

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de

VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

et le Doctorat National du Maroc

Spécialité : Electronique

Présentée et soutenue par Othmane, ALAOUI FDILI.

Le 10/06/2015, à la Faculté des Sciences de Rabat, Maroc.

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie/Département
d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE)

**Optimisation multicritères de la qualité de service dans les réseaux de
capteurs multimédia sans fil**

JURY

Président du jury

- NAJIM, Mohamed. Professeur des Universités, Laboratoire IMS (UMR CNRS 5218), Groupe GSI, Bordeaux

Rapporteurs

- POUSSET, Yannis. Professeur des Universités, Institut de Recherche XLIM (UMR CNRS 6172), Département SIC, Poitiers
- EL FKIH, Sanaa. Professeur HDR à l'ENSIAS, Rabat

Examineur

- MINAOUI, Khalid. Professeur HDR à la Faculté des Sciences de Rabat.

Co-directeur de thèse : COUDOUX, François-Xavier. Professeur des Universités, IEMN (UMR CNRS 8520), Département OAE, Valenciennes

Co-directeur de thèse : ABOUTAJDINE, Driss. Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat

Co-encadrant : CORLAY, Patrick. Maître de Conférences HDR, IEMN (UMR CNRS 8520), Département OAE, Valenciennes

Co-encadrant : FAKHRI, Youssef, Professeur HDR à la Faculté des Sciences de Kénitra



REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT), à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR) sous la direction de Mr. Driss ABOUTAJDINE et le co-encadrement de Monsieur Youssef FAKHRI et au groupe COMNUM du Département Opto-Acousto-Electronique de l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN/DOAE), à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC) sous la direction de Mr. François-Xavier COUDOUX et la co-direction de Monsieur Patrick CORLAY, dans le cadre d'une thèse en cotutelle pour l'obtention du grade de docteur au Maroc et de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

C'est avec la plus profonde gratitude que je souhaite remercier mon directeur de thèse Mr. **Driss ABOUTAJDINE**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, directeur du laboratoire LRIT et directeur du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST). Je lui exprime ma profonde gratitude de m'avoir accepté au sien du laboratoire LRIT et d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherche. Je le remercie infiniment pour tout l'intérêt, le suivi et l'implication inconditionnels portés à cette thèse, inlassablement durant toutes ces années et malgré son emploi du temps chargé. J'exprime ici ma profonde gratitude à son égard et l'estime respectueuse que je lui porte.

Merci aussi à mon co-encadrant Mr. **Youssef FAKHRI**, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Kénitra. Je tiens à le remercier pour ces années de soutien, pour ses précieux conseils scientifiques et pour son aide et sa capacité à simplifier les problèmes rencontrés dans le cadre du travail. Je le remercie infiniment pour sa compréhension dans toutes les circonstances et pour son habilité de toujours trouver les mots d'encouragement, qui ne manquaient pas d'augmenter ma motivation.

Je veux également exprimer toute ma reconnaissance à Mr. **François-Xavier COUDOUX**, Professeur des universités à l'UVHC, mon deuxième directeur de thèse et directeur-adjoint à l'IEMN/DOAE. Je le remercie de m'avoir accueilli au sein de l'équipe COMNUM, de m'avoir consacré tout ce temps et toute cette énergie et toujours dans la bonne humeur. J'ai ainsi largement pu profiter de sa grande acuité scientifique et de son enthousiasme indéfectible et communicatif pour le travail de ses doctorants. Je lui suis donc redevable de m'avoir permis de poursuivre cette thèse dans de bonnes conditions.

Enfin je remercie Mr. **Patrick CORLAY**, Maître de conférences HDR à l'UVHC, mon deuxième co-encadrant, pour ces années de soutien ainsi que pour ses précieux conseils. De plus, je le remercie pour sa modestie, son optimisme ainsi que son intérêt porté à mes travaux.

Je tiens à remercier Mr. **Mohamed NAJIM**, Professeur des universités à l'Université de Bordeaux 1, d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Mes remerciements vont également à Mme. **Sanaa EL FKIHI**, Professeur habilité à l'École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes (ENSIAS), d'avoir accepté de juger la qualité de mon travail en tant que rapporteur.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Mr. **Yannis POUSSET**, Professeur des

universités à l'Université de Poitiers, d'avoir accepté de rapporter ce travail et de participer au jury final.

Je tiens aussi à remercier Mr. **Khalid MINAOUI**, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Au cours de cette thèse, j'ai bénéficié d'une bourse d'excellence octroyée par le CNRST dans le cadre du programme des bourses de recherche initié par le ministère de l'éducation national de l'enseignement supérieur, de la recherche scientifique et de la formation des cadres. Dans le cadre de la cotutelle, durant mes séjours en France, j'ai bénéficié d'une bourse de mobilité dans le cadre du programme de coopération franco-marocain STIC. Je tiens ainsi à exprimer toute ma gratitude à ces deux institutions ainsi qu'à **Mr. El Houssain BENCHATER**, chargé de la gestion des bourses missions et invitations au niveau du service SCAC de l'ambassade de France à Rabat, pour sa bonne humeur, sa gentillesse et sa compréhension lors de la mise en place de chaque séjour.

Au cours de ces dernières années, j'ai eu l'occasion de rencontrer des personnes toutes aussi intéressantes les unes que les autres. A leur façon, ils ont tous contribué à mon apprentissage. Bien que je sois reconnaissant envers chacune de ces personnes, certaines d'entre elles méritent un merci tout particulier. Je tiens à remercier tous mes collègues du laboratoire LRIT à la faculté des sciences de Rabat. Je remercie, tous les membres de l'IEMN/DOAE, particulièrement ceux de l'équipe COMNUM, également les doctorants, permanents ainsi que les différents stagiaires que j'ai croisés pendant mes différents séjours à l'IEMN/DOAE. Un énorme merci à nos secrétaires à l'IEMN/DOAE : Edith, Virginie, Françoise, puis Anne pour leur aide précieuse lors des formalités administratives. Une pensée amicale très chaleureuse à mes amis qui m'ont toujours encouragé et soutenu. Je remercie particulièrement : Nawal, Saïd, Fadoua, Chouaïb, Zakaria, Awatif, Maryam, Meryem, Fedwa, Brahim et tous les autres pour leur soutien et encouragements. Je remercie aussi : Kassim, Hossep, Amina, Basma, Fred, Ali, Eloïse, et tous les autres membres pour les moments de partage et de complicité au sein de l'IEMN/DOAE. Je termine par les personnes que je ne saurais jamais remercier assez. Mille merci à ma chère maman. Merci à ma chère épouse Nawal. Merci à ma famille et ma belle famille.



RÉSUMÉ

Les progrès réalisés en systèmes micro-électro-mécaniques couplés avec leur convergence vers les systèmes de communication sans fil, ont permis l'émergence des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Les contraintes de ces réseaux font que tous les efforts soient fournis pour proposer des solutions économes en énergie. Avec les récents développements des technologies CMOS, des capteurs d'images à faible coût ont été développés. En conséquence, un nouveau dérivé des RCSF, qui sont les Réseaux de Capteurs Vidéo Sans Fil (RCVSF), a été proposé. La particularité des données vidéo ainsi que les contraintes inhérentes aux nœuds ont introduit de nouveaux défis.

Dans cette thèse, nous proposons deux solutions basées sur l'approche inter-couches pour la livraison de la vidéo sur les RCVSF. La première solution propose un nouveau schéma de compression vidéo adaptatif, efficace en énergie et basé sur la norme de compression vidéo H.264/AVC. Le flux vidéo est ensuite géré par une version améliorée du protocole MMSPEED que nous proposons et notons EQBSA-MMSPEED. Les résultats des simulations montrent que la durée de vie du réseau est étendue de 33%, tout en améliorant la qualité du flux vidéo reçu de 12%. Dans la deuxième solution, nous enrichissons le schéma de compression de modèles mathématiques pour prévoir la consommation d'énergie et la distorsion de l'image lors des phases d'encodage et de transmission. Le flux vidéo est géré par un nouveau protocole de routage efficace en énergie et à fiabilité améliorée noté ERMM. Comparée à une approche basique, cette solution réalise une extension de la durée de vie du réseau de 15%, tout en améliorant la qualité du flux vidéo reçu de 35%.

Mots clés : *Conception inter-couches ; Prédiction de l'énergie et de la distorsion ; Compression Vidéo H.264/AVC ; Routage fiable et efficace en énergie ; Réseaux de Capteurs Vidéo Sans Fil.*



ABSTRACT

Thanks to the valuable advances in Micro Electro-Mechanical Systems coupled with their convergence to wireless communication systems, the Wireless Sensor Networks (WSN). In the WSN context, all the efforts are made in order to propose energy-efficient solutions. With the recent developments in CMOS technology, low-cost imaging sensors have been developed. As a result, a new derivative of the WSN, which is the Wireless Video Sensor Network (WVSN), has been proposed. The particularities of the video data as well as the inherent constraints of the nodes have introduced new challenges.

In this thesis, we propose two cross-layer based solutions for video delivery over the WVSN. The first solution proposes a new energy efficient and adaptive video compression scheme dedicated to the WVSNs, based on the H.264/AVC video compression standard. The video stream is then handled by an enhanced version of MMSPEED protocol, that we propose and note EQBSA-MMSPEED. Performance evaluation shows that the lifetime of the network is extended by 33%, while improving the video quality of the received stream by 12%. In the second solution, we enrich our compression scheme with mathematical models to predict the energy consumption and the video distortion during the encoding and the transmission phases. The video stream is then handled by a novel energy efficient and improved reliability routing protocol, that we note ERM. Compared to a basic approach, this solution is extending the network lifetime by 15%, while improving the quality of the received video stream by 35%.

Keywords : *Cross-layer design ; Energy and distortion prediction ; H.264/AVC Video Compression ; Energy-efficient reliable routing ; Wireless Video Sensor Networks.*



LISTE DES ACRONYMES

ABS	espace disponible dans le buffer « Available Buffer Size »
ACM	« Association for Computing Machinery »
AOA	angle d'arrivée « Angle Of Arrival »
BKGD	arrière-plan « BacKGrounD »
BP	Basse Priorité
CABAC	codage arithmétique binaire adaptatif basé sur le contexte « Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding »
CAVLC	codage à longueur variable adaptable en fonction du contexte « Context Adaptative Variable Length Coding »
CIF	Common Intermediate Format
DCT	transformée en cosinus discrète « Discrete Cosine Transform »
DWT	Transformée en ondelettes discrète « Discrete Wavelet Transform »
EQBSA	Energy and Queue Buffer Size Aware
ERM	Enhanced Reliability Measure
ERMM	Energy-efficient Reliable Multi-path Multi-Priority
FIFO	premier arrivé premier servi « First In First Out »
FMO	ordonnancement flexible de macroblocs « Flexible Macroblock Ordering »
FR	débit d'images par seconde « Frame Rate »
FS	ensemble de nœuds relais « Forwarding Set »
FSkip	saut de trame « Frame Skip »
FSP	paramètre de la sélection fréquentielle « Frequency Selectivity Parameter »
HP	Haute Priorité
IBS	Initial Buffer Size
ID	identifiant
LCP	procédure de dernière chance « Last Chance Procedure »
MANET	réseaux mobiles ad hoc « Mobile Ad hoc NETworks »
MBAMap	carte d'allocation de macroblocs aux slices « Macroblocks Allocation Map »
MDC	codage à descriptions multiples « Multiple description coding »
MEMS	systèmes micro-électro-mécaniques « Micro-Electro-Mechanical Systems »
MMSPEED	Multi-path Multi-SPEED
NAL	couche d'adaptation au réseau « Network Adaptation Layer »

NGF	routage géographique non déterministe « Non-deterministic Geographic Forwarding »
NHC	candidats pour le prochain saut « Next-Hop Candidates »
NS	ensemble des nœuds voisins « Neighbor Set »
PDR	taux moyen de paquets reçus « Packet Delivery Ratio »
PLR	taux de paquets perdus « Packet Loss Rate »
PSNR	« Peak Signal-to-Noise Ratio »
QBSA	Queue Buffer Size Aware
QCIF	Quarter Common Intermediate Format
QP	paramètre de quantification « Quantization Parameter »
RCaSF	Réseaux de Capteurs Acoustiques Sans Fil
RCASF	Réseaux de Capteurs et d'Actionneurs Sans Fil
RCCSF	Réseaux de Capteurs Corporels Sans Fil
RCISF	Réseaux de Capteurs Image Sans Fil
RCMSF	Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
RCSMSF	Réseaux de Capteurs Sous-Marins Sans Fil
RCSTSF	Réseaux de Capteurs Sous-Terrain Sans Fil
RCVisSF	Réseaux de Capteurs Visuels Sans Fil
RCVSF	Réseaux de Capteurs Vidéo Sans Fil
RE	énergie résiduelle « Remaining Energy »
ROI	région d'intérêt « Region Of Interest »
RP	probabilité d'atteindre la destination « Reaching Probability »
SS	intensité du signal « Signal Strength »
TOA	temps d'arrivée « Time Of Arrival »
TRP	probabilité totale d'atteindre le Sink « Total Reaching Probability »
ULB	Ultra Large Bande
VCL	couche de codage vidéo « Video Coding Layer »



TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Liste des acronymes	vii
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xvi
Introduction générale	1
 Partie I Réseaux de capteurs sans fils : État de l’art et généralités	 5
Chapitre 1 : Réseaux de capteurs sans fil	7
1.1 Introduction	7
1.2 Réseaux de capteurs sans fil	8
1.3 Familles de réseaux de capteurs sans fil	18
1.4 Réseaux de capteurs vidéo sans fil	20
1.5 Exemples d’applications	25
1.6 Conclusion	29
Chapitre 2 : Solutions inter-couches pour le support de flux images et vidéo dans les RCVisSF	31
2.1 Introduction	31
2.2 Importance de l’approche inter-couches dans les RCVisSF	32
2.3 Solutions inter-couches dans les RCVisSF	32
2.4 Synthèse sur les techniques employées en vue d’approches inter-couches perfor- mantes	43
2.5 Conclusion	45

Partie II Vers une première approche inter-couches efficace en énergie pour le support de la vidéo dans les RCVSF	49
Chapitre 3 : Impact de la considération de l'espace disponible dans la file d'attente sur les protocoles de routage dédiés aux RCSF	51
3.1 Introduction	51
3.2 Aperçu sur les protocoles SPEED et MMSPEED	52
3.3 Schéma original de routage proposé	54
3.4 Simulations et discussion des résultats	57
3.5 Conclusion	62
Chapitre 4 : Une première solution inter-couches pour le support du contenu vidéo dans les RCVSF	63
4.1 Introduction	63
4.2 Le schéma d'encodage proposé	64
4.3 Le protocole de routage proposé	73
4.4 Évaluation des performances	75
4.5 Conclusion	82
Partie III Vers une approche inter-couches efficace en énergie sous contrainte de qualité vidéo dans les RCVSF	85
Chapitre 5 : Modélisation de la consommation de l'énergie et de la distorsion	87
5.1 Introduction	87
5.2 Modélisation de la consommation de l'énergie	88
5.3 Modélisation de la distorsion	103
5.4 Conclusion	111
Chapitre 6 : Solution inter-couches efficace en énergie sous contrainte de qualité vidéo pour les RCVSF	113
6.1 Introduction	113
6.2 Le protocole de routage ERMM	114
6.3 La solution inter-couches proposée	117
6.4 Évaluation des performances	119
6.5 Conclusion	124
Conclusion et perspectives	127
Liste des publications	131
Bibliographie	133

LISTE DES FIGURES

1.1	Un réseau de capteurs sans fil	8
1.2	Architecture physique d'un nœud capteur	9
1.3	Exemples de nœuds capteurs	10
1.4	Architecture à saut unique	14
1.5	Architecture à multi-sauts plate	15
1.6	Architecture en clusters à saut unique	15
1.7	Architecture en clusters à saut multiples	16
1.8	Architecture en clusters à niveaux multiples	16
1.9	Les différentes familles de RCSF	18
1.10	Nœud capteur vidéo Meerkats et ses composants (Boice <i>et al.</i> , 2006)	22
1.11	Carte Stargate interfacée avec une webcam de résolution moyenne. Stargate intègre une carte 802.11 et un nœud MICAz qui fonctionne comme une passerelle vers le réseau de capteurs.	23
1.12	Acroname GARCIA, un robot mobile avec une caméra pan-tilt montée et doté d'interfaces 802.11 ainsi que 802.15.4 pour communiqué avec un réseau extérieur et le Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF).	23
1.13	GARCIA déployé sur le testbed agissant comme un Sink mobile et peut se déplacer vers la zone d'intérêt.	24
1.14	Exemples de nœuds capteurs vidéo	25
1.15	De gauche à droite : nœud enterré, écran d'affichage	26
1.16	Le module de détection de variation du champs magnétique	26
1.17	Le nœud Waspnote avec le module de détection de radiation	27
1.18	L'intérieur du nœud PRETESIC	27
1.19	Mesures recueillies par les nœuds déployés pour le projet PRETESIC	28
1.20	Le nœud agriculture du système Siega	28
1.21	Illustration d'un cerf et une biche équipés de nœuds vidéo	29
1.22	Illustration du nœud vidéo ainsi que ses composants	29
2.1	Evolution du PSNR en fonction du taux de paquets perdus recueilli à partir du testbed (Sarisaray <i>et al.</i> , 2010)	33
2.2	Performances de l'approche proposée par (Boluk <i>et al.</i> , 2011b) en termes de qualité (à gauche) de délai (à droite) et de consommation d'énergie (au-dessous) comparée à l'approche utilisant le protocole MMSPEED	34
2.3	Illustration de l'impact de la décomposition en plans binaires sur la qualité visuelle (Felemban <i>et al.</i> , 2014)	35
2.4	Résultats de l'approche proposée par Felemban <i>et al.</i> (2014) en termes de délai (à gauche), de fiabilité (à droite) et de qualité visuelle (au-dessous)	36

2.5	Schématisation de la sélection des coefficients AC avec $\rho = 4$ (Mammeri <i>et al.</i> , 2008b)	37
2.6	Schématisation du tatouage et la dissimulation des erreurs avec routage multi-chemins adoptés (Boluk <i>et al.</i> , 2011c)	37
2.7	Qualité obtenue (à gauche) et énergie consommée par pixel (à droite) pour les différents schémas étudiés (Boluk <i>et al.</i> , 2011c)	38
2.8	Performances de l'approche proposée par Politis <i>et al.</i> (2008) en termes de qualité (à gauche) et de consommation d'énergie (à droite)	39
2.9	Performances de l'approche proposée par (Aghdasi <i>et al.</i> , 2008) en termes de qualité (à gauche) et de consommation d'énergie (à droite) comparée à l'approche dite « Mixed-Architecture »	40
2.10	Performance de l'approche proposée par Shah <i>et al.</i> (2012) en termes de délai (à gauche), de qualité visuelle (à droite) et de consommation d'énergie (au-dessous)	41
2.11	Illustration du codage différentiel proposé dans (Rui <i>et al.</i> , 2012)	42
2.12	Performance de l'approche CAQR proposée par Rui <i>et al.</i> (2012)	42
3.1	Modules du protocole SPEED	52
3.2	Illustration de NS_i , $FS_i(S)$ et de la distance de progression	52
3.3	Le modèle du réseau	55
3.4	Illustration d'une file d'attente avec priorités	55
3.5	Variation du délai en fonction de la valeur de SetSpeed choisie	58
3.6	Variation du PDR en fonction de la valeur de SetSpeed choisie	59
3.7	Variation du délai en fonction de la valeur de fiabilité requise	59
3.8	Comparaison en termes de délai moyen de SPEED et QBSA-SPEED	60
3.9	Comparaison en termes de délai moyen de MMSPEED et QBSA-MMSPEED	60
3.10	Comparaison en termes de fiabilité de SPEED et QBSA-SPEED	61
3.11	Comparaison en termes de fiabilité de MMSPEED et QBSA-MMSPEED	62
4.1	Le schéma en blocs simplifié d'un encodeur H.264/AVC	65
4.2	Modes de prédiction Intra pour les blocs 4x4 de luminance	66
4.3	La structuration de l'image proposée par la norme H.264/AVC via l'option FMO	69
4.4	Les six premiers types de FMO proposés dans la norme H.264/AVC	69
4.5	Illustration de la sélection fréquentielle quand le FSP est fixé à 6	70
4.6	Exemples de résultats visuels après sélection fréquentielle suivant différents FSP à QP=25 constant	70
4.7	Le diagramme en bloc du schéma d'encodage proposé	71
4.8	Illustration de la séparation du flux en ROI et BKGD, avec quantification, puis sélection fréquentielle du BKGD	72
4.9	Qualité (en dB) et débit (en %) après quantification et séparation du flux initiale en ROI et BKGD avec sélection fréquentielle du BKGD	73
4.10	Structure d'un paquet de contrôle du protocole EQBSA-MMSPEED	74
4.11	Table de voisinage pour le protocole EQBSA-MMSPEED	74
4.12	Évolution des courbes débit-distorsion pour les différents cas étudiés	76
4.13	De gauche à droite : noFRQPOnly, FRROIInoFS, FRROIIFS à QP=25	76
4.14	Énergie cumulative consommée par image pour N sauts	77
4.15	Le nombre maximal de séquences vidéo reçues à la destination	78
4.16	Le gain moyen en énergie, par rapport au schéma noFRQPOnly, durant la phase de transmission de la vidéo pour différents QP allant de 10 à 40	78

4.17	Nombre de nœuds en vie pour chaque protocole	80
4.18	Les délais de réception moyens observés durant le mode « rush » pour chaque protocole	81
4.19	Le taux de paquets reçus durant le mode « rush » pour chaque protocole	81
4.20	La qualité de la vidéo reçue pour chaque protocole	82
5.1	Le diagramme en bloc du schéma d'encodage proposé	88
5.2	Les séquences de test utilisées	89
5.3	Evolution de l'énergie d'encodage normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP	90
5.4	Evolution des coefficients $\alpha_{EE}(QP, FSP_{max})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP	92
5.5	Evolution des coefficients $\beta_{EE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	93
5.6	Evolution des coefficients $C_{EE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	94
5.7	Evolution de l'énergie de transmission normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP	96
5.8	Evolution des coefficients $\alpha_{TE}(QP, FSP_{max})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP	97
5.9	Evolution des coefficients $\beta_{TE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	98
5.10	Evolution des coefficients $C_{TE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	100
5.11	Evolution des coefficients $\gamma(FSkip)$ mesurés et prédits pour l'encodage en fonction du paramètre FSkip	101
5.12	Evolution des coefficients $\gamma(FSkip)$ mesurés et prédits pour la transmission en fonction du paramètre FSkip	102
5.13	Evolution de la distorsion d'encodage normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP	104
5.14	Evolution des coefficients $\alpha_{ED}(QP, FSP_{min})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP	105
5.15	Evolution des coefficients $\beta_{ED}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	106
5.16	Evolution des coefficients $C_{ED}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP	108
5.17	Illustration du modèle de Gilbert-Elliott utilisé pour la génération des schémas de pertes de paquets	109
5.18	Evolution de la distorsion de transmission D_{Trans} mesurée et prédite en fonction du taux de perte de paquets PLR	110
6.1	L'algorithme de routage proposé où NHC_{Havg} et NHC_{Lavg} sont deux sous-ensembles de NHC contenant les nœuds dont l'énergie résiduelle est supérieure et inférieure à l'énergie résiduelle moyenne de NHC, respectivement.	116
6.2	L'organigramme du mode « rush »	118
6.3	Energie consommée au niveau du nœud vidéo source pour encoder puis transmettre le flux vidéo	120
6.4	Distorsion de bout-en-bout moyenne après dissimulation des pertes	120
6.5	Valeurs des paramètres d'exécutions	121

6.6	Taux de paquets reçus moyen en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau	122
6.7	Énergie résiduelle moyenne du réseau en fonction du nombre des nœuds sources vidéo	122
6.8	Délai moyen en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau	123
6.9	Distorsion de bout-en-bout moyenne après dissimulation des pertes en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau	123



LISTE DES TABLEAUX

1.1	Exemples de nœuds	11
1.2	Les modulations et débits par bande de fréquence de la norme IEEE 802.15.4 . .	12
1.3	Émetteurs-récepteurs existants utilisés dans les RCSF (Akyildiz et Vuran (2010), chapitre IV)	13
1.4	Exemples de nœuds vidéo	24
2.1	Tableau synthétisant quelques approches inter-couches dans le cas des images fixes avec, à titre indicatif, les résultats obtenus	46
2.2	Tableau synthétisant quelques approches inter-couches dans le cas de la vidéo avec, à titre indicatif, les résultats obtenus	47
3.1	Table de voisinage avec le nouveau champ ABS dans le cas de deux niveaux de priorité($l=2$)	56
3.2	Paramétrage des simulations	57
4.1	Paramétrage des simulations	80
4.2	Résultats visuels de l'approche inter-couches en adoptant les protocoles MM-SPEED, QBSA-MMSPEED et EQBSA-MMSPEED	83
6.1	Table de voisinage du protocole ERMM	116
6.2	Paramètres de simulation	119
6.3	Résultats visuels de la solution basique et proposée pour 8 nœuds sources vidéo simultanés	125

Contexte général

Les rapides progrès dans les domaines des technologies de l'information, de la conception des capteurs et des réseaux sans fil ont ouvert la voie à la prolifération des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) (Akyildiz *et al.*, 2002). Un RCSF est composé en général d'un grand nombre de nœuds déployés dans une zone d'intérêt, capables de capturer, de traiter puis d'acheminer l'information à la destination d'une manière collaborative (Akyildiz et Vuran, 2010). Ces réseaux ont le potentiel d'interfacer le monde physique avec le monde numérique sur une échelle sans précédent. A l'heure actuelle, les RCSF constituent l'un des sujets de recherche phare de la communauté scientifique internationale dans le domaine interdisciplinaire des STIC, vu leur importance dans l'émergence des villes intelligentes ou « Smart Cities » (Zanella *et al.*, 2014). Face à cette réalité et dans le but de développer de nouvelles compétences dans ce domaine, le projet de recherche initiant les travaux de cette thèse, intitulé « RECIF : REseaux de Capteurs Image sans fil Fiabiles : optimisation de la Qualité de Service dans les réseaux de capteurs sans fil multimédia » a été proposé. Ce projet de recherche est en effet une concrétisation de la collaboration scientifique Franco-Marocaine dans les domaines des STIC, impliquant deux laboratoires de recherche, à savoir le LRIT de l'université Mohammed V de Rabat et l'IEMN-DOAE de l'université de Valenciennes.

Les RCSF deviennent aujourd'hui plus accessibles, multifonctionnels et à faible coût grâce aux progrès réalisés en systèmes micro-électro-mécaniques « Micro-Electro-Mechanical Systems » (MEMS) et en systèmes à faible consommation d'énergie. L'usage répandu des RCSF par les communautés industrielles et scientifiques est dû à l'adaptabilité à plusieurs types d'applications dans les domaines militaires (*e.g.* télésurveillance de champs de bataille, détection d'ennemis), environnementaux (*e.g.* pollution, séisme), domotiques (*e.g.* surveillance des risques, détection d'intrus), de santé (*e.g.* surveillance des fonctions vitales, diabète), etc. Les caractéristiques les plus pertinentes sont généralement liées à la miniaturisation, l'autonomie, la couverture et la possibilité du passage à l'échelle. Dès que le réseau est mis en place, le contrôle de la zone de couverture est effectué pour relever l'apparition d'un événement spécifique (*e.g.* intrusion, séisme) ou pour mesurer un état physique (*e.g.* température, humidité).

Comme souvent, après des années de recherche dans les RCSF « scalaires », l'attention s'est posée sur le flux « Multimédia ». L'introduction de capteurs image et vidéo au cœur d'un RCSF permet sans conteste d'améliorer les performances des applications couvertes par ces réseaux, en exploitant les événements, l'activité et les informations visuelles disponibles à l'intérieur de la scène. La disponibilité de caméras CMOS bas coût, couplée à des progrès importants dans le traitement des signaux multimédia (*e.g.* techniques de codage et de compression), ont récemment permis l'émergence des Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF) intégrant des capteurs d'images. Ces réseaux vont devoir faire face à des environnements sévères et des contraintes strictes de qualité vidéo en plus des besoins de faible consommation d'énergie.

Problématique

Le cadre dans lequel se place cette thèse est la vidéosurveillance pour assurer la sécurité et la sûreté des personnes et des biens, mais aussi pour effectuer un monitoring de l'environnement (*e.g.* littoral, forêts, parcs naturels). En effet, les Réseaux de Capteurs Vidéo Sans Fil (RCVSF) qui ne sont qu'un cas particulier des RCMSF, s'avèrent être un bon support pour le déploiement de telles applications. Ceci est dû au fait qu'ils ne nécessitent ni câblage, ni infrastructure et permettent de recevoir l'information d'une manière assez simple. Toutefois, les contraintes des RCVSF liées aux particularités des nœuds en termes de ressources (*e.g.* énergie, puissance de traitement, mémoire) ainsi que celles liées aux besoins du flux vidéo (*e.g.* traitement, qualité de service, transmission, codage) doivent être prises en considération lors de toute conception liée aux RCVSF. Par conséquent, de nouvelles problématiques ont été révélées nécessitant de nouvelles solutions innovantes qui s'adaptent aux contraintes de ces réseaux.

En particulier, la consommation d'énergie constitue une préoccupation majeure des RCVSF. En effet, cette dernière limite les performances en termes de traitement et de transmission de chaque nœud alimenté sur batterie, et donc la performance globale de l'application. Il est ainsi primordial d'optimiser la consommation d'énergie au sein d'un RCVSF afin d'accroître sa durée de vie tout en garantissant un niveau de qualité d'expérience le plus élevé possible à l'utilisateur final.

Objectifs

Plusieurs approches peuvent être envisagées afin de répondre à notre problématique. Dans cette thèse, nous proposons une approche dite « inter-couches » (*cross-layer* en anglais) qui permettra d'optimiser, au niveau de plusieurs couches de la pile protocolaire, l'énergie consommée ainsi que la qualité de la vidéo en réception. Nous souhaitons ainsi évaluer dans quelle mesure les couches MAC, routage et application, peuvent s'adapter aux caractéristiques du réseau de communication ainsi qu'à ses changements en vue de garantir la fiabilité et l'efficacité énergétique au sein du réseau. Grâce à une adaptation inter-couches, les paramètres vidéo et de transmission réseau seront optimisés pour supporter au mieux les contraintes en énergie imposées sur l'ensemble du réseau, en caractérisant les paramètres de qualité de service et d'expérience nécessaires, pour délivrer l'information visuelle au plus haut niveau de qualité possible à l'utilisateur final.

Contributions

Dans cette section, nous présentons brièvement les principales contributions de cette thèse :

- Premièrement, nous proposons une étude analytique sur l'impact de la considération de l'espace disponible dans la file d'attente des nœuds intermédiaires, sur les protocoles de routages. A cet effet, nous avons considéré deux protocoles de routage dédiés aux RCVSF, à savoir SPEED (He *et al.*, 2005a) et MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006). Le premier fournit un service unique, alors que le deuxième protocole, qui est multi-chemins, peut fournir de multiples classes de service selon l'importance des données.
- Deuxièmement, nous proposons une première solution inter-couches efficace en énergie pour le support du flux vidéo dans les RCVSF. En particulier nous proposons :
 - Un schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie basé sur le standard H.264/AVC, qui fournit en sortie deux classes de flux à savoir la région d'intérêt « Region Of Interest » (ROI) et l'arrière-plan « BackGround » (BKGD). Pour réduire davantage la consommation de l'énergie lors de la transmission, le schéma réduit la quantité d'information à transmettre, d'une manière contrôlée, en utilisant la sélection fréquentielle.
 - Une deuxième extension du protocole MMSPEED, qui considère l'information sur l'éner-

gie résiduelle des nœuds intermédiaires, en plus de l'espace disponible dans leurs files d'attente, pour le choix du prochain saut. Cette version du protocole MMSPEED permet ainsi d'acheminer les flux encodés (*i.e* la ROI et le BKGD) avec différenciation de service et avec plus de fiabilité et d'efficacité énergétique.

- Troisièmement, nous proposons des modèles mathématiques en adéquation avec le comportement physique observé, lors de nos tests, des énergies et des distorsions mesurées durant les phases d'encodage et de transmission vidéo. Les modèles sont exprimés en fonction des paramètres de contrôle du schéma d'encodage vidéo, proposé pour la première solution inter-couches.
- Finalement, nous proposons une deuxième solution inter-couches efficace en énergie pour le support du flux vidéo dans les RCVSF et sous contrainte de qualité vidéo de bout-en-bout. En particulier, nous proposons :
 - Une amélioration du schéma d'encodage proposé pour la première solution inter-couches, en intégrant les modèles mathématiques élaborés, permettant de choisir dynamiquement la configuration adéquate pour répondre à la contrainte de la qualité souhaitée tout en prolongeant la durée de vie du réseau.
 - Un autre protocole de routage efficace en énergie et fiable, inspiré du protocole MMSPEED. Ce protocole tire son efficacité énergétique du fait qu'il ne considère que les nœuds voisins ayant une énergie résiduelle supérieure à l'énergie moyenne sur un voisinage. Par ailleurs, ce protocole propose une métrique de fiabilité améliorée et offre une interaction plus prononcée avec le schéma d'encodage.

Organisation

La suite de ce manuscrit s'articule en trois parties.

La Partie I est dédiée à l'état de l'art et est divisée en deux chapitres. Le chapitre 1 dresse un état de l'art sur le contexte des RCSF en présentant les caractéristiques, challenges, composants et particularités de ce type de réseaux. Par ailleurs, ce chapitre liste les différentes familles de RCSF et propose une vue détaillée des RCVSF, auxquels nous nous intéressons particulièrement dans cette thèse. Le chapitre 2 propose un état de l'art des différentes solutions inter-couches adaptées au contexte des Réseaux de Capteurs Visuels Sans Fil (RCVisSF). En effet, nous couvrons des solutions proposées pour le support du flux vidéo ainsi que d'autres dédiées aux images fixes, dans le but de présenter une vue précise et approfondie de l'existant.

La Partie II est consacrée à notre première solution inter-couches pour le support du flux vidéo dans les RCVSF. Le chapitre 3 présente une analyse de l'impact de la considération de l'espace disponible dans la file d'attente des nœuds voisins sur la qualité de service de deux protocoles de routage dédiés aux RCSF, à savoir SPEED (He *et al.*, 2005a) et MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006). A l'issue de cette analyse, nous proposons une amélioration de la fiabilité ainsi que du délai pour les deux protocoles sujets à l'étude, que nous nommons QBSA-SPEED et QBSA-MMSPEED. Le chapitre 4 présente notre première approche inter-couches qui fait interagir un schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie, que nous proposons dans ce même chapitre, avec une amélioration du protocole QBSA-MMSPEED en y introduisant la dimension de l'énergie.

La Partie III décrit notre deuxième solution inter-couches. Dans le chapitre 5 nous analysons les comportements de l'énergie consommée ainsi que de la distorsion dues à l'encodage et la transmission de la vidéo par le nœud source et nous proposons des modèles en adéquation avec les comportements physiques de ces quantités. Ces modèles sont développés en fonction des paramètres de contrôle de notre schéma d'encodage, présenté dans le chapitre 4. Par la suite, dans le chapitre 6, nous détaillons notre deuxième solution qui intègre ces modèles mathématiques au schéma d'encodage et propose aussi un nouveau protocole de routage. Ce dernier considère

l'énergie résiduelle comme premier critère de sélection, puis introduit une formulation pour le choix du prochain saut sur la base de sa fiabilité ainsi que sa distance du nœud courant. Par ailleurs, le protocole proposé offre plus d'interaction avec le schéma d'encodage, qui adapte en temps-réel ses différents paramètres selon la qualité vidéo requise et les ressources énergétiques disponibles.

Finalement, nous donnons une conclusion générale portant sur l'ensemble des travaux de cette thèse, ainsi que des perspectives à court, moyen et long termes.

Partie I

Réseaux de capteurs sans fils : État de l'art et généralités

RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Réseaux de capteurs sans fil	8
1.2.1	Le nœud capteur	8
1.2.2	Architectures d'un réseau de capteurs sans fil	14
1.2.3	Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil	15
1.3	Familles de réseaux de capteurs sans fil	18
1.3.1	Réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil	18
1.3.2	Réseaux de capteurs sous-marins sans fil	18
1.3.3	Réseaux de capteurs souterrains sans fil	19
1.3.4	Réseaux de capteurs corporels sans fil	19
1.3.5	Réseaux de capteurs multimédia sans fil	20
1.4	Réseaux de capteurs vidéo sans fil	20
1.4.1	Spécificités d'un réseau de capteurs vidéo sans fil	20
1.4.2	Architectures d'un réseau de capteurs vidéo sans fil	22
1.4.3	Exemples de nœuds vidéo	24
1.5	Exemples d'applications	25
1.5.1	Smart Santander : Recherche de places de stationnement libres	26
1.5.2	Safecast : suite à la catastrophe nucléaire de Fukushima Diachi	26
1.5.3	PRETESIC : supervision de la qualité et la gestion de l'eau à Valence	27
1.5.4	Siega : pour la supervision des vignobles de Galice	28
1.5.5	Deernet : vidéo-surveillance des cerfs dans leur milieu sauvage	28
1.6	Conclusion	29

1.1 Introduction

LE premier travail de recherche portant sur les RCSF date de 1970 (Xu, 2002). Dès lors, grâce aux avancées ainsi que la convergence des domaines de la communication sans fil et les technologies des MEMS, des micro-composants intégrant des dispositifs de captures et de communication sans fil ont pu être développés. Ces derniers, communément appelées « nœuds capteurs », quand ils sont réunis, forment une infrastructure de communication appelée RCSF.

Les RCSF se composent généralement d'un grand nombre d'unités autonomes, déployées aléatoirement dans une zone géographique donnée pour surveiller et mesurer des phénomènes physiques divers. Après le déploiement, les capteurs s'auto-organisent en une infrastructure réseau, souvent en mode multi-sauts. Dans le cas le plus simple, les nœuds sont à un seul saut de la destination, en une architecture en étoile par exemple.

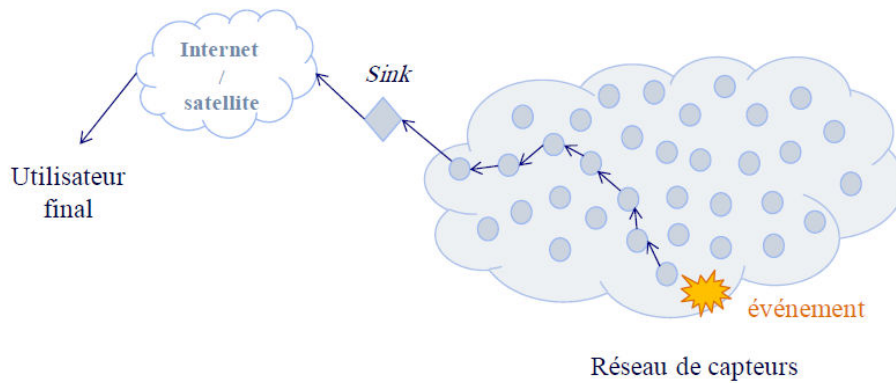


Figure 1.1 – Un réseau de capteurs sans fil

Comme illustré par la Figure 1.1, les nœuds collectent les informations relatives à l'environnement de déploiement qui se trouve dans leur rayon de captage. Ensuite, ils collaborent afin de les acheminer directement, ou via un routage multi-sauts, à un nœud destination considéré comme « point de collecte », appelé Sink (puits). Ce dernier peut être éventuellement connecté à une machine puissante via internet ou par satellite. Ainsi, l'utilisateur final, à travers cette machine, est capable de manipuler le réseau afin d'en extraire des informations, puis procéder à des traitements pour des prises de décisions.

1.2 Réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont en fait un type particulier des réseaux ad hoc, aussi appelés réseaux mobiles ad hoc « Mobile Ad hoc NETworks » (MANET). Contrairement aux réseaux basés sur la communication cellulaire, aucune administration centralisée ni aucune infrastructure ne sont nécessaires (Akyildiz *et al.*, 2002). En effet, ce sont les hôtes mobiles eux-mêmes qui forment, d'une manière *ad hoc*, une infrastructure du réseau où ils jouent les deux rôles de nœuds sources et relais (ou routeurs). De plus, aucune supposition ou limitation n'est faite sur la taille de ce type de réseaux.

Les principales différences entre les RCSF et les MANET se situent au niveau de la densité et de la tolérance à l'efficacité énergétique. En effet, la taille d'un réseau de capteurs est supposée être de l'ordre de plusieurs centaines jusqu'à des milliers de nœuds capteurs (Akyildiz *et al.*, 2002). Par ailleurs, les contraintes énergétiques des nœuds capteurs, vu qu'ils sont alimentés en général par des batteries dont le remplacement est indésirable et des fois difficile, imposent la considération de cette ressource au niveau de toute la pile protocolaire.

1.2.1 Le nœud capteur

Dans la littérature, un nœud capteur peut être défini comme « *un dispositif matériel intégrant des composants de captage qui interopèrent avec des unités de traitements et de communications* » (Mcouat (2013), chapitre I). Ainsi, son rôle principal est de recueillir des informations sur un phénomène ou processus physique, les traduire en signaux qui peuvent être mesurés et analysés, puis les transmettre vers le Sink. D'un point de vue technique, « *un capteur est un type de transducteur qui convertit l'énergie mesurée du monde physique en énergie électrique, pouvant être alors relayée à un système de calcul ou de commande pour traitement et interprétation* » (Dargie et Poellabauer (2010), chapitre I).

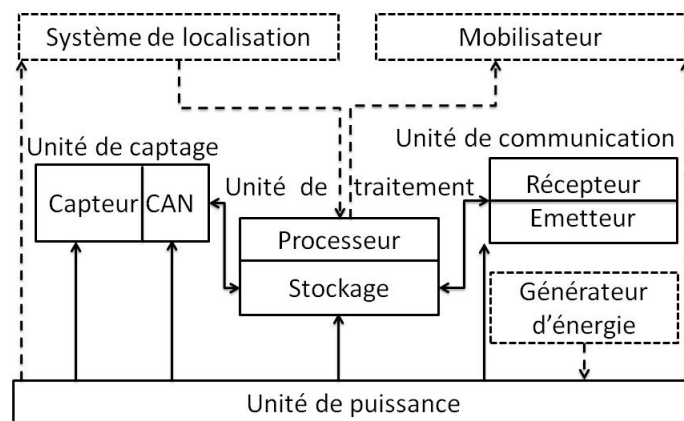


Figure 1.2 – Architecture physique d'un nœud capteur

Architecture physique d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé principalement de 4 unités (voir la figure 1.2) (Akyildiz *et al.*, 2002) :

- **L'unité de captage** est le principal composant distinguant les nœuds capteurs de tout autre système intégré avec des capacités de communication. Elle est principalement caractérisée par un rayon de captage qui détermine le rayon de couverture du nœud. Cette unité peut être éventuellement composée de plusieurs types de capteurs mesurant diverses quantités physiques (température, pression, lumière, ...). Les signaux analogiques produits par le(s) capteur(s) sont convertis en signaux numériques par le biais du convertisseur analogique/numérique (CAN) et sont passés à l'unité de traitement.
- **L'unité de traitement** est le dispositif de commande principal du nœud, généralement constituée d'un microcontrôleur ou un microprocesseur avec une mémoire qui fournit un contrôle intelligent au nœud capteur. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité de captage et les envoie à l'unité de communication. Elle est aussi chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent la collaboration entre les nœuds, ainsi que d'analyser les données captées.
- **L'unité de communication** est l'unité responsable de toutes les transmissions entrantes et sortantes du nœud. Il est plus courant d'utiliser les radio fréquences (RF) comme moyen de communication dans les RCSF. Trois normes peuvent être utilisées pour la communication RF : IEEE 802.11 LAN sans fil (communément appelée Wi-Fi), Bluetooth et IEEE 802.15.4 (communément appelé ZigBee)(IEEE, 2006).
Bien que l'utilisation des RF est le cas le plus commun, des techniques de communications à base d'optique ou d'acoustique peuvent être utilisées et être plus adaptées dans certains environnements. Par exemple, les RCSF sous-marins peuvent utiliser les communications acoustiques. Un autre avantage des communications « non-RF » est que le déploiement du réseau est facilité du fait qu'il ne nécessite aucune approbation réglementaire ou licence, à la différence du cas de communications RF.
- **L'unité d'alimentation** doit être en mesure de satisfaire les besoins en énergie du nœud durant la phase de communication radio, ainsi que ceux du processeur lors de la transition d'un état de veille à un état pleinement opérationnel. La source d'énergie du nœud est typiquement une pile ou une batterie (primaire ou secondaire) pouvant être secondée par un système de récupération d'énergie tel qu'un panneau photovoltaïque ou des turbines à fluide.

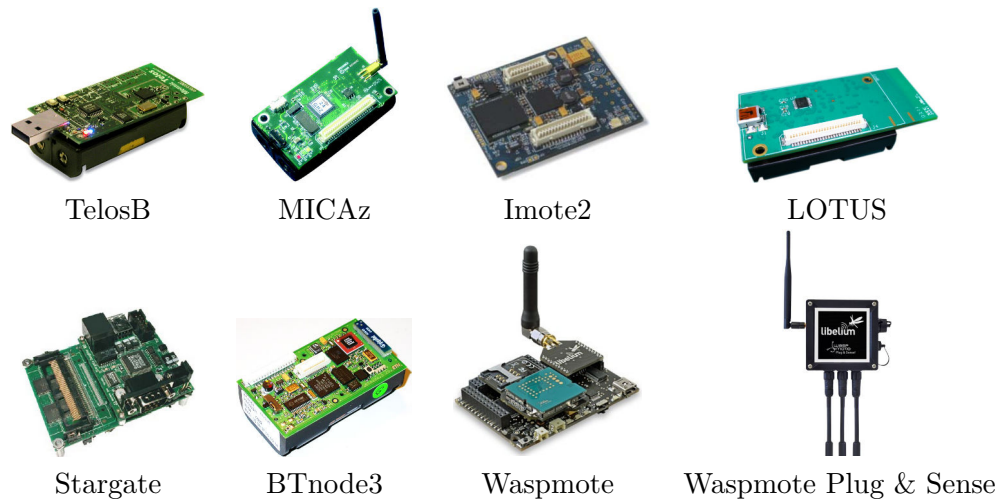


Figure 1.3 – Exemples de nœuds capteurs

Dans de nombreuses applications, la position des nœuds est d'une grande importance. En effet, pour avoir une vue correcte de l'environnement surveillé, il est important d'associer aux informations recueillies la position du nœud en question. Ceci est primordial en présence de nœuds mobiles ou encore des événements évoluant dans le temps. Les systèmes de positionnement relatifs peuvent être divisés en trois catégories principales (Akyildiz et Vuran (2010), chapitre XII) : basés sur le temps d'arrivée « Time Of Arrival » (TOA), sur l'angle d'arrivée « Angle Of Arrival » (AOA) ou sur l'intensité du signal « Signal Strength » (SS). La technique TOA estime la distance entre les nœuds en mesurant le temps de progression du signal reçu. La technique AOA mesure les angles entre un nœud donné et un nombre de nœuds de référence pour estimer la localisation. L'approche SS estime la distance entre les nœuds en mesurant l'énergie du signal reçu. Par ailleurs, de nombreux déploiements extérieurs de RCSF qui exigent la localisation utilisent des GPS fabriqués en grande série et qui deviennent de moins en moins coûteux.

Caractéristiques principales d'un nœud capteur

Un nœud capteur est caractérisé par les spécificités de ses composants (*i.e.* ses unités). Cependant, le passage en revue des différents produits disponibles sur le marché, ainsi que les prototypes proposés dans la littérature (Mcouat, 2013; Dargie et Poellabauer, 2010; Akyildiz et Vuran, 2010), permettent de conclure que la petitesse de la taille est le premier dénominateur commun. En second, les nœuds capteurs sont en général contraints en termes d'énergie. C'est, en effet, la contrainte majeure qui motive toujours de nos jours d'innombrables travaux de recherches, à tous les niveaux de la pile protocolaire. Ainsi, des approches efficaces en énergie sont développées afin de rendre les RCSF de plus en plus « verts ». Par ailleurs, les nœuds capteurs sont aussi contraints en termes de puissance de calculs.

Exemples de nœuds capteurs

Il existe plusieurs fabricants de nœuds capteurs. Nous citerons Crossbow, Libelium, Euro-Therm, etc. Parmi ces nœuds, il existe quelques uns qui sont capables de varier la puissance du signal émis afin d'adapter le rayon de communication et, en conséquence, la zone de communication.

Nous rapportons dans la figure 1.3 quelques exemples de nœuds capteurs, et dans le tableau 1.1 leurs caractéristiques. Comme indiqué par le tableau 1.1, les nœuds adoptent différents standards pour communiquer leurs données.

