qui constitue un problème majeur dans ce cas.

## 5.2 Limitations de la solution proposée

Dans le cas multi-point à point, la modulation adaptative est prouvée être plus performante sur l'ensemble des scénarios étudiés. Cependant, si on considère un seul scénario, on constate que dans chaque cas, il y a un niveau de modulation qui atteint une performance très proche de celle apportée par la modulation adaptative. Par conséquent, on peut conclure que l'utilisation de la modulation adaptative peut être plus utile dans le cas où le système étudié subit des variations plus importantes :

- Les noeuds sont mobiles : c'est-à-dire, l'atténuation moyenne change dans le temps.
- La topologie varie dans le temps et provoque une variation au niveau du nombre de noeuds.

D'autre part, dans ce mémoire, on a considéré le cas d'un système homogène. La performance des algorithmes proposée doit être évalué dans le cas d'un système hétérogène, i.e : si les noeuds ont des atténuation moyenne différentes ou/et si le taux d'arrivée de l'énergie est différent d'un noeud à l'autre. Par conséquent, dans ce cas, une étude d'équité est nécessaire. Une autre limitation de ce travail réside dans le fait de supposer que la capacité de stockage des batterie est infinie et que la connaissance du canal est parfaite.

### 5.3 Améliorations futures

Dans le futur on envisage d'abord améliorer la performance lors de la saturation du système. En effet, le problème de saturation constitue un problème majeur dans le cas multi-point à point. Afin d'améliorer cet aspect, on peut :

- Définir une nouvelle mesure qui combine la mesure définie dans ce mémoire  $u(j)$ , la valeur de l'atténuation et l'énergie disponible au noeud. En effet, dans ce mémoire l'algorithme d'ordonnancement, en se basant sur  $u(j)$ , peut accorder l'accès au canal à un noeud qui ne peut pas transmettre avec un niveau élevé (à cause d'un évanouissement profond ou de l'indisponibilité de l'énergie nécessaire). La nouvelle mesure peut améliorer cet aspect et par conséquent, elle peut retarder la saturation du système.

Cependant, cette amélioration de la performance en terme de  $V_n$  peut être au détriment de l'équité. Donc, la solution envisagée doit assurer un compromis entre la saturation et l'équité.

Ensuite, on envisage d'étudier le cas d'un système hétérogène, et on prévoit de développer des algorithmes distribués à contention. Finalement, la considération de la mobilité peut être envisagée afin d'évaluer l'amélioration apportée par la modulation adaptative dans ce cas.

## RÉFÉRENCES

- [1] C.-Y. Chong et S. P. Kumar, “Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, n°. 8, p. 1247–1256, 2003.
- [2] M. P. Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić et V. Milutinović, “A survey of military applications of wireless sensor networks,” dans *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*. IEEE, 2012, p. 196–199.
- [3] M. Winkler, K.-D. Tuchs, K. Hughes et G. Barclay, “Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks,” *Journal of Telecommunications and Information Technology*, p. 37–45, 2008.
- [4] P. Corke, T. Wark, R. Jurdak, W. Hu, P. Valencia et D. Moore, “Environmental wireless sensor networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, n°. 11, p. 1903–1917, 2010.
- [5] I. Diane, “Optimisation de la consommation d’énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs,” Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2014.
- [6] K. Bouabdellah, “Problématique de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” Thèse de doctorat, Université d’Oran, 13/07, 2010.
- [7] H. Alemdar et C. Ersoy, “Wireless sensor networks for healthcare : A survey,” *Computer networks*, vol. 54, n°. 15, p. 2688–2710, 2010.
- [8] H. Karl et A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] S. Raza, M. Faheem et M. Guenes, “Industrial wireless sensor and actuator networks in industry 4.0 : Exploring requirements, protocols, and challenges-A MAC survey,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, n°. 15, p. e4074, 2019.
- [10] I. Khemapech, I. Duncan et A. Miller, “A survey of wireless sensor networks technology,” dans *6th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*, vol. 13, 2005.
- [11] A. Elmrini et A. G. Amrani, “Wireless sensors network for traffic surveillance and management in smart cities,” dans *2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt)*. IEEE, 2018, p. 562–566.
- [12] S. J. Ramson et D. J. Moni, “Applications of wireless sensor networks—a survey,” dans *2017 international conference on innovations in electrical, electronics, instrumentation and media technology (ICEEIMT)*. IEEE, 2017, p. 325–329.



