

Efficacité énergétique d'une DCT zonale rapide dans le contexte de la compression d'image dans les réseaux de capteurs sans fil

L. Makkaoui¹

V. Lecuire¹

J-M. Moureaux¹

¹ Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)

Nancy-Université, CNRS
Campus Sciences, BP 70239
F-54506 Vandœuvre-les-Nancy Cedex, FRANCE

{leila.makkaoui, vincent.lecuire, jean-marie.moureaux}@cran.uhp-nancy.fr

Résumé

Cet article traite de la compression d'image dans le contexte d'application des réseaux de capteurs sans fil, où l'efficacité énergétique est un critère dominant pour la durée de vie des noeuds caméra, aussi bien que pour la durée de vie du réseau tout entier. Nous proposons d'intégrer dans une chaîne de compression de type JPEG une DCT zonale rapide, autrement dit de combiner une méthode de sélection zonale des coefficients avec une méthode de DCT rapide. Cela réduit 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 résultats obtenus sur le microcontrôleur de référence MSP430 (il a été adopté dans les noeuds Telos développés à Berkeley) montrent que des économies d'énergie importantes sont possibles, environ 7.5% à qualité d'image égale, et jusqu'à 40%, au prix d'une distorsion de l'image plus grande mais restant tout à fait acceptable pour beaucoup d'applications.

Mots clefs

Compression d'images fixes, transformée en cosinus discrète, réseaux de capteurs sans fil, consommation d'énergie.

1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une révolution technologique qui change radicalement la façon de concevoir les systèmes de surveillance de très grandes échelles. En effet, les progrès croissants de la microélectronique et des communications par ondes radio permettent de fabriquer des *noeuds capteurs* de plus en plus petits, embarquant une unité de traitement de données, un module de transmission sans fil et une batterie. Ces capteurs abandonnés sur le terrain vont s'organiser en réseau de manière spontanée et collaborer entre eux pour récolter des données (grandeur physique mesurée) et les acheminer jusqu'à un point de collecte (noeud puits qui fait l'interface entre le réseau de capteurs et l'utilisateur consommateur des

données). Les applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil sont nombreuses. Citons par exemple les surveillances environnementales (activité volcanique, sismique, climatique, etc.) et militaires (détection des mouvements ennemis, localisation et traque de cibles). Un problème fondamental dans les réseaux de capteurs sans fil se rapporte à la consommation d'énergie, l'hypothèse communément retenue étant qu'il est impossible de recharger ou remplacer les batteries des noeuds capteurs une fois qu'ils ont été abandonnés sur le terrain. Par conséquent, tout noeud ayant épuisé sa batterie devient définitivement inutilisable, si bien que la couverture et la connectivité du réseau va diminuer inexorablement au cours du temps jusqu'à atteindre le point de rupture. L'efficacité énergétique doit donc être recherchée, pour optimiser la durée de vie des noeuds (critère local) aussi bien que la durée de vie du réseau tout entier (critère global).

Parmi toutes les applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil, celles utilisant des capteurs d'image sont appréciables pour tout ce qui concerne la reconnaissance, la localisation et le dénombrement d'objets par la vision [1]. Des noeuds capteurs dotés d'une caméra existent déjà, comme Cyclops [2] qui est un prototype de laboratoire, et le capteur multimédia IMB vendu par Crossbow [3]. Mais les applications basées sur des capteurs d'image sont particulièrement gourmandes en énergie puisque la quantité de données nécessaire pour représenter une image diffère de plusieurs ordres de grandeur en comparaison d'une valeur scalaire classique (une mesure de température par exemple). Comme le transceiver radio est un des composants les plus gourmands en énergie, 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 noeuds capteurs sont par nature très limités en capacité de calcul et de mémoire, c'est une conséquence directe des contraintes de consommation d'énergie, de miniaturisation et de coût de fabrication. Ils ne peuvent donc pas implanter des algorithmes de compression de trop grande complexité. De plus, des travaux

comme ceux de Ferrigno et al. [4] ont montré que des algorithmes comme JPEG2000, SPIHT et même JPEG sont inefficaces sur la plupart des plateformes logicielles utilisées dans les réseaux de capteurs, c'est-à-dire que l'opération de compression de l'image coûte plus d'énergie qu'une transmission de l'image non compressée.

Dans cet article, nous considérons une chaîne de compression d'image basée sur l'algorithme bien connu JPEG, et nous proposons de combiner une méthode de DCT rapide avec une méthode de sélection zonale des coefficients. Une telle combinaison, que nous désignons sous le terme de *DCT zonale rapide*, réduit le nombre de coefficients à calculer, et donc à quantifier et à encoder. Précisons que les méthodes de DCT rapides et de sélection zonale des coefficients ont déjà été largement étudiées dans la littérature [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Mais à notre connaissance, il n'y a pas de travaux qui vise à les associer et leur performance combinée reste à évaluer. Notre contribution se situe là, en particulier :

- Nous comparons deux modèles de sélection zonale des coefficients de la DCT, l'un utilisant une zone de forme carrée et l'autre une zone de forme triangulaire ;
- Nous évaluons la complexité de la DCT rapide de Loeffler en fonction de la dimension de la zone de sélection des coefficients ;
- Nous évaluons la consommation d'énergie de notre chaîne de compression pour le microcontrôleur MSP430 de Texas Instruments, qui fait référence dans les noeuds de capteurs sans fil.

2 Proposition

Les algorithmes de compression d'image basés sur la transformée en cosinus discrète (DCT) avec des blocs de 8×8 pixels sont très populaires mais cette transformée est coûteuse en calcul, et donc gourmande en énergie. Dans une chaîne de compression conventionnelle <Transformée - Quantification - Codage> implantée logiciellement, l'étape de la DCT représente à elle seule environ 60% du coût total en énergie [12]. De nombreux travaux traitent de la réduction du coût de calcul de la DCT. Une approche consiste à réécrire la transformée sous forme matricielle et à factoriser la décomposition de manière à réduire le nombre de multiplications scalaires nécessaires. Pour la DCT 1-D, l'algorithme de Loeffler-Ligtenberg-Moschytz (LLM) [5], avec 11 multiplications et 29 additions seulement, est le plus efficace (il a été prouvé qu'on ne peut pas faire moins que 11 multiplications). Le graphe des flux de l'algorithme LLM est présenté Figure 1. La DCT 2-D peut être obtenue en appliquant d'abord la DCT 1-D sur chaque ligne du bloc de pixels puis sur chacune des colonnes du bloc résultant. Avec l'algorithme LLM, la DCT 2-D nécessite 176 multiplications et 464 additions. Comme les multiplications sont des opérations coûteuses en énergie, quelques algorithmes tels que BinDCT [7], Cordic DCT [8] et Cordic Loeffler DCT [9] opèrent dans l'espace des valeurs entières et utilisent des additions et des

décalages en lieu et place des multiplications. Cela coûte moins d'énergie mais les valeurs obtenues pour les coefficients de la DCT sont des approximations des valeurs exactes. Cela se fait donc au prix d'une plus grande distorsion de l'image. De toutes ces méthodes approchées, c'est l'algorithme de Cordic Loeffler DCT, avec 38 additions et 16 décalages (soit 608 additions et 256 décalages en 2-D), qui fournit le meilleur compromis entre la complexité de calcul et la distorsion de l'image. Dans le domaine de la DCT 2-D, Feig et Winograd ont proposé l'un des algorithmes les plus rapides pour des blocs de 8×8 pixels, qui nécessite seulement 94 multiplications et 454 additions. D'une manière générale, les approches considérant directement la DCT 2-D ont une complexité de calcul moindre que les approches 1-D par lignes puis colonnes mais elles exigent un espace mémoire important pour stocker les résultats intermédiaires. Les nombreux échanges mémoire qui sont sollicités par le microcontrôleur peut dégrader la vitesse d'exécution drastiquement.

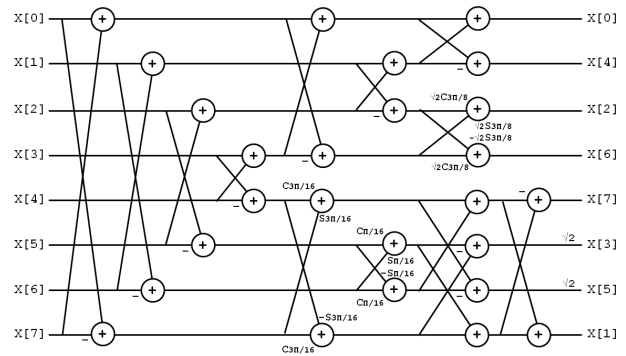


Figure 1 – Graphe des flux de l'algorithme LLM.

Une autre approche pour réduire le coût de calcul de la DCT et des étapes qui suivent dans la chaîne de compression est basée sur le codage zonal. Cela consiste à opérer sur un sous-ensemble de coefficients situés dans une zone du bloc 8×8 bien délimitée. Il s'agit de sélectionner les coefficients les plus importants, c'est-à-dire ceux de basses fréquences, pour calculer, quantifier, encoder et transmettre seulement ceux-là. Dans [10] par exemple, la zone de sélection des coefficients correspond au carré de longueur k , avec $k < 8$, situé dans la partie supérieure gauche du bloc 8×8 (voir Figure 2(a)). Il y a ici k^2 coefficients à traiter et les autres sont négligés (ils seront implicitement mis à zéro côté décodeur). Plus le paramètre k est petit, et plus le temps pour exécuter la DCT, puis quantifier et coder les coefficients sera rapide. Les effets de la variation du paramètre k et du niveau de quantification sur la consommation d'énergie, la latence, la qualité de l'image et le débit sont étudiés dans [11]. Dans [13], le même principe est repris, mais cette fois-ci, la zone de sélection des coefficients est définie par un triangle rectangle de cathète k , situé dans la partie supérieure gauche de la zone carrée précédemment mentionnée (voir Figure 2(b)). Dans cette

forme, il y a seulement $\frac{1}{2}k(k+1)$ coefficients significatifs au lieu de k^2 . Remarquons que pour une valeur de k donnée, la forme triangulaire va permettre de diminuer le temps de calcul pour les étapes de quantification et de codage des coefficients comparée à la forme carrée, puisqu'il y a moins de coefficients à traiter, mais le coût de la DCT 2-D reste exactement le même. Que la forme soit carrée ou triangulaire en effet, une DCT 1-D sera appliquée d'abord sur les 8 lignes du bloc de pixels puis sur chacune des k colonnes du bloc résultant.

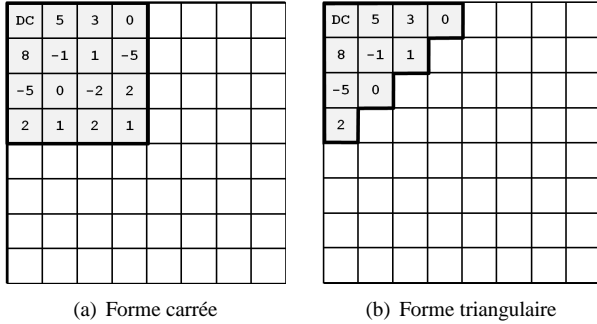


Figure 2 – Différentes formes de DCT zonale avec $k = 4$.

Les deux approches présentées, approche par factorisation de la matrice et approche par sélection zonale des coefficients, sont complémentaires et peuvent être combinées. Nous désignerons une telle combinaison comme étant une *DCT zonale rapide*. Nous allons d'abord étudier les effets de la variation du paramètre k sur le coût de calcul des coefficients de la DCT, pour des zones des deux formes. Dans cet article, nous avons adopté l'algorithme LLM comme point de départ de notre analyse mais celle-ci peut être reproduite pour d'autres algorithmes de DCT rapide. Comme nous l'avons déjà indiqué, la DCT zonale rapide consiste à calculer seulement les coefficients les plus significatifs, ceux de basses fréquences. En considérant l'algorithme LLM, cela se traduit par réduire le nombre de ses sorties à k . Un exemple est montré Figure 3 pour le cas où $k = 4$.

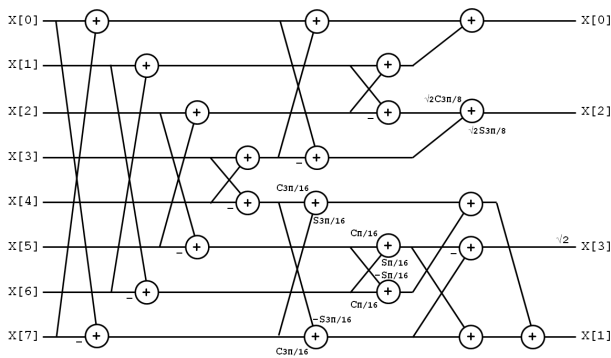


Figure 3 – Graphe des flux de la DCT zonale avec l'algorithme LLM (avec $k = 4$).