Tableau 1.1 – Exemples de nœuds

Nœud	Année	Fabricant	Traitement	Mémoire	Communication	Observations	Prix
TelosB (TPR2420)	2004	Crossbow	TI MSP430 16-bit (8 MHz)	10Ko RAM, 16Ko EE-PROM	radio type TI-CC2420, 802.15.4, bande ISM 2400-2483.5 MHz, 250 kbps	Capteurs lumière, infrarouge, humidité et température	79\$-99\$
MICAz (MPR2400 CB)	2004	Crossbow	Atmel ATmega128L 8-bit (7.4 MHz)	4Ko SRAM, 4Ko EEPROM	radio type TI-CC1000/2420 802.15.4, bande ISM 2400-2483.5 MHz, 38.4/250 kbps	possibilité capteurs lumière, pression, acoustique, humidité et température	120\$
Imote2 (IPR2400)	2005	Crossbow	Intel PXA271 XScale (13-416MHz) + Intel Wireless MMX DSP Coprocessor	256Ko SRAM, 32Mo FLASH, 32Mo SDRAM	radio transcepteur 802.15.4, bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps	possibilité capteurs lumière, pression, acoustique, humidité et température	120\$
LOTUS (LPR2400)	2003	MEMSIC	Cortex M3 32-bit (10-100 MHz)	64Ko SRAM, 512Ko FLASH, 64Mo Serial FLASH	radio transcepteur 802.15.4, bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz, 250 kbps	possibilité capteurs lumière, pression, acoustique, humidité et température	N/A
Stargate	2003	Crossbow	Intel PXA255 Xscale (400 MHz)	64Mo SDRAM	802.11 et Bluetooth	possibilité capteurs lumière, pression, acoustique, humidité et température	N/A
Waspnote	2010	Libelium	ATmega128L (14.7456 MHz)	8Ko SRAM, 4Ko EEPROM, 128Ko FLASH, 2Go SD Card	802.15.4, Bluetooth, LoRa, 802.11b/g, 3G	possibilité alimentation panneau solaire, possibilité capteurs qualité d'eau, gaz, pression, infrarouge, mouvement, vidéo, magnétique ...	230\$ (Star-ter Kit)
BTNode3	2004	ETH Zürich	ATMega128L (7.4 MHz)	128Ko FLASH, 184Ko RAM, 4Ko EEPROM	ZV4002, CC1000	N/A	N/A

Nous présentons brièvement les différents standard utilisés d'après la littérature (Suhonen *et al.* (2012), chapitre II) :

- **La norme IEEE 802.15.4** : L'IEEE 802.15.4 (IEEE, 2006) est une norme développée par l'IEEE 802.15 Task Group 4, qui précise les couches physiques et MAC pour les Wireless Personal Area Networks (WPAN) à débits faibles. L'objectif de ce groupe est de fournir une norme à ultra faible complexité, ultra faible coût, faible consommation d'énergie, et faible débit entre des appareils bon marché. La pile protocolaire de la norme IEEE 802.15.4, a été spécifiée pour coexister avec d'autres normes de l'IEEE pour les réseaux sans fil, par exemple, IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks (WLAN) et

Tableau 1.2 – Les modulations et débits par bande de fréquence de la norme IEEE 802.15.4

Bande de fréquence	Modulation	Débit (kbps)	Symboles
779–787	O-QPSK	250	16-aire orthogonale
779–787	MPSK	250	16-aire orthogonale
868–868.6	BPSK	20	Binaire
902–928	BPSK	40	Binaire
868–868.6	ASK	250	20-bit PSSS
902–928	ASK	250	5-bit PSSS
868–868.6	O-QPSK	100	16-aire orthogonale
902–928	O-QPSK	250	16-aire orthogonale
950–956	GFSK	100	Binaire
950–956	BPSK	20	Binaire
2400–2483.5	O-QPSK	250	16-aire orthogonale

IEEE 802.15.1 (Bluetooth). La couche physique fonctionne dans l’une des trois bandes de fréquences gratuites suivantes (Suhonen *et al.* (2012), chapitre II) :

- de 868 à 868,6 MHz en Europe.
- de 902 à 928 MHz en Amérique du Nord.
- de 2400 à 2483,5 MHz dans le monde.

La tableau 1.2 résume les différentes modulations et débits proposés dans le cadre de la norme IEEE 802.15.4.

La couche MAC fournit des services de données et de gestion aux couches supérieures. Le service de données permet la transmission et la réception de paquets MAC sur la couche physique. Les services de gestion comprennent la synchronisation, la gestion des timeslot, l’association et la dissociation des périphériques au réseau. En outre, la couche MAC met en œuvre des mécanismes de sécurité de base.

- **La norme ZigBee** : La norme IEEE 802.15.4 définit uniquement les couches physiques et MAC sans préciser les couches supérieures, y compris les couches réseau et application. La norme ZigBee Specification (2008) est développée au-dessus de la norme IEEE 802.15.4 et définit les couches réseau et application. La couche réseau fournit des fonctionnalités de routage pour les différentes topologies réseau, et la couche application fournit une framework pour le développement d’applications distribuées. La pile protocolaire ZigBee a été proposée à la fin de 2004 par l’Alliance ZigBee, une association de sociétés collaborant pour permettre la réalisation d’applications de surveillance et de contrôle fiables, économiques, à faible puissance, sans fil, sur la base d’une norme mondiale « open ».
- **6LoWPAN** : 6LoWPAN (Montenegro *et al.*, 2007) signifie L’IPv6 sur réseaux IEEE 802.15.4 personnels sans fil de faible puissance (L-WPAN) et a été développée par la « Internet Engineering task Force »(IETF) en 2007. La 6LoWPAN permet à IPv6 d’opérer directement sur les réseaux IEEE 802.15.4 de capteurs sans fil à faible puissance. Par conséquent, le nœud sans fil dans un réseau de capteurs basé sur 6LoWPAN devient accessible depuis Internet. La norme ne définit pas de protocoles de routage, mais s’appuie sur d’autres spécifications, par exemple IEEE 802.15.5, pour la couche de routage d’une topologie maillée.
- **Bluetooth Low Energy** : Bluetooth Low Energy (BLE) (Heydon et Hunn, 2012) est une extension de la technologie Bluetooth destinée aux appareils à basse consommation d’énergie. Malgré son nom, le BLE n’est pas compatible avec le Bluetooth en raison de différents protocoles de la couche liaison. Comparé au Bluetooth, les principales différences fonctionnelles sont l’utilisation de paquets à longueur variable et la mise en mode économie d’énergie automatiquement lorsqu’un dispositif ne transmet pas. Ces changements visent à réduire au minimum le temps d’activité de l’émetteur-récepteur. Pour faciliter l’implémentation efficace en énergie, la complexité du protocole est réduite en diminuant

Tableau 1.3 – Émetteurs-récepteurs existants utilisés dans les RCSF (Akyildiz et Vuran (2010), chapitre IV)

	RFM TR1000	Infineon TDA5250	TI CC1000	TI CC2420	Zeevo ZV4002
Standard	N/A	N/A	N/A	IEEE 802.15.4	Bluetooth
Débit (kbps)	2.4–115.2	19.2	38.5	250	723.2
Modulation	OOK/ASK	ASK/FSK	FSK	O-QPSK	FHSS–GFSK
Fréquence radio (MHz)	916	868	315/433/868/915	2.4 GHz	2.4 GHz
Tension d'alimentation (V)	2.7–3.5	2.1–5.5	2.1–3.6	2.1–3.6	0.85–3.3
TX max (mA/dBm)	12/−1	11.9/9	26.7/10	17.4/0	32/4
TX min (mA/dBm)	N/A	4.9/−22	5.3/−20	8.5/−25	N/A
RX (mA)	1.8–4.5	8.6–9.5	7.4–9.6	18.8	32
Veille (μ A)	5	9	0.2–1	0.02	3.3mA
Temps de démarrage (ms)	12	0.77–1.43	1.5–5	0.3–0.6	N/A

le nombre des différents états de connectivité et formats de messages. Dans le BLE, les dispositifs annoncent leur présence avec des paquets périodiques, tout en écoutant le canal brièvement pour capter des demandes de connexions ou de données entrantes après chaque annonce. Le BLE utilise trois canaux de découverte et 37 canaux de données. Le protocole utilise un saut de fréquence dans les canaux de données afin de réduire l'impact des interférences.

Les principaux émetteurs-récepteurs utilisés pour les RCSF, ainsi que leurs propriétés, sont énumérées dans le tableau 1.3 (Akyildiz et Vuran (2010), chapitre IV) selon l'ordre chronologique. Nous pouvons observer qu'une grande variété de débits de données, fréquences de fonctionnement et niveaux de consommation d'énergie existent. Une augmentation constante du débit de 10 jusqu'à 723 kbps peut être constatée. Cependant, ceci est obtenu au prix de l'augmentation de la consommation d'énergie, en raison de la hausse de la complexité des modulations, ainsi que celle des circuits d'émetteur-récepteur récents. Néanmoins, étant donné que les durées de transmission sont diminuées par des débits plus élevés, les émetteurs-récepteurs récents sont beaucoup plus économes en énergie par rapport aux anciens. Une importante tendance observée est le changement dans le compromis entre l'énergie d'émission et de réception. Dans les émetteurs-récepteurs antérieurs comme le RFM TR1000, la puissance de transmission domine la consommation d'énergie de 4 contre 1, ce qui est principalement causé par l'électronique de réception relativement simple. Dans ce cas, la consommation de l'amplificateur est plus élevée que celle du circuit électronique. Cependant, dans les plates-formes plus récentes telles que le CC1000, l'énergie d'émission et de réception sont à peu près égales. Ce compromis a été balancé vers la consommation d'énergie à la réception dans le CC2420, qui a été utilisé dans de nombreuses plates-formes et est conforme à la norme IEEE 802.15.4.

Une autre tendance importante dans la conception d'émetteur-récepteur est la diminution de la puissance en mode sommeil, qui peut être observée dans les quatre premières colonnes du tableau 1.3. La différence significative de la consommation d'énergie entre les modes veille et repos motive plusieurs protocoles de communication de mettre le nœud en mode veille pour la plupart du temps (Calhoun *et al.*, 2005; Rabaey *et al.*, 2006).

1.2.2 Architectures d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs se compose généralement d'un grand nombre de nœuds densément déployés dans une région d'intérêt, en plus d'un ou de plusieurs Sink(s) situés à proximité ou à l'intérieur de cette zone. Le Sink peut éventuellement envoyer des requêtes à des nœuds spécifiques, à une région ou au réseau en entier, pour récupérer des données détectées. Les nœuds collaborent pour remonter ces données au Sink. A leur réception, le Sink peut éventuellement effectuer un traitement simple sur ces données, puis envoyer les informations pertinentes aux utilisateurs. Ainsi, le Sink peut jouer les rôles de point de collecte, centre de traitements « soft » et passerelle pour l'extérieur du réseau (Akyildiz *et al.*, 2002).

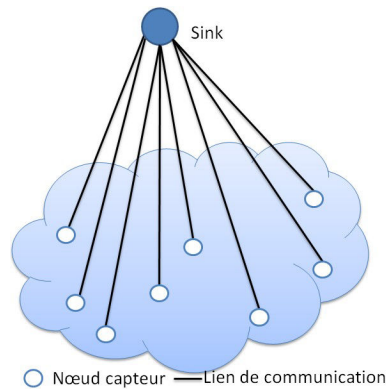


Figure 1.4 – Architecture à saut unique

Pour envoyer des données au Sink, les nœuds peuvent adopter un schéma de communication à saut unique, via des transmissions sur longues distances. Ce schéma conduit à l'architecture de réseau à saut unique dite « Single-hop », comme le montre la figure 1.4. La transmission à longue distance est cependant coûteuse en termes de consommation d'énergie. En effet, la communication à saut unique sur une longue distance conduit à l'épuisement non-uniforme des nœuds du réseau, engendrant ainsi le découvrément rapide de certaines zones et l'inefficacité du réseau.

Dans les RCSF où les données sont scalaires, l'énergie consommée pour la communication est beaucoup plus élevée que celle dépensée pour le traitement et le calcul. Par exemple, l'énergie consommée pour transmettre un bit de données à un récepteur à 100 m de distance est égale à celle nécessaire à l'exécution de 3000 instructions (Chong et Kumar, 2003). Le rapport de la consommation d'énergie pour communiquer un bit, sur le support sans fil, sur l'énergie de traitement de ce même bit peut être de l'ordre de 1000 à 10000 (Akyildiz *et al.*, 2002; Estrin *et al.*, 2002). Aussi, la puissance de transmission requise augmente de façon exponentielle avec l'augmentation de la distance de transmission. Par conséquent, il est souhaitable de réduire la quantité de données et la distance de transmission afin de prolonger la durée de vie du réseau. A cet effet, le schéma de communication à sauts multiples sur de courtes distances, dit « N-hops », est hautement préféré. Dans la plupart des RCSF, les nœuds sont déployés densément et sont proches les uns des autres. Ceci rend possible l'utilisation de communications à courtes distances. Dans une communication multi-sauts, un nœud transmet ses données détectées vers le Sink via un ou plusieurs nœuds intermédiaires, distribuant ainsi la charge énergétique de la communication sur plusieurs nœuds et conduisant à l'extension de la durée de vie du réseau.

Un réseau multi-sauts peut être organisé en deux types d'architectures : plate et hiérarchique (Akyildiz *et al.*, 2002).

- **Architecture plate** Dans un réseau plat, les nœuds jouent le même rôle lors de l'exé-

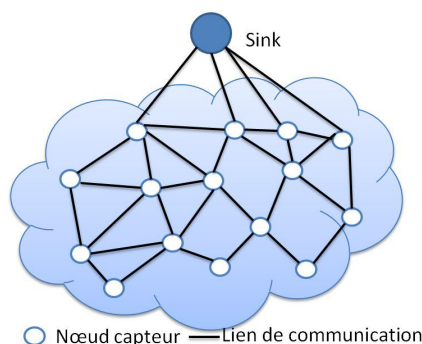


Figure 1.5 – Architecture à multi-sauts plate

cution des tâches de traitement et de détection. Dans une telle architecture, les nœuds communiquent les données « directement » au Sink, via un schéma de communication à multi-sauts, sans intermédiaire hiérarchique. En général, le traitement de données ne peut se faire qu'au niveau du nœud source ou du Sink. La figure 1.5 illustre l'architecture typique d'un réseau plat.

- **Architecture hiérarchique** Dans un réseau hiérarchique, les nœuds capteurs sont organisés en clusters, où les membres d'un même cluster envoient leurs données aux chefs du cluster. Ces derniers alors servent de relais pour transmettre les données au Sink. En général, le chef du cluster est un nœud avec des ressources plus importantes, au niveau duquel des traitements préliminaires sont effectués (agrégation de données, compressions, etc). Dans le cas d'un réseau homogène, le chef du cluster est élu périodiquement en fonction des ressources résiduelles des nœuds du même cluster.

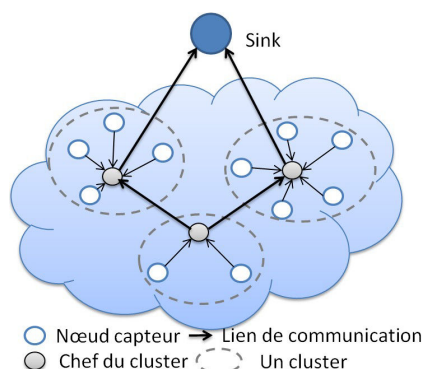


Figure 1.6 – Architecture en clusters à saut unique

Selon la distance entre les membres du cluster et leurs chefs, un réseau de capteurs peut être organisé dans une seule architecture en cluster à un saut ou à multi-sauts, comme le montrent les figures 1.6 et 1.7, respectivement (Gupta et Younis, 2003). Selon le nombre de niveaux dans la hiérarchie des nœuds, un RCSF peut être organisé dans une seule architecture en cluster d'un niveau ou une architecture de clusters multi-niveaux. La figure 1.8 illustre un exemple à multi-niveaux.

1.2.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

Comparés aux réseaux classiques de communication sans fil, les RCSF ont les caractéristiques et les contraintes uniques suivantes (Akyildiz et Vuran (2010), chapitre III; Mcouat (2013), chapitre I; Zheng et Jamalipour (2009), chapitre I) :

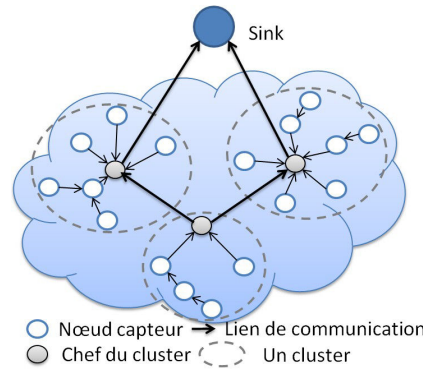


Figure 1.7 – Architecture en clusters à saut multiples

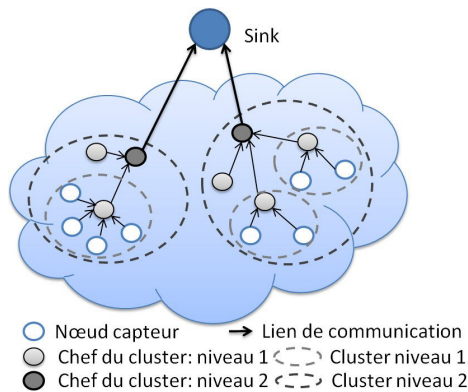


Figure 1.8 – Architecture en clusters à niveaux multiples

- **Densité du réseau** : les nœuds sont généralement densément déployés dans une zone d'intérêt. Le nombre de nœuds dans un RCSF peut être plus élevé de plusieurs ordres de grandeur que dans un MANET. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs (Akyildiz *et al.*, 2002). Les nouveaux schémas doivent garantir un bon fonctionnement de ce nombre élevé de nœuds et bien exploiter cette caractéristique.
- **Ressource énergétique limitée** : les nœuds sont généralement alimentés par une batterie. La durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Dans la plupart des situations, ils sont déployés dans un environnement hostile, où il est très difficile, voire impossible, de remplacer les batteries. Par conséquent, la bonne gestion de cette énergie est l'une des garanties majeures du bon fonctionnement du réseau pour le support de l'application.
- **Changement fréquent de la topologie** : la topologie d'un RCSF change fréquemment en raison de plusieurs facteurs. En effet, le nœud peut être hors service en cas de pannes matérielles ou d'épuisement d'énergie, de même que quand il ne trouve aucun autre nœud dans son rayon de communication, ou qu'il existe mais n'arrive pas à l'atteindre. La mobilité des nœuds est aussi un facteur à prendre en considération, que ce soit une mobilité propre au nœud grâce à son mobilisateur ou celle de l'environnement de déploiement (océan, air, ...).
- **Orienté-application** : un réseau de capteur est généralement conçu et déployé pour une application spécifique. Pour ces raisons, une nouvelle série de protocoles de communication est nécessaire, qui tient compte non seulement des contraintes de ressources des nœuds capteurs, mais aussi les différentes exigences de l'application.

- **Redondance de données** : dans la plupart des applications, les nœuds capteurs sont densément déployés. Ainsi, les données détectées par des nœuds capteurs voisins ont naturellement un certain degré de corrélation ou de la redondance.
- **Tolérance aux pannes** : les contraintes matérielles peuvent conduire le nœud capteur à un état de blocage pour un certain laps de temps. La défaillance d'un nœud se traduit alors par sa déconnexion du réseau et ne devrait pas affecter le fonctionnement global du réseau. Les protocoles et algorithmes conçus pour les RCSF tirent profit de la redondance des données, inhérente à ces réseaux, pour réduire l'impact des pannes. Le degré de tolérance d'un réseau aux pannes dépend aussi principalement de l'application en question.
- **Gestion décentralisée** : vu la taille des RCSF ainsi que les différentes contraintes matérielles, il est impossible de compter sur des algorithmes centralisés (par exemple, exécuté au niveau du Sink) pour la gestion de la topologie, du routage, ou autres. Au lieu de cela, les nœuds capteurs doivent collaborer avec leurs voisins pour prendre des décisions à la base d'informations locales. En conséquence, les résultats de ces algorithmes décentralisés (ou distribués) ne seront pas optimaux, mais ils peuvent être plus efficaces que les solutions centralisées en approchant la solution optimale avec une moindre complexité.
- **Besoin de sécurité** : la commande à distance et sans surveillance des nœuds capteurs augmente leur exposition aux intrusions malveillantes et aux attaques. En outre, dans un environnement sans fil, il est facile pour un adversaire d'écouter les transmissions de nœuds. Les objectifs de sécurité pour ces réseaux dépendra de ce que devra être protégé. Bien qu'il existe de nombreuses techniques et de solutions pour les systèmes distribués, qui empêchent les attaques ou contiennent l'étendu et les dégâts de ces attaques, beaucoup d'entre elles requièrent du calcul lourd et de nombreuses communications. Les ressources que requièrent ces solutions ne peuvent être satisfaites par des nœuds capteurs. En conséquence, les réseaux de capteurs nécessitent de nouvelles solutions pour l'établissement et la distribution des clés, l'authentification du nœud et autres. Il y a alors un grand besoin de développer des approches distribuées de sécurité pour les RCSF.
- **Modèle de transmission de données** : dans la plupart des applications de réseaux de capteurs, les données vont des nœuds au Sink, créant un pattern dit plusieurs-à-un. Cette transmission de données peut, quant à elle, se faire suivant plusieurs modèles dont nous distinguons trois essentiels (Chen et Varshney, 2004) :
 - Modèle basé sur les événements où la génération et la transmission des paquets de données est commandée par l'occurrence d'un événement. La plupart des applications basées sur les événements sont des applications sensibles aux délais.
 - Modèle basé sur les interrogations où la collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le Sink. La plupart des applications basées sur les interrogations sont des applications interactives, critiques et leur tolérance aux délais dépend de l'urgence de l'interrogation.
 - Modèle continu où les nœuds capteurs envoient les informations d'une manière continue au Sink suivant un volume de trafic prédéterminé.
- **Connectivité** : la densité élevée des nœuds dans les RCSF les empêche d'être complètement isolés. Par conséquent, nous nous attendons à ce que les nœuds soient bien reliés. Cependant, cette propriété doit être maintenue tout au long de la vie du réseau pour accomplir sa mission.
- **Couverture** : chaque nœud capteur a une certaine vue de l'environnement dans lequel il est placé qui est limitée par son rayon de captage. Par conséquent, la couverture de toute la zone d'intérêt est également un paramètre de conception important dans les RCSF.

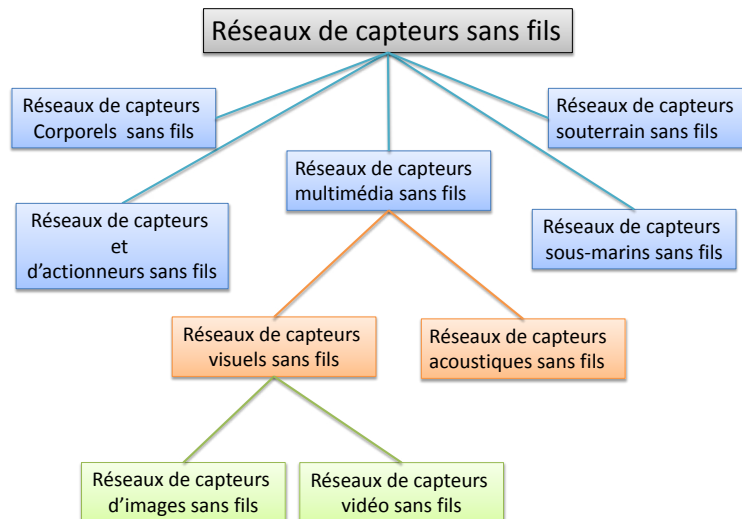


Figure 1.9 – Les différentes familles de RCSF

1.3 Familles de réseaux de capteurs sans fil

En survolant les différentes références sur les RCSF (Dargie et Poellabauer, 2010; Mcouat, 2013; Suhonen *et al.*, 2012), en passant par l'incontournable référence du domaine (Akyildiz et Vuran, 2010), ainsi que les différentes applications proposées, les RCSF peuvent être catégorisés en plusieurs familles. La figure 1.9 représente notre propre vue de l'évolution du domaine.

1.3.1 Réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil

Les RCSF fournissent des informations détaillées du monde physique grâce à des solutions de détection distribuées. En général, cette information est traitée au niveau du Sink. Avec l'émergence d'actionneurs et de robots à faible coût, l'information recueillie à partir de l'environnement peut être utilisée pour déclencher une action sur cet environnement. Cela a conduit à l'émergence des Réseaux de Capteurs et d'Actionneurs Sans Fil (RCASF) qui sont capables d'observer le monde physique, traiter localement quelques données pour la prise de décisions sur la base de ces observations, et effectuer des actions appropriées (Akyildiz et Kasimoglu, 2004). Un exemple important d'applications utilisant les RCASF est la détection d'incendie. Nous pouvons imaginer des capteurs répartis capables de détecter l'origine et l'intensité du feu, puis de relayer cette information aux gicleurs d'eau (des actionneurs), afin de maîtriser l'incendie. De même, des capteurs détecteurs de mouvement et de lumière répartis dans une maison peuvent détecter la présence de personnes. Selon l'identité et l'emplacement de l'utilisateur, les capteurs peuvent commander les actionneurs appropriés pour exécuter des actions, en fonction des préférences de l'individu que la maison peut apprendre au fil du temps.

1.3.2 Réseaux de capteurs sous-marins sans fil

Les Réseaux de Capteurs Sous-Marins Sans Fil (RCSMSF) sont envisagés pour permettre une grande variété d'applications telles que la collecte de données océanographiques, la surveillance de la pollution, l'exploration offshore, la prévention des catastrophes, la navigation assistée et la surveillance tactique (Akyildiz *et al.*, 2005). Plusieurs véhicules sans pilote ou sous-marins autonomes, équipés de capteurs sous-marins, peuvent être utilisés pour des applications d'explo-

ration des ressources naturelles sous-marines et de collecte de données scientifiques, ou encore pour recueillir des données de surveillances stratégiques. Pour rendre ces applications viables, il est nécessaire de développer des schémas de communication adaptés à ces appareils sous-marins. Comme pour les exigences des réseaux de capteurs classiques, les nœuds sous-marins doivent posséder des capacités d'auto-configuration. Les RCSMSF peuvent contribuer à la surveillance de courants marins et les vents, l'amélioration des prévisions météo, la détection des changements climatiques, ainsi que la compréhension et la prévention de l'effet des activités humaines sur les écosystèmes marins. Les RCSMSF qui mesurent l'activité sismique à partir d'emplacements distants peuvent fournir des alertes aux tsunamis dans les zones côtières, ou étudier les effets des tremblements de terre sous-marins.

1.3.3 Réseaux de capteurs souterrains sans fil

Les Réseaux de Capteurs Sous-Terrain Sans Fil (RCSTSF) sont constitués de nœuds sans fil qui fonctionnent sous la surface du sol (Akyildiz et Stuntebeck, 2006). Ces dispositifs sont soit complètement enterrés sous un sol dense, ou placés dans un espace souterrain ouvert borné, comme les mines et les tunnels routiers/métro. Les RCSTSF promettent une grande variété de nouvelles applications. Par rapport aux réseaux de capteurs souterrain actuels, qui utilisent des méthodes de communication filaires pour le déploiement du réseau, les RCSTSF ont plusieurs mérites remarquables tels que la dissimulation, la facilité de déploiement, l'actualité des données, la fiabilité et la densité de la couverture. Dans les applications agricoles, des capteurs souterrains sont utilisés pour surveiller les conditions du sol en termes d'eau et de teneur en minéraux. Les capteurs sont également utilisés avec succès pour surveiller l'intégrité des infrastructures invisibles tels que la plomberie. Les glissements de terrain ainsi que les tremblements de terre sont suivis à l'aide de sismomètres enterrés. Une autre application possible est la surveillance de la qualité de l'air dans les mines de charbon souterraines. L'accumulation du méthane et de monoxyde de carbone est un problème dangereux qui peut conduire à des explosions et incendies dans la mine. La présence de ces gaz représente un grand danger aussi pour la santé des mineurs et doit être suivie en permanence. Les capteurs peuvent également être utiles dans la surveillance de l'état des structures souterraines d'un bâtiment, d'un pont ou d'un barrage. Cela pourrait permettre un suivi en temps réel de l'usure dans un bâtiment et de prévenir des incidents catastrophiques.

1.3.4 Réseaux de capteurs corporels sans fil

Les Réseaux de Capteurs Corporels Sans Fil (RCCSF) sont une autre extension des RCSF qui, à leur tour, ont évolué au cours des dernières années en raison de l'innovation significative dans les micro-capteurs, le traitement embarqué, ainsi que les technologies sans fil (Yang et Yacoub, 2006). Un RCCSF est constitué de plusieurs micro-nœuds interconnectés, de faible puissance, qui peuvent à l'intérieur du corps, sur le corps, ou près du corps, surveiller les patients et leur constantes, donner des traitements et communiquer les données aux centres de surveillances. Les RCCSF ont reçu un énorme intérêt de la part des industriels et les différents acteurs du secteur de la santé, en raison de l'étendu des applications envisageables et commercialisables dans ce secteur, telles la télé-médecine, les soins de santé à distance, les sports et le divertissement. L'intérêt pour ces réseaux vient en majorité du fait que les systèmes de santé traditionnels n'ont pas été conçus pour répondre à l'énorme flux de patients et sont ainsi insuffisants dans les scénarios actuels. Les chercheurs parlent même d'arriver à un point où les individus n'auront même pas conscience du fait qu'ils étaient à un certain moment malades.

Beaucoup de travaux de recherches ont porté sur les technologies de communications sans fil où le corps est le medium, nommées « communications On-Body » (Hall *et al.*, 2007), et d'autres

reliant le capteur corporel à un dispositif externe, caractérisées de « communications Off-Body » (Hertleer *et al.*, 2009).

1.3.5 Réseaux de capteurs multimédia sans fil

Les progrès récents dans la technologie des CMOS ont permis le développement de modules de caméras qui pourront facilement être intégrés à des émetteurs-récepteurs bon marché. En outre, les microphones ont longtemps été utilisés comme une partie intégrante de nœuds capteurs sans fil. L'interconnexion des sources multimédia avec des appareils de communication peu coûteux a favorisé la recherche dans la mise en réseau de capteurs multimédia (Akyildiz *et al.*, 2007). En conséquence, les RCMSF sont devenus l'objet de recherches dans une grande variété de domaines. Le type du capteur utilisé détermine le type de données collectées ainsi que la catégorie du réseau. Quand seul les microphones sont utilisés le réseau est nommé Réseaux de Capteurs Acoustiques Sans Fil (RCAcSF). L'utilisation de caméras a permis l'émergence de la famille des RCVisSF, qui sont divisés en Réseaux de Capteurs Image Sans Fil (RCISF) et RCVSF. Les RCVSF, sur lesquels porte cette thèse, seront présentés en détail dans la section suivante.

1.4 Réseaux de capteurs vidéo sans fil

Les premiers travaux de recherches se focalisant sur la problématique du support de flux vidéo dans les RCSF, introduisant ainsi le terme de RCVSF, se situent entre les années 2002 et 2003. Dernièrement, les RCVSF ont attiré encore plus d'attention. Certains chercheurs ont lancé la recherche sur les aspects de compression efficace en énergie, adaptée à ce contexte, menant aux publications des résultats de recherche dans des conférences généralement dédiées au traitement du signal image et vidéo telles qu'ICME ou ICIP. D'autres chercheurs traitent l'aspect réseaux et protocoles de communications sans fil, menant aux publications des résultats dans des conférences réseaux et télécommunications (GLOBECOM, INFOCOM).

Depuis 2003, l'« Association for Computing Machinery » (ACM) a lancé l'« ACM International Workshop on Video Surveillance & Sensor Networks » (ACM IWVSSN) afin d'échanger des résultats de recherche connexes. Plusieurs célèbres universités américaines telles l'université de Californie, l'université de Carnegie-Mellon, l'université du Massachusetts et celle de Portland State ont également entamé la recherche dans le domaine. Cependant, les recherches sont toujours dans un stade initial et loin de la demande réelle.

Le premier travail de recherche réalisé pour introduire et bien caractériser les RCVSF est celui proposé par Akyildiz *et al.* (2007). Dès lors, quelques travaux plus spécialisés ont été proposés pour aborder directement les réseaux de capteurs visuels (Soro et Heinzelman, 2009; Tavli *et al.*, 2012; Yap et Yen, 2014) et ainsi les RCVSF.

1.4.1 Spécificités d'un réseau de capteurs vidéo sans fil

Un RCVSF est constitué de plusieurs nœuds vidéo répartis et dotés de capacités de calcul, de traitement et de communication. Les RCVSF héritent des contraintes des RCSF classiques et en rajoutent d'autres. L'une des principales différences entre les RCVSF et les autres types de réseaux de capteurs réside dans la nature des données collectées. La plupart des capteurs fournissent des mesures dont les signaux sont en une dimension (1D). Cependant, les nœuds capteurs vidéo embarquent un grand nombre de cellules photosensibles. Une mesure du capteur fournit un ensemble à deux dimensions (2D) de points de données, qui passe à trois dimensions (3D) en cas de vidéo avec l'ajout de la dimension temporelle. Les dimensions supplémentaires

sur l'ensemble des données collectées résulte à un contenu plus riche en termes d'information, entraînant par ailleurs à une plus grande complexité de traitement et d'analyse des données.

Les RCVSF sont certainement uniques et plus complexes relativement à d'autres types de RCSF. Ces caractéristiques particulières sont décrites ci-après (Tavli *et al.*, 2012; Soro et Heinzelman, 2009; Akyildiz *et al.*, 2007).

- **Besoins en ressources** : la durée de vie du nœud, alimenté en général par batterie, est proportionnelle à l'énergie consommée pour la détection, le traitement et la transmission des données. Compte tenu de la grande quantité de données générées par les nœuds vidéos, en plus de traiter localement et de transmettre les données, ce qui est coûteux en termes d'énergie, des méthodes de compression et transmission efficaces en énergies sont requises. En outre, les RCVSF nécessitent une bande passante plus conséquente pour la transmission de données vidéo. Ainsi des techniques de transmission à débit de données élevé et à faible consommation d'énergie sont requises. A cet effet, les techniques de transmission à ultra large bande semblent être prometteuses pour ce contexte particulier.
- **Couverture avancée** : un nœud capteur peut recueillir des données à partir de son voisinage, limité par un rayon de couverture. Les nœuds vidéo, quant à eux, sont limités par un champs de vision, et leur efficacité dépend principalement de l'existence d'une visibilité directe entre l'événement et la caméra du nœud capteur. Ainsi, les modèles de couverture développés pour les RCSF traditionnels ne sont plus adaptés au contexte des RCVSF. En effet, le champs de vision est un nouveau paramètre qui doit être pris en considération par les nouvelles solutions en vue d'optimiser la couverture du réseau.
- **Collaboration autonome** : les RCVSF sont envisagés pour devenir des systèmes distribués et autonomes, où les nœuds vidéo collaborent pour couvrir convenablement l'environnement surveillé. La communication entre les caméras devrait être fondée sur une certaine ontologie uniforme pour la description de l'événement et l'interprétation de la dynamique de la scène. De plus, via des algorithmes bien conçus, les nœuds peuvent collaborer après déploiement pour s'auto-organiser et converger vers une topologie offrant une couverture optimale.
- **Encodage de la vidéo en local** : l'encodage vidéo (ou compression) permet de réduire la quantité de données à faire circuler dans le réseau. Il est obligatoire dans le contexte des RCVSF de tenir compte du bilan énergétique lors de l'encodage ainsi qu'à la transmission. Le seul domaine utilisant la vidéo et ayant considéré l'énergie du traitement est celui de la vidéo sur mobile. Toutefois, l'énergie considérée dans ce domaine particulier est celle du décodage, consommée par les Smartphones lors du décodage des vidéos reçues via Youtube ou autre Hoque *et al.* (2014). Il est aussi à noter que l'énergie liée au traitement est toujours négligée dans le cadre des RCSF. Ainsi, la considération de l'énergie lors de l'encodage du flux vidéo et la proposition de schémas d'encodage efficaces en énergie sont de nouveaux challenges introduits par ces réseaux si particuliers.
- **Encodage de la vidéo en réseau (In-Network)** : la contrainte énergétique des RCVSF pousse à envisager des algorithmes de traitement des données à l'intérieur du réseau. Le traitement de données en réseau est une technique dans laquelle un nœud intermédiaire est sélectionné pour abriter une fonction complexe pour fusionner les flux provenant des nœuds de sources. Cela nécessite alors de nouvelles architectures de traitement collaboratif distribué, permettant le filtrage et l'extraction d'informations sémantiquement pertinentes au niveau du réseau de capteurs. En conséquence, la durée de vie du réseau peut être augmentée en réduisant la transmission des informations redondantes.
- **Intérêt de solutions inter-couches** : satisfaire les besoins des applications dans un contexte à multiples contraintes est très difficile. En effet, les RCVSF doivent faire face à une grande taille de données avec plusieurs exigences (*i.e.* délai, fiabilité, etc.) et sous plusieurs contraintes (*i.e.* ressources en énergie, mémoire, traitement, etc.). L'approche

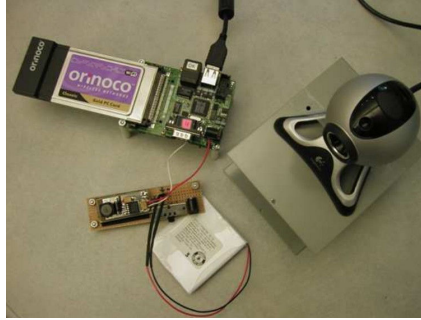


Figure 1.10 – Nœud capteur vidéo Meerkats et ses composants (Boice *et al.*, 2006)

inter-couches est considérée comme le schéma de conception de solutions le plus efficace pour faire face aux exigences rigoureuses des RCVSF et répondre ainsi aux exigences de l'application avec une faible complexité. Ce point particulier est traité en détail dans le chapitre 2.

1.4.2 Architectures d'un réseau de capteurs vidéo sans fil

Dans les différentes références bibliographiques traitant les RCMSF (Almalkawi *et al.*, 2010; Akyildiz *et al.*, 2007) ou même les RCVSF (Soro et Heinzelman, 2009), les architectures envisagées peuvent être catégorisées sous trois classes ou modèles de référence.

- **Architecture plate et à niveau unique (1-tier)** : ce type de réseau est composé de nœuds homogènes de mêmes capacités et exécutant les mêmes fonctions dans le réseau. Sous ce modèle, tous les nœuds peuvent ainsi capturer la vidéo, effectuer le même traitement sur les données et les relayer vers le Sink via un schéma de communication à multi-sauts. Cette architecture a le grand avantage d'être facile à gérer, mais vues les contraintes énergétiques, elle ne permet pas de faire des traitements poussés (*i.e.* détection, suivi, fusion).

Un exemple de réseau adoptant cette architecture est le banc d'essai (testbed) Meerkats (Boice *et al.*, 2006) développé à l'université de Californie à Santa Cruz. Le réseau se compose de 8 nœuds Meerkats et d'un ordinateur portable Dell Inspiron 4000 comme Sink, utilisant une carte Orinco Gold 802.11b pour la communication sans fil. Chaque nœud vidéo, illustré dans la figure 1.10, se base sur un nœud Stargate du fabricant Crossbow composé d'une CPU XScale PXA255 cadencée à 400 MHz avec 32 Mo de mémoire flash et 64 Mo de SDRAM. Chaque nœud Stargate est équipé d'une carte sans fil 802.11b Orinco Gold et d'une webcam Logitech QuickCam Pro 4000, via USB, qui capture le flux vidéo à une résolution spatiale allant jusqu'à 640x480 pixels.

- **Architecture hiérarchique et à niveau unique** : dans ce type d'architecture, des nœuds hétérogènes coexistent et forment des clusters comme précédemment introduit (cf. sous-section 1.2.2). A la tête de chaque cluster, un nœud disposant de plus de ressources effectue des traitements de données vidéo plus complexes. Le chef du cluster communique directement avec le Sink ou via d'autres chefs de clusters en mode multi-sauts.
- **Architecture à multi-tiers** : dans cette architecture, plusieurs types de capteurs sont organisés dans une structure à plusieurs niveaux logiques. Par exemple, le premier niveau, déployé avec des capteurs scalaires pourrait effectuer des tâches simples, comme la détection de mouvement. Un deuxième niveau, constitué de capteurs vidéo, peut effectuer des tâches plus complexes comme la compression, la détection et la reconnaissance d'objets. D'autres niveaux peuvent être envisagés, composés de nœuds plus puissants ou à résolution spatiale plus élevée et qui seront capables d'effectuer des tâches encore plus complexes.

Chaque niveau peut avoir un hub central pour effectuer plus de traitements de données et communiquer avec le niveau supérieur. Le dernier niveau peut être connecté sans fil au Sink ou à une passerelle. Cette architecture peut accomplir des tâches ayant différents besoins avec un meilleur équilibre en termes de coûts, de couverture, de fonctionnalité ainsi qu'en termes d'exigences en fiabilité. Nous retenons cette architecture particulière dans nos contributions.



Figure 1.11 – Carte Stargate interfacée avec une webcam de résolution moyenne. Stargate intègre une carte 802.11 et un nœud MICAz qui fonctionne comme une passerelle vers le réseau de capteurs.

Le testbed des RCVSF développé au Laboratoire Broadband Wireless Networking (BWN) à Georgia Tech (GIT) est basé sur des dispositifs commerciaux « off-the-shelf » (COTS) et adopte cette architecture. Il a été développé pour démontrer l'efficacité des algorithmes et des protocoles pour les communications multimédia à travers ces réseaux particuliers. Le testbed intègre un réseau de capteurs scalaires composé d'un ensemble hétérogène de nœuds Imote2 et Micaz du constructeur Crossbow. Le testbed permet l'intégration de dis-

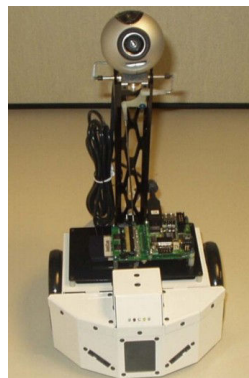


Figure 1.12 – Acroname GARCIA, un robot mobile avec une caméra pan-tilt montée et doté d'interfaces 802.11 ainsi que 802.15.4 pour communiquer avec un réseau extérieur et le RCSF.

positifs hétérogènes et comprend trois types de capteurs multimédia : capteurs d'imagerie bas de gamme, des capteurs vidéo (webcam) de qualité moyenne attachés à des nœuds de type Stargate (voir figure 1.11), ainsi que des caméras pan-tilt montées sur les robots mobiles Acroname GARCIA (voir figure 1.12). Le testbed utilise à la fois la norme IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11b pour la communication sans fil et est capable de livrer du flux vidéo sous encodage JPEG au format QCIF (176 x144) à 15 images par seconde. La figure 1.13 donne un aperçu sur ce testbed.



Figure 1.13 – GARCIA déployé sur le testbed agissant comme un Sink mobile et peut se déplacer vers la zone d'intérêt.

1.4.3 Exemples de nœuds vidéo

Le tableau 1.4 rapporte des exemples sur les différents nœuds vidéo et prototypes de recherche existants, illustrés dans le figure 1.14, ainsi que leurs spécifications. D'après ce tableau, nous pouvons voir que les nœuds ont des capacités différentes (résolution, puissance de traitement, stockage, et autres) et en conséquence, ils peuvent jouer des rôles différents dans le réseau.

En effet, les nœuds disposant d'une caméra à basse résolution peuvent être utilisés dans une

Tableau 1.4 – Exemples de nœuds vidéo

Nœud	Année	Traitement	Mémoire (RAM/FLASH)	Caméra	Communication
Cyclops	2005	Atmel ATmega128L 8-bit (7.4 MHz) + Xilinx XC2C256 CoolRunner (16MHz CPLD)	64 Ko/512 Ko	Agilent Compact CMOS ADCM-1700 (352×288 pixel @10 fps)	Interfacé avec MICA2 ou MICAz IEEE 802.15.4
eCAM	2006	Contrôleur OV528 Serial Bridge (JPEG)	4 Ko (noeud Eco)	COMedia C328-7640 board caméra OV7640 (640×480 pixel @30 fps)	Interfacé avec nœud Eco (radio nRF24E1, 1Mbps)
Panoptes	2003	Intel XScale PXA255 32-bit (400MHz, Stargate) (JPEG, Differential JPEG)	64 Mo/32 Mo (Stargate)	Logitech 3000 USB Camera (640×480 pixel @ ≈13 fps) (160×120 pixel @ ≈30 fps)	Carte 802.11 PCMCIA (11 Mbps pour 802.11b)
CITRIC	2008	Intel XScale PXA270 32-bit (624 MHz) (JPEG)	64 Mo/16 Mo	OmniVision OV9655 (1280×1024 pixel @15 fps) (640×480 pixel @30 fps)	Interfacé avec nœud Tmote Sky (radio CC2420 802.15.4, 250 kbps)
DSPCam	2009	ADSP-BF537 Blackfin 16-bit (600 MHz) (JPEG)	32 Mo/4 Mo	OmniVision OV9653 (640×480 @30 fps) (1280×1024 @15 fps)	Stand alone 802.11b/g module ou avec nœud FireFly (54 Mbps)
NIT-Hohai	2009	Intel PXA270 32-bit (500 MHz) (H.263)	SDRAM Externe + Flash	Webcam (174×144 @15 fps)	Stand-alone 802.11 (54 Mbps)
Waspnote+ video board	2014	Atmega1281 (8 MHz) (Waspnote) (MPEG-4)	Waspnote + 2 à 32 Go stockage du module 3G	Camera (640×480) images, (320×240 @7.5, 10 et 15 fps) vidéos	Interfacé avec Waspnote (802.11, 802.15.4) ou 3G

architecture multi-tiers pour des tâches simples, comme la détection d'objets. Les nœuds avec une caméra à résolutions intermédiaire ou haute peuvent être utilisés aux niveaux supérieurs du réseau pour des tâches plus complexes et qui consomment de l'énergie, telles que la recon-

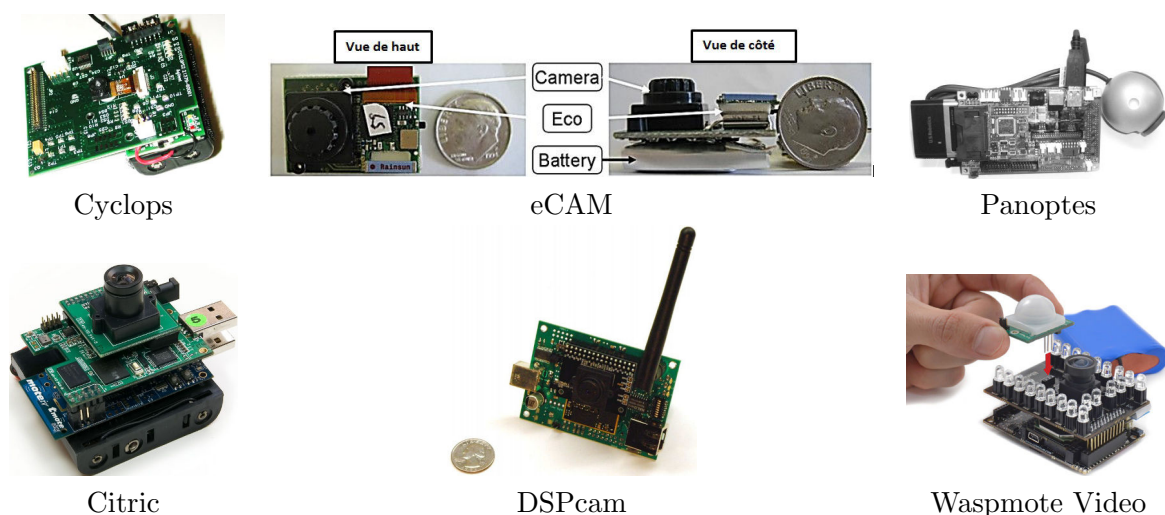


Figure 1.14 – Exemples de nœuds capteurs vidéo

naissance et le suivi d'objets. Ces types de nœuds consomment plus d'énergie et donc ne sont réveillés qu'à la demande des dispositifs du niveau inférieur, par exemple, en cas de détection d'un objet d'intérêt.

Le tableau 1.4 énumère aussi les technologies utilisées pour la transmission du flux vidéo. Nous remarquons l'utilisation de la norme IEEE 802.15.4 ainsi que la norme IEEE 802.11 dans la plupart des projets. L'Ultra Large Bande (ULB) (Aiello et Rogerson, 2003) s'impose de plus en plus comme une technologie solution pour la transmission de données dans les RCVSF, à hauts débits et à faible consommation d'énergie. Premièrement, l'ULB permet des débits de données allant jusqu'à 250 Mbps en plus de son immunité à la propagation par trajets multiples et une information sur le positionnement assez précise. La couche physique ULB est implémentée en utilisant soit des impulsions radio (IR) de très courte durée ou un multiplexage fréquentiel (MB-OFDM). Deuxièmement, le faible cycle de service en IR-ULB, en raison de la courte durée de l'impulsion, est un avantage clé pour une faible consommation d'énergie. Par ailleurs, le fait que l'information est étendue sur une large bande passante diminue la densité spectrale de puissance, réduisant ainsi l'interférence avec d'autres systèmes, ainsi que la probabilité d'interception.

1.5 Exemples d'applications

L'émergence des RCVSF a déclenché des recherches approfondies sur de nombreux aspects. Cependant, l'applicabilité de ces réseaux a longtemps été discutée en mettant l'accent sur les applications potentielles qui peuvent être réalisées. Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu des applications commerciales et académiques existantes développées pour les RCVSF.

Rien que sur le site du fabricant « Libelium¹ », qui gagne de plus en plus de terrain par rapport aux autres concurrents, nous pouvons recenser plus de 50 applications réalisables avec leurs produits tous domaines confondus. Par ailleurs, d'après plusieurs sources telles Shaikh *et al.* (2013), ainsi que les applications réalisables et envisagées (Xu, 2002; Borges *et al.*, 2014), les RCVSF présentent une excellente alternative pour la gestion de ressources naturelles dans les pays en voie de développement.



Figure 1.15 – De gauche à droite : noeud enterré, écran d’affichage



Figure 1.16 – Le module de détection de variation du champs magnétique

1.5.1 Smart Santander : Recherche de places de stationnement libres

Le projet SMART SANTANDER², a été développé par plusieurs sociétés et institutions, dont Telefonica I + D et l’Université de Cantabrie. Le projet vise à concevoir, déployer et valider à Santander et son voisinage une plateforme composée de capteurs, actionneurs, appareils photo et afficheurs afin de détecter les places de stationnement libres. La ville de Santander a été divisée en 22 zones différentes. Environ 380 nœuds Waspnotes ont été déployés à différents endroits de la ville, enterrés sous la surface de la route à l’intérieur d’un boîtier (voir figure 1.15). Pour détecter la variation du champ magnétique engendré par un véhicule garé dessus, les nœuds utilisent le module illustré par la figure 1.16. L’information est envoyée périodiquement aux répéteurs puis à un dispositif qui stocke les données et met à jour les informations disponibles pour les citoyens. Une série de panneaux situés dans la ville de Santander, comme illustré par la figure 1.15, indiquent le nombre de places de stationnement libres. Le statut des places de parking est également mis à jour dans une carte pour être consulté par les citoyens sur Internet.

En outre, le projet SmartSantander est un réseau à grande échelle d’expérimentation qui permet aux chercheurs de partout dans le monde de tester différents algorithmes dans un environnement réel.

1.5.2 Safecast : suite à la catastrophe nucléaire de Fukushima Diachi

Après le tremblement de terre de Tohoku le 3/11/2011, il est devenu impossible d’avoir une source de données fiable sur les niveaux de radiation. Ceci est à un tel point que les citoyens ne pouvaient que deviner, à la base de rumeurs, si leur région est contaminée ou non. De plus, les données publiées par des sources officielles étaient tellement vagues qu’elles étaient inutiles pour la plupart des citoyens. La situation a empiré davantage lorsque les stocks de détecteurs de radiation Geiger ont été (rapidement) épuisés.

1. <http://www.libelium.com/>

2. http://www.libelium.com/smart_santander_smart_parking/

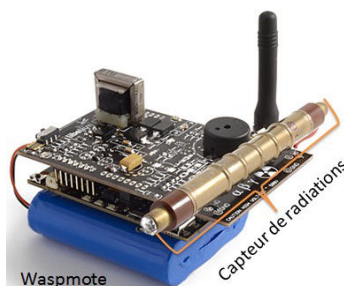


Figure 1.17 – Le nœud Waspmote avec le module de détection de radiation



Figure 1.18 – L'intérieur du nœud PRETESIC

SafeCast³ est une plateforme créée par un groupe de citoyens qui ont décidé de résoudre ce problème eux-mêmes. En créant et en déployant un réseau de capteurs de radiation, composé de capteurs statiques et mobiles activement déployés tout autour du Japon, de vastes zones ont été numérisées et documentées. Ces données ont été ensuite recueillies et publiées librement pour que quiconque puisse y avoir accès. Des scientifiques, des universitaires et des équipes de développement ont pu analyser les données et les exploiter. Par ailleurs, les citoyens ont pu voir les niveaux de radiation précis dans leur région. Un nœud capteur pour recueillir des informations sur les radiations est maintenant proposé et commercialisé par la compagnie Libelium et est reporté par la figure 1.17.

1.5.3 PRETESIC : supervision de la qualité et la gestion de l'eau à Valence

Le projet PRETESIC⁴ a été développé par l'Institut de technologie informatique (ITI), en collaboration avec l'Université Polytechnique de Valence (UPV) et Telefonica Cathedra, et déployé dans la ville de Valence (Espagne). Le système est capable de surveiller la qualité de l'eau en mesurant différents paramètres tels que le pH, la température, la conductivité, qui permettent de vérifier si les différents processus au sein du cycle de l'eau fonctionnent correctement. De cette façon, le système est capable de réagir contre des situations inattendues, en évitant d'éventuels dommages ainsi que les catastrophes naturelles telles que les inondations. Le nœud utilisé est représenté dans la figure 1.18. L'utilisation d'un RCSF a permis de réduire au minimum le temps nécessaire pour le déploiement et de commencer à recevoir des données immédiatement, comme illustré par la figure 1.19. Ainsi, les agents responsables de la qualité de l'eau n'ont plus à se déplacer dans la ville de Valence pour récupérer leur échantillons et prendre les mesures.

3. <http://blog.safecast.org/>

4. http://www.libelium.com/smart_water_cycle_monitoring_sensor_network/

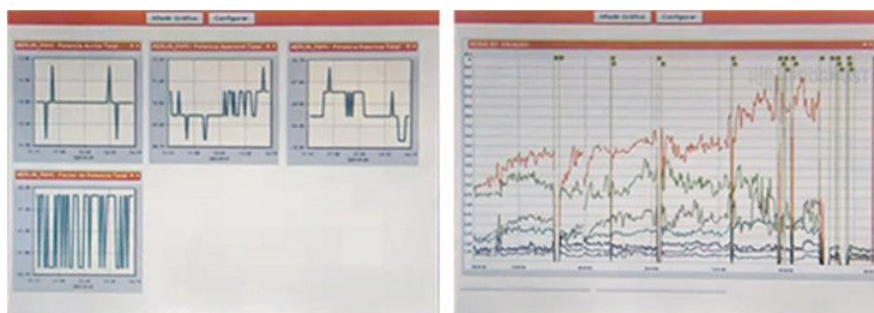


Figure 1.19 – Mesures recueillies par les nœuds déployés pour le projet PRETESIC

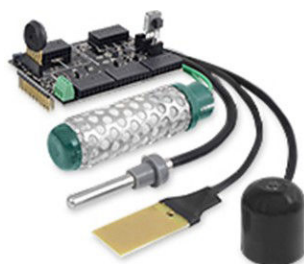


Figure 1.20 – Le nœud agriculture du système Siega

1.5.4 Siega : pour la supervision des vignobles de Galice

Le système Siega⁵ a été développé par Grupo Austen, une société espagnole spécialisée dans les installations navales et maintenant dans les RCSF. Ce système a été tout d'abord déployé dans un vignoble de Pontevedra, une ville dans le nord de l'Espagne. Le système Siega est capable de surveiller les paramètres environnementaux tels que la température ambiante, l'humidité et d'autres paramètres liés à l'agriculture tels que les précipitations et le vent. Un exemple de nœud agriculture utilisé est donné par la figure 1.20. Le système permet de surveiller les conditions de la vigne en temps réel et de prédire l'apparition d'une infection dans les prochaines heures/jours. Cette fonctionnalité permet aux techniciens viticoles de prendre les mesures nécessaires pour minimiser l'impact des infections dans le vignoble, ainsi que le temps et l'argent perdu à cause de ce fléau. D'autre part, le système permet également de surveiller et de contrôler le raisin et assurer une traçabilité jusqu'au distributeur.

1.5.5 Deernet : vidéo-surveillance des cerfs dans leur milieu sauvage

DeerNet (He *et al.*, 2008b) est un projet parrainé par la National Science Foundation (NSF), conjointement mené par l'Université de Floride, l'Université de Missouri-Columbia ainsi que le Département de Conservation du Missouri. Le but majeur est d'exploiter l'information générée par ce projet de vidéo-surveillance afin de réduire le nombre d'accidents entre les cerfs et les véhicules. Les données multimédia primaires fournies par DeerNet sont des vidéos capturées à partir du point de vue d'un Cerf de Virginie. Cette information est capturée par des caméras vidéo montées sur les bois des mâles, et les cols des femelles, comme illustré par la figure 1.21.

Pour faire parvenir la vidéo à la station d'enregistrement, chaque cerfs porte également un émetteur sans fil et un pack utilisable pour plusieurs centaines d'heures de transmission vidéo à partir d'une même batterie. Afin de conserver l'énergie, les caméras sont équipées de capteurs de lumière, de sorte à ce que l'appareil photo soit éteint dans des conditions de faible luminosité.

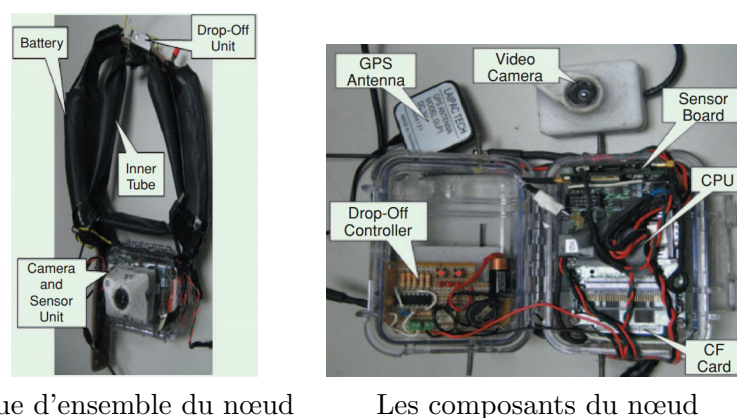
5. <http://www.siegasystem.com/index.html>



Une biche équipée

Un cerf équipé

Figure 1.21 – Illustration d'un cerf et une biche équipés de nœuds vidéo



Vue d'ensemble du nœud

Les composants du nœud

Figure 1.22 – Illustration du nœud vidéo ainsi que ses composants

La figure 1.22 rapporte les composants du nœuds vidéo utilisé. Chaque nœud se base sur le nœud Stargate de Crossbow. Rappelons que ce nœud a un microprocesseur Intel XScale cadencé à 400 MHz et est lié à une carte PCMCIA pour la transmission de données sans fil 802.11. De plus, le nœud est connecté à une caméra USB pour la capture vidéo, une carte Compact Flash (CF) pour stocker les flux de bits vidéo compressés ainsi qu'une carte multi-capteurs avec accéléromètre, GPS, capteurs de température et de lumière. Le système comprend également une unité de commande « drop-off » dont la fonctionnalité est de détacher le nœud à distance.

Les données vidéo capturées par la caméra sont encodées par un encodeur vidéo MPEG-4 efficace en énergie (He *et al.*, 2005b) opérant sur le microprocesseur intégré. Les flux binaires compressés sont stockés temporairement dans la carte CF de 4 Go. Plusieurs routeurs sans fil sont déployés à proximité des lieux que les animaux visitent souvent (par exemple un emplacement de nourriture). Lorsque l'animal entre dans la portée du routeur, le module de transmission sans fil est activé pour transférer les données vidéo compressées au routeur et libère l'espace de stockage dans la carte CF.

1.6 Conclusion

Ce chapitre introduit une vue d'ensemble sur les RCSF. En effet, dans un premier temps nous avons présenté les RCSF d'une manière générale en passant en revue les types de nœuds capteurs, les différentes architectures de réseaux ainsi que leurs caractéristiques particulières recueillies d'après plusieurs références bibliographiques. Deuxièmement, nous avons introduit les

différentes familles des RCSF, à savoir les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil (RCASF), les réseaux de capteurs sous-marins sans fil (RCSMSF), les réseaux de capteurs souterrain sans fil (RCSTSF), les réseaux de capteurs corporels sans fil (RCCSF) ainsi que les réseaux de capteurs multimédia sans fil (RCMSF). Ces derniers étaient notre fil conducteur pour introduire les réseaux de capteurs vidéo sans fil (RCVSF) sur lesquels porte cette thèse en grande partie. Finalement, après avoir présenté les particularités de ces nouveaux réseaux, les différents challenges et architectures envisageables ainsi que les différents nœuds vidéo et leurs caractéristiques, nous avons cité quelques applications ayant utilisé les RCSF comme solution.

Dans le chapitre 2, nous présentons les différents travaux de recherches proposés dans la littérature portant sur les approches inter-couches dans les RCVISF, pour le support des flux images et vidéo.

SOLUTIONS INTER-COUCHES POUR LE SUPPORT DE FLUX IMAGES ET VIDÉO DANS LES RCVISF

Sommaire

2.1	Introduction	31
2.2	Importance de l'approche inter-couches dans les RCVISF	32
2.3	Solutions inter-couches dans les RCVISF	32
2.3.1	Solutions inter-couches dans le cas des images fixes	33
2.3.2	Solutions inter-couches dans le cas de la vidéo	38
2.4	Synthèse sur les techniques employées en vue d'approches inter-couches per- formantes	43
2.4.1	Synthèse sur les schémas d'encodage	43
2.4.2	Synthèse sur les schémas de routage	44
2.5	Conclusion	45

2.1 Introduction

Les approches de communication en couches séparent généralement les tâches de communication en plusieurs couches, avec une définition claire de la fonctionnalité de chacune d'elles. Dans une pile de communication en couches, l'interaction entre les couches se produit à travers des interfaces standardisées bien définies, qui inter-connectent uniquement les couches voisines de la pile (Srivastava et Motani, 2005). En revanche, les approches inter-couches tentent d'exercer une interaction plus riche entre les couches, même entre les non adjacentes, afin de réaliser des performances plus importantes.

Dans le chapitre VII de Jurdak (2007) l'approche inter-couches est définie, par rapport à une architecture en couches de référence, comme étant « *la conception d'algorithmes, de protocoles et d'architectures qui exploitent ou fournissent un ensemble d'interactions entre les couches, étant un sur-ensemble d'interfaces standards fournies par l'architecture en couches de référence* ». Ainsi, dans les approches conçues en inter-couches, les couches adjacentes et non adjacentes peuvent partager des informations à travers de nouvelles interfaces qui sont soit unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Alternativement, une architecture inter-couches peut mettre à disposition des variables d'état globales accessibles à toutes les couches de la pile protocolaire.

Dans les RCSF, les nœuds doivent gérer plusieurs aspects de performances, tels que la gestion d'énergie, les exigences de l'application ou la sécurité. Contrairement aux modèles traditionnels à infrastructure, où les stations de base ont une vue globale de l'état du réseau, l'information sur ce dernier est en quelque sorte répartie entre les nœuds, dans le cas des RCSF. Plus précisément, chaque nœud forme sa propre vision locale de l'état de son voisinage, ce qui représente une vue partielle de l'état global du réseau. Dans la plupart des cas, il est impossible de connaître l'état du réseau au niveau de chaque nœud (problèmes de connectivité par exemple), ce qui défavorise l'utilisation d'algorithmes d'optimisation centralisés (Akyildiz *et al.*, 2002). Par conséquent, au

niveau de chaque nœud, des algorithmes distribués sont utilisés, sur la base de la vue partielle qu'a chaque nœud de l'état du réseau. Les solutions distribuées peuvent adopter une conception inter-couches pour permettre à chaque nœud de réaliser des optimisations en local à « petite échelle ».

2.2 Importance de l'approche inter-couches dans les RCVISF

Les exigences rigoureuses des réseaux de capteurs image et vidéo poussent de plus en plus vers la conception de solutions sous une architecture inter-couches (Akyildiz *et al.*, 2007; Almalkawi *et al.*, 2010). En effet, afin d'atteindre les performances souhaitées sous multiples contraintes (*i.e.* énergie, distorsion, délai, ...), les protocoles et algorithmes des couches MAC, réseau, transport et application sont amenés à fonctionner d'une manière encore plus interactive. Dans un tel contexte, chaque couche est consciente de l'importance des données en cours de traitement pour l'ensemble du système. Une importance particulière est donnée aux encodeurs vidéo et image du fait qu'ils jouent un rôle crucial. En effet, sur la base des exigences de l'application, l'encodeur peut spécifier la priorité de chaque donnée encodée. Ensuite, en fonction des retours des couches inférieures, l'encodeur peut ajuster le débit source des données ainsi que les paramètres d'encodage, de manière à prolonger la durée de vie du nœud sous une contrainte de qualité vidéo désirée.

L'introduction de la priorité entre les données permet de réduire la complexité des solutions proposées, en servant les données différemment, afin d'atteindre les performances ciblées. Cette manière de traiter les données dans un réseau est communément nommée « différenciation de service ». Ce paradigme est fortement recommandé dans le contexte des RCVSF (Yap et Yen, 2014; Akyildiz *et al.*, 2007; Almalkawi *et al.*, 2010). En effet, la différenciation de service est introduite d'abord au niveau de la couche application, par l'encodeur, et est ensuite respectée au niveau des couches inférieures. Par exemple, sur la base de la pertinence des données vidéo, le protocole de routage peut fournir des traitements différenciés pour les paquets, en n'atteignant par exemple une grande fiabilité que pour des paquets de priorité élevée. Puisque fournir de la fiabilité dans les RCVSF nécessite davantage de consommation d'énergie (Akyildiz *et al.*, 2007), grâce à ce paradigme, une importante efficacité énergétique peut être atteinte. D'autre part, l'efficacité énergétique et le contrôle de congestion peuvent être obtenus en éliminant les paquets les moins pertinents, lorsque les énergies résiduelles ou l'espace disponible dans les files d'attente des nœuds sont au-dessous d'un seuil donné.

Par ailleurs, les approches inter-couches avec différenciation de service permettent d'atteindre une fiabilité et une qualité d'expérience plus importante, avec une complexité réduite. En effet, plusieurs copies de paquets de données pertinentes peuvent être transmises, de manière à augmenter la probabilité de réception du paquet, moyennant un routage à multi-chemins. Encore, des codes correcteurs d'erreur de capacité de correction variable peuvent être utilisés pour protéger mieux les parties les plus pertinentes des flux encodés.

Pour toutes ces raisons, de nouvelles solutions inter-couches intégrant le paradigme de différenciation de service, adaptées aux contraintes des RCVISF, sont requises.

2.3 Solutions inter-couches dans les RCVISF

Nombreux sont les travaux ayant adopté l'approche inter-couches dans les RCVISF. En passant en revue les différentes approches proposées récemment dans la littérature (Felemban *et al.*, 2014; Sahin *et al.*, 2014; Shah *et al.*, 2012; Zhang et Ding, 2010), ainsi que quelque travaux de recherche recensant ce type d'approches (Soro et Heinzelman, 2009; Costa et Guedes, 2011; Yap et Yen, 2014), il est clair que celles-ci peuvent être catégorisées selon le type des

données visuelles (*i.e.* image ou vidéo) ou selon la politique de l'encodage (*i.e.* en local ou en collaboration).

Dans le but d'avoir une vue assez globale de ce que propose la littérature, nous présentons dans ce qui suit les approches conçues pour les données images, puis celles proposées dans le cas des données vidéo.

2.3.1 Solutions inter-couches dans le cas des images fixes

Dans un tel contexte, les données (*i.e.* images) nécessitent généralement moins de bande passante et consomment moins d'énergie en transmission et en traitement que les données vidéo.

Boluk *et al.* (2011b) présentent une framework efficace en énergie, pour la transmission des

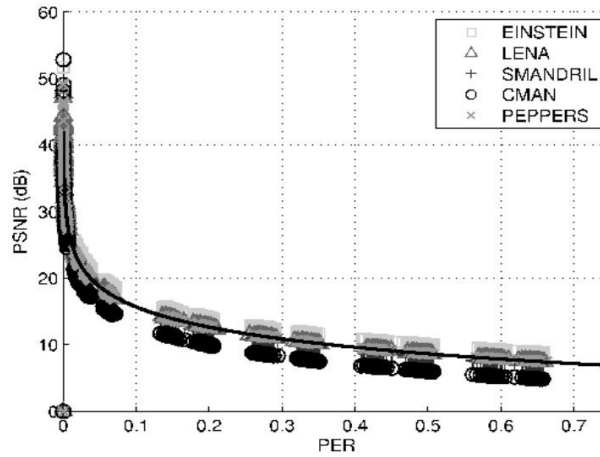


Figure 2.1 – Evolution du PSNR en fonction du taux de paquets perdus recueilli à partir du testbed (Sarisaray *et al.*, 2010)

images sous contrainte de qualité perçue, dans les RCMSEF. En effet, les auteurs proposent d'affecter au niveau applicatif, la **priorité** aux différents blocs de l'image à transmettre selon deux mesures. Une première mesure, reflétant l'entropie selon Shannon de ce bloc, puis une deuxième reflétant l'information sur le contour contenue dans ce bloc, selon le filtre de **Haar**. Au niveau de la couche réseau, les auteurs adoptent leur protocole de routage à **multi-chemins** proposé dans un précédent travail (Boluk *et al.*, 2011a) et nommé Image Quality Aware Routing (IQAR). Ce protocole, très inspiré du protocole **MMSPEED** (Felemban *et al.*, 2006) (voir chapitre 3), permet d'acheminer les blocs d'image avec différenciation de service en considérant l'énergie résiduelle, le délai ainsi que la fiabilité des nœuds voisins. Pour relier les performances réseau requises à la qualité de l'image souhaitée, les auteurs adoptent leur **modèle de prédiction de distorsion** (Sarisaray *et al.*, 2010), obtenu à partir d'une étude expérimentale suivie d'une régression linéaire. La figure 2.1 rapporte les résultats obtenus suite à cette étude expérimentale. Le modèle est donné par :

$$PSNR = \alpha \ln\left(\frac{X_d}{X}\right) + \beta \quad (2.1)$$

Où X_d et X sont le nombre de paquets reçus et envoyés respectivement, et α et β des constantes. Ainsi, selon l'importance de chaque bloc de l'image, un degrés de fiabilité doit être atteint par la couche réseau afin de fournir la qualité souhaitée. Les résultats des simulations comparant les performances de l'approche proposée, notée IQAR, à une approche adoptant le protocole MMSPEED au niveau de la couche réseau sont rapportés dans la figure 2.2. Les auteurs arrivent à améliorer en moyenne le délai par 35%, la consommation de l'énergie par 51% et la qualité par 12.5% (environ 3dB), relativement au protocole MMSPEED. Cependant, les auteurs ne

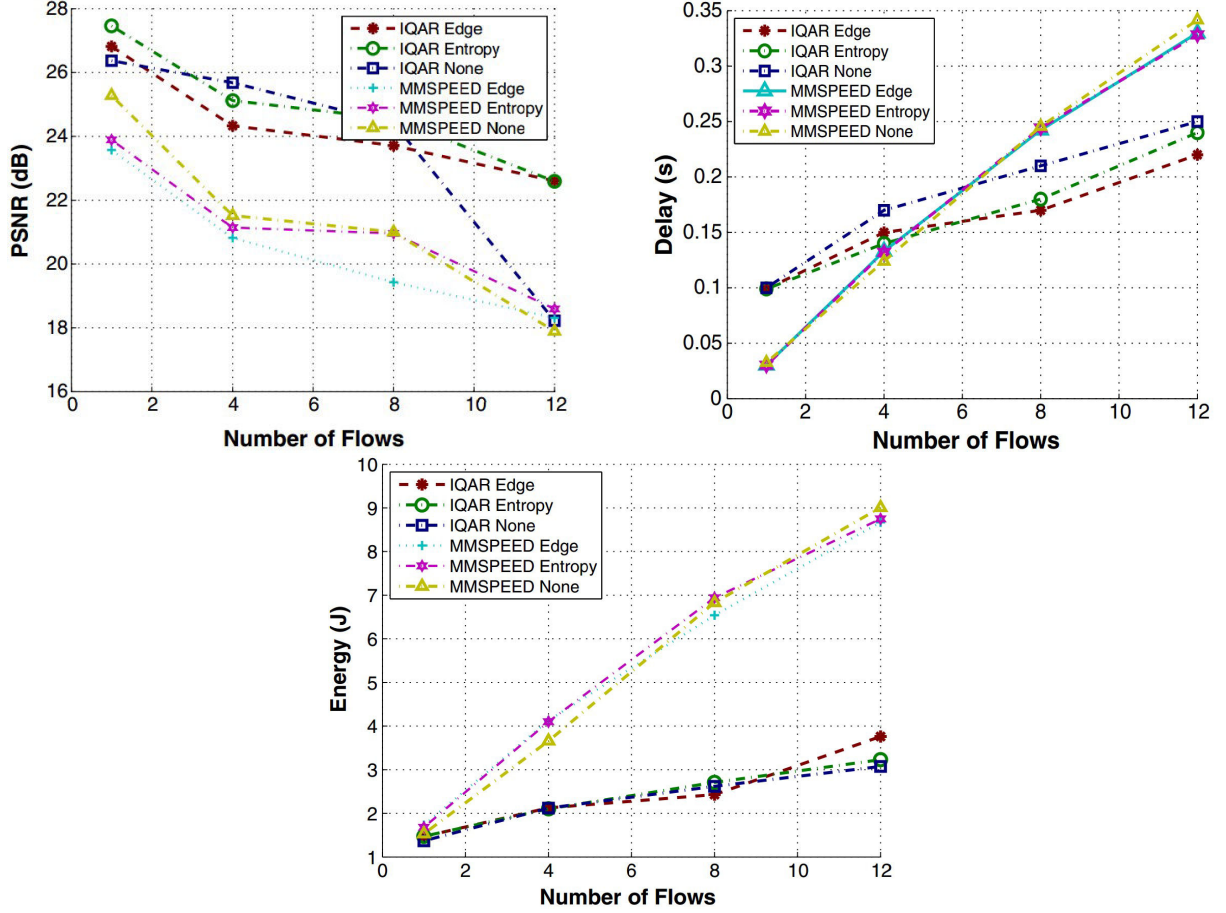


Figure 2.2 – Performances de l’approche proposée par (Boluk *et al.*, 2011b) en termes de qualité (à gauche) de délai (à droite) et de consommation d’énergie (au-dessous) comparée à l’approche utilisant le protocole MMSPEED

considèrent pas l’énergie consommée par le traitement de l’image dans le bilan énergétique.

Irgan *et al.* (2014) proposent une approche pour introduire la **priorité**, à faible coût, entre les blocs de l’image dans le cadre d’une application de surveillance des frontières à base de RCVisSF. En effet, ils présentent cinq mesures pour classer les blocs d’une image comme important ou pas. En outre, ils proposent un **modèle pour prédire l’énergie consommée pour la transmission** des images. En effet, leur modèle suppose que la transmission réussie d’un paquet est d’une probabilité constante p et que chaque transmission est indépendante. Ainsi, une transmission fiable d’un paquet est considérée comme une variable suivant la loi de Bernoulli, de paramètre p . Le modèle proposé pour estimé l’énergie de transmission, sachant que chaque macrobloc est encapsulé dans un paquet et seuls les macrobloc labellisés sont retransmis, est donné par :

$$E = e_p \cdot \frac{l}{p} \quad (2.2)$$

Où e_p est l’énergie requise pour transmettre un paquet de données et l est le nombre de paquets labellisés importants. Dans la couche réseau, ils supposent l’existence d’un protocole de routage fiable et qui adopte la différenciation de service. Cependant, aucune évaluation de la qualité visuelle reçue n’est faite, en vue de tester l’impact du taux de perte sur leurs approche.

Le travail proposé par Lecuire *et al.* (2007) consiste en un schéma de transmission d’images

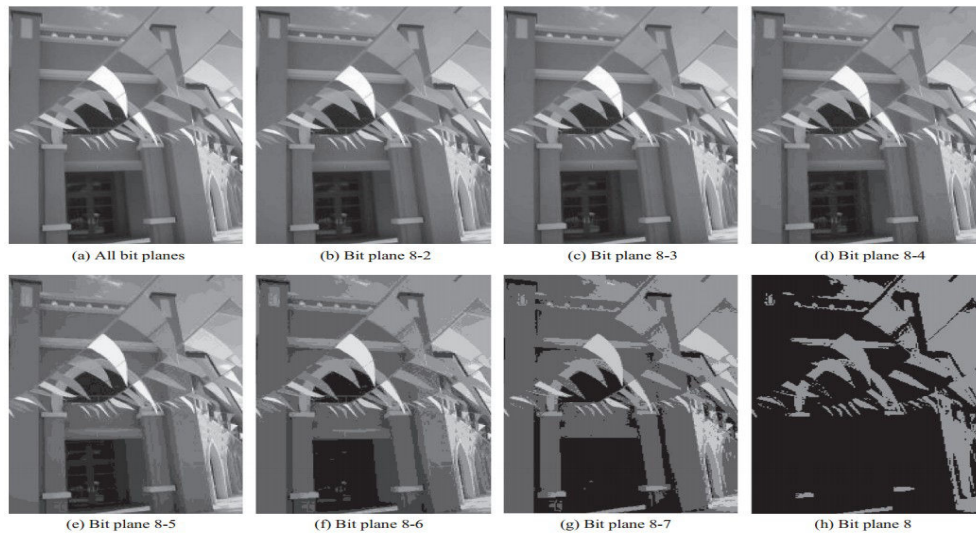


Figure 2.3 – Illustration de l’impact de la décomposition en plans binaires sur la qualité visuelle (Felemban *et al.*, 2014)

adaptatif et efficace en énergie pour les RCISF. Les auteurs essaient d’établir un compromis entre la consommation d’énergie, durant la phase de transmission, et la qualité des images reçues. La solution inter-couches proposée adopte au niveau de la couche application un schéma d’encodage de l’image à base de Transformée en ondelettes discrète « Discrete Wavelet Transform » (DWT). Pour la transmission, cette solution propose un schéma avec différents niveaux de fiabilité. En général, l’encodage d’images basé sur les ondelettes implique deux niveaux de décompositions, résultant en deux sous-bandes de fréquences à savoir les hautes et basses fréquences. De ce fait, la **DWT** définit alors intrinsèquement la **priorité** des données encodées, puisque l’image est décomposée en plusieurs sous-bandes. Ainsi, la transmission fiable est réalisée pour les données basse fréquence importantes afin de réduire la consommation de l’énergie. Le mécanisme de fiabilité au niveau de la transmission repose sur la considération de l’énergie résiduelle du nœud intermédiaire. En effet, quand celle-ci est en-dessous d’un certain seuil, les paquets de basse priorité sont rejetés. Ainsi, la durée de vie du réseau est prolongée tout en préservant la qualité visuelle des images reçues.

Une approche inter-couches pour la transmission de l’image, moyennant un routage avec différenciation de service, est présentée récemment par Felemban *et al.* (2014). Au niveau de la couche application, les **priorités** sont attribuées aux données en utilisant une séparation sur les plans binaires. En fait, les auteurs remarquent que dans une image à niveaux de gris, les trois plans de bits les plus forts contiennent la majorité des informations visuelles, alors que les cinq autres ne contribuent pas d’une manière significative en termes d’information visuelle (voir figure 2.3). Par conséquent, les trois plans supérieurs (bits 8-6) sont encapsulés dans des paquets de haute priorité, tandis que les cinq autres (bits 5-1) sont acheminés vers la destination avec une faible priorité. Par la suite, la solution est implémentée sur le système Contiki (Dunkels *et al.*, 2004) et ainsi les couches MAC et réseau sont celles de la pile de communication Rime (Dunkels *et al.*, 2007), avec quelques modifications. Pour le routage, Felemban *et al.* (2014) choisissent comme prochain saut le voisin dont le nombre de sauts vers la destination est le moindre. Dans la couche MAC, une procédure de gestion de paquets est proposée, de sorte que les paquets de haute priorité soient transmis avant les paquets à faible priorité.

Les performances de cette solution en termes de délai, de fiabilité et de qualité visuelle sont reportées dans la figure 2.4, quand trois nœuds source émettent simultanément. Cependant, le choix du prochain saut selon une métrique à une seule dimension (*i.e.* nombre de sauts),

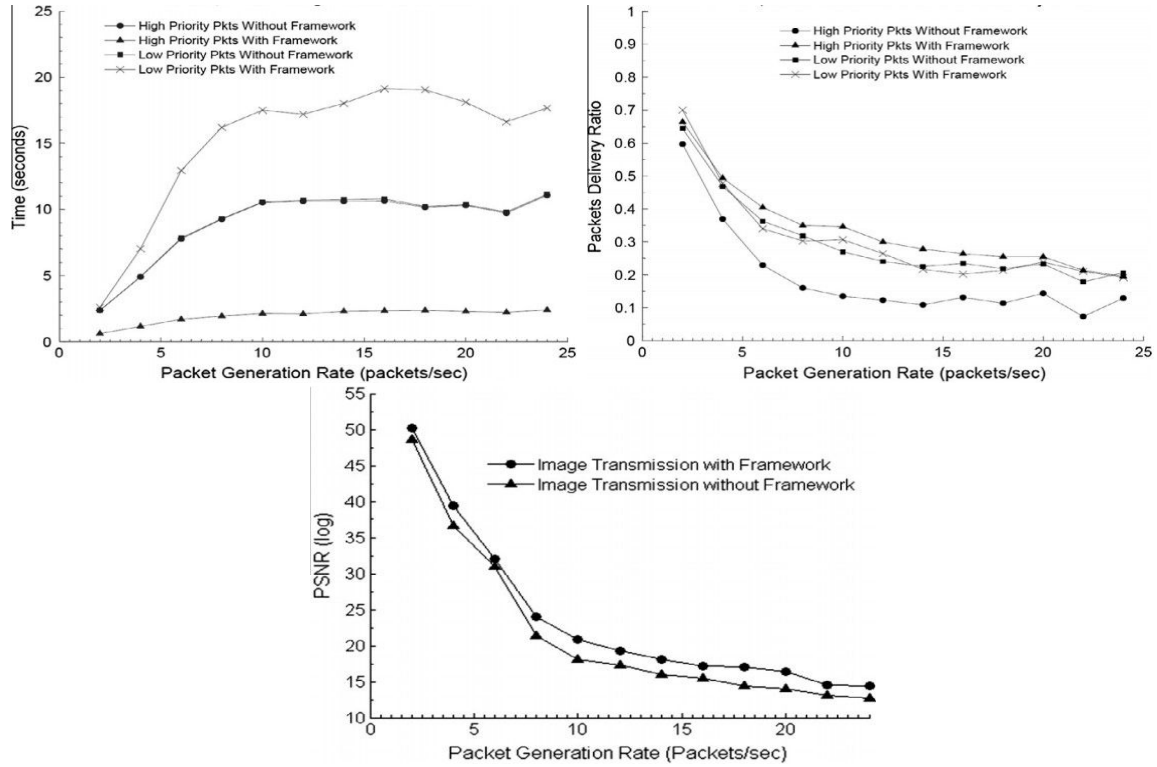


Figure 2.4 – Résultats de l’approche proposée par Felemban *et al.* (2014) en termes de délai (à gauche), de fiabilité (à droite) et de qualité visuelle (au-dessous)

sans mécanismes d’équilibrage de charge, concentrera certainement la charge sur des nœuds spécifiques et conduira à leur mort rapide. En outre, aucune évaluation de la consommation d’énergie de la solution n’est présentée.

Le travail de Yu *et al.* (2004) vise à réduire d’une manière adaptative l’énergie consommée pendant le traitement et la transmission d’images dans les RCISF. L’économie d’énergie est obtenue par la compression d’images sous la norme **JPEG2000** (Christopoulos *et al.*, 2000), selon la qualité requise. Le **JPEG2000** est en effet basé sur la DWT et présente un taux de compression assez important ainsi qu’une forte résilience aux erreurs. En utilisant les informations sur les contraintes de distorsion de bout-en-bout, ainsi que les conditions du canal estimées, la solution peut déterminer d’une manière adaptative le nombre de niveaux encodés à transmettre. En d’autres termes, les auteurs proposent d’ajuster le débit source, le niveau de résilience aux erreurs source ainsi que la puissance d’émission.

Mammeri *et al.* (2008a) proposent une solution inter-couches qui agit au niveau de la couche application, transport et MAC. En effet, ce travail vient comme suite à leur précédent travail (Mammeri *et al.*, 2008b) dans lequel **une étude et une modélisation de l’énergie** dissipée au niveau de chaque bloc de la compression **JPEG** sont proposées, en fonction du nombre de coefficients de la transformée en cosinus discrète « Discrete Cosine Transform » (DCT). En suite, pour réduire l’énergie consommée durant le traitement, les auteurs proposent qu’après la **DCT** seul un nombre réduit de coefficients de la partie haute-gauche de chaque bloc de 8x8 soit traité. Ceci donna naissance au Triangular JPEG (T-JPEG), où le triangle a une longueur ρ comme illustré par la figure 2.5. Ainsi, Mammeri *et al.* (2008a) proposent deux solutions pour remédier au conflit entre la réduction de l’énergie consommée durant la compression T-JPEG et la dégradation de la qualité de l’image en diminuant le nombre de coefficients retenus après la **DCT**. En effet, une méthode globale est proposée pour trouver la valeur optimale de ρ , notée ρ_0 , pour une meilleure qualité tout en consommant le moins d’énergie. Cette méthode s’appuie

$\rho = 4$

DC	AC1	AC5	AC6				
AC2	AC4	AC7					
AC3	AC8						
AC9							

Figure 2.5 – Schématisation de la sélection des coefficients AC avec $\rho = 4$ (Mammeri *et al.*, 2008b)

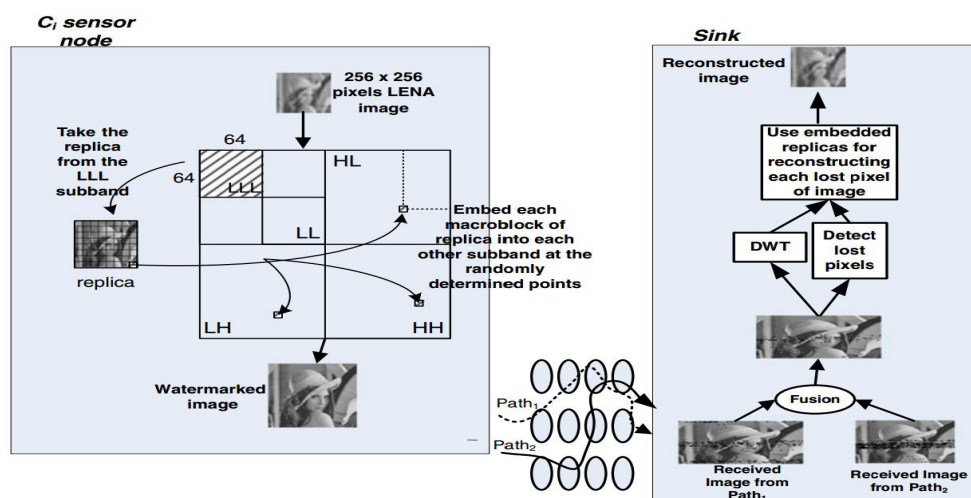


Figure 2.6 – Schématisation du tatouage et la dissimulation des erreurs avec routage multi-chemins adoptés (Boluk *et al.*, 2011c)

sur le modèle mathématique regroupant l'énergie consommée ainsi que la qualité de l'image en fonction de ρ . En suite, pour la méthode locale, l'image est subdivisée en ROI et BKGD. La ROI est considérée comme une image à part entière sur laquelle l'approche globale sera exécutée, afin de trouver le ρ_0 . En revanche, pour le BKGD, un ρ inférieur est choisi pour une meilleure efficacité énergétique et aussi justifié par le fait qu'une moindre qualité est tolérée pour cette région. De plus, les auteurs proposent un schéma semi-fiable pour la protection des images et assurer la possibilité de reconstruire à la réception. Ainsi, ils commencent par attribuer une **priorité** supérieure à la ROI de l'image et une moindre au BKGD. A la réception, seul le trafic prioritaire est sujet à vérification et demande retransmission si nécessaire.

La transmission des images dans les RCSF avec robustesse est abordée par Boluk *et al.* (2011c). En effet, les auteurs comparent plusieurs schémas de traitement et de transmission de l'image afin de faire face aux pertes et aux erreurs. Les solutions considérées sont le **tatouage numérique** à base de transformée en ondelettes, pour intégrer une réplique de l'image originale de taille très réduite et faire de la dissimulation des erreurs à la réception (voir figure 2.6), ainsi que le code correcteur de Reed-Solomon (**RS**). Au niveau du routage, les auteurs comparent entre plusieurs schémas de transmission, à savoir celui à chemin unique, à **multi-chemins** disjoints et à multi-chemins avec croisement. Par ailleurs, pour une comparaison fiable, ils proposent des **modèles de consommation d'énergie**, au niveau des nœuds sources, des deux schémas de

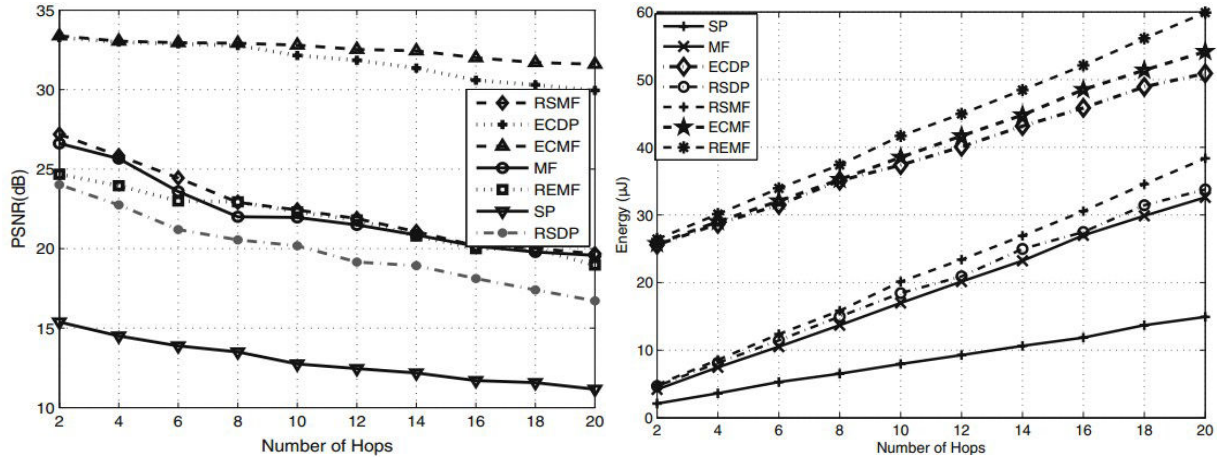


Figure 2.7 – Qualité obtenue (à gauche) et énergie consommée par pixel (à droite) pour les différents schémas étudiés (Boluk *et al.*, 2011c)

protection des flux de données. Les modèles sont en effets établis en décomposant chaque opération en opération élémentaires (*i.e.* addition, multiplication, décalage etc...), puis en multipliant l'énergie consommée par chaque opération par le nombre de répétitions.

Les auteurs concluent, d'après les résultats des simulations présentés dans la figure 2.7, que le schéma utilisant le tatouage numérique combiné au routage **multi-chemins** avec croisement (*i.e.* ECMF dans la figure 2.7) présente un très bon compromis qualité-énergie, par rapport aux autres schémas étudiés.

2.3.2 Solutions inter-couches dans le cas de la vidéo

Politis *et al.* (2008) proposent une approche inter-couches impliquant les couches application et routage. Au niveau de la couche application, les auteurs adoptent le standard **H.264/AVC** pour la compression du flux vidéo capturé au niveau du nœud source. Afin de compenser l'énergie consommée au cours de la phase de compression, le protocole de clustering LEACH (Heinzelman *et al.*, 2000) est utilisé. Ensuite, les auteurs introduisent une modification à ce protocole afin de fournir de multiples chemins reliant la source à la destination, en permettant les communications entre les chefs des clusters du réseau. En outre, ils proposent deux algorithmes d'ordonnancement de paquets qui les rejettent d'une manière sélective. Le premier algorithme dit « Baseline » qui choisi les paquets à rejeter avant la transmission sur la base de leur impact sur la qualité de la vidéo. Le second algorithme, dit « Power aware » rejette les paquets selon le budget énergétique résiduel des nœuds tout en faisant attention à la dégradation de la qualité survenue suite au rejet de ce paquet. En effet, ces algorithmes utilisent un **modèle de prédiction de distorsion** récursif, permettent de prédire la distorsion de la vidéo engendrée par le rejet des paquets. Les résultats présentés comparant ces deux algorithmes en termes de qualité visuelle et de consommation d'énergie sont rapportés dans la figure 2.8. Sur cette figure, un cycle représente l'encodage puis la transmission de la séquence vidéo. Cependant, Politis *et al.* (2008) ne considèrent pas l'énergie consommée pendant la phase de compression dans leur bilan énergétique, surtout que la prédiction en inter est utilisée.

Shu *et al.* (2010a) présentent une approche inter-couches pour la collecte des données dans les RCMSF. Un système adaptatif est utilisé pour ajuster dynamiquement le rayon de communication ainsi que le taux de génération des données. La solution proposée commence par minimiser le délai de transmission de bout-en-bout en adoptant un taux de génération de données minimal. Ensuite, le rayon d'une transmission optimale est calculé au niveau de la couche

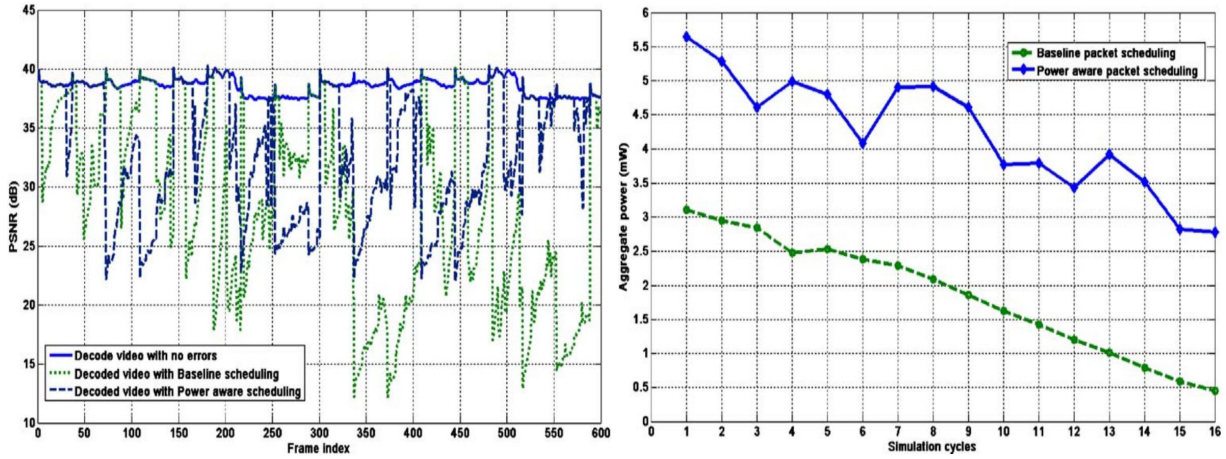


Figure 2.8 – Performances de l'approche proposée par Politis *et al.* (2008) en termes de qualité (à gauche) et de consommation d'énergie (à droite)

physique. Puis, en utilisant ce rayon de transmission, le taux de génération des données peut être ajusté pour augmenter la quantité des données recueillies. Par la suite, la construction de plusieurs chemins vers la destination est achevée par le protocole TPGF proposé par Shu *et al.* (2010b). La sélection des chemins appropriés à partir des chemins ainsi obtenus est effectuée au niveau de la couche de transport, de manière à maximiser le nombre de chemins tout en respectant les délais requis. Néanmoins, les auteurs ne proposent pas de modèles relatifs aux énergies consommées pour le traitement des images ni pour la transmission.

Aghdasi *et al.* (2008) présentent une architecture efficace en énergie pour la transmission de la vidéo, en vue d'étendre la durée de vie du réseau tout en préservant la qualité de la vidéo. Cette approche inter-couches opère sur trois niveaux à savoir les couches application, transport et réseau. Les auteurs introduisent d'abord le paradigme de la **priorité** en générant à la couche application deux classes de trames, grâce à leur encodeur « Modified-MPEG » (M-MPEG) basé sur **MPEG-2**. En effet, cet encodeur fournit en sortie deux types de trames vidéo, à savoir la « Main-Frame » (M-Frame) et la « Difference-Frame » (D-Frame). La M-Frame est obtenue en utilisant une version étendue de JPEG qui comprend une étape d'attribution de priorités aux blocs de l'image. Le D-Frame est le résultat de la soustraction de la M-Frame ainsi obtenue de la frame courante. Ainsi, l'idée principale de ce travail est de créer des trames pertinentes qui devraient être transmises par des schémas fiables, alors que les flux moins pertinents seraient transmis par des schémas semi-fiables. Au niveau de la couche transport, un protocole à base de messages de commandes inter-couches est proposé pour suivre l'état du réseau. En outre, ce protocole ne retransmet pas les paquets, afin de réaliser une transmission vidéo en temps réel. Quant à la couche réseau, les auteurs proposent un protocole de routage à chemin unique, basé sur la négociation saut-par-saut. Par ailleurs, deux algorithmes probabilistes de rejet des paquets sont proposés. Dans le premier, les paquets sont rejetés suivant une fonction de probabilité tenant compte de l'énergie résiduelle normalisée des nœuds intermédiaires. Dans le second, une probabilité de rejet est affectée aux paquets de faible priorité avant la transmission. Les auteurs comparent leur approche avec une solution dite « Mixed-Architecture » composée du l'encodeur MPEG-2 au niveau de la couche application, du protocole MRTP Aghdasi *et al.* (2008) au niveau de la couche transport et du protocole MMSPEED Felemban *et al.* (2006) au niveau de la couche réseau. Les résultats de la comparaison, rapportés par la figure 2.9, montrent la supériorité de la solution proposée en termes de qualité visuelle et de consommation d'énergie. Cependant, les auteurs ne considèrent pas l'énergie consommée durant la compression vidéo. Aussi, interdire simultanément les retransmissions et le routage **multi-chemins** peut avoir un impact très négatif

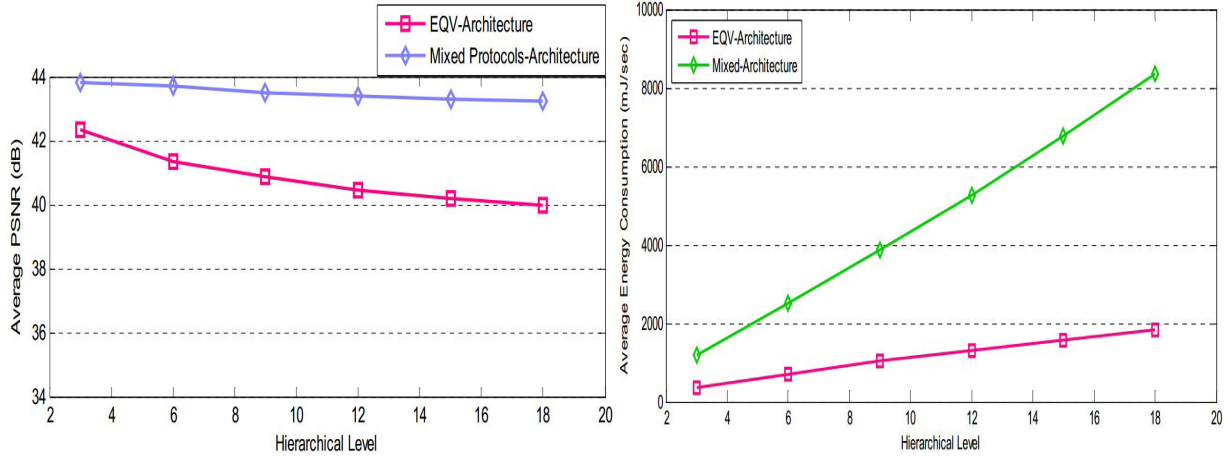


Figure 2.9 – Performances de l’approche proposée par (Aghdasi *et al.*, 2008) en termes de qualité (à gauche) et de consommation d’énergie (à droite) comparée à l’approche dite « Mixed-Architecture »

sur les performances en fiabilité, en particulier dans le contexte des RCVSF où plusieurs nœuds sont amenés à envoyer de l’information simultanément.

Chen *et al.* (2008) proposent une approche inter-couches impliquant les couches application et réseau. La norme d’encodage vidéo **H.26L** (équivalent à H.264/AVC) est utilisée dans un schéma adaptatif selon l’état du réseau. En fait, si un nœud intermédiaire estime, lors de la réception d’un paquet, que le délai nécessaire ne peut être respecté, alors ce paquet est rejeté. Ensuite, ce nœud envoie un paquet au nœud source pour l’amener à ajuster le débit d’encodage. Pour faire face à cette perte, le nœud source utilise multiples trames de référence et force, dans le pire des cas, l’encodage en intra pour préserver les trames suivantes de la propagation de cette erreur. Au niveau de la couche réseau, un routage **multi-chemins** avec un algorithme de sélection de chemins est adopté. En effet, le protocole de routage « Directional Geographical Routing » (Chen *et al.*, 2007) crée plusieurs chemins à nœuds disjoints vers la destination en fonction de l’énergie, du délai et de la bande passante disponible. Ensuite, l’algorithme de sélection de chemins divise le flux vidéo sur plusieurs chemins, jusqu’à ce que la largeur de la bande requise soit atteinte. De plus, cet algorithme tente d’introduire un équilibrage de charge sur le réseau. Dans cette approche (Chen *et al.*, 2008), les auteurs tiennent compte de la consommation d’énergie et de la distorsion causées par la transmission, mais ils négligent celles causées par l’encodage vidéo.

Shah *et al.* (2012) proposent un schéma inter-couches qui agit au niveau des couches application, réseau et MAC. Dans la couche application, le **codage vidéo distribué** basé sur les résultats théoriques de **Wyner et Ziv (1976)** est utilisé. L’idée est de transmettre simultanément des trames encodées en intra avec des trames d’information associées. Les trames encodées en intra sont générées en utilisant une technique à base de **DCT**. Les trames d’information sont destinées à être traitées au niveau du décodeur, qui exploite la corrélation temporelle entre les trames. Ensuite, les trames ainsi créées sont acheminées en utilisant un protocole de routage **multi-chemins**, qui détermine trois chemins possibles dirigés vers la destination. Ce protocole prend en considération à la fois le déplacement et l’énergie résiduelle du prochain saut. La différenciation de service est gérée par la couche MAC, où le standard **IEEE 802.11e** est adopté. En effet, les paquets contenant les données des trames intra ont la plus haute **priorité**, tandis que ceux contenant les données d’informations sont traités avec une faible priorité. Shah *et al.* (2012) utilisent aussi des **modèles pour prédire la distorsion**, causée par l’encodage et la perte de paquets, relatifs à l’encodeur de Wyner-Ziv. Les performances de l’approche proposée

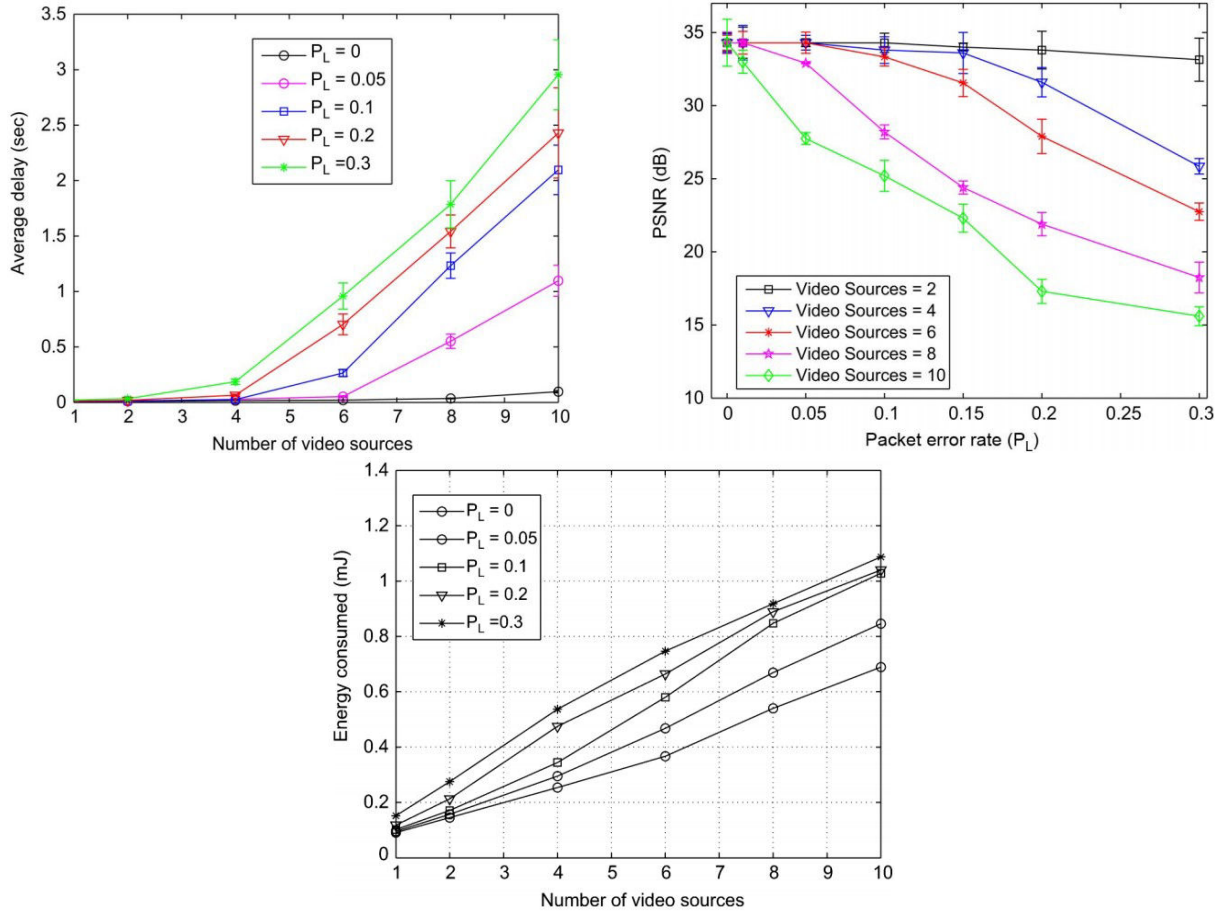


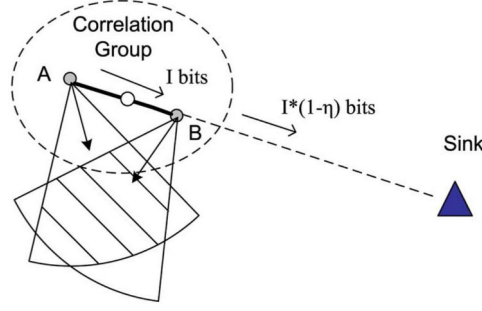
Figure 2.10 – Performance de l’approche proposée par Shah *et al.* (2012) en termes de délai (à gauche), de qualité visuelle (à droite) et de consommation d’énergie (au-dessous)

sont rapportées par la figure 2.10. Néanmoins, les auteurs ne considèrent pas la consommation d’énergie due à l’encodage vidéo.

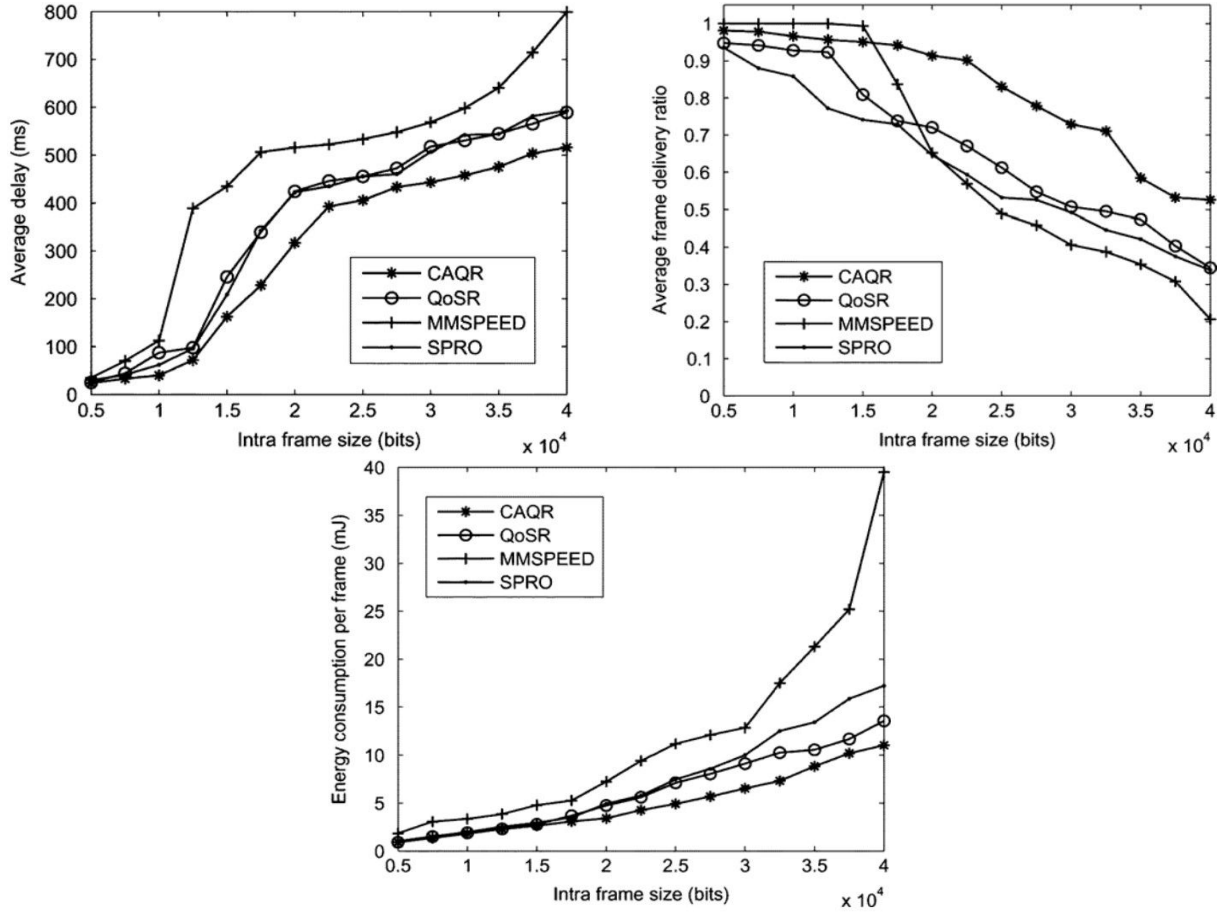
L’extension de la durée de vie du réseau sous la contrainte de la qualité vidéo est aussi traitée par He *et al.* (2009) et Zou *et al.* (2011). He *et al.* (2009) présentent un algorithme distribué pour maximiser la durée de vie du réseau en optimisant conjointement le débit source, l’énergie d’encodage vidéo et le routage. En effet, ils considèrent les énergies consommées ainsi que les distorsions des phases de transmission et d’encodage vidéo dans la formulation du problème d’optimisation. Zou *et al.* (2011) proposent une approche pour l’adaptation des débits source et canal, où les consommations en énergie du contrôle d’erreurs, de la communication de données, ainsi que celles de l’encodage source et réseau sont considérées. A cet effet, **des modèles de prédiction d’énergie** durant toutes ces phases sont proposés. Par la suite, un problème d’optimisation convexe pondéré est formulé, puis décomposé en une procédure d’optimisation à deux niveaux. Le premier réalise une optimisation du débit source, alors que le second effectue une allocation de ressources du réseau. La dualité de Lagrange est également utilisée pour résoudre ce problème.

Ces deux travaux adoptent particulièrement le modèle puissance-débit-distorsion proposé par He et Wu (2006), afin d’estimer l’énergie consommée durant la phase de l’encodage vidéo. Le modèle est donné par :

$$D(R, P) = \sigma^2 e^{-\gamma \cdot R \cdot g(P)}, P \in [0, 1], R \geq 0 \quad (2.3)$$

Figure 2.11 – Illustration du codage différentiel proposé dans (Rui *et al.*, 2012)

Où R est le débit source, P est la puissance consommée par l'encodage vidéo, σ^2 est la variance moyenne en entrée et γ est un paramètre du modèle relatif à l'efficacité de l'encodage. La fonction $g(\cdot)$ est la fonction inverse du modèle de consommation d'énergie du microprocesseur considéré.

Figure 2.12 – Performance de l'approche CAQR proposée par Rui *et al.* (2012)

La corrélation spatiale de l'information visuelle, extraite à partir de différents capteurs vidéo distribués, entraîne une considérable redondance des données dans les RCVSF. De ce fait, l'**encodage multivues** peut être considéré comme une bonne solution pour réduire d'avantage les données à transmettre. Dans ce sens, Rui *et al.* (2012) proposent une approche interconnectant les couches application et réseau. Pour réduire la taille du trafic généré, les auteurs

adoptent le **codage différentiel** entre les trames encodées en intra, provenant des nœuds dont les champs de vision se chevauchent (voir figure 2.11). A cet effet, ils proposent un modèle pour estimer l'efficacité du codage différentiel, basé sur les entropies des sources vidéo. Au niveau de la couche réseau, les auteurs introduisent un protocole de routage inspiré du protocole **MM-SPEED** (Felemban *et al.*, 2006), qui opère sous contraintes de délai et de fiabilité. En utilisant la corrélation des capteurs vidéo, ce protocole réalise un service efficace en énergie tout en satisfaisant des contraintes de qualité de service. Par ailleurs, les auteurs proposent de modéliser et attribuer dynamiquement la contrainte de fiabilité pour chaque paquet, de manière à ce que la trame constituée par ces paquets demeure décodable. Les performances du protocole de routage proposé, noté CAQR, comparées à d'autres protocoles de routage tels MMSPEED, en termes de délai, fiabilité et consommation d'énergie sont rapportées par la figure 2.12. Les résultats des simulations montrent que l'approche proposée parvient à réaliser des améliorations moyennes de 48% en termes de consommation d'énergie, 17% en termes de fiabilité (*i.e.* PDR) et 34% en termes de délai relativement au protocole MMSPEED.

Dans un contexte de transmission vidéo sur des réseaux sujets aux erreurs et aux pertes, tels les RCVSF, le codage à descriptions multiples « Multiple description coding » (MDC) apparaît comme une solution intéressante. L'idée principale est de réduire le délai de bout-en-bout et d'accroître la résilience aux erreurs par l'exploitation des chemins multiples. En effet, le **MDC** fragmente un flux vidéo en deux ou plusieurs sous-flux (ou descriptions), qui peuvent traverser le réseau dans différents paquets via des chemins distincts. Chaque description fournit une version acceptable et de faible qualité du flux d'origine. La qualité est améliorée au fur et à mesure que le nombre de descriptions reçues augmente. Li *et al.* (2010) s'appuient sur le **MDC** au niveau de la couche application pour une transmission du flux vidéo en deux descriptions. Au niveau de la couche réseau, les auteurs proposent un protocole de routage basé sur la diffusion dirigée (Intanagonwiwat *et al.*, 2003) et qui renforce les chemins de bonne qualité et à petits délais. En effet, ils utilisent une métrique hybride qui considère l'énergie, la qualité du lien ainsi que le délai.

2.4 Synthèse sur les techniques employées en vue d'approches inter-couches performantes

D'après l'étude bibliographique faite à partir des principaux travaux cités ci-dessus, nous pouvons constater que les travaux de recherche proposant des approches inter-couches s'accordent sur plusieurs aspects. Nous remarquons particulièrement que la plupart des travaux impliquent les couches application et réseau/MAC. Ainsi, nous présentons dans ce qui suit une synthèse en deux volets : encodage puis routage.

2.4.1 Synthèse sur les schémas d'encodage

Nous constatons que les travaux qui choisissent d'intégrer la couche application, adoptent des schémas de compressions originaux ou bien se basent sur des standards avec quelques adaptations. Aussi, nous remarquons que la plupart de ces travaux développent des solutions pour réduire la consommation d'énergie au niveau de l'encodage. Par ailleurs, pour davantage d'efficacité énergétique, les auteurs proposent des schémas d'encodage adoptant la priorité entre les différents composants du flux visuel avec des débits sources adaptatifs.

Un autre constat est qu'en vue de proposer des schémas de plus en plus efficaces, les auteurs essaient de concevoir des modèles de prédiction de consommation d'énergie et de distorsion pour les phases d'encodage et de transmission. Certains travaux préfèrent se baser sur des modèles de la littérature, comme celui proposé par He et Wu (2006). Alors que d'autres, vue la particularité de leur approche ou de la quantité à modéliser (*i.e.* énergie d'encodage), développent leur propre

modèle mieux adapté. A cet effet, d'après la littérature, il existe différentes approches pour recueillir des mesures de l'énergie dissipée durant l'encodage en vue d'une modélisation :

- Une première approche consiste à mesurer la puissance directement ou par l'intermédiaire d'activités du circuit, telles les capacités efficaces ou les courants moyens. Cette approche est utilisée par exemple par Ullah *et al.* (2011), qui se sont particulièrement intéressés au compromis énergie traitement/communication pour les encodeurs MPEG-4(Part2) et H.264/AVC. Ces derniers ont été déployés sur de vrais nœuds capteurs Imote2 dans des réseaux à un saut et à multi-sauts de la station de base.
- Une deuxième approche repose sur l'analyse méticuleuse de l'énergie instruction par instruction. Cette approche est communément appelée « Instruction Level Power Profiling » (ILPP) (Mehta *et al.*, 1996) et est utilisée par exemple par Lecuire *et al.* (2007). Cette méthode se base sur le fait que tout code exécuté provoque la commutation de transistors, et donc de la consommation dynamique de puissance. Puisqu'un programme est une série d'instructions, il suffit de connaître la consommation de chaque instruction pour estimer la consommation en énergie du code. Il est bien sûr nécessaire d'additionner l'énergie dissipée par l'interaction entre les instructions successives, les interruptions et l'interaction du processeur avec l'environnement extérieur.
- Une troisième approche, à un niveau d'abstraction plus élevé, repose sur l'estimation de la charge du microprocesseur en exécutant le schéma d'encodage. Cette méthode adoptée par plusieurs travaux (Rui *et al.*, 2012; He et Wu, 2006; Sarif *et al.*, 2013), permet moyennant une transformation donnée de passer à la dimension de l'énergie. Nous opterons pour cette solution qui sera détaillée dans le chapitre 5.

2.4.2 Synthèse sur les schémas de routage

En ce qui concerne le routage, nous remarquons que la plupart des travaux proposés adoptent un schéma de transmission/routage à multi-chemins (Boluk *et al.*, 2011b; Shah *et al.*, 2012; Politis *et al.*, 2008). L'utilisation du multi-chemins est très importante pour des raisons d'équilibrage de charge et de fiabilité. Cette technique peut être réalisée soit via l'envoi du même paquet sur plusieurs chemins pour augmenter sa probabilité de réception, soit par l'envoi de descriptions via des chemins différents quand la MDC est utilisée, ou encore par l'envoi de différentes données sur différents chemins en parallèle pour des raisons de bande passante.

Une autre recommandation à retenir est l'adoption de la différenciation de service entre les différents paquets (Irgan *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2008; Felemban *et al.*, 2014; Aghdasi *et al.*, 2008). En effet, ceci permet de réduire la complexité des solutions proposées, pour atteindre les performances requises tout en fournissant une bonne qualité d'expérience à l'utilisateur. En outre, l'introduction de la priorité permet d'adopter des schémas de protections de données inégales.

Plusieurs protocoles de routage ont été utilisés ou proposés. Ces protocoles se sont basés pour le choix du prochain saut sur plusieurs critères tels le délai, la fiabilité, l'énergie résiduelle, le nombre de sauts depuis la destination, et autres. Par ailleurs, nous remarquons qu'un protocole de routage particulier nommé MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006) se montre très prometteur, et est repris dans plusieurs travaux comme étant très adapté pour le support du flux image et vidéo (Soro et Heinzelman, 2009; Costa et Guedes, 2011; Yap et Yen, 2014). Ce protocole a inspiré de nombreux travaux et est toujours en étude en vue de plus d'améliorations (Macit *et al.*, 2014; Sahin *et al.*, 2014).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue différentes approches inter-couches dédiées aux RCVISF. En analysant ces approches, nous avons identifié différentes solutions pour l'optimisation inter-couches dans les RCVSF ainsi que dans les RCISF. La synthèse réalisée suite à cette étude nous permet de voir les directives à suivre afin de proposer des solutions inter-couches efficaces, qui tiennent comptes des spécificités de ces réseaux et répondent à leurs exigences. Toutefois, il est difficile de comparer les différentes approches en termes de performances vu que l'environnement d'évaluation ainsi que ses paramétrages varient grandement d'une approche à une autre (*i.e.* énergie initiale des nœuds, densité du réseau, nombre des nœuds source simultanément, bande passante, évaluation sur MATLAB ou simulateur ou testbed, énergies considérées dans le bilan énergétique, performances évaluées, ...). Ainsi, nous rapportons dans les tableaux 2.1 et 2.2 une synthèse sur les différentes approches inter-couches présentées dans la section 2.3 avec, à titre indicatif, les résultats obtenus afin de fournir une idée sur les grandeurs.

Dans les chapitres de la partie Partie II, nous construisons pas à pas une première approche inter-couches en vue du support du flux vidéo dans les RCVSF, sur la base des différents éléments recueillis à partir de notre étude bibliographique.

Tableau 2.1 – Tableau synthétisant quelques approches inter-couches dans le cas des images fixes avec, à titre indicatif, les résultats obtenus

Approche	Couches impliquées	Type du flux	Compression	Quantités évaluées	Observations	Résultats (en moyenne)
Boluk <i>et al.</i> (2011b)	Application + Réseau + MAC	Image (256x256)	Non	Qualité visuelle, énergie (transmission) et délai	Séparation en ROI et BKGD, routage efficace en énergie, différenciation de service, modèle de distorsion (transmission)	Evaluations considérant entre 1 et 12 nœuds source image : Qualité : 28 à 18 dB, Délai : 0.1 à 0.25 s, Energie : 1.5 à 3.5 J/Image
Boluk <i>et al.</i> (2011c)	Application + réseau + physique	Image (256x256)	Non	Qualité visuelle, énergie (transmission+traitement)	Dissimulation de l'erreur par tatouage numérique, codes correcteurs de Reed-Solomon, transmission sur chemins multiples avec et sans croisement, modèle de consommation d'énergie (transmission+traitement)	Evaluation considérant un nœud source : Qualité : 34 dB, Energie : 2.7 J/Image
Felemban <i>et al.</i> (2014)	Application + réseau + MAC	Image	Non	Qualité visuelle, délai et fiabilité (PDR)	Séparation en plans binaires prioritaires et non-prioritaires, différenciation de service, routage selon la distance du sink, considération de la taille de la file d'attente	Evaluation considérant entre 1 et 3 nœuds source image : Qualité : 32 dB (un seul nœud source) PDR : 0.95 à 0.4, Délai : 1 à 6s.
Mammeri <i>et al.</i> (2008a)	Application + transport+ MAC	Image (256x256)	T-JPEG	Qualité visuelle et énergie (transmission+compression)	Séparation ROI et BKGD, différenciation de service, transmission fiable et semi-fiable, modèle de consommation d'énergie (transmission+compression)	Evaluation considérant un nœud source image : Qualité : 28 dB, Energie : 4.2 J/Image
Lecuire <i>et al.</i> (2007)	Application + transport	Image	non	Qualité visuelle et énergie (transmission+compression)	Décomposition en ondelettes, transmission fiable et semi-fiable, modèle de consommation d'énergie (transmission+compression)	Evaluation considérant un nœud source image : Qualité : 32 dB, Energie : 3 J/Image

Tableau 2.2 – Tableau synthétisant quelques approches inter-couches dans le cas de la vidéo avec, à titre indicatif, les résultats obtenus

Approche	Couches impliquées	Type du flux	Compression	Quantités évaluées	Observations	Résultats (en moyenne)
Politis <i>et al.</i> (2008)	Application + réseau	vidéo (QCIF, @30fps)	H.264/AVC	Qualité visuelle et énergie (transmission)	Modèle de consommation d'énergie de transmission, modèle de distorsion de transmission, schémas de rejets de paquets sélectifs	Evaluation considérant un nœud source vidéo : Qualité : 25 dB, Energie : 46 mJ/Image
Aghdasi <i>et al.</i> (2008)	Application + transport + réseau	vidéo (QVGA)	Modified MPEG	Qualité visuelle et énergie (transmission)	Différentiation de service, schéma de rejets de paquets sélectifs, routage selon l'énergie résiduelle et la distance	Evaluation considérant un nœud source vidéo : Qualité : 40 dB, Energie : 33 mJ/Image
Chen <i>et al.</i> (2008)	Application + réseau	vidéo (QCIF, @20fps)	H.26L	Qualité visuelle	Schéma de communication adaptatif, routage sur chemins multiples selon le délai et l'énergie et la bande passante disponible, paquets FEC	Evaluation considérant un nœud source vidéo : Qualité : 29 dB
Shah <i>et al.</i> (2012)	Application + réseau + MAC	vidéo	Wyner-Ziv	Qualité visuelle, Délai, énergie	Codage distribué, modèles de distorsion de codage et transmission vidéo, énergie (transmission), routage sur chemins multiples selon la position et l'énergie résiduelle, différenciation de service	Evaluation considérant 2 à 10 nœuds source vidéo : Qualité : 34 à 22 dB, Délai : 0.1 à 1.7 s, Energie : 0.1 à 1 mJ/Image
Rui <i>et al.</i> (2012)	Application + réseau	vidéo (QCIF, @30fps)	H.264/MVC	Délai, fiabilité (PDR), énergie (compression+transmission)	Codage différentiel, routage selon l'énergie et le délai et la fiabilité, fiabilité adaptative, énergie (compression+transmission)	Evaluation en considérant 10 nœuds source vidéo : Délai : 0.5 s, Energie : 7 mJ/Image, PDR : 0.75
Zou <i>et al.</i> (2011)	Application + réseau + physique	vidéo	MPEG-4	Qualité visuelle et durée de vie	Schéma adaptatif, Modèles de distorsions (compression+transmission), modèles de consommation d'énergie (compression+transmission+contrôle d'erreurs), routage à chemins multiples	Evaluation en considérant 10, 20 et 30 nœuds source vidéo : Qualité (MSE) : 100, 320 et 700, Durée de vie : X , $X \cdot \frac{2}{3}$, $X \cdot \frac{1}{2}$

Partie II

*Vers une première approche
inter-couches efficace en énergie
pour le support de la vidéo dans les
RCVSF*

IMPACT DE LA CONSIDÉRATION DE L'ESPACE DISPONIBLE DANS LA FILE D'ATTENTE SUR LES PROTOCOLES DE ROUTAGE DÉDIÉS AUX RCSF

Sommaire

3.1	Introduction	51
3.2	Aperçu sur les protocoles SPEED et MMSPEED	52
3.2.1	Protocole SPEED	52
3.2.2	Protocole MMSPEED	53
3.3	Schéma original de routage proposé	54
3.3.1	Terminologie et formulation du problème	54
3.3.2	Fonction d'attribution des poids	55
3.3.3	Adaptation des protocoles SPEED et MMSPEED à la nouvelle métrique	56
3.4	Simulations et discussion des résultats	57
3.4.1	Évaluation des protocoles SPEED et MMSPEED	58
3.4.2	Évaluation des protocoles proposés	59
3.5	Conclusion	62

3.1 Introduction

Nombreux sont les protocoles de routage qui ont été proposés (*cf.* chapitre 2), en tenant compte des spécificités des RCSF, pour permettre la réalisation de nombreuses applications. Cependant, la gestion de la file d'attente des nœuds demeure l'un des points les moins étudiés. Ainsi, dans ce chapitre, nous présentons une analyse de l'impact de la considération de l'espace disponible dans la file d'attente des nœuds voisins sur la qualité de service des protocoles de routage orientés qualité de service et dédiés aux RCSFs. Les protocoles sujets à cette étude sont SPEED (He *et al.*, 2005a) et son extension Multi-path Multi-SPEED (MMSPEED) (Felemban *et al.*, 2006).

Le choix de ces deux protocoles de routage comme cas d'étude est motivé par leurs caractéristiques relatives au support d'une seule classe de trafic pour SPEED et plusieurs classes de trafic pour MMSPEED. Ce point est important pour notre analyse car il nous permet d'étudier l'approche dans le cas de protocoles uni-service et multi-services. En effet, le protocole SPEED offre un même routage pour toutes les classes de trafic, par le maintien de la vitesse de progression du paquet désirée, nommée *SetSpeed*, à travers le réseau. D'autre part, le protocole MMSPEED étend SPEED en offrant de multiples types de services aux paquets en fonction de leur classe de trafic.

En outre, plusieurs approches décrites dans le chapitre 2 ont été proposées pour améliorer la qualité de service de SPEED et MMSPEED. Néanmoins, à notre connaissance, aucune d'entre elles n'a abordé le problème de la file d'attente qui est généralement considérée comme infinie (Felemban *et al.*, 2006).

Dans la section 3.2 nous passons en revue les protocoles SPEED et MMSPEED. Par la suite, dans la section 3.3, nous présentons la formulation du problème et nous expliquons la procédure d'intégration de la nouvelle métrique dans ces protocoles. Enfin, nous évaluons l'impact de cette métrique sur les performances des protocoles SPEED et MMSPEED dans la section 3.4.

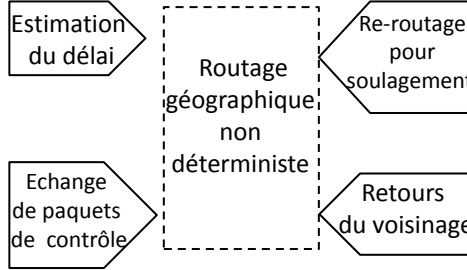


Figure 3.1 – Modules du protocole SPEED

3.2 Aperçu sur les protocoles SPEED et MMSPEED

3.2.1 Protocole SPEED

Pour accomplir ses tâches, SPEED repose sur l'interopérabilité de plusieurs modules comme illustré sur la figure 3.1. Basé sur les informations locales contenues dans la table de voisinage, ainsi que sur la position et l'identifiant (ID) du Sink S , chaque nœud i détermine le prochain saut j grâce au module de routage géographique non déterministe « Non-deterministic Geographic Forwarding » (NGF). Dans ce module majeur, le nœud i débute par établir l'ensemble de nœuds relais « Forwarding Set » (FS) $FS_i(S)$, qui représente un sous-ensemble de l'ensemble des nœuds voisins « Neighbor Set » (NS) NS_i contenant les nœuds j plus proches de la destination S que le nœud i (cf. figure 3.2). Formellement, $FS_i(S) = \{j \in NS_i / dist(i, S) - dist(j, S) > 0\}$, où $dist(i, S)$ et $dist(j, S)$ sont les distances Euclidiennes entre i et S , j et S respectivement. Si $FS_i(S)$ n'est pas vide, le nœud i calcule la vitesse de progression du paquet vers la destination S pour chaque nœud j de $FS_i(S)$ par l'équation suivante :

$$Speed_{ij}(S) = \frac{dist(i, S) - dist(j, S)}{Délai_{ij}} \quad (3.1)$$

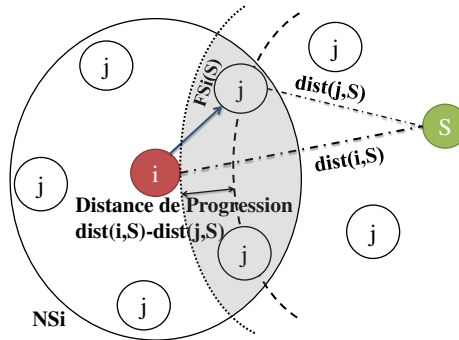


Figure 3.2 – Illustration de NS_i , $FS_i(S)$ et de la distance de progression

Ensuite, le nœud i divise $FS_i(S)$ en deux sous-ensembles. Dans un sous-ensemble nommé $FS_iInf(S)$ (*resp.* $FS_iSup(S)$), le nœud i met les nœuds j ayant $Speed_{ij}(S)$ inférieure (*resp.* supérieure) à $SetSpeed$. Ensuite, pour chaque nœud de $FS_iSup(S)$, la probabilité d'être choisi est calculée selon une loi exponentielle discrète (He *et al.*, 2005a) par l'équation (3.2) :

$$P(x = j) = \frac{Speed_{ij}(S)^r}{\sum_{l=1}^N Speed_{il}(S)^r} \quad (3.2)$$

où N est la taille de $FS_iSup(S)$ et $0 < r < 1$. Une grande valeur de r conduit à un délai de bout-en-bout plus court, tandis qu'une valeur plus petite atteint un meilleur équilibre de charge. Le nœud j avec la plus grande probabilité est le prochain saut.

3.2.2 Protocole MMSPEED

Le protocole Multi-path multi-SPEED (MMSPEED) proposé par Felemban *et al.* (2006) est une extension et amélioration du protocole SPEED (He *et al.*, 2005a). Le protocole MMSPEED introduit en fait la notion de différenciation de service accompagnée d'un schéma de routage à multi-chemins.

Protocole MMSPEED dans le domaine temporel

Dans le domaine temporel, MMSPEED est très similaire à SPEED. La différence réside dans le fait de subdiviser la couche réseau en plusieurs couches virtuelles, avec chacune une seule vitesse de progression du paquet notée $SetSpeed_l$, qui vérifient la relation suivante :

$$SetSpeed_1 < SetSpeed_2 < \dots < SetSpeed_n \quad (3.3)$$

où n représente le nombre des vitesses de progression du paquet permises. En pratique, le nombre de couches est deux.

Pour attribuer à un paquet X la couche adéquate l , le classificateur de paquets du nœud source i calcule $ReqSpeed(X)$, la vitesse requise pour répondre au délai de bout-en-bout souhaité $Deadline(X)$, définie comme suit :

$$ReqSpeed(X) = \frac{dist(i, S)}{Deadline(X)} \quad (3.4)$$

Où $dist(i, S)$ est la distance entre i et la destination S . Ensuite, le classificateur sélectionne à partir de la couche virtuelle 1, la première couche l qui satisfait la condition $SetSpeed_l \geq ReqSpeed(X)$.

Pour sélectionner les prochains sauts, le nœud i utilise le module NGF du protocole SPEED, présenté précédemment dans la sous-section 3.2.1.

Protocole MMSPEED dans le domaine de fiabilité

La contribution majeure du protocole MMSPEED, par rapport au protocole SPEED (He *et al.*, 2005a), réside dans le fait d'ajouter une autre dimension de qualité de service, la fiabilité notamment.

Le protocole MMSPEED offre plusieurs niveaux de fiabilité grâce à un routage multi-chemins. Il se base en fait sur l'hypothèse suivante : « **plus le nombre de chemins vers la destination croît, plus la probabilité que le paquet atteint la destination augmente** » (Felemban *et al.*, 2006).

Pour déterminer le nombre de nœuds, ainsi le nombre de chemins, nécessaires pour garantir le taux moyen de paquets reçus « Packet Delivery Ratio » (PDR) souhaité noté P^{req} , le nœud

i calcule la probabilité d'atteindre la destination « Reaching Probability » (RP). Cette mesure, notée RP_{ij}^S , indique la probabilité que le paquet atteigne S si i relaie le paquet au nœud j , et est exprimée comme suit :

$$RP_{ij}^S = (1 - e_{ij})(1 - e_{ij})^{\lceil \frac{dist(j,S)}{dist(i,j)} \rceil} \quad (3.5)$$

Où e_{ij} est le taux de paquets envoyés à j qui sont finalement perdus. Par la suite, une variable exprimant la probabilité totale d'atteindre le Sink « Total Reaching Probability » (TRP) est initialisée à 0 puis est mise à jour comme suit :

$$TRP_{new} = 1 - (1 - TRP_{old})(1 - RP_{ij}^S) \quad (3.6)$$

En injectant à chaque fois l'ancienne valeur TRP_{old} ainsi qu'un nouveau nœud représenté par son RP_{ij}^S , le TRP_{new} tend vers la fiabilité désirée P^{req} . Enfin, le paquet est envoyé à tous les nœuds qui ont participé à rendre TRP_{new} supérieure ou égale à P^{req} .

Pour garantir la différenciation inter-nœuds, MMSPEED utilise le protocole EDCF (Enhanced Distributed Coordination Function) dans la couche MAC, proposé par la norme IEEE 802.11e (IEEE, 2002). Ce protocole permet la gestion de huit classes de priorités grâce à deux méthodes introduites pour supporter la différenciation de service. La première, est l'utilisation des espaces inter trames (Inter Frame Space, (IFS)) différents pour les différentes classes de trafic. En effet, dans l'EDCF l'idée est d'affecter au paramètre IFS des valeurs minimales quand il s'agit d'un flux prioritaire. Par conséquent, les flux prioritaires auront plus de chance d'accéder au médium que les flux moins prioritaires. La deuxième méthode introduite par le protocole EDCF, comporte l'allocation de différentes tailles de fenêtres de contention (Contention Windows (CW)) pour les différentes catégories. Assigner la plus petite taille de fenêtre au flux le plus prioritaire permet de s'assurer, que les flux de hautes priorités occupent le canal devant ceux de basses priorités. Avec ces nouveaux mécanismes, l'EDCF est supposé améliorer les performances de son prédécesseur Distributed Coordination Function (DCF) dans des conditions de congestions.

3.3 Schéma original de routage proposé

3.3.1 Terminologie et formulation du problème

Dans ce qui suit, nous considérons un réseau homogène représenté par un graphe connexe non-orienté et pondéré $G = (V, E)$, où $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ se réfère à l'ensemble des nœuds dans le réseau (Vertex) et $E = \{e_{12}, e_{13}, \dots, e_{nm}\}$ désigne l'ensemble des liens bidirectionnels entre les nœuds (Arêtes). Étant donné un rayon de communication r , deux nœuds v_i et v_j ($i \neq j$) sont connectés s'ils sont à une distance inférieure ou égale à r . Dans ce cas, $e_{ij} \in E$ et (v_i, v_j) est une paire de nœuds adjacents (voisins). Le poids de chaque arête est donné par une fonction de pondération proposée sur la base de deux paramètres décrits dans la sous-section 3.3.2. La figure 3.3 illustre les notations introduites.

Dans ce travail, nous supposons que les nœuds sont déployés de façon aléatoire sur un plan bidimensionnel. Aussi, le Sink n'est pas mobile et est considéré comme un nœud puissant sans contraintes énergétiques. Nous supposons que les nœuds connaissent leur coordonnées et celles du nœud Sink. Enfin, il est supposé que le canal est symétrique de sorte que l'énergie requise pour transmettre un message de m bits à partir du nœud i au nœud j est égale à l'énergie requise pour transmettre le même message dans le sens inverse, pour un rapport signal à bruit donné.

Dans les applications orientées multimédia le taux de trafic généré est très élevé. De plus, les nœuds fonctionnent comme des relais pendant une grande partie de leur durée de vie. Par conséquent, les nœuds doivent tenir dans une mémoire tampon les paquets entrants pendant tout le temps nécessaire pour traiter les paquets reçus précédemment. Étant donné que la mémoire

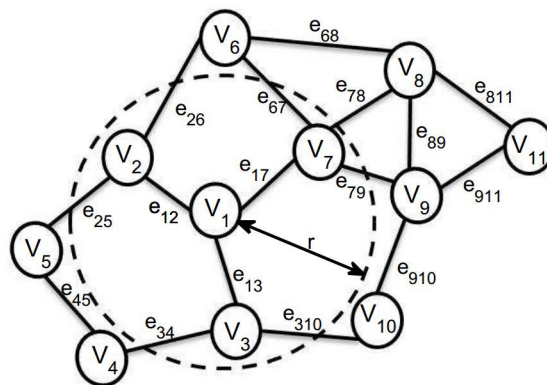


Figure 3.3 – Le modèle du réseau

est limitée dans ces nœuds, mettre en file d'attente une infinité de paquets n'est pas possible. Par conséquent, la taille de l'espace disponible dans la file d'attente doit être pris en compte dans le processus de routage. D'autre part, le temps passé par un paquet dans un nœud comprend le temps d'attente passé dans sa file d'attente. Ainsi, tenir compte de cet espace disponible dans la décision de routage peut réduire le délai subi par le paquet.

Le modèle de file d'attente considéré dans notre approche est une file d'attente avec priorité (voir la figure 3.4) composée de plusieurs files d'attente virtuelles où chacune suit un système de service $M/G/1$ (Adan et Resing, 2002). Ce type de file d'attente est caractérisé par une arrivée selon un processus de Poisson (Kingman, 1993) avec une moyenne de taux d'arrivée des paquets λ et une distribution de temps de service considérée comme exponentielle d'un taux moyen de service μ . La discipline de file d'attente est de type premier arrivé premier servi « First In First Out » (FIFO) où les paquets sont traités en fonction de leur instant d'arrivée : un paquet qui arrive en premier sera traité en premier dès que le processeur est libre. Quand un paquet arrive à un nœud i , et grâce à son champ de type de service, le classificateur du nœud i affecte ce paquet à une file d'attente virtuelle de niveau l approprié à la classe de trafic du paquet.

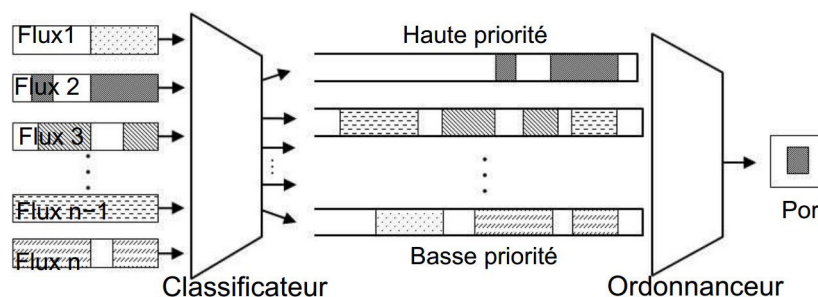


Figure 3.4 – Illustration d'une file d'attente avec priorités

Les paquets avec une priorité plus élevée sont servis en premier, suivis de ceux avec priorité plus basse et ainsi de suite ... selon une discipline FIFO.

3.3.2 Fonction d'attribution des poids

La décision de routage proposée est basée sur deux paramètres : la vitesse de progression du paquet des voisins en plus de leur espace disponible dans la mémoire tampon de file d'attente. Chaque nœud est en continu conscient de la taille de cet espace dans ses voisins grâce aux paquets de contrôle, où l'information sur l'espace disponible dans la file d'attente est maintenant injectée. Lorsque le nœud i a besoin de choisir le prochain saut j , et après avoir calculé $Speed_{ij}(S)$ pour

chaque nœud de $FS_i(S)$, le nœud i attribue un poids à chaque lien e_{ij} avec ses voisins à l'aide de l'équation suivante :

$$e_{ij} = \alpha \times Speed_{ij}(S) + (1 - \alpha) \times ABS^l(j) \quad (3.7)$$

Où α est un coefficient de pondération à fixer et ABS^l est l'information sur l'espace disponible dans la file d'attente du nœud j au niveau l . En fait, quand un nœud i reçoit un paquet de contrôle, il extrait les informations sur le nœud j et met à jour sa table de voisinage (voir le tableau 3.1) qui contient désormais les informations sur les ABS^l . Le champs ABS^l est mis à jour en utilisant une moyenne mobile exponentielle pondérée (Lucas et Saccucci, 1990) comme suit :

$$ABS^l(j, n) = \gamma \times ABS_{new}^l(j) + (1 - \gamma) \times ABS^l(j, n - 1) \quad (3.8)$$

Où γ est un facteur de lissage entre 0 et 1, $ABS_{new}^l(j)$ est la valeur extraite du paquet de

Tableau 3.1 – Table de voisinage avec le nouveau champ ABS dans le cas de deux niveaux de priorité($l=2$)

ID	Position	Délai	ABSs	PLRs	Timestamp
23	(x,y,z)	0.1	(12,50)	(0.02, 0.1)	9 :30

contrôle. Ainsi, chaque nœud i connaît la valeur de ABS à chaque niveau l de la file d'attente de ses voisins j . La mise à jour de cette manière permet de considérer la valeur de ABS^l à l'instant n et tenir compte de l'ancienne valeur $ABS^l(j, n - 1)$, afin de réduire la forte fluctuation de ABS^l . Bien évidemment, quand un nœud souhaite envoyer un paquet de contrôle, il injecte l'information sur l'espace disponible dans la file d'attente de chaque niveau de priorité l .

3.3.3 Adaptation des protocoles SPEED et MMSPEED à la nouvelle métrique

Queue Buffer Size Aware SPEED

Tel que mentionné dans la section 3.2, le protocole SPEED ne peut gérer qu'une seule classe de trafic. Par conséquent, dans le protocole SPEED avec la nouvelle métrique, qu'on nomme Queue Buffer Size Aware (QBSA) SPEED, la file d'attente avec priorité mentionnée ci-dessus agit comme une file d'attente uni-service avec la discipline FIFO.

Par conséquent, quand un nœud i a besoin de choisir le prochain saut j , après l'attribution de poids à chaque liens e_{ij} de ses voisins selon l'équation 3.7, il choisit le nœud j qui satisfait la condition suivante :

$$e_{ij} = \max_{p \in FS_i(S)}(e_{ip}) \quad (3.9)$$

QBSA-SPEED n'utilise pas les deux sous-ensembles $FS_iSup(S)$ et $FS_iInf(S)$. En fait, ce protocole est conscient du degré de congestion du saut suivant par la prise en compte du paramètre ABS^l . Ainsi, QBSA-SPEED tente de transmettre le paquet au meilleur nœud selon son la vitesse de progression du paquet et espace disponible dans le buffer « Available Buffer Size » (ABS) afin de respecter le choix *SetSpeed* et de préserver les nœuds de la congestion.

Le protocole QBSA-SPEED est également capable d'équilibrer les charges. En effet, même si l'on considère le fait que la vitesse de progression du paquet d'un nœud peut rester constante pendant un certain moment, le nombre de paquets présents dans la file d'attente du nœud varie au fil du temps, spécialement en cas de transmission en continu. Ainsi, le score des nœuds est continuellement en évolution ce qui fournit un équilibrage de charge et constitue ainsi un avantage certain par rapport à la version initiale du protocole.

Tableau 3.2 – Paramétrage des simulations

Paramètres	
Terrain	$200m \times 200m$
Nombre de nœuds	100
Déploiement	Uniforme
ID du Sink	1
Bandwidth	200 Kbps
Taille des données	32 Octets
Taux de paquets	5 paquets/seconde
Type de trafic	VBR (Poisson)
Module sans fil	AT&T WaveLAN PCMCIA
Modèle de propagation	Two ray Ground
γ	0.8
QBSA-SPEED	$\alpha = 0.8$
QBSA-MMSPEED	$\alpha = 0.7$
Taille des files d'attente	100 paquets

Queue Buffer Size Aware MMSPEED

Le protocole MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006) est capable de gérer de nombreuses classes de trafic. Par conséquent, la file d'attente avec priorité est utilisée pour permettre de réaliser une différenciation entre les paquets.

Ainsi, dans le protocole QBSA-MMSPEED, quand un nœud i cherche un nœud de relai j , il calcule le poids e_{ij} de chacun de ses voisins selon l'équation 3.7 en utilisant les informations enregistrées dans sa table de voisinage. Ensuite, les voisins sont triés en fonction de ces poids ainsi calculés dans l'ordre décroissant. Par la suite, chaque voisin est injecté dans l'équation 3.6 jusqu'à ce que TRP atteigne le P^{req} désiré, comme expliqué dans la section 3.2.2.

3.4 Simulations et discussion des résultats

Afin d'évaluer l'efficacité du schéma de routage proposé et ainsi les protocoles QBSA-SPEED et QBSA-MMSPEED, des simulations ont été effectuées à l'aide du Java Simulator (JSIM) (Sobeih *et al.*, 2006), en utilisant le package dédié aux RCSF, sous différents scénarios. Le but de ces simulations est d'observer l'effet des approches proposées sur deux domaines de qualité de service, à savoir le délai et la fiabilité. Dans tout ce qui suit, nous choisissons la position des nœuds sources ainsi que l'instant du début des émissions d'une manière aléatoire pour chaque réalisation. Ainsi, chaque point des courbes ci-après présentées est une moyenne sur les 100 réalisations. Nous nous assurons aussi que les intervalles de transmission se chevauchent afin d'évaluer les protocoles en présence de situations de congestion. La consommation de l'énergie est en dehors du cadre de cette étude.

Pour fixer la valeur de α de l'équation 3.7 de nombreuses réalisations ont été effectuées. La valeur de 0.8 a produit les meilleures performances pour le protocole QBSA-SPEED tandis que pour QBSA-MMSPEED, 0.7 est la valeur optimale. Notons que, d'après les tests réalisés sur les deux protocoles, la valeur de α dépend principalement de la taille de la file d'attente et du taux de génération des paquets. Le tableau 3.2 résume les paramètres de toutes les simulations, inspirés de Felemban *et al.* (2006) à quelques adaptations près.

3.4.1 Évaluation des protocoles SPEED et MMSPEED

Dans cette sous-section, nous effectuons une étude sur les protocoles SPEED et MMSPEED, qui fait appel à une approche différente de celles présentée par He *et al.* (2005a) et Felemban *et al.* (2006).

Impact de la valeur du paramètre SetSpeed sur la qualité de service

Dans cette expérience, nous étudions l'influence de la valeur de SetSpeed sur le délai et le PDR. Nous fixons le nombre de nœuds source à 10 flux, entre 100 nœuds déployés uniformément comme indiqué dans le tableau 3.2, tout en variant la variable SetSpeed. Nous prenons le cas simple du protocole SPEED.

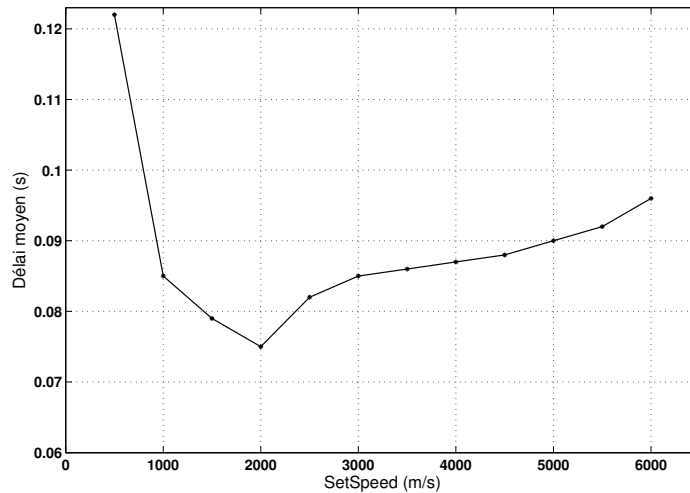


Figure 3.5 – Variation du délai en fonction de la valeur de SetSpeed choisie

La figure 3.5 montre que le délai diminue pour SetSpeed entre 500 m/s et 2000 m/s. Mais au-delà de ce seuil (2000m/s), le délai commence à augmenter. Ce résultat s'explique par l'incapacité des nœuds de trouver des relais qui satisfont SetSpeed supérieure à 2000m/s. Quand cela arrive, les nœuds source ont un $FS_iSup(S)$ qui est vide.

Dans le protocole SPEED et MMSPEED, ceci est perçu comme un cas de congestion, qui conduit à une procédure pour soulager le voisinage, ainsi qu'au rejet des paquets. Cette procédure consiste à diffuser des paquets dans le voisinage alertant de cet état pour que le nœud en question soit contourné. Quand le nombre de sources est assez élevé, cette procédure mène à l'inondation des voisinages et ainsi du réseau. Par conséquent, le délai augmente comme illustré dans la figure 3.5.

Ainsi, la valeur de SetSpeed doit être choisie d'une manière adaptée à la topologie du réseau.

Le résultat de cette expérience dans le domaine de fiabilité est rapporté dans la figure 3.6. L'allure de la courbe indique que le taux de paquets perdus diminue lorsque la valeur de SetSpeed augmente. En d'autres termes, si SetSpeed dépasse le seuil de vitesse de la topologie, la probabilité de trouver l'ensemble $FS_iSup(S)$ vide augmente ainsi que la probabilité de rejet de paquets, ce qui est illustré par la chute du PDR.

Compromis délai-fiabilité dans le protocole MMSPEED

Afin d'attester le compromis délai-fiabilité dans le protocole MMSPEED, nous effectuons l'expérience suivante, en fixant le nombre de flux à 14, sous contrainte de délai requis de 1 seconde et SetSpeed de 1000m/s. Un seul type de flux est généré.

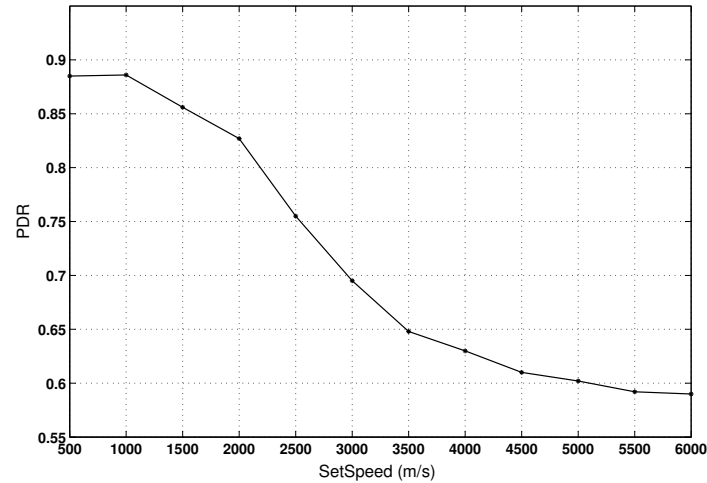


Figure 3.6 – Variation du PDR en fonction de la valeur de SetSpeed choisie

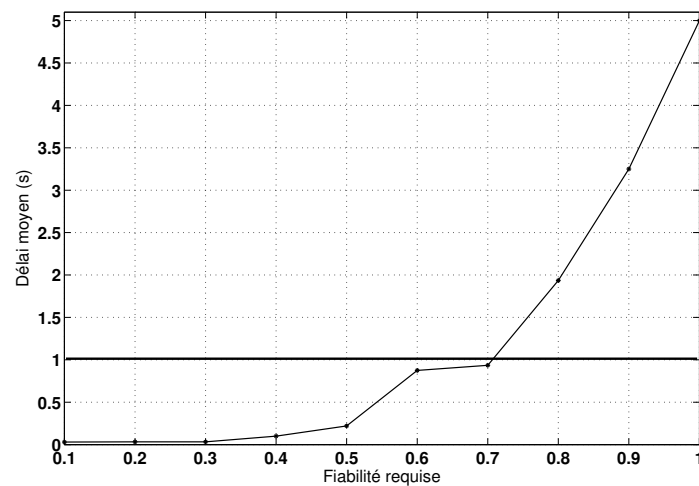


Figure 3.7 – Variation du délai en fonction de la valeur de fiabilité requise

La figure 3.7 montre le fait qu'il est difficile pour le protocole MMSPEED de garantir un délai strict lorsque les flux exigent un haut niveau de fiabilité. Comme on peut le voir, ce compromis affecte les performances du protocole. Ceci est dû au fait que lorsque la fiabilité exigée est importante, plusieurs nœuds de relai sont nécessaires surtout quand le taux de perte augmente, dû à la surcharge du réseau. Sous la contrainte d'un délai assez strict, non adapté aux flux ainsi que la topologie du réseau, la procédure pour soulager le voisinage est exécutée à plusieurs reprises menant à l'encombrement, conduisant à l'augmentation du délai.

3.4.2 Évaluation des protocoles proposés

Délai de bout-en-bout

Nous étudions la variation du délai moyen de bout-en-bout, tout en augmentant le nombre de flux pour les deux protocoles QBSA-SPEED et QBSA-MMSPEED. Pour chaque nombre de flux, plusieurs réalisations ont été effectuées pour chaque protocole et sont représentées sur la figure par la valeur moyenne. Dans ces simulations nous essayons de choisir des nœuds source concentrés dans une zone donnée, pour pousser le réseau vers la congestion et voir la réaction

des protocoles face à cette situation.

1) *SPEED Vs QBSA-SPEED*

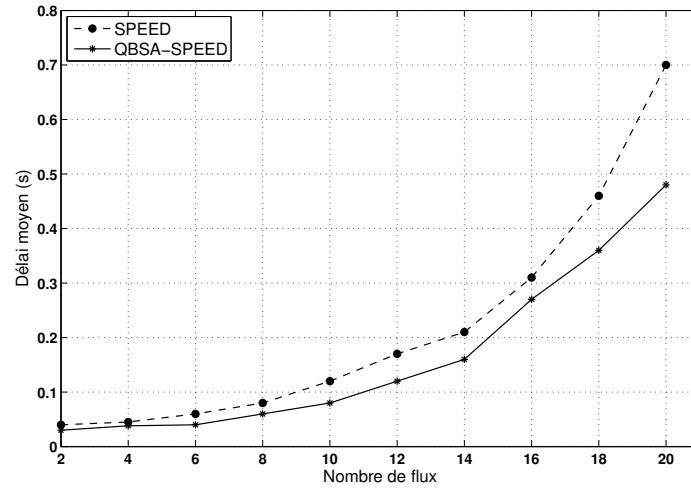


Figure 3.8 – Comparaison en termes de délai moyen de SPEED et QBSA-SPEED

La figure 3.8 présente les résultats de cette expérience pour les protocoles SPEED et QBSA-SPEED. Comme on peut le voir, le délai augmente en augmentant le nombre de nœuds source, en raison du nombre important de paquets mis en mémoire, traités puis transmis. La figure montre également que le protocole QBSA-SPEED est plus performant que le protocole SPEED en termes de délai moyen, avec un délai moyen de 0.18s. Ce résultat peut être expliqué par la prise en compte de la taille du buffer de la file d'attente du prochain saut de QBSA-SPEED. Ceci est illustré par la différence entre les deux courbes qui est de 26% en moyenne.

2) *MMSPEED Vs QBSA-MMSPEED*

Pour comparer MMSPEED et QBSA-MMSPEED le flux est divisé en deux groupes ayant des exigences de délai différents. Le premier groupe, prioritaire (Prio), a besoin de 0.5 secondes tandis que le second, non-prioritaire (N-Prio), a besoin de 1.5 secondes. Les deux groupes requiert un PDR de 0.5. Les protocoles MMSPEED et QBSA-MMSPEED utilisent deux couches virtuelles qui utilisent une valeur du paramètre *SetSpeed* de 250m/s pour le flux non-prioritaire et de 1000m/s pour celui prioritaire.

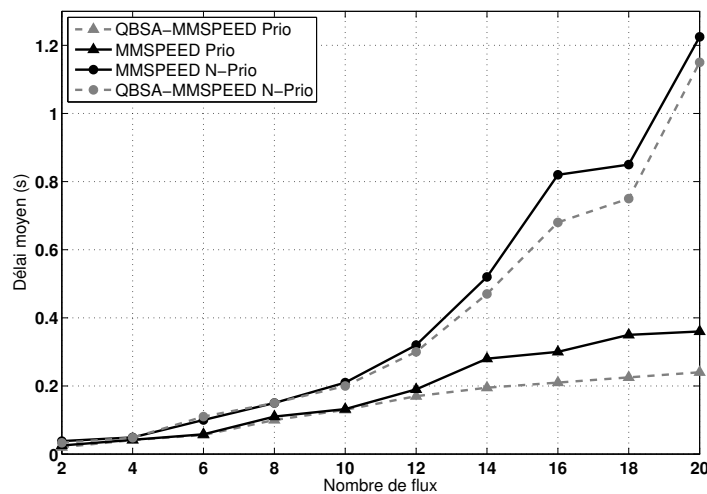


Figure 3.9 – Comparaison en termes de délai moyen de MMSPEED et QBSA-MMSPEED

La figure 3.9 montre la variation du délai moyen, en fonction du nombre de flux. Cette figure indique que les deux protocoles sont capables de différencier les paquets en fonction de leur priorité grâce aux services de différenciation mis en œuvre dans les couches MAC et réseau. De plus, il est clair qu'au-delà de 12 flux QBSA-MMSPEED surpasse le protocole MMSPEED pour les deux types de flux. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'entre 2 et 12 nœuds source, il n'y a pas suffisamment de trafic pour submerger les files d'attente des nœuds. Au-delà de ce nombre de flux, les files d'attente commencent à être en manque d'espace et QBSA-MMSPEED choisit les nœuds avec une vitesse de progression du paquet acceptable et moins congestionnés. D'autre part, le protocole MMSPEED préfère les nœuds avec une grande vitesse de progression du paquet et ne tient pas compte du nombre de paquets en attente dans les prochains sauts. En moyenne, QBSA-MMSPEED offre un délai de 0.13s pour le flux prioritaire et 0.36s pour le flux moins prioritaire. Ainsi, QBSA-MMSPEED diminue le délai de 31% pour le flux prioritaire et de 15% pour le flux moins prioritaire, ce qui correspond à une amélioration générale de 23% en termes de délai.

Taux de paquets reçus

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus lors des simulations conduites en termes de taux de paquets reçus.

1) SPEED Vs QBSA-SPEED

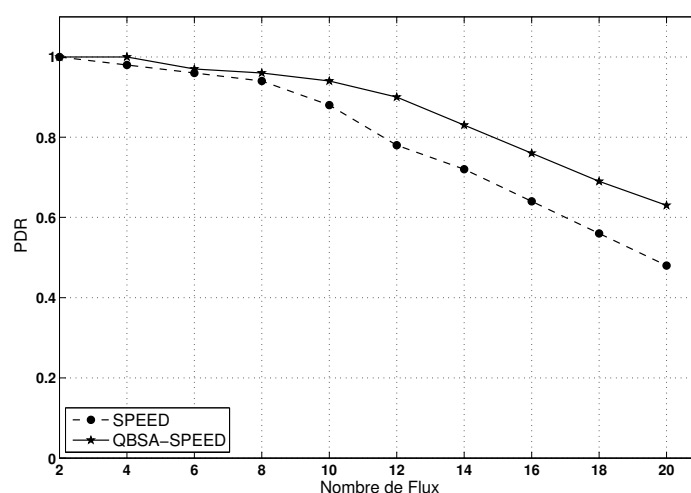


Figure 3.10 – Comparaison en termes de fiabilité de SPEED et QBSA-SPEED

En domaine de fiabilité, comme indiqué sur la figure 3.10, QBSA-SPEED surpasse SPEED en moyenne de 14%, pour un PDR moyen de 0.84. Ceci est le résultat de la prise en considération de QBSA-SPEED de l'espace disponible dans la mémoire tampon des voisins, évitant ainsi, autant que possible, le rejet de paquets. De ce fait, QBSA-SPEED qui tente de transmettre les paquets vers des nœuds plus appropriés, gère mieux les cas de congestion en évitant les nœuds congestionnés.

2) MMSPEED Vs QBSA-MMSPEED

En ce qui concerne le domaine de fiabilité, comme indiqué par la figure 3.11, les protocoles MMSPEED et QBSA-MMSPEED offrent une meilleure fiabilité aux flux qui requièrent des délais moins stricts. Ceci reflète à nouveau le compromis délai-fiabilité inhérent au protocole de base MMSPEED, discuté dans la section 3.4.1. Par ailleurs, nous observons une amélioration en termes de fiabilité fournie par le protocole QBSA-MMSPEED qui arrive à maintenir le PDR désiré de 0.5 pour les flux prioritaires jusqu'à 16 flux, tandis que le protocole MMSPEED ne peut le maintenir que jusqu'à 12 flux. Ceci est le résultat de la prise en compte de QBSA-MMSPEED

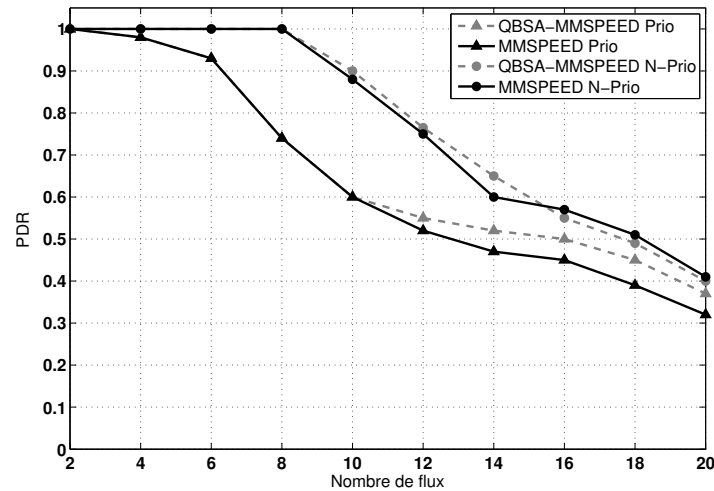


Figure 3.11 – Comparaison en termes de fiabilité de MMSPEED et QBSA-MMSPEED

de l'espace disponible dans la mémoire tampon des sauts suivants. De même que QBSA-SPEED, QBSA-MMSPEED choisit des nœuds moins encombrés et satisfaisants les délais requis. Pour les flux moins prioritaires, les deux protocoles arrivent à maintenir le PDR désiré jusqu'à 18 flux simultanés. Toutefois, en moyenne, QBSA-MMSPEED respecte le PDR désiré en offrant un PDR de 0.78 pour les flux moins prioritaires et 0.66 pour ceux prioritaires, conduisant à une amélioration générale du PDR de 5%.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et démontré l'efficacité de la considération de la taille de l'espace disponible dans la file d'attente pour deux protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs. Ce paramètre, comme l'indiquent les résultats des simulations, améliore la qualité de service dans deux domaines : délai et fiabilité. En effet, QBSA-SPEED améliore en moyenne le délai de 26% et la fiabilité de 14%, comparé au protocole SPEED. Par ailleurs, QBSA-MMSPEED améliore en moyenne le délai de 23% et la fiabilité de 5%, comparé au protocole MMSPEED. Néanmoins, QBSA-MMSPEED comparé à QBSA-SPEED est parvenu à offrir au flux prioritaire un délai moyen de 0.13s tout en garantissant une fiabilité supérieure au seuil requis de 0.5.

Dans le chapitre suivant nous proposerons une première solution inter-couches en vue du support du flux vidéo dans les RCVSF. Cette solution proposera, en premier, un encodeur vidéo adaptatif et efficace en énergie dédié aux RCVSF qui introduira la notion de différenciation de service. Ainsi, un protocole supportant la différenciation de service prendra en charge la tâche d'acheminer les flux encodés. Pour ce, nous proposerons en deuxième lieu une version améliorée du protocole QBSA-MMSPEED qui tiendra compte de l'énergie résiduelle avec une nouvelle procédure d'amélioration de la fiabilité.

UNE PREMIÈRE SOLUTION INTER-COUCHES POUR LE SUPPORT DU CONTENU VIDÉO DANS LES RCVSF

Sommaire

4.1	Introduction	63
4.2	Le schéma d'encodage proposé	64
4.2.1	Vues sur le standard H.264/AVC et l'adaptation de débit utilisée	64
4.2.2	Schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie pour les RCVSF	70
4.3	Le protocole de routage proposé	73
4.3.1	Terminologie	73
4.3.2	Table de voisinage et paquets de contrôle	74
4.3.3	L'algorithme de routage	74
4.4	Évaluation des performances	75
4.4.1	Évaluation du schéma d'encodage	75
4.4.2	Évaluation de la solution inter-couches	79
4.5	Conclusion	82

4.1 Introduction

D'après l'étude bibliographique présentée dans le chapitre 2, l'approche inter-couches est considérée comme le schéma de conception de solutions le plus efficace pour faire face aux exigences rigoureuses des réseaux de capteurs visuels en général (Yap et Yen, 2014; Costa et Guedes, 2011), et pour répondre aux exigences de l'application avec une faible complexité. De plus, le paradigme de différenciation de service fortement recommandé pour les RCVSF (Akyildiz *et al.*, 2002), introduit premièrement par l'encodeur vidéo et respecté au niveau des couches sous-jacentes (réseau et MAC), semble être un bon moyen pour introduire plus d'efficacité.

Dans ce chapitre, nous proposons une solution inter-couches pour le support du flux vidéo dans les RCVSF. En premier, nous proposons un schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie dédié aux RCVSF, basé sur le standard H.264/AVC. L'encodeur opère en deux modes, à savoir le mode « standby » et le mode « rush ». Durant le premier mode, les nœuds capturent la scène suivant une cadence faible. Lorsqu'un événement se produit, un débit d'images par seconde « Frame Rate » (FR) plus élevé est utilisé et l'encodeur fournit en sortie deux classes différentes de macroblocs : la première classe contient les macroblocs appartenant à la ROI, tandis que la seconde classe contient ceux appartenant au reste de l'image, noté ici BKGD. Pour une efficacité énergétique, cette dernière est encodée avec un débit plus faible en comparaison de la ROI. Le flux vidéo est acheminé vers la destination par un protocole de routage, avec différenciation de service, améliorant le protocole QBSA-MMSPEED par la considération de l'énergie résiduelle.

Dans la section 4.2, nous présentons le schéma d'encodage proposé. La section 4.3 présente le protocole de routage adopté par la solution inter-couches. La section 4.4 présente les résultats des simulations pour la validation de la solution proposée.

4.2 Le schéma d'encodage proposé

Il a été montré dans la littérature (*cf.* chapitre 2) que différentes approches pour l'encodage de la vidéo pouvaient être adoptées dans le cas des RCVSF. Dans certains travaux, les auteurs s'appuient sur un standard et essaient de réduire la consommation d'énergie dans les couches inférieures de la pile protocolaire Politis *et al.* (2008); Zhang et Ding (2010). Dans d'autres, les auteurs modifient légèrement les encodeurs standards pour être plus appropriés aux RCVSF en termes de consommation d'énergie et de la complexité d'une part, et d'autre part pour introduire le paradigme de différenciation de service (Bambang *et al.*, 2011; Mammeri *et al.*, 2008b). De ce fait, il est clair que l'introduction de différenciation de service en plus de l'adaptation de l'encodeur sont les approches les plus utilisées et qui ont prouvé leur efficacité.

Nous proposons un schéma d'encodage adaptatif et efficace en énergie conçu pour les RCVSF et basé sur le standard H.264/AVC (ITU-T, 2009). Le schéma proposé exploite les avantages du standard vidéo H.264/AVC en termes de qualité d'image et de réduction de débit. De plus, on applique une adaptation du débit binaire contrôlée, de faible complexité, qui est la sélection fréquentielle pour plus d'efficacité énergétique lors de la transmission. Ce schéma produit en sortie deux flux contenant respectivement la ROI et le BKGD, à deux niveaux de qualité vidéo. Les flux résultants sont adaptés pour être acheminés avec différenciation de service.

Avant d'introduire le schéma d'encodage proposé, nous présentons d'abord les différents outils utilisés.

4.2.1 Vues sur le standard H.264/AVC et l'adaptation de débit utilisée

Le standard H.264/AVC

La norme H.264/AVC (ITU-T, 2009) a été présentée sous la forme finale d'un projet de norme internationale en 2003, par la Joint Video Team (JVT) formée par l'ISO Motion Picture Experts Group (MPEG) et de l'ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG). Le standard H.264 atteint jusqu'à 50% de gain en débit par rapport au format MPEG-2 pour la même qualité vidéo (Richardson, 2006). Les changements importants dans H.264/AVC se produisent dans les détails de chaque élément fonctionnel, afin d'accomplir une meilleure performance de codage, en incluant la prédiction Intra-image, une nouvelle transformation DCT entière de blocs 4x4, de multiples images de référence, des tailles variables de blocs et une compensation de mouvement jusqu'au quart de pixel, un filtre de déblocage et un codage entropique amélioré (Richardson, 2006).

Cette norme a pour objectif de s'adapter à de multiples domaines, allant de la vidéo sur téléphone mobile, en passant par la télévision haute définition, jusqu'à la vidéo surveillance. De ce fait, il a fallu penser à une organisation qui soit flexible et évolutive des données. Dans ce but, les données relatives à la compression de l'image sont regroupées dans la couche de codage vidéo « Video Coding Layer » (VCL). De plus, une couche orientée réseau, la couche d'adaptation au réseau « Network Adaptation Layer » (NAL) formate la couche VCL et y insère des informations afin de permettre le stockage de la vidéo ou son acheminement. La couche NAL conditionne le flux vidéo dans une série d'unités appelées NALU (Network Abstraction Layer Unit). Une NALU est constituée d'une en-tête d'un octet indiquant la nature des informations qu'elle contient, suivi d'un nombre entier d'octets correspondant aux données utiles appelées RBSP (Raw Byte Sequence Payload). Les NALU transportant des informations appartenant aux slices codées de l'image sont appelées NALU VCL. Un autre type de NALU permet de transporter des éléments de syntaxe utiles au décodage du flux binaire, tels que les NALU SPS (Sequence Parameter Set) qui contiennent des informations sur la séquence et les NALU PPS (Picture Parameter Set) qui portent sur l'image courante (Wiegand *et al.*, 2003).

Le codeur, dont le schéma en blocs est représenté sur la figure 4.1, comprend deux chemins

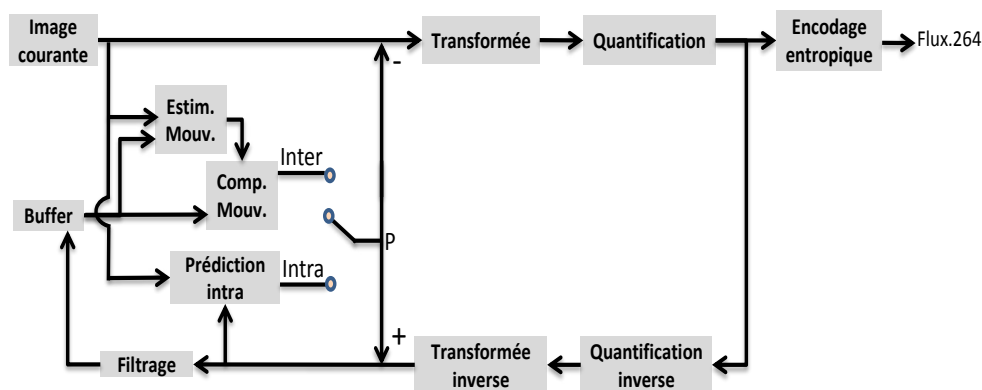


Figure 4.1 – Le schéma en blocs simplifié d'un encodeur H.264/AVC

de flux de données (Richardson, 2006) un chemin « en avant » (gauche à droite) et un chemin dit de « reconstruction » (de droite à gauche). Chaque image en entrée est traitée en unités de macroblocs, qui sont encodés soit en mode Intra ou en mode Inter, afin d'obtenir un macrobloc de prédiction P. Par la suite, l'erreur de prédiction (ou résidu), obtenue en soustrayant le macrobloc prédit P du macrobloc initial, subit une transformée entière, une quantification puis un codage entropique afin d'intégrer ces données dans le flux vidéo. L'architecture de l'encodeur est ainsi dite « en boucle fermée » dans le but de réaliser les prédictions à partir des blocs précédemment encodés puis décodés et non sur l'image originale.

Sur le chemin de reconstitution, le résidu transformé et quantifié subit une quantification inverse et une transformée inverse. Par la suite, la prédiction (P) intra ou inter-image est ajoutée aux coefficients ainsi obtenus afin de reconstituer le macrobloc dans le domaine spatial. Ce dernier est ensuite ajouté au buffer image afin d'être utilisé pour de futures prédictions. Ainsi, nous parvenons à constituer une version approchée de l'image originale puisque les fréquences éliminées par la quantification sont définitivement perdues.

Dans ce qui suit nous passons en revue quelques caractéristiques de la norme H.264/AVC prises en compte dans le cadre de cette thèse.

a) Profils :

Le profil précise l'ensemble des outils de codage et algorithmes utilisés pour créer le flux vidéo. Un décodeur conforme à un profil donné doit supporter toutes les fonctionnalités de celui-ci. À l'origine, H.264/AVC définissait trois profils : Baseline, Main et Extended. D'autres profils ont été ajoutés afin d'étendre le standard à d'autres types d'applications et notamment professionnelles. Dans nos travaux nous retenons le profil Baseline parce qu'il offre un bon compromis complexité-efficacité de codage vis à vis des applications RCVSF visées.

b) Notions de Slice, macrobloc et bloc :

Une image peut contenir une ou plusieurs slices. Une slice est constituée d'un nombre entier fini de macroblocs codés formant une entité indépendamment décodable. En effet, une slice peut contenir au minimum un macrobloc et au maximum l'ensemble des macroblocs d'une image, offrant ainsi une flexibilité plus importante et une limitation intrinsèque à la propagation des erreurs d'une slice à une autre. Il est important de noter que chaque slice est séparément encapsulée dans une NALU.

Un macrobloc est un ensemble de pixels d'une même image de taille 16x16 pixels. Les ensembles de pixels de taille 4x4 ou 8x8 sont appelés blocs.

c) Modes de prédiction :

La prédiction Intra : utilise les redondances spatiales de l'image pour prédire le macrobloc

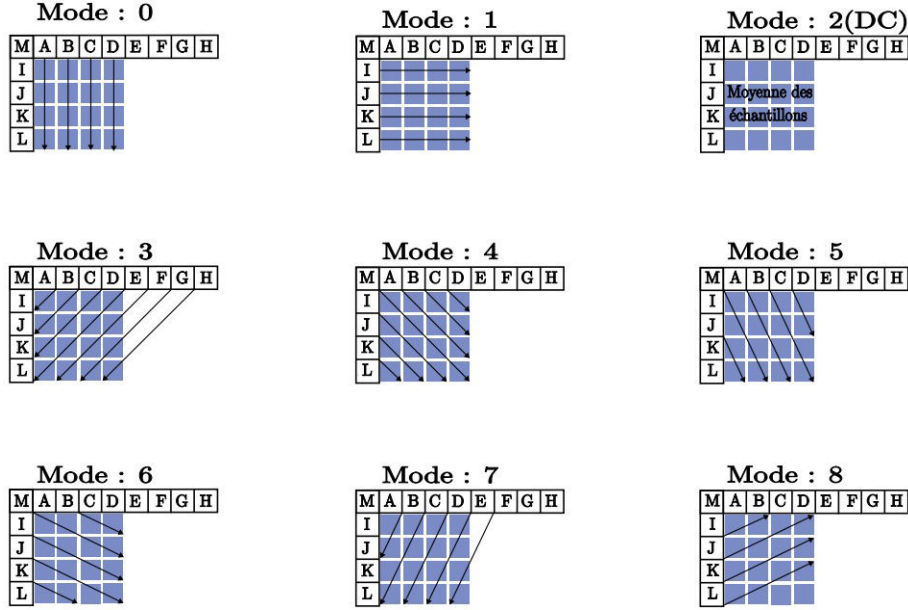


Figure 4.2 – Modes de prédiction Intra pour les blocs 4x4 de luminance

courant sans avoir besoin d'aucune image de référence. Elle se base sur le fait que des pixels voisins sont fortement corrélés. Dans la norme H.264/AVC, la prédiction en Intra est réalisée à partir de macroblocs de la même slice précédemment codés puis décodés puis reconstruits. En effet, la prédiction Intra au-delà des limites de la slice n'est pas autorisée afin de maintenir l'indépendance des slice les unes par rapport aux autres (Ostermann *et al.*, 2004).

Concrètement, la prédiction Intra des composantes de luminance est réalisée suivant l'un des 9 modes de prédiction en option pour les blocs de 4x4, ou l'un des 4 modes optionnels pour les macroblocs (16x16) de luminance. La figure 4.2 rapporte les neuf modes de prédiction des blocs 4x4 de luminance (Richardson, 2006). En effet, chaque bloc 4x4 (région foncée) est prédit spatialement à partir des pixels au-dessus et à gauche (pixels de A à M noté par la suite [A-M]) précédemment reconstruits. De plus, tous les modes sont directionnels à part le mode 2 (appelé mode DC), où la prédiction consiste à affecter au bloc 4x4 la moyenne des intensités des pixels voisins [A-D] et [I-L]. Les modes 0 et 1 reviennent à prédire le bloc 4x4 en extrapolant verticalement les pixels [A-D] et horizontalement les pixels [I-L] respectivement. Quant aux modes [3-8], le bloc 4x4 est prédit par une moyenne pondérée, selon des règles bien définies (ITU-T, 2009), à partir des pixels voisins [A-M], suivant une direction donnée. Par exemple, le pixel au coin haut-gauche du bloc 4x4 est prédit par le mode 3 par $\frac{A+2B+C+2}{4}$ et par le mode 4 par $\frac{A+2Q+I+2}{4}$ (Hurbain, 2004). Enfin, l'encodeur retient le mode qui minimise l'erreur de prédiction mesurée en SAE (Sum of Absolute Errors) entre le bloc original et le celui prédit.

Chaque composante de chrominance de taille 8x8 d'un macrobloc est prédite, à partir d'échantillons de chrominance codés précédemment, suivant quatre modes de prédiction très similaires à ceux utilisés pour la prédiction macroblocs 16x16 de luminance, sauf que la numérotation des modes est différente (Richardson, 2006).

La prédiction Inter : plusieurs améliorations sont proposées par la norme H.264/AVC comme la taille de bloc variable et les références multiples. Il existe alors deux types de macroblocs codés : type Prédit (P) qui utilise une prédiction basée sur l'image précédente ou Bidirectionnel (B) qui utilise une prédiction basée sur des images précédentes et suivantes. La prédiction Inter crée un modèle de prédiction au moyen de l'estimation et de la compensation de mouvement afin de réduire les corrélations temporelles. Parmi les principales différences qu'apporte H.264/AVC par rapport à ses antécédents, nous citons : une large gamme de tailles de

blocs (jusqu'à 4x4) et un sous échantillonnage plus fin des vecteurs de mouvement (résolution au quart d'échantillon pour la luminance).

d) Transformée, quantification et codage entropique :

La transformée : Le système visuel humain est beaucoup plus sensible aux basses fréquences spatiales qu'aux hautes fréquences spatiales. Ainsi, certaines informations de haute fréquence spatiale peuvent être codées avec moins de précision ou complètement supprimées. De ce fait, une transformation permettant de décorréler le signal et qui soit compacte de sorte que l'énergie soit concentrée sur un petit nombre de termes, est nécessaire. La DCT répond en effet à ce besoin et permet de convertir les valeurs de luminance et de chrominance des pixels en coefficients représentant les amplitudes aux différentes fréquences. Elle permet d'une part de classer les informations par ordre d'importance au regard de la vision humaine, et d'autre part de concentrer l'énergie sur un nombre réduit de coefficients (Bellaiche, 2002).

A la différence des standards précédents, la norme H.264/AVC utilise une transformée entière 4x4 à base de la DCT au lieu d'une DCT 8x8 classique. L'expression de la transformation est donnée par (Richardson, 2006)

$$Y = CXC^T \otimes E \quad (4.1)$$

Où CXC^T est le noyau de la transformation 2D, E est une matrice d'échelonnement et le symbole $\otimes$ indique une multiplication terme à terme. L'expression de la matrice E est comme suit :

$$E = \begin{pmatrix} a^2 & \frac{ab}{2} & a^2 & \frac{ab}{2} \\ \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} & \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} \\ a^2 & \frac{ab}{2} & a^2 & \frac{ab}{2} \\ \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} & \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

avec $a = \frac{1}{2}$ et $b = \sqrt{\frac{2}{5}}$. En effet, c'est une transformée dont le noyau n'utilise que des additions et des décalages sur 16 bits. Afin de réduire le nombre de multiplications sur les phases de transformation et de quantification, la multiplication par la matrice d'échelonnement E est injectée dans le processus de quantification, expliqué ci-après. Par ailleurs, puisque l'ensemble des calculs se fait sur des entiers, la transformée et son inverse sont réversibles et permettent de préserver la précision (Richardson, 2006). Ainsi, chaque macrobloc ou sous-macroblock est décomposé en blocs de quatre par quatre échantillons. L'application de la transformée entière sur un bloc de 4x4 pixels permet d'obtenir un coefficient basse fréquence (DC) (ou niveau lumineux moyen) et quinze coefficients haute fréquence (AC). Dans la norme H.264/AVC, la transformation débute par une transformée entière 4x4 sur tous les blocs résiduels des composantes de luminance et de chrominance, quelque soit le type de prédiction adopté. La matrice de transformation est donnée par (Richardson, 2006) :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Dans le cas de prédiction Intra 16x16, les coefficients DC de luminance sont regroupés dans une matrice 4x4 et subissent une transformée de Hadamard. La matrice de transformation est donnée par (Richardson, 2006) :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Les coefficients DC de chrominance sont regroupés dans une matrice 2x2 et subissent une transformée de Hadamard 2x2. La matrice de transformation est donnée par (Richardson, 2006) :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Quantification : les coefficients ainsi obtenus, après transformation, sont ensuite quantifiés. L'opération de base de la quantification scalaire utilisée dans la norme H.264/AVC est donnée par (Richardson, 2006) :

$$Z_{ij} = \text{round}\left(\frac{Y_{ij}}{Q_{step}}\right) \quad (4.6)$$

Où Y_{ij} est un coefficient de la transformation, Q_{step} est la taille du pas de quantification et Z_{ij} est le coefficient quantifié. Un des 52 quantificateurs est sélectionné pour chaque macrobloc, désigné par paramètre de quantification « Quantization Parameter » (QP) variant de 0 à 51. Le Q_{step} est associé à chaque valeur du paramètre QP, augmentant de 12% à chaque incrémentation de 1 de QP (Wiegand *et al.*, 2003). Les facteurs a^2 , $\frac{ab}{2}$ et $\frac{b^2}{4}$ de la matrice E sont incorporés dans l'opération de quantification somme suit (Richardson, 2006) :

$$Z_{ij} = \text{round}\left(W_{ij} \cdot \frac{PF}{Q_{step}}\right) \quad (4.7)$$

Où PF prend une valeur des facteurs de la matrice E selon la position du pixel en question et W_{ij} est le coefficient résultant de la transformée. Au niveau de l'implémentation, afin de simplifier les calculs, $\frac{PF}{Q_{step}}$ devient $\frac{MF}{2^{qbits}}$ avec $qbits = 15 + \text{floor}(\frac{QP}{6})$.

Codage entropique : Les blocs après transformation et quantification contiennent de nombreux zéros. Les plus grands coefficients sont généralement situés à la partie supérieure gauche du bloc. De ce fait les blocs sont généralement balayés suivant un schéma en zigzag, puis transmis après un encodage entropique. Les coefficients 2x2 DC de la composante de chrominance sont scannés suivant le schéma « raster ». La méthode d'encodage entropique la plus simple utilise un unique ensemble illimité de mots-codes défini pour tous les éléments syntaxiques, à l'exception des coefficients de transformée quantifiés. Ainsi, au lieu de concevoir une table de code à longueur variable (VLC) différente pour chaque élément syntaxique, seule la correspondance à la table de mots-codes unique, est personnalisée en fonction des statistiques des données. La table unique est un code Golomb exponentiel aux propriétés de décodage simples et régulières (Wiegand *et al.*, 2003). Pour transmettre les coefficients de transformée quantifiés, la norme H.264/AVC fait intervenir la méthode codage à longueur variable adaptable en fonction du contexte « Context Adaptative Variable Length Coding » (CAVLC). Ainsi, les tables VLC de plusieurs éléments syntaxiques sont remplacées en fonction de ceux déjà transmis. L'efficacité du codage entropique a été encore améliorée par l'adoption d'un autre type de codage arithmétique binaire adaptatif basé sur le contexte « Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding » (CABAC) au sein des autres profils (Wiegand *et al.*, 2003). Ce codage arithmétique a permis de réduire encore le débit binaire de 5% à 15% des signaux de télévision d'une même qualité en le comparant au CAVLC.

e) Ordonnancement flexible de macroblocs :

L'option d'ordonnancement flexible de macroblocs « Flexible Macroblock Ordering » (FMO) est un mécanisme de robustesse aux erreurs introduit par la norme H.264/AVC. Il est en fait, comme rapporté par la figure 4.3, une structuration de l'image qui propose le groupe de slices (Slice Group) comme un niveau intermédiaire entre l'image et sa slice. Chaque image peut être divisée en un maximum de huit groupes de slices différents constitués chacun d'une ou plusieurs slices. Chaque macrobloc est affecté à un groupe de slices selon une carte d'allocation de macroblocs

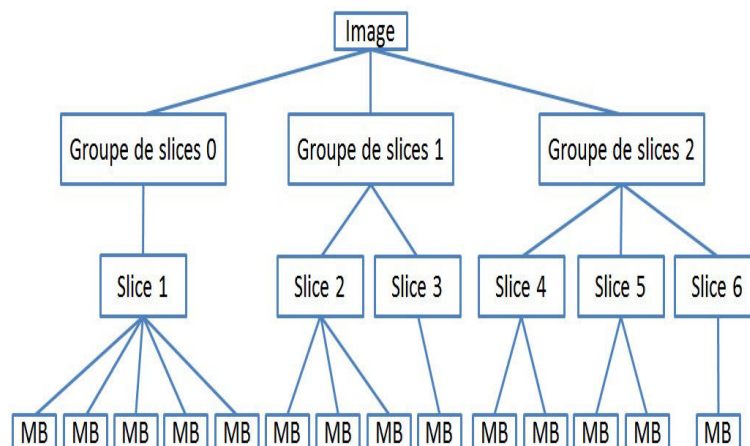


Figure 4.3 – La structuration de l'image proposée par la norme H.264/AVC via l'option FMO

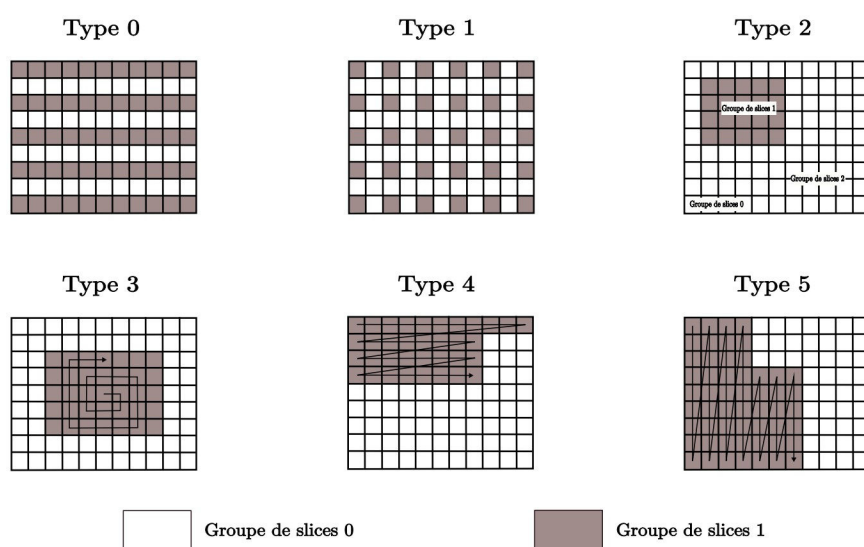


Figure 4.4 – Les six premiers types de FMO proposés dans la norme H.264/AVC

aux slices « Macroblocks Allocation Map » (MBAmapping). Le terme FMO ne peut être utilisé que lorsqu'il s'agit de plus d'un groupe de slice. Les normes de compression vidéo précédentes telles que le H.263 forcent d'encoder les macroblocs d'une image dans un ordre de balayage dit « raster », parce que c'est l'ordre dans lequel les décodeurs devraient recevoir les macroblocs encodés. Cela signifie que les codeurs devraient commencer dans le coin supérieur gauche, puis traiter la rangée de macroblocs par ligne jusqu'à ce que le coin inférieur droit de l'image soit atteint et l'image entière soit encodée. En revanche, l'option FMO permet de modifier l'ordre dans lequel les macroblocs sont encodés puisque chaque groupe de slices est codé de façon indépendante (Wenger et Horowitz, 2002). Par conséquent, une image peut encore être décodée même si tous les groupes de slices ne sont pas présentés au décodeur. Toutefois, les macroblocs d'un même groupe de slices sont encodés dans l'ordre de balayage « raster ». La norme H.264/AVC propose sept schémas FMO pour différentes stratégies de répartition de macrobloc (*cf.* figure 4.4). Parmi ceux-ci, le schéma FMO dit "Type 6" permet de personnaliser complètement les groupes de slices en termes de taille et position (Wenger et Horowitz, 2002) et c'est celui utilisé dans nos travaux.

Adaptation du débit basée sur la sélection fréquentielle

Comme mentionné précédemment, dans notre schéma proposé, nous utilisons la sélection fréquentielle pour l'adaptation du débit binaire des images. En fait, il s'agit d'une technique de faible complexité qui permet de supprimer plusieurs coefficients en fonction de leur position en fréquence tout en conservant la précision initiale des coefficients restants. Cette technique a également été appliquée pour le transcodage de flux haute définition, pour s'adapter à un débit donné, et a prouvé son efficacité (Deknudt *et al.*, 2010).

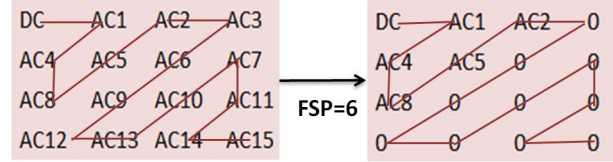


Figure 4.5 – Illustration de la sélection fréquentielle quand le FSP est fixé à 6

Le nombre de coefficients devant être maintenus, dans l'ordre en zigzag, est déterminé par le paramètre de la sélection fréquentielle « Frequency Selectivity Parameter » (FSP) variant de 1 (coefficient DC uniquement) jusqu'à 16 (l'ensemble des 16 coefficients). La figure 4.5 illustre la sélection fréquentielle avec un FSP égale à 6. Il a été démontré que le filtrage par sélection fréquentielle génère un flou global plus ou moins prononcé, qui est moins gênant visuellement que les effets de blocs ou de scintillement des contours dus à une quantification sévère. Un exemple de résultats visuels suite à l'application de cette technique est donné par la figure 4.6.

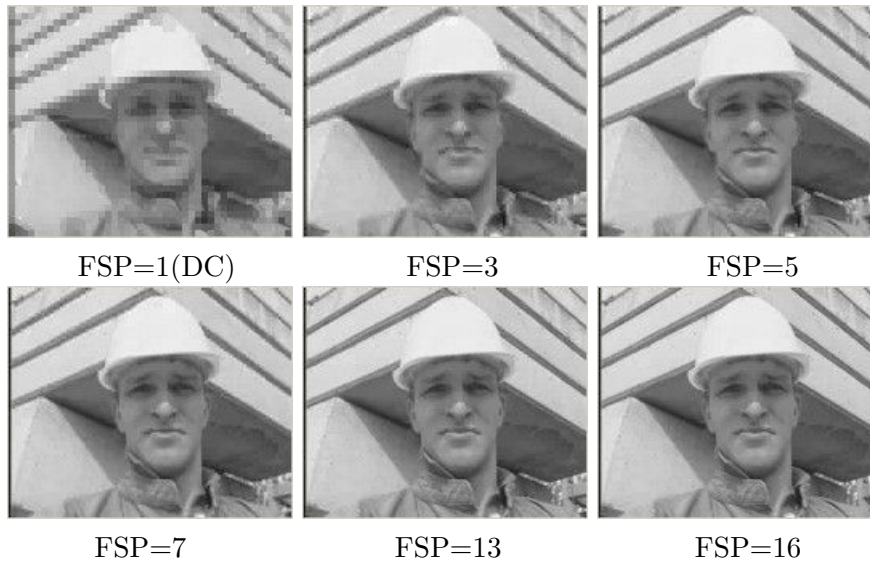


Figure 4.6 – Exemples de résultats visuels après sélection fréquentielle suivant différents FSP à QP=25 constant

Selon les auteurs (Deknudt *et al.*, 2010), la sélection fréquentielle leur a permis de produire un transcodeur efficace qui n'a pas besoin d'une grande mémoire tampon et qui n'est pas complexe. Par conséquent, ces caractéristiques font de cette technique un candidat intéressant pour être utilisé dans un contexte de RCVSF.

4.2.2 Schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie pour les RCVSF

Dans ce qui suit, nous présentons notre schéma proposé pour l'encodage vidéo dans les RCVSF. Pour passer d'un mode à un autre, nous supposons que le système est intégré dans

une architecture générale fournissant un système de détection de mouvement intelligent déployé dans la zone d'intérêt avec les nœuds de vidéo (*cf.* figure 4.7). Lorsqu'un événement se produit, le système est responsable de signaler cet état aux nœuds vidéo qui basculent en mode « rush ». À la fin de l'événement, le système avertit les nœuds vidéo pour repasser à nouveau en mode « standby ».

Par ailleurs, nous n'adoptons que la prédiction en Intra parce que nous estimons qu'elle est adaptée aux contraintes des RCVSF. En fait, dans (Ullah *et al.*, 2011) les auteurs montrent que les nœuds capteurs Intel imote2 sont en mesure d'exécuter l'encodeur vidéo H.264/AVC. L'étude en question s'est portée sur trois séquences vidéo de résolution spatiale de 176×144 à 12 images par seconde. En plus, en comparant la prédiction en Intra à celle en Inter, ils ont montré que la première est plus économe en énergie (Ullah *et al.*, 2011). En effet, la phase d'estimation de mouvement consomme une quantité d'énergie considérable. Enfin, la prédiction en Intra évite surtout toute propagation temporelle des erreurs dues à des distorsions de canal possibles ou variation du réseau puisque chaque image est encodée de manière indépendante.

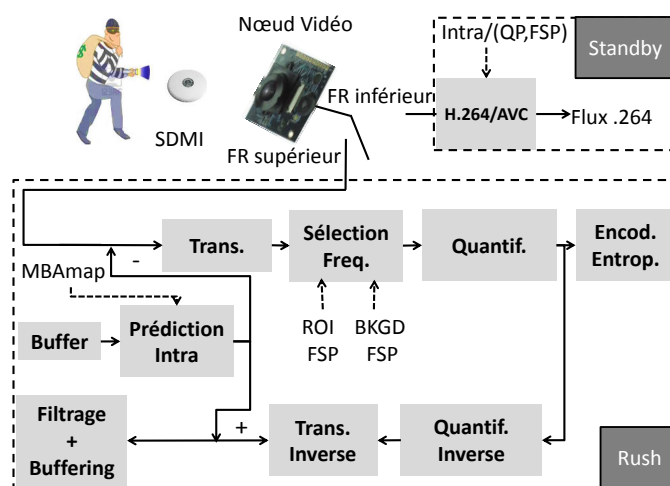


Figure 4.7 – Le diagramme en bloc du schéma d'encodage proposé

Le mode « standby »

Pour économiser l'énergie, les nœuds vidéo capturent la scène suivant un débit images par seconde faible du fait qu'il n'y a aucun événement important à signaler. Chaque image est prédite en Intra et quantifiée par le QP qui définit le niveau de quantification des macrobloques transformés.

Le mode « rush »

Le premier changement dans ce mode est l'augmentation du nombre d'images par seconde. En effet, l'augmentation de la fréquence de capture des nœuds de la scène est appliquée parce que nous estimons que dans une application de vidéo surveillance, les nœuds doivent rapporter l'événement avec des informations sur les objets en mouvement. Cependant, la précision des mouvements souhaitée de l'événement rapporté varie d'une application à une autre. Par ailleurs, l'augmentation du nombre d'images par seconde peut être considérée comme un mécanisme pour faire face aux pertes dans le réseau, du fait que l'importance de chaque image est proportionnellement diminuée. Par conséquent, la perte d'une image, qui est possible dans les réseaux sujets aux pertes, sera moins tragique.

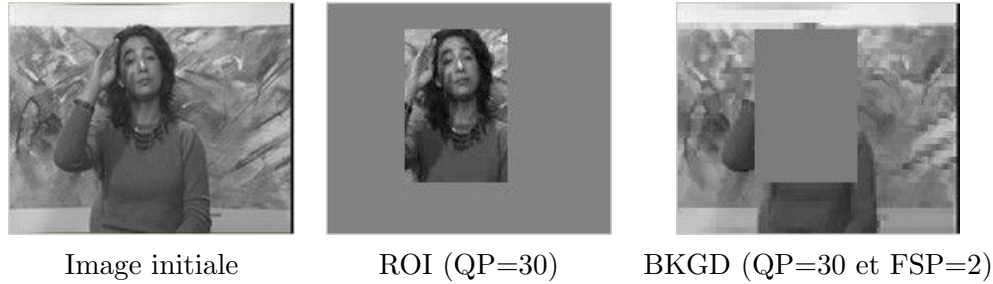


Figure 4.8 – Illustration de la séparation du flux en ROI et BKGD, avec quantification, puis sélection fréquentielle du BKGD

Chaque image du signal vidéo est codée en Intra tout en utilisant l’option FMO de la norme H.264/AVC. Le FMO permet de réorganiser chaque image en deux groupes de slices qui sont la ROI et le BKGD. Concrètement, l’utilisation du FMO permettra de séparer le flux en un groupe de slices contenant des macroblocs ROI et un autre groupe de slices contenant des macroblocs BKGD. Nous évitons ainsi d’avoir, dans une même slice, des données ROI et BKGD. Cette séparation permettra par la suite de faciliter le routage des paquets, relatifs à la ROI et au BKGD, avec différenciation de service (section 4.3). Par ailleurs, cette flexibilité est importante pour protéger la ROI de la propagation des pertes survenues dans le BKGD, du fait que l’adresse spatiale du prochain macrobloc à décoder n’est pas nécessairement la suivante dans l’ordre de balayage. Dans le présent travail, les groupes de slices (*i.e* l’appartenance d’un macrobloc à la ROI ou au BKGD) sont signalés explicitement à l’encodeur via le FMO type 6. Par ailleurs, nous considérons dans cette thèse une segmentation ROI/BKGD simple de manière à représenter la ROI par un ensemble de macroblocs, formant un carré ou un rectangle au centre de l’image. La proportion de la ROI par rapport à l’image est signalée dans les paramètres de simulation (voir la section 4.4.2).

Après la prédiction Intra 4x4, une transformée entière 4x4 est appliquée aux blocs résiduels. Par la suite, la sélection fréquentielle est effectuée pour chaque bloc du macrobloc courant en fonction du groupe de slices auquel il appartient, à savoir le BKGD ou la ROI. Dans le schéma proposé, nous distinguons deux scénarios : l’application de la sélection fréquentielle sur le BKGD seulement, ou les deux régions de l’image à la fois. Pour le premier scénario, une valeur faible du paramètre FSP est utilisée pour le BKGD pendant que la ROI demeure intacte. Pour le second, nous proposons d’utiliser deux valeurs différentes de FSP pour chaque région : un FSP supérieur pour la ROI et un FSP inférieur pour le BKGD. Ainsi, deux niveaux de qualité sont obtenus avec seulement une opération de quantification qui consomme plus d’énergie qu’une simple sélection fréquentielle. Enfin, après codage entropique CAVLC, les groupes de slices sont encapsulés séparément dans des unités NAL pour une transmission ultérieure. Même s’il est légèrement moins performant que le CABAC, le CAVLC permet d’approcher l’entropie de la source avec une complexité réduite, tout en étant adapté au contexte d’une application vidéo.

L’énergie consommée par le schéma proposé durant l’encodage ne diffère pas d’une manière significative de celle consommée par un encodeur classique du standard H.264/AVC en mode intra. Les principaux ajouts que nous proposons sont le FMO et la sélection fréquentielle. Quant au premier, comme indiqué par Wenger et Horowitz (2002), il n’ajoute pas de complexité que ce soit du côté de l’encodeur ou du décodeur. Comme la consommation d’énergie est fortement liée à la complexité du calcul, on peut conclure qu’il n’y a pas une consommation supplémentaire d’énergie par notre schéma d’encodage. Quant au deuxième, c’est uniquement un contrôle logique des coefficients considérés après la transformée, ainsi il n’ajoute aucune complexité. L’étude de la consommation énergétique de ce schéma d’encodage sera considérée et abordée en détail dans les chapitres 5 et 6. La figure 4.8 illustre, à titre d’exemple, la séparation en ROI et BKGD ainsi

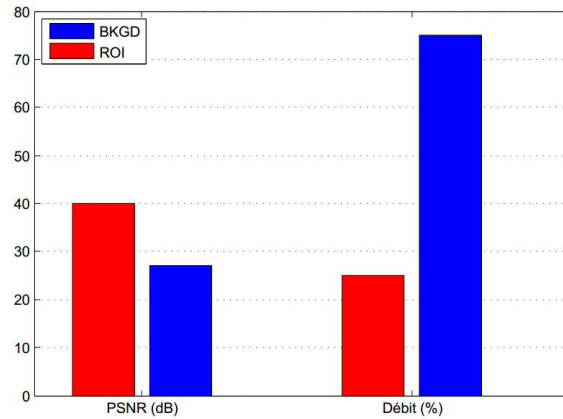


Figure 4.9 – Qualité (en dB) et débit (en %) après quantification et séparation du flux initiale en ROI et BKGD avec sélection fréquentielle du BKGD

que le résultat visuel de l'application de la sélection fréquentielle sur ce dernier. La figure 4.9 rapporte les résultats numériques relatifs à cet exemple. D'après ces figures, le schéma d'encodage proposé permet de concentrer la qualité au niveau de la ROI et de réduire le débit au niveau du BKGD. L'efficacité énergétique du schéma d'encodage ainsi que d'autres résultats sont présentés dans la section 4.4.

4.3 Le protocole de routage proposé

Maintenant que les flux vidéo sont encodés en deux catégories différentes, nous avons besoin de les transférer au Sink. A cet effet, un protocole de routage avec différenciation de service est nécessaire pour servir chaque flux en fonction de sa classe de trafic (ROI ou BKGD). En outre, ce protocole de routage doit tenir compte de la contrainte énergétique imposée par l'utilisation de flux vidéo.

4.3.1 Terminologie

Comme dit précédemment, le protocole de routage proposé, que nous baptisons Energy and Queue Buffer Size Aware (EQBSA) MMSPEED, étend QBSA-MMSPEED en considérant l'énergie résiduelle lors du processus de la sélection du prochain saut. A titre de rappel, nous ré-introduisons quelque termes présentés dans la sous-section 3.2.2 du chapitre précédent :

- L'ensemble des nœuds relais du nœud i est défini comme suit :

$$FS_i(S) = \{j \in NS_i / dist(i, S) - dist(j, S) > 0\} \quad (4.8)$$

Où $dist(i, S)$ et $dist(j, S)$ sont les distances Euclidiennes entre i et S , j et S respectivement.

- La vitesse de progression du paquet vers la destination S pour chaque nœud j de $FS_i(S)$:

$$Speed_{ij}(S) = \frac{dist(i, S) - dist(j, S)}{Délai_{ij}} \quad (4.9)$$

- La probabilité que le paquet atteigne S si i relaie le paquet au nœud j :

$$RP_{ij}^S = (1 - e_{ij})(1 - e_{ij})^{\lceil \frac{dist(j, S)}{dist(i, j)} \rceil} \quad (4.10)$$

Où e_{ij} est le taux de paquets perdus envoyés à j .

• La probabilité totale que le paquet soit reçu à la destination S , est initialisée à 0 puis mise à jour comme suit :

$$TRP_{new} = 1 - (1 - TRP_{old})(1 - RP_{ij}^S) \quad (4.11)$$

4.3.2 Table de voisinage et paquets de contrôle

Afin de tenir compte de la consommation d'énergie pendant le processus du routage, l'information sur l'énergie résiduelle est injectée dans les paquets de contrôle qui sont périodiquement diffusés par chaque nœud dans son voisinage. Ces paquets ont maintenant la structure suivante comme indiqué par la figure 4.10.

Paquet de contrôle	ID nœud source	Position	Info	TTL	ABS	Energie résiduelle
--------------------	----------------	----------	------	-----	-----	--------------------

Figure 4.10 – Structure d'un paquet de contrôle du protocole EQBSA-MMSPEED

Quand un nœud reçoit un paquet de contrôle, il met à jour les différents champs de sa table de voisinage qui contient maintenant le champs de l'énergie résiduelle comme illustré par la figure 4.11.

ID du voisin	Position	Délai	ABS	Energie résiduelle
4	(22,11,0)	0.5	(12,30)	7

Figure 4.11 – Table de voisinage pour le protocole EQBSA-MMSPEED

4.3.3 L'algorithme de routage

Quand un nœud reçoit un paquet de données de classe de trafic l , il construit d'abord l'ensemble $FS_i(S)$, puis les sous-ensembles FS_{high} et FS_{low} qui contiennent respectivement les nœuds avec la vitesse de progression supérieure et inférieure à celle requise, notée $SetSpeed$. Par la suite, un score est attribué à chacun des nœuds du sous-ensemble FS_{high} . Ce score est en fait calculé sur la base de trois indicateurs : l'énergie résiduelle « Remaining Energy » (RE) au niveau du nœud considéré, l'espace disponible dans sa file d'attente ainsi que sa fiabilité représentée par son RP_{ij}^S . Nous proposons de calculer le score d'un nœud voisin j comme suit :

$$score(j) = \alpha.RP_{ij}^S + \beta.ABS_l(j) + (1 - \alpha - \beta).RE(j) \quad (4.12)$$

Où α et β sont des coefficients de pondération et ABS_l est l'information sur l'espace disponible dans le buffer de la file d'attente du nœud j au niveau l .

Une fois les nœuds triés selon les scores ainsi calculés, ils sont présentés à l'équation 4.11 un par un jusqu'à ce que le TRP_{new} atteigne la fiabilité requise pour la classe de trafic du paquet.

Lorsque le nœud ne parvient pas à trouver les nœuds de relais appartenant à FS_{high} , le protocole MMSPEED, d'une manière probabiliste, rejette le paquet ou le transmet au meilleur nœud dans le FS_{low} .

Ici, nous introduisons une nouvelle procédure appelée procédure de dernière chance « Last Chance Procedure » (LCP). Le but de cette procédure est d'essayer d'améliorer la fiabilité tout en considérant l'énergie résiduelle, même devant une telle situation.

La LCP consiste d'abord à diviser le sous-ensemble FS_{low} en deux sous-ensembles, à savoir

FS_{low}^{LC} et FS_{low}^{Rescue} . Formellement, FS_{low}^{LC} peut être définie comme suit :

$$FS_{low}^{LC} = \{j \in FS_{low} / PS(j) \geq PS_{avg}\} \quad (4.13)$$

Par conséquent, la FS_{low}^{LC} contient les nœuds de FS_{low} qui sont en mesure d'offrir une vitesse de progression au paquet supérieure à la vitesse de progression moyenne sur l'ensemble FS_{low} . Si cette condition n'est pas vérifiée, le nœud appartient alors à FS_{low}^{Rescue} .

Par la suite, les nœuds de FS_{low}^{LC} sont classés en fonction de leurs scores calculés par l'équation 4.12. Ensuite, ils sont injectés dans l'équation 4.11 jusqu'à ce que le TRP_{new} atteigne la fiabilité requise pour la classe de trafic du paquet.

Dans le cas où les nœuds présentés ne sont pas suffisants pour satisfaire la fiabilité requise, les meilleurs nœuds en termes de fiabilité appartenant à FS_{low}^{Rescue} sont sélectionnés un par un.

Par conséquent, la sélection des nœuds d'une telle manière permet de (1) respecter les délais fixés puisque les nœuds sont choisis -quand possible- de la FS_{high} , (2) prolonger la durée de vie du réseau autant que possible par la prise en compte de l'énergie des nœuds et (3) améliorer la fiabilité par la considération au moment de la décision du routage du degré de congestion, ainsi que de la LCP.

4.4 Évaluation des performances

Dans ce qui suit nous évaluons la solution inter-couches proposée ; composée de l'encodeur et du protocole de routage décrits dans les sections 4.2 et 4.3 respectivement. L'évaluation est menée sur deux niveaux. En premier lieu nous évaluons le schéma d'encodage en termes d'efficacité énergétique en transmission et de qualité vidéo. En second, nous évaluons la solution inter-couches dans sa totalité ainsi que le protocole de routage EQBSA-MMSPEED vis à vis à ses prédécesseurs QBSA-MMSPEED et MMSPEED, pour le support des flux vidéo générés par le schéma d'encodage proposé.

4.4.1 Évaluation du schéma d'encodage

Les simulations ont été réalisées en utilisant la séquence Hall_Monitor en résolution Quarter Common Intermediate Format (QCIF) composée de 300 images. Nous utilisons notre implémentation modifiée du JM18.4 de la norme d'encodage vidéo H.264/AVC. Les FR relatifs au mode « standby » et au mode « rush » sont fixés à 5 et 10 images par secondes respectivement.

Nous nous intéressons à l'étude de quatre cas de figure pour comparaison :

- noFRQPOnly désigne la séquence encodée en intra avec un QP donné sans ajustement du FR,
- FRQPOnly désigne le cas précédent avec ajustement du FR,
- FRnoROIFS désigne le cas précédent avec application de la sélection fréquentielle du BKGD uniquement,
- FRROIFS désigne le cas précédent avec application de la sélection fréquentielle de la ROI également.

Pour un équilibre du côté perceptuel entre les composantes fréquentielles horizontales et verticales, le FSP du BKGD est fixé à 3 (Deknudt, 2011) et lorsque la sélection fréquentielle est appliquée sur la ROI, il est fixé à 6. D'autres valeurs peuvent bien sur être envisagées. Nous utilisons le « Peak Signal-to-Noise Ratio » (PSNR) comme métrique de qualité qui est définie par :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{(X_{max}^{init})^2}{EQM} \right) dB \quad (4.14)$$

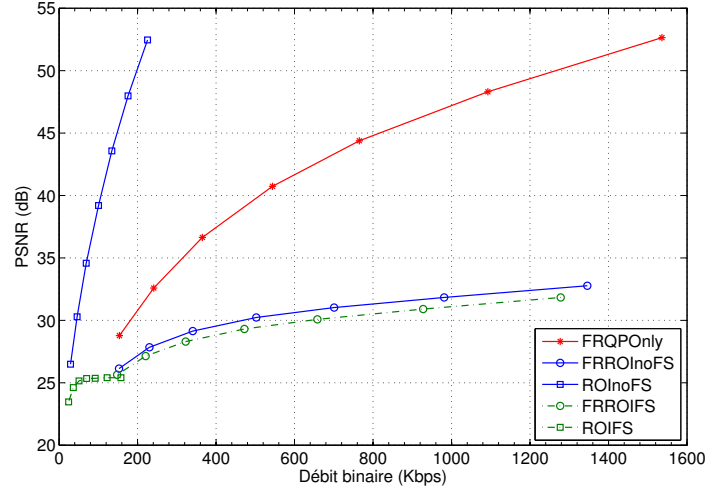


Figure 4.12 – Évolution des courbes débit-distorsion pour les différents cas étudiés

Où X_{max}^{init} est la valeur maximale d'un pixel de l'image initiale. Cette valeur est égale à 255 puisque les images sont généralement codées sur 8 bits. Le terme EQM représente l'erreur quadratique moyenne qui est donnée par :

$$EQM = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij}^{init} - X_{ij}^{rec})^2 \quad (4.15)$$

Où M et N sont la hauteur et la largeur des images respectivement, X_{ij}^{init} et X_{ij}^{rec} représentent la valeur du pixel à la position (i, j) dans l'image initiale et reconstruite respectivement. Pour calculer le PSNR, dans le cas où le FR est réduit par rapport au FR initial, nous répercutons cette réduction sur la séquence initiale afin d'avoir le bon nombre de d'images et la bonne concordance.

Évaluation de la qualité de la vidéo

La figure 4.12 rapporte l'évolution de la courbe débit-distorsion pour les différents cas de figure, ainsi que les courbes relatives à leur ROI respectives illustrées par des carrés. Chaque point est une réalisation à un QP donné qui varie de 40 à 10 à pas de 5. Pour des raisons de lisibilité, nous ne traçons pas la courbe concernant le cas noFRQPOnly qui a besoin d'un débit minimal de 785.7 Kbps. La figure montre que l'ajustement du FR permet de réduire le débit par exemple à 241.2 Kbps pour un PSNR global de 32.59 dB. Lorsque la sélection fréquentielle est appliquée à la ROI la réduction du débit comparant à noFRQPOnly atteint 84%.



Figure 4.13 – De gauche à droite : noFRQPOnly, FRROInoFS, FRROIFS à QP=25

Pour le cas FRROInoFS, malgré une réduction de la qualité globale, la ROI est maintenue à une haute qualité. Nous observons l'effet du FMO qui fait diminuer légèrement (en comparant ROInoFS et FRQPOnly) les valeurs du PSNR de la ROI. Ceci est dû au fait que la prédiction

intra des macroblocs n'est pas réalisée de la même manière, vu que quand le FMO est utilisé la prédiction se fait exclusivement à partir de blocs appartenant à une même région. Néanmoins, la qualité visuelle est identique (voir figure 4.13). Lorsque l'on compare FRROIFS et FRROInoFS nous observons que les valeurs du PSNR global (cercles) sont proches les unes des autres, tandis que les valeurs du PSNR de leurs ROI sont très différentes. Bien entendu, cette diminution de la qualité est due à l'application de la sélection fréquentielle. Cette diminution des valeurs de PSNR peut s'expliquer par le fait que la région d'intérêt est logiquement très riche en termes de contenu (objets, textures ...) et est donc caractérisée comme un contenu vidéo à haute énergie. Par conséquent, la suppression des coefficients qui sont des valeurs sûrement non nulles conduit à ce résultat. La qualité visuelle est contrôlée pour rester acceptable, tout en réduisant le débit binaire.

Évaluation de l'efficacité énergétique

Dans ce qui suit nous évaluons l'efficacité énergétique du schéma proposé dans un RCVSF. Le premier test consiste à considérer un réseau multi-sauts sans contrainte de bande passante, en fixant le QP à 20. Nous étudions alors l'énergie consommée par image lors de la transmission vers la destination en faisant varier le nombre de sauts. Dans ce réseau nous considérons que les nœuds sont espacés de 10 mètres. L'énergie consommée pour transmettre un seul bit peut être approchée par le modèle suivant (Heinzelman *et al.*, 2000) :

$$E_{Tx} = E_{elec} + \epsilon_{fs} \times d^2 \quad (4.16)$$

Où ϵ_{fs} est l'énergie consommée par l'amplificateur pour transmettre à courte distance, E_{elec} est l'énergie dissipée dans le circuit électronique pour transmettre et recevoir le signal et d est la distance entre l'émetteur et le récepteur. E_{elec} est fixée à $50nJ/bit$ et ϵ_{fs} à $0.1nJ/bit/m^2$ (Heinzelman *et al.*, 2000; Boluk *et al.*, 2011c). L'énergie totale pour transmettre sur N sauts est alors donnée par (Ullah *et al.*, 2011) :

$$E_N = E_{Tx} \times N + E_{Rx} \times (N - 1) \quad (4.17)$$

Où E_{Tx} et E_{Rx} sont respectivement l'énergie consommée par un nœud pour émettre et recevoir le train binaire encodé. Nous supposons que E_{Rx} est égale à E_{elec} .

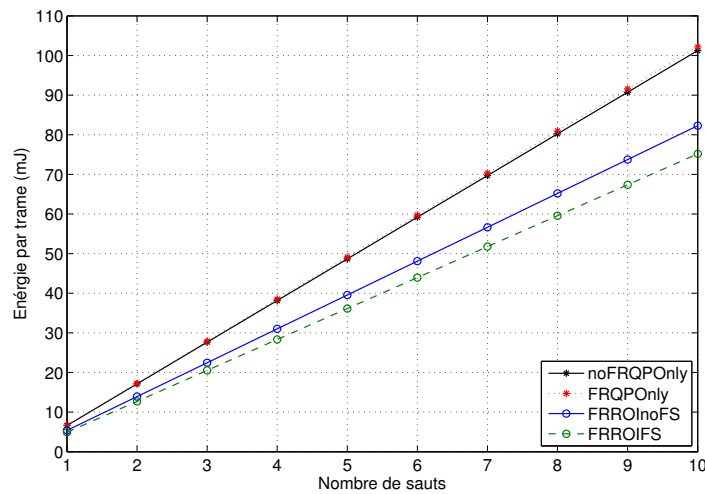


Figure 4.14 – Énergie cumulative consommée par image pour N sauts

La figure 4.14 présente l'efficacité énergétique du schéma d'encodage proposé. En fait, on

peut voir clairement l'effet de la sélection fréquentielle du BKGD qui réduit la quantité d'énergie consommée pour la transmission de l'image. En outre, l'application de la sélection fréquentielle permet d'atteindre une réduction de l'énergie consommée par image de 30%, mais avec une distorsion visuelle contrôlée.

Dans un deuxième test, nous considérons un réseau où la source est loin de 4 sauts de la destination (*i.e.* 3 nœuds intermédiaires) avec une contrainte de débit de 250 Kbps.

La figure 4.15 indique le nombre maximal de séquences vidéo que le réseau était en mesure de livrer à la destination jusqu'à l'extinction du nœud source. Il est à noter que l'énergie initiale de nœuds est fixée à 10 Joules (Mammeri *et al.*, 2008a). Comme indiqué sur cette figure, notre

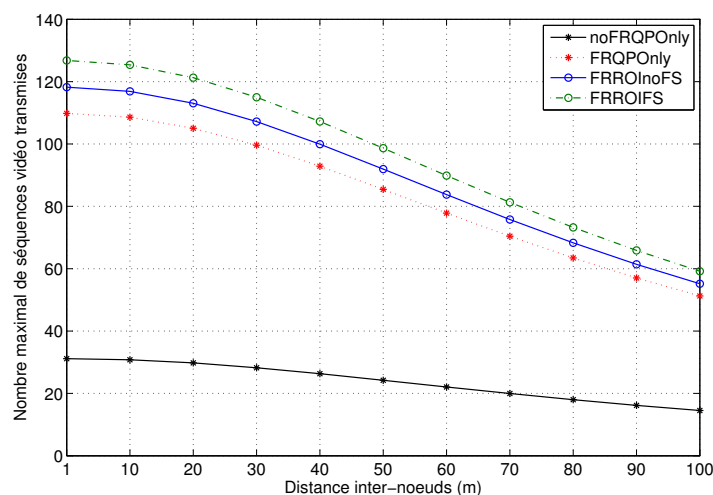


Figure 4.15 – Le nombre maximal de séquences vidéo reçues à la destination

schéma proposé, quel que soit le cas de figure, permet d'obtenir des performances élevées et prolonge la durée de vie du réseau, représentées par le nombre important de séquences vidéo successivement envoyées et reçues. L'extension moyenne de la durée de vie du réseau est de 2.8 fois celle du cas noFRQPOnly.

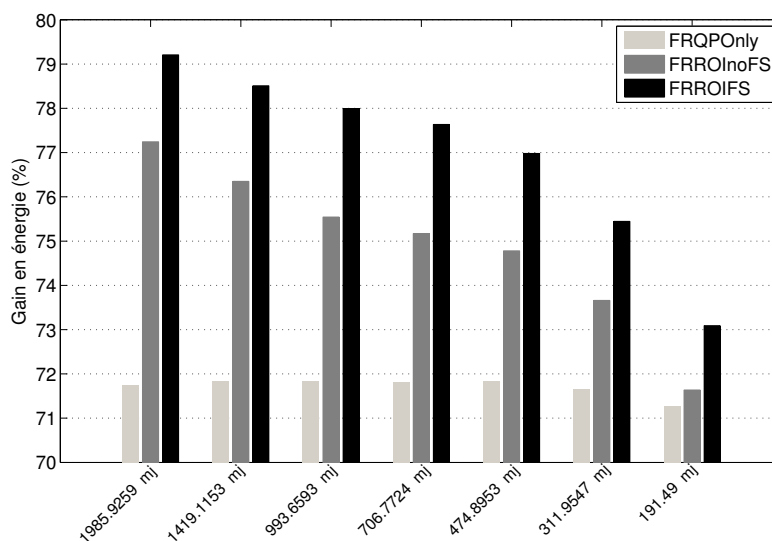


Figure 4.16 – Le gain moyen en énergie, par rapport au schéma noFRQPOnly, durant la phase de transmission de la vidéo pour différents QP allant de 10 à 40

La figure 4.16 résume le gain moyen par rapport au schéma classique noFRQPOnly, sur plusieurs distances inter-nœuds, en termes d'énergie consommée au niveau de la transmission de la vidéo, pour les différents cas de figures étudiés et sous différentes valeurs de QP (*i.e.* de 10 à 40 à pas de 5). Les valeurs représentées sur cette figure en abscisse correspondent aux énergies consommées par le cas de figure noFRQPOnly pour un QP donné. Cette figure rapporte le fait que plus la quantification est sévère (*i.e.* QP élevé), plus le gain en énergie, par rapport au schéma noFRQPOnly, diminue. Cependant, le gain est maintenu autour de 72% pour la plus grande valeur de QP considérée.

4.4.2 Évaluation de la solution inter-couches

Afin d'évaluer la solution proposée, nous avons effectué plusieurs simulations en utilisant le simulateur de réseau JSIM (Sobeih *et al.*, 2006). Nous avons considéré 100 nœuds uniformément déployés dans une zone d'intérêt où 50% d'entre eux sont des nœuds vidéo. Nous utilisons le modèle énergétique d'une carte sans fil AT& T Wavelan PCMCIA, implémenté dans le même simulateur. La puissance de transmission est fixée à $8.5872e^{-4}W$ pour un rayon de transmission de 40m. Le schéma d'encodage sur lequel porte le test est celui de FRROIInoFS.

En premier, les nœuds commencent l'échange de paquets de contrôle pour une durée donnée XD . Ensuite, tous les nœuds vidéo commencent le mode « standby » en capturant la scène selon FR faible FR_{SM} , et la compresse en utilisant un QP donné. Chaque image est ensuite subdivisée en un nombre de paquets à être acheminés vers le récepteur en fonction d'un débit de paquets par seconde donné, PR_{SM} .

Au moment de l'événement, le premier nœud l'ayant détecté passe en mode « rush » et adopte un FR supérieur FR_{RM} , alors que les autres nœuds vidéo demeurent sur le mode « standby ». Chacun des macroblocs des images capturées est classé ROI ou BKGD grâce à la MBAmapping de l'option FMO. La MBAmapping est transmise dans des NALU PPS pour indiquer au décodeur la répartition des groupes de slices dans l'image. La région BKGD est ensuite sélectionnée en fréquence en utilisant le paramètre FSP . Par la suite, après encodage complet, la ROI et le BKGD sont encapsulés dans des paquets à être acheminés vers le Sink selon un débit de paquets PR_{RM} , sous contraintes de fiabilité (DR_{ROI} et DR_{BKGD}) et délai ($Délai_{ROI}$ et $Délai_{BKGD}$) appropriés. En effet, l'utilisation du FMO permet de séparer le flux en une série de NALU contenant des données ROI et une autre série de NALU contenant des données BKGD, et chaque NALU est encapsulée dans un paquet.

Pour la fiabilité des évaluations, les positions des nœuds vidéo, les débuts des modes « standby » et du mode « rush » sont désignés de manière aléatoire dans chaque réalisation. Nous nous assurons aussi que les intervalles de transmission se chevauchent afin d'évaluer les solutions en études en présence de situations de congestion. Nous évaluons les performances de l'approche proposée lors de la transmission de la vidéo jusqu'à ce que le dernier paquet livrable atteigne le Sink. Le tableau 4.1 indique les paramètres de simulation utilisés.

La figure 4.17 rapporte le nombre moyen de nœuds vivants lors de la transmission de la vidéo sur 100 réalisations. Nous comparons ici trois protocoles de routage : MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006), QBSA-MMSPEED proposé dans le chapitre 3 et son extension proposée dans ce chapitre nommée EQBSA-MMSPEED. Comme on peut le voir, le QBSA-MMSPEED améliore le protocole MMSPEED en consommation énergétique, du fait qu'à chaque instant le nombre de nœuds vivants du protocole QBSA-MMSPEED est supérieur à celui de MMSPEED. Ceci peut être expliqué par l'équilibrage de charge introduit par la considération du nombre de paquets dans la file d'attente des nœuds voisins en plus de la vitesse de progression qu'ils offrent au paquet. De ce fait, QBSA-MMSPEED à recours moins fréquemment aux mêmes nœuds puisque les scores changent continuellement. Quant au protocole EQBSA-MMSPEED, il prolonge la durée de vie du réseau d'une moyenne de 33%. Ce résultat est principalement dû à la prise en

Tableau 4.1 – Paramétrage des simulations

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Séquence	Foreman	Format vidéo	QCIF(176x144)
FR_{SM}	1 (fps)	FR_{RM}	3 (fps)
QP	32	FSP	6
Ratio de la ROI	0.5	XD	50 (s)
PR_{SM}	5 (pps)	PR_{RM}	10 (pps)
Paquets par image	33	Taille de la file	100 (Pckts)
QBSA-MMSPEED(α)	0.7	EQBSA-MMSPEED(α, β)	(0.3,0.2)
DR_{ROI}	0.7	DR_{BKGD}	0.3
$Délai_{ROI}$	1 (s)	$Délai_{BKGD}$	2 (s)
Rayon de communication	40 (m)	Terrain	200 x 200 (m ²)
Bandwidth	250 (kbps)	Energie initiale	10 (Joules)
Seuil de capture	10 (dB)	Seuil de détection de porteuse	$1.559e^{-11}$ (W)

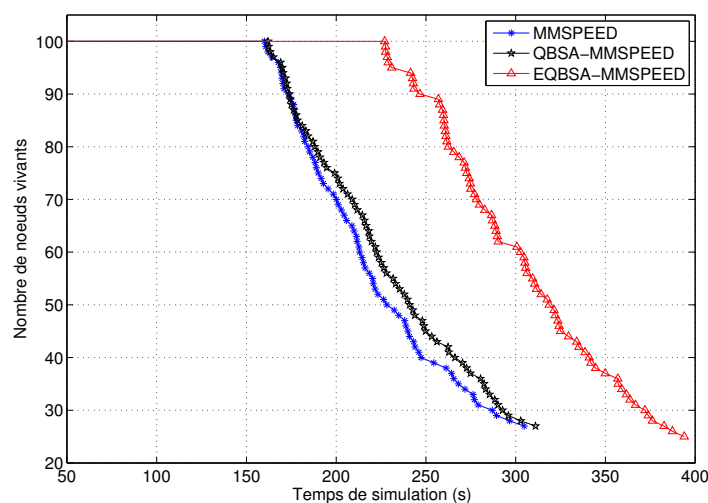


Figure 4.17 – Nombre de nœuds en vie pour chaque protocole

considération de l'énergie résiduelle du prochain nœud lors du processus de routage. En ajoutant ceci à la considération du nombre de paquets dans la file d'attente, d'avantage d'équilibrage de charge est réalisé menant à l'extension de la durée de vie du réseau. En moyenne, en tenant compte des énergies dissipées par toutes les transmissions dans le réseau lors de nos simulations (*i.e.* paquets de contrôle, paquets routés, émis et retransmis, ...), le réseau dans sa globalité consomme 0.87 joules par image (J/I) quand le protocole MMSPEED est utilisé, 0.8 J/I en adoptant le protocole QBSA-MMSPEED et 0.56 J/I lorsque le protocole EQBSA-MMSPEED est considéré.

La figure 4.18 rapporte les résultats en termes de délai de réception moyen durant le mode « rush » sur les 100 réalisations. On peut observer que les trois protocoles traitent la ROI et le BKGD différemment. En outre, on observe une légère amélioration dans les délais atteints par le EQBSA-MMSPEED. Ceci peut être expliqué par la prise en compte de l'énergie résiduelle, qui permet de soulager les nœuds ayant un délai et un nombre de paquets dans la file d'attente appropriés pour ne pas les conduire à l'état de congestion, ayant donc moins de paquets à traiter. Le protocole EQBSA-MMSPEED introduit une amélioration moyenne en délai de 5% par rapport au protocole QBSA-MMSPEED et de 10% par rapport au protocole MMSPEED.

La figure 4.19 représente le taux de paquets reçus en mode « rush » en moyenne sur les 100 réalisations. Nous pouvons observer que le protocole proposé EQBSA-MMSPEED offre des performances intéressantes et cela est dû à quatre raisons principales. La première est, comme

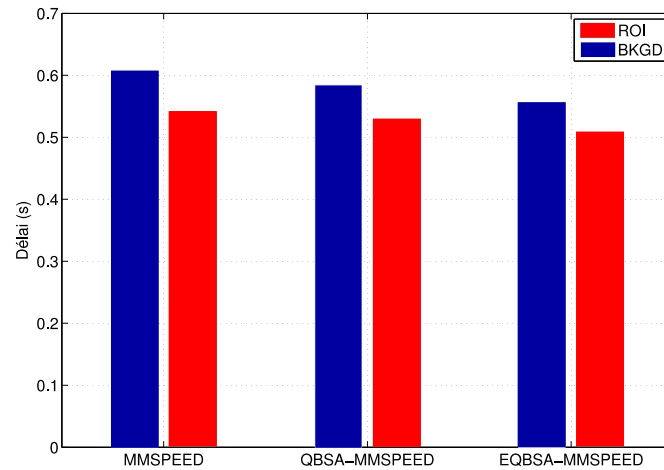


Figure 4.18 – Les délais de réception moyens observés durant le mode « rush » pour chaque protocole

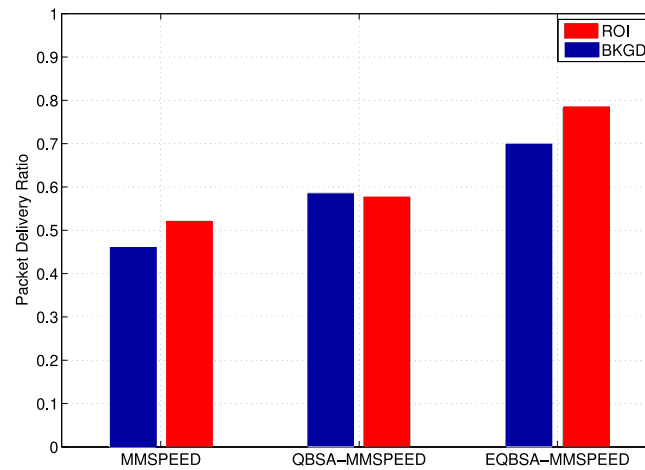


Figure 4.19 – Le taux de paquets reçus durant le mode « rush » pour chaque protocole

dit précédemment, l'introduction de nouvelles métrique permet plus d'équilibrage de charge. La seconde est que, même dans le pire des cas, la perte de paquet est évitée autant que possible tout en tenant compte de la consommation d'énergie, grâce à la procédure de dernière chance proposée (LCP). La troisième est liée au fait que négliger l'énergie résiduelle, dans les protocoles MMSPEED et QBSA-MMSPEED, conduit à l'accélération de la mort des nœuds. Ce fait crée des vides spécialement dans les régions qui sont proches du Sink qui se retrouve alors isolé. Par conséquent, ceci conduit à l'augmentation de la perte de paquets. Finalement, un nœud source joue également le rôle de nœud relai pour les autres nœuds. Ne pas tenir compte de son énergie résiduelle accélère sa mort, conduisant dans certains cas à ne pas pouvoir transmettre la totalité du flux vidéo encodé. Le protocole EQBSA-MMSPEED introduit une amélioration moyenne en PDR de 23% par rapport au protocole QBSA-MMSPEED et de 34% par rapport au protocole MMSPEED.

Enfin, la figure 4.20 rapporte les performances de l'approche inter-couches proposée avec EQBSA-MMSPEED contre MMSPEED Felemban *et al.* (2006) et QBSA-MMSPEED en termes de qualité de la vidéo exprimée en PSNR. Les variations de qualité perçues sur cette figure sont dues aux pertes de paquets dans le réseau. Quelques résultats visuels, correspondant à la figure 4.20, sont rapportés dans le tableau 4.2. Il est à noter qu'à la réception un procédé simple

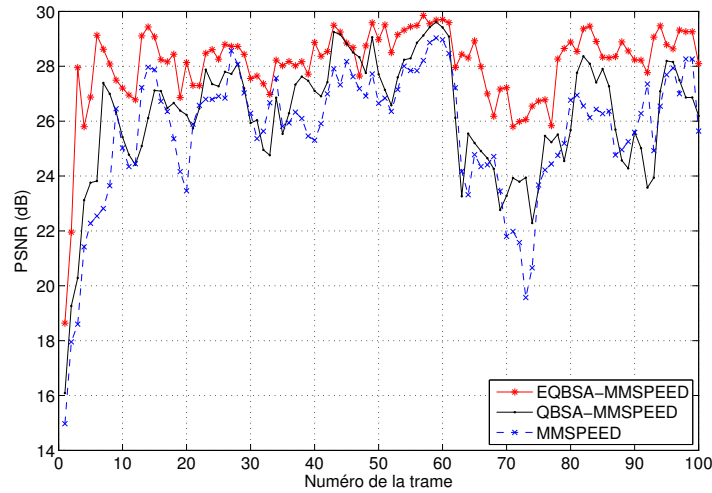


Figure 4.20 – La qualité de la vidéo reçue pour chaque protocole

de dissimulation d'erreur spatiale est appliqué, qui consiste à recopier la partie correspondante de l'image précédente. Quand le taux de perte de paquets est important, ce procédé n'est plus d'une grande efficacité puisque la dissimulation est faite depuis des images elles-mêmes sujettes aux pertes. Le protocole EQBSA-MMSPEED proposé, grâce à sa fiabilité et son efficacité énergétique améliorées, permet d'augmenter la qualité vidéo en moyenne de 3 dB par rapport à ses prédécesseurs, MMSPEED et QBSA-MMSPEED.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une première solution inter-couches pour le support de flux vidéo dans les RCVSF est proposée. L'approche repose sur un schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie. Il est basé sur la norme H.264/AVC et utilise des techniques simples pour être économes en énergie. Enfin, il délivre deux catégories de macrobloc à savoir la ROI et le BKGD. Nous avons montré par des simulations que le cas avec variation du FR et sans application de la sélection fréquentielle sur la ROI (*i.e.* FRROInoFS) offre une qualité satisfaisante d'environ 30 dB avec un débit de 230.3 Kbps et une efficacité énergétique de 73.6% par rapport à un schéma classique. D'un autre côté, à même débit binaire, FRROIFS réalise une qualité globale de 25 dB, mais avec une efficacité énergétique de 75.4%. Ainsi, nous avons prouvé son efficacité en termes de qualité et d'efficacité énergétique. Nous proposons par la suite un protocole de routage pour acheminer les flux ainsi générés, que nous nommons EQBSA-MMSPEED. Ce dernier adopte une fonction d'attribution de scores étendue, qui pondère entre l'énergie résiduelle des nœuds, l'espace disponible dans leurs files d'attente ainsi que leur délai. De plus, ce protocole propose une procédure dont le but est de repousser le rejet du paquet autant que possible. Les résultats des évaluations réalisées sur le simulateur JSIM (Sobeih *et al.*, 2006) montrent que EQBSA-MMSPEED atteint 33% d'extension de durée de vie moyenne et introduit une amélioration moyenne en délai de 5% par rapport à QBSA-MMSPEED et de 10% par rapport à MMSPEED. Par ailleurs, EQBSA-MMSPEED offre une amélioration moyenne en fiabilité de 23% comparé à QBSA-MMSPEED et de 34% comparé à MMSPEED. En termes de qualité vidéo, l'approche inter-couches utilisant EQBSA-MMSPEED comme protocole de routage augmente de 3 dB la qualité moyenne de la vidéo reçue par rapport à MMSPEED et QBSA-MMSPEED. Le délai moyen assuré en utilisant le protocole EQBSA-MMSPEED est 0.52s et le PDR moyen est 0.74.

Dans la partie Partie III, nous améliorons cette solution en l'enrichissant de modèles mathématiques afin de pouvoir déterminer la bonne configuration de l'encodeur en termes de trois

Tableau 4.2 – Résultats visuels de l’approche inter-couches en adoptant les protocoles MMSPEED, QBSA-MMSPEED et EQBSA-MMSPEED

MMSPEED	QBSA-MMSPEED	EQBSA-MMSPEED
Image 35		
		
Image 64		
		
Image 73		
		
Image 89		
		

niveaux de contrôle : FR, QP et FSP. De plus, nous tiendrons compte de l’énergie consommée durant le phase d’encodage, chose qui a été négligée jusqu’à présent, ainsi que dans un grand nombre de travaux de recherche (Felemban *et al.*, 2014; Shah *et al.*, 2012; Boluk *et al.*, 2011b; Politis *et al.*, 2008; Aghdasi *et al.*, 2008). De ce fait, nos modèles mathématiques pourront prédire, étant donné un triplet de configuration, quelles seront les énergies et les distorsions observées pour l’encodage ainsi que pour la transmission. Enfin, nous proposerons un nouveau protocole de routage qui mettra l’accent sur l’efficacité énergétique et la fiabilité plus que sur le délai. Sur la base de ces modèles, de l’énergie résiduelle ainsi que de la fiabilité perçue au niveau du réseau, l’encodeur adaptera ses paramètres d’encodage afin d’offrir la meilleure efficacité énergétique de bout-en-bout sous contrainte de qualité vidéo.

Partie III

*Vers une approche inter-couches
efficace en énergie sous contrainte
de qualité vidéo dans les RCVSF*

MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE ET DE LA DISTORSION

Sommaire

5.1	Introduction	87
5.2	Modélisation de la consommation de l'énergie	88
5.2.1	Énergie d'encodage	88
5.2.2	Énergie de transmission	95
5.2.3	Impact du FR sur l'énergie consommée	99
5.3	Modélisation de la distorsion	103
5.3.1	La distorsion d'encodage	103
5.3.2	Distorsion de transmission	107
5.4	Conclusion	111

5.1 Introduction

LA motivation de notre travail est de proposer une approche inter-couches efficace en termes d'énergie pour la transmission du flux vidéo dans les RCVSF. Plus précisément, nous proposons un encodeur vidéo qui intègre des modèles de prédiction de consommation de l'énergie et de la distorsion. L'unique modèle mathématique qui représente fidèlement ces quantités est utilisé par He *et al.* (2009) et Zou *et al.* (2011), qui a été d'abord développé et proposé par He *et al.* (2005b) puis raffiné dans (He et Wu, 2006), pour le codec vidéo MPEG-4 (*cf.* chapitre 2 section 2.3.2 équation 2.3). Néanmoins, les auteurs dans He *et al.* (2008a) soulignent que leur approche analytique décrite dans He *et al.* (2005b) ne peut pas être facilement étendue à d'autres encodeurs vidéo tels que le standard H.264/AVC. Ce constat est argumenté par le fait que l'analyse de l'impact des paramètres de contrôle sur l'énergie consommée devient très difficile lorsque le mécanisme d'encodage vidéo devient plus sophistiqué. Par conséquent, ils proposent dans He *et al.* (2008a) une approche opérationnelle empirique hors-ligne pour l'analyse et la modélisation de la consommation d'énergie, qui peut être appliquée à des encodeurs vidéo génériques. Elle consiste à la prise en compte des paramètres qui sont responsables de consommer plus ou moins d'énergie au cours de la compression du signal vidéo. Dans notre cas, ces paramètres sont le débit d'images par seconde « Frame Rate » (FR), le paramètre de quantification « Quantization Parameter » (QP) et le paramètre de la sélection fréquentielle « Frequency Selectivity Parameter » (FSP).

Pour évaluer l'influence des paramètres QP et FSP sur l'énergie et la distorsion lors des processus d'encodage et de transmission, de nombreux tests sur plusieurs séquences vidéo ont été menés. Ces dernières sont encodées par notre version modifiée de l'implémentation JM18.4 de la norme H.264/AVC, comme illustré par la figure 5.1, dans son profil de base « Baseline ». Plus précisément, huit séquences vidéo (voir figure 5.2), Hall, Foreman, Football, Ice en résolution QCIF (176 × 144), et City, Bus, Stefan et News en résolution Common Intermediate

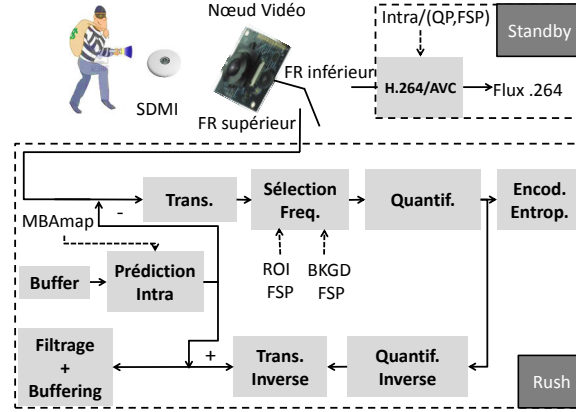


Figure 5.1 – Le diagramme en bloc du schéma d'encodage proposé

Format (CIF) (352×288) sont utilisées. Chaque séquence est encodée à 14 différents paramètres de quantification (QP) et 16 différents paramètres de sélection fréquentielle (FSP) à 30 Hz. Dans le reste de ce chapitre, les courbes pleines représentent les modèles proposés et les points correspondent aux mesures.

5.2 Modélisation de la consommation de l'énergie

Dans cette section, nous analysons l'évolution de l'énergie consommée par le nœud source puis nous développons des modèles de consommation d'énergie qui lient l'énergie aux paramètres QP et FSP. A notre connaissance, aucun précédent travail n'a considéré cette combinaison particulière de paramètres de contrôle.

Le nœud source vidéo, tout au long de son cycle de vie, effectue plusieurs opérations d'encodage et de transmission de flux vidéo. Par conséquent, l'énergie consommée par un nœud source vidéo, notée E_{Total} , peut être approchée par :

$$E_{Total} = E_E + E_T \quad (5.1)$$

où E_E et E_T correspondent respectivement à l'énergie consommée pour l'encodage et la transmission du flux vidéo.

5.2.1 Énergie d'encodage

L'énergie consommée pour le traitement d'une tâche spécifique peut être approchée, tel que présenté par Rui *et al.* (2012), par une fonction dépendante du nombre de cycles d'horloge, donnée comme suit :

$$E_{Proc}(N) = N_{cyc} \cdot C_{total} \cdot V_{dd}^2 + V_{dd} \cdot (I_0 \cdot e^{\frac{V_{dd}}{n \cdot V_T}}) \left(\frac{N_{cyc}}{freq} \right) \quad (5.2)$$

Où N_{cyc} est le nombre de cycles d'horloge, C_{total} est la capacité moyenne commutée par cycle, V_{dd} est la tension d'alimentation, I_0 est le courant de fuite, $freq$ est la vitesse d'horloge, V_T est la tension thermique et n une constante liée au processeur. Toutes ces variables sont liées au processeur, qui est dans notre cas un Intel 2.93 GHz Core 2 Duo.

$$N_{cyc} = T_{Proc} \cdot freq \quad (5.3)$$



Figure 5.2 – Les séquences de test utilisées

Où T_{Proc} est le temps de traitement de la tâche, qui est dans notre cas le temps d'encodage retourné par l'encodeur.

Pour des mesures fiables et précises, nous contrôlons le fonctionnement de l'encodeur pour en faire le processus le plus prioritaire exécuté dans le microprocesseur (hors processus système). Une fois les mesures converties en énergie, elles sont normalisées par l'énergie maximale consommée.

La figure 5.3 montre le comportement de la consommation d'énergie normalisée mesurée au cours du processus d'encodage pour différents QP et FSP. Comme on peut le voir, pour un FSP donné, l'énergie mesurée et normalisée diminue quand le QP augmente. Le même comportement est observé lorsque FSP diminue pour un QP donné. Ces comportements peuvent être expliqués par le fait que lorsque l'on augmente le QP et diminue le FSP, d'avantage de coefficients

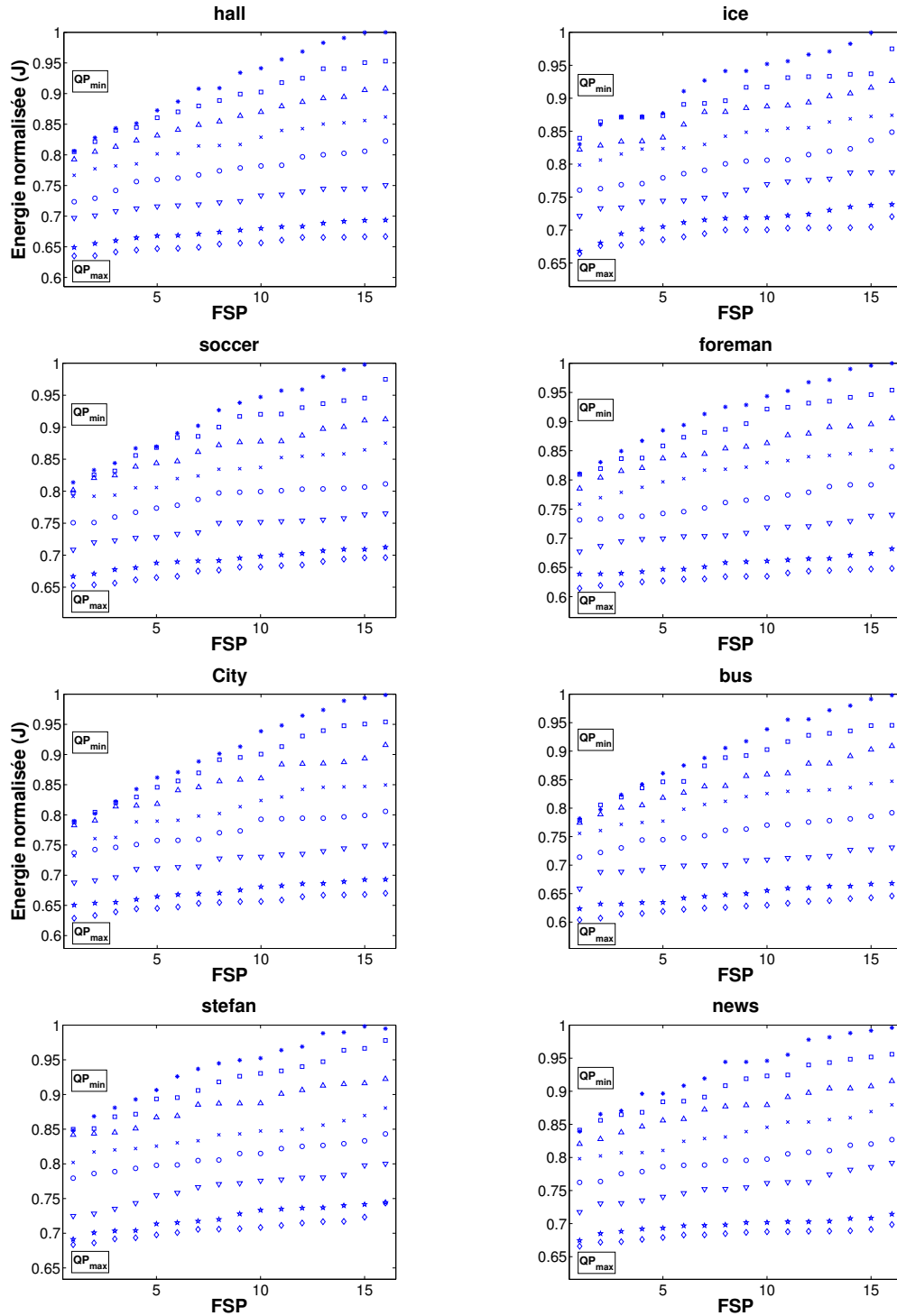


Figure 5.3 – Evolution de l'énergie d'encodage normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP

nuls sont générés, ce qui facilite l'encodage entropique qui suit, nécessitant un nombre réduit d'opérations. En fait, la figure 5.3 peut être interprétée comme une illustration du comportement de coefficients dépendants du couple (QP, FSP), par lesquels l'énergie maximale, atteinte pour le couple (QP_{min}, FSP_{max}) , est réduite. Pour chaque QP, la valeur maximale des coefficients est atteinte au $FSP = FSP_{max} = 16$, puis diminue vers la valeur minimale atteinte au $FSP =$

$$FSP_{min} = 1.$$

Ces observations suggèrent que ces coefficients, peuvent être générés par la fonction $C_{EE}(\cdot)$, comme suit :

$$C_{EE}(QP, FSP) = \alpha_{EE}(QP, FSP_{max}) \cdot \beta_{EE}(QP, FSP) \quad (5.4)$$

Le terme noté $\alpha_{EE}(QP, FSP_{max})$ exprime l'effet de la quantification sur l'énergie consommée normalisée au cours du processus d'encodage. La figure 5.4 rapporte les $\alpha_{EE}(QP, FSP_{max})$ mesurées. Nous pouvons remarquer que l'énergie diminue lentement lorsque le QP augmente. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la valeur du QP rend la quantification plus sévère. Ainsi, comme mentionné précédemment, des MBs avec d'avantage de coefficients nuls sont générés. Par conséquent, l'énergie consommée pendant l'encodage entropique CAVLC est diminuée. En fait, la figure 5.4 montre le comportement d'un facteur de réduction qui est QP-dépendant. Ce facteur atteint sa valeur maximale de 1 à $QP = QP_{min} = 0$, puis diminue lentement alors que le QP augmente, jusqu'à atteindre sa valeur maximale $QP = QP_{max} = 51$. Sur la base de ces constatations, nous proposons de modéliser la fonction $\alpha_{EE}(\cdot)$ comme suit¹ :

$$\alpha_{EE}(QP, FSP_{max}) = 2 - \exp(a \cdot QP) \quad (5.5)$$

Où a est un coefficient dépendant du contenu de la séquence vidéo obtenu en minimisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données mesurées et prédites. Le modèle de l'équation 5.5 permet de prédire les valeurs maximales atteintes pour chaque QP de la figure 5.3. Comme illustré sur la figure 5.4, le modèle proposé par l'équation 5.5 peut approcher les coefficients de réduction $\alpha_{EE}(\cdot)$.

Le terme $\beta_{EE}(QP, FSP)$ représente la réduction de la consommation d'énergie observée lors de la diminution du FSP pour un QP donné. La figure 5.5 illustre les $\beta_{EE}(QP, FSP)$ mesurés. D'après ces mesures, la forme fonctionnelle appropriée pour la fonction $\beta_{EE}(\cdot)$ doit répondre à certaines conditions :

1. $\forall QP$, si $FSP = FSP_{max}$ alors $\beta_{EE}(QP, FSP) = 1$
2. $\forall QP, \forall i, j$ ($i \neq j$), si $FSP_i > FSP_j$ alors $\beta_{EE}(QP, FSP_i) \geq \beta_{EE}(QP, FSP_j)$
3. $\forall QP, \forall FSP \forall i, j$ ($i \neq j$), si $QP_i > QP_j$ alors $\beta_{EE}(QP_i, FSP) \geq \beta_{EE}(QP_j, FSP)$

La condition (1) exprime le fait que lorsque la sélection fréquentielle est appliquée avec un FSP maximal, aucune réduction de la consommation d'énergie ne doit être observée. Par conséquent, la seule réduction de la consommation d'énergie devrait être en raison de la quantification, donnée par l'équation 5.5. La condition (2) représente le fait qu'augmenter le nombre de coefficients retenus dans la phase de la sélection fréquentielle s'accompagne d'un accroissement de la consommation d'énergie. Enfin, la condition (3) traduit l'effet couplé de la quantification et de la sélection fréquentielle sur l'énergie consommée de l'encodage. En effet, comme indiqué sur la figure 5.5, lorsque la quantification devient plus sévère l'effet de la sélection fréquentielle devient moins important.

A la base de ces observations, nous proposons la forme fonctionnelle suivante pour $\beta_{EE}(\cdot)$:

$$\beta_{EE}(QP, FSP) = \frac{1 - b \cdot e^{(c \cdot QP_{norm})} \cdot e^{(d \cdot (FSP_{norm}^*)^f)}}{1 - b \cdot e^{(c \cdot QP_{norm})}} \quad (5.6)$$

Où $QP_{norm} = \frac{QP}{QP_{max}}$, FSP^* est le dual de FSP ($FSP^* = FSP_{max} - FSP$) et $FSP_{norm}^* =$

1. Nous avons retenu par la suite pour l'équation 5.5 une modélisation empirique basée sur une décroissance exponentielle. Dans une seconde approche, il est possible de proposer une simplification par un modèle linéaire de la forme $1 - a \cdot QP$.

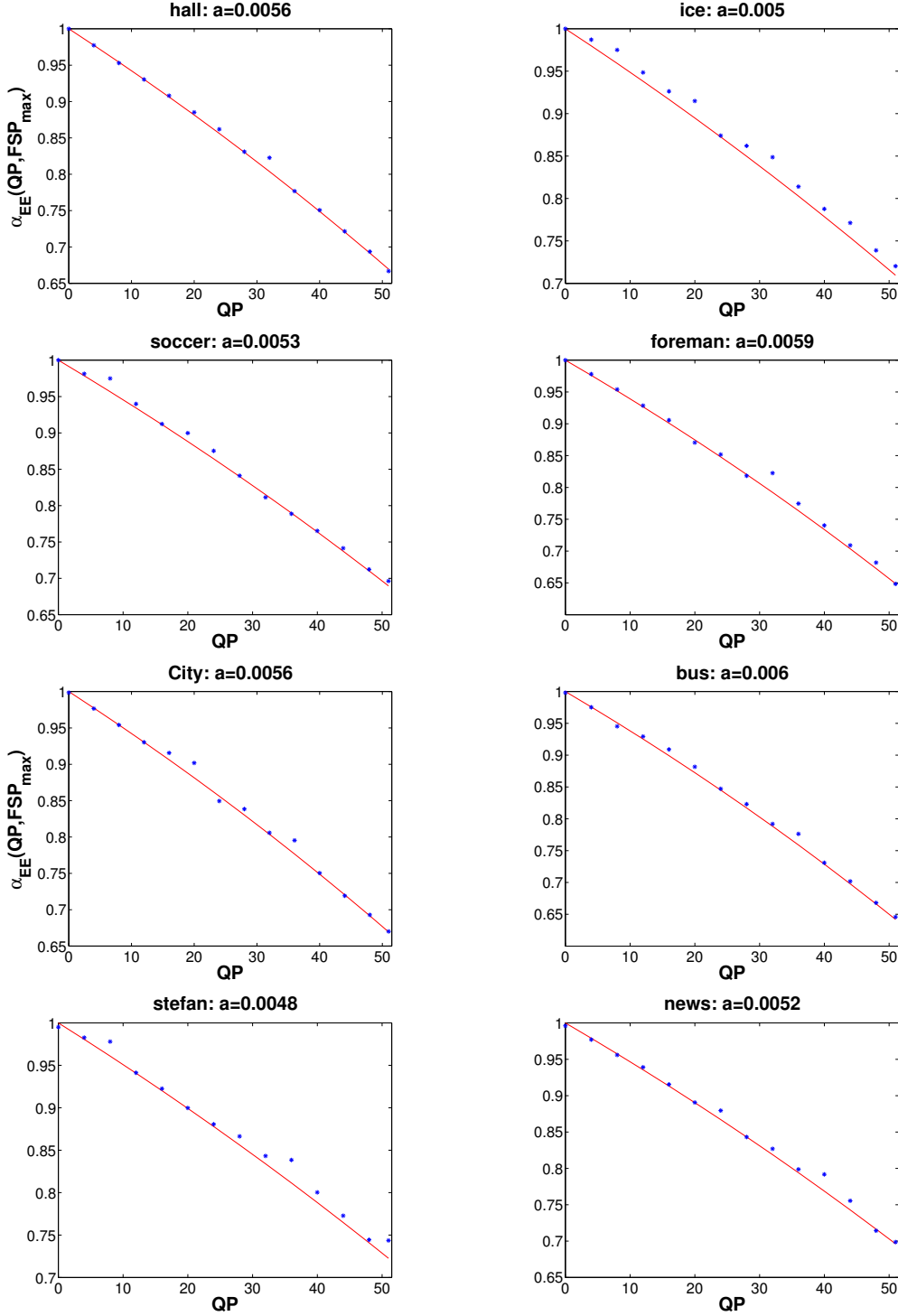


Figure 5.4 – Evolution des coefficients $\alpha_{EE}(QP, FSP_{max})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP

$\frac{FSP^*}{FSP_{max}^*}$. Les paramètres b et d sont dépendants du contenu. En mesurant l'énergie consommée pour les couples (0,1) et (51,1), et en fixant b à une valeur donnée, nous pouvons déduire la valeur exacte de d . D'après plusieurs tests, nous concluons que c peut être fixé à 1 et f fixé à 1.2. Comme on peut le voir sur la figure 5.5, le modèle proposé par l'équation 5.6 décrit fidèlement le comportement de $\beta_{EE}(\cdot)$.

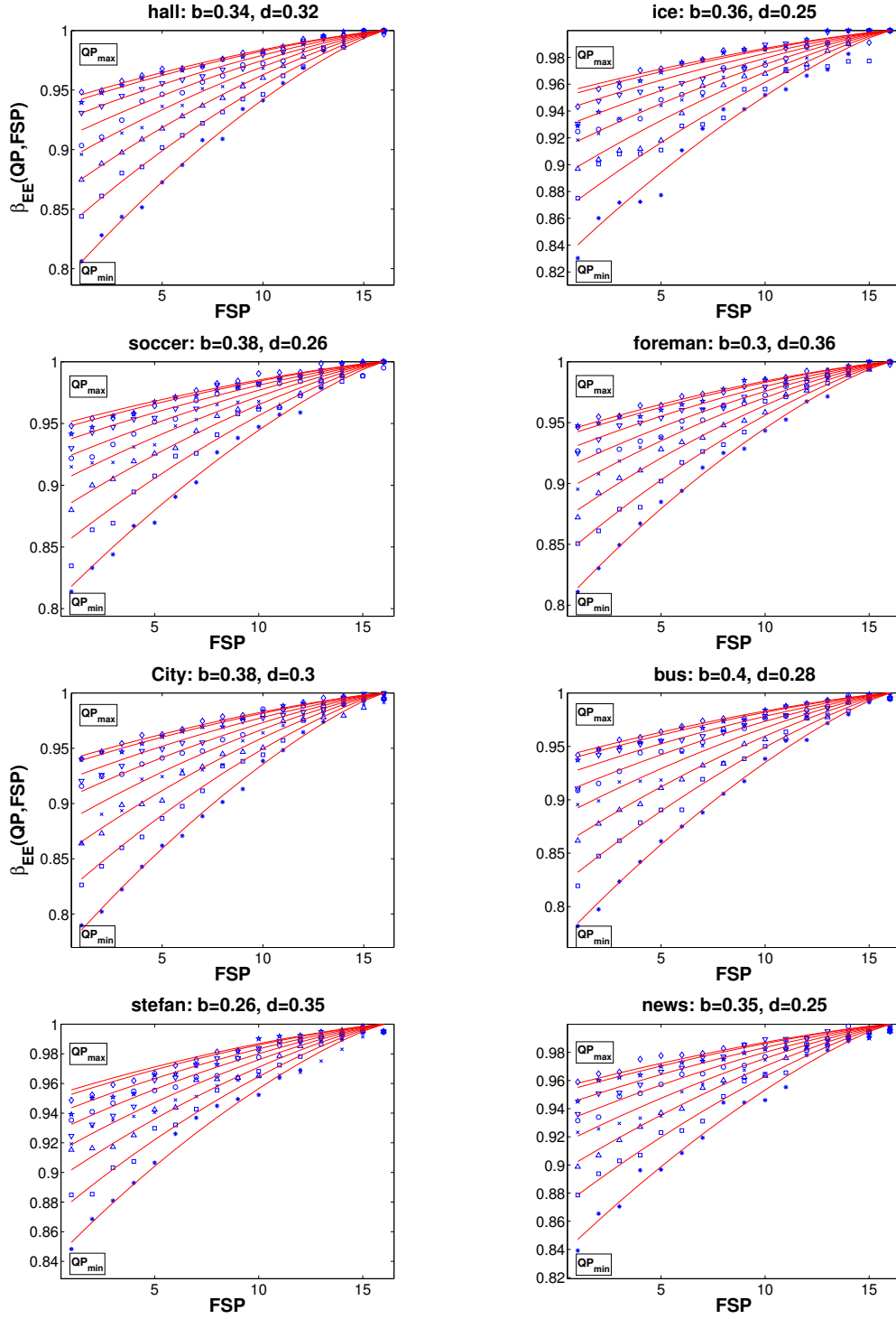


Figure 5.5 – Evolution des coefficients $\beta_{EE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

Finalement, le modèle global pour estimer la consommation d'énergie au cours du processus d'encodage vidéo, compte tenu du QP et du FSP, peut être formulé comme suit :

$$E_E(QP, FSP) = \max(E_E).C_{EE}(QP, FSP) \quad (5.7)$$

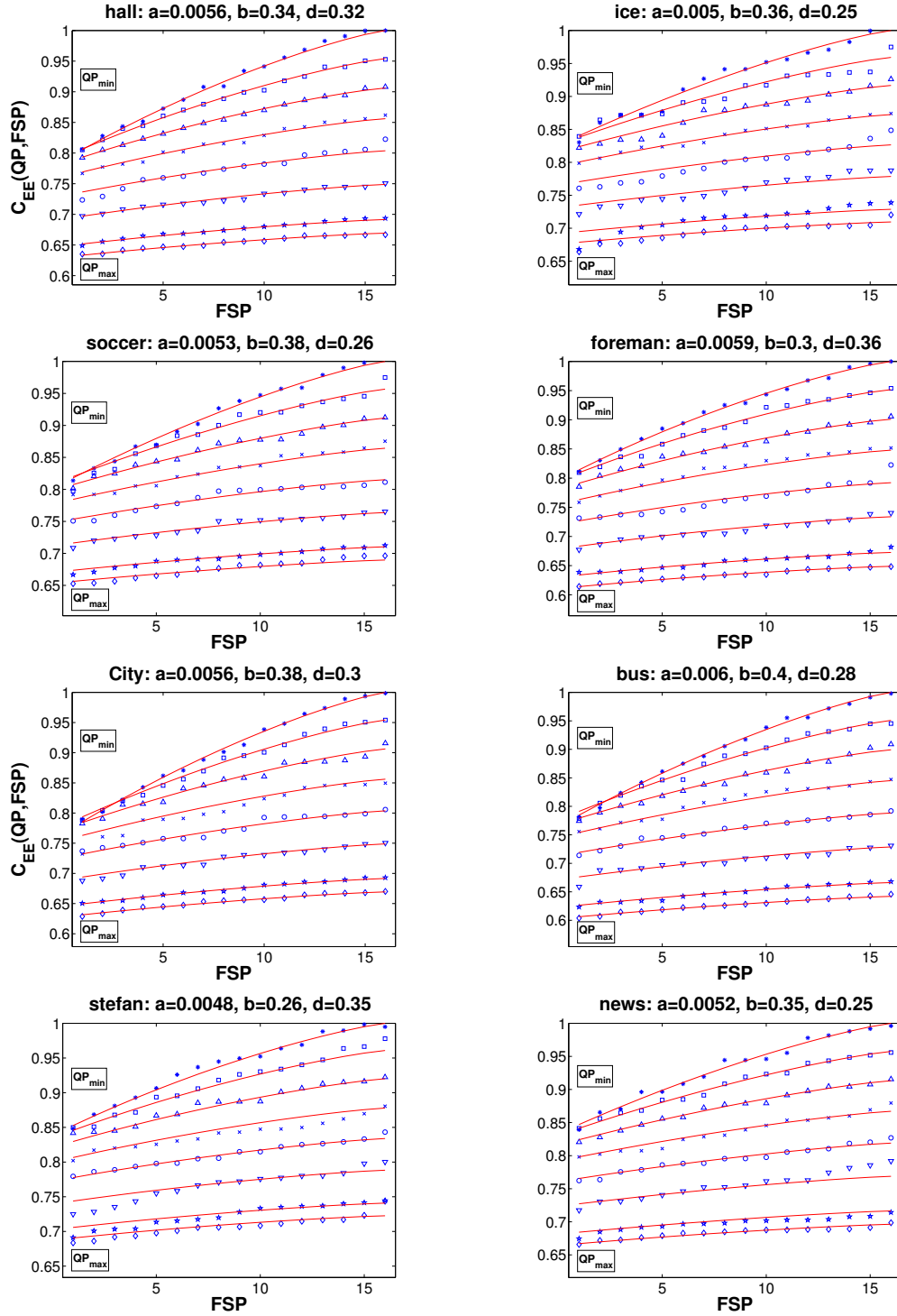


Figure 5.6 – Evolution des coefficients $C_{EE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

Encore plus explicitement :

$$E_E(QP, FSP) = E_E(QP_{min}, FSP_{max}) \cdot \alpha_{EE}(QP, FSP_{max}) \cdot \beta_{EE}(QP, FSP) \quad (5.8)$$

Il est à noter que $max(E_E)$ dépend principalement du contenu de la séquence vidéo, du QP_{min} ,

du FSP_{max} , du FR, ainsi que les caractéristiques du microprocesseur. L'impact du FR sur cette quantité sera traité dans la sous-section 5.2.3.

La figure 5.6 montre que le modèle global, proposé dans l'équation 5.8, approche l'énergie consommée durant l'encodage avec une erreur de prédiction moyenne de 6%.

5.2.2 Énergie de transmission

L'énergie consommée par bit au cours du processus de transmission est donnée par le modèle proposé dans Heinzelman *et al.* (2000) :

$$E_{Tx} = E_{elec} + \epsilon_{fs} \times d^2 \quad (5.9)$$

Où ϵ_{fs} est l'énergie consommée par l'amplificateur pour transmettre à courte distance, E_{elec} est l'énergie dissipée dans le circuit électronique pour transmettre et recevoir le signal et d est la distance entre le émetteur et le récepteur. Ainsi, l'énergie consommée pour transmettre à une distance donnée d avec ϵ_{fs} et E_{elec} fixés dépendra directement du nombre de bits total généré par l'encodeur.

La figure 5.7 présente l'énergie consommée normalisée recueillie durant la phase de transmission des tests effectués. La première remarque est que l'effet conjoint de la quantification et de la sélection fréquentielle sur l'énergie consommée pour la transmission est approximativement le même que celui observé dans le cas de l'énergie consommée pour l'encodage (figure 5.3). La seconde remarque est que la diminution de l'énergie consommée observée, lors de l'augmentation du QP et de diminution du FSP, est plus importante dans le cas de la transmission que celui de l'encodage, ce qui est un résultat logique. La raison en est que, pendant le processus de l'encodage, même si la présence de coefficients nuls rend le CAVLC plus simple, il y a cependant de l'énergie qui est dissipée pour le traitement (comparaison, comptage, ...). En outre, pour transmettre le signal encodé, l'efficacité énergétique observée est considérable en raison de l'efficacité de l'encodage.

Similaire à la sous-section 5.2.1, les points sur la figure 5.7 représentent l'évolution des coefficients dépendants du couple (QP, FSP) par lesquels l'énergie maximale, atteinte aussi pour le couple (QP_{min}, FSP_{max}), est réduite. Pour chaque QP, la valeur maximale des coefficients est atteinte pour FSP=FSP_{max}=16, puis diminue vers la valeur minimale atteinte pour FSP=FSP_{min}=1. Ces observations suggèrent que ces coefficients, peuvent être générés par la fonction $C_{TE}(\cdot)$ comme suit :

$$C_{TE}(QP, FSP) = \alpha_{TE}(QP, FSP_{max}) \cdot \beta_{TE}(QP, FSP) \quad (5.10)$$

Le terme $\alpha_{TE}(QP, FSP_{max})$ est en fait l'effet de la quantification sur la consommation d'énergie normalisée pendant le processus de transmission. La figure 5.8 rapporte les $\alpha_{TE}(QP, FSP_{max})$ mesurés. Comme on peut le voir, $\alpha_{TE}(\cdot)$, similaire à $\alpha_{EE}(\cdot)$, atteint son maximum à QP=QP_{min} et son minimum à QP=QP_{max}. Cependant, $\alpha_{TE}(\cdot)$ diminue plus rapidement que $\alpha_{EE}(\cdot)$ et tend vers 0. Par conséquent, nous proposons de représenter $\alpha_{TE}(\cdot)$ par une fonction de QP exponentielle décroissante, comme suit :

$$\alpha_{TE}(QP, FSP_{max}) = e^{-a \cdot QP} \quad (5.11)$$

Où a est un coefficient dépendant du contenu obtenu en minimisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données mesurées et prédites. Le modèle de l'équation 5.11 permet de prédire les valeurs maximales atteintes pour chaque QP de la figure 5.7. Comme le montre la figure 5.8, le modèle proposé par l'équation 5.11 peut prédire les coefficients de réduction $\alpha_{TE}(QP, FSP_{max})$.

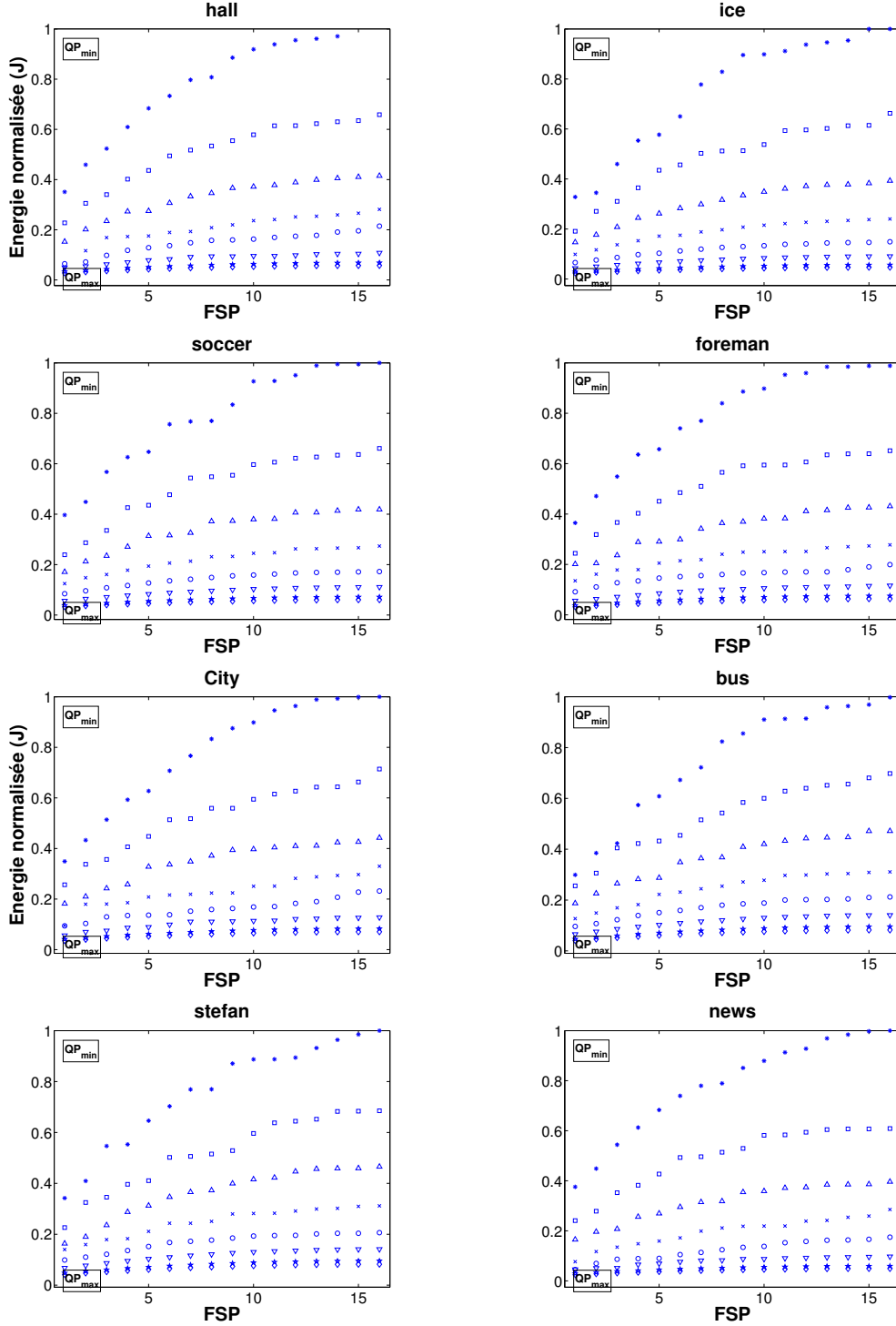


Figure 5.7 – Evolution de l'énergie de transmission normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP

Le terme $\beta_{TE}(QP, FSP)$ est la réduction de la consommation d'énergie perçue lors de la diminution du FSP pour un QP donné. La figure 5.9 rapporte les $\beta_{TE}(QP, FSP)$ mesurés. Selon les mesures sur cette figure, la forme fonctionnelle appropriée pour $\beta_{TE}(\cdot)$ doit répondre aux mêmes conditions que celles relatives à $\beta_{EE}(\cdot)$. Pour ces raisons, nous avons choisi d'exprimer $\beta_{TE}(\cdot)$ de la manière suivante :

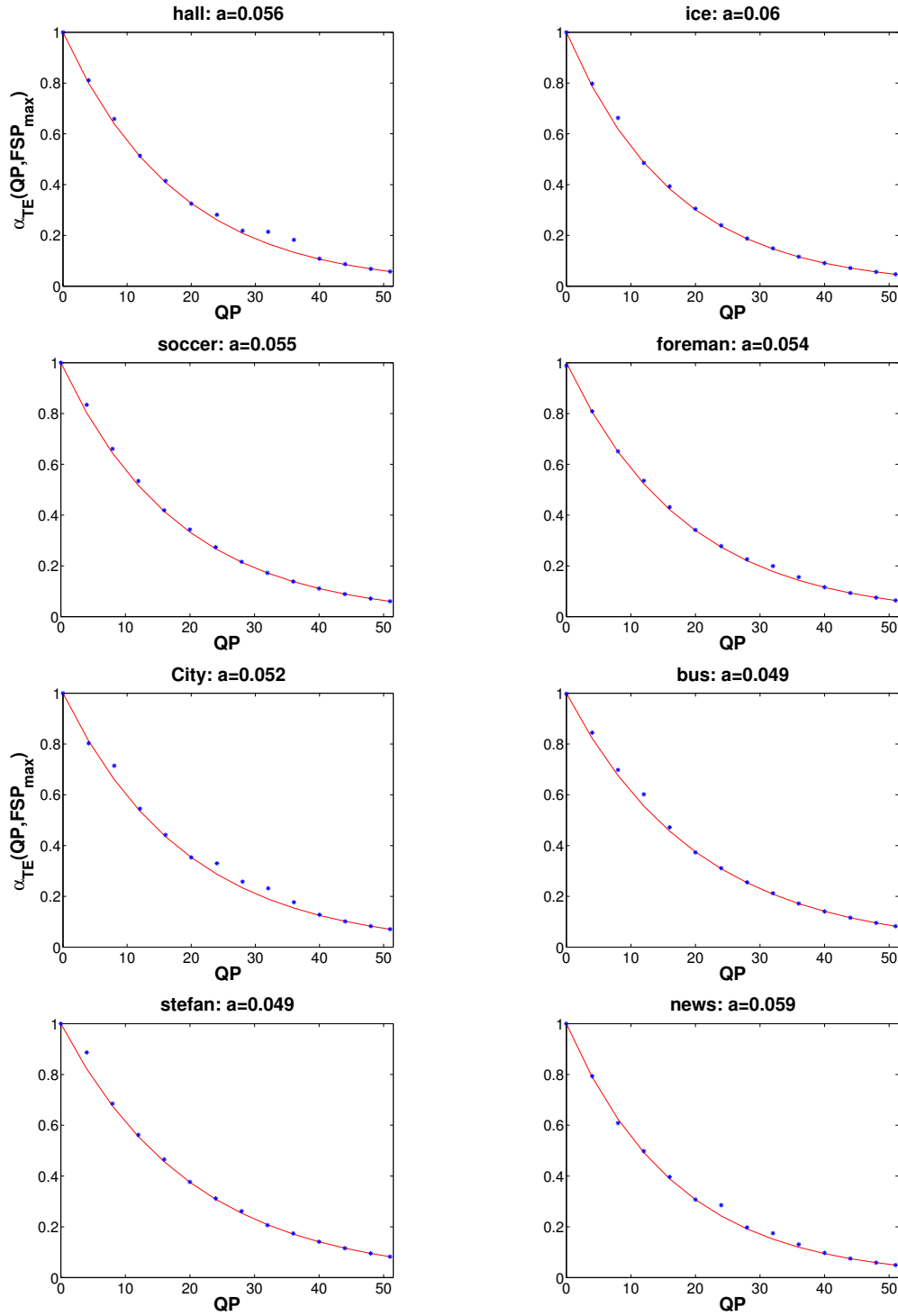


Figure 5.8 – Evolution des coefficients $\alpha_{TE}(QP, FSP_{max})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP

$$\beta_{TE}(QP, FSP) = \frac{1 - b.e^{(c.QP_{norm})}.e^{(d.(FSP_{norm}^*)^f)}}{1 - b.e^{(c.QP_{norm})}} \quad (5.12)$$

Néanmoins, la valeur de c doit être fixée à -0.1 et celle de f fixée à 2. Ainsi b et d demeurent les seuls paramètres dépendants du contenu. Comme on peut le voir sur la figure 5.9, le modèle

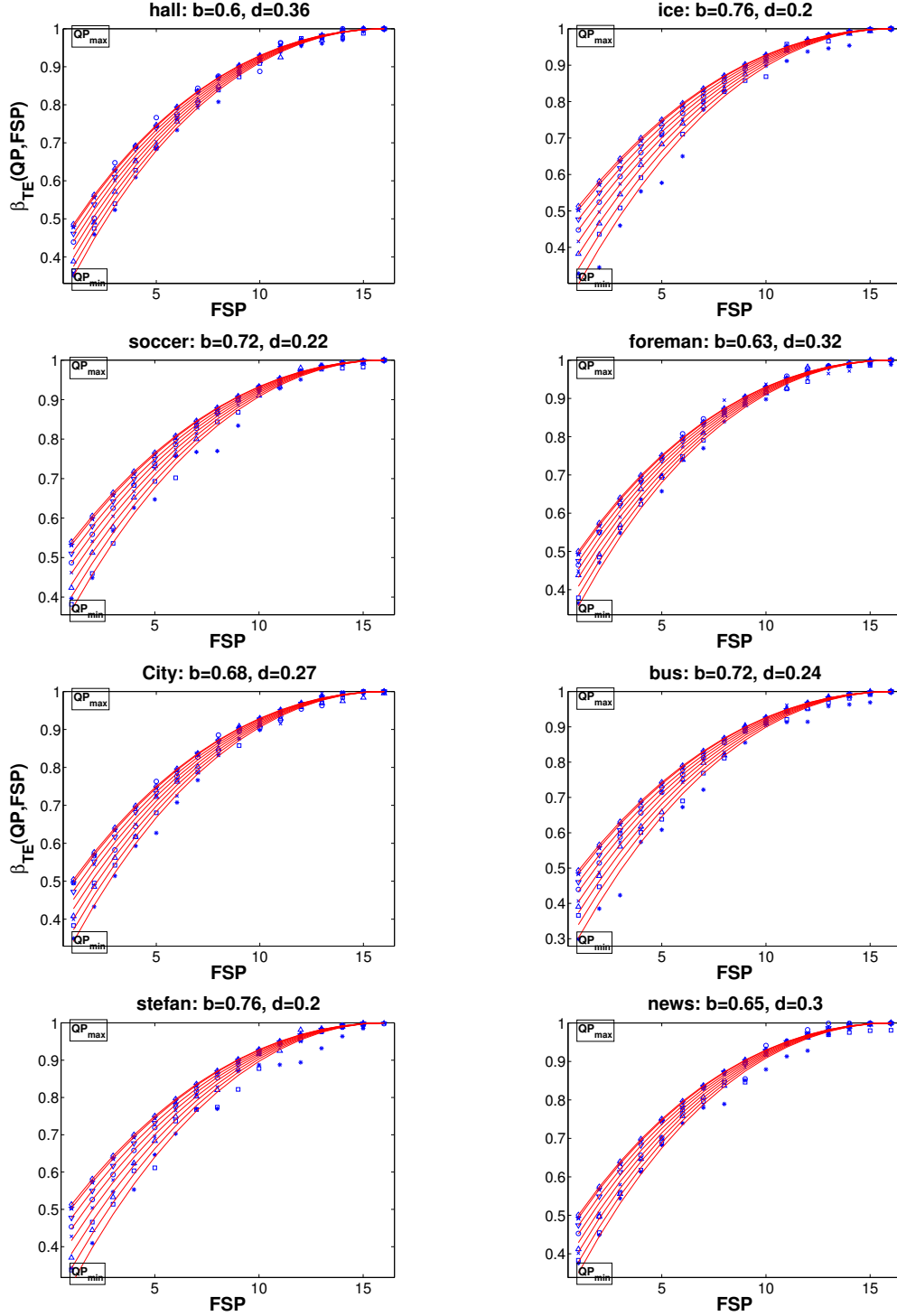


Figure 5.9 – Evolution des coefficients $\beta_{TE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

proposé dans l'équation 5.12 décrit bien le comportement de $\beta_{TE}(\cdot)$.

Il est à noter que l'équation 5.12 ne signifie pas que, étant donné un QP et un FSP, l'énergie consommée pour l'encodage d'un signal vidéo donné est égale à celle consommée pour sa transmission. Tout d'abord, les énergies maximales atteintes pour le couple (QP_{min}, FP_{max}) lors de l'encodage et de la transmission sont différentes. Deuxièmement, les coefficients générés par

le modèle de l'équation 5.6 et celui proposé dans l'équation 5.12 sont complètement différents. Cependant, l'équation 5.12 et 5.6 expriment le fait que ces énergies évoluent de la même façon.

Finalement, le modèle global d'estimation de la consommation d'énergie pendant le processus de transmission d'une séquence vidéo, compte tenu du QP et du FSP, peut être formulé comme suit :

$$E_T(QP, FSP) = \max(E_T).C_{TE}(QP, FSP) \quad (5.13)$$

Encore plus explicitement :

$$E_T(QP, FSP) = E_T(QP_{min}, FSP_{max}).\alpha_{TE}(QP, FSP_{max}).\beta_{TE}(QP, FSP) \quad (5.14)$$

Comme le montre la figure 5.10, le modèle proposé dans l'équation 5.10 approche les coefficients $C_{TE}(QP, FSP)$ et donc l'énergie consommée au cours du processus de transmission, avec une erreur de prédiction moyenne de 4 %. Notez que $\max(E_T)$ dépend principalement des caractéristiques du module radio, du QP_{min} , du FSP_{max} ainsi que du FR.

5.2.3 Impact du FR sur l'énergie consommée

Le FR est le troisième facteur que nous considérons pour contrôler la consommation d'énergie de notre système. Le FR peut être contrôlé dans l'implémentation JM du standard H.264/AVC en variant le paramètre de saut de trame « Frame Skip » (FSkip). La relation entre ces deux paramètres est donnée comme suit :

$$FSkip = \lceil \frac{FR_{max}}{FR} \rceil - 1 \quad (5.15)$$

Où FR_{max} est le FR maximal, et $\lceil . \rceil$ est la fonction partie entière par excès.

La figure 5.11 présente l'énergie normalisée mesurée pour l'encodage en variant le FSkip. La consommation d'énergie diminue lorsque l'on augmente le FSkip et diminuant ainsi le FR. Cela peut évidemment être expliqué par le fait que lors de la réduction du FR, le FSkip est augmenté et donc moins d'images sont encodées, ce qui conduit à une réduction considérable de la consommation d'énergie. Il est à noter que le FR_{max} des séquences vidéo testées est de 30 images par seconde et en utilisant l'équation 5.15 on peut déduire les FR testés. De plus, nous remarquons que l'incrément du FSkip par un réduit, logiquement, l'énergie d'environ la moitié, ce qui est un comportement évident et prévisible.

Le même comportement est observé pour le cas de la transmission, illustré par la figure 5.12.

Les figures 5.11 et 5.12 montre en fait le comportement d'un facteur de réduction qui dépend de FSkip, par lequel $\max(E_T)$ dans les équations 5.7 et 5.13 est réduite. Nous le nommons $\gamma(FSkip)$. Ce facteur atteint sa valeur maximale de 1 à $FSkip = FSkip_{min} = 0$ et diminue rapidement vers sa valeur minimale à $FSkip = FSkip_{max} = 29$. Par ailleurs, ce facteur n'atteint pas la valeur nulle puisqu'il y a au moins une image à encoder et transmettre. Sur la base de ces considérations, nous proposons de modéliser $\gamma(.)$, comme suit :

$$\gamma(FSkip) = \frac{1}{2^{FSkip}} + r \quad (5.16)$$

Où r est un paramètre dépendant du contenu obtenu en minimisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données mesurées et prédites. Comme reporté par les figures 5.12 et 5.11, le modèle proposé par l'équation 5.16 approche le comportement de $\gamma(.)$ avec une erreur moyenne de 5%.

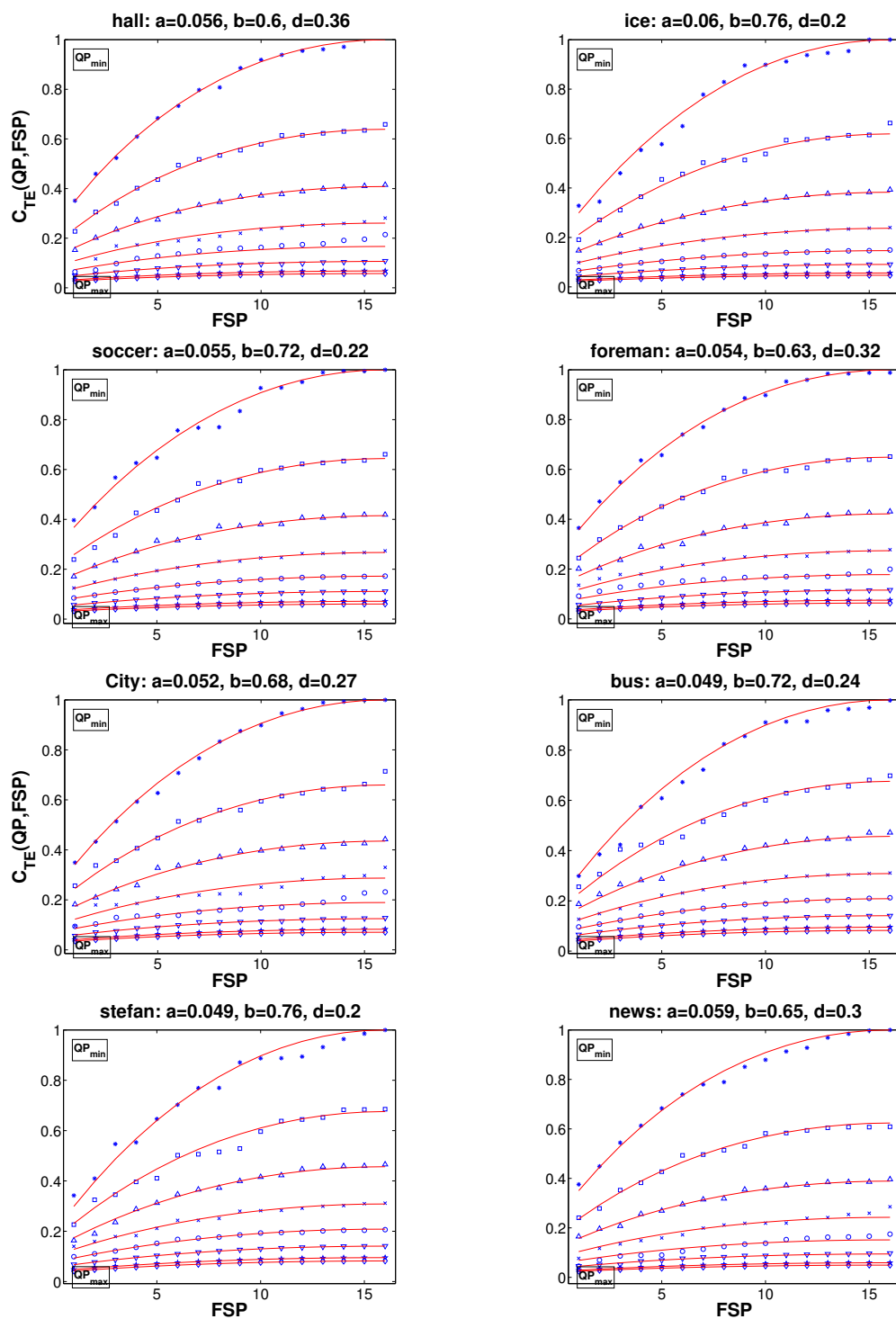


Figure 5.10 – Evolution des coefficients $C_{TE}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

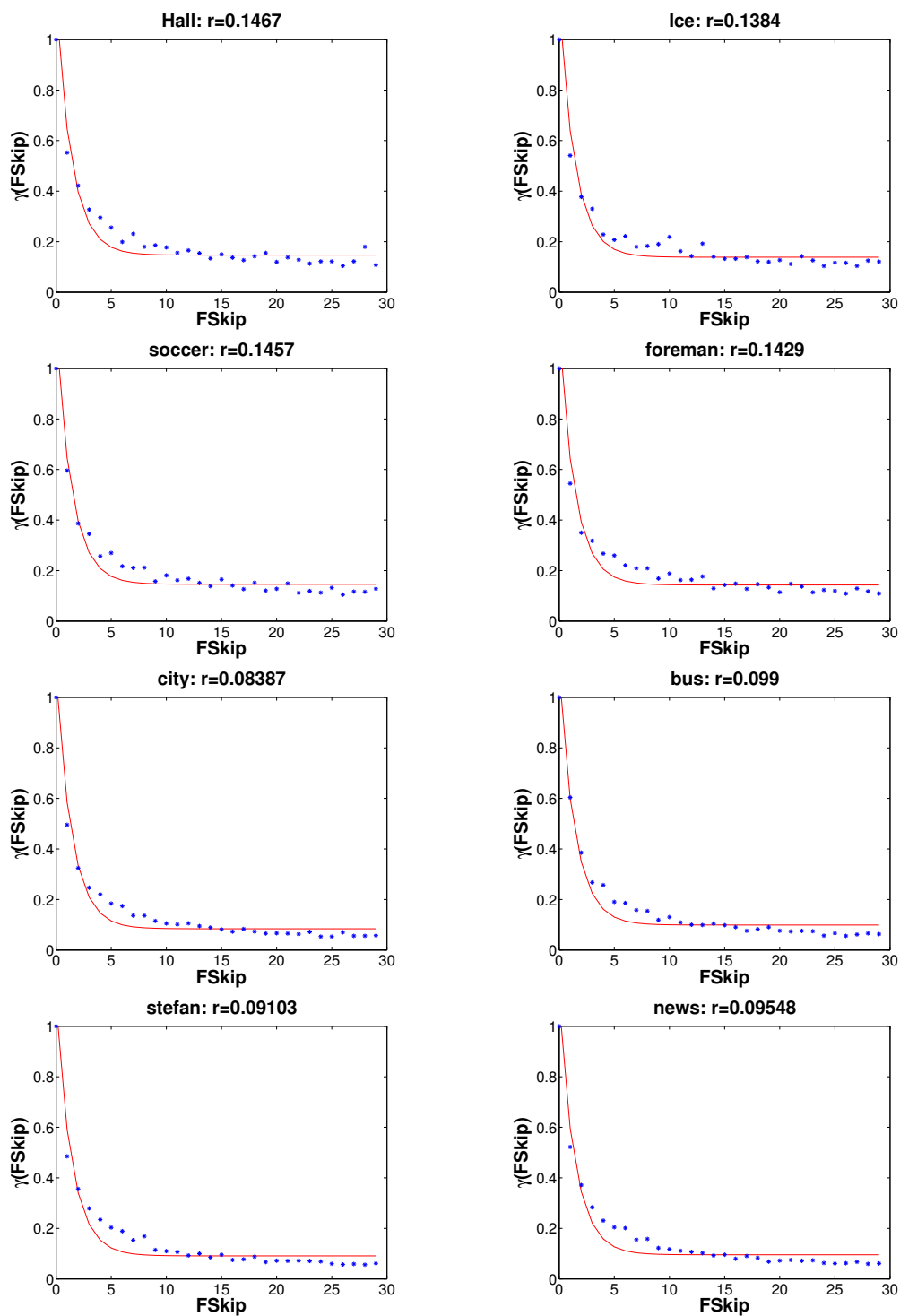


Figure 5.11 – Evolution des coefficients $\gamma(FSkip)$ mesurés et prédits pour l'encodage en fonction du paramètre $FSkip$

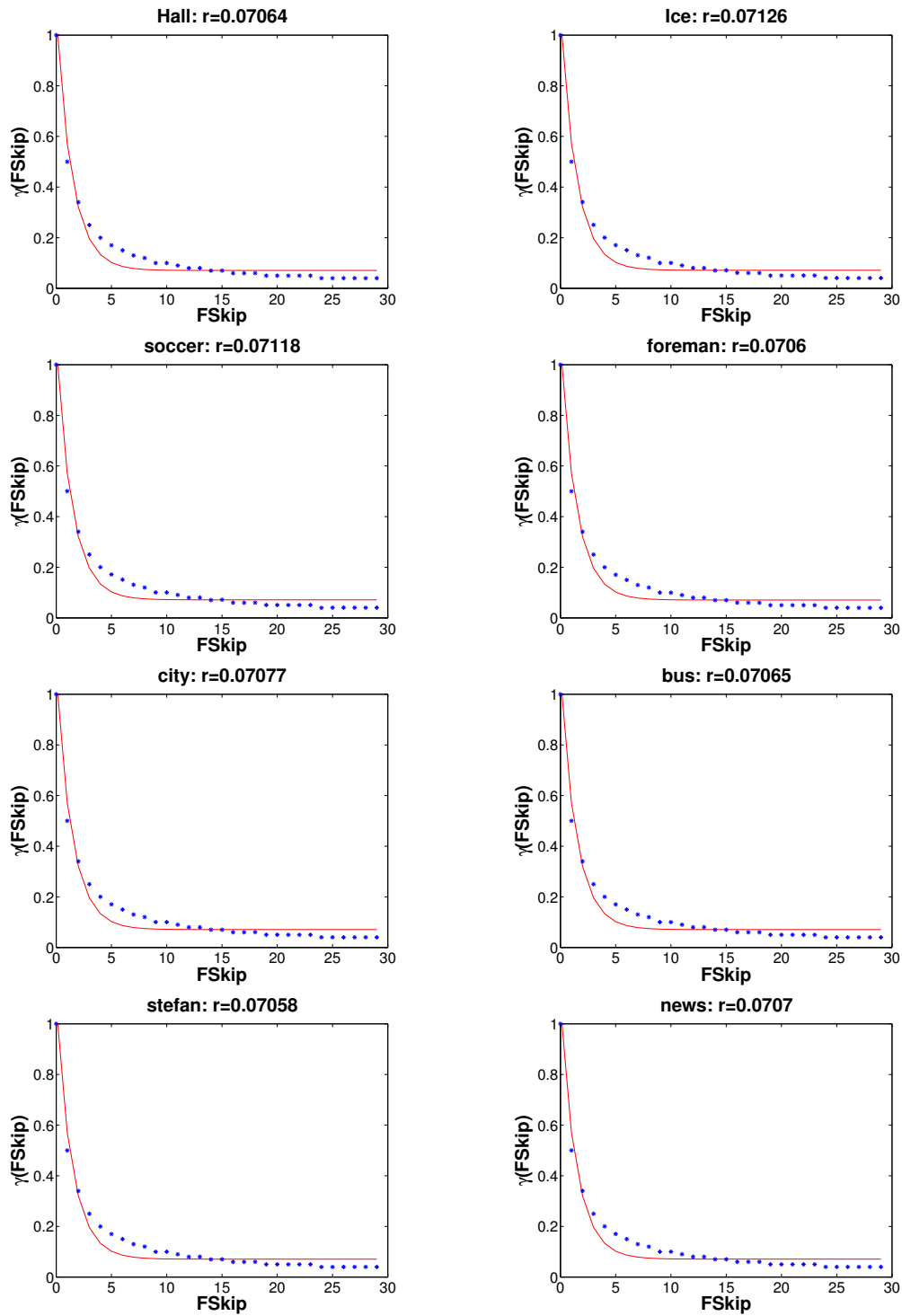


Figure 5.12 – Evolution des coefficients $\gamma(FSkip)$ mesurés et prédits pour la transmission en fonction du paramètre $FSkip$

5.3 Modélisation de la distorsion

Dans ce qui suit nous développons des modèles pour la prédiction de la distorsion, qui est principalement due à l'encodage et à la transmission. Par conséquent, la distorsion du signal vidéo D_{Total} peut être approximée par :

$$D_{Total} = D_{Enc} + D_{Trans} \quad (5.17)$$

Où D_{Enc} et D_{Trans} représentent la distorsion causée par l'encodage et la transmission de flux vidéo respectivement. Il est à noter que la distorsion est exprimée en termes d'erreur quadratique moyenne (EQM) et est donnée par :

$$EQM(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{m, n} (X_{i,j} - Y_{i,j})^2}{m.n} \quad (5.18)$$

Où X est l'image en question, Y est l'image correspondante après encodage/transmission, m et n sont respectivement la largeur et la hauteur de l'image.

5.3.1 La distorsion d'encodage

La distorsion introduite par le processus d'encodage peut être exprimée en fonction du paramètre de quantification QP et celui de la sélection fréquentielle FSP . Dans cette thèse, nous ne considérons pas la distorsion introduite par la diminution du FR , qui fait parti de nos perspectives. La figure 5.13 rapporte la distorsion d'encodage normalisée, mesurée pour les séquences testées. Comme on peut le constater, l'augmentation du QP comme la diminution du FSP ont pour effet d'augmenter la distorsion de la vidéo, ce qui est un comportement évident. En effet, lorsque la quantification et la sélection fréquentielle sont sévères, une importante quantité d'information est perdue. Cela affecte directement la qualité mesurée qui baisse fortement. Il est à noter que la normalisation est effectuée par la valeur maximale de la distorsion d'encodage, qui est atteinte pour le couple (QP_{max}, FSP_{min}) .

Similaire à la sous-section 5.2.1, la figure 5.13 peut être considérée comme l'illustration du comportement de coefficients dépendants du couple (QP, FSP) par lesquels la distorsion maximale, atteinte pour le couple (QP_{max}, FSP_{min}) , est réduite. Pour chaque QP , la valeur maximale des coefficients est atteinte pour le $FSP = FSP_{min} = 1$, puis diminue vers la valeur minimale atteinte pour le $FSP = FSP_{max} = 16$. Ces observations suggèrent que ces coefficients peuvent être générés par la fonction $C_{ED}(\cdot)$ comme suit :

$$C_{ED}(QP, FSP) = \alpha_{ED}(QP, FSP_{min}) \cdot \beta_{ED}(QP, FSP) \quad (5.19)$$

Le terme $\alpha_{ED}(QP, FSP_{min})$, représente l'effet de la quantification sur la distorsion normalisée provoquée par le processus de l'encodage.

La figure 5.14 rapporte les $\alpha_{ED}(QP, FSP_{min})$ mesurés. Comme on peut le voir, la fonction $\alpha_{ED}(\cdot)$ atteint son maximum à $QP = QP_{max}$ et son minimum à $QP = QP_{min}$. De plus, $\alpha_{ED}(\cdot)$ observe une phase quasi-stationnaire, jusqu'à atteindre un QP donné où elle augmente fortement. Par conséquent, nous proposons de modéliser $\alpha_{ED}(\cdot)$ comme suit :

$$\alpha_{ED}(QP, FSP_{min}) = (1 - a) \cdot (QP_{norm})^n + a \quad (5.20)$$

Où a est la distorsion mesurée et normalisée due à l'encodage pour le couple $(QP, FSP) = (0, 1)$ et n est un coefficient qui dépend du contenu obtenu en minimisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données mesurées et prédites. Le modèle de l'équation 5.20 permet de prédire les valeurs maximales atteintes pour chaque QP de la figure 5.13. Comme illustré par

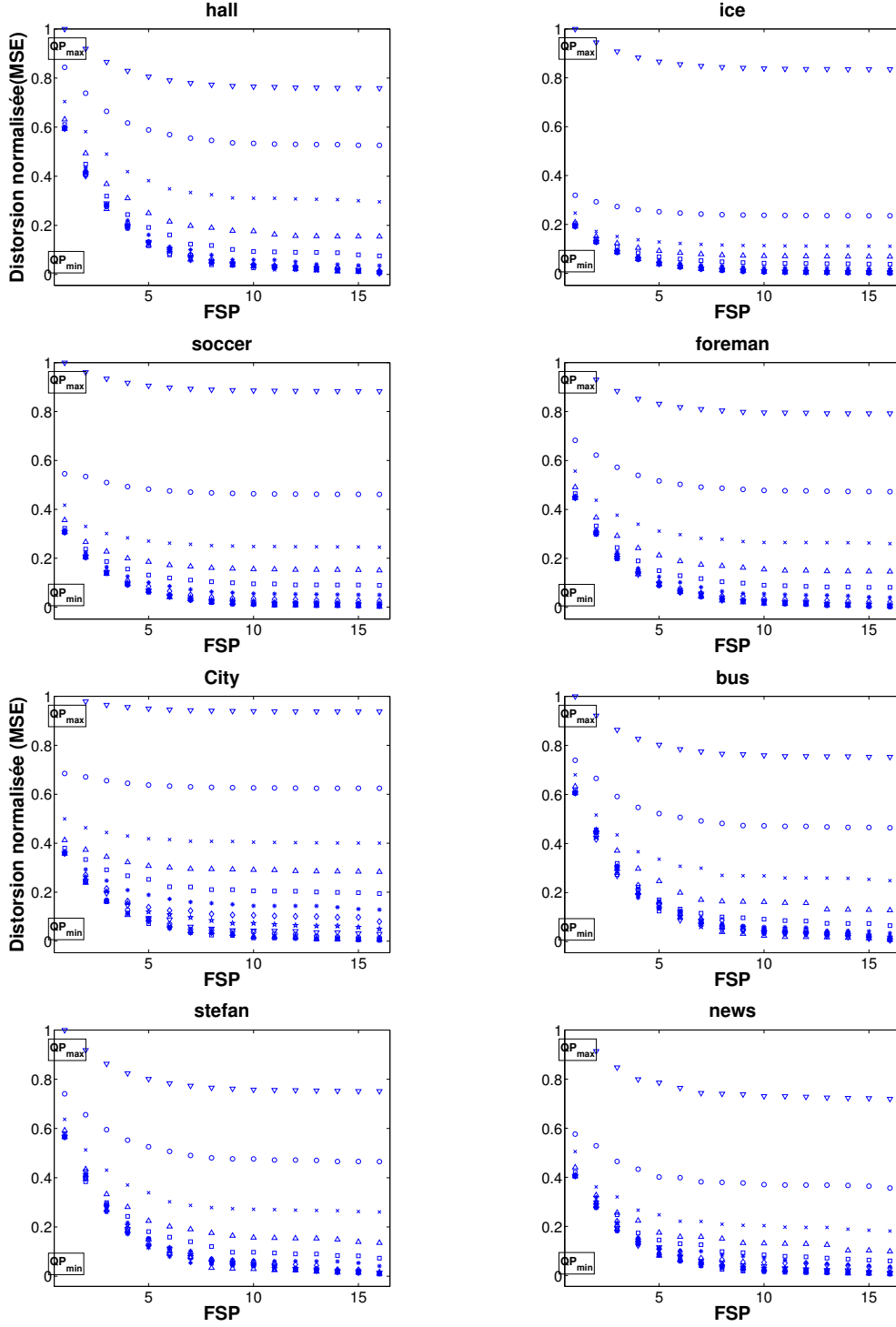


Figure 5.13 – Evolution de la distorsion d'encodage normalisée mesurée en fonction des paramètres QP et FSP

la figure 5.14, le modèle proposé dans l'équation 5.20 peut approcher le comportement des coefficients de réduction $\alpha_{ED}(QP, FSP_{min})$.

Le terme $\beta_{ED}(QP, FSP)$ représente la réduction de la distorsion de l'encodage perçue lors de l'augmentation du FSP pour un QP donné. La figure 5.15 rapporte les $\beta_{ED}(QP, FSP)$ mesurés. Selon ces mesures, la forme fonctionnelle appropriée pour la fonction $\beta_{ED}(\cdot)$ doit remplir les

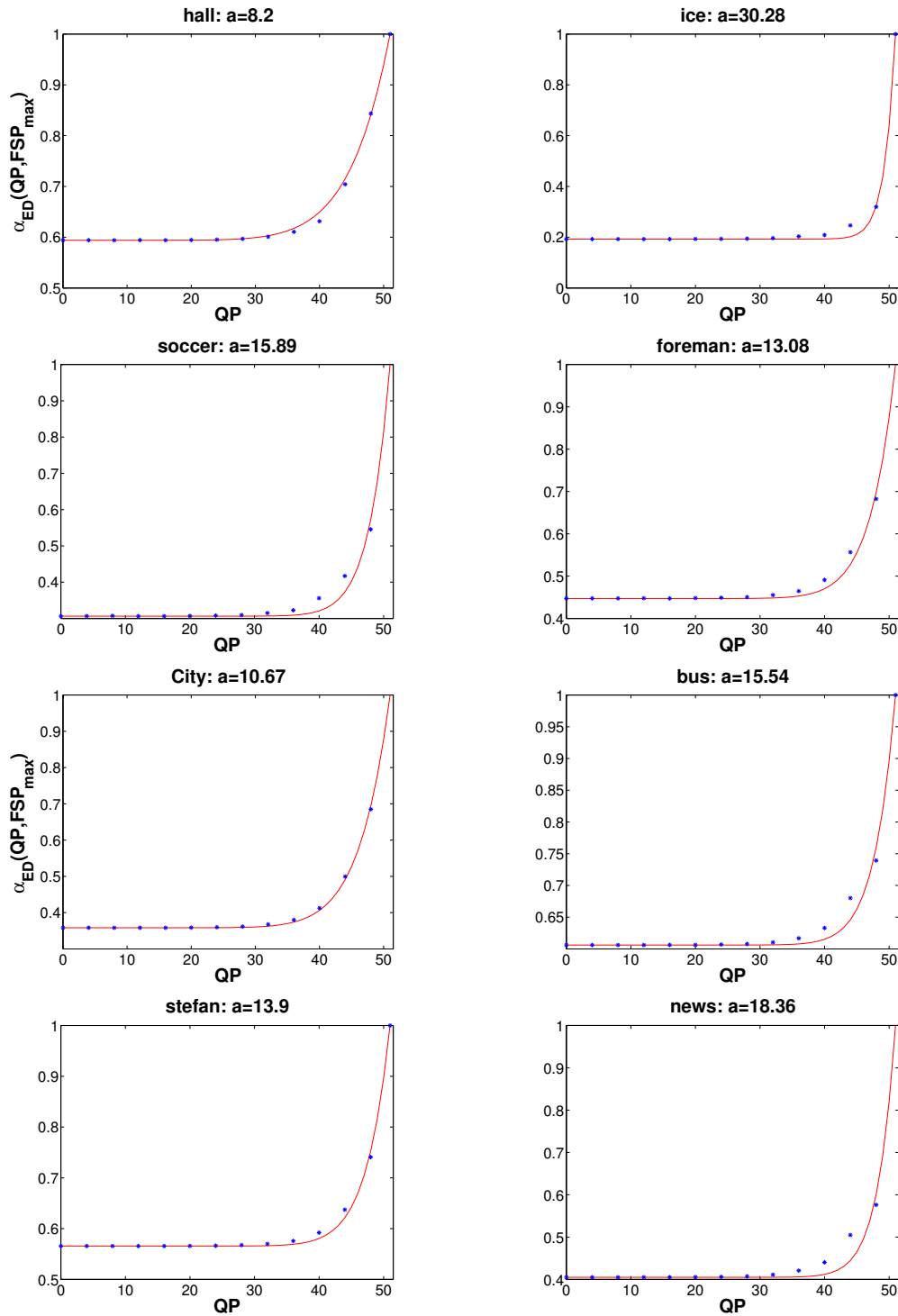


Figure 5.14 – Evolution des coefficients $\alpha_{ED}(QP, FSP_{min})$ mesurés et prédits en fonction du paramètre QP

conditions suivantes :

1. $\forall QP$, Si $FSP = FSP_{min}$ alors $\beta_{ED}(QP, FSP) = 1$
2. $\forall QP, \forall FSP, \forall i, j (i \neq j)$, Si $FSP_i > FSP_j$ Alors $\beta_{ED}(QP, FSP_i) \leq \beta_{ED}(QP, FSP_j)$
3. $\forall QP, \forall FSP, \forall i, j (i \neq j)$, Si $QP_i > QP_j$ Alors $\beta_{ED}(QP_i, FSP) \geq \beta_{ED}(QP_j, FSP)$

La condition (1) met en évidence le fait que quand la sélection fréquentielle est appliquée avec

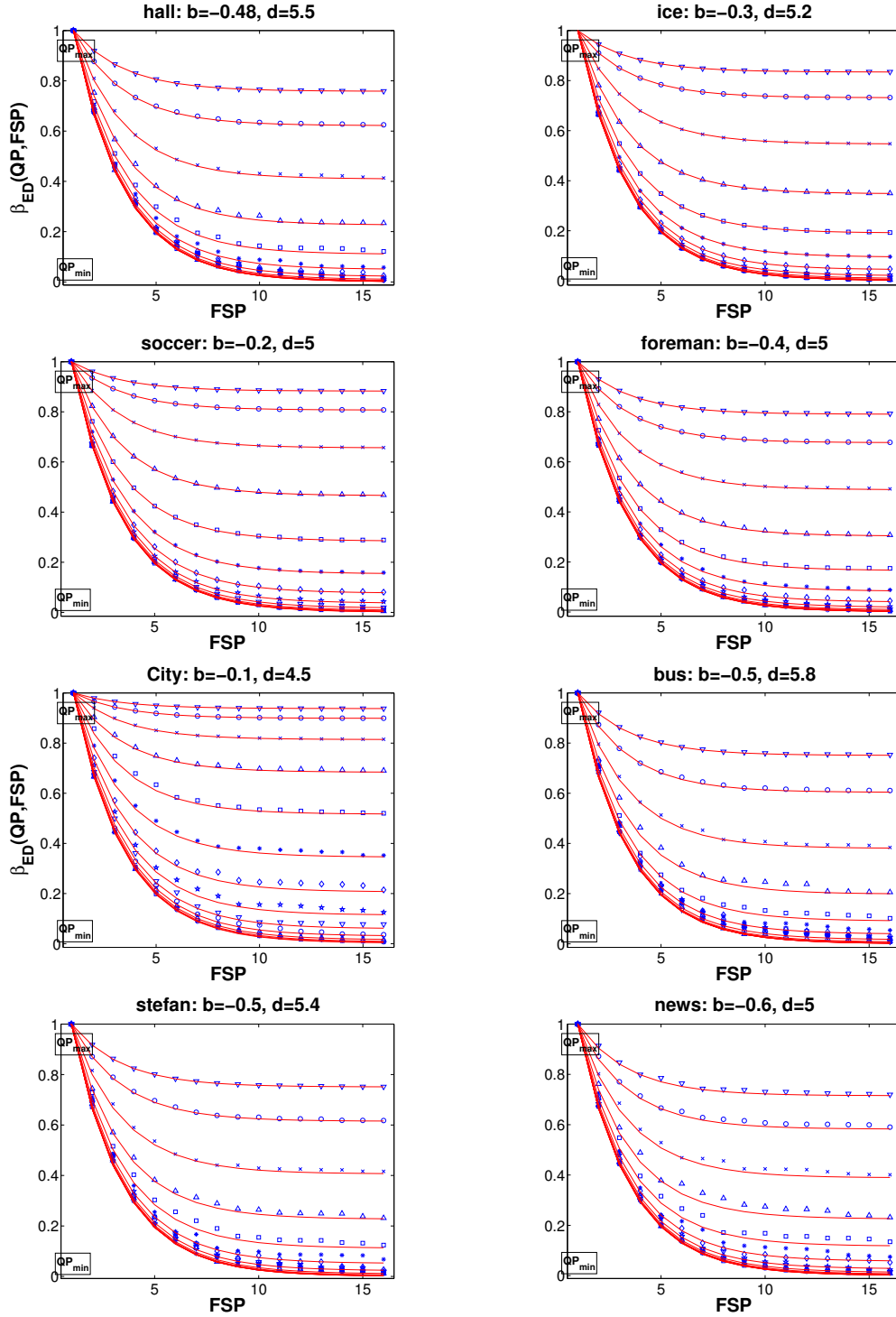


Figure 5.15 – Evolution des coefficients $\beta_{ED}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

le FSP minimal, aucune réduction de la distorsion d'encodage ne doit être observée. Par conséquent, la seule réduction de la distorsion perçue est celle due à la quantification, donnée par l'équation 5.20. La condition (2) représente le fait que plus le nombre de coefficients retenus dans la phase de la sélection fréquentielle est important, moins il y a de distorsion d'encodage. Enfin, la condition (3) traduit le fait que lorsque la quantification devient plus sévère, l'effet de

la sélection fréquentielle devient moins important.

A partir de ces observations, nous proposons la forme fonctionnelle suivante pour $\beta_{ED}(\cdot)$:

$$\beta_{ED}(QP, FSP) = \frac{1 - b.e^{(d.(QP_{norm}^*)^2).e^{-h.FSP}}}{1 - b.e^{(d.(QP_{norm}^*)^2).e^{-h}}} \quad (5.21)$$

Où b et d sont des paramètres qui dépendent du contenu obtenus en minimisant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre les données mesurée et prédites. D'après plusieurs test, le paramètre h peut être fixé à 0.41.

Enfin, le modèle global pour estimer la distorsion d'une séquence vidéo en raison du processus d'encodage, compte tenu du QP et du FSP, peut être formulé comme suit :

$$D_{Enc}(QP, FSP) = \max(D_{Enc}).C_{ED}(QP, FSP) \quad (5.22)$$

Explicitement :

$$D_{Enc}(QP, FSP) = D_{Enc}(QP_{max}, FSP_{min}).\alpha_{ED}(QP, FSP_{min}).\beta_{ED}(QP, FSP) \quad (5.23)$$

Comme on peut le constater sur la figure 5.16, le modèle proposé dans l'équation 5.19 peut générer les coefficients $C_{ED}(QP, FSP)$ et donc approcher la distorsion de l'encodage, avec une erreur de prédiction moyenne de 4 %.

5.3.2 Distorsion de transmission

Un autre facteur affectant la qualité de la vidéo est la perte de paquets pendant la transmission. La distorsion introduite, D_{Trans} , est alors dépendante principalement de la méthode d'encodage adoptée (par exemple inter ou intra) ainsi que des taux de paquets perdus « Packet Loss Rate » (PLR). De toute évidence, les PLR considérés dans nos statistiques sont ceux qui concernent les paquets de données vidéo. Par conséquent, le PLR d'un paquet de priorité l est donné par :

$$PLR^l = 1 - \frac{N_{Rec}^l}{N_{Env}^l} \quad (5.24)$$

Où N_{Rec}^l représente le nombre de paquets distincts reçus de priorité l et N_{Env}^l le nombre des paquets distincts envoyés par le nœud source, de priorité l . La distorsion introduite par la perte d'un paquet k peut être estimée par le modèle suivant proposé par Zhai *et al.* (2006) :

$$E[D_k] = (1 - \rho_k)E[D_{(R,k)}] + \rho_k E[D_{(L,k)}] \quad (5.25)$$

Où $E[D_{(R,k)}]$ et $E[D_{(L,k)}]$ sont les distorsions estimées lorsque le paquet k est soit correctement reçu ou perdu, respectivement. ρ_k est la probabilité de perte du paquet k . Dans le présent travail, nous utilisons un encodeur basé sur le standard vidéo H.264/AVC en utilisant uniquement la prédiction en intra. Par conséquent, la propagation temporelle de l'erreur est évitée. De plus, l'option FMO (Lambert *et al.*, 2006) fournie par le standard H.264/AVC est utilisée pour coder séparément deux régions de chaque image. Ainsi, la ROI est protégée contre les propagations spatiales des pertes qui se sont produites au niveau du BKGD et vice-versa.

Dans les normes de codage vidéo précédentes, les pixels en intra sont directement codés en utilisant un codage par transformée. Dans le standard H.264/AVC, la prédiction en intra est appliquée d'abord pour prévoir les MB actuels utilisant les pixels voisins précédemment codés dans l'image courante, puis l'erreur de prédiction est codée en utilisant un codage par transformée. Par conséquent, quand un paquet appartenant à une slice donnée est perdu, les

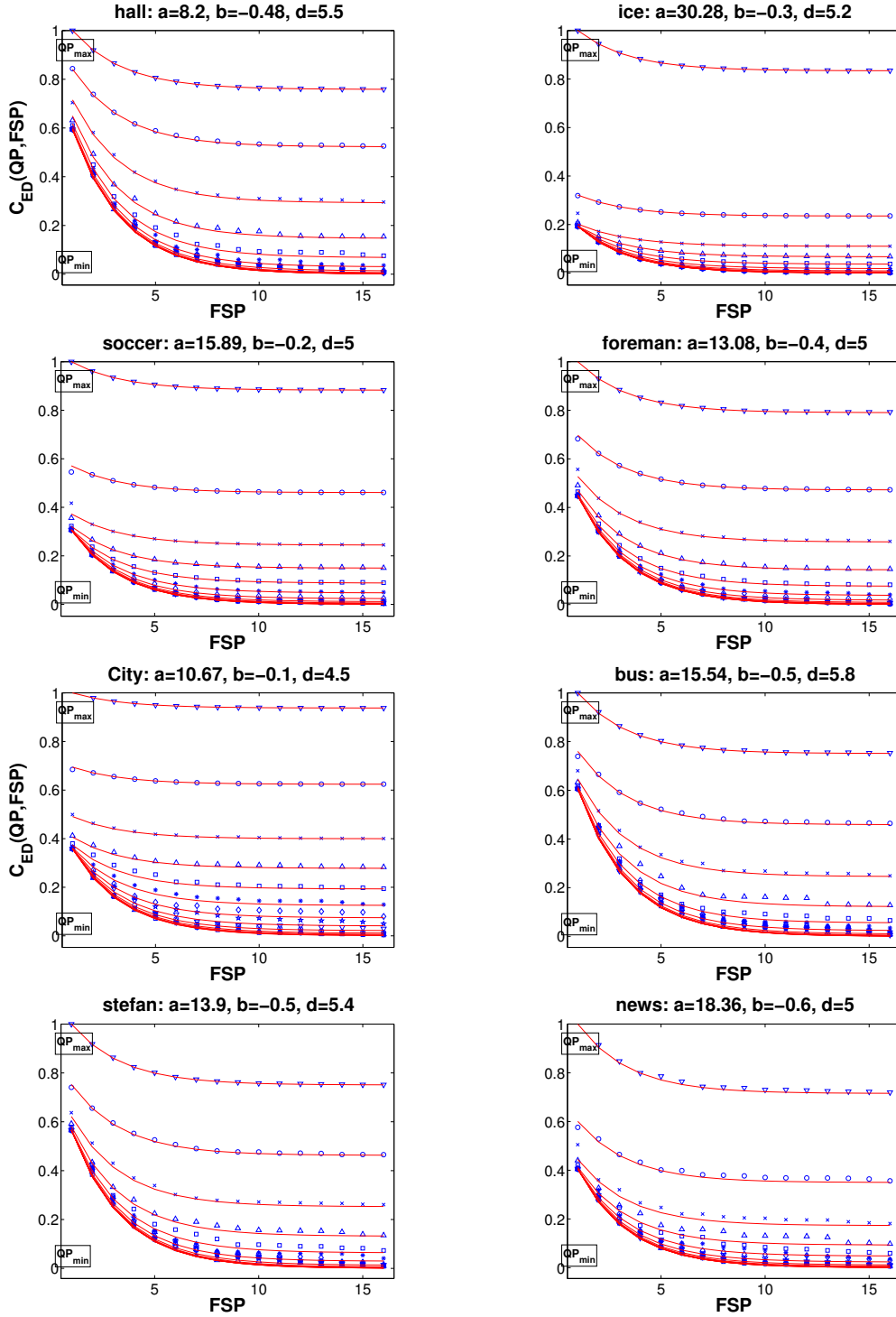


Figure 5.16 – Evolution des coefficients $C_{ED}(QP, FSP)$ mesurés et prédits en fonction des paramètres QP et FSP

prochains MB de la même slice transmis sur d'autres paquets bien reçus sont atteints par cette perte. A cet effet, nous réalisons une dissimulation de pertes au niveau du décodeur par copie de la slice perdue à partir des images précédentes.

Par conséquent, lors de la perte d'un paquet, la distorsion attendue $E[D_{(L,k)}]$ est causée par la dissimulation de la perte $E[D_{(Con,k)}]$. Cette dernière peut être estimée au niveau de l'enco-

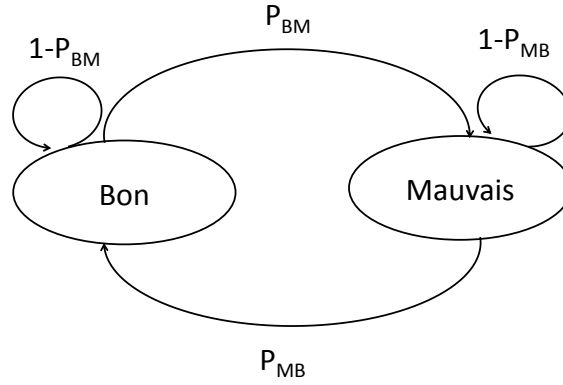


Figure 5.17 – Illustration du modèle de Gilbert-Elliott utilisé pour la génération des schémas de pertes de paquets

deur par l'écart moyen entre deux images successives. Lorsque le paquet est reçu, la distorsion $E[D_{(R,k)}]$ est provoquée par les erreurs du canal. Dans le présent travail, nous supposons que les paquets sont soit perdus ou correctement reçus. La question de la protection des paquets de données contre les erreurs fait partie des perspectives de cette thèse. Ainsi : $E[D_{(R,k)}] = 0$. Par la suite, l'équation 5.25 devient :

$$E[D_k] = \rho_k E[D_{(Con,k)}] \quad (5.26)$$

Par conséquent, nous proposons la formulation suivante pour approcher la distorsion de transmission au niveau de l'image :

$$E[D^n] = \lambda \frac{\sum_{k=1}^N E[D_k]}{N} + (1 - \lambda) E[D^{n-1}] \quad (5.27)$$

Où D^n fait référence à la distorsion de l'image n et N est le nombre de paquets de l'image n . Nous introduisons un facteur de propagation de la perte λ à l'intérieur de la séquence qui représente la distorsion introduite par la dissimulation à partir de images elles-mêmes potentiellement sujettes à la dissimulation de pertes.

Le rôle de ce modèle est de permettre au nœud source de se rapprocher de la distorsion moyenne de transmission d'une séquence vidéo donnée moyennant une information locale sur le PLR, qui en pratique est continuellement fourni par la couche réseau de notre système.

Pour la validation du modèle, nous adoptons le modèle de pertes de Gilbert-Elliott qui est une chaîne de Markov à deux états pour générer des schémas de perte de paquets en rafale, caractérisant la perte dans les RCVSF (He *et al.*, 2009).

La figure 5.17 illustre le diagramme d'état considéré. Il est composé de deux états, à savoir le bon et le mauvais état. Dans le bon état, le paquet est reçu, alors que dans le mauvais état, les pertes se produisent avec une probabilité Π_M . Le modèle est aussi caractérisé par deux probabilités de transition P_{BM} et P_{MB} correspondant respectivement à la probabilité de transition du bon au mauvais état, et du mauvais au bon état. Le PLR moyen est donné par (He *et al.*, 2009) :

$$\Pi_M = \frac{P_{BM}}{P_{BM} + P_{MB}} \quad (5.28)$$

Nous générons 200 schémas de perte de paquets pour chaque PLR (Π_M). Les résultats sont reportés par la figures 5.18. Comme on peut le constater sur cette figure, le modèle proposé

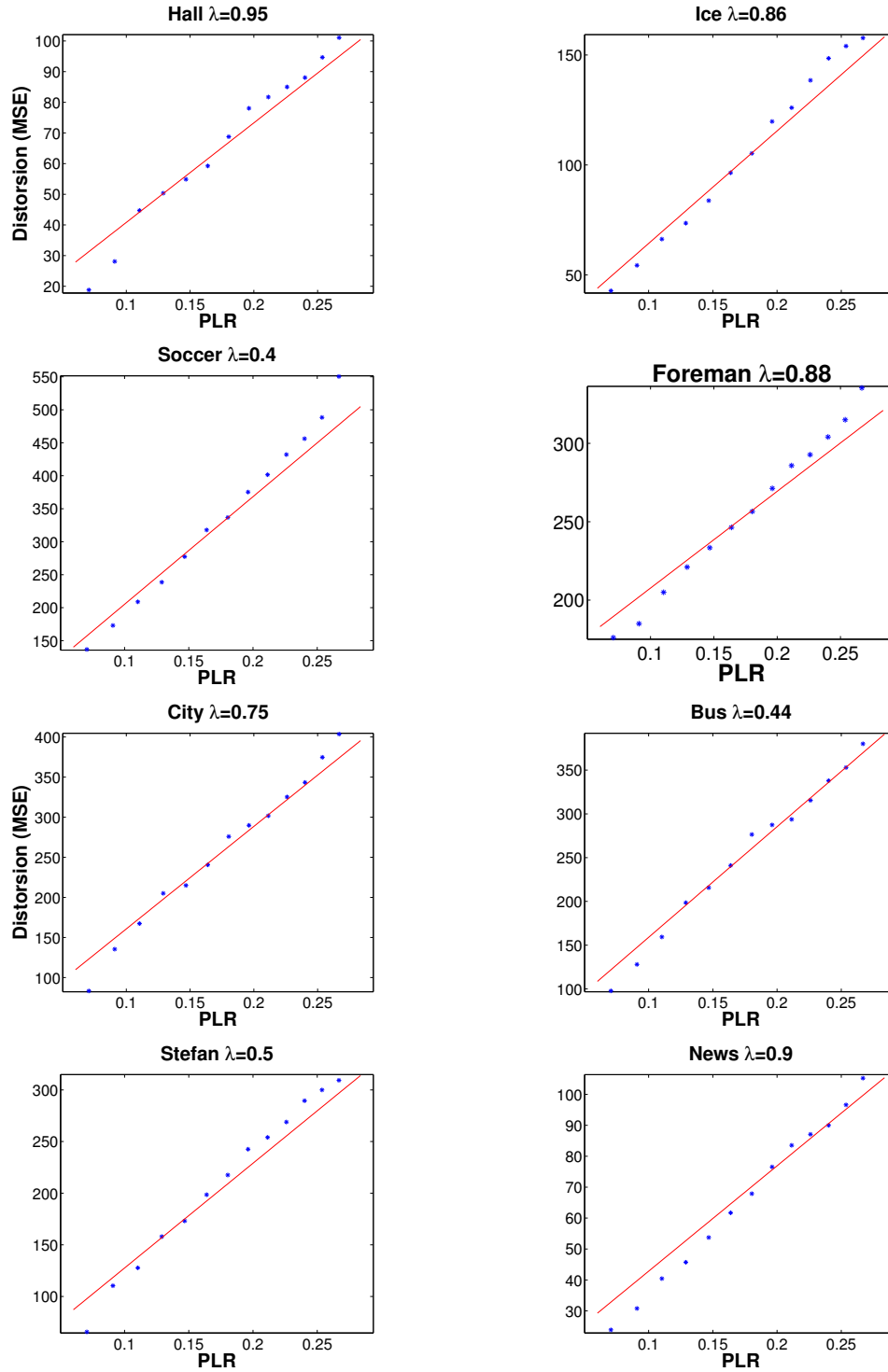


Figure 5.18 – Evolution de la distorsion de transmission D_{Trans} mesurée et prédite en fonction du taux de perte de paquets PLR

approche la distorsion moyenne mesurée, avec une erreur moyenne de prédiction de 9%.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les comportements de l'énergie consommée ainsi que la distorsion dues à l'encodage et la transmission de la vidéo par le nœud source. Par la suite, nous avons proposé des modèles en adéquation avec les comportements physiques de ces quantités, en fonction des paramètres de contrôle de notre schéma d'encodage proposé dans le chapitre 4, à savoir le FR, le QP et le FSP. En effet, suite à l'analyse du comportement de l'énergie d'encodage et de transmission, nous avons proposé de les modéliser en premier en fonction du QP et du FSP, comme étant l'énergie maximale atteinte au point (QP_{min}, FSP_{max}) , qui est diminuée par l'effet de la quantification puis diminuée par l'effet de la sélection fréquentielle dépendant du QP adopté. L'erreur de prédiction moyenne, sur toutes les séquences testées, du modèle la consommation de l'énergie d'encodage et de transmission est de 6% et 4% respectivement. En second, cette énergie maximale est davantage réduite par un autre levier qui agit sur le nombre d'images à encoder et à transmettre. Le levier en question est le FR, qui via l'incrémentatation du paramètre *FSkip*, permet de diminuer l'énergie d'encodage et de transmission d'environ la moitié. L'analyse du comportement de la distorsion introduite au niveau de l'encodage a permis de la modéliser, en fonction du QP et du FSP, comme étant la distorsion maximale atteinte au point (QP_{max}, FSP_{min}) qui est atténuée par l'effet la diminution de la quantification, puis atténuée par l'augmentation du paramètre de la sélection fréquentielle dont l'effet dépend du QP adopté. L'erreur de prédiction moyenne de ce modèle, sur toutes les séquences testées, est de 4%. Enfin, nous avons proposé de modéliser la distorsion introduite par la transmission, après dissimulation des pertes, en fonction du taux de paquets perdus pour un encodage effectué en tout Intra. En effet, l'analyse des tests menés en adoptant un schéma de génération de pertes suivant le modèle de Gilbert-Elliott, a permis de constater que cette distorsion peut être modélisée comme étant une pondération entre la distorsion due à la dissimulation des pertes de paquets et celle due à la dissimulation à partir d'images sujettes elles-même aux pertes. L'erreur de prédiction moyenne de ce modèle, sur toutes les séquences testées, est de 9%.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une deuxième approche inter-couches qui intégrera les modèles de prédictions proposés dans le présent chapitre pour déterminer dynamiquement les paramètres de contrôle dans le but d'étendre la durée de vie du réseau tout en fournissant une qualité de bout-en-bout de la vidéo exigée par l'utilisateur. De plus, nous proposons un protocole de routage qui favorise l'efficacité énergétique ainsi que la fiabilité dans le choix du prochain saut.

SOLUTION INTER-COUCHES EFFICACE EN ÉNERGIE SOUS CONTRAINTE DE QUALITÉ VIDÉO POUR LES RCVSF

Sommaire

6.1	Introduction	113
6.2	Le protocole de routage ERMM	114
6.2.1	Terminologie et définitions	114
6.2.2	Création et maintien des tables de voisinages	115
6.2.3	L'algorithme de routage	116
6.2.4	La couche MAC	117
6.3	La solution inter-couches proposée	117
6.4	Évaluation des performances	119
6.4.1	Évaluation à l'échelle du nœud vidéo source	119
6.4.2	Évaluation à l'échelle du réseau	121
6.5	Conclusion	124

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une solution inter-couches efficace en énergie pour le support du flux vidéo sous contrainte de qualité de bout-en-bout dans les RCVSFs. Cette approche fait intervenir trois couches : l'application, le routage et la couche MAC. En premier, pour la couche applicative, nous adoptons le schéma d'encodage décrit dans chapitre 4. Rappelons que ce schéma d'encodage basé sur le standard H.264/AVC opère sous deux modes. Dans un premier mode « standby » le nœud source vidéo adopte un débit d'images par seconde « Frame Rate » (FR) qui est bas pour une meilleure efficacité énergétique. Quand un événement se produit, l'encodeur passe au mode « rush », adopte un FR supérieur et produit deux catégories de macroblocs, à savoir la région d'intérêt « Region Of Interest » (ROI) et l'arrière-plan « BackGround » (BKGD). Ensuite, une simple technique d'adaptation de débit binaire, notée la FS, est appliquée au BKGD (ou BKGD et ROI) afin de diminuer l'énergie consommée pendant le processus de transmission. Cette opération est contrôlée par le paramètre de FSP, qui représente le nombre de coefficients retenus après la transformée. Cette solution a montré qu'une importante quantité d'énergie est préservée pendant le processus de transmission, par rapport à un schéma classique, tout en conservant une qualité de la vidéo qui est satisfaisante. Cependant, comme dit précédemment, l'énergie consommée pendant le processus d'encodage devrait également être considérée.

Ainsi, en deuxième lieu, pour améliorer cette solution, nous l'enrichissons par les modèles mathématiques pour prédire la consommation d'énergie et la distorsion de la vidéo lors des phases d'encodage et de transmission, proposés et discutés dans le chapitre 5. Par conséquent, l'encodeur peut adapter sa configuration, sur la base des retours des couches sous-jacentes, afin de diminuer la consommation d'énergie globale tout en respectant la qualité désirée de la vidéo.

Enfin, pour l'acheminement du flux ainsi encodé vers la destination, nous proposons un nouveau protocole de routage efficace en énergie, fiable, à multi-chemins et qui intègre la multi-priorités, nommé Energy-efficient Reliable Multi-path Multi-Priority (ERMM). En fait, ce protocole considère l'énergie résiduelle ainsi que la fiabilité des nœuds adjacents, afin de délivrer les paquets de haute et basse priorité (*i.e.* ROI et BKGD) en fonction de la fiabilité souhaitée. Par ailleurs, ce protocole repose sur la coopération de la couche MAC afin de garantir la différenciation de service, en donnant aux paquets de haute priorité de plus grandes chances d'accéder au support partagé.

Pour une meilleure compréhension de la solution proposée, nous débutons par introduire le protocole de routage proposé ERMM dans la section 6.2. En suite, l'interaction entre les différentes couches constituant notre solution est détaillée dans la section 6.3. Enfin, la section 6.4 présente les résultats de l'étude expérimentale portant sur les performances de l'approche inter-couches proposée.

6.2 Le protocole de routage ERMM

La solution inter-couches proposée adopte un protocole de routage tenant compte de l'énergie résiduelle ainsi que la taille de l'espace disponible dans la file d'attente reflétant le degré de congestion. De plus, il tire profit des multi-chemins existants entre la source et le Sink pour atteindre une plus grande fiabilité et adopte le paradigme de multi-priorités recommandé pour les RCVSFs. Le protocole de routage proposé effectue une stratégie de décision de routage dite à saut-par-saut qui offre plus d'évolutivité par rapport à la topologie du réseau et de flexibilité à l'égard des variations du trafic. Ce protocole est en fait inspiré du protocole MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006), qui a inspiré de nombreux travaux de recherche dans les RCSF et RCVSF (Boluk *et al.*, 2011c; Macit *et al.*, 2014; Sahin *et al.*, 2014).

Le protocole ERMM opère sous certaines hypothèses :

- Les nœuds déployés sont en mesure de connaître leurs coordonnées euclidiennes et celles du Sink (la destination).
- Étant donné un rayon de communication r , deux nœuds sont connectés (dits voisins) s'ils sont à une distance inférieure ou égale à r .
- Le Sink est un nœud puissant doté de capacités de communication et de calcul importantes et sans contraintes énergétiques.
- Le réseau déployé dispose de mécanismes pour faire face aux problèmes d'isolement des nœuds.

6.2.1 Terminologie et définitions

Dans ce qui suit nous définissons certains termes qui seront utilisés. Le premier est l'ensemble des candidats pour le prochain saut « Next-Hop Candidates » (NHC), regroupant les nœuds qui sont dans le rayon de communication et plus près du Sink S que le nœud courant i , et il est formulé comme suit :

$$NHC_i(S) = \{j \in NS_i / dist(i, S) - dist(j, S) > 0\} \quad (6.1)$$

où $dist(i, S)$ et $dist(j, S)$ sont les distances Euclidiennes entre i et S , j et S , respectivement, NS_i est l'ensemble voisinage de i qui contient les voisins accessibles à un saut.

La fiabilité d'un nœud candidat j est définie par Felemban *et al.* (2006) comme suit :

$$RP_{ij}^S = (1 - e_{ij})(1 - e_{ij})^{\left[\frac{dist(j, S)}{dist(i, j)}\right]} \quad (6.2)$$

où e_{ij} est le taux moyen de paquets perdus avec le nœud j . L'équation 6.2 exprime la probabilité que le paquet atteigne le nœud j , puis le Sink S après approximativement $\frac{dist(j,S)}{dist(i,j)}$ sauts séparant j et S . Ici, e_{ij} est supposé être constant sur les sauts nécessaires pour atteindre le Sink S .

Une amélioration de cette mesure de la fiabilité peut être réalisée en tenant compte du PLR_{ij}^l (i.e. e_{ij}^l), se référant au taux moyen de perte atteint avec le nœud j pour la priorité l , en plus de l'espace disponible dans la file d'attente de paquets de priorité l du nœud j , noté ABS^l . En fait, ABS^l donne une information sur les chances d'un paquet pour être mis en mémoire tampon (file d'attente) du prochain saut, indépendamment de la réussite ou de l'échec de la transmission. Par conséquent, dans ERMM, la fiabilité du nœud j est exprimée comme suit :

$$RP_{ij}^S = (1 - ERM^l(j))(1 - ERM^l(j))^{\left[\frac{dist(j,S)}{dist(i,j)}\right]} \quad (6.3)$$

Où $ERM(j)$ est la mesure de fiabilité améliorée (Enhanced Reliability Measure (ERM)) du nœud j pour la priorité de paquets l donnée par :

$$ERM^l(j) = PLR_{ij}^l * \frac{IBS^l - ABS^l}{IBS^l} \quad (6.4)$$

Où IBS^l est la taille initiale du buffer (Initial Buffer Size (IBS)) pour la priorité l . La probabilité totale d'atteindre le Sink « Total Reaching Probability » (TRP) telle que présentée par Felemban *et al.* (2006), permet d'estimer les chances qu'un paquet a pour atteindre le Sink, quand ce paquet est relayé sur de multiples chemins à partir d'une source donnée i et est formulée comme suit :

$$TRP_{new} = 1 - (1 - TRP_{old})(1 - RP_{ij}^S) \quad (6.5)$$

En fait, l'utilisation de l'équation 6.5 consiste à sélectionner les nœuds candidats j et les injecter un par un dans la formule, jusqu'à ce que le TRP_{new} atteigne la valeur de la fiabilité souhaitée. Ceci sera plus amplement expliqué dans la section 6.2.3.

6.2.2 Création et maintien des tables de voisinages

Le protocole de routage proposé est sans états et fonctionne sur la base d'informations locales pour construire dynamiquement des chemins vers la destination. Après le déploiement du réseau, une courte durée est observée avant que le réseau soit opérationnel. Pendant cette période, notée NE , les nœuds établissent leurs tables de voisinage. En effet, chaque nœud émet périodiquement des paquets contenant son identifiant unique (ID) ainsi que ses coordonnées (x, y, z) se référant à son emplacement. A la réception de ce message, chaque nