

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Badji Mokhtar – ANNABA

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat

Département d'Informatique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention

du diplôme de **MAGISTER** en informatique

Compression d'images dans les réseaux de capteurs sans fil

Option : Informatique Embarquée (INEM)

Par

Mr. ARAAR Chaouki

DEVANT LE JURY

Président	: Pr. KIMOUR Med-Taher	Professeur	Université Badji Mokhtar – Annaba
Rapporteur	: Pr. BENMOHAMMED Mohammed	Professeur	Université Constantine 2
Examineurs	: Pr. BOUDOUR Rachid	Professeur	Université Badji Mokhtar – Annaba
	Pr. GHANEMI Salim	Professeur	Université Badji Mokhtar – Annaba

Année : 2015

Dédicaces

À ma mère :

À mon père :

À mes frères :

À ma sœur :

À mes amis :

À toute ma famille :

À tous ceux qui me sont chers :

Remerciements

« الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات »

Ah ! Les remerciements ! Ça me permet de remémorer les moments importants qui ont ponctué mes années de magister, ainsi que les personnes qui m'ont accompagné et encouragé.

En ouverture, avant toute considération subjective, je tiens à remercier très chaleureusement les membres du jury. Merci à Monsieur BENMOHAMMED Mohammed, Professeur à l'université Constantine 2, qui m'accueilli et m'accompagné, pour sa gentillesse, sa disponibilité tout au long de ce parcours. Merci pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ce travail.

Je tiens à dire toute ma gratitude à monsieur KIMOUR Med-Taher, professeur à l'université Badji-Mokhtar ANNABA, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance de magister.

Je souhaite également remercier monsieur BOUDDOUR Rachid, professeur à l'université Badji-Mokhtar ANNABA et monsieur GHANEMI Salim, professeur à l'université Badji-Mokhtar ANNABA qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury de soutenance.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et à tous mes amis, qui m'ont toujours soutenus et encouragés au cours de ces années de magister.

Résumé

Les progrès technologiques incessants ont permis le développement de nouveaux types de capteurs, issue de la convergence de la micro-électronique et des technologies de communication sans fil. Les capteurs, nouveaux venus dans les thèmes de recherche en informatique peuvent être vus comme des systèmes autonomes miniaturisés, équipés d'une unité de traitement et de stockage de données, d'une unité de transmission sans fil et d'une batterie. Ces nouveaux petits composants peu onéreux pouvant s'organiser en réseau autonome pour récolter des données et les remonter à une station de base, avec comme contrainte fondamentale la limitation de leurs ressources de calcul, de stockage et surtout d'énergie.

Parmi les nombreuses applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil, celles utilisant des capteurs d'image sont appréciables pour tout ce qui concerne la détection et la localisation d'objets par la vision (comptage de la faune dans les réserves naturelles, localisation des départs de feu en forêt, etc.). Mais elles sont particulièrement gourmandes en énergie puisque la quantité de données nécessaire pour représenter une image en comparaison d'une valeur scalaire classique (une mesure de température par exemple) diffère de plusieurs ordres de grandeur.

Il semble évident de prime abord que le coût énergétique de la transmission de l'image peut être réduit significativement en compressant l'image à la source. Or, la contrainte de la limitation des ressources des nœuds rend impossible ou inefficace en pratique l'exécution des algorithmes de compression standards. Ferrigno et al., ont montré en effet que des algorithmes bien connus comme JPEG ou JPEG2000 ont un coût d'énergie plus supérieur au gain qu'ils amènent.

Dans ce domaine, on remarque des efforts de plusieurs auteurs pour adapter les algorithmes de compression bien connus comme JPEG, JPEG2000 ou SPIHT aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil. Notre proposition, suit aussi cette voie en proposant d'intégrer dans une chaîne de compression de type JPEG, une DCT rapide basée sur l'algorithme de Loeffler, de la quantification scalaire, et du codage entropique basé sur le codeur Golomb couplé avec le codeur arithmétique QM. L'approche DCT rapide utilisée permet de réduire le nombre d'opérations pour calculer les coefficients de la DCT. Elle entraîne systématiquement une réduction de la complexité de calcul de la chaîne de compression, et par incidence une réduction de la consommation d'énergie. Le choix du codeur Golomb couplé avec le codeur arithmétique présente un bon compromis vitesse d'exécution/taux de compression. La validation de notre proposition a été faite par simulation en utilisant le simulateur de réseaux de capteurs sans fil Castalia.

Mots-clés : Réseaux de capteurs, compression d'image, DCT rapide, consommation d'énergie.

Abstract

Incessant technological progress has allowed the development of new types of sensors, resulting from the convergence of micro-electronics and wireless communication technologies. Sensors, newcomers to research topics in computer science can be seen as autonomous miniaturized systems, equipped with a processing unit and data storage, a wireless transmission unit and a battery. These new small inexpensive components that organize themselves into autonomous network to collect data and to carry up them to a base station, with fundamental constraint, the limitation of their computing, storage and especially energy resources.

Among the numerous potential applications of wireless sensor networks, those using camera sensors are significant for all that relates to the detection and localization of objects by vision (counting wildlife in nature reserves, Localization of departures forest fire, etc. ..). But they are particularly energy consuming since the amount of data needed to represent an image compared to a conventional scalar value (a measure of temperature for example) differs by several orders of size.

It seems obvious at first sight that the energy cost of transmitting the image can be significantly reduced by compressing the image at the source. However, the constraint of resource limitations of the nodes makes impossible or inefficient in practice the execution of standard compression algorithms. Ferrigno et al., Have indeed shown that well-known algorithms such as JPEG or JPEG2000 have an energy cost more superior to the gain they bring.

In this regard, we note the efforts of several authors to adapt the well-known compression algorithms such as JPEG, JPEG2000 or SPIHT to the specific constraints of wireless sensor networks. Our proposal also follows this way by proposing to integrate in a JPEG compression chain, a fast DCT based on Loeffler algorithm, a scalar quantization and an entropy coding based on Golomb encoder coupled with the arithmetic QM encoder. The fast DCT approach used allows reducing the number of operations to calculate the DCT coefficients. It systematically reduces the computational complexity of the compression chain, which reduce also the energy consumption. The choice of Golomb encoder coupled with the arithmetic encoder is a good compromise execution speed/compression ratio. The validation of our proposal has been made by simulation, using Castalia, simulator of wireless sensors networks.

Keywords: Sensors networks, image compression, fast DCT, energy consumption.

ملخص

مكن التقدم التكنولوجي المستمر في تطوير أنواع جديدة من أجهزة الاستشعار، والناجمة عن التقارب بين التكنولوجيات الالكترونيات الدقيقة والاتصالات اللاسلكية. يمكن اعتبار أجهزة الاستشعار (موضوعات البحث الجديدة في علوم الكمبيوتر) على أنها أنظمة مستقلة مصغرة، مجهزة بوحدة معالجة وتخزين البيانات، وحدة نقل لاسلكية وبطارية. هذه المكونات الصغيرة الجديدة والرخيصة باستطاعتها تنظيم نفسها على شكل شبكة مستقلة لتجميع البيانات والعودة بها إلى المحطة الأساسية، مع بقاء الحد من مواردها الحاسوبية، التخزين وخاصة موارد الطاقة كقيد أساسي.

من بين العديد من التطبيقات المحتملة لشبكات الاستشعار اللاسلكية، تلك التي تستخدم أجهزة استشعار الصورة هي هامة لكل ما يتعلق بكشف وتحديد موقع الأشياء عن طريق الرؤية (عد الحياة البرية في المحميات الطبيعية، تحديد موقع بداية مكان حرائق الغابات، الخ ..). لكنها بشكل خاص مستهلكة للطاقة لأن كمية البيانات اللازمة لتمثيل صورة مقارنة بقيمة عددية تقليدية (قياس درجة حرارة على سبيل المثال) يختلف بعدة مرات من حجمها.

يبدو واضحا للوهلة الأولى أن تكلفة الطاقة اللازمة لنقل الصورة يمكن تخفيضها بشكل كبير بضغط الصورة في المصدر. ومع ذلك، فإن عائق الموارد المحدودة لأجهزة الاستشعار يجعل من المستحيل أو غير فعالة من الناحية العملية تنفيذ خوارزميات الضغط النموذجية. فرنيو والآخرون، أظهروا بالفعل أن خوارزميات ضغط معروفة مثل JPEG أو JPEG2000 لديها تكلفة طاقة أكثر من الربح الذي تجلبه.

في هذا الصدد، نلاحظ جهود العديد من الباحثين لتكييف خوارزميات الضغط المعروفة مثل JPEG، JPEG2000 أو SPIHT للقيود الخاصة بشبكات الاستشعار اللاسلكية. اقتراحنا كذلك يتبع هذا الاتجاه من خلال اقتراح أن ندرج في سلسلة ضغط من نوع JPEG، تحويل جيب التمام المنفصل (DCT) السريع المستند على خوارزمية لوفر، التكميم العددي والتشفير الانتروبي المستند على مشفر غولومب إلى جانب المشفر الحسابي QM.

مقارنة جيب التمام المنفصل السريع المستخدمة تسمح بتقليل عدد العمليات اللازمة لحساب معاملات DCT. بحيث تقل بشكل منهجي التعقيد الحسابي لسلسلة الضغط وتأثر إيجابيا على تقليل استهلاك الطاقة. اختيار مشفر غولومب إلى جانب المشفر الحسابي هو تسوية جيدة بين سرعة التنفيذ / نسبة الضغط. التحقق من صحة اقتراحنا أنجزت عن طريق المحاكاة باستخدام محاكي شبكات الاستشعار اللاسلكية Castalia.

الكلمات الرئيسية: شبكات الاستشعار، ضغط الصورة، تحويل جيب التمام المنفصل السريع، استهلاك الطاقة.

Tables des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Tables des matières	vi

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction	1
2. Anatomie d'un nœud capteur	1
3. Vue d'ensemble des plates-formes existantes	3
4. Caractéristiques des réseaux de capteurs	5
4.1 Architecture d'un réseau de capteurs.....	5
4.2 Architecture protocolaire	6
4.3 Contraintes de conception des RCSFs.....	7
4.4 Déploiement des capteurs.....	8
4.5 Type d'application.....	9
5. Applications des réseaux de capteurs	10
5.1 Applications militaires.....	11
5.2 Applications environnementales	11
5.3 Applications industrielles.....	11
5.4 Applications commerciales.....	12
5.5 Applications médicales	12
6. Conclusion	12

Chapitre 2 : Problème de la consommation d'énergie

1. Introduction	13
2. Consommation d'énergie d'un nœud-capteur	13
2.1 Formes de dissipation d'énergie	13
2.1.1 L'unité d'acquisition	13
2.1.3 L'unité de traitement.....	14
2.1.2 L'unité de communication	14
2.2. Sources de surconsommation d'énergie	15
3. Durée de vie d'un réseau de capteurs.....	16
4. Techniques de conservation de l'énergie.....	18
4.1 Réveil cyclique (Duty-cycling)	18
4.1.1 Protocoles Sleep/Wake up	19

4.1.2 Protocoles du niveau MAC	20
4.2 Protocoles de routage efficaces en énergie.....	22
4.2.1 Protocoles hiérarchiques	23
4.2.2 Protocoles basés sur la localisation.....	24
4.2.3 Protocoles de routage centré-donnée.....	24
4.3 Contrôle de la topologie	25
4.4 Techniques orientées données	26
4.4.2 Réduction des données	26
4.4.1 Acquisition des données efficaces en énergie	27
4.5 Technique de mobilité.....	28
4.5.1 Mobilité de la station de base.....	28
4.5.2 Mobilité des nœuds-relais.....	29
5. Conclusion	29

Chapitre 3 : Réseaux de capteurs d'images

1. Introduction	31
2. Spécificités des réseaux de capteurs d'images	32
3. Exemples d'application	33
3.1 Applications militaires.....	33
3.2 Surveillance environnementale.....	34
3.3 Télé-relevé des compteurs de mesure	36
3.4 Suivi du trafic routier	36
4. Dispositifs de capture d'images	36
4.1 Caméras basées sur des composants commerciaux.....	37
4.2 Caméras conçues spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil	40
5. Etat de l'art sur la compression et la transmission d'images dans les réseaux de capteurs sans fil.....	40
5.1 Compression d'images à la source	41
5.2 Compression d'images distribuée	43
5.3 Transmission d'images	45
6. Conclusion	47

Chapitre 4 : Compression d'images

1. Introduction	48
2. Critères d'évaluation des algorithmes de compression.....	48
3. Méthodes de compression avec pertes	49
3.1 Techniques de dé-corrélation intra-image.....	49
3.1.1 La transformée en cosinus discrète (DCT)	50
3.1.2 La transformée en ondelettes discrètes (DWT)	53

3.2 Quantification.....	54
3.2.1 La quantification scalaire.....	55
3.2.2 La quantification vectorielle.....	55
3.3 Codage entropique.....	57
3.3.1 Codage de Huffman.....	57
3.3.2 Codage arithmétique.....	59
3.3.3 Codage de Golomb.....	60
4. Réduction DCT.....	61
4.1 L'approche par factorisation de la matrice (DCT rapide).....	61
4.2 L'approche zonale (DCT réduite).....	63
5. Conclusion.....	65

Chapitre 5 : Chaîne de compression proposée

1. Introduction.....	66
2. Petite présentation de l'algorithme JPEG.....	66
3. Chaîne de compression proposée.....	67
3.1 Transformation.....	67
3.2 Quantification.....	69
3.3 Lecture en Zig-Zag.....	70
3.4 Codage entropique.....	70
4. Evaluation des performances.....	71
4.1. Présentation du simulateur Castalia.....	71
4.1.1. Structure.....	71
4.1.2. Liste des modules.....	73
4.2. Expérimentation et résultats.....	74
5. Conclusion.....	77
Conclusion Générale.....	78

Chapitre 1.

Introduction aux réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

1. Introduction.....	1
2. Anatomie d'un nœud capteur	1
3. Vue d'ensemble des plates-formes existantes	3
4. Caractéristiques des réseaux de capteurs	5
4.1 Architecture d'un réseau de capteurs	5
4.2 Architecture protocolaire	6
4.3 Contraintes de conception des RCSFs	7
4.4 Déploiement des capteurs	8
4.5 Type d'application	9
5. Applications des réseaux de capteurs	10
5.1 Applications militaires	11
5.2 Applications environnementales.....	11
5.3 Applications industrielles	11
5.4 Applications commerciales.....	12
5.5 Applications médicales.....	12
6. Conclusion	12

1. Introduction

Les progrès récents dans les domaines de la micro-électronique, des communications sans fil et de l'informatique embarquée ont permis de fabriquer des systèmes de mesure autonomes de plus en plus petits. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée.

Un réseau de capteurs est un réseau informatique composé d'un grand nombre de nœuds-capteurs. Ces nœuds sont densément déployés à l'intérieur de la zone à surveiller, généralement de manière aléatoire et ont des capacités de coopération. Habituellement, ces dispositifs sont de petite taille et peu coûteux, de sorte qu'ils peuvent être produits et déployés en grand nombre, et ainsi, leurs ressources en termes d'énergie, de mémoire, de vitesse de calcul et de bande passante sont sévèrement limitées. Après déploiement, les nœuds-capteurs commencent à collecter des données sur un phénomène physique particulier et à les transmettre à une station de traitement appelée communément « *Station de Base* ». Les spécificités les plus frappantes de ces nœuds sont leurs capacités d'auto-organisation, de coopération, leur rapidité de déploiement, leur tolérance aux erreurs et leur faible coût.

Le développement des réseaux de capteurs sans fil a été motivé par des applications militaires telles que la surveillance du champ de bataille. Ils sont maintenant utilisés dans de nombreux domaines d'application industriels et civils, notamment la surveillance industrielle et le contrôle des processus, la surveillance de l'environnement et de l'habitat, les applications de soins de santé, la domotique et le contrôle de la circulation...etc.

Des concepts intéressants que nous allons utiliser très souvent dans ce mémoire sont « *nœud-capteur* » et « *station de base* » qui reviennent fréquemment dans la littérature. Toutefois, nous gardons à travers ce manuscrit d'autres appellations telles que « *nœud* », « *capteur* » ayant la même signification que « *nœud-capteur* » et « *puits* », « *sink* » qui renvoient toute finalement à la même chose que « *station de base* ».

2. Anatomie d'un nœud capteur

Les capteurs sans fil sont considérés comme de véritables systèmes embarqués, dotés de moyens de traitement et de communication de l'information en plus de leur fonction initiale de transformer l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, généralement électrique.

Comme cela est illustré sur la figure 1.1, un capteur sans fil est composé fondamentalement de quatre unités élémentaires :

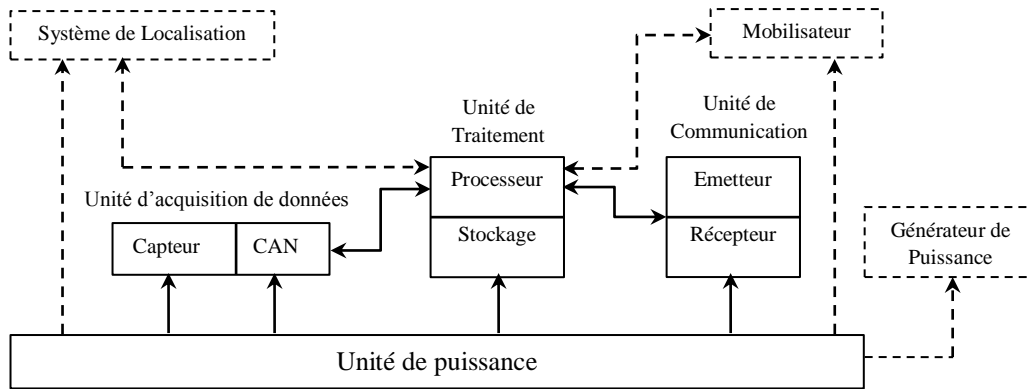


Figure 1.1. Anatomie générale d'un nœud capteur

- **L'unité d'acquisition des données** : elle est composée d'un capteur proprement dit qui permet de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques (pour une thermistance par exemple, une variation de température entraîne une variation de la résistance) et d'un convertisseur analogique-numérique qui transforme les signaux analogiques en signaux numériques compréhensible par l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement des données** : les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sans fil sont de faible vitesse d'exécution, moins de 10 MHz avec également une faible consommation d'énergie, de l'ordre de 1 mW. De même, la taille de leur mémoire est très réduite, de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [1,2]. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pourquoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie. En plus de sa fonction principale de traitement de données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission.
- **L'unité de transmission de données** : appelée aussi *transceiver*¹, qui représente le couple *émetteur/récepteur* permettant au nœud d'être connecté au réseau. Elle est associée à une technologie de transmission d'information telles que la radiofréquence, l'optique, ... etc. Elle prend en charge le protocole de communication dépendant de la technologie sans fil utilisée, c'est à dire tout ce qui traite de la transmission de messages entre nœuds-capteurs directement à portée : le contrôle d'accès au médium, la mise en forme des trames, l'encodage et le décodage des signaux, etc.
- **La source d'énergie** : elle fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du dispositif. Cependant, les dispositifs embarqués étant de petites tailles, les batteries sont aussi petites et donc les ressources énergétiques sont limitées. Il y

¹ Néologisme anglo-saxon issu de la contraction de *transmitter* et *receiver*

a essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant des piles. À titre indicatif, ce sera souvent une pile AA normale d'environ 2.2 – 2.5 Ah fonctionnant à 1.5 V [2].

Les capteurs sans fil peuvent également être dotés par d'autres modules additionnels relativement moins pertinents et surtout très gourmands en énergie qui sont : *un système de géolocalisation* et *un Mobilisateur*. Le système de géolocalisation est utilisé pour l'identification de la position géographique (un récepteur GPS par exemple). Tandis que, le support mobile (*Mobilisateur*) permet la possibilité aux nœuds-capteurs de se déplacer à l'intérieur de la zone à observer. Enfin, s'il est nécessaire qu'un nœud soit maintenu en activité pendant une très longue période de temps, un *Générateur de Puissance*, tel que des cellules solaires, serait utile afin de tenir le nœud alimenté électriquement sans avoir à changer ses batteries.

3. Vue d'ensemble des plates-formes existantes

Comme beaucoup d'autres technologies de l'information, les réseaux de capteurs sans fil proviennent principalement de la recherche militaire. En effet, le premier prototype de nœuds capteurs sans fil identifiable dans la bibliographie correspond sans aucun doute au module LWIM (*Low-power Wireless Integrated Microsensors*) développé dans le milieu des années 90 par l'Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense (*DARPA*) des Etats-Unis et l'UCLA (voir figure 1.2). Il s'agissait d'un géophone équipé d'un capteur de transmission radiofréquence et d'un contrôleur PIC. Depuis un peu plus de 10 ans, la technologie des capteurs sans fil a connue plus d'évolution. Les modules deviennent de plus en plus petits et les durées de vie prévues augmentent. Récemment, le marché de nœuds a été ouvert à l'industrie. Le fournisseur le plus connu est Crossbow Inc., avec son offre de capteurs « Mica2 » et « MicaZ ».



Figure 1.2. Plateformes de réseaux de capteurs sans fil.

Le tableau 1.1 recense les différents composants actuellement disponibles sur le marché.

Plateforme	Fabriquant	Unité de traitement	Unité de communication	Unité d'acquisition	Unité de puissance
MICA2	Crossbow	Atmel ATmega128L (128 Ko de mémoire de programme, 4 Ko RAM) 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	CC1000 (radio transceiver multi-freq. 868/916 ou 433 - 315 MHz, 38.4Kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V
MICAZ	Crossbow	Atmel ATmega128L 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	Chipcon CC2420 (radio transceiver 802.15.4, bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V
IRIS	Crossbow	Atmel ATmega1281 (128 Ko de mémoire de programme, 8 Ko RAM) 512 ko mémoire flash pour des données EEPROM 4 Ko (configuration)	Radio transceiver 802.15.4 (bande ISM, de 2400 à 2480 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.7 - 3.3V
Imote2	Crossbow	Intel PXA271 256 ko mémoire SRAM 32 Mo mémoire SDRAM 32 Mo mémoire flash	TI CC2420 (bande ISM, de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps)	Connecteur pour carte de capteurs externe	3.2 - 4.5V
Tmote Sky	Moteiv (Sentilla)	Texas Instruments MSP430 F1611 (10Ko RAM, 48Ko Flash, 128o stockage d'information)	Chipcon CC2420	Connecteur pour carte de capteurs externe	2.1 - 3.6V
BTnode rev3	ETH	Atmel ATmega128L 64+180 Kbyte RAM EEPROM 4 Ko	Bluetooth, CC1000	Connecteur pour carte de capteurs externe	3.8 - 5V
Particle 2/29	TECO	PIC 18F6720 (20 MHz), Mémoire interne : 128Ko de mémoire de programme, 4Ko RAM, 1Ko EEPROM, 512 Ko Mémoire flash pour des données	TR1001 (RFM, bande passante 125Ko, bands ISM 868.35 ou 315 MHz)	Connecteur pour carte de capteurs externe	0.9 - 3.3 V

Tableau 1.1. Caractéristiques des nœuds capteurs existants actuellement

Le développement de nœuds-capteurs est réalisé suivant une conception modulaire. En effet, tous les nœuds de la table 1 sont en fait des cartes intégrées qui regroupent l'unité de communication et l'unité de traitement. Par contre, l'unité d'acquisition de données est conçue sur une autre carte distincte pouvant être enfichée sur la carte principale. Cela a l'avantage de pouvoir réutiliser les mêmes nœuds-capteurs pour différentes applications. Par exemple, un nœud « Mica2 » peut être combiné avec une carte « MTS310 » qui comprend un

capteur de température, un capteur de lumière, un capteur de son, un capteur de champ magnétique, et un accéléromètre à deux axes. De même, nous pouvons combiner le nœud « Mica2 » avec une carte « MTS420 » pour le doter d'un capteur d'humidité et d'un capteur de pression barométrique, et même d'un GPS pour le positionnement géographique.

Un grand nombre de capteurs sans fil sont fabriqués pour être configurés par programmation, dans différents modes d'activité afin d'économiser de l'énergie. Ainsi, un nœud-capteur peut passer d'un mode actif où toutes les unités sont opérationnelles, à un mode sommeil où toutes ou une partie de ses unités sont en inactivées pour économiser de l'énergie.

La plupart des constructeurs des capteurs optent pour des émetteurs radio fréquence à basse fréquence. Les autres ont choisi de mettre en œuvre un protocole conforme à la norme IEEE 802.15.4, conçu spécifiquement pour les modules industriels sans fil de faible puissance. Ce protocole de transmission opère dans la bande de fréquences des 2.4GHz. Les microcontrôleurs utilisés sont de faible vitesse d'exécution avec relativement une faible consommation d'énergie. De même, la mémoire disponible pour les programmes et les données est d'une capacité de stockage faible en comparaison avec celle des équipements informatiques traditionnels.

4. Caractéristiques des réseaux de capteurs

4.1 Architecture d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs est généralement constitué de nombreux nœuds répartis dans une zone (*sensor field*). Ces nœuds sont reliés à une ou plusieurs puits (*sink*) qui permettent l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellite . . .) (voir figure 1.3). Par principe, les nœuds-capteurs ont donc (au moins) deux rôles : ce sont des sources d'information (acquisition des mesures) et des relais intermédiaires de son transport de bout en bout (transmission de proche en proche pour l'acheminement des paquets jusqu'à destination). Le point de collecte, appelé puits ou station de base, fait l'interface entre le réseau de capteurs sans fil et l'utilisateur. L'interconnexion du puits à un réseau à infrastructure (e.g., Internet par liaison satellite) permet les accès à distance pour les utilisateurs éloignés.

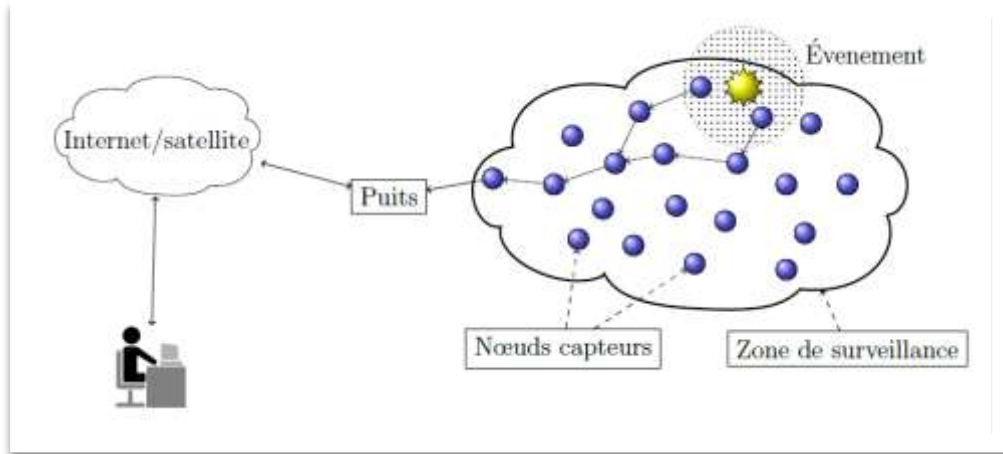


Figure 1.3. Schéma conventionnel d'un réseau de capteurs sans fil

4.2 Architecture protocolaire

La pile de protocoles [1] utilisée par le puits ainsi que par tous les nœuds capteurs est illustrée sur la figure 1.4. La pile protocolaire comprend cinq couches qui sont : *la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique* qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI. En plus des couches précédemment citées, la pile regroupe trois plans à savoir *le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches*. Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application. La couche transport aide à gérer le flux de données si le réseau de capteurs l'exige. Elle permet de diviser les données issues de la couche application en segments pour les délivrer, ainsi elle réordonne et rassemble les segments venus de la couche réseau avant de les envoyer à la couche application. La couche réseau prend soin de router les données fournies par la couche transport. Le protocole MAC (*Media Access Control*) de la couche liaison assure la gestion de l'accès au support physique et le contrôle des erreurs de communication. La couche physique répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et assure la transmission et la réception des données au niveau bit.

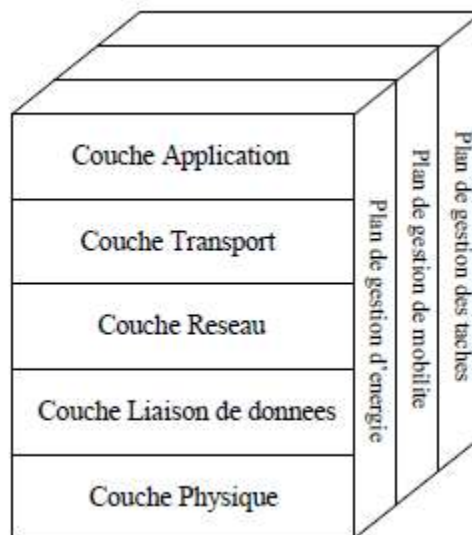


Figure 1.4. La pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements, et la répartition des tâches entre les nœuds capteurs. Ces plans aident les nœuds capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie.

4.3 Contraintes de conception des RCSFs

La conception et le développement des réseaux de capteurs sont influencés par plusieurs paramètres tels que la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Les principaux facteurs et contraintes influençant la conception et le développement de protocoles et d'algorithmes utilisés dans les réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [1]:

- **Tolérance aux pannes** : La robustesse des capteurs sans fil est un élément très important. Dans les RCSFs, les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à l'épuisement des batteries. Les interférences liées à l'environnement peuvent aussi être la cause des pannes. Ces problèmes ne devraient pas normalement affecter le fonctionnement du reste de réseau.
- **Coût de fabrication** : Le coût de fabrication d'un seul capteur est très important pour l'évaluation du coût global de réseau. Donc, Il est indispensable que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique. Sinon, l'utilisation de cette technologie n'est justifiée et elle ne serait pas rentable.
- **Topologie du réseau** : La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps à cause de plusieurs raisons : défaillance de certains nœuds, changements de la position des nœuds dus à leur mobilité ou dus à des facteurs externes (vents,...), l'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie. Il faut donc que les nœuds capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée.
- **Consommation d'énergie** : L'énergie est considérée comme une ressource rare et l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, les nœuds sont généralement équipés d'une source limitée d'énergie (des piles alcaline), souvent non rechargeables et leur remplacement s'avère difficile voire impossible. D'autre part, la retransmission des données, la réorganisation du réseau ainsi que le changement dynamique de sa topologie rendent la gestion et la conservation d'énergie d'une haute importance. Il faut donc que les capteurs gèrent au maximum la dépense en énergie afin de pouvoir fonctionner pour de longues périodes.

- **Passage à l'échelle** : Les réseaux de capteurs sont considérés comme des réseaux de très grande dimension, de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de nœuds, déployés de manière dense (chaque nœud peut avoir plusieurs dizaines de voisins). La forte densité du réseau peut entraîner des problèmes de congestion, si les nœuds essaient de communiquer au même moment, donc des retards dans la diffusion de messages et des pertes de paquets. Le facteur d'échelle constitue un critère important utilisé pour tester l'évolutivité (surcharge du réseau) des protocoles de communication, en particulier les protocoles d'accès au médium MAC et les protocoles de routage.
- **Contrainte de l'environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au-delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- **Médias de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans-fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normé. On utilise le plus souvent l'infrarouge (qui est License-free, robuste aux interférences, et peu onéreux), le Bluetooth et les communications radio ZigBee.

4.4 Déploiement des capteurs

Le déploiement constitue la première étape de la mise en place d'un réseau de capteurs. Différents modes de déploiement sont envisageables et dépendent essentiellement de l'application. Citons par exemple :

- *Le déploiement déterministe* : lorsque l'environnement à surveiller est accessible et peu étendue, il est possible de positionner manuellement les nœuds-capteurs à des emplacements connus d'avance. C'est le cas par exemple pour les capteurs chargés de réguler la climatisation d'un immeuble ou de surveiller les constantes médicales de personnes malades à distance.
- *Le déploiement aléatoire* : L'utilisation des capteurs dans des zones inaccessibles ou sensibles rend impossible un déploiement déterministe. Les nœuds peuvent alors être déployés aléatoirement à l'aide de moyens divers. Par exemple, dans les surveillances militaires, les capteurs pourraient être largués comme un jeté de graines sur les endroits stratégiques depuis un avion ou un drone.

Le déploiement aléatoire ne permet pas une distribution uniforme des capteurs dans la zone à surveiller. Dans ce cas, le réseau doit faire face à des problèmes de connectivité d'un certain nombre de nœuds qui se retrouvent en dehors de la zone de couverture des autres

nœuds, soit parce qu'ils sont trop éloignés, soit parce qu'ils sont tombés dans des lieux qui entravent la propagation des ondes radio ou tout simplement parce qu'ils ont été détruits.

4.5 Type d'application

Selon le mode de communication des données de mesure entre le réseau de capteurs et la station de base, nous identifions quatre types d'applications pour les réseaux de capteurs [3]:

- *Application périodique (Time-Driven)* : Dans le mode de signalement périodique, les nœuds-capteurs recueillent des informations de l'environnement à des moments prédéterminés et envoient périodiquement les données à la station de base. Les applications de surveillance sont les premières concernées où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée. Dans l'exemple de la figure 1.5-(a), une mesure est capturée périodiquement par le nœud A, puis, les données sont transmises vers le puits à travers les nœuds 1 et 2.
- *Application à la demande (On-Demand)* : Dans le mode à la demande, les utilisateurs décident quand recueillir des données. Ils envoient des requêtes aux capteurs; leurs indiquant qu'ils souhaitent recevoir des données. Les utilisateurs peuvent même spécifier les périodes futures de signalement; les données ultérieures seront ensuite envoyées en mode périodique. Dans l'exemple de la figure 1.5-(b), une demande est adressée au nœud source A, le message est acheminé à travers les nœuds 2 et 1, à sa réception, le nœud A, active son unité d'acquisition et envoie ses mesures vers le puits, cette fois par le chemin constitué des nœuds intermédiaires 3, 4 et 2.
- *Application événementielles (Event-Driven)*: Dans ce scénario, les capteurs signalent les données à la station de base une fois un événement précis (par exemple, incendie) a été détecté. Dans l'exemple de la figure 1.5-(c), le nœud-capteur A détecte un événement dans sa portée de détection ; puis commence à envoyer les données vers le puits à travers les nœuds 1 et 2.
- *Applications hybrides* : toute alliance des cas précédents.

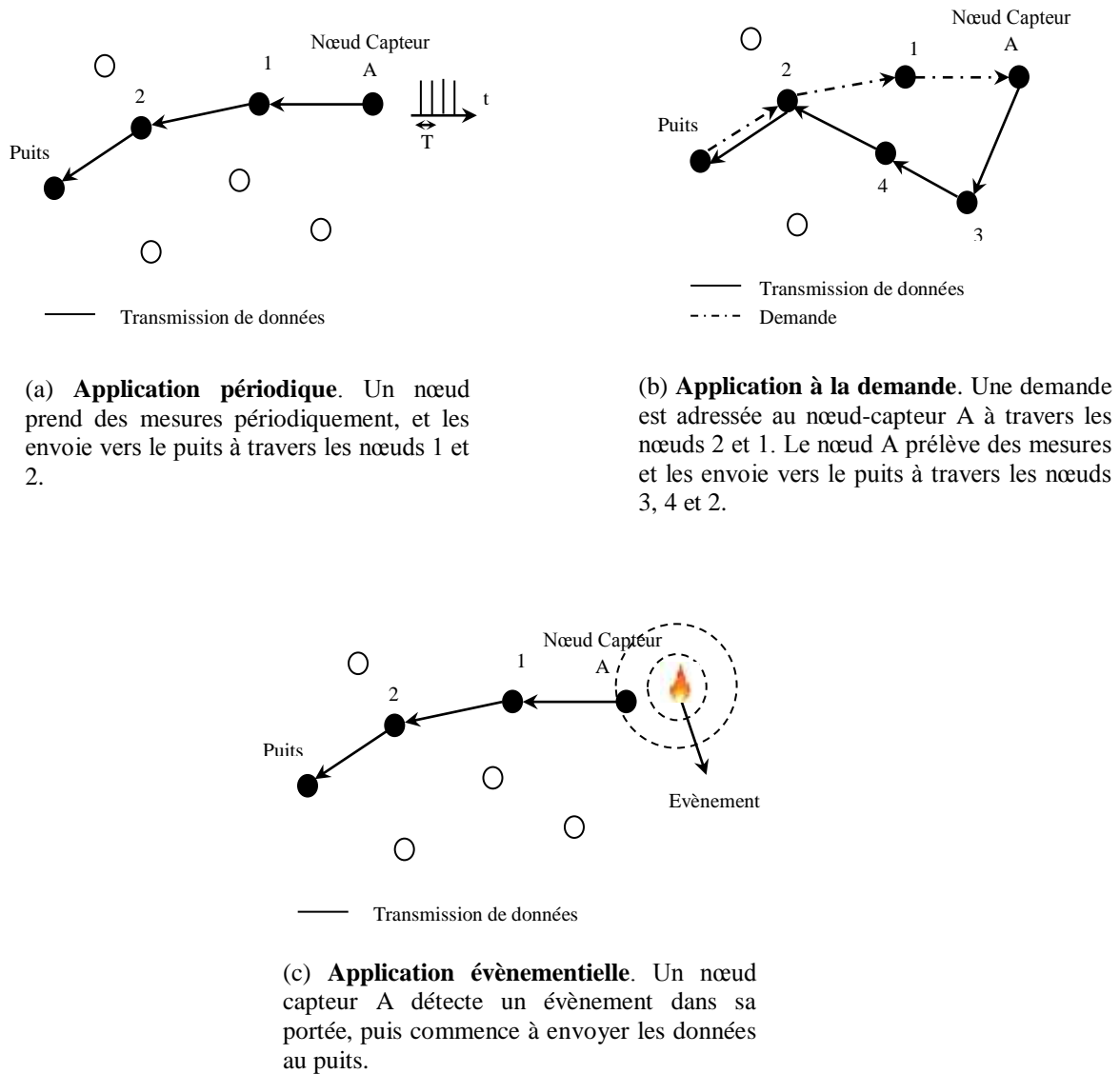


Figure 1.5. Différents types d'applications pour réseaux de capteurs sans fil.

5. Applications des réseaux de capteurs

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi [1, 4, 5] grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications. Parmi ces évolutions, on peut citer la diminution de taille et du coût des capteurs, ainsi que l'élargissement des gammes de capteurs disponibles (mouvement, température, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil.

Les réseaux de capteurs sont très utiles pour la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et la télématique, etc. Nous décrivons ici brièvement quelques applications dans certains domaines pour donner une idée de cette étendue.

5.1 Applications militaires

Comme beaucoup d'autres technologies de l'information, les réseaux de capteurs sans fil proviennent principalement de la recherche militaire. Des réseaux de capteurs autonomes peuvent être rapidement déployés et utilisés pour la surveillance des champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement, et l'identité des soldats et des véhicules. Les réseaux de capteurs ont été initiés en 1993 dans le cadre du projet WINS [6] (*Wired Integrated Network Sensors*) de la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). Les applications militaires sont les premières et certainement les plus représentatives des applications trouvées actuellement dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

5.2 Applications environnementales

Un des premiers déploiements expérimentaux de réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance de l'habitat s'est déroulé, sur *Great Duck Island* (44.09N, 68.15W) dans le golfe du Maine. Une équipe de chercheurs du laboratoire de recherche d'Intel à Berkeley, de l'Université de Californie à Berkeley, et du Collège de l'Atlantique à Bar Harbor ont déployé un réseau de 32 nœuds pour la surveillance de l'habitat d'espèces protégées [7]. Le but de ce projet était d'étudier le comportement de « L'océanite culblanc² », un oiseau qui vit en grandes colonies sur l'île, au cours de la saison de reproduction, conformément aux changements climatiques. Les nœuds, dont certains ont été installés dans les nids des oiseaux, étaient capables de mesurer la température, la pression barométrique et l'humidité, et de transmettre les données dans un mode multi-saut jusqu'à un puits sur l'île, qui est à son tour reliée à un lien de communication par satellite, pour mettre les données transmises à disposition sur le web. Un autre exemple d'application similaire peut être trouvé dans [8], concernant l'étude des oiseaux de mer dans une réserve nationale naturelle au Royaume-Uni.

D'autres exemples d'applications environnementales sont utilisées dans la surveillance de certains phénomènes climatiques dans une optique de détecter ou de prévoir d'éventuelles catastrophes naturelles telles que l'éruption des volcans [9], les inondations [10] et les incendies de forêts [11].

5.3 Applications industrielles

Dans la fabrication industrielle, des capteurs et des actionneurs sont utilisés pour les processus de suivi et de contrôle. Par exemple, dans une usine de traitement chimique à plusieurs étapes, il peut y avoir des capteurs placés en différents points dans le processus afin de surveiller la température, la concentration chimique, la pression, ... etc.

En raison de leur sensibilité aux interférences, la plupart des applications de réseaux de capteurs sans fil dans le domaine industriel concerne la maintenance prédictive. Par exemple, sur la base de mesures de vibration, les auteurs dans [12] ont évalué les performances d'une application de réseaux de capteurs pour la prévision des pannes d'équipements dans des environnements industriels. Une architecture de réseaux de capteurs a été aussi discutée pour sa mise en œuvre dans une usine de fabrication de semi-conducteurs, en comparant deux plates-formes différentes : l'une basée sur des capteurs « Mica2 » et l'autre sur de capteurs « Intel Mote ». Une autre expérience a été réalisée dans une station pétrolière dans la mer du

² L'océanite culblanc ou en anglais *Leach's storm petrel* (*Oceanodroma leucorhoa*) est un oiseau de mer de la famille des procellariidés (sous-famille des hydrobatinés).

Nord. Les résultats montrent l'efficacité des réseaux de capteurs sans fil pour fournir des données de haute qualité utiles pour des applications de maintenance prédictive et disponibles à un coût relativement faible, pendant de longues périodes de l'ordre de plusieurs mois.

D'autres déploiements peuvent être trouvés dans les industries agricoles. On peut citer à titre d'exemple, les travaux menés par [13], visaient à améliorer l'efficacité du système d'irrigation de pâturage en Australie.

5.4 Applications commerciales

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées [14].

5.5 Applications médicales

La surveillance de la santé humaine présente un bon marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui ont déjà commencé à envahir le monde médical. On peut trouver par exemple dans le domaine médical, des gélules multi-capteurs pouvant être avalées qui permettent, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain [15].

6. Conclusion

Les réseaux de capteurs représentent une révolution technologique des instruments de mesure, issue de la convergence de la micro-électronique et des technologies de communication sans fil. Les capteurs sont vus ici comme des systèmes autonomes miniaturisés, équipés d'une unité de traitement et de stockage de données, d'une unité de transmission sans fil et d'une batterie. Ils vont s'organiser en réseau pour récolter des données et les remonter à une station de base, avec comme contrainte fondamentale la limitation de leurs ressources de calcul et d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base et fédéré quelques concepts nécessaires à leur compréhension. Nous avons évoqué les caractéristiques des réseaux de capteur, leur architecture, les différents facteurs de conception, les modèles de fonctionnement, ainsi que les différentes applications les mettant en œuvre. Pour obtenir un premier aperçu de l'état de l'art sur les réseaux de capteurs, le lecteur novice est invité à consulter l'article « *WSNs : a survey* » [1].

Dans le prochain chapitre nous allons mettre l'accent sur le problème de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs et nous dresserons un panorama des techniques de conservation d'énergie proposées dans la littérature.

Chapitre 2.

Problème de la consommation d'énergie

Sommaire

1. Introduction.....	13
2. Consommation d'énergie d'un nœud-capteur.....	13
2.1 Formes de dissipation d'énergie	13
2.1.1 L'unité d'acquisition	13
2.1.3 L'unité de traitement.....	14
2.1.2 L'unité de communication	14
2.2. Sources de surconsommation d'énergie	15
3. Durée de vie d'un réseau de capteurs.....	16
4. Techniques de conservation de l'énergie	18
4.1 Réveil cyclique (Duty-cycling).....	18
4.1.1 Protocoles Sleep/Wake up	19
4.1.2 Protocoles du niveau MAC	20
4.2 Protocoles de routage efficaces en énergie	22
4.2.1 Protocoles hiérarchiques.....	23
4.2.2 Protocoles basés sur la localisation	24
4.2.3 Protocoles de routage centré-donnée.....	24
4.3 Contrôle de la topologie	25
4.4 Techniques orientées données.....	26
4.4.2 Réduction des données	26
4.4.1 Acquisition des données efficaces en énergie	27
4.5 Technique de mobilité.....	28
4.5.1 Mobilité de la station de base	28
4.5.2 Mobilité des nœuds-relais.....	29
5. Conclusion.....	29

1. Introduction

La consommation d'énergie est sans doute le problème le plus important lorsque les capteurs sont déployés dans des zones hostiles et inaccessibles, c'est-à-dire lorsqu'il est difficile de changer les batteries des capteurs quand elles sont déchargées. Les capteurs sont généralement conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau. Donc, la gestion de la consommation d'énergie dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil constitue un défi majeur.

En effet, tous composants électroniques d'un capteur sans fil (résistances, condensateurs, diodes, transistors, circuits intégrés) consomment de l'énergie en fonction des sollicitations du composant dans le temps. Par exemple, une mémoire ne consomme pas la même énergie en mode lecture et écriture, et le temps passé en lecture peut être différent de celui en écriture. De même, les autres unités du nœud-capteur (microcontrôleur, émetteur radio) adoptent des modes de veille plus au moins profondes pour consommer peu d'énergie quand ils sont dans un état d'inactivité [16].

Dans ce chapitre, nous décrivons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Nous présenterons également les principales techniques de conservations d'énergie proposées dans la littérature.

2. Consommation d'énergie d'un nœud-capteur

2.1 Formes de dissipation d'énergie

Les nœuds-capteurs sont alimentés principalement par des batteries. Ils doivent donc fonctionner avec un bilan énergétique frugal. En outre, ils doivent le plus souvent avoir une durée de vie de l'ordre de plusieurs mois, voire de quelques années, puisque le remplacement des batteries n'est pas une option envisageable pour des réseaux avec des milliers de nœuds. Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est extrêmement important de faire d'abord une analyse des différents facteurs provoquant la dissipation de l'énergie d'un nœud-capteur. Cette dissipation d'énergie est due essentiellement aux unités suivantes : l'unité d'acquisition, de traitement et de communication de données [17].

2.1.1 L'unité d'acquisition

Il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par le module de détection, notamment l'échantillonnage et la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique-numérique. Vu la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée.

2.1.3 L'unité de traitement

L'unité de traitement consomme généralement peu d'énergie en comparaison avec l'unité de communication. L'exemple présenté dans [18] illustre cette disparité, en montrant que le coût énergétique nécessaire pour transmettre **1 KB** sur une portée de **100 m** est d'environ **3J**. En revanche, un processeur à usage général ayant une efficacité énergétique de **100 MIPS/W** pourrait exécuter **3×10^8** instructions pour cette énergie.

L'unité de traitement possède divers modes de fonctionnement : *actif*, *idle*, et *sommeil*, employés à des fins de gestion d'énergie. Chaque mode est caractérisé par une quantité différente de consommation d'énergie. Par exemple, le StrongARM consomme 50 mW en mode *idle*, et juste 0.16 mW dans le mode *sommeil*. Toutefois, la transition entre les modes de fonctionnement implique un surplus d'énergie et de latence [17].

Enfin, il faut noter que l'unité de traitement se charge du codage/décodage des paquets de données ainsi que le maintien de tables diverses (pour le voisinage, le routage,...etc.) pour les protocoles de communication des couches hautes. La conception des algorithmes et des protocoles de communication va donc influencé largement l'énergie consommée par l'unité de traitement [16].

2.1.2 L'unité de communication

L'unité de communication est le plus souvent constituée d'un émetteur-récepteur radio (radio transceiver) permettant au capteur de communiquer avec les autres au sein d'un réseau. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

La radio opère dans quatre modes de fonctionnement : *émission*, *réception*, *écoute (idle)*, et *sommeil (sleep)*. Une observation importante dans le cas de la plupart des radios est que le mode *écoute* induit une consommation d'énergie significative, presque égale à la consommation en mode *réception* [19]. Ainsi, il est plus judicieux d'éteindre complètement la radio plutôt que de passer en mode *écoute* quand l'on a ni à émettre ni à recevoir de données. Un autre facteur déterminant est que, le passage de la radio d'un mode à un autre engendre une dissipation d'énergie importante due à l'activité des circuits électroniques. Par exemple, quand la radio passe du mode *sommeil* au mode *émission* pour envoyer un paquet, une importante quantité d'énergie est consommée pour le démarrage de l'émetteur lui-même [20].

L'histogramme présenté par la figure 2.1, illustre la consommation de l'énergie par les différentes unités d'un nœud-capteur.

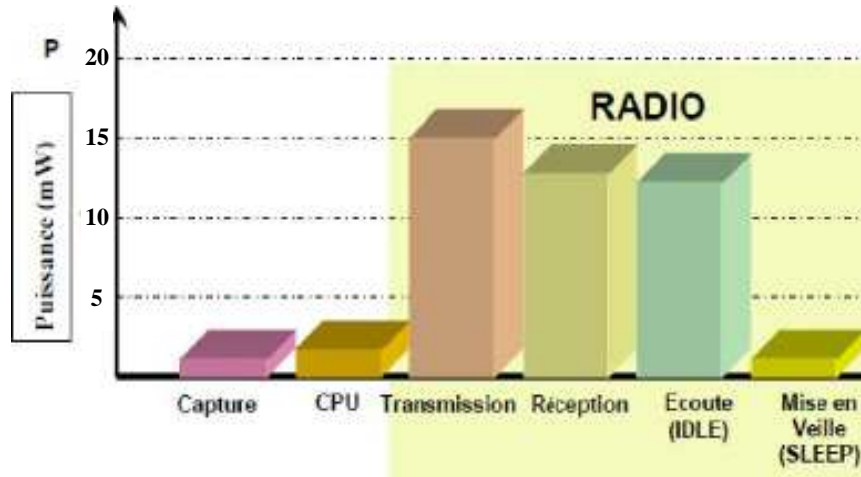


Figure 2.1. Formes de dissipation d'énergie d'un nœud-capturer.

2.2. Sources de surconsommation d'énergie

Nous appelons surconsommation d'énergie toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud-capturer. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses et peuvent être due à une ou plusieurs faits suivants.

Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [21, 22].

- *Les collisions* : sont à la fois une source de dégradation des performances du réseau et de perte d'énergie. Les collisions se produisent quand les nœuds reçoivent plusieurs paquets de données en même temps. En conséquence, la donnée reçue est inutile et le processus de transmission doit être répété alors que l'énergie est dissipée. Ces retransmissions peuvent consommer beaucoup d'énergie, car les pertes d'énergie sont multipliées par le nombre de sauts entre la source et la cible. Tous les protocoles MAC essaient à leur manière d'éviter les collisions.
- *La surémission (Overemitting)* : Les envois infructueux arrivent quand un nœud essaie de communiquer avec un autre nœud qui n'est plus accessible parce qu'il est en mode *sommeil* par exemple (ou hors de portée). Le nœud émetteur est en attente d'un acquittement, et il retransmet donc la même trame plusieurs fois. Les transmissions répétées augmentent les dépenses en énergie des nœuds individuels pour envoyer leurs données ainsi que le temps de latence de l'ensemble du réseau.

- *L'écoute passive (idle listening)* : L'écoute passive se produit lorsqu'un nœud est à l'écoute du canal alors qu'il y a aucune transmission. Cela peut, de façon abusive, engendrer une consommation considérable et inutile d'énergie surtout dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode « *idle* ». Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester raisonnable.
- *L'écoute abusive (overhearing)* : cette situation se présente quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Cela peut engendrer une surconsommation importante d'énergie surtout dans le cas des réseaux très denses et à très fort trafic, particulièrement dans les réseaux « *mostly-on* »³.
- *L'overhead des paquets de contrôle* : Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages consomment de l'énergie.

3. Durée de vie d'un réseau de capteurs

La durée de vie du réseau est peut-être la métrique la plus importante pour l'évaluation des réseaux de capteurs. Bien sûr, dans un environnement aux ressources limitées, la consommation de chaque ressource limitée doit être considérée.

Les études sur la durée de vie, sont d'abord venues parce que la recharge ou le remplacement des batteries n'est pas faisable dans de nombreux scénarios (trop de nœuds, environnement hostile, etc.), et ainsi la durée de vie du réseau ne peut être étendue à l'infini. Bien entendu, la durée de vie a été ensuite discutée de différents points de vue, ce qui a conduit au développement de divers paramètres de durée de vie. Selon les sources de consommation d'énergies considérées dans chaque métrique et les besoins spécifiques des applications envisagées, ces métriques peuvent conduire aux différentes estimations de durée de vie réseau.

Les définitions possibles et proposées dans la littérature ont été documentées dans [23].

- *Durée de vie basée sur le nombre de nœuds vivants* : La définition la plus fréquemment trouvée dans la littérature est la durée de vie de *n-sur-n*. Dans cette définition, la durée de vie du réseau se termine dès que le premier nœud échoue. *n-sur-n* est une définition très pratique. Elle est facile à calculer et les algorithmes fonctionnant sur le réseau n'ont pas à faire face aux changements de la topologie du tout. C'est parce que dans un réseau sans nœuds mobiles, le premier nœud qui échoue, résulte du premier changement de la topologie après déploiement. Une autre variante de la définition *n-sur-n*, définit la durée de vie comme le temps jusqu'à ce que la

³ Réseau dont les radios des nœuds capteurs sont dans la plupart du temps allumées

fraction de nœuds vivants tombe au-dessous d'un seuil prédéfini « β », ou le temps pendant lequel au moins k -sur- n nœuds sont vivants [23].

- *Durée de vie basée sur le nombre de nœuds morts* : Il est possible de définir la durée de vie réseau comme le temps jusqu'à ce que tous les nœuds épuisent leur énergie [24]. Cette métrique est très rarement utilisée. Il s'agit bien entendu du fait que la métrique est beaucoup trop optimiste pour être utile. Dans la plupart des cas, un réseau de capteurs cesse de fournir un service utile pendant une longue période avant que le dernier nœud échoue définitivement.
- *Durée de vie basée sur la couverture* : Compte tenu des caractéristiques spécifiques des réseaux de capteurs, estimer la durée de vie du réseau comme étant le temps pendant lequel la région d'intérêt est couverte par les nœuds-capteurs semble être un moyen naturel pour définir la durée de vie. Plusieurs articles fondent leurs définitions de la durée de vie du réseau sur une variante de couverture. Parmi celles-ci, la définition la plus courante, utilise *1-couverture* pour définir la durée de vie comme le temps pendant lequel la région d'intérêt est complètement dans la portée de détection d'au moins un nœud-capteur, c'est-à-dire que la région est couverte par au moins un nœud [25]. Une variante moins stricte de cette définition est que seulement une fraction α de la région d'intérêt doit être couverte [26]. Ceci est communément appelé *α -couverture*. Une autre variante plus stricte exigeant que chaque point dans la zone d'intérêt soit couvert par au moins k nœuds [27]. Ceci est appelé *k -couverture*.
- *Durée de vie basée sur la connectivité* : Un autre groupe de métriques prend en compte la connectivité du réseau. La connectivité est une métrique qui est couramment rencontré dans le contexte des réseaux ad hoc, car il n'y a pas de notion de couverture capteur dans les réseaux ad hoc et donc la capacité de transmettre des données vers une destination donnée est plus importante. Il y'a plusieurs variantes de durée de vie reposant sur la connectivité du réseau, parmi lesquelles le pourcentage de nœuds pouvant atteindre la station de base via une communication multi-sauts. Les auteurs dans [28] définissent la durée de vie de réseau comme la durée pendant laquelle certains nœuds peuvent maintenir une route vers le puits.

Finalement, nous constatons bien que plusieurs définitions convergent puisque certaines d'entre elles ne sont que des relaxations des autres et la majorité suggère que la durée de vie du réseau dépend de la consommation d'énergie de ses nœuds. Toutefois, il peut s'avérer judicieux de tenir en compte de la connectivité et de la couverture si elles sont nécessaires aux besoins des applications. La connaissance des exigences de l'application aide les concepteurs à affiner la définition de la durée de vie du réseau afin d'aboutir à une évaluation beaucoup plus réaliste et plus précise pour les utilisateurs de l'application.

4. Techniques de conservation de l'énergie

Malgré les progrès technologiques qui ont été faits dans le domaine des réseaux de capteur sans fil, la durée de vie des nœuds-capteurs continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

En effet, les concepteurs de solutions pour de tels réseaux se focalisent souvent sur la qualité de service requise par l'application au premier plan pour ensuite assujettir cela avec l'efficacité énergétique. Une telle attention est accordée à l'efficacité énergétique, car le fonctionnement d'un nœud est étroitement lié à la quantité d'énergie disponible dans sa batterie. Ce qui fait que la durée de vie du réseau est en général fortement dépendante des quantités individuelles d'énergie des différents nœuds capteurs. Ainsi, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature et utilisent différentes technique qui peuvent être classées en cinq grandes catégories (voir figure 2.2) [22, 29, 30]. Approches basées sur le réveil cyclique, protocoles de routage efficace en énergie, contrôle de la topologie, techniques centrées données et finalement approches basées sur la mobilité.

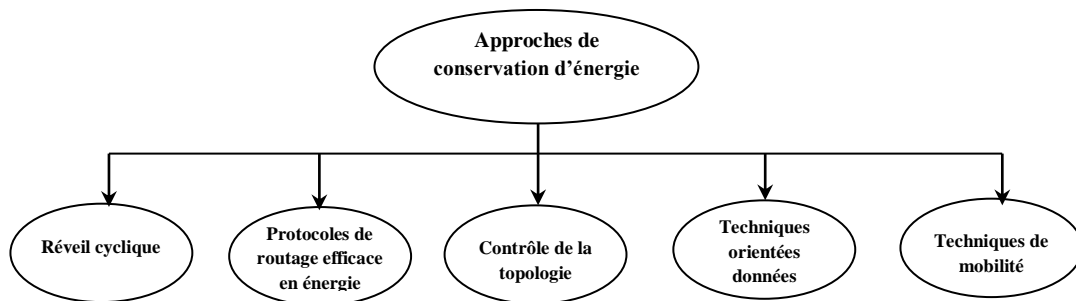


Figure 2.2. Approches de conservation d'énergie dans les RCSFs.

Nous présentons dans cette section un panorama de différentes techniques et mécanismes de conservation d'énergie comme schématisé dans la figure 2.2.

4.1 Réveil cyclique (Duty-cycling)

Le moyen le plus efficace pour conserver de l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. L'idée est que la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu.

Comme les nœuds-capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling.

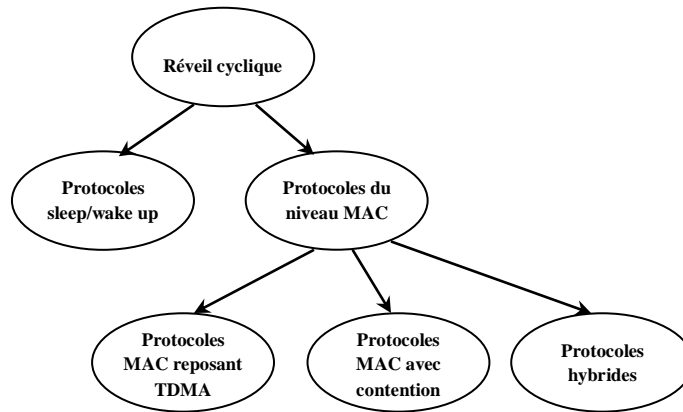


Figure 2.3. Taxonomie des approches de réveil cyclique [30].

4.1.1 Protocoles Sleep/Wake up

Lorsque les nœuds-capteurs sont mis dans un état d'écoute d'un événement, ils peuvent perdre une partie de leurs énergies. Cette énergie perdue est assez importante et ayant presque la même importance que celle nécessaire à la réception de donnée (voir figure 2.1).

Un régime *Sleep/wake up* peut être défini pour un composant donné par exemple le module *Radio* du nœud-capteur lui permettant ainsi de limiter au maximum l'état en « écoute ». On peut relever les principaux plans *Sleep/wake up* implantés sous forme de protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (au niveau de la couche réseau ou de la couche application).

Les protocoles *Sleep/wake up* indépendants peuvent être subdivisés en trois catégories principales [31]: à la demande, rendez-vous planifiée, et régime asynchrone:

- Les protocoles à la demande utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller que lorsqu'un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est prêt à communiquer avec lui. À cette fin, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à haut débit mais gourmand en énergie pour la communication de données).
- Une solution alternative consiste à utiliser une approche de rendez-vous planifiée. L'idée de base derrière les systèmes de rendez-vous planifié, est que chaque nœud devrait se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent selon un plan de réveil, et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils s'endorment jusqu'au prochain rendez-vous.

- Enfin, un protocole *sleep/wake up* asynchrone peut être utilisé. Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Cet objectif est atteint par des propriétés impliquées dans le régime *sleep/wake up*, donc aucun échange explicite d'information, est nécessaire entre les nœuds.

4.1.2 Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont été proposés dans la littérature. Nous allons nous intéresser principalement sur les questions de gestion d'énergie plutôt que sur les méthodes d'accès au canal. La plupart d'entre eux mettent en œuvre un régime avec un faible duty-cycle pour gérer la consommation d'énergie. Les protocoles MAC peuvent être classés en trois catégories : protocoles basé-TDMA, ceux basé-contention et protocoles hybrides.

4.1.2.1 Protocoles MAC reposant sur TDMA

Cette technique est basée sur un multiplexage temporel qui consiste à dire que les utilisateurs utilisent la même fréquence tout en occupant des slots de temps différents. Chaque nœud utilise toute la bande passante allouée par le système de transmission durant le slot (c'est lui seul qui occupe le support).

Le fait que chaque nœud connaît d'avance le slot de temps qu'il va occuper, cela va lui permettre de passer à l'état « *endormi* » durant les slots inactifs. Ainsi, la perte d'énergie due aux états de « *écoute abusive* » et « *écoute passive* » va être évitée.

Toutefois, le système TDMA (Time Division Multiple Access) demande un maintien constant des horloges de synchronisation à travers le réseau car une erreur introduite dans l'une des horloges peut entraîner des collisions ; la station de base doit en effet, émettre périodiquement des paquets de synchronisation aux différents nœuds qui doivent impérativement les intercepter pour mettre à jour leurs horloges. Cette réinitialisation de l'horloge effectuée à chaque fois par le nœud, consomme une quantité considérable d'énergie malgré que le nœud ne transmette pas d'informations.

Un des protocoles TDMA important et efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil est TRAMA [32]. TRAMA divise le temps en deux parties, une période avec un accès aléatoire et une période avec un accès ordonnancé. La période d'accès aléatoire est consacrée à la réservation des slots et l'accès au canal est fondé sur la contention. Au contraire, la période d'accès ordonnancé est constituée par un certain nombre de slots de temps attribués à un nœud précis.

FLAMA (Flow-Aware Medium Access) [33] est un protocole MAC reposant sur TDMA dérivé de TRAMA, et optimisé pour les applications de surveillance périodiques. L'idée principale est d'éviter la surcharge associée à l'échange d'information de trafic. Comme le flux de messages dans les applications périodiques est plutôt stable, FLAMA configure d'abord les flux, puis utilise un mécanisme de traction, de sorte que les données sont transférées qu'après avoir été explicitement demandé.

4.1.2.2 Protocoles MAC avec contention :

La plupart des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil sont des protocoles basés sur la contention :

L'un des protocoles MAC les plus populaires à base de contention est B-MAC (Berkeley-MAC) [34], avec une faible complexité et une faible consommation induite par le système d'exploitation *TinyOS*⁴. L'objectif de B-MAC est de fournir quelques services de base (organisation, synchronisation et routage qui seront intégrés à un niveau supérieur de son implémentation) et un mécanisme efficace en énergie pour l'accès au canal. B-MAC a été utilisé pour satisfaire les exigences des applications WSN de « monitoring » en matière d'exactitude, de rapidité...etc.

Un protocole MAC bien connu pour les réseaux de capteurs multi-sauts est le S-MAC (Sensor-MAC) [35]. L'idée apportée par Sensor-MAC est d'entraîner les nœuds dans un état endormi périodique [36] en se basant sur un « duty-cycle » fixe (égale au rapport de la durée de la période « écoute » sur la somme des périodes « écoute » et « endormi »). En effet, chaque nœud s'endort pendant un laps de temps puis se réveille et se met à l'écoute pour voir s'il y a un autre nœud voulant initier une communication avec lui ou s'il veut lui-même initier une communication. Durant l'état endormi, le nœud éteint son module radio et déclenche un temporisateur pour son réveil plus tard.



Figure 2.4. Principe des états périodiques « écoute » et « endormi »

Chaque nœud est libre de choisir sa propre séquence d'état « écoute/endormi ». Toutefois, pour réduire le temps d'attente, chaque nœud doit synchroniser sa séquence d'états « écoute/endormi » avec les nœuds qui lui sont proches [35].

Le protocole T-MAC (TimeOut-MAC) [37] est un protocole qui a été conçu afin de remédier aux faiblesses du protocole S-MAC en matière de charge de trafic variable. L'idée que le protocole T-MAC a apportée est de réduire le phénomène d'écoute passive en rendant le « duty-cycle » variable et dépendant du volume du trafic, contrairement au protocole S-MAC qui adopte un duty-cycle fixe.

⁴ TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour les dispositifs sans fil limités en ressources. Les RSCFs sont des systèmes typiques où TinyOS peut être utilisé avec succès.

4.1.2.3 Protocoles hybrides

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (changement du comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. Le principe de ces protocoles hybrides se base sur la division du canal d'accès en deux. Les paquets de contrôle sont transmis dans le canal à accès aléatoire, tandis que les paquets de données sont transmis dans le canal d'accès planifié. En comparaison avec les protocoles MAC à base de contention et ceux reposant sur TDMA, les protocoles hybrides peuvent obtenir des économies d'énergie plus élevées et offrent une meilleure évolutivité et flexibilité.

Quelques protocoles MAC hybrides ont été récemment proposés. Z-MAC [38] est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec un de ses voisins à un saut n'interfère pas avec les transmissions de ses voisins à deux sauts.

Z-MAC permet à chaque nœud de maintenir son propre ordonnancement qui dépend du nombre de voisins et évite tout conflit avec ses voisins de contention. Chaque nœud a des informations sur les slots de tous ses voisins à deux sauts et tout le monde se synchronise sur un slot de référence. Après cette phase d'initialisation, les nœuds sont prêts pour l'accès au canal. Les nœuds peuvent être soit en mode faible niveau de contention (*LCL* pour *Low Contention Level*), soit en mode haut niveau de contention (*HCL* pour *High Contention Level*). Un nœud persiste dans le mode *LCL* sauf s'il a reçu une notification (*ECN* pour *Explicit Contention Notification*). Dans le mode *HCL*, seuls les propriétaires du slot et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à concourir pour l'accès au canal. En *LCL* (à la fois les propriétaires et les non-propriétaires) peuvent concourir pour transmettre dans n'importe lequel des slots. En revanche les propriétaires ont une priorité sur les autres. De cette façon, Z-MAC peut atteindre un niveau élevé d'utilisation du canal, même en faible contention, car un nœud peut transmettre dès que le canal est disponible.

Dans Z-MAC, CSMA est considéré comme le régime de base MAC et TDMA est utilisé pour améliorer la résolution de contention. Z-MAC utilise le concept de propriétaire de slot. Un nœud a un accès garanti à son propre slot (de style TDMA) et un accès basé-contention aux autres slots (de style CSMA). De cette manière, les collisions et les consommations d'énergie sont réduites.

4.2 Protocoles de routage efficaces en énergie

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est très défiant en raison des caractéristiques intrinsèques qui distinguent ces réseaux à d'autres réseaux sans fil tels que les réseaux mobiles ad hoc ou les réseaux cellulaires. Afin de minimiser la consommation de l'énergie, les techniques proposées dans la littérature pour les réseaux de capteurs emploient des tactiques de routage bien connues ainsi que des tactiques spécifiques aux réseaux de

capteurs, par exemple, l'agrégation des données et le traitement en réseau, la formation de cluster et des méthodes centrées-données ont été employées. Les protocoles de routage efficace en énergie peuvent être classés en trois groupes : protocoles hiérarchiques, protocoles basé sur la localisation et protocoles de routage centré-donnée

Un bon nombre de protocoles de routage proposés dans la littérature, qui minimisent l'énergie dissipée est documenté dans [1, 39, 40].

4.2.1 Protocoles hiérarchiques

La formation de clusters est une technique qui consiste à subdiviser le réseau en plusieurs sous-ensembles de nœuds, appelés cluster. Les capteurs sont alors groupés en sous-ensembles ayant chacun un capteur désigné comme cluster-head⁵ et des nœuds membres connectés à ce dernier. Les nœuds membres transmettent leurs données au cluster-head qui, à son tour, les achemine jusqu'à la station de base.

La formation de clusters favorise une meilleure répartition de la consommation d'énergie. En effet, dans le cas d'une transmission directe vers le puits (figure 2.5-(a)), les capteurs éloignés vont plus rapidement manquer d'énergie et les autres nœuds peuvent être sujets au phénomène d'overhearing (écoute abusive) dans le cas des réseaux « Mostly-On ».

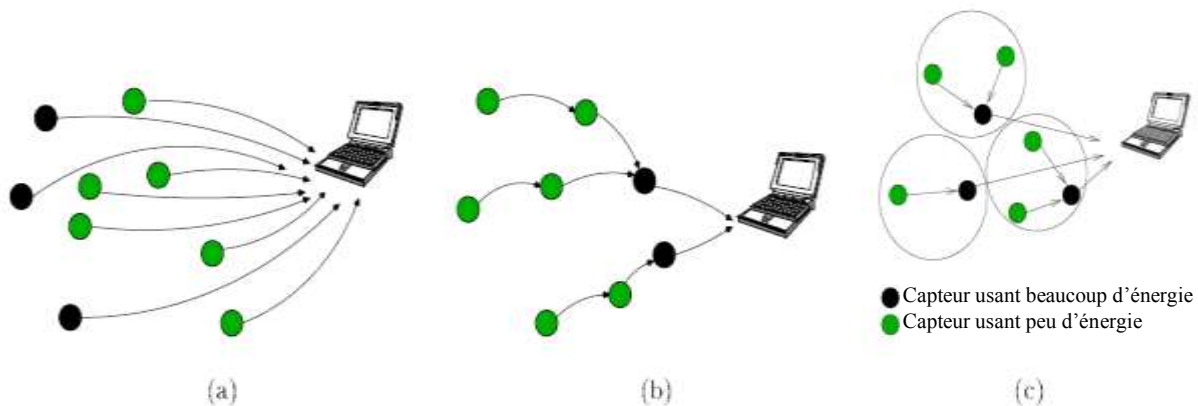


Figure 2.5. (a)-Transmission directe. (b)-Transmission saut par saut. (c)- Hiérarchisation en clusters.

Au contraire, dans le cas d'une transmission par saut (figure 2.5-(b)), les nœuds proches du puits vont rapidement épuiser leurs réserves en énergie car ils seront plus sollicités pour relayer les messages des autres. La solution consiste à hiérarchiser les échanges en divisant la zone d'observation en clusters (figure 2.5-(c)). Un « cluster-head » est élu pour chaque cluster. Il s'occupe de récupérer les informations auprès des capteurs de son cluster et de les transmettre directement au puits. En changeant régulièrement le cluster-head, on obtient un réseau dans lequel aucun capteur n'est prédisposé à arriver en rupture de batterie avant les autres. Mettre en place des clusters va également permettre de cloisonner le réseau et ceci

⁵ Le rôle du cluster-head est de faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres cluster-head. Il possède généralement des ressources énergétiques supérieures aux autres nœuds du réseau.

dans l'objectif de réduire les interférences. On améliore ainsi la qualité du lien radio et par conséquent, on limite les retransmissions liées aux reprises sur erreur. L'exemple phare d'une solution avec des clusters est le protocole LEACH [41].

4.2.2 Protocoles basés sur la localisation

Les protocoles de routage basés sur la localisation utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Dans ces protocoles, les constructions des chemins de routage nécessitent la connaissance de l'emplacement géographique des nœuds pour optimiser le choix de la route.

Comme rapporté dans [42], les auteurs ont proposé le protocole GAF (*Geographical Adaptive Fidelity*) qui économise de l'énergie en éteignant les nœuds inutiles dans le réseau sans affecter le niveau de fidélité de routage. Chaque nœud détermine sa position à l'aide d'un GPS et s'associe à un point d'une grille virtuelle regroupant des nœuds géographiquement proches. Les nœuds associés au même point de la grille sont considérés comme équivalents en termes de coût de routage de paquet. Cette équivalence est exploitée dans la conservation de certains nœuds ; situés dans une zone particulière de la grille en état « *sommeil* » afin d'économiser de l'énergie. Ainsi, GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau quand le nombre de nœuds augmente.

Les auteurs dans [43] ont étudié l'utilisation de l'information géographique tout en diffusant des requêtes vers les régions cibles ; car les requêtes de données comprennent souvent des attributs géographiques. Le protocole, appelé GEAR (*Geographic and Energy Aware Routing*), utilise des heuristiques efficace en énergie pour la sélection des voisins pour acheminer un paquet vers la destination. L'idée principale est de limiter le nombre de participations dans la diffusion dirigée en considérant uniquement une région plutôt que d'envoyer les requêtes à l'ensemble du réseau.

4.2.3 Protocoles de routage centré-donnée

Dans les réseaux à plat, chaque nœud joue généralement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent ensemble pour accomplir leurs tâches. En raison du grand nombre de ces nœuds, il n'est pas possible d'attribuer un identifiant global pour chaque nœud. Cette considération a conduit au routage centré-données, où la station de base envoie des requêtes à certaines régions et attend les données de nœuds situés dans les régions sélectionnées.

SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) [44], est une famille de protocoles de routage centré-donnée qui améliore la conservation de l'énergie des nœuds au niveau du routage. Dans SPIN, un nœud voulant émettre ou transférer des données propose à ses voisins une image de ces données (méta-donnée) avant de les émettre, via un message d'information. Le (ou les) voisin qui serait intéressé à recevoir ces données le fera savoir au nœud émetteur par un message REQ. Ensuite, les nœuds intéressés recevront les données via un message DATA. L'avantage de SPIN est d'éviter la surcharge du réseau et de conserver l'énergie des nœuds qui ne sont pas intéressés à recevoir certaines données, surtout si celles-ci sont volumineuses.

Toujours dans le but d'éviter l'implosion et la surcharge du réseau par des envois systématiques à tous les voisins, la diffusion dirigée [45] est un paradigme de routage orienté données qui consiste à établir un chemin pour chaque « information d'intérêt » annoncée et diffusée par la station de base. L'information d'intérêt pourrait être, par exemple, « les zones où un mouvement a été détecté ». Une première étape consiste à établir le chemin associé à cette information. Ensuite, lorsqu'un nœud répond à cet intérêt (dans notre exemple, un nœud qui détecte un mouvement), il achemine l'information via le chemin associé à cet « intérêt ».

4.3 Contrôle de la topologie [46]

Afin de comprendre comment le contrôle de topologie peut réduire la consommation d'énergie, il est important de clarifier d'abord le concept de la topologie du réseau. La topologie du réseau est déterminée par les nœuds et les liaisons qui permettent une communication directe. Une fois un réseau de capteurs sans fil est déployée, chacun des nœuds communique avec un sous-ensemble des nœuds en fonction de la distance qui les sépare (les nœuds-capteurs sont réglés pour transmettre à la puissance maximale afin de communiquer avec le plus grand nombre de nœuds); des liaisons de communication sont établies avec les nœuds qui sont suffisamment proches pour que le signal radio arrive avec assez de force pour être détectée. Ces nœuds et ces liaisons établissent la topologie du réseau.

Généralement, en raison de la densité élevée et le déploiement aléatoire des nœuds, de nombreux capteurs se trouvent très proches les uns des autres. Dans ces cas, les informations collectées que les nœuds très proches fournissent, auront tendance à être très similaire, et par conséquent, la présence de nœuds « redondants » dans le réseau n'est pas tout à fait nécessaire. En outre, le fait d'avoir des nœuds redondants actifs dans le réseau n'est même pas désiré; ils dissipent de l'énergie supplémentaire en retransmettant les paquets qui entrent en collision en raison de la hausse trafic du réseau.

Une solution à tous ces problèmes consiste à modifier la topologie du réseau en profitant de la capacité d'adaptation de la puissance d'émission des capteurs et leurs différents modes de fonctionnement. La combinaison correcte de la puissance d'émission et l'état des capteurs permet à l'opérateur de réseau de concevoir une topologie à faible consommation d'énergie tout en préservant la connectivité et la couverture souhaitée de détection et de communication.

Ainsi, le **contrôle de la topologie** est la réorganisation et la gestion des paramètres de nœud et des modes de fonctionnement de temps à autre afin de modifier la topologie du réseau dans le but de prolonger sa durée de vie tout en préservant les caractéristiques importantes, telles que la connectivité et la couverture réseau.

Une classification de différents mécanismes de contrôle de la topologie est documentée dans [46].

4.4 Techniques orientées données

En effet, les techniques de conservation d'énergie vues précédemment ne tiennent pas compte des données prélevées par les nœuds. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité énergétique encore plus.

Les données échantillonnées ont généralement de fortes corrélations spatiales et/ou temporelles [47], Par conséquent, il n'est pas nécessaire de communiquer les informations redondantes à la station de base faisant diminuer ainsi la consommation d'énergie du sous-système de détection.

Les techniques orientées données dans les réseaux de capteurs peuvent être divisées en deux catégories: techniques de réduction des données et techniques d'acquisition des données efficace en énergie, voir figure 2.6.

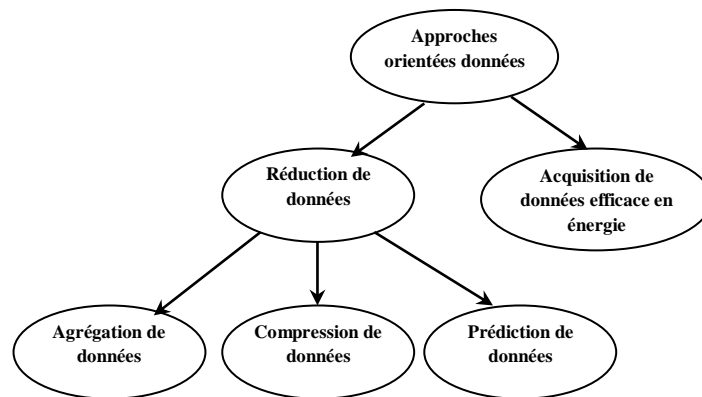


Figure 2.6. Taxonomie des approches orientées données pour la conservation d'énergie [30]

Les approches de réduction de données traitent le cas des échantillons inutiles ou redondants, alors que les approches d'acquisition de données efficace en énergie visent principalement à réduire l'énergie dépensée par le sous-système de détection [22].

4.4.2 Réduction des données

Réduire les données en termes de volume ou de nombre de paquets, dans le réseau peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature. Parmi les méthodes de réduction de données, on trouve la compression de données [48], l'agrégation des données [49] et la prédiction de donnée [22].

4.4.2.1 Compression des données

Les nœuds-capteurs dans les RCSFs consomment de l'énergie pendant les phases d'acquisition, de traitement et de transmission. Mais généralement, l'énergie dépensée par un nœud dans le module de communication pour la transmission et la réception de données est supérieure à celle nécessaire pour le traitement. Une approche importante pour conserver de l'énergie et maximiser la durée de vie du réseau, est l'utilisation de systèmes efficaces de

compression de données. Les méthodes de compression des données réduisent la taille des données avant de les transmettre au support sans fil ce qui se traduit par une réduction de la consommation d'énergie totale. Ces économies d'énergie en raison de la compression se traduisent directement par l'extension de la durée de vie pour les nœuds du réseau [48].

En raison des ressources limitées disponibles dans les nœuds-capteurs, pour réaliser la compression de données dans les réseaux de capteurs, cela nécessite des algorithmes spécifiquement conçus. Deux approches ont été suivies dans la littérature [50]:

- Distribuer le coût de calcul sur l'ensemble du réseau (compression distribuée).
- Permettre la compression en agissant sur un nœud unique indépendamment des autres (compression locale).

4.4.2.2 Agrégation de données

Dans les réseaux de capteurs denses où les redondances sont fortement présentes, éliminer la redondance et réduire le trafic de données dans le réseau peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie. Parmi les méthodes de réductions de données, nous trouvons le *In-network processing* qui consiste à effectuer de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiaires entre la *source* et le *puits* appelé « *nœud agrégateur* ». Seulement le résultat produit sera transmis à la station de base. De cette manière, la quantité de données à communiquer est réduite tout en parcourant le réseau vers le *puits*, ce qui réduit par conséquent la consommation de la bande passante et celle de l'énergie des capteurs. Un aperçu sur les principales approches de l'agrégation de données récemment proposées pour les réseaux de capteurs sans fil est documenté dans [49].

4.4.2.3 Prédiction de données

La prédiction des données consiste à construire une abstraction d'un phénomène détecté, par exemple un modèle décrivant l'évolution des données. Le modèle peut prédire les valeurs détectées par nœuds-capteurs dans certaines limites d'erreur. Si la précision nécessaire est satisfaite, les requêtes émises par les utilisateurs peuvent être évaluées au niveau de la station de base à travers le modèle sans la nécessité d'obtenir les valeurs exactes auprès des nœuds. Quand du côté nœuds, ceux derniers effectuent des échanges avec la station de base que pour les échantillons de données pertinentes [22].

4.4.1 Acquisition des données efficaces en énergie

L'acquisition des données est l'une des tâches la plus fondamentales pour un réseau de capteurs sans fil. Les nœuds sont destinés à collecter des données sur un phénomène physique observé dans un environnement donné. Ainsi, l'intégration de nouvelles techniques permettant de réduire le nombre d'acquisition au moment de la phase d'acquisition des données semble très intéressante. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : L'échantillonnage adaptatif, l'échantillonnage hiérarchique et l'échantillonnage actif fondé sur un modèle [51].

- L'échantillonnage adaptatif a pour objectif de réduire le nombre d'échantillons de données générées par un nœud en exploitant la corrélation spatio-temporelle sur ces données.
- L'approche d'échantillonnage hiérarchique, consiste à équiper les nœuds de plusieurs capteurs, simples et complexes. Les capteurs simples sont à basse consommation mais offrent une résolution faible sur le phénomène observé. Contrairement aux capteurs simples, ceux dits complexes sont plus sophistiqués en terme de résolution mais en contrepartie sont plus gourmands en énergie. L'idée de base consiste à activer d'abord les capteurs de basse consommation pour la détection puis utiliser les capteurs à haute résolution pour raffiner l'observation.
- L'échantillonnage actif fondé sur un modèle ou « *model-based active sampling* » est un peu similaire à l'approche de prédiction des données. Mais contrairement à la prédiction qui effectue un échantillonnage périodique, l'échantillonnage actif s'appuie sur les données déjà obtenues pour déterminer un modèle qui permettra de déduire l'état futur du phénomène observé avec une certaine précision.

4.5 Technique de mobilité

Dans cette section nous complétons notre étude sur les techniques de conservation d'énergie en introduisant le dernier schéma, représenté par les techniques de mobilité. En fait, la plupart des travaux sur les réseaux de capteurs sans fil, en particulier dans les premiers stades de recherche dans ce domaine, ont assumés une architecture où les nœuds sont supposés être statiques, et la densité devrait être suffisamment grande pour permettre la communication entre deux nœuds quelconques, éventuellement en utilisant un chemin multi-sauts. Plus récemment, toutefois, la mobilité a été considérée comme une solution alternative pour la collecte de données efficace en énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [30].

Les techniques de mobilité peuvent être classées en fonction de la nature de l'élément mobile en deux ensembles : techniques basées sur la mobilité de la station de base et techniques reposant sur la mobilité des nœuds-relais.

4.5.1 Mobilité de la station de base

De nombreuses approches proposées dans la littérature sur les réseaux de capteurs avec station de base mobile reposent sur la programmation linéaire (*LP*), qui est exploitée afin d'optimiser certains paramètres telle que la durée de vie du réseau. L'objectif de la mobilité du puits est de pouvoir garantir un équilibrage des charges en ce qui concerne la consommation énergétique, et aussi alléger la tâche de routage.

Par exemple, dans [52], les auteurs proposent un modèle constitué d'un puits mobile qui peut se déplacer à un nombre limité de lieux afin de visiter un nœud donné et de communiquer avec lui (les nœuds-capteurs sont censés être disposés dans une grille carrée à l'intérieur de la zone de surveillance). Lors des visites aux nœuds, le puits reste chez le nœud pour une période de temps (séjour). Les nœuds qui ne sont pas dans la zone de couverture du puits peuvent envoyer leurs messages le long des chemins multi-sauts jusqu'au puits. Les auteurs adoptent la programmation linéaire afin d'obtenir les temps de séjour optimales à

chaque lieu visité par le puits. La solution proposée permet de maximiser la durée de vie du réseau tout en équilibrant la dépense énergétique, mais elle ne tient pas en compte les coûts liés au déménagement du puits.

4.5.2 Mobilité des nœuds-relais

La mobilité du nœud relais est très utilisée pour la collecte des données dans les réseaux de capteurs sans fil. L'approche la plus courante consiste à utiliser des nœuds dits «*bac à message ou message ferries*». Un bac à message est un nœud spécial qui se déplace à travers le réseau pour collecter les informations des nœuds capteurs statiques situés à proximité [51].

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude étendue sur le problème de la consommation d'énergie ainsi que les facteurs influençant cette dernière au niveau d'un nœud-capteur. A cet effet, nous avons constaté que le module radio, est souvent au cœur des sources de surconsommation de l'énergie. Cet élément a suscité beaucoup de réflexion et de nombreuses solutions ont été proposées.

Le volet des techniques de conservation d'énergie présenté à travers ce chapitre s'articule autour de plusieurs axes. Le premier vise à réduire le duty-cycle des nœuds. Cela se traduit par la réduction de la durée de l'activité radio afin d'éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont vu le jour soit sous forme de protocoles MAC à faible duty-cycle ou bien sous forme de protocoles indépendants de niveau supérieur fondés sur des ordonnancements sleep/wake up.

Le second axe s'intéresse aux protocoles de routage où l'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Ces protocoles doivent prendre en compte des métriques relatives à la consommation d'énergie car une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau entier.

Le troisième axe profite de la densité élevée des capteurs déployés pour se permettre de mettre en sommeil certains d'entre eux, afin que tous les capteurs ne soient pas actifs en même temps. L'ajustement de la puissance de transmission peut aussi conserver de l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant la contention avec d'autres nœuds transmetteurs.

Le quatrième axe s'intéresse aux données prélevées par les nœuds. Des techniques orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. Parmi ces techniques, nous avons vu celles qui s'intéressent à l'acquisition de données efficace en énergie et il y'a celles qui visent à réduire les données en termes de volume ou de nombre de paquets pour avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication.

Enfin, dans le dernier axe, nous avons évoqué les méthodes centrées sur la mobilité des nœuds relais ou bien des puits de données. Ces méthodes constituent aussi une solution élégante pour réduire la consommation énergétique des nœuds et par conséquent prolonger la durée de vie du réseau.

Nombreuses sont les approches et techniques de conservation d'énergie présentées et détaillées dans ce chapitre, mais la liste est toutefois loin d'être exhaustive.

Chapitre 3.

Réseaux de capteurs d'images

Sommaire

1. Introduction.....	31
2. Spécificités des réseaux de capteurs d'images.....	32
3. Exemples d'application	33
3.1 Applications militaires	33
3.2 Surveillance environnementale.....	34
3.3 Télé-relevé des compteurs de mesure.....	36
3.4 Suivi du trafic routier	36
4. Dispositifs de capture d'images	36
4.1 Caméras basées sur des composants commerciaux.....	37
4.2 Caméras conçues spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil	40
5. Etat de l'art sur la compression et la transmission d'images dans les réseaux de capteurs sans fil.....	40
5.1 Compression d'images à la source	41
5.2 Compression d'images distribuée	43
5.3 Transmission d'images	45
6. Conclusion	47

1. Introduction

Au cours de la dernière décennie, le développement de matériel peu coûteux tel que les caméras et les microphones capables de capturer du contenu multimédia de façon ubiquitaire a observé une forte évolution. Ces dispositifs deviennent de plus en plus petits et bon marché, et fournissent de plus en plus de performances en termes de rapidité et de qualité du signal. Ce qui a conduit à l'émergence d'un nouveau type de réseau de capteurs sans fil qui sont les réseaux de capteurs d'images ou encore réseaux de capteurs multimédia. L'engouement pour ce type de réseaux n'est commencé qu'à l'apparition et la commercialisation de mini-caméras en technologie CMOS, consommant très peu d'énergie, comme par exemple la caméra ADCM-1650 chez Agilent Technologies ou la MT9V011 chez Micro. En conséquence, un grand éventail d'applications peuvent être projetées dans de nombreux domaines de la vie quotidienne.

Un réseau de capteurs d'images n'est qu'un cas particulier des réseaux de capteurs sans fil et une grande partie de la théorie et de l'application des réseaux de capteurs sans fil s'applique aussi au réseau de capteurs d'images. Par rapport aux réseaux de capteurs traditionnels (RCSFs), les réseaux de capteurs d'images présentent des défis uniques principalement en raison de la grande quantité de données à capturer et à transmettre au-dessus d'un réseau contraint en ressources.

Un réseau de capteur d'images est un réseau de nœuds-caméras spatialement distribués. A l'intérieur d'un tel réseau, chaque nœud-capteur d'images a la capacité d'acquérir, de compresser, et de transmettre des images utiles à la station de base, à travers le lien établie entre la source et la station de base, voir figure 3.1.

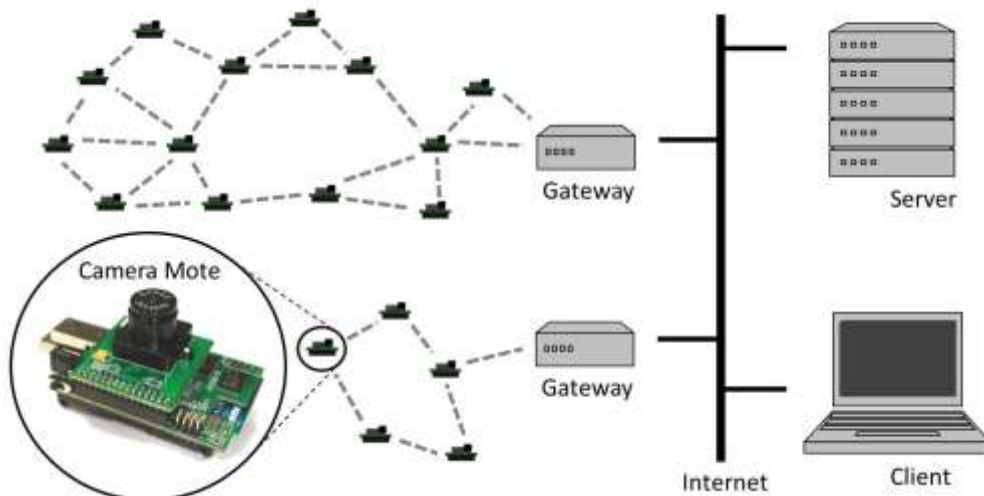


Figure 3.1. Réseau de capteurs d'images.

2. Spécificités des réseaux de capteurs d'images

Les réseaux de capteurs d'images se diffèrent de leurs prédécesseurs, les réseaux de capteurs scalaires principalement dans ce qui suit [16, 53, 54]:

- La quantité d'information associée à une image est plus grande à celle réservée à une information scalaire simple. En effet, les données fournies par un capteur scalaire sollicitent généralement quelques bits d'information (par exemple la carte d'acquisition MTS400 de Crossbow, les valeurs de température et d'humidité sont codées sur 14 bits par le convertisseur analogique/numérique et les valeurs de luminosité sur 12 bits). Dans ce cas, le transport de données nécessite seulement un seul paquet et la compression n'est pas donc exigée. Une image est au contraire conduite à l'emploi de plusieurs centaines ou milliers d'octets et donc son transport nécessite typiquement plusieurs paquets.
- La perte de paquets est tolérée dans les réseaux de capteurs d'images à cause de la redondance de flux visuel. En effet, les images naturelles ont des corrélations spatiales assez marquées entre les pixels voisins, c'est à dire qu'on peut reconstruire une version approximative de l'image originale même si une partie des informations est perdue dans le réseau. De ce fait, le protocole de communication de bout en bout n'a pas besoin de fournir un service de transport totalement fiable, et des économies d'énergie sont possibles à ce niveau. Ces corrélations spatiales sont exploitées dans les algorithmes de compression, mais en contrepartie, les images compressées perdent leur tolérance aux pertes de paquets
- Le champ de perception des capteurs scalaires est omnidirectionnel, c'est-à-dire que l'orientation du capteur n'influe pas sur la valeur de la grandeur physique mesurée. En plus, les données collectées par les capteurs voisins sont presque les mêmes et peuvent être considérées dans ce cas comme données redondantes puisque les nœuds sont très proches les uns des autres. Le champ de vision des nœuds-capteurs d'images est par contre restreint en direction. Dans ce cas, les données collectées par les capteurs voisins ne sont plus redondantes. La réduction de la consommation d'énergie par contrôle de la topologie (mise en sommeil des nœuds redondants) est donc plus complexe à mettre en œuvre dans le cas des réseaux de capteurs d'images.
- Contrairement aux réseaux de capteurs scalaires, les réseaux de capteurs d'images ont besoin à des ressources importantes en mémoire, en traitement et en puissance de communication pour pouvoir manipuler la grande quantité du flux visuel.
- Les nœuds capteurs d'images voisins surveillant la même petite région locale d'intérêt ont de multiples et de différentes vues de cette scène, comparativement aux capteurs de données scalaires où une valeur unique (par exemple, température) est collectée par tous les nœuds voisins (situés dans la même région).

Le tableau 3.1 résume les principales différences entre réseaux de capteurs scalaires et réseaux de capteurs d'images [54]:

	Réseaux de capteurs scalaires	Réseaux de capteurs d'images
Mémoire	Limitée	Limitée
Capacité de traitement	Faible	Faible
Complexité	Faible	Haute
Consommation d'énergie	Haute	Plus haute
Vitesse	Faible	Plus faible

Tableau 3.1. Comparaison entre réseaux de capteurs scalaires et réseaux de capteurs d'images.

3. Exemples d'application

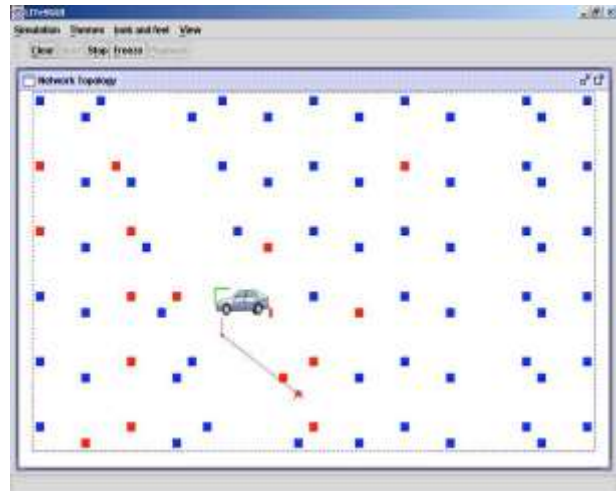
Parmi les nombreuses applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil, celles utilisant des capteurs d'images sont appréciées pour tout ce qui concerne la reconnaissance, le suivi et la surveillance de l'environnement. Les applications militaires (détection d'intrusions, localisation et traque de cible) sont les premières concernées.

3.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs d'images peuvent être très utiles pour l'espionnage militaire et la surveillance des champs de bataille. Dans l'expérience menée à la base MacDill de l'US air force à Tampa, Floride, « *Une ligne dans le sable - A line in the sand* » [55], un réseau de capteurs d'images a été déployé par une équipe de recherche de l'université d'Ohio. L'objectif du réseau était de détecter et suivre les mouvements d'objets mobiles intrus. Trois différents groupes d'objectifs ont été classés en tenant compte des caractéristiques détectables telles que leur quantité de métal et de leur rapidité de mouvement : personne non armée, soldat et véhicule blindé. Le réseau était constitué de plus de 90 nœuds dotés chacun d'un capteur de métaux, d'un radar doppler et d'une caméra.



(a)- Le nœud-capteur



(b)- Le logiciel permettant de visualiser le réseau et les cibles

Figure 3.2. Une ligne dans le sable [55]

3.2 Surveillance environnementale

Les réseaux de capteurs d'images sont aussi très utiles pour la surveillance environnementale. Comme les nœuds consomment très peu d'énergie, ils peuvent être déployés dans des endroits stratégiques pour de longues périodes de temps (de l'ordre de plusieurs mois), afin d'obtenir des images d'intérêt scientifique sur de larges zones géographiques, par exemple près des nids, des abreuvoirs et réserves d'eau naturelles. Grâce à cela, les observateurs de la nature peuvent étudier des changements dans l'environnement de certaines espèces animales ou végétales, afin de mieux comprendre leur comportement, en obtenant des scènes de lieux, qui peuvent être très éloignées, sans avoir besoin de se déplacer physiquement. En outre, des espèces naturellement timides qui rejettent la présence humaine pourraient être étudiées à travers les caméras, permettant son étude et l'ouverture de nouvelles portes à la science.

Quelques expériences peuvent être signalées pour ce type d'application pour l'observation de la faune et de la flore en milieu naturel. Par exemple, le projet *PODS* [56] développé par l'université d'Hawaii pour l'étude à long terme des espèces végétales rare et en danger. Les capteurs d'images nommés *PODS* sont déployés dans le parc national des volcans d'Hawaii. Pour la surveillance des plantes et leur environnement, le réseau utilise des capteurs d'images, de température, d'humidité, de vent, de chute de pluie et de radiation solaire. *PODS* collecte la température chaque 10 minutes et les images sont collectées chaque une heure et ensuite transmises à l'utilisateur final.

Comme rapporté dans [57], un petit nœud-capteur de surveillance à usage général pour les champs appelés « serveur de champs » (figure 3.3), a été développé afin qu'il puisse facilement être installé à l'extérieur dans le but de réaliser la surveillance à distance et à long terme des champs. Les serveurs de champ sont équipés de serveurs Web pour gérer différents capteurs y compris les caméras, et d'un réseau local sans fil pour fournir un réseau de

transmission à haute vitesse et à bas prix. En installant de nombreux nœuds-capteurs dans un champ, nous avons construit un système de surveillance à distance et à long terme qui peut facilement traiter diverses données à partir de n'importe quel endroit, à tout moment et ainsi réduire la quantité d'effort requise pour un utilisateur.



Figure 3.3. Un serveur de champs standard.

Le projet *BearCam* [58] est un autre exemple d'application pour l'observation de la faune et de la flore. Ce projet a été déployé en automne 2005 près de cercle polaire arctique, avait comme objectif de surveiller les ours bruns « grizzly », juste à la sortie de leur sommeil hivernal. Cette application aide les biologistes à collecter des données utiles pour leurs études sur le comportement des ours.

Dans l'article présenté dans [59], un réseau de capteurs d'images pour la surveillance du comportement des oiseaux pendant la saison de nidification a été déployé pour répondre aux questions biologiques relatives au dépôt, incubation et éclosion des œufs. Ce système composé de 19 caméras *Cyclops* a été déployé dans la réserve des Montagnes James San Jacinto, Californie, dans les nids d'oiseaux. Les biologistes ont pu trouver en ligne, en temps quasi-réel, l'accès aux images qui peuvent être utiles pour obtenir des données sur la réponse à leurs questions biologiques.

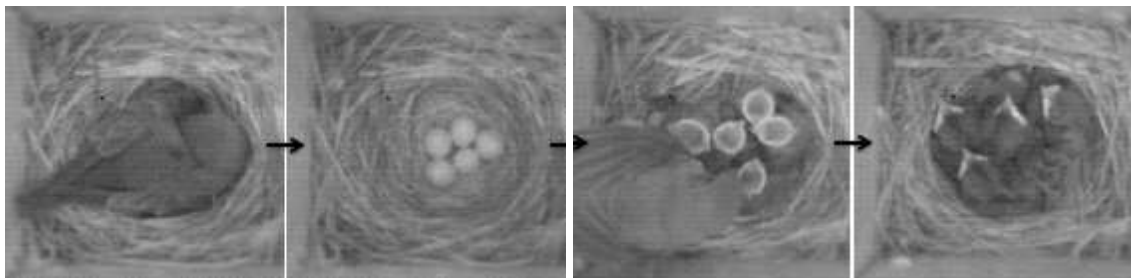


Figure 3.4. Série d'images capturées au cours de la phase de post-éclosion [59]

3.3 Télé-relevé des compteurs de mesure

Les réseaux de capteurs d'images sans fil peuvent être très utiles pour les applications de mesures dans le domaine de télé-relevé des compteurs de l'énergie, de gaz ou compteurs d'eau. Un réseau de capteurs d'images a été utilisé dans l'étude de cas: l'utilisation de capteurs d'images sans fil au télé-relevé de compteurs d'eau [60]. Le capteur a été convenablement conçu pour être installé pour couvrir la face avant de compteurs traditionnels et d'être à distance interrogé par un opérateur humain pour télécharger une photo du tableau, sans accéder au site d'installation. Le capteur est supposé être interrogé deux fois par mois et les piles doit être changé avec une fréquence aussi bas que possible d'une fois chaque année.



Figure 3.5. Une image d'une lecture d'un compteur d'eau.

3.4 Suivi du trafic routier

Des réseaux de capteurs d'images peuvent être déployés pour le suivi et le contrôle de la circulation routière. Des algorithmes d'analyse d'images peuvent être utilisés pour faire le dénombrement des véhicules ou des personnes pour estimer le niveau de trafic en fonction des heures de la journée.

4. Dispositifs de capture d'images

Les capteurs d'images de faible consommation d'énergie ont fait l'objet de grands progrès au cours des dernières années. En réponse à la forte demande du marché, nous pouvons trouver des capteurs d'images de plus en plus petits et de résolutions de plus en plus grandes, destinées principalement à être intégrés dans les téléphones portables, les ordinateurs portables, et les PDAs. Cependant, ces dispositifs sont dotés de ressources importantes en termes de mémoire et vitesse de calcul. Les développements ont été centrés sur l'offre de meilleures qualités d'image et de taux de compression plus élevés puisque la demande des utilisateurs porte surtout sur ces aspects. L'autonomie en énergie est aussi importante, mais c'est de l'ordre de la journée. Dans les réseaux de capteurs d'images sans fil, comme dans les réseaux de capteurs en général, le problème de la consommation d'énergie est d'un autre ordre de grandeur, les nœuds devant avoir une autonomie de l'ordre du mois, voire de l'année. Dans beaucoup d'applications, la résolution des images n'a pas besoin d'être très élevée. Pour

compter des œufs dans un nid par exemple, une image de 64×64 pixels sur 16 ou 32 niveaux de gris est suffisante.

Plusieurs études et classifications des plateformes et cartes de vision qui peuvent exister dans la littérature ont été abordées et décrites dans [61, 62, 63].

4.1 Caméras basées sur des composants commerciaux

Plusieurs noeuds et cartes de capture d'images pour des applications de réseaux de capteurs sans fil ont été développés en utilisant des composants électroniques commerciaux (dit en anglais composants COTS - *Commercial Off-The-Shelf*), par exemple, des caméras CMOS, des microcontrôleurs, des mémoires, ..etc.

✪ *MeshEye* :

La caméra MeshEye [64] est principalement orientée vers les applications dans le domaine de la surveillance intelligente distribuée. Sa conception est caractérisée par l'implémentation d'une interface directe entre le processeur embarqué et les différents capteurs d'images. MeshEye intègre un microcontrôleur Atmel AT91SAM7S, une mémoire flash MMC/SD, deux imageurs ADNS-3060 sont utilisées, une caméra VGA ADCM-2700 et un module radio CC2420 de Texas Instruments conforme à la norme 802.15.4 est utilisé pour la connexion sans fil. Ce mote peut être alimenté via une interface mini-usb ou par des batteries standard AA.

✪ *Cyclops* :

La caméra Cyclops [65] a été développée par les laboratoires Agilent et le CENS (Center for Embedded Network Sensing) de l'UCLA. Elle permet la capture et le traitement d'images de faible résolution avec relativement faible consommation d'énergie. Quatre versions de Cyclops ont été développées : Cyclops1, Cyclops2A, Cyclops2B et Cyclops2C. La caméra Cyclops est composée d'un module CMOS de capture d'images de moyenne qualité ADCM-1700 (Agilent), un processeur RISC 8-bits ATmega128L de Atmel avec 128Ko de mémoire flash pour le stockage du code de l'application et 4Ko de mémoire SRAM, un circuit CPLD XC2C256 CoolRubber de Xilinx, une mémoire SRAM TC55VCM208A de Toshiba avec 64Ko et une mémoire flash AT29BV040A d'Atmel pour le stockage de données. La caméra Cyclops possède un connecteur de 51 pins lui permettant d'être enfichée sur un mote Mica2 ou MicaZ.



Figure 3.6. Caméra cyclops attachée à un mote Mica2.

La dernière version de Cyclops supporte différentes dimensions d'image. La résolution maximale pour le capteur ADCM est CIF (352x288), mais le microcode programmé par défaut limite la taille maximale à 128 x 128 pixels, dû probablement à des restrictions du matériel. Elle peut générer des images de trois formats différents : monochrome codé 8bpp, couleur RGB (24bpp) et couleur $YCbCr$ (16bpp). La carte Cyclops peut aussi avoir différents états, qui définissent l'énergie consommée par la plateforme. Par exemple, en capture d'image, Cyclops consomme 42mW, 0.7mW en mode sommeil et moins de 1 μ W en état OFF.

Cyclops est une bonne initiative dans la route vers un capteur d'image peu gourmand en énergie. Cependant, ses consommations d'énergie pourraient être trop importantes pour des applications de réseaux de capteurs de longue durée. En outre, Cyclops présente des contraintes surtout dues à la faible vitesse du processeur qui induit des temps de traitement assez longs.

★ CMUcam3 :

CMUcam3 est une plateforme de vision embarquée programmable [66]. La CMUcam3 a été développée à l'Institut de robotique de l'Université Carnegie Mellon et c'est la dernière d'une série de caméras embarquées. Elle est basée sur un processeur ARM7 (un microcontrôleur NXP LPC210), avec 64Ko de mémoire RAM et 128Ko de mémoire flash, et un buffer de vidéo FIFO Averlogic AL4V8M440 de 1Mo. Elle comprend aussi une caméra CMOS Omni-vision OV6620 ou une OV7620. La CMUcam3 supporte la résolution CIF avec un capteur de couleur RGB et peut faire un peu de traitement d'image de base sur son propre processeur.

Des bibliothèques open source et des exemples de programmes sont fournis pour développer des programmes en C pour la caméra. Cette caméra peut être connectée aux nœuds capteurs sans fil tel que le Tmote Sky, Telos ou bien encore le FireFly.



Figure 3.7. CMUCam3 attachée à un mote TMote Sky

Afin d'obtenir des économies d'énergie, la caméra peut travailler selon trois modes d'opérations : *active*, *idle* et *power down*. Cependant, la consommation d'énergie de la CMUcam3 est bien plus grande que celle de la caméra Cyclops. Le bénéfice réel de la CMUcam3 est dans la rapidité de traitement.

✧ Plateforme basée iMote2

Cette plate-forme de vision pour réseaux de capteurs sans fil est assez simple [67]. Elle se compose d'une interconnexion directe entre le nœud Imote2, et un imageur CMOS commercial omni-vision (OV7649) via une interface série. Cet imageur peut capturer des images couleur VGA (640x480px) à 30fps et QVGA (320x240px) à 60fps avec une consommation de puissance de 44 mW. Le Contrôle de l'exposition automatique, contrôle de gain et la balance des blancs sont des fonctionnalités supplémentaires disponibles. En mode entièrement actif, avec un mote Imote2 travaillant à 104MHz et un taux d'image de 8fps, le système consomme 322mW. Une image instantanée de cette plateforme est illustrée sur la figure 3.8.



Figure 3.8. Plateforme basée iMote2

✧ Carte Stargate avec Webcam

Stargate est une plate-forme de traitement pour les réseaux de capteurs sans fil qui peut être lui-même utilisé comme un nœud capteur [63]. Elle a été développée par Intel et a été vendue par Crossbow. Cette plate-forme est souvent choisie pour les réseaux de capteurs de vidéo. La carte Stargate peut être connectée à une Webcam. Ce nœud fournit une résolution d'imagerie moyenne. Puisque les radios de faible puissance sont limités, la diffusion en direct de la vidéo n'est possible qu'avec une connexion Wi-Fi, la carte Stargate n'a pas d'interface sans fil du tout mais elle peut être connectée à un nœud capteur ou à une carte Wi-Fi. Le système d'exploitation linux est normalement utilisé. Le processeur est un Intel modèle PXA255 d'une fréquence de 400 MHz. Une carte Stargate attachée à une Webcam est illustrée sur la figure 3.9.



Figure 3.9. Plateforme Stargate de Crossbow attachée à un Webcam

4.2 Caméras conçues spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil

Une proposition différente pour la conception de capteur d'image numérique a été introduite par [68]. Le capteur d'image ALOHA, un imageur conçu et réalisé en technologie CMOS. Le prototype, conçu spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil, fonctionne comme suit : chaque pixel qui atteint un seuil de tension bien déterminé (proportionnel à la quantité de lumière collectée par la surface photosensible) envoie une requête à un circuit spécifique pour lui permettre de transmettre sa valeur. Pour résoudre le problème d'accès multiples au bus de données, la technique d'accès ALOHA est utilisée (lorsqu'un pixel a de l'information à transmettre, il envoie ses données sans se préoccuper des autres pixels. S'il y a une collision, tous les pixels intervenants doivent retransmettre leurs valeurs ultérieurement).

Jusqu'à présent, deux versions du capteur d'images ALOHA ont été développées :

- ALOHAim1, un capteur d'image disposant d'une matrice de 32x32 pixels et d'un circuit détecteur de contention (ou collision) analogique [69].
- ALOHAim2, dispose d'une matrice de 64x64 pixels (4 quadrants de 32x32 pixels) et d'un détecteur de collision numérique [68].

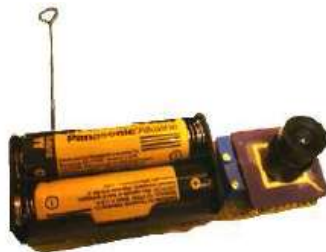


Figure 3.10. Un imageur ALOHA attachée à un mote Mica2

La consommation électrique de ALOHAim1 est d'environ $115\mu\text{W}$ pour une alimentation numérique et d'environ $680\mu\text{W}$ pour une alimentation en analogique. Pour ALOHAim2, la consommation d'énergie atteint environ $5.72\mu\text{W}$ par quadrant.

5. Etat de l'art sur la compression et la transmission d'images dans les réseaux de capteurs sans fil

La plupart des études sur les réseaux manipulant des données scalaires ont typiquement assumées que les coûts computationnels, y compris acquisition et compression, sont insignifiants comparés aux coûts de la communication [70]. Cette hypothèse est seulement valide que dans le cas des réseaux de capteurs scalaires manipulant des grandeurs physiques légères (tels que la température, l'humidité, la pression) où le coût du calcul de la compression, est négligeable comparé au coût de la communication. Dans le cas de réseaux de capteurs d'images, cette hypothèse ne peut être tenue, vu la quantité énorme du flux visuel.

Habituellement, la transmission d'images précédée par compression est un choix idéal afin de gagner en temps et en énergie. Des algorithmes de compression existants ont fourni d'excellentes performances en termes de rapport débit/distorsion, mais ils ne sont pas éligibles dans le contexte des réseaux de capteurs. Ces algorithmes, en général, sont utilisés à des fins de stockage, ou encore, utilisés quand aucune restriction de temps ou d'énergie soit nécessaire [53]. Par exemple, le travail mené dans [60], où les auteurs ont évalué les performances de plusieurs algorithmes traditionnels de compression d'images sur un nœud-capteur. Les résultats ont montré en effet que des algorithmes bien connus comme JPEG, JPEG2000 ou SPIHT ont un coût d'énergie bien supérieur au gain qu'ils amènent. Autrement dit, le capteur épuiserait plus vite son énergie en envoyant des images compressées que des images non compressées.

On peut classer les travaux relatifs aux réseaux de capteurs d'images sans fil sous la contrainte de la limitation des ressources selon trois catégories : travaux portant sur la compression locale, d'autres sur la compression distribuée et finalement ceux portant sur la transmission d'images.

5.1 Compression d'images à la source

Comme l'émetteur-récepteur radio est un des composants les plus gourmands en énergie, la compression d'images à la source semble une réponse naturelle au problème de la consommation d'énergie de la transmission d'images sur un réseau de capteurs. Cependant, la limitation des nœuds-capteurs en termes de capacité mémoire ainsi que de vitesse du processeur rend inefficace en pratique l'exécution des algorithmes de compression standards. Ainsi, plusieurs auteurs ont proposé d'adapter les algorithmes de compression bien connus comme JPEG, JPEG2000 ou SPIHT aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil.

Dans [71], les auteurs proposent une technique de compression, caractérisé par une faible complexité de calcul et un taux de compression élevé. Leur choix repose sur la combinaison « HWT - EZW – RLE » (*Haar Wavelet Transform – Embedded Zerotrees of Wavelet transform – Run Length Encoding*), permettant une performance de compression similaire à JPEG2000, mais avec un coût de calcul beaucoup plus faible. La HWT est la plus simple des transformées en ondelettes, mais elle est le plus efficace en termes de complexité de calcul, temps de traitement et besoin en mémoire. L'encodage EZW est la technique qui répond le mieux au compromis « coût de calcul - efficacité de compression » par rapport à des techniques similaires telles que le codage SPIHT. RLE est une forme très simple de compression de données sans perte, ce qui est bien adapté pour une utilisation avec HWT et EZW.

Dans l'article présenté dans [72], les auteurs ont proposé un système de compression d'images extrêmement rapide, de faible complexité et efficace en énergie pour les dispositifs limités en ressources utilisés dans les applications temps réel. L'optimale zonale 2×2 BinDCT basée sur la factorisation de Chen est utilisée comme transformée. Elle est unique

puisque elle extrait et code directement le coefficient DC⁶ et les trois premiers coefficients AC⁷ d'un bloc 8x8 en utilisant uniquement que des opérations de décalage et d'addition. Le codage de Huffman classique ou encore le codage arithmétique ne sont pas utilisés, d'où la complexité de calcul est considérablement réduite. Le besoin en mémoire est également minimisé parce que l'utilisation d'une table ou d'une liste n'est pas requise.

Le système de compression d'image proposé dans [73] repose sur la structure conventionnelle <Transformation – Quantification - Assignment de mots de code>. L'étape de transformation est basée sur l'algorithme rapide Cordic-Loeffler « CL-DCT » qui fonctionne dans le domaine 1D-DCT et utilise que des opérations d'addition et de décalage. L'étape de quantification utilise la table de quantification recommandée par la norme JPEG. L'étape d'assignation de mot de code est basée sur le parcours en zigzag, le codeur Golomb et MQ. Le codeur MQ est une implémentation approximative du codage arithmétique adaptée pour les données binaires. L'utilisation du codage de Golomb et MQ au lieu du codage de Huffman ou encore le codage arithmétique est nettement rentable de point de vue complexité de calcul et besoin en mémoire. La robustesse contre la perte de paquets est obtenue en combinant le paradigme d'encodage indépendant de bloc avec l'entrelacement des blocs codés. D'une part, le codage indépendant de bloc fournit un appui très fort pour la résistance aux erreurs, d'autre part, l'utilisation de technique d'entrelacement permet de dé-corréler spatialement les blocs de pixels voisins par leur mise dans différents paquets.

Les auteurs dans [74], proposent d'adapter l'algorithme JPEG en combinant une approche par factorisation de la matrice avec une approche par sélection zonale des coefficients. Cela revient à intégrer dans une chaîne de compression de type JPEG une DCT zonale rapide. Ce qui permet de réduire le nombre de coefficients à calculer, à quantifier et à coder dans chaque bloc, entraînant mécaniquement des économies d'énergie sur toute la chaîne de compression.

Les auteurs dans [75], ont proposé un algorithme de compression ne faisant appel à aucune transformée, nommé TiBS (Tiny Block-Size Coding), qui opère sur des blocs de taille 2x2 pixels. L'utilisation de blocs de petites tailles pour l'encodage de l'image, permet à TiBS de renforcer la tolérance aux pertes de données. Un protocole de communication non fiable (sans acquittement ni retransmission) peut être adopté pour l'acheminement des paquets de données, et des économies d'énergies peuvent être trouvées à ce niveau.

Pour des fins de validation, TiBS ainsi qu'un algorithme JPEG ont été implémentés sur un vrai nœud caméra sans fil composé d'un mote Mica2 et un imageur Cyclops. Les résultats expérimentaux montrent que TiBS ne fournit pas des taux de compression élevés, mais il permet une communication d'images efficace en énergie, même lorsque le taux de perte de paquets est élevé. TiBS s'inspire de deux règles essentielles pour un codage d'images robuste:

⁶ Composante Directe : représente la valeur moyenne d'un bloc 8x8

⁷ Composantes Alternatives : Il reste 63 composantes de ce type, Cela représente les amplitudes des fréquences spatiales horizontales et verticales dans le bloc.

- Le premier est d'effectuer la compression d'image par blocs de pixels indépendants afin d'assurer que les blocs codés sont correctement reçus au sink, seront toujours décodable.
- Le second est d'effectuer l'entrelacement des blocs de pixels encodés. La logique d'entrelacement permet de dé-corréler spatialement les blocs de pixels voisins par leur mise en paquets, qui sont très éloigné les uns des autres dans la séquence de transmission. Si le schéma d'entrelacement est bien conçu, un bloc manquant de pixels peut être entouré de pixels correctement reçus. En procédant ainsi, le rendement d'un procédé de dissimulation d'erreur peut être sensiblement amélioré.

5.2 Compression d'images distribuée

La nature distribuée des réseaux de capteurs sans fil a poussé plusieurs groupes de recherche à mener des travaux qui concernent la compression distribuée d'images.

Dans la compression distribuée, le traitement de l'image sera réparti sur plusieurs nœuds de manière coopérative. Le principe est de découper l'image en plusieurs blocs et de les envoyer à des nœuds voisins pour qu'ils fassent, chacun, une partie du traitement.

Les auteurs dans [76], ont développé un système de coopération pour distribuer la charge de travail pour le calcul de la transformée en ondelette en utilisant le standard JPEG2000. Deux méthodes d'échange de données ont été proposées : une méthode de transformée parallèle et une méthode par carrelage.

- **Méthode de transformée d'ondelettes parallèle :** Cette première méthode consiste à appliquer une transformée d'ondelettes parallèle. La figure 3.11 illustre le schéma de partitionnement des données pour un seul niveau de décomposition en ondelette. L'image capturée est divisée en n blocs de données R_1, \dots, R_n , consistant en une ou plusieurs lignes. Par la suite, ces blocs sont transmis aux nœuds voisins de la source afin d'effectuer chacun, la transformée en ondelettes unidimensionnelle (1-D) sur chaque bloc de données qui lui a été destiné. Le résultat de la transformé est transmis à un nœud dit agrégat (central). Dès réception du résultat, celui-ci passe à la division de données cette fois en m blocs I_1, \dots, I_m composé de colonnes. Ces blocs sont transmis aux nœuds voisins qui effectuent alors la transformée en ondelettes (1-D) encore une fois et les renvoient au nœud agrégat. Après récupération de tous les blocs, on obtient ainsi le résultat de transformation bidimensionnelle (2-D) en ondelettes de l'image.

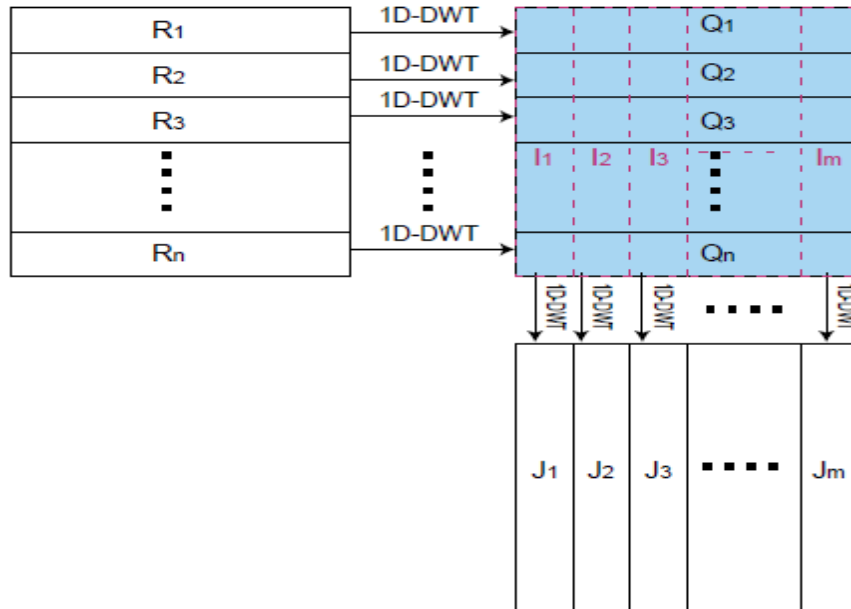


Figure 3.11. Méthode de transformée d'ondelettes parallèles

- **Méthode par carrelage** : Dans cette méthode dite par carrelage, l'image capturée est divisée en tuiles (de blocs de données), qui sont distribuées par la suite à certains nœuds voisins. Chacun de ces nœuds effectuent la transformation en ondelettes bidimensionnelle (2-D) sur ces tuiles indépendamment des autres nœuds. Une fois qu'un nœud termine sa transformation, il envoie le résultat à un nœud agrégat. Le traitement des blocs d'une manière indépendante mène à une perte d'information. Généralement, cette perte est petite quand le nombre de bloc est petit. L'objectif de ce système de coopération est de répartir plus équitablement la dépense d'énergie entre les nœuds afin de prolonger la durée de vie du réseau. Les résultats de simulation rapportés dans [76] montrent que le réseau a une durée de vie quatre fois plus grande avec ce système de coopération en comparaison à la compression locale de l'image.

Un autre schéma de compression distribuée d'images de faible complexité et efficace en énergie qui est approprié pour les réseaux de capteurs sans fil restreint en ressources, a été documenté dans [77]. Les principales caractéristiques de ce système sont :

- La transformée (LBT) est utilisée dans le schéma de compression au lieu de la transformée en cosinus discrète (DCT) ou la transformée en ondelettes discrète (DWT). Par rapport aux méthodes basées sur la DCT, l'algorithme proposé améliore l'efficacité du codage en prenant en compte la corrélation spatiale inter-bloc et résout le problème des effets de blocs engendré par la DCT. Par rapport à celles basées sur la DWT, l'algorithme proposé réduit considérablement la complexité de calcul. De plus, il est très approprié pour une implémentation distribuée dans le réseau de capteurs.
- le codage de Golomb et la Quantification multiple (MQ) sont utilisés au lieu du codage de Huffman ou du codage arithmétique, de sorte que la complexité de calcul

est considérablement réduite. En outre, le besoin en mémoire est minimisé car l'algorithme proposé ne nécessite pas aucune table ou liste lors du codage.

- Une implémentation distribuée du schéma de compression basée sur une architecture clustérisée permettant de surmonter la limitation de calcul et de l'énergie des nœuds-capteurs sous une exigence spécifique de la qualité d'image.

5.3 Transmission d'images

La plupart des recherches dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil se concentrent sur les protocoles de communication à tous les niveaux qui doivent être efficaces en termes d'énergie. En dépit de la grande quantité de propositions de protocoles de communication, il y a encore peu de propositions pour le cas particulier de la transmission d'images.

Pour éviter le problème du trou d'énergie, un système de transmission d'image en cluster à deux-sauts a été proposé dans [78]. Deux types de nœuds-capteurs existent dans ce système: nœuds-capteurs normaux et nœuds-caméra. Le nœud équipé d'une caméra agit comme un cluster-head et forme son cluster caméra en premier. Les membres de ce cluster caméra sont les nœuds-capteurs normaux de proximité. Ensuite, tous les nœuds-capteurs, en outre, ceux équipés d'une caméra sont organisés en cluster normaux par LEACH [41].

Les nœuds capteurs normaux dans le cluster caméra reçoivent les images en provenance du nœud-caméra, partagent les tâches de compression d'images et prennent la responsabilité de transmettre les données compressées au cluster-head normal. Avec l'ajustement adaptatif du rayon de transmission par le nœud équipé d'une caméra dans l'affectation de cluster caméra et des tâches en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds-capteurs normaux, ce schéma allège considérablement le fardeau de la consommation d'énergie de traitement sur le nœud équipé d'une caméra et équilibre l'énergie résiduelle des nœuds-capteurs.

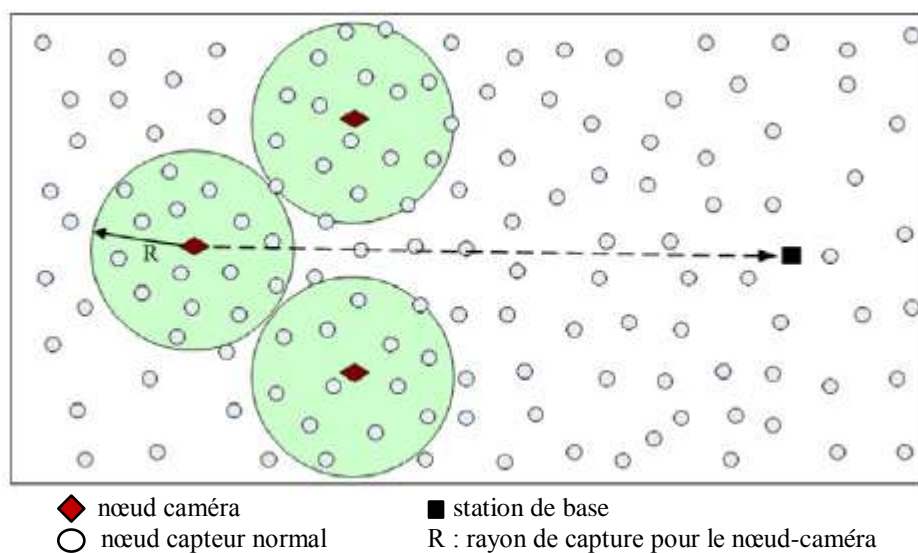


Figure 3.12. Modèle du réseau [78]

Les auteurs dans [79], proposent une méthode rentable pour la priorisation dynamique (à la volée) des macro-blocs d'images. Cette technique repose sur l'emploi d'un schéma simple de codage au niveau du nœud source par marquage de blocs de données comme «important» et «non-important» en fonction des informations qu'ils contiennent. Si on considère que les chemins dans le réseau peuvent être divisés en deux, fiables et non fiables, il est judicieux de transférer les paquets importants à travers les chemins fiables et celle jugés non-importants à travers les chemins non fiables.

Le principe de macro-bloc priorisation [79] s'inspire de la théorie d'information de Shannon⁸ (1948), qui indique que la redondance qui est déjà inclus dans les données aide à lutter contre les imperfections du canal de transmission. A la lumière de ça, au lieu de supprimer par compression la redondance qui est naturellement inclus dans les données de l'image, la redondance peut être exploitée pour renforcer la robustesse des images transmises dans les réseaux de capteurs.

Dans l'article [80], les auteurs proposent un schéma de transmission d'image auto-adaptatif axée sur des considérations d'efficacité énergétique afin d'être appliqué aux réseaux de capteurs sans fil. Il est basé sur la transformée en ondelettes de l'image et la transmission semi-fiable pour assurer la conservation de l'énergie. La transformée en ondelettes de l'image fournit une décomposition de données en plusieurs niveaux de résolution, de sorte que l'image peut être divisée en paquets de différentes priorités. Le système de transmission d'image est semi-fiable au sens où il n'est pas obligatoire de transmettre tous les paquets jusqu'au bout, excepté bien sûr ceux de la priorité « 0 ».

Dès qu'un paquet de données a été formé et sa priorité affectée, il est prêt à être envoyé sur le réseau. La source va transmettre les paquets dans l'ordre dans lequel ils ont été préparés. Avec une stratégie de priorité basée sur les résolutions de l'image, la transmission commence pour celles avec la plus grande priorité, puis se poursuit avec ceux de la priorité immédiatement inférieure, et ainsi de suite jusqu'à ceux de priorité « p-1 » (voir figure 3.13).

⁸ Claude Shannon est un ingénieur en génie électrique et mathématicien américain. Il est l'un des pères, si ce n'est le père fondateur, de la théorie de l'information.

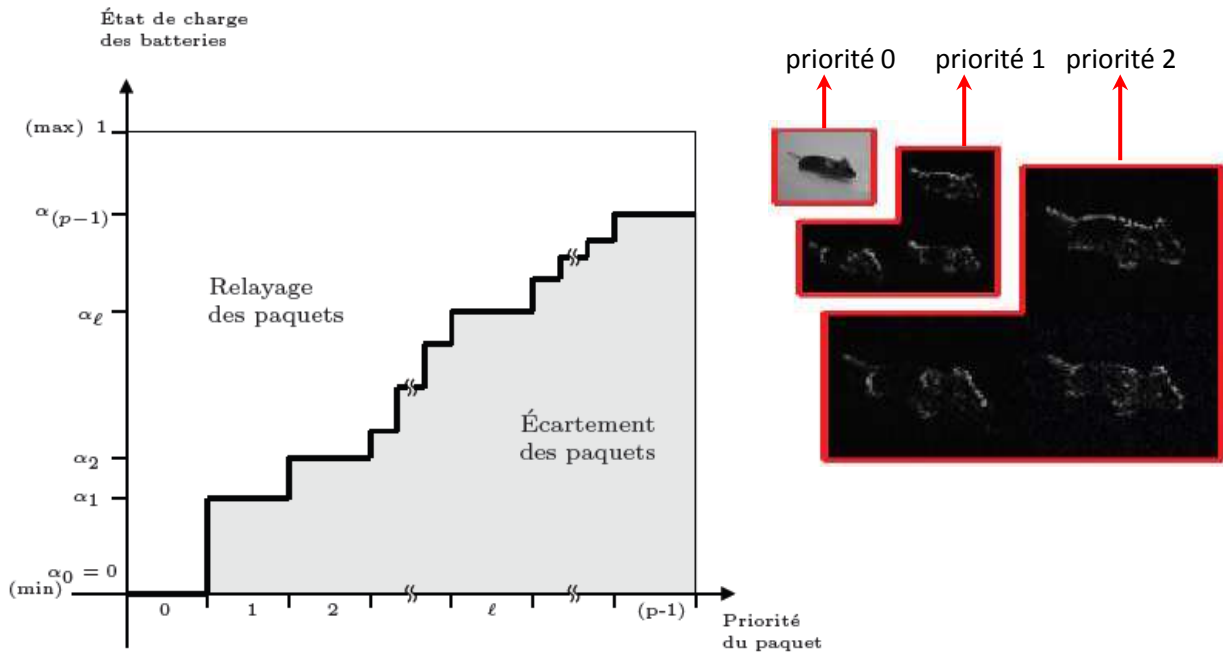


Figure 3.13. Politique de transmission de paquets en fonction de priorité [80].

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un cas spécifique de réseau de capteurs sans fil : les réseaux de capteurs d'images. Nous avons introduit leur apparition et exposé leurs spécificités les plus frappantes, ainsi que leurs applications potentielles qui commencent à devenir de plus en plus nombreuses. Nous avons clôturé ce chapitre en faisant un petit tour sur les travaux relatifs aux réseaux de capteurs d'images trouvés dans la littérature.

Comparés aux réseaux de capteurs scalaires qui manipulent des données scalaires simples comme la température ou l'humidité, les réseaux de capteurs d'images traitent un volume d'informations beaucoup plus grand. Nous nous intéressons à la compression d'images pour diminuer la quantité de données à communiquer afin de réduire la dépense en énergie.

Bien que les algorithmes de compression standards comme JPEG ou JPEG2000 ont beau fourni d'excellentes performances en termes de rapport débit/distorsion, des expériences ont démontré que ces algorithmes sont beaucoup trop coûteux en énergie, plus coûteux que la transmission d'une image sans compression. Plusieurs travaux ont été proposés pour adapter ces algorithmes aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil et les rendre ainsi moins gourmands en énergie.

Chapitre 4.

Compression d'images

Sommaire

1. Introduction.....	48
2. Critères d'évaluation des algorithmes de compression.....	48
3. Méthodes de compression avec pertes.....	49
3.1 Techniques de dé-corrélation intra-image.....	49
3.1.1 La transformée en cosinus discrète (DCT).....	50
3.1.2 La transformée en ondelettes discrètes (DWT).....	53
3.2 Quantification.....	54
3.2.1 La quantification scalaire.....	55
3.2.2 La quantification vectorielle.....	55
3.3 Codage entropique.....	57
3.3.1 Codage de Huffman.....	57
3.3.2 Codage arithmétique.....	59
3.3.3 Codage de Golomb.....	60
4. Réduction DCT.....	61
4.1 L'approche par factorisation de la matrice (DCT rapide).....	61
4.2 L'approche zonale (DCT réduite).....	63
5. Conclusion.....	65

1. Introduction

Les images naturelles sont extrêmement volumineuses et nécessitent des capacités de traitement, de stockage et de transmission puissantes pour pouvoir les manipuler. Pour pallier à ce problème qui peut influencer la faisabilité de traitement, de stockage et de transmission des images ; des techniques de compression d'images ont été élaborées pour compacter leur représentation numérique. Ce chapitre présente une introduction générale sur les techniques de compression d'images sans et avec pertes, en particulier celles qui intègrent la transformée en cosinus discrète (DCT) dans le processus de compression. Cependant, les techniques de compression basées sur l'utilisation de la DCT demeurent coûteuses pour une implantation dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil à cause la complexité calculatoire de la DCT. C'est pour cela qu'on a ajouté à la fin de ce chapitre une section permettant de présenter les principales méthodes de réduction de la complexité de la DCT à savoir la DCT rapide et la DCT réduite.

Les techniques de compression se divisent en deux catégories principales : compression sans perte (conservative de l'image) ou réversible et compression avec perte (destructive de l'image) ou irréversible.

Les techniques de compression avec pertes sont préférées à celles sans pertes pour deux raisons majeures :

- Il permet d'atteindre des taux de compression très élevé
- Nos yeux perçoivent peu les petits détails et davantage les variations de lumière que de couleurs.

2. Critères d'évaluation des algorithmes de compression

Le **taux de compression** est une mesure de la performance d'un algorithme de compression de données. Il est défini comme le rapport du volume des données après compression sur le volume initial des données, et généralement exprimé en pourcentage. Le taux de compression ainsi défini est donné par la formule :

$$\tau = \frac{\text{volume en bits de l'image compressée}}{\text{volume en bits de l'image initiale}} \quad (4.1)$$

Classiquement, pour l'évaluation de **la qualité d'image**, où plutôt la mesure de la dégradation engendré par les traitements (compression), on se base sur l'erreur quadratique moyenne (*MSE - mean square error*) :

$$MSE = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |x_{rec}[i, j] - x[i, j]|^2 \quad (4.2)$$

Dans la littérature, les **mesures de qualité** sont en général exprimées en rapport signal sur bruit, soit, dans le cas d'un signal représenté sur 8 bits :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{L^2}{MSE} \right) / L : \text{nombre d'échelons de luminance (255 pour 8 bits)} \quad (4.3)$$

Cependant, ces critères ne sont pas suffisants pour l'évaluation des algorithmes de compression dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil. Les autres critères à considérer sont : la complexité calculatoire de l'algorithme de compression, l'énergie consommée lors du codage et la robustesse aux erreurs de transmission.

3. Méthodes de compression avec pertes

Les algorithmes de compression avec pertes comportent généralement trois étapes, (voir figure 4.1). La première étape est la transformation, ayant pour but de transformer le domaine de représentation de l'image. Elle permet de passer d'un domaine spatial à un domaine fréquentiel. La deuxième étape est la quantification qui permet de réduire l'espace de représentation des données. Finalement, l'étape du codage entropique permet d'encoder les données quantifiées suivant un code binaire à longueur variable.

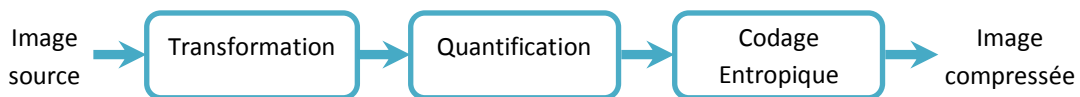


Figure 4.1. Schéma général de la compression avec pertes

Si la compression sans perte consiste à enlever les redondances présentées dans l'image. Elle ne permet pas en effet des taux de compression élevés. Pour obtenir une compression plus élevés, quelques informations seront négligées par la compression avec pertes. Les améliorations apportées par la compression avec pertes ne sont pas tout simplement dues à l'élimination des données redondantes, mais plutôt à l'abandon des informations estimées non pertinentes, comme par exemple les informations sur les détails non perceptible facilement à l'œil nu.

3.1 Techniques de dé-corrélation intra-image

Les images naturelles contiennent une très grande redondance statistique dans le domaine spatial. La propriété statistique fondamentale sur laquelle les techniques de compression se fondent, est la corrélation entre pixels. Les pixels d'une image sont normalement fortement corrélés spatialement (d'un pixel à ses voisins). Cette corrélation peut être exploitée pour éliminer les pixels « redondants ».

Dans une image les détails se répètent fréquemment sur un petit nombre de pixels, on dit qu'ils ont une fréquence élevée : c'est le cas pour les bords et les contours dans une image. Au contraire, les fréquences basses correspondent à des variations qui se répètent peu car, diluées sur de grandes parties de l'image, par exemple des variations de fond de ciel.

Les algorithmes de compression d'images tels que JPEG ou JPEG2000 intègrent une étape de transformation utilisée pour analyser efficacement les corrélations spatiales entre les pixels voisins de la même image. Cette étape de transformation permet de produire des coefficients non corrélés permettant d'optimiser le traitement dans les étapes ultérieures de quantification et de codage entropique.

Le but de la transformée dans un schéma de compression est double. En effet, en plus de réorganiser l'information de manière intelligente, elle doit représenter les composantes importantes d'un signal avec le moins d'éléments possibles : c'est ce qu'on appelle donner une **représentation creuse du signal** ou, de manière équivalente, **compacter l'énergie** [81].

Dans ce qui suit, nous allons expliquer, brièvement, les principes des transformées employées en compression et comparer deux approches différentes à savoir la transformée en cosinus discrète [82] et la transformée en ondelettes [83].

3.1.1 La transformée en cosinus discrète (DCT)

La transformée en cosinus discrète [82] est une transformation mathématique complexe qui a pour but de transformer le domaine de représentation de l'image d'un domaine spatial à un spectre de fréquence. En effet, l'œil humain perçoit peu les détails de l'image, le but de la DCT est donc de passer dans un domaine fréquentiel, ce qui permettra de projeter les données dans un espace plus propice à la compression et ainsi supprimer certaines données non perceptibles facilement à l'œil nu, cela revient à supprimer les fréquences hautes de l'image et conserver les fréquences basses représentant l'intégralité de l'image.

La définition de la DCT unidimensionnelle (DCT 1-D) est donné par l'équation (4.4)

$$f(u) = \sqrt{\frac{2}{N}} C(u) \sum_{i=0}^{N-1} \text{pixel}(i) \cos\left(\frac{\pi(2i+1)u}{2N}\right) \quad (4.4)$$

Avec $u=0,1,\dots, N-1$ et $C(u)$ définit comme suit : $C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{si } u = 0 \\ 1 & \text{autrement} \end{cases}$

La DCT 1-D est utilisée en traitement des signaux unidimensionnels. Pour l'analyse d'un signal bidimensionnel (2D) comme les images, on a besoin d'une version 2D de la DCT. La définition de la DCT bidimensionnelle (DCT 2-D) est donnée par l'équation (4.5) :

$$f(u, v) = \frac{2}{N} C(u) C(v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \text{pixel}(i, j) \cos\left(\frac{\pi(2i+1)u}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi(2j+1)v}{2N}\right) \quad (4.5)$$

Avec $u=0,1,\dots, N-1$ et $v=0,1,\dots, N-1$, Où : $C(u), C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{si } u, v = 0 \\ 1 & \text{autrement} \end{cases}$

Cette méthode de transformation permet de séparer les basses fréquences de hautes fréquences comme il est indiqué sur la figure 4.2. L'intégralité de l'information de l'image se trouve dans les basses fréquences. Par contre, les détails de l'image se localisent en hautes fréquences.

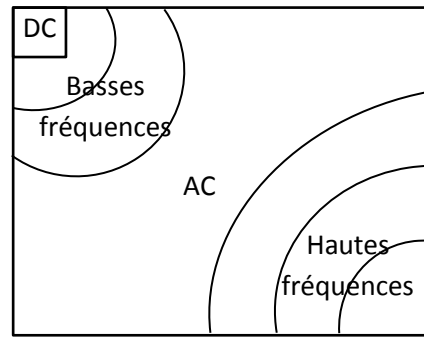


Figure 4.2. Répartition des fréquences dans un bloc DCT 8×8 ⁹

Toutefois, la DCT est particulièrement adaptée aux signaux stationnaires. Or, la plupart des signaux réels tels que les sons ou les images ont des caractéristiques non stationnaires¹⁰. Pour traiter ces types de signaux transitoires, on peut découper le signal en plusieurs morceaux sur lesquels sera appliquée une transformée ; on fait ici en quelque sorte l'hypothèse que le signal est « **stationnaire par morceaux** ». C'est la méthode employée en particulier dans le standard de compression JPEG avec la transformée en cosinus par bloc. Toutefois, même si cette stratégie donne de bons résultats, elle présente l'inconvénient de créer des artefacts (effets de bloc) dus au découpage en blocs [81].

La DCT par bloc 8×8 , donne un coefficient DC et 63 coefficients AC. Le coefficient DC (pour direct component) ou coefficient continue, est la moyenne des échantillons transformés et représente les détails les plus bruts du bloc d'image (plus basse fréquence spatiale). Les coefficients AC (Alternative components) représentent les détails les plus fins de l'image (fréquences spatiales plus élevées).

Ci-dessous, on donne un exemple de matrice de pixels avec sa transformée, (figure 4.3).

⁹ 8×8 , a été choisie après de nombreuses expérimentations avec les autres dimensions. Les conclusions sont :

- Toute matrice plus grande, rends difficile les opérations mathématiques et augmente le temps de calcul.
- Toute matrice d'une dimension moins, ne possède pas assez d'information. Il en résulte une mauvaise qualité de l'image compressée.

¹⁰ Les signaux non stationnaires sont des signaux qui ne se répètent que rarement et se manifestent par des oscillations évoluant au cours du temps.

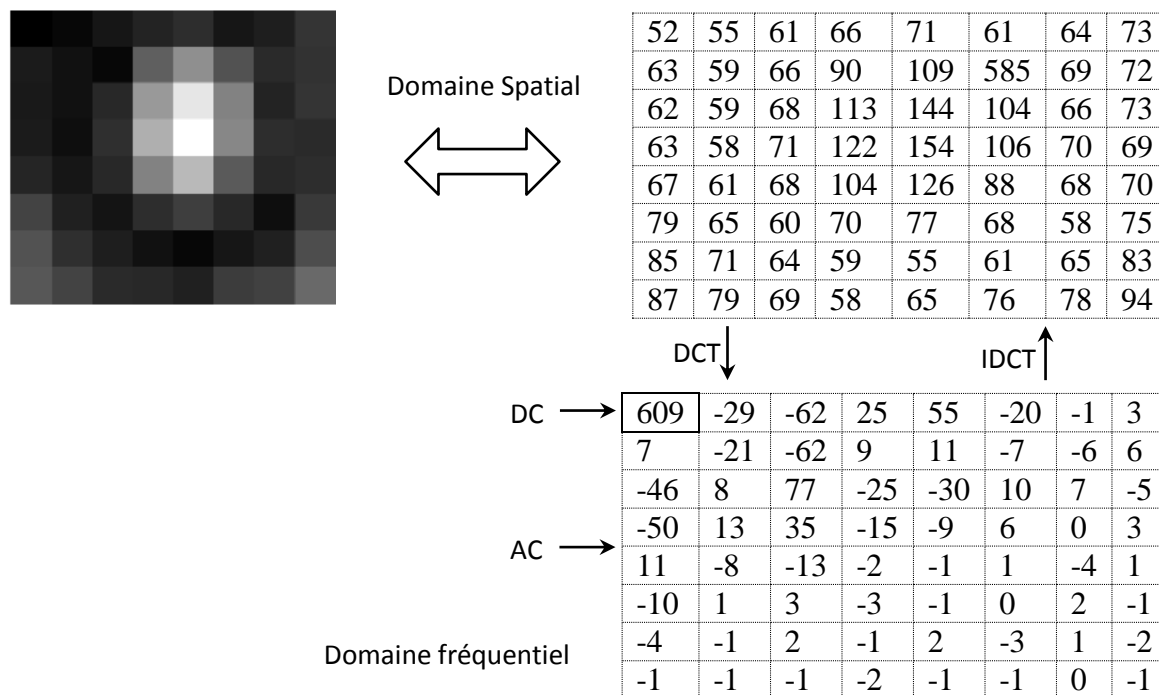


Figure 4.3. Principe de fonctionnement de la DCT.

Les composantes trouvées en position (0,0) transportent une information plus utile que les composantes hautes fréquences. Lorsqu'on s'éloigne des composantes continues de l'image, on constate non seulement que les coefficients ont tendance à avoir de faibles valeurs mais aussi, qu'ils deviennent moins importants pour la description de l'image. Ce qui signifie qu'en effectuant la transformée DCT sur une matrice de pixels, nous concentrons la représentation de l'image dans les coefficients situés en haut et à gauche de la matrice de sortie.

Limitations de la DCT

La DCT offre quelques limitations qui restreignent son utilisation dans des applications à très faible débit binaire. Les limitations sont énumérées ci-dessous [84]:

- La quantification grossière des coefficients de basses fréquences introduit des grains dans certaine partie dans l'image.
- L'élimination des coefficients de fréquences hautes peut rendre l'image flou, surtout quand le nombre de ce coefficient est important (détails de l'image sont élevées)
- Des Artefacts (effets de blocs) graves sont apparus aux limites de blocs. Étant donné que chaque bloc est traité indépendamment, ce qui peut engendrer des dégradations dans la qualité de l'image.

Parmi tous les problèmes énumérés ci-avant, le problème d'artefacts est le plus sérieux et inacceptable à des débits binaires faibles. Ces effets de bloc peuvent être réduits par

l'application d'une transformée chevauchée, comme la L.O.T (*Lapped Orthogonal Transform*) [84] ou par l'application de post-traitement. Pour des débits binaires faibles, la transformée en ondelettes (DWT) permet d'éviter le problème d'artefacts engendré par l'application de la DCT et de présenter de meilleures performances de codage.

3.1.2 La transformée en ondelettes discrètes (DWT)

La transformée en ondelette discrète [83], est une opération qui décompose un signal en deux parties par projection sur un filtre passe-bas L et un filtre passe-haut H . La partie résultant du filtrage passe-bas représente une approximation du signal d'origine à la nouvelle résolution (ou échelle), celle résultant du filtrage passe-haut représentant les détails perdus entre les deux résolutions.

Puisqu'une image est typiquement un signal en deux dimensions, la DWT est effectuée, en appliquant d'abord les filtres L et H sur les échantillons ligne par ligne, puis en réappliquant les mêmes filtres sur les échantillons résultants, mais colonne par colonne cette fois-ci. Au final, l'image est divisée en 4 parties, les sous-images LL , LH , HL et HH comme présenté sur la figure 4.4-(a). La sous-image LL fournit une version de plus basse résolution (4 fois moins de pixels que l'image originale), LH , HL et HH représentant les détails perdus respectivement dans les directions horizontale, verticale et diagonale. La DWT peut être réitérée sur la sous-image LL pour obtenir plusieurs niveaux de résolution. La figure 4.4-(c) présente une image décomposée en trois niveaux de résolution.

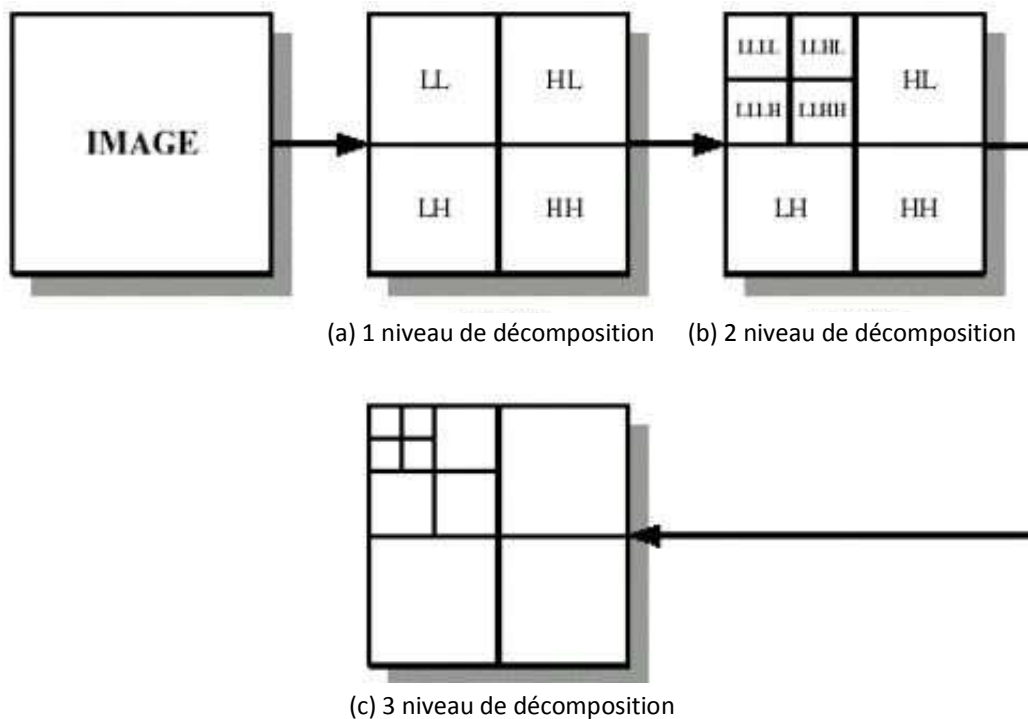


Figure 4.4. Analyse multi-résolution à trois niveaux de décomposition d'une image.

La transformée en ondelette est mise en œuvre à l'aide de bancs de filtres. Ces filtres sont séparables et suivent deux orientations : horizontale et verticale. Nous présentons sur la figure 4.5 un exemple d'analyse d'une image à partir d'un banc de filtres.

En effet, après l'application des filtres L et H (horizontalement et verticalement) sur l'image originale suivie par un sous-échantillonnage d'un facteur de 2 (horizontalement et verticalement), on obtient la nouvelle image de la figure 4.5. L'opération de sous-échantillonnage d'un facteur 2 consiste de se débarrasser d'un coefficient sur deux.

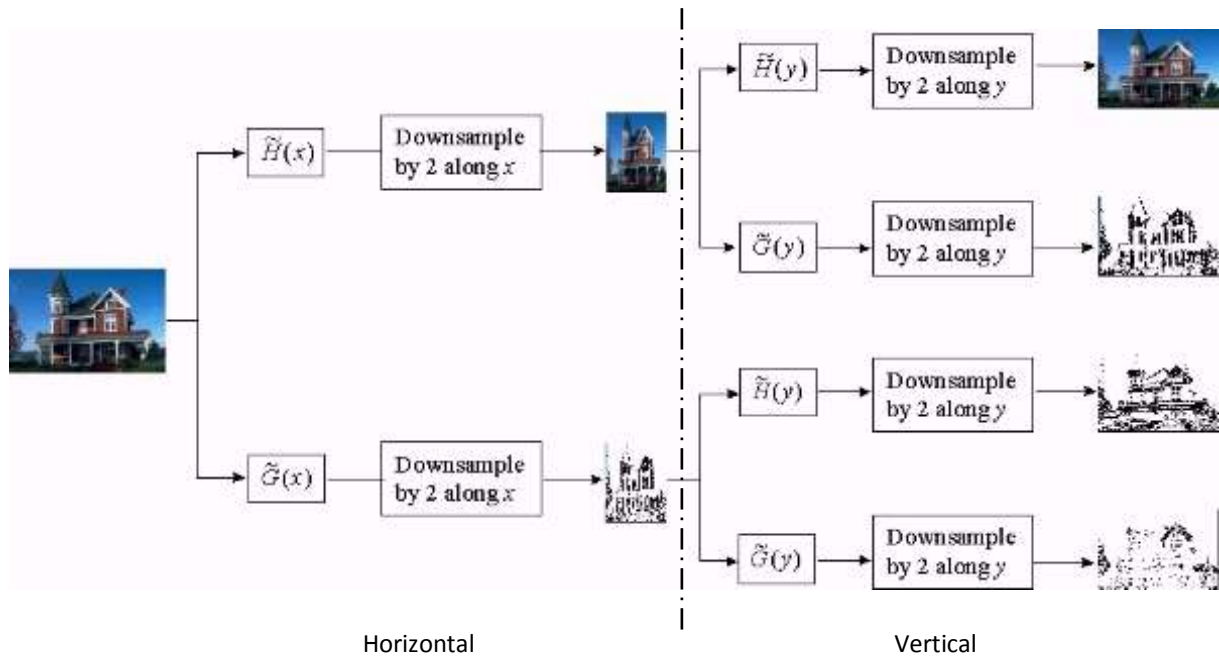


Figure 4.5. Décomposition en ondelettes d'une image.

3.2 Quantification

La définition unanime de la quantification est le processus de représentation d'un grand ensemble de valeurs avec des valeurs d'un ensemble plus petit.

Dans le schéma de compression, l'étape de quantification est celle qui dégrade de manière irréversible le signal. Elle est cependant d'une importance capitale dans la réduction du débit binaire. La quantification est une opération qui transforme un signal continu en un signal discret. Ce passage du continu au discret peut s'effectuer échantillon par échantillon, dans ce cas on parlera de **quantification scalaire**, ou bloc par bloc : c'est ce qu'on appelle la **quantification vectorielle** qui consiste à traiter conjointement n échantillons [81].

La quantification est souvent utilisée dans la pratique et elle est basée sur le principe que les coefficients de basses fréquences font la plus importante contribution à la qualité de bloc reconstruit. Seuls ceux coefficients, dont les magnitudes dépassent un seuil sont importants et tous ceux qui restent peuvent être écartés de la reconstruction de l'image.

L'élaboration d'un algorithme de quantification doit être conçu à partir de considérations visuel, sur la base de la réaction du système visuel humain (HVS) aux variations de la luminance et de la chrominance. Notons que le système visuel humain est davantage sensible aux fréquences basses qu'aux fréquences hautes. A ce niveau, les éléments

jugés peu significatifs visuellement sont plus grossièrement quantifiés en utilisant un pas de quantification plus grand.

3.2.1 La quantification scalaire

L'œil humain est plus sensible aux erreurs de reconstitution liées aux basses fréquences qu'à celles liées aux hautes fréquences. Les changements linéaires lents de l'intensité ou de la couleur sont importants pour l'œil. Les changements rapides dans les hautes fréquences peuvent être imperceptibles, c'est pourquoi on peut les éliminer. Pour chaque coefficient dans la matrice DCT, il faut calculer une valeur quantifiée correspondante en divisant chaque coefficient DCT par un pas de quantification. La formule de quantification pour chaque coefficient est la suivante:

$$Valeur_{quantifiée}(i,j) = Round \left(\frac{DCT(i,j)}{Q(i,j)} \right)$$

La quantification scalaire consiste [85] à coder des échantillons qui sont représentés par une valeur.

Quantification scalaire \Leftrightarrow 1 valeur en entrée \rightarrow 1 valeur quantifiée

La quantification scalaire peut être, une :

- *Quantification scalaire uniforme* : la plus simple et très largement employée notamment dans les CAN, en amont de tout traitement numérique (y compris compression). Les valeurs quantifiées possibles sont équi-réparties (uniformément) sur une échelle linéaire.
- *Quantification scalaire non uniforme* : son principe est de tenir compte de la répartition statistique des valeurs à quantifier. Pour les signaux réels (parole/sons/images), certaines amplitudes sont plus fréquentes (probables) que d'autres. Dans ce cas, la quantification permet d'éliminer les coefficients non significatifs (quantifiés grossièrement) au profit des coefficients significatifs qui sont alors quantifiés plus finement.

Le point fort de la quantification scalaire est sa flexibilité par variation du pas de quantification. Elle est très simple à mettre en œuvre parce qu'elle nécessite uniquement le réglage d'un seul paramètre afin d'obtenir le débit souhaité. Sa complexité calculatoire est de 2 opérations (1 division + 1 arrondi) par coefficient. Pour un bloc de n coefficients, cela devient $O(n) = 2n$ opérations [16].

3.2.2 La quantification vectorielle

La quantification vectorielle [86] n'est pas qu'une simple généralisation du cas scalaire. Elle permet de prendre en compte la corrélation entre les échantillons. De plus, il a été montré qu'aucune autre méthode ne pouvait surpasser les performances de la quantification vectorielle. Des résultats théoriques montrent que la quantification vectorielle est meilleure,

mais sa mise en œuvre est plus délicate, et elle est encore peu utilisée dans les méthodes actuelles de compression.

La quantification vectorielle code de manière efficace des échantillons représentés par plusieurs valeurs (ou vecteurs).

Quantification vectorielle \Leftrightarrow n valeur en entrée \rightarrow 1 valeur quantifiée

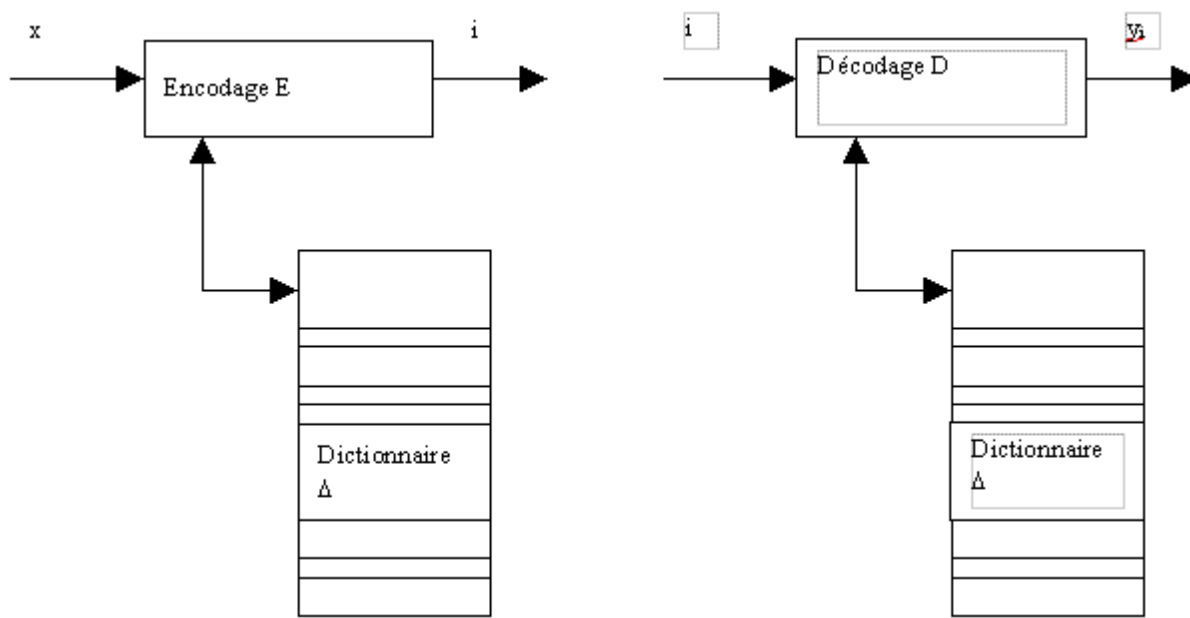


Figure 4.6. Schéma synoptique d'un quantificateur vectoriel [87]

Encodage

La procédure d'encodage consiste, pour tout vecteur x du signal d'entrée, à rechercher dans le dictionnaire « Δ » le code-vecteur y_i (aussi appelé vecteur de reproduction ou vecteur représentant) le plus proche de x .

Décodage

Le décodeur est considéré comme un récepteur chargé de la reconstruction du signal, pour cela il doit disposer d'une copie identique du dictionnaire qu'il consulte afin de restituer le code vecteur source correspondant à l'index qu'il reçoit. Le décodeur réalise l'opération de décompression.

Le contenu du dictionnaire est calculé à partir d'une séquence d'apprentissage [87] par l'algorithme *LBG* (Linde, Buzo et Gray) [88] ou encore *l'Algorithme de Lloyd Généralisé* (GLA) [89]. Ce dictionnaire permet de déterminer les « meilleurs représentants » pour un signal donné.

3.3 Codage entropique

Le concept du codage entropique¹¹ se fonde sur la théorie de l'information développée par Shannon. La stratégie consiste à exploiter l'analogie entre la probabilité d'un événement et la quantité d'information à transmettre. Le codage entropique permet d'encoder différents symboles (luminance, chrominance...) en leur attribuant un mot binaire. La longueur de ce mot dépend de la fréquence d'apparition du symbole considéré. Le principe d'un tel codage est d'encoder les coefficients quantifiés en utilisant des codes courts pour représenter les symboles ayant une forte probabilité d'apparition et des codes plus longs pour les symboles peu probable. Le but de ce codage est d'éliminer la redondance présente dans la source quantifiée.

Le codage entropique repose sur une procédure de codage à longueur variable, qui assigne des mots de longueur variable aux valeurs possibles y_i , de façon telle que les valeurs hautement probables soient associées à des mots courts du code, et vice - versa. Ceci permet donc en principe de réduire la longueur moyenne des mots du code [90]. La génération de tels codes repose sur le principe du préfixe unique : un code préfixe est un ensemble de mots tel qu'aucun mot de l'ensemble n'est préfixe d'un autre mot de l'ensemble. Par exemple, le code « 0, 10, 110, 111 » est un code préfixe alors que le code « 0, 10, 101, 0101 » ne l'est pas car « 0 » est le préfixe du mot « 0101 » et « 10 » est le préfixe de « 101 » [81].

Parmi les codeurs entropiques les plus connus. On peut citer, le codage de Huffman [91], le codage arithmétique [92] ou bien encore le codage de Golomb [93] qui seront décrit brièvement ci-dessous.

3.3.1 Codage de Huffman

Le codage de Huffman [91] est un procédé dans lequel la longueur des symboles codés varie dans le sens inverse de leur probabilité d'apparition (c'est à dire que les symboles de forte probabilité auront un code court alors que les symboles de faible probabilité auront un code long).

La technique de Huffman consiste à construire progressivement un graphe orienté en forme d'arbre binaire, où chaque branche partant d'un nœud est associée à un symbole 0 ou 1. Cet arbre est élaboré de façon ascendante en commençant par les feuilles de l'arbre et en remontant vers la racine (voir figure 4.7).

La construction de l'arbre de Huffman se fait en ordonnant dans un premier temps les valeurs des coefficients quantifiées par fréquence d'apparition. Successivement les deux coefficients de plus faible fréquence d'apparition sont retirés de la liste et rattachés à un nœud dont le poids vaut la somme des fréquences des deux symboles. Le coefficient de plus faible poids est affecté à la branche 1, l'autre à la branche 0 et ainsi de suite en considérant chaque nœud formé comme un nouveau coefficient, jusqu'à obtenir un seul nœud parent appelé racine.

¹¹ Entropique vient du mot « *entropie* » : L'entropie d'une source est la quantité moyenne d'information contenue dans cette source. Cette mesure a été introduite par Shannon.

Après construction de l'arbre, un mot du code est associé à chaque nœud terminal en prenant comme mot de code la succession des symboles binaires sur les branches.

Soit la phrase « La jolie petite fleur va ». Les fréquences d'apparitions des lettres sont :

E	L	A	T	I	P	R	U	F	O	V	J
4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1

Voici l'arbre correspondant :

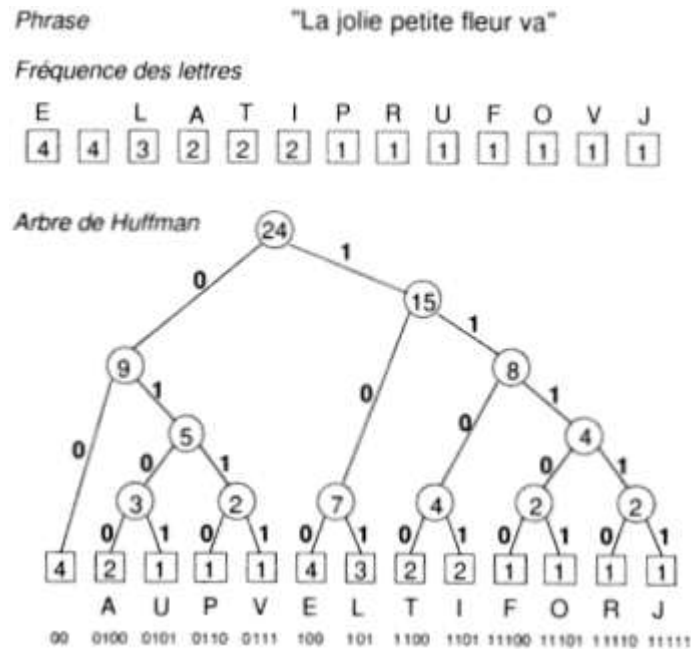


Figure 4.7. Arbre de Huffman

Les codes correspondants à chaque caractère sont tels que les codes des caractères les plus fréquents sont courts et ceux correspondant aux symboles les moins fréquents sont longs:

	A	U	P	V	E	L	T	I	F	O	R	J
00	0100	0101	0110	0111	100	101	1100	1101	11100	11101	11110	11111

Cependant, cet algorithme présente des inconvénients : il est utilisé pour coder un certain type de données (codage non-adaptatif) et il ne permet pas d'atteindre des débits inférieurs à 1 bit/échantillon [81]. De plus, il faut insérer la table des codes dans l'image comprimée pour pouvoir la décompresser, ce qui diminue le taux de compression, surtout pour les images de taille réduite. Ce problème est éliminé par le codage Huffman adaptatif, qui s'adapte au type de données en entrée en modifiant la table au fil du traitement. Il est alors intéressant de se baser sur la table par défaut utilisé dans le format JPEG. Cela permet d'atteindre de meilleurs taux de compression car dans ce cas il n'est pas nécessaire d'insérer la table créée dans l'image comprimée [16].

3.3.2 Codage arithmétique

Dans cette section, on va présenter les idées principales du codage arithmétique [92], qui est une des techniques de compression sans pertes les plus récentes, et probablement la plus importante dans les applications et les normes actuelles.

Contrairement aux algorithmes de codage utilisant des mots de codes à longueur variable, le code ici, est associé à la séquence et non pas à chaque symbole pris individuellement.

Le codage arithmétique se singularise par sa capacité à coder chaque symbole sur un nombre non entier de bits. En réalité, il n'assigne pas un mot de code à chaque symbole mais il associe une valeur de l'intervalle $[0,1]$ à un ensemble de symboles. Le principe repose sur le découpage de l'intervalle $[0,1]$. Chaque symbole se voit attribuer une partition de l'intervalle dont la taille est égale à sa probabilité d'occurrence. L'ordre de rangement est mémorisé pour être utilisé lors du décodage.

Considérons un exemple pratique: la chaîne "compressee".

Symbole	c	e	m	o	p	r	s
Occurrence	1	3	1	1	1	1	2
Probabilité	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2

On décide maintenant d'associer à chaque symbole un *domaine* dans l'espace des probabilités, le but étant d'associer un symbole à un domaine. La table d'associations sera transmise avec le message encodé (comme dans le cas de HUFFMAN):

Symbole	c	e	m	o	p	r	s
Probabilité	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
domaine	[0.0-0.1]	[0.1-0.4]	[0.4-0.5]	[0.5-0.6]	[0.6-0.7]	[0.7-0.8]	[0.8-1.0]

L'algorithme servant à encoder est le suivant:

```
// Tableau contenant les bornes inferieures des intervalles
// Calculs ci-avant
Borne_Inf[];
// Idem pour la borne sup
Borne_Sup[];
// Initialisation
Inf=0.0;
Sup=1.0;
c = lireCaractere();
TantQue (c!= EOF) {
Sup = Inf + (Sup - Inf) * Borne_Sup[c];
Inf = Inf + (Sup - Inf) * Borne_Inf[c];
c = lireCaractere();}
```

Par exemple, le message original ("compressee") est encodé comme suit :

Symbole	Borne Inférieure	Borne Supérieure
c	0.0	0.1
o	0.05	0.06
m	0.054	0.055
p	0.0546	0.0547
r	0.05467	0.05468
e	0.054671	0.054674
s	0.0546734	0.054674
s	0.05467388	0.054674
e	0.054673892	0.054673928
e	0.0546738956	0.0546739064

Ainsi « 0.0546738956 » est la représentation arithmétique du message "compressee".

Le codage arithmétique donne une compression de 5 à 10 % meilleure que le codage de Huffman [94]. Mais il est un peu plus lent et compliqué. Ceci peut être expliqué par le fait que le codage arithmétique est une méthode de codage par nombre en virgule flottante. En effet, il permet de remplacer une séquence de symboles par un nombre en virgule flottante appartenant à l'intervalle $[0, 1]$.

Le codage arithmétique dépend fortement aux symboles précédemment encodés, ce qui le rend peu robuste aux erreurs de transmission, et empêche le décodage à partir d'une position aléatoire dans le flux de données [16].

3.3.3 Codage de Golomb

Le codage de Golomb [93] d'un entier naturel n dépend d'un paramètre k , se fait en deux étapes :

1. le codage du quotient de la division euclidienne de n par k avec un codage unaire ;
2. le codage du reste de la même division ($n \bmod k$) avec un codage binaire.

La représentation unaire est une suite de bits à '1' suivie d'un bit d'arrêt à '0' (n fois '1' et un '0' à la fin).

Décimal	Binaire	Code de Golomb $k = 1$ (unaire)	Code de Golomb $k = 2$	Code de Golomb $k = 4$	Code de Golomb $k = 16$
0	0000	0	0 0	0 00	0 0000
1	0001	10	0 1	0 01	0 0001
2	0010	110	10 0	0 10	0 0010
3	0011	1110	10 1	0 11	0 0011
4	0100	11110	110 0	10 00	0 0100
5	0101	111110	110 1	10 01	0 0101
6	0110	1111110	1110 0	10 10	0 0110
7	0111	11111110	1110 1	10 11	0 0111
8	1000	111111110	11110 0	110 00	0 1000
9	1001	1111111110	11110 1	110 01	0 1001
10	1010	11111111110	111110 0	110 10	0 1010

Tableau 4.1. Représentation des premiers entiers naturels avec un codage de Golomb

Le codage de Golomb-Rice [95] (une extension adaptative du codage de Golomb) de paramètre k est strictement équivalent à un codage de Golomb de paramètre 2^k . La division par 2^k peut être implémentée par un décalage de k bits vers la droite, et la seconde étape revient à répliquer les k bits de poids faible de la valeur à coder. Ces opérations simples font que le codage de Golomb-Rice est particulièrement adapté pour une implémentation rapide.

4. Réduction DCT

La réalisation directe de la DCT requiert un nombre important d'opérations arithmétiques. Pour remédier à cela, plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour réduire la complexité calculatoire de la DCT. Ces méthodes peuvent être classées dans deux catégories principales qui sont **la DCT réduite** et **la DCT rapide** (voir figure 4.8).

L'approche de **la DCT rapide** permet de réduire le nombre d'opérations nécessaires pour calculer les coefficients de la DCT alors que **la DCT réduite** réduit le nombre de coefficients DCT à calculer [16].

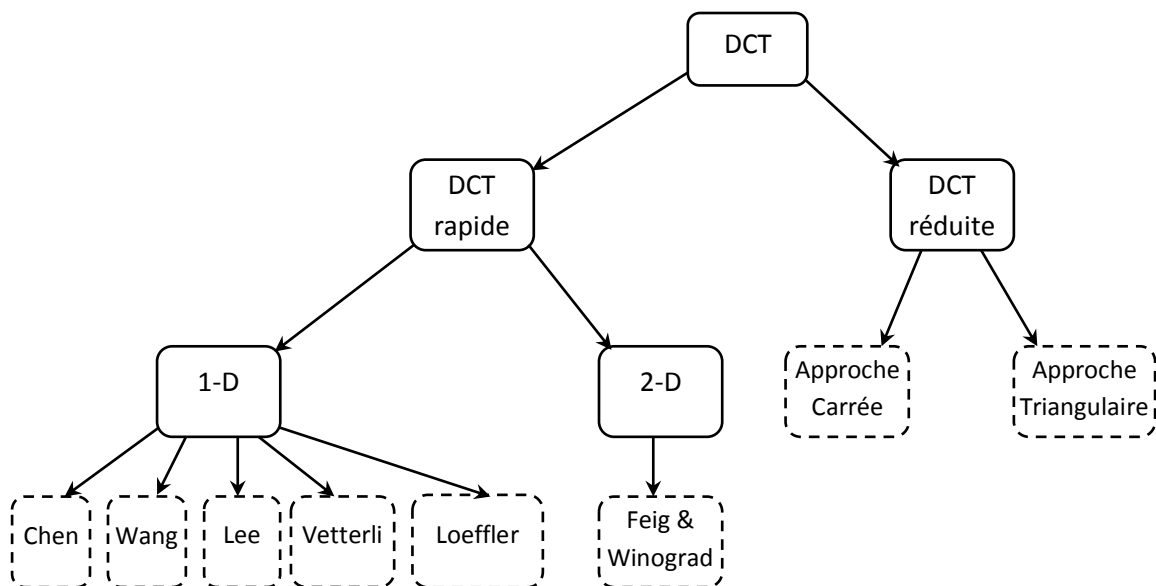


Figure 4.8. Les méthodes de calcul rapide de la DCT

Dans ce qui suit, une brève description de l'approche de factorisation de la matrice (DCT rapide) et l'approche zonale (DCT réduite) est donnée.

4.1 L'approche par factorisation de la matrice (DCT rapide)

Le principe de cette approche consiste à réécrire la transformée sous forme matricielle et à factoriser la décomposition de manière à réduire le nombre de multiplications scalaires nécessaires.

Une bonne manière d'implémenter la DCT par blocs serait de créer une matrice A de la transformée de cosinus, comme montrée dans l'équation 4.6 [96]:

$$A_{u,v} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{N}} \cos\left(\frac{\pi(2v+1)u}{2N}\right) & \text{si } 1 < u < N \\ \frac{1}{\sqrt{N}} & \text{si } u = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Une fois cette matrice créée, on crée la matrice transposée A^T . Ensuite la transformée par bloc 8×8 se réduit à deux multiplications matricielles :

$$DCT = A_{N \times N} \cdot \text{Img}_{N \times N} \cdot A_{N \times N}^T \quad (4.7)$$

Donc le coût pour calculer la DCT sur un bloc se réduira, initialement de 4096 multiplications et 3584 additions (équation de référence 4.5) à 1024 multiplications et 1024 additions, pour un bloc 8×8 en ne calculant qu'une seule fois le produit des deux cosinus. Cela représente un gain important par rapport à une simple double boucle sur les indices comme pourrait le laisser suggérer la formule initiale de la DCT (équation de référence 4.5).

Un développement optimisé de la transformée DCT-1D peut être obtenu en réécrivant la transformée sous forme matricielle et en factorisant la décomposition, pour réduire le nombre de multiplications scalaires nécessaires

Par exemple, l'application de la DCT 1-D pour le cas de $N=8$ (8-point DCT), peut être présenté sous la forme de produit matricielle comme le montre l'équation 4.8.

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} C_0 & C_0 & C_0 & C_0 & C_0 & C_0 & C_0 & C_0 \\ C_1 & C_3 & C_5 & C_7 & -C_7 & -C_5 & -C_3 & -C_1 \\ C_2 & C_6 & -C_6 & -C_2 & -C_2 & -C_6 & C_6 & C_2 \\ C_3 & -C_7 & -C_1 & -C_5 & C_5 & C_1 & C_7 & -C_3 \\ C_4 & -C_4 & -C_4 & C_4 & C_4 & -C_4 & -C_4 & C_4 \\ C_5 & -C_1 & C_7 & C_3 & -C_3 & -C_7 & C_1 & -C_5 \\ C_6 & -C_2 & C_2 & -C_6 & -C_6 & C_2 & -C_2 & C_6 \\ C_7 & -C_5 & C_3 & -C_1 & C_1 & -C_3 & C_5 & -C_7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Où : $C_k = \cos\left(\frac{k\pi}{16}\right)$ pour $k = \{1, 2, 3, 5, 6, 7\}$

$$C_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ pour } k = \{0, 4\}$$

Le calcul d'un seul vecteur de coefficients nécessite 64 multiplications et 56 additions (ici, pour chaque vecteur de 8 valeurs). Cela devient 1024 multiplications et 896 additions dans le cas du calcul d'un bloc de 8×8 pixels.

Cependant, en examinant les lignes de la matrice, la propriété de la symétrie des coefficients peut être trouvée. Ce qui présente un grand avantage. Nous observons que la localisation du centre de la symétrie est déterminée par le numéro de la ligne. Ainsi, le centre de la symétrie est dans le milieu entre deux éléments de centre de la ligne, pour les lignes d'index pairs. Pour les lignes d'index impaires, le centre de la symétrie est dans le milieu de la ligne. Nous pouvons voir que les lignes d'index pairs sont symétriques et les lignes d'index impaires sont antisymétriques [97].

En exploitant cette symétrie dans les lignes de la matrice, et en séparant les lignes paires et impaires, on obtient la matrice suivante :

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} C_0 & C_0 & C_0 & C_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_6 & -C_6 & -C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_4 & -C_4 & -C_4 & C_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_6 & -C_2 & C_2 & -C_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & C_3 & C_5 & C_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & -C_7 & -C_1 & -C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & -C_1 & C_7 & C_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_7 & -C_5 & C_3 & -C_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 + x_7 \\ x_1 + x_6 \\ x_2 + x_5 \\ x_3 + x_4 \\ x_4 - x_7 \\ x_5 - x_6 \\ x_6 - x_5 \\ x_7 - x_4 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

La matrice ci-dessus peut encore être simplifiée par les 2 sous matrices de (4.10) et (4.11) [98].

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_4 & C_4 & C_4 & C_4 \\ C_2 & C_6 & -C_6 & -C_2 \\ C_4 & -C_4 & -C_4 & C_4 \\ C_6 & -C_2 & C_2 & -C_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 + x_7 \\ x_1 + x_6 \\ x_2 + x_5 \\ x_3 + x_4 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_3 \\ y_5 \\ y_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 & C_3 & C_5 & C_7 \\ C_3 & -C_7 & -C_1 & -C_5 \\ C_5 & -C_1 & C_7 & C_3 \\ C_7 & -C_5 & C_3 & -C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_4 - x_7 \\ x_5 - x_6 \\ x_6 - x_5 \\ x_7 - x_4 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Cette nouvelle décomposition de la matrice DCT sert à diminuer de façon spectaculaire (de 75%) le calcul de 1024 multiplications à 256 multiplications uniquement (le nombre de multiplications est réduit de 64 à 32, deux passes de 32 multiplications pour chaque ligne de 8 valeurs) dans le traitement d'un bloc d'image 8×8 pixels [99].

4.2 L'approche zonale (DCT réduite)

La DCT zonale est basé sur le principe que les coefficients de basse fréquence situés dans le coin supérieur gauche de la matrice transformée sont ceux qui transportent la plupart du signal et doivent donc être conservés, alors que ceux de la haute fréquence qui représentent les détails de l'image peuvent être tronqués.

Une DCT zonale bidimensionnel calcule seulement un sous-ensemble de $N \times N$ coefficients DCT, généralement ceux de faibles fréquences à l'intérieur de la zone carrée supérieure gauche de taille k , avec $k < N$ (typiquement $N = 8$), comme illustré sur la figure 4.9. Il y a donc k^2 coefficients DCT à calculer à la place de N^2 . Les autres sont omis (ce qui signifie qu'ils sont implicitement mis à zéro) [100].

En conséquence, le nombre de coefficients DCT à quantifier et à coder est réduit, de sorte que les étapes de quantification et du codage entropique bénéficient d'un coût de calcul faible.

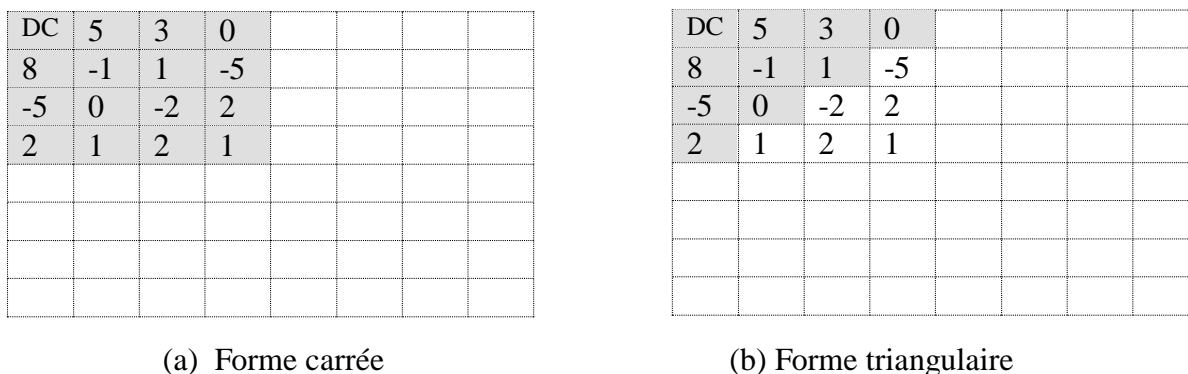


Figure 4.9. Différentes formes de DCT zonale avec $k=4$

Le paramètre k est un coefficient qui délimite horizontalement et verticalement la zone de sélection des coefficients à traiter. Par exemple dans le cas de la forme carrée, voir figure 4.9-(a), uniquement k^2 coefficients que doivent être traités (16 coefficients pour $k = 4$) au lieu de 64 coefficients pour la DCT classique. Si on utilise la forme triangulaire (figure 4.9-(b)), uniquement $\frac{k(k+1)}{2}$ coefficients doivent être traités (10 coefficients pour $k = 4$).

La forme triangulaire permet de réduire encore le temps de calcul pour les étapes de quantification et de codage des coefficients par rapport à la forme carrée, puisqu'il y a moins de coefficients à traiter.

Une adaptation de l'algorithme JPEG [101], aux contraintes énergétiques des réseaux de capteurs a été proposée. L'algorithme T-JPEG (*Triangular-JPEG*) proposé repose sur l'incorporation de la notion de la réduction de la taille de bloc (*Reduced Block Size*) qui consiste à traiter que la partie supérieure gauche triangulaire (figure 4.9-(b)) de chaque bloc de $N \times N$ coefficients DCT. Les auteurs montrent que la DCT triangulaire utilisée réduit le nombre des opérations de base nécessaires à chaque étape de compression et par conséquent l'énergie dissipée, tout en gardant une qualité d'image acceptable au niveau du sink.

Comme rapporté dans [102], les auteurs ont proposé une approche qui permet de sélectionner uniquement la moitié de coefficient transformés. Après l'application de 2D-BinDCT (DCT binaire), seule la moitié des coefficients transformés dans une zone spécifique sont codés et transmis. Ce sont les coefficients de la matrice de taille $k \times k$ où $k = N/2$. Ainsi, le coût de calcul est considérablement réduit puisque seulement la moitié des coefficients transformés sont codé au lieu de N^2 coefficients.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord décrit les principaux aspects de la compression et plus particulièrement la compression avec perte basé sur la dé-corrélation intra image. Deux techniques ont été abordé à savoir la transformée en cosinus discrète (DCT) et la transformée en ondelettes (DWT). Même si la complexité de la DCT est inférieure à celle de la transformées en ondelettes, la DCT demeure coûteuse pour une implantation dans le contexte des réseaux de capteurs.

Nous avons présenté aussi deux approches de réduction de la DCT. L'approche de la **DCT réduite**, qui sert à réduire le nombre de coefficients DCT à calculer et l'approche de la **DCT rapide** qui permet de réduire le nombre d'opérations pour calculer les coefficients de la DCT. Ces deux approches, entraînent une réduction importante dans la complexité calculatoire de la DCT et par conséquent une réduction dans la consommation d'énergie.

Pour que la compression d'images soit efficace en termes de consommation d'énergie, il faut que la compression et transmission d'images coûte moins d'énergie que la transmission d'une image brute. Donc, notre objectif dans le chapitre suivant consiste à fournir une chaîne de compression adaptée aux contraintes des réseaux de capteurs sans fil, c'est-à-dire de faible complexité calculatoire et efficace en énergie.

Chapitre 5.

Chaîne de compression proposée

Sommaire

1. Introduction.....	66
2. Petite présentation de l'algorithme JPEG.....	66
3. Chaîne de compression proposée	67
3.1 Transformation.....	67
3.2 Quantification	69
3.3 Lecture en Zig-Zag.....	70
3.4 Codage entropique	70
4. Evaluation des performances.....	71
4.1. Présentation du simulateur Castalia.....	71
4.1.1. Structure	71
4.1.2. Liste des modules	73
4.2. Expérimentation et résultats	74
5. Conclusion	77

1. Introduction

La transmission d'image dans un réseau de capteur sans fil est gourmande en énergie puisque la quantité de données nécessaire pour représenter une image en comparaison d'une valeur scalaire classique (une mesure de température par exemple) diffère de plusieurs ordres de grandeur.

Il semble évident que le coût d'énergie de la transmission de l'image peut être réduit significativement en compressant l'image à la source. Toutefois, les méthodes de compression existantes comme SPIHT et les standards JPEG et JPEG2000, ont beau fournir d'excellentes performances en termes de débit/distorsion (*le débit est lié à la taille d'un flux compressé et la distorsion à la perte de qualité*), elles ne sont pas éligibles dans le contexte des réseaux de capteurs. Deux raisons à cela : D'abord, leur complexité est telle que cela coûte plus d'énergie de compresser l'image que de la transmettre sans compression. Ensuite, ces méthodes résistent très mal aux erreurs (perte de paquets) apportées par le canal de transmission.

Dans ce domaine, on remarque des efforts de plusieurs auteurs pour adapter les algorithmes de compression d'images, comme JPEG ou JPEG2000, aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil.

L'objectif est donc de proposer une nouvelle méthode de compression d'image satisfaisant aux contraintes posées par les réseaux de capteurs sans fil, c'est-à-dire de faible complexité calculatoire et efficace en énergie.

2. Petite présentation de l'algorithme JPEG

La compression JPEG (Joint Photographic Experts Group) est une méthode de compression non conservative de l'image. Elle s'appuie sur une analyse de la perception de l'œil humain, ainsi que sur l'usage de codeurs classiques (RLE, et Huffman) [103].

Cette méthode est très performante puisqu'elle peut réduire la taille d'une image de près de 90%. Cependant, pour atteindre un tel taux, l'utilisateur doit faire un compromis Taille/Qualité. En effet le caractère non conservatif de la compression provoque une dégradation de l'image proportionnelle au facteur de compression.

La chaîne de compression du standard JPEG est illustrée sur la figure 5.1.

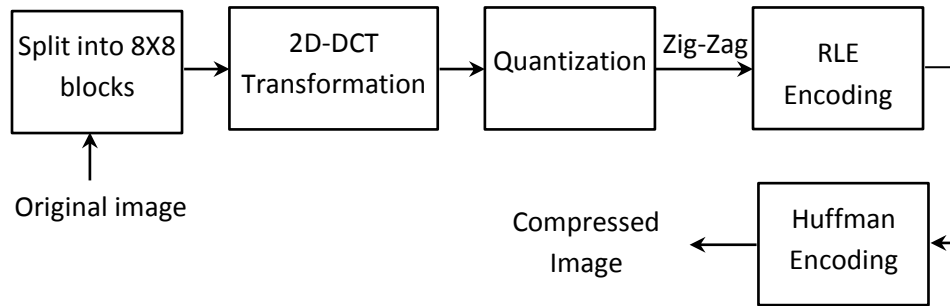


Figure 5.1. Étapes de la compression JPEG

L’algorithme a besoin de réaliser plusieurs étapes afin de pouvoir compresser une image. Premièrement, l’image de l’entrée est divisée en plusieurs blocs de taille fixe 8x8 pixel. Ensuite la transformée 2D-DCT est appliquée sur chaque bloc afin de séparer les basses fréquences des hautes fréquences. Par la suite, chaque bloc DCT est quantifié uniformément. Le résultat de la quantification est réorganisé à nouveau d’une manière zigzag, des fréquences basses aux fréquences hautes. Après cela, le codage RLE est appliqué pour réduire la longueur des séquences produites. Finalement, le processus de codage entropique réversible (tel que Huffman ou codage arithmétique) est effectué sur les données quantifiées pour produire des mots de code de longueur fixes ou variables [103].

3. Chaîne de compression proposée

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les trois étapes de la chaîne de compression. A chaque étape, notre choix s’oriente vers la méthode la plus adaptée. La méthode qu’on propose repose sur l’adaptation de l’algorithme JPEG aux contraintes particulières des réseaux de capteurs.

3.1 Transformation

Puisque l’étape de la transformée bidimensionnelle consomme la majorité d’énergie dans un système de compression basé sur la transformée DCT (plus de 60% du coût de calcul de l’algorithme JPEG [104]). Beaucoup de différents algorithmes rapides pour le calcul de la DCT ont été présentés dans la littérature [105, 106, 107, 108, 109, 110, 111] peuvent être utilisés afin de réduire la complexité de la DCT. La plupart de ces algorithmes nécessitent 12 multiplications et 29 additions pour calculer la DCT d’un vecteur à 8 points (voir tableau 5.1). L’algorithme de Loeffler est actuellement le plus efficace ayant été publié (avec 11 multiplications pour la DCT à 8 points).

Auteur Référence	Chen [105]	Wang [106]	Lee [107]	Vetterli [108]	Suehiro [109]	Hou [110]	Loeffler [111]
Multiplication	16 (13)	13	12	12	12	12	11
Addition	26 (29)	29	29	29	29	29	29

Tableau 5.1. Complexité arithmétique des algorithmes rapides de la DCT [111]

Il est possible de montrer que la DCT 2-D peut être obtenue en appliquant d'abord la transformée unidimensionnelle (1-D) sur chaque ligne de bloc de pixels, puis sur chacune des colonnes du bloc résultant. Avec l'algorithme de Loeffler, la DCT 2-D nécessite 176 multiplications et 464 additions.

La figure 5.2 montre le principe d'application :

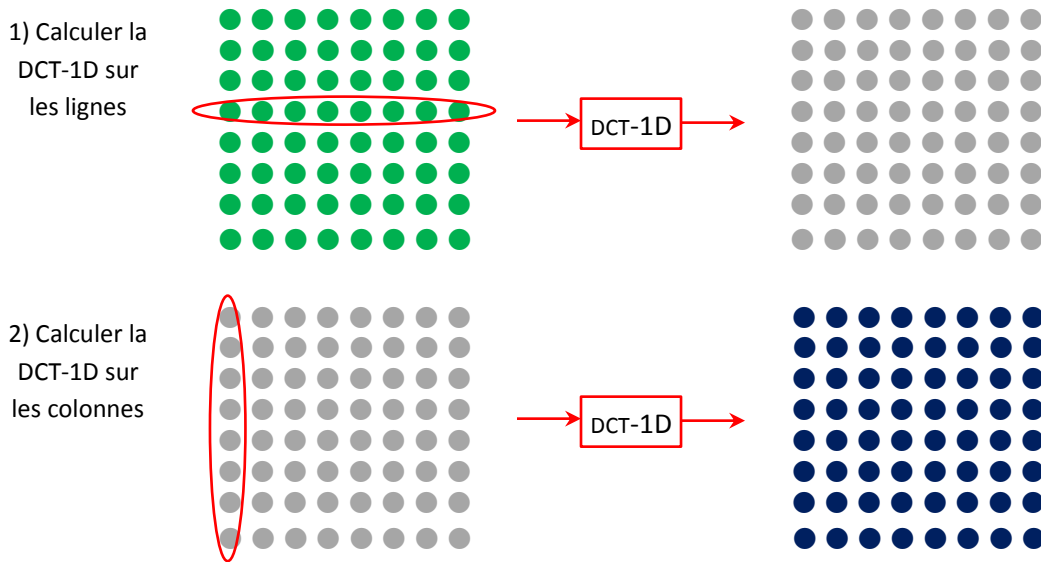


Figure 5.2. Calcul de la DCT par la décomposition ligne-colonne

Les étapes de l'algorithme numéroté de 1 à 4 font des parties qui doivent être exécutées en série dû à la dépendance de donnée. Dans l'étape 2, l'algorithme se divise en deux parties. Une pour les coefficients pairs et l'autre pour les coefficients impairs. La partie paire, n'est rien autre qu'une DCT à 4 points, encore séparée en deux parties : partie paire et autre impaire dans l'étape 3. Les blocs arrondis dans la figure 5.3 signifient une multiplication par constante.

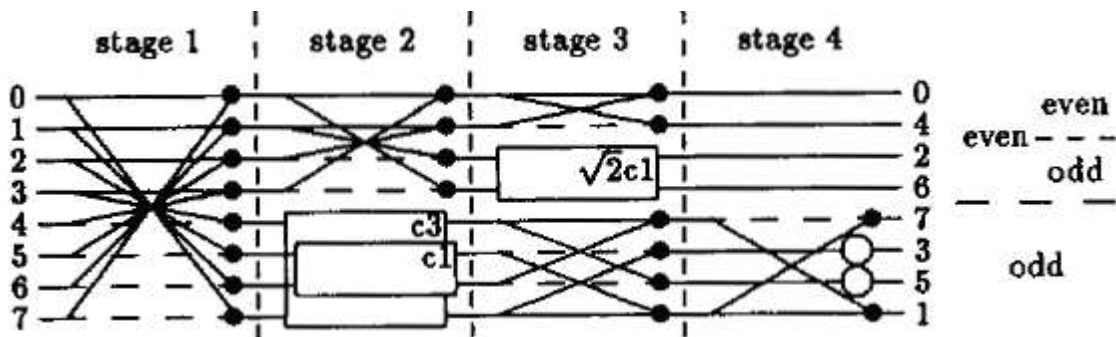


Figure 5.3. Graphe de flux de l'algorithme de Loeffler pour la DCT à 8 points [111]

Chaque étape doit être exécutée en série et ne peut pas être évaluée en parallèle à cause de la dépendance de données. Cependant, les calculs à l'intérieur d'une seule étape peuvent être parallélisés. La figure 5.4 explique les blocs de construction de l'algorithme.

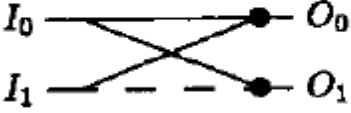
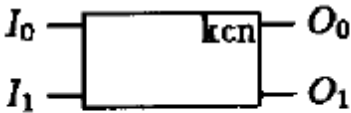

symbol	equations	effort
	$O_0 = I_0 + I_1$ $O_1 = I_0 - I_1$	2 add
	$O_0 = I_0 \cdot k \cdot \cos \frac{n\pi}{2N} + I_1 \cdot k \cdot \sin \frac{n\pi}{2N}$ $O_1 = -I_0 \cdot k \cdot \sin \frac{n\pi}{2N} + I_1 \cdot k \cdot \cos \frac{n\pi}{2N}$	3 mult + 3 add
	$O = \sqrt{2} \cdot I$	1 mult

Figure 5.4. Symboles utilisés pour l'algorithme [111]

Le bloc de rotation peut être calculé avec seulement 3 multiplications et 3 additions au lieu de 4 multiplications et 2 additions en utilisant l'équivalence de l'équation (5.1) [111].

$$\begin{aligned}
 y_0 &= a \cdot x_0 + b \cdot x_1 = (b - a) \cdot x_1 + a \cdot (x_0 + x_1) \\
 y_1 &= -b \cdot x_0 + a \cdot x_1 = -(a + b) \cdot x_0 + a \cdot (x_0 + x_1)
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

3.2 Quantification

La norme JPEG définit deux matrices de quantification utilisable par défaut, une pour la luminance¹² (niveaux de gris), et l'autre pour la chrominance¹³. Ces matrices types sont le résultat de plusieurs expériences effectuées par le groupe JPEG. Puisque on s'intéresse qu'aux images en niveaux de gris, la matrice de quantification qu'on va utiliser est celle de la luminance :

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	16	13	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Figure 5.5. Matrice de quantification de la luminance

¹² La luminance est la sensation visuelle qu'on a de la lumière (Intensité de la lumière).

¹³ La Chrominance est un signal combiné comportant les trois informations de base : Rouge, Vert, Bleu. Elle est tout simplement la variation des couleurs.

3.3 Lecture en Zig-Zag

Après la quantification, de longues plages de « 0 » sont apparues en bas du tableau. Le but de la lecture en zigzag est de former un vecteur où les coefficients relatifs aux basses fréquences sont regroupés, c'est-à-dire mettre les « 0 » à la fin pour pouvoir les supprimer.

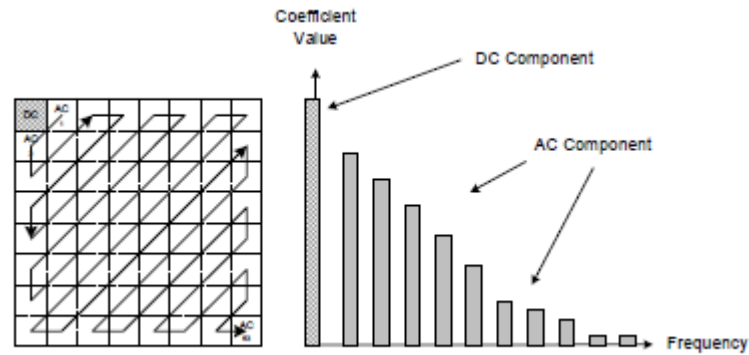


Figure 5.6. Parcours en zigzag de coefficients quantifiés

3.4 Codage entropique

Puisque la majorité des applications de réseaux de capteurs d'image se focalisent sur la vitesse d'exécution (un temps plus bas correspond à une consommation d'énergie plus basse) ainsi que sur les performances de compression, le codage de Golomb-Rice couplé avec le codeur arithmétique QM présente un bon compromis vitesse d'exécution/taux de compression.

Finalement, la chaîne de compression qu'on propose est donnée par la figure 5.7

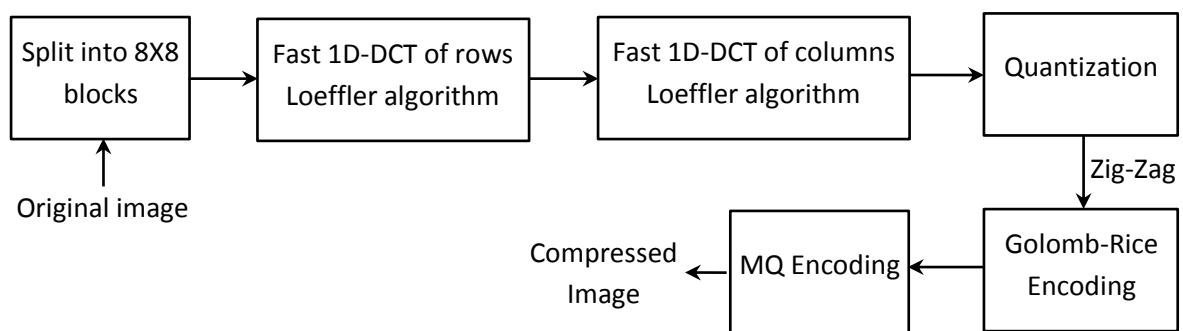


Figure 5.7. Chaîne de compression proposée.

4. Evaluation des performances

Cette section a pour objectif d'évaluer les performances de notre proposition, en particulier d'évaluer le coût en énergie sur un cycle de fonctionnement <capture – compression – transmission> et de le comparer avec le coût de la transmission d'images produit pour un cycle <capture – transmission>. Cette évaluation a été réalisée par simulation.

4.1. Présentation du simulateur Castalia [112]

Plusieurs outils existent pour mettre en place une simulation comme les langages de programmation tels que Simula¹⁴, GPSS¹⁵, et des logiciels de simulations comme NS2, NS3, OMNET++ et qui nécessitent moins de programmation que les langages.

Parmi les simulateurs qui existent, il y'a Castalia¹⁶, qui est un simulateur de réseaux de capteurs (WSN), de réseaux corporels (BAN) et plus généralement des réseaux de matériels embarqués de faible puissance. Il est basé sur la plateforme OMNET++ et qui offre un modèle radio intéressant basé sur les travaux de Zuniga et al [113]. Cela permet aux utilisateurs de se rapprocher le plus possible de la réalité avec les aléas d'un médium de communication, avec un comportement de nœud réaliste en particulier en matière d'accès à la radio. Castalia peut être utilisé pour évaluer des caractéristiques différentes de plateforme pour des applications spécifiques, car il est très paramétrique, et peut simuler une grande variété de plateformes. Castalia gère également la consommation d'énergie des capteurs et de processeur, l'utilisation de la mémoire et du temps CPU.

Les principaux avantages visibles sont : un modèle de canal évolué, empiriquement basé sur des données mesurées et un modèle radio basé sur des radios réels pour les communications de faible puissance.

4.1.1. Structure

La structure de module de base de Castalia est illustrée sur le schéma suivant :

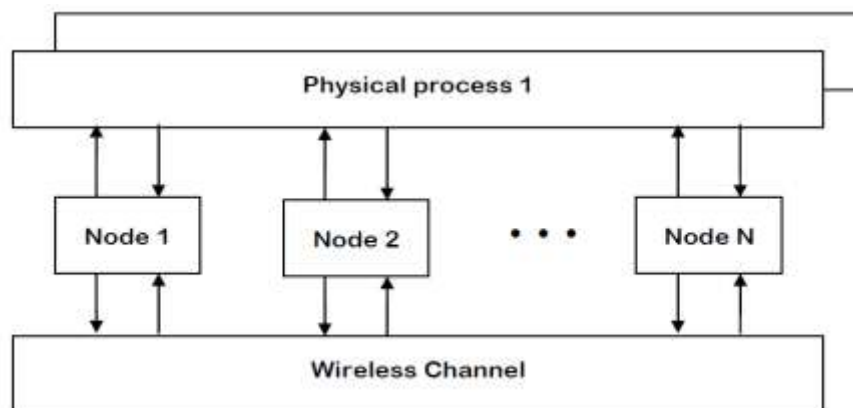


Figure 5.8. Les modules et leurs connections dans Castalia

¹⁴ <http://staff.um.edu.mt/jsk11/talk.html>

¹⁵ <http://www.wolverinesoftware.com/GPSSHOverview.htm>

¹⁶ <http://castalia.npc.nicta.com.au/index.php>

Notant que les différents nœuds ne se connectent pas directement les uns aux autres mais à travers le module *canal sans fil* (*Wireless Channel*). Les flèches montrent le passage de message d'un module à un autre. Quand un nœud a un paquet à envoyer, ceci va au *canal sans fil* qui alors décide quels nœuds devraient recevoir le paquet. Les nœuds sont aussi liés au *processus physique* (*physical process*) qui les contrôle. Il peut y avoir des processus physiques multiples, représentant les capteurs multiples qu'un nœud possède.

Le module *nœud* est un module composite¹⁷. La figure 5.9 représente la structure interne d'un nœud composite. Les flèches solides signifient le passage de message et les flèches en lignes discontinues signifient l'appel de fonction simple. Par exemple, la plupart des modules appellent une fonction du module *Ressource Manager* pour signaler que l'énergie est consommée. Le module *Application* est celui que l'utilisateur changera le plus communément, habituellement en créant un nouveau module pour implémenter un nouvel algorithme. Le module *MAC* et le module de *routage*, ainsi que le module de *gestion de mobilité* sont aussi de bons candidats pour le changement par l'utilisateur, encore habituellement en créant un nouveau module pour implémenter un nouveau protocole ou un nouveau modèle de la mobilité.

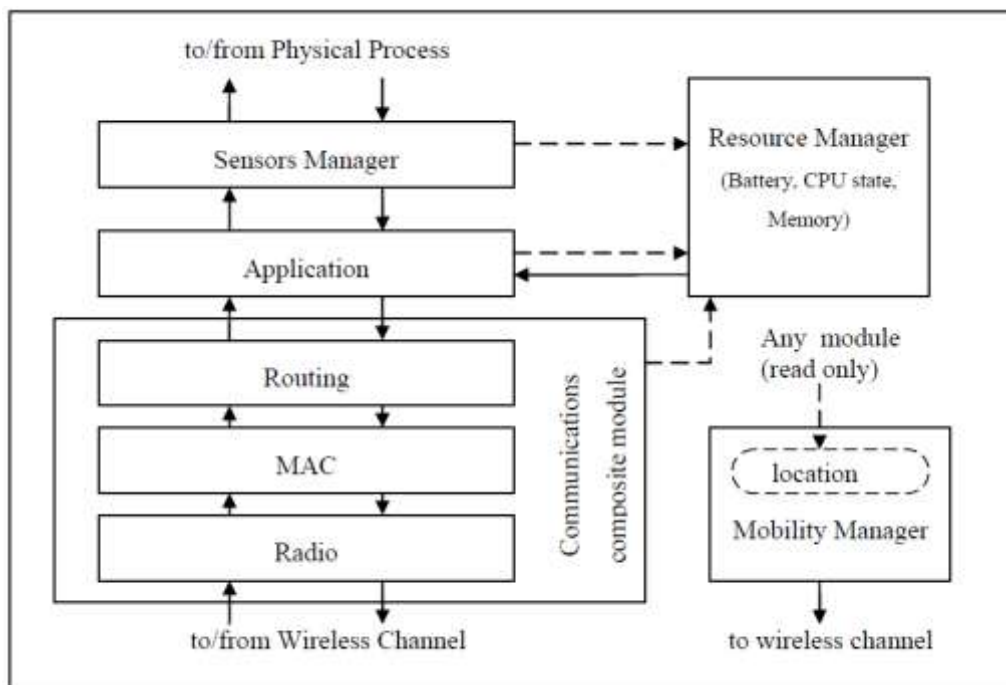


Figure 5.9. Le module nœud composite.

Donc les nœuds ne se communiquent pas directement comme cela se faisait avec OMNET++. Un module représentant la radio est utilisé. Ainsi, lorsqu'un nœud veut envoyer des données, il devra seulement l'acheminer vers la radio en spécifiant l'adresse de destination et c'est la radio qui veillera à ce que les données arrivent à bon port.

Castalia utilise les caractéristiques d'OMNET++ pour définir l'architecture d'un nœud capteur. Toutes les définitions sont décrites et implémentées dans le répertoire

¹⁷ Un module composite est juste une construction de simples et/ou autres modules composites

Castalia-3.2/src. Pour mieux visualiser l'architecture de Castalia, on se réfère à la capture d'écran suivante montrant la disposition des différents éléments le compose.

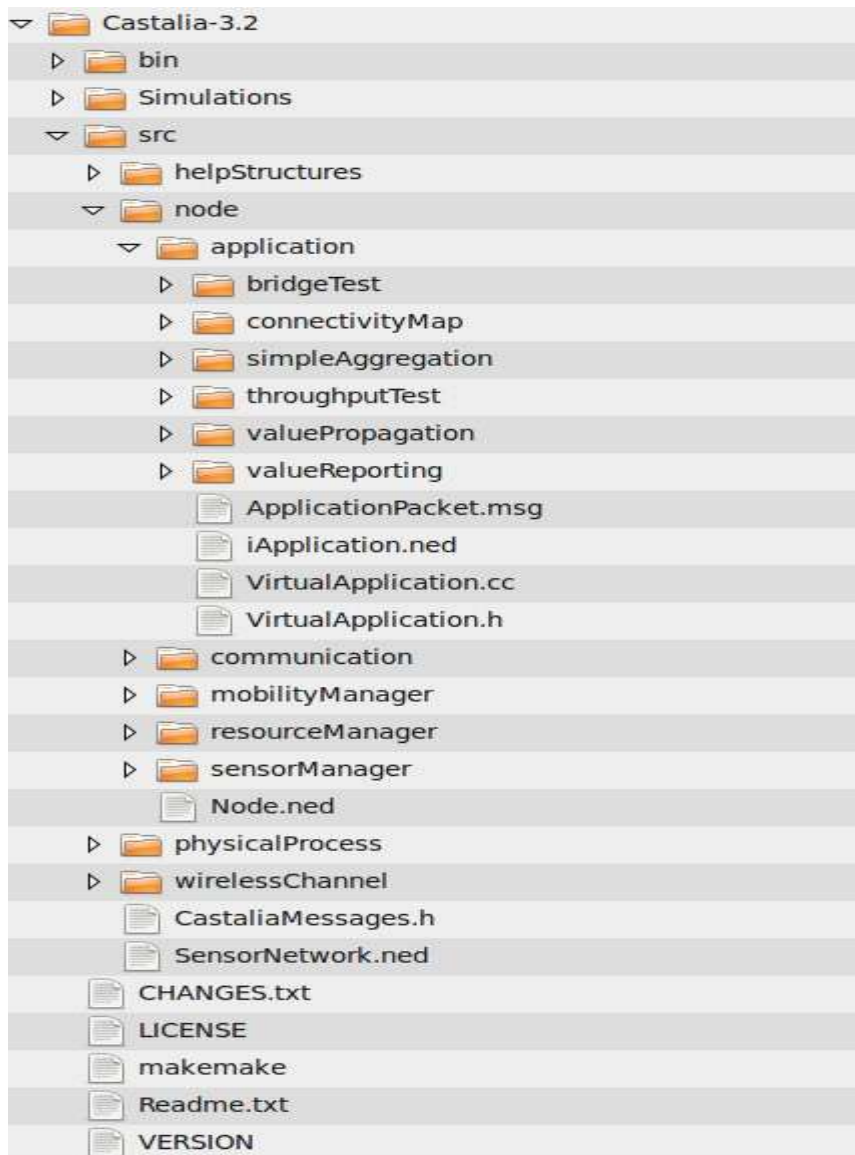


Figure 5.10. Hiérarchie des dossiers dans Castalia

4.1.2. Liste des modules

Le diagramme suivant fournit une façon simple pour voir tous les modules et aussi montrer leurs relations hiérarchiques. Notant quelquefois qu'un module peut être un de plusieurs modules similaires possibles (modules qui partagent une interface commune). Cela se passe avec les modules tels que le module *Application*, *Routing*, *MAC*, et le module *MobilityManager*. Par exemple, nous avons de multiple modules d'applications qui toutes partagent le même nom complet de la hiérarchie: *SN.node[*].Application*. Dans le diagramme en-dessous, tous les noms des modules possibles sont donnés entre crochets.

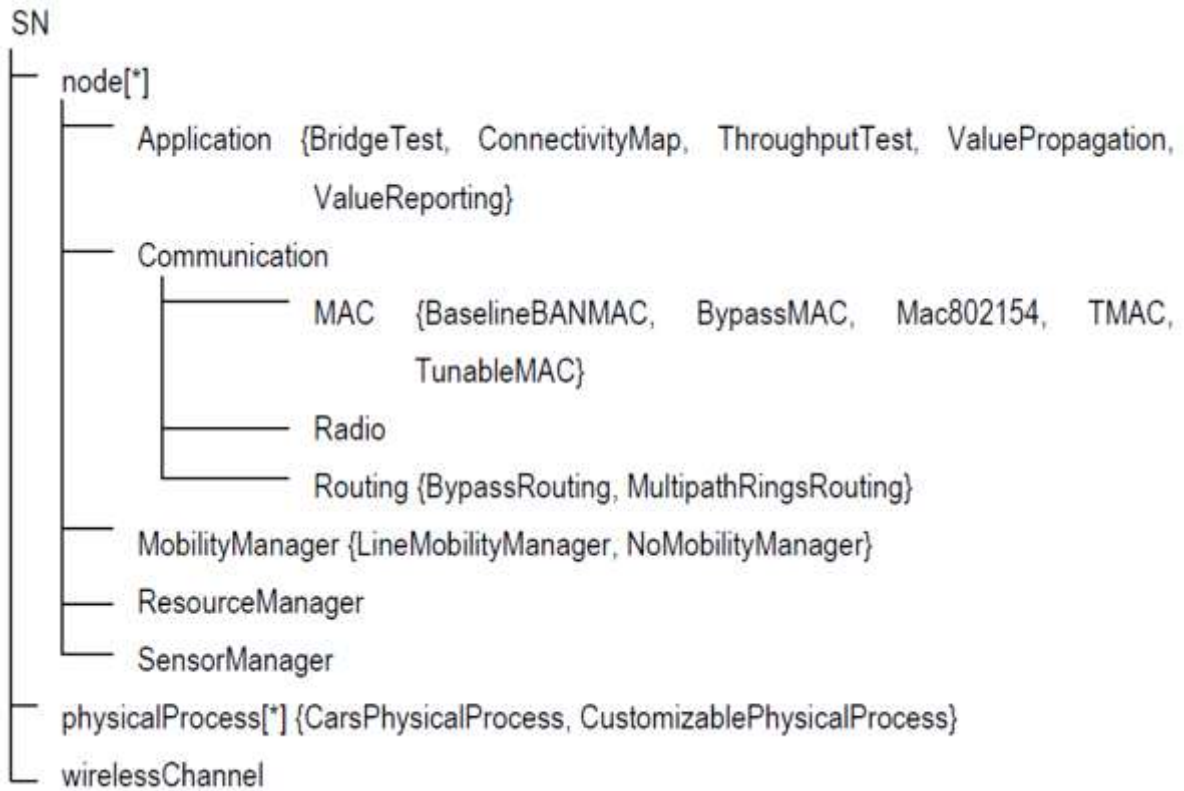


Figure 5.11. Liste des modules dans Castalia

4.2. Expérimentation et résultats

Nous avons pris comme référence pour notre simulation les valeurs caractéristiques de nœud-capteur bien connu : Mica2 fabriqué par Crossbow. Il s'appuie sur un microcontrôleur Atmel ATMEGA 128L cadencé à 7, 3728 MHz, avec un émetteur radio ChipCon CC1000 qui opère à la fréquence de 916 MHz et qui fournit un débit de transmission de 38, 4 kbps.

La simulation porte sur des images (BMP) en niveaux de gris codées à l'origine sur 8 bits par pixel. Le tableau 5.2 résume Les paramètres de simulation pour la plateforme utilisée.

	Mica2
Interface Radio	<ul style="list-style-type: none"> • Chipcon CC1000 • Puissance d'émission : Max (10dbm) Min (-20dbm)
Mémoire	<ul style="list-style-type: none"> • 4k de RAM • 512K de mémoire flash
Format de l'image	BMP en niveaux de gris (8bpp)
Taille de l'image	200X200 / 320X320
Facteur de qualité	{10, 50, 90}
Taille des paquets	64 octets
Energie	18720 joules (2 Piles alcalines)

Tableau 5.2. Paramètres de simulation pour Mica2

Les résultats pour les différents cas de simulation sont rangés dans les tableaux suivants :

	Nombre de paquets	Energie consommée[j]	Taux de compression [bpp]
JPEG _{proposed} : QF 10	67	0.168623	0.7716
JPEG _{proposed} : QF 50	206	0.520808	2.193
JPEG _{proposed} : QF 90	607	1.56048	4.491
Uncompressed	625	1.56573	-

Tableau 5.3. Energie consommée pour compression et transmission d'image (200x200) utilisant Mica2 à une puissance d'émission minimale (-20dbm) et avec différents facteurs de qualité : 10, 50 ,90

	Nombre de paquets	Energie consommée[j]	Taux de compression [bpp]
JPEG _{proposed} : QF 10	67	0.375775	0.7716
JPEG _{proposed} : QF 50	206	1.13373	2.193
JPEG _{proposed} : QF 90	607	3.10291	4.491
Uncompressed	625	3.57198	-

Tableau 5.4. Energie consommée pour compression et transmission d'image (200x200) utilisant Mica2 à une puissance d'émission maximale (10dbm) et avec différents facteurs de qualité : 10, 50 ,90

	Nombre de paquets	Energie consommée[j]	Taux de compression [bpp]
JPEG _{proposed} : QF 10	92	0.23115	0.425547
JPEG _{proposed} : QF 50	302	0.76215	1.29648
JPEG _{proposed} : QF 90	756	1.91939	2.90336
Uncompressed	1600	4.00827	-

Tableau 5.5. Energie consommée pour compression et transmission d'image (320x320) utilisant Mica2 à une puissance d'émission minimale (-20dbm) et avec différents facteurs de qualité : 10, 50 ,90

	Nombre de paquets	Energie consommée[j]	Taux de compression [bpp]
JPEG _{proposed} : QF 10	92	0.519595	0.425547
JPEG _{proposed} : QF 50	302	1.67462	1.29648
JPEG _{proposed} : QF 90	756	4.08644	2.90336
Uncompressed	1600	9.14427	-

Tableau 5.6. Energie consommée pour compression et transmission d'image (320x320) utilisant Mica2 à une puissance d'émission maximale (10dbm) et avec différents facteurs de qualité : 10, 50 ,90

La figure 5.12 montre la consommation en énergie de la compression et transmission d'images pour le mote Mica2 dans le cas où son émetteur radio est mis à sa puissance minimale.

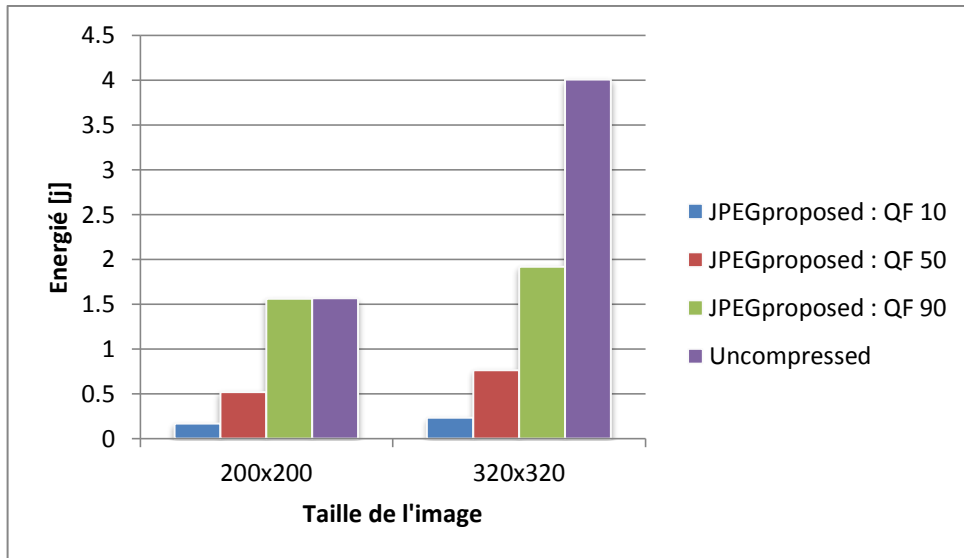


Figure 5.12. Consommation en énergie de la compression et transmission d'images à (-20dbm) avec différents facteurs de qualité : 10, 50, 90

La figure 5.13 montre la consommation en énergie de la compression et transmission d'images pour le mote Mica2 dans le cas où son émetteur radio est mis à sa puissance maximale.

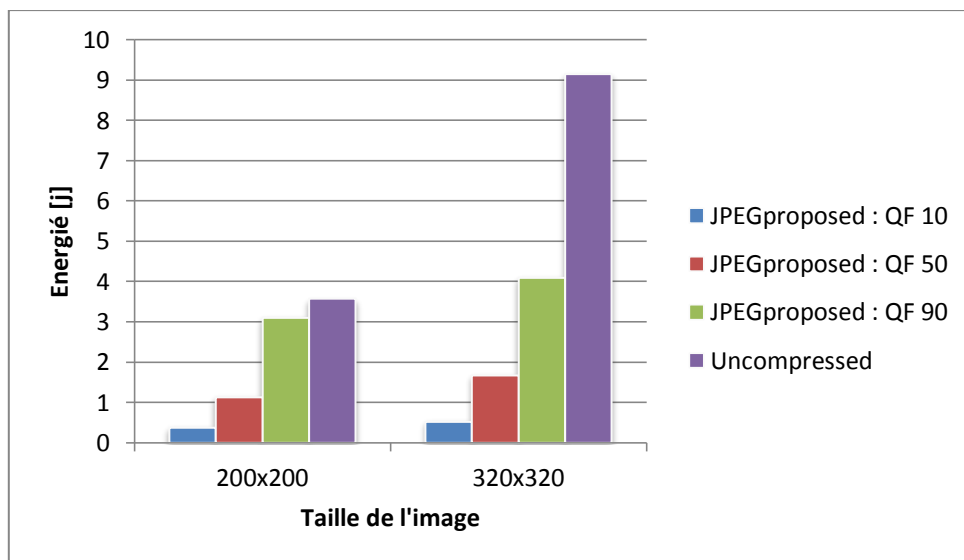


Figure 5.13. Consommation en énergie de la compression et transmission d'images à (10dbm) avec différents facteurs de qualité : 10, 50, 90

5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, la chaîne de compression proposée basée sur la DCT rapide. Nous avons évalué aussi les performances de la chaîne de compression proposée par simulation et nous avons pu obtenir un gain important en énergie.

Nous pouvons remarquer que la compression est rentable de point de vue consommation en énergie pour le mote Mica2. Les économies d'énergie deviennent de plus en plus intéressantes en diminuant le facteur de qualité. Les économies d'énergie sont d'environ 55.31%, 81.67%, 94.32% respectivement qu'on transmet une image (320x320) codée au débit binaire de 2.90 *bpp*, 1.30 *bpp* et 0.43 *bpp* avec une puissance d'émission de l'émetteur radio de « 10dBm ». Et d'environ 52.11%, 80.96%, 94.23% respectivement qu'en transmettant la même image codée également avec le même débit binaire qu'auparavant pour un rapport de puissance de l'émetteur radio de « -20dBm ».

Les résultats sont probants et montrent sans ambiguïtés la faisabilité de notre chaîne de compression pour les systèmes limités en ressources tel que le Mica2. Donc, il est toujours plus avantageux de compresser l'image avant transmission.

Conclusion Générale

Les réseaux de capteurs, nouvelle thématique de recherche innovante, viennent enrichir le domaine des réseaux et télécommunications. La dimension de ce nouveau type de réseau capable de collecter des informations sur un environnement et de les stocker ou les transmettre à une station collectrice, permet de surveiller différentes zones qui peuvent être hostiles à l'homme. La pluridisciplinarité de ce domaine pousse à la convergence des compétences de plusieurs laboratoires qui ont parfois des centres d'intérêts différents mais qui se rejoignent sur cette thématique. La particularité de ces nouveaux systèmes distribués émergents est la capacité réduite des nœuds en termes de calcul, de mémoire et d'énergie. Cette dernière caractéristique est le point critique dans ces réseaux. Les recherches dans ce domaine se focalisent donc dans la majorité des cas sur la gestion énergétique.

Dans le domaine de la compression d'images dans les RCSF, on remarque des efforts dans plusieurs travaux pour adapter les algorithmes de compression d'images aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil. Cependant, même si les algorithmes classiques présentent des bons performances, des expériences sur des capteurs démontrent que ces algorithmes sont beaucoup trop coûteux en énergie, plus coûteux que la transmission d'une image sans compression.

Notre proposition, consiste à intégrer dans une chaîne de compression de type JPEG, une DCT rapide basée sur l'algorithme de Loeffler, de la quantification scalaire, et du codage entropique basé sur le codeur Golomb couplé avec le codeur arithmétique QM. Cette solution permet de réduire la complexité de calcul de la chaîne de compression, et par incidence une réduction de la consommation d'énergie.

D'une manière générale, un algorithme de compression dédié aux réseaux de capteurs sans fil, doit présenter les propriétés suivantes :

- Faible complexité de calcul
- Faible usage de mémoire
- Faible consommation d'énergie
- Taux de compression acceptable

Bibliographie



-
- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393-422, 2002. 5, 6, 7, 20.
- [2] K. Holger and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2005. 5, 6, 7, 14, 20, 21.
- [3] Amiya N. and Ivan S. *Wireless Sensor and Actuator Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [4] Carlos F. et al. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. *IJCSNS Int 264 international Journal of Computer Science and Network Security*, VOL.7 No.3, March 2007.
- [5] Ning X. *A Survey of Sensor Network Applications*. University of Southern California.
- [6] J. Pottie, and W. J. Kaiser, *Wireless Integrated Network Sensors*, *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 51-58, May 2000.
- [7] Mainwaring, Alan, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler and John Anderson (2002). *Wireless sensor networks for habitat monitoring*. In: *2002 ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. WSNA '02*. Atlanta GA.
- [8] Naumowicz, Tomasz, Robin Freeman, Andreas Heil, Martin Calsyn, Eric Hellmich, Alexander Brandle, Tim Guilford et Jochen Schiller (2008). *Autonomous monitoring of vulnerable habitats using a wireless sensor network*. In : *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, REALWSN'08*. Glasgow, Scotland.
- [9] Harvard Sensor Networks Lab (2004 - 2008). *Volcano monitoring*. <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano>
- [10] Schulz, Jens, Frank Reichenbach, Jan Blumenthal and Dirk Timmermann (2008). *Low cost system for detecting leakages along artificial dikes with wireless sensor networks*. In : *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, REALWSN'08*. Glasgow, Scotland.
- [11] Doolin, David M. and Nicholas Sitar (2005). *Wireless sensors for wildfire monitoring*. In: *Proceedings of SPIE Symposium on Smart Structures & Materials/ NDE 2005*. San Diego, California.
- [12] Krishnamurthy, Lakshman, Robert Adler, Phil Buonadonna, Jasmeet Chhabra, Mick Flanigan, Nandakishore Kushalnagar, Lama Nachman and Mark Yarvis (2005). *Design and deployment of industrial sensor networks: Experiences from a semiconductor plant and the north sea*. In : *3rd international Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. pp. 64-75.
- [13] McCulloch, John, Siddeswara Mayura Guru and Daniel Hugo (2008). *Wireless sensor network deployment for water use efficiency in irrigation*. In: *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, REALWSN'08*. Glasgow, Scotland.
- [14] Vassileios Tsetsos, George Alyfantis, Tilemahos Hasiotis, Odysseas Sekkas, and Stathes Hadjiefthymiades. *Commercial wireless sensor networks: Technical and business issues*. In *2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Service (WONS 2005)*, 19-21 January 2005, St. Moritz, Switzerland, pages 166-173. IEEE Computer Society, 2005.
- [15] David M. Davenport, Budhaditya Deb, and Fergus J. Ross. *Wireless propagation and coexistence of medical body sensor networks for ambulatory patient monitoring*. In *Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, BSN 2009*, Berkeley, CA, USA, 3-5 June 2009, pages 41- 45. IEEE Computer Society, 2009.
- [16] Mekaoui L. *Compression d'images dans les réseaux de capteurs sans fil*. Phd thesis. CRAN 2012.
- [17] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava. *Energy-aware wireless microsensor networks*. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2):40-50, March 2002. 2, 13, 14, 22.
- [18] Pottie, G.J. and W.J. Kaiser (2000). *Wireless integrated network sensors*. *Communications of the ACM*, 43(5), 51-58.

- [19] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'01), pages 70-84, New York, NY, USA, 2001.ACM. 13
- [20] A. Wang, S-H. Cho, C.G. Sodini, and A.P. Chandrakasan, "Energy-efficient modulation and MAC for asymmetric microsensor systems," in *Proc. ISLPED*, 2001, pp 106-111.
- [21] Martin Enzinger. Energy-efficient communication in Wireless Sensor Networks. Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen. SS2012.
- [22] Zahra R., Shima M. Energy Saving in Wireless Sensor Networks. International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES) Vol.3, No.1,February 2012.
- [23] Dietrich, I. and Dressler, F. 2009. On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Trans. Sensor Network 5, 1, Article 5 (January 2009), 39 pages. DOI=10.1145/1464420.1464425 <http://doi.acm.org/10.1145/1464420.1464425>.
- [24] Tian, D. and Georganas, N. D. 2002. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002). Atlanta, GA, 32-41.
- [25] Cardei, M., Thai, M. T., Li, Y., and Wu, W. Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks. In 24th IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2005). Miami, FL.
- [26] Wu, K., Gao, Y., Li, F., and Xiao, Y. 2005. Lightweight Deployment-Aware Scheduling for Wireless Sensor Networks. Mobile Networks and Applications 10, 6, 837-852.
- [27] Mo, W., Qiao, D., and Wang, Z. 2005. Mostly-Sleeping Wireless Sensor Networks: Connectivity, k-Coverage, and alpha-Lifetime. In The 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, IL.
- [28] Carbutar, B., Grama, A., Vitek, J., and Carbutar, O. 2006. Redundancy and coverage detection in sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN) 2, 1 (February), 94-128.
- [29] Mahfoudh, S. and P.Minet (2008). Survey of energy efficient strategies in wireless ad hoc and sensor networks. In : Networking, 2008. ICN 2008. Seventh International Conference on. IEEE. pp. 1-7.
- [30] Anastasi, G., M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella (2009). Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. Ad Hoc Networks, 7(3), 537-568.
- [31] Armstrong T., "Wake-up Based Power Management in Multi-hop Wireless Networks", available at <http://www.eecg.toronto.edu/~trevor/Wakeup/index.html>.
- [32] V. Rajendran, K. Obraczka, J. J. Garcia-Luna Aceves, "Energy-efficient, Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", Proc. ACM SenSys 2003, Los Angeles (USA), November 2003.
- [33] V. Rajendran, J. Garcia-Luna-Aceves and K. Obraczka, "Efficient Application-aware Medium Access for Sensor Networks", Proc. of the 2nd IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2005), Washington, DC, November 2005.
- [34] J. Polastre, J. Hill and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Sensor Networks", Proc. of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November 3-5, 2004.
- [35] Ye W., Heidmann J., « Medium Access Control in Wireless Sensor Networks», USC/ISI Technical Report ISI-TR-580, Octobre 2003.
- [36] Heidemann J., Ye W., Estrin D., « An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks », IEEE Infocom, Juin 2002.
- [37] T. V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 2003.

- [38] I.Rhee, A.Warrier, M. Aia et al, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions*, pp.511 – 524,2008.
- [39] Al-karaki, J. and Kamel, A. (2004). "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey".
- [40] Akkaya, K. and M. Younis (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks.
- [41] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, January 2000.
- [42] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," In *Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001*, pp. 70-84.
- [43] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan. Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", *UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023*, May 2001.
- [44] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan. "Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, Volume: 8, pp. 169-185, 2002.
- [45] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," *Proceedings of ACM MobiCom '00*, Boston, MA, 2000, pp. 56-67.
- [46] M.A. Labrador and P.M. Wightman. *Topology Control in Wireless Sensor Networks: with a companion simulation tool for teaching and research*. Springer.
- [47] M.C.Vuran,O.B.Akan,I.F.Akyildiz,"Spatio-temporal correlation: theory and applications for wireless sensor networks", *Computer Networks Journal*,2004.
- [48] Jonathan G.K. et al. A Simple Data Compression Algorithm for Wireless Sensor Networks.
- [49] Sergio P., Francesca C., and Laura G. *Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: A Multifaceted Perspective*. G. Ferrari (ed.), *Sensor Networks, Signals and Communication Technology*, DOI 10.1007/978-3-642-01341-6 6, C _ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [50] Francesco M. and Massimo V. A two-objective evolutionary approach to design lossy compression algorithms for tiny nodes of wireless sensor networks.
- [51] Dame D. *Optimisation distribuée de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil*. Phd thesis. Université Gaston Berger de Saint Louis.
- [52] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, C. Petrioli, "Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime", *Proc. of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '05)*, Hawaii, 03-06 Jan. 2005.
- [53] Mammeri A., Hadjou B., Khoumsi A. A survey of image compression algorithms for visual sensor networks. *Sherbrooke university*. Pages 2-3.
- [54] ZainEldin H. et al., *Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey*, *Ain Shams Eng J* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.001>
- [55] Arora, A., P. Dutta, S. Bapat, V. Kulathumani, H. Zhang, V. Naik, V. Mittal, H. Cao, M. Demirbas, M. Gouda and al. (2004). *A line in the sand: a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking*.
- [56] Biagioni, E.S. and KW Bridges (2002). The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 16(3), 315–324.
- [57] Tokihiro F. and Masayuki H. *Field Monitoring Using Sensor-Nodes with a Web Server*. *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.17 No.2, 2005. pp.164-172.

- [58] Wawerla, J., S. Marshall, G. Mori, K. Rothley and P. Sabzmejdani (2009). Bearcat: Automated wildlife monitoring at the Arctic Circle. *Machine Vision and Applications*, 20(5), 303–317.
- [59] Jeongyeup P., John H., Sharon C. and Ramesh G. Image-Based Environmental Monitoring Sensor Application Using an Embedded Wireless Sensor Network. Published: 28 August 2014.
- [60] L. Ferrigno, S. Marano, V. Paciello, et A. Pietrosanto. Balancing computational and transmission power consumption in wireless image sensor networks. Dans *IEEE Int. Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measures Systems (VECIMS)*, Giardini Naxos, Italy, July 2005. IEEE.
- [61] I.F. Akyildiz et al., A survey on wireless multimedia sensor networks, *Computer Network* (2006), doi:10.1016/j.comnet.2006.10.002.
- [62] Jorge Fernandez, Berni Ricardo Carmona, Galan Angel Rodriguez, Vazquez, Vision-enabled WSN nodes: state of the art, Low-power smart imagers for vision-enabled sensor networks: chapter 2, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, DOI 10.1007/978-1-4614-2392-8, 2012.
- [63] Sven Z. and Thomas N. Technologies and Architectures for Multimedia-Support in Wireless Sensor Networks. *University of Limerick Ireland*.
- [64] Hengstler, S., Prashanth, D., Sufen, F., & Aghajan, H. 2007. Mesheye: a Hybrid-Resolution Smart Camera Mote for Applications in Distributed Intelligent Surveillance. Pages 360{369 of: Proc. of 6th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks.
- [65] Rahimi, M., Baer, R., Iroezi, O.I., Garcia, J.C., Warrior, J., Estrin, D., & Srivastava, M. 2005. Cyclops: In Situ Image Sensing and Interpretation in Wireless Sensor Networks. Pages 192{204 of: Proc. of 3rd Int. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys).
- [66] Rowe, Anthony, Adam Goode, Dhiraj Goel and Illah Nourbakhsh (2007). CMUcam3: An open programmable embedded vision sensor. Technical Report RI-TR-07-13. Carnegie Mellon Robotics Institute. Pittsburgh, Pennsylvania 15213.
- [67] Teixeira, T., Lymberopoulos, D., Culurciello, E., Aloimonos, Y., & Savvides, A. 2006. A Lightweight Camera Sensor Network Operating on Symbolic Information. In: First Workshop on Distributed Smart Cameras.
- [68] Culurciello, Eugenio and Andreas G. Andreou (2006). CMOS image sensors for sensor networks. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 49(1), 39–51.
- [69] Culurciello, Eugenio and Andreas G. Andreou (2004). ALOHA CMOS imager. In: IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Vancouver, Canada. pp. IV–956–9.
- [70] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. B. Wicker, “The impact of data aggregation in wireless sensor networks,” in *ICDCSW '02: Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2002, pp. 575–578.
- [71] Ahmed C., Adel S., Gilles S. Contribution to the design of a CMOS image sensor with low-complexity video compression for wireless sensor networks. *Journal of Systems Architecture* 59 (2013) 818–825.
- [72] Asnath Vicky Phamila Y., Amutha R. Low complexity energy efficient very low bit-rate image compression scheme for wireless sensor network. *Information Processing Letters* 113(2013) 672–676.
- [73] Med Lasaad K., Adel S., Vincent L., Kholdoun T., Leila M., Jean-Marie M. Low power hardware-based image compression solution for wireless camera sensor networks. *Computer Standards & Interfaces* 34 (2012) 14–23.
- [74] Mekaoui L., Vincent L. and Jean-marie M. Fast Zonal DCT-based image compression for Wireless Camera Sensor Networks. 2nd International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, IPTA 2010, Paris: France (2010).
- [75] Cristian D.F., Vincent L. , Francis L. Tiny block-size coding for energy-efficient image compression and communication in wireless cameras sensor networks. *Signal Processing: Image Communication* 26 (2011) 466–481.

- [76] Huaming W., Alhussein A. Energy efficient distributed image compression in resource-constrained multihop wireless networks. *Computer Communications*, Volume 28, Issue 14, 1 September 2005, Pages 1658-1668.
- [77] Qin L., Wusheng L., Jidong W., Bo C. Low-complexity and energy efficient image compression scheme for wireless sensor networks. *Computer Networks* 52 (2008) 2594–2603.
- [78] Zhen Z., Qin L., Wusheng L. A two-hop clustered image transmission scheme for maximizing network lifetime in wireless multimedia sensor networks. *Computer Communications* 35 (2012) 100–108.
- [79] Kerem I., Cem Ü., Sebnem B. Low-cost prioritization of image blocks in wireless sensor networks for border surveillance. *Journal of Network and Computer Applications* 38(2014)54–64.
- [80] Vincent L., Cristian D.-F., Nicolas K. Energy-Efficient Transmission of Wavelet-Based Images in Wireless Sensor Networks. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Springer, 2007, 2007, pp.ID 47345. <10.1155/2007/47345>. <hal-00146211>.
- [81] Guillemot L. Une approche vectorielle pour exploiter le contenu de l'image en compression et tatouage. Phd thesis. CRAN 2004.
- [82] Ahmed, N., T. Natarajan and KR Rao (1974). Discrete cosine transform. *Computers, IEEE Transactions on*, 100(1), 90–93.
- [83] Mallat, S.G. (1999). *A wavelet tour of signal processing*. Academic Pr.
- [84] LOSSY IMAGE COMPRESSION SYSTEMS. Version 2 ECE IIT, Kharagpur
- [85] J. Max, "Quantizing for Minimum Distortion," *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 6, no. 1, pp. 7–12, Mar. 1960.
- [86] Gersho A. and Gray R.M. *vector quantization and signal compression* Boston, kluwer academic publishers 1992.
- [87] *Principes généraux de quantification d'une source*.
- [88] Y. Linde, A. Buzo, and R. M. Gray, "An Algorithm for Vector Quantizer Design," *IEEE Trans. on Communication*, Vol. COM-28, pp. 84-95, Jan. 1980.
- [89] Lloud (S.P) Least square quantization in PCM . *IEEE trans. On Information Theory* vol. 28 N° 2 mars 1982. pp 129-137.
- [90] B. Gosselin. *La Quantification des Signaux*.
- [91] D.A. Huffman, "A method for the construction of minimum-redundancy codes", *Proc. of the IRE*, vol.40, p. 1098-1101, septembre 1952
- [92] G. L. J. Rissanen, « Arithmetic Coding », *IEEE Trans.on Communication*, June 1981.
- [93] Golomb, SW (1966). Run-length encodings. *IEEE Transactions on Information Theory*, 12, 399–401.
- [94] *La Compression des Images Numériques*. Paris: Hermès, 1995
- [95] Rice, R. and J. Plaunt (1971). Adaptive variable-length coding for efficient compression of space craft television data. *Communication Technology, IEEE Transactions on*, 19(6), 889–897.
- [96] <http://www-ljk.imag.fr/membres/Valerie.Perrier/SiteWeb/node9.html>
- [97] 丁建均 教授 (professeur Ding Jianjun). *Fast Algorithms for Discrete Cosine and Sine Transforms. Advanced Digital Signal Processing.*
- [98] A. Madisetti and A. N. Willson Jr., "A 100 MHz 2-D 8x8 DCT/IDCT processor for HDTV applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 5, no. 2, April 1995
- [99] http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformé_en_cosinus_discrète

- [100] Med Lassaad K., Adel S., Vincent L., Leila M., Jean-Marie M., KholdounT. Design and performance analysis of a zonal DCT-based image encoder for Wireless Camera Sensor Networks. *Microelectronics Journal*, Volume 43, Issue 11, November 2012, Pages 809-817.
- [101] A.Mammeri, A.Khoumsi,D.Ziou,B.Hadjou, Modeling and adapting JPEG to the energy requirements of VSN, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN'08,USA, 2008*, pp.1–6.
- [102] Phamila, Y.A.V. and Amutha, R., Low complexity image compression using Half Zonal Binary DCT for wireless sensor networks. *Third International Conference on Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT)*, 2012; Page(s):1-7.
- [103] G. K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *Commun. ACM*, vol. 34, no. 4, pp. 30–44, 1991.
- [104] C. N. Taylor, D. Panigrahi, and S. Dey, "Design of an adaptive architecture for energy efficient wireless image communication," *Lecture notes in computer science*, pp. 260–273, 2002.
- [105] W. A. Chen, C. Harrison, and S. C. Fralick, "A Fast computational Algorithm for the Discrete Cosine Transform," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-25, No. 9, Sept. 1977, pp. 1004-1011.
- [106] Z. Wang, "Fast Algorithms for the Discrete W-Transform and for the Discrete Fourier Transform," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-32, No. 4, Aug. 1984, pp. 803-816.
- [107] Byeong Lee, "A New Algorithm to Compute the Discrete Cosine Transform," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-32, No. 6, Dec. 19M, pp. 1243-1245.
- [108] M. Vetterli, H. Nussbaumer, "Simple FFT and DCT Algorithms with Reduced Number of Operations," *Signal Processing (North Holland)*, Vol. 6, No. 4, Aug. 1984, pp. 267-278.
- [109] N. Suehiro and M. Aatori, "Fast Algorithms for the DFT and other Sinusoidal Transforms," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-34, No. 3, June 1986, pp. 642-644.
- [110] H. S. Hou, "A Fast Recursive Algorithm for Computing the Discrete Cosine Transform," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-35, No. 10, Oct. 1987, pp. 1455-1461.
- [111] C.Loeffler, A. Lieenberg, and G.S. Moschytz, "Practical fast 1-D DCT algorithms with 11 multiplications", *IEEE*,pp.988-991.1989.
- [112] Castalia. A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks. User's Manual. [online], September 2010. Available from: <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia-UserManual.pdf>.
- [113] Marco Zuniga, Bhaskar Krishnamachari, "Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links", *First IEEE International Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks (SECON)*, Santa Clara, CA, October 2004.