On constate qu'avec $k = 4$, le nombre d'opérations est réduit à 9 multiplications et 24 additions. Comparé à l'al-

gorithme LLM original, les économies de calcul peuvent paraître modestes, 2 multiplications et 5 additions en moins seulement. Lorsqu'on projette les résultats à la DCT 2-D cependant, la réduction du coût de calcul devient franchement significative puisque on gagne 68 multiplications et 176 additions. Cela fait une économie d'environ 38% sur chaque type d'opération. La table 1 donne le nombre d'opérations nécessaires pour calculer la DCT zonale rapide, en 1-D et en 2-D, pour les différentes valeurs de k .

	Coût de la DCT 1-D		Coût de la DCT 2-D	
	mult.	add.	mult.	add.
LLM (référence)	11	29	176	464
LLM Zonal ($k=7$)	11	28	165	420
LLM Zonal ($k=6$)	10	26	140	364
LLM Zonal ($k=5$)	9	25	117	325
LLM Zonal ($k=4$)	9	24	108	288
LLM Zonal ($k=3$)	8	23	88	253
LLM Zonal ($k=2$)	6	20	60	200

Tableau 1 – Coût de calcul de la DCT zonale rapide.

Reste à comparer l'efficacité énergétique des deux formes de DCT zonale rapide. Pour une valeur de k donnée, la forme triangulaire est plus économique en énergie puisqu'il y a moins de coefficients à quantifier et à encoder. En contrepartie, la distorsion de l'image sera plus élevée, notamment pour des niveaux de quantification de moyenne et de haute qualité, puisqu'un plus grand nombre de coefficients sont négligés. Toutefois, l'efficacité énergétique se rapporte au rapport énergie distorsion pour un débit donné, ou encore au rapport énergie débit pour une distorsion donnée. Nous avons mené une série d'expériences sur plusieurs images tests, incluant Lena, Peppers et Baboon pour les débits de 0.5 et 1 bpp. Dans tous les cas, il apparaît que la forme carrée est la plus efficace. Cela s'explique facilement : Les résultats montrent en effet que la distorsion de l'image obtenue est pratiquement la même dans les deux formes lorsque le nombre de coefficients à traiter est similaire. Par exemple, pour la forme carrée avec $k = 4$, il y a 16 coefficients à traiter et pour la forme triangulaire avec $k = 5$, il y en a 15. Ces deux scénarios sont comparables à débit constant puisqu'ils donnent à peu près le même niveau de distorsion (pour l'image Lena à 0.5 bpp, le PSNR est de 33.52 dB pour la forme carrée et de 33.35 dB pour la forme triangulaire). Et au final, le coût de la DCT est en faveur de la forme carrée, alors que les coûts de la quantification et du codage des coefficients sont très proches. Prenons un autre exemple symbolique : Pour la forme carrée avec $k = 6$ et la forme triangulaire avec $k = 8$, il y a 36 coefficients à traiter. Toujours pour l'image Lena à 0.5 bpp, les PSNR sont très proches (34.26 dB pour la forme carrée et 34.28 dB pour l'autre). Et là encore, le coût énergétique est en faveur de la forme carrée.

3 Évaluation de performance

Les performances de la DCT zonale rapide ont été évaluées en considérant une chaîne de compression de type JPEG, et en utilisant les tables de quantification et du codage

de Huffman qui sont recommandées dans l'annexe de la norme JPEG [14]. Le premier critère de performance considéré était la distorsion de l'image compressée, à travers la mesure du PSNR. Les résultats sont présentés Figure 4 en prenant l'exemple de l'image Lena encodée au débit de 0.5 bpp. Les deux formes de zone, carrée et triangulaire, ont été utilisées avec plusieurs valeurs de k .



Figure 4 – image Lena codée à 0.5 bpp, pour les deux formes zonales et différentes valeurs de k .

Evidemment, la distorsion de l'image compressée aug-

mente et le PSNR diminue quand k diminue. Pour des grandes valeurs de k (entre 6 et 8), et quelle que soit la forme adoptée, on constate aussi bien visuellement que dans les valeurs du PSNR que la qualité des images sont très proches de celle obtenue avec la DCT classique. Il y a donc matière à faire des économies d'énergie en utilisant une DCT zonale rapide avec un très faible impact sur la distorsion d'image. Pour des petites valeurs de k (4 et en dessous), la distorsion s'accroît rapidement lorsque k diminue. En fait, la qualité d'image reste visuellement acceptable pour beaucoup d'applications jusqu'à $k = 3$ pour la forme carrée et jusqu'à $k = 4$ pour la forme triangulaire. En dessous de ces valeurs, les effets de blocs classiques de la compression par DCT à bas débit deviennent trop marqués. Précisons que ces tendances ont été observées avec d'autres valeurs du débit et sur d'autres images tests. Le deuxième critère de performance considéré était le temps d'exécution et le coût d'énergie de toute la chaîne de compression. Les résultats sont bien sûr dépendants de la plateforme utilisée pour les noeuds capteurs. Nous avons choisi la plateforme Telos [15] qui fait référence dans la communauté scientifique en réseaux de capteurs sans fil. Cette plateforme, qui a été développée par l'équipe du célèbre D. Culler à Berkeley (Université de Californie), est l'une des moins gourmandes en énergie qui existe actuellement. Elle est bâtie autour d'un microcontrôleur MSP430 qui peut fonctionner à 1.8V et consomme 3 mW en mode actif (l'horloge est cadencée à 8 MHz et le bus est de 16 bits). Telos est aussi équipé d'un circuit CC2420 qui est un transceiver radio compatible avec la norme 802.15.4. Le débit de transmission est de 250 kbps. La puissance consommée par ce circuit est de 35 mW en transmission à 0 dBm. Le coût d'énergie de la compression d'image est proportionnel au nombre de cycles exécutés par le microcontrôleur. Pour obtenir ce nombre de cycles, nous avons utilisé le simulateur WSim qui est développé par l'INRIA (disponible sur <http://gforge.inria.fr/projects/wsim/>). Les résultats sont présentés Table 2 en considérant un débit de sortie de 0.5 bpp. Précisons qu'il s'agit des coûts de calcul par bloc de 8×8 pixels. Pour avoir les coûts correspondant au traitement d'une image entière, il suffit de multiplier les valeurs données par le nombre de blocs de l'image.

	DCT (cycles)	Quanti. (cycles)	Codage (cycles)	Total (cycles)	Temps (ms)	Energie (μ J)
LLM	246863	23980	79830	350673	43.8	132
Tri. 8	246863	14895	77058	338816	42.4	127
Carré 6	234303	14782	76926	326011	40.8	122
Tri. 6	234303	9898	75743	319944	40.0	120
Carré 4	217455	8136	75094	300685	37.6	113
Tri. 4	217455	6225	62667	286347	35.8	107
Carré 2	169503	4190	38167	211860	26.5	79
Tri. 2	169503	3876	33044	206423	25.8	77

Tableau 2 – Temps d'exécution et consommation d'énergie pour compresser un bloc de 8×8 pixels à 0.5 bpp, pour différents scénarios de compression.

Les valeurs de référence sont celles obtenues avec la chaîne de compression JPEG classique, c'est-à-dire lorsque les

64 coefficients de la DCT sont calculés, quantifiés et encodés. Il faut ainsi 43.8 ms au microcontrôleur MSP430 pour encoder un bloc, et la dépense énergétique est de 132 μJ . Comme prévu, c'est l'étape de la DCT qui est la plus coûteuse en calcul, elle prend environ 70% du total. Les valeurs associées à la forme carrée de la DCT zonale rapide sont les plus importantes à analyser puisque c'est la forme qui fournit la meilleure efficacité énergétique. Prenons d'abord le scénario avec $k = 6$. Ce scénario a un impact très faible sur la distorsion d'image comparé au scénario de référence (LLM). Mais les économies d'énergie sont déjà significatives puisqu'elles sont approximativement de 7.5%. Les applications qui tolèrent une distorsion plus importante de l'image peuvent utiliser des scénarios avec de plus petites valeurs de k . Les économies d'énergie s'avèrent alors très importantes : 14% dans le scénario avec $k = 4$ et 40% avec $k = 2$. De telles économies d'énergie vont permettre aux noeuds capteurs d'avoir une durée de vie beaucoup plus longue.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié les performances d'une chaîne de compression de type JPEG qui intègre une DCT zonale rapide. Cette DCT zonale rapide réduit le nombre de coefficients à calculer, et donc à quantifier et à encoder. Elle entraîne mécaniquement une réduction de la complexité de calcul de la chaîne de compression, et par incidence une réduction de la consommation d'énergie sur le système hôte. Elle est particulièrement intéressante dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil où le problème de la consommation d'énergie est dominant. Nous avons montré qu'une forme carrée fournit une meilleure efficacité énergétique qu'une forme triangulaire. Intégrée dans une chaîne de type JPEG, elle amène des économies d'énergie d'environ 7.5% à qualité d'image égale. Des économies plus importantes sont possibles au prix d'une distorsion d'image plus importante, mais qui reste acceptable pour de nombreux scénarios d'applications. Notre proposition prenait pour cible la DCT de Loeffler. Mais elle peut être reproduite pour d'autres méthodes de DCT rapide. Une comparaison des différentes variantes de DCT zonale rapide constitue la suite immédiate de nos travaux. Une comparaison de performance pour plusieurs plateformes de réseaux de capteurs sans fil doit aussi être réalisée.

Références

- [1] S. Soro et W. Heinzelman. A survey of visual sensor networks. *Advances in Multimedia*, 2009 :Article ID 640386, 21 pages, 2009.
- [2] M. Rahimi, R. Baer, O. I. Iroezzi, J. C. Garcia, J. Warrior, D. Estrin, et M. Srivastava. Cyclops : In situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. Dans *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–204, San Diego (CA), USA, November 2005.
- [3] Crossbow Technology Inc.. <http://www.xbow.com/>.
- [4] 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 (VEICMS)*, Giardini Naxos, Italy, July 2005. IEEE.
- [5] C. Loeffler, A. Ligtenberg, et G. S. Moschytz. Practical fast 1-D DCT algorithms with 11 multiplications. Dans *Int. Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, volume 2, pages 988–991, Glasgow, UK, May 1989.
- [6] E. Feig et S. Winograd. Fast algorithms for the discrete cosine transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40(9) :2174–2193, September 1992.
- [7] J. Liang et T. D. Tran. Fast multiplierless approximations of the dct with the lifting scheme. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49(12) :3032–3044, December 2001.
- [8] H. Jeong, J. Kim, et W-K. Cho. Low-power multiplierless dct architecture using image correlation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1) :262–267, February 2004.
- [9] B. Heyne, C. C. Sun, J. Goetze, et S. J. Ruan. A computationally efficient high-quality cordic based dct. Dans *European Signal Processing Conference (EU-SIPCO)*, Florence, Italy, September 2006.
- [10] J. Bracamonte, M. Ansorge, et F. Pellandini. VLSI systems for image compression. a power-consumption/image-resolution trade-off approach. Dans *Conference on Digital Compression Technologies and Systems for Video Communications*, volume 2952, pages 591–596, Berlin, Germany, October 1996. SPIE.
- [11] C. N. Taylor et S. Dey. Adaptive image compression for wireless multimedia communication. Dans *IEEE Int. Conference on Communications (ICC)*, volume 6, pages 1925–1929, Helsinki, Finland, June 2001.
- [12] F. Marcelloni et M. Vecchio. A simple algorithm for data compression in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 12(6) :411–413, June 2008.
- [13] A. Mammeri, A. Khoumsi, D. Ziou, et B. Hadjou. Modeling and adapting JPEG to the energy requirements of VSN. Dans *Int. Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 806–811, St. Thomas, Virgin Islands, USA, August 2008. IEEE.
- [14] International Organization for Standardization. ITU-T recommendation T.81. <http://www.jpeg.org/jpeg/>, 1992. ISO/IEC IS 10918-1.
- [15] J. Polastre, R. Szewczyk, et D. Culler. Telos : enabling ultra-low power wireless research. Dans *Int. Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Los Angeles (CA), USA, April 2005. IEEE.