- [13] J. Zheng et A. Jamalipour, *Wireless sensor networks : a networking perspective*. John Wiley & Sons, 2009.
- [14] M. Healy, T. Newe et E. Lewis, “Wireless sensor node hardware : A review,” dans *SENSORS, 2008 IEEE*. IEEE, 2008, p. 621–624.
- [15] M. O. Farooq et T. Kunz, “Operating systems for wireless sensor networks : A survey,” *Sensors*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 6, p. 5900–5930, 2011.
- [16] Y. S. Razoki et M. Al-Asfoor, “Intelligent routing to enhance energy consumption in wireless sensor network : A survey,” *arXiv preprint arXiv :2101.10812*, 2021.
- [17] A. Bhuyan et B. Sharma, “A survey on energy-efficient approaches in wireless sensor networks,” dans *Ubiquitous Intelligent Systems*. Springer, 2022, p. 107–125.
- [18] A. Hassan, A. Anter et M. Kayed, “A survey on extending the lifetime for wireless sensor networks in real-time applications,” *International Journal of Wireless Information Networks*, p. 1–27, 2021.
- [19] S. Kosunalp, “Mac protocols for energy harvesting wireless sensor networks : Survey,” *ETRI journal*, vol. 37, n<sup>o</sup>. 4, p. 804–812, 2015.
- [20] S. Basagni, M. Y. Naderi, C. Petrioli et D. Spenza, “Wireless sensor networks with energy harvesting,” *Mobile ad hoc networking*, vol. 1, p. 701–736, 2013.
- [21] J. Singh, R. Kaur et D. Singh, “Energy harvesting in wireless sensor networks : A taxonomic survey,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, n<sup>o</sup>. 1, p. 118–140, 2021.
- [22] A. J. Williams, M. F. Torquato, I. M. Cameron, A. A. Fahmy et J. Sienz, “Survey of energy harvesting technologies for wireless sensor networks,” *IEEE Access*, 2021.
- [23] X. Guo, R. Singh, P. Kumar et Z. Niu, “A risk-sensitive approach for packet inter-delivery time optimization in networked cyber-physical systems,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, n<sup>o</sup>. 4, p. 1976–1989, 2018.
- [24] A. Hentati, W. Jaafar, J.-F. Frigon et W. Ajib, “Analysis of the interdelivery time in IoT energy harvesting wireless sensor networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, n<sup>o</sup>. 6, p. 4920–4930, 2020.
- [25] A. Hentati, “Réseaux de capteurs sans fil avec récolte d’énergie : techniques de transmission pour les applications sensibles au délai,” Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal, 2021.
- [26] M. Farsi, M. A. Elhosseini, M. Badawy, H. A. Ali et H. Z. Eldin, “Deployment techniques in wireless sensor networks, coverage and connectivity : A survey,” *IEEE Access*, vol. 7, p. 28 940–28 954, 2019.

- [27] A. Boonsongsrikul, S. Kocijancic et S. Suppharangsarn, “Effective energy consumption on wireless sensor networks : Survey and challenges,” dans *2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE, 2013, p. 469–473.
- [28] L. Lei, Y. Kuang, X. S. Shen, K. Yang, J. Qiao et Z. Zhong, “Optimal reliability in energy harvesting industrial wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 8, p. 5399–5413, 2016.
- [29] B. T. Bacinoglu et E. Uysal-Biyikoglu, “Finite horizon online lazy scheduling with energy harvesting transmitters over fading channels,” dans *2014 IEEE International Symposium on Information Theory*. IEEE, 2014, p. 1176–1180.
- [30] I. Fawaz, M. Sarkiss et P. Ciblat, “Optimal resource scheduling for energy harvesting communications under strict delay constraint,” dans *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2018, p. 1–6.
- [31] Q. Yao, A. Huang, H. Shan, T. Q. Quek et W. Wang, “Delay-aware wireless powered communication networks—energy balancing and optimization,” *IEEE transactions on Wireless Communications*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 8, p. 5272–5286, 2016.
- [32] Y.-J. Yoon, W.-T. Park, K. H. H. Li, Y. Q. Ng et Y. Song, “A study of piezoelectric harvesters for low-level vibrations in wireless sensor networks,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, n<sup>o</sup>. 7, p. 1257–1262, 2013.
- [33] R. A. Kishore et S. Priya, “A review on low-grade thermal energy harvesting : Materials, methods and devices,” *Materials*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 8, p. 1433, 2018.
- [34] M. Prauzek, J. Konecny, M. Borova, K. Janosova, J. Hlavica et P. Musilek, “Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks : A review,” *Sensors*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 8, p. 2446, 2018.
- [35] K. Williams et A. Qouneh, “Internet of things : Solar array tracker,” dans *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2017, p. 1057–1060.
- [36] K. Z. Panatik, K. Kamardin, S. A. Shariff, S. S. Yuhaniz, N. A. Ahmad, O. M. Yusop et S. Ismail, “Energy harvesting in wireless sensor networks : A survey,” dans *2016 IEEE 3rd international symposium on Telecommunication Technologies (ISTT)*. IEEE, 2016, p. 53–58.
- [37] M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Lee, J. Chun, D. Maurya, G. T. Hwang, J. Ryu et S. Priya, “High power magnetic field energy harvesting through amplified magneto-mechanical vibration,” *Advanced Energy Materials*, vol. 8, n<sup>o</sup>. 16, p. 1703313, 2018.

- [38] F. K. Shaikh et S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks : A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, p. 1041–1054, 2016.
- [39] S. Sudevalayam et P. Kulkarni, “Energy harvesting sensor nodes : Survey and implications,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 13, n<sup>o</sup>. 3, p. 443–461, 2010.
- [40] M. K. Simon, *Bandwidth-efficient digital modulation with application to deep-space communications*. Hoboken, N.J. : Wiley-Interscience, 2003.
- [41] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill Companies, 2000.
- [42] T. Aulin et C. Sundberg, “Continuous phase modulation - part i : Full response signaling,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, n<sup>o</sup>. 3, p. 196–209, 1981.
- [43] D. Mulally et D. Lefevre, “A comparison of digital modulation methods for small satellite data links,” 1991.
- [44] R. Anane, K. Raouf et R. Bouallegue, “Minimization of wireless sensor network energy consumption through optimal modulation scheme and channel coding strategy,” *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 83, n<sup>o</sup>. 1, p. 65–81, 2016.
- [45] F. M. Costa et H. Ochiai, “A comparison of modulations for energy optimization in wireless sensor network links,” dans *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*. IEEE, 2010, p. 1–5.
- [46] M. Tan et W. Chen, “Performance comparison and analysis of PSK and QAM,” dans *2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE, 2011, p. 1–4.
- [47] Y. Yu, R. Zhu et J. Dai, “An energy-efficient physical layer adaptive modulation scheme for wireless sensor networks,” dans *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*. IEEE, 2009, p. 3963–3966.
- [48] R. Ma et W. Zhang, “Variable-rate variable-power MQAM for energy harvesting communications with 1-bit feedback,” dans *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2015, p. 4670–4674.
- [49] K. Liu, Q. Zhu et H. Hu, “An online adaptive modulation scheme for energy harvesting nodes using bayesian decision theory,” dans *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. IEEE, 2018, p. 789–793.
- [50] M. Li, X. Zhao, H. Liang et F. Hu, “Deep reinforcement learning optimal transmission policy for communication systems with energy harvesting and adaptive MQAM,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, n<sup>o</sup>. 6, p. 5782–5793, 2019.

- [51] C. Qiu, Y. Hu, Y. Chen et B. Zeng, “Lyapunov optimization for energy harvesting wireless sensor communications,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, n<sup>o</sup>. 3, p. 1947–1956, 2018.
- [52] N. Charef, A. B. Mnaouer et O. Bouachir, “AI-based energy model for adaptive duty cycle scheduling in wireless networks,” dans *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE, 2021, p. 1–6.
- [53] F. Zhang, D. Gao et I.-W. Joe, “A tier-based duty-cycling scheme for forest monitoring,” *Journal of Information Processing Systems*, vol. 13, n<sup>o</sup>. 5, p. 1320–1330, 2017.
- [54] M. Mukherjee, Y. R. Lu, R. Matam et N. Choudhury, “Energy trading in sleep scheduling for wireless rechargeable WSNs,” dans *2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*. IEEE, 2018, p. 429–431.
- [55] W. Fang, Z. Zhang, M. Mukherjee, L. Shu et Z. Zhou, “Energy-utilization aware sleep scheduling in green WSNs for sustainable throughput,” dans *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2017, p. 4724–4727.
- [56] S. Escolar, S. Chessa et J. Carretero, “Energy management in solar cells powered wireless sensor networks for quality of service optimization,” *Personal and ubiquitous computing*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 2, p. 449–464, 2014.
- [57] L. Guntupalli, F. Y. Li et M. Gidlund, “Energy harvesting powered packet transmissions in duty-cycled WSNs : A DTMC analysis,” dans *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017, p. 1–6.
- [58] R. Li, A. Eryilmaz et B. Li, “Throughput-optimal wireless scheduling with regulated inter-service times,” dans *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. IEEE, 2013, p. 2616–2624.
- [59] Y. Sadi et S. C. Ergen, “Optimal power control, rate adaptation, and scheduling for UWB-based intravehicular wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, n<sup>o</sup>. 1, p. 219–234, 2013.
- [60] B. Li, R. Li et A. Eryilmaz, “Throughput-optimal scheduling design with regular service guarantees in wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, n<sup>o</sup>. 5, p. 1542–1552, 2015.
- [61] R. Singh, X. Guo et P. R. Kumar, “Index policies for optimal mean-variance trade-off of inter-delivery times in real-time sensor networks,” dans *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. IEEE, 2015, p. 505–512.
- [62] X. Guo, R. Singh, P. R. Kumar et Z. Niu, “Optimal energy-efficient regular delivery of packets in cyber-physical systems,” dans *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2015, p. 3186–3191.

- [63] W. Liu, X. Zhou, S. Durrani, H. Mehrpouyan et S. D. Blostein, “Energy harvesting wireless sensor networks : Delay analysis considering energy costs of sensing and transmission,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, n°. 7, p. 4635–4650, 2016.
- [64] S. Luo, R. Zhang et T. J. Lim, “Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, n°. 3, p. 1196–1207, 2013.
- [65] S. Mukesh, M. Iqbal, Z. Jianhua, Z. Ping *et al.*, “Comparative analysis of M-ary modulation techniques for wireless ad-hoc networks,” dans *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2007, p. 1–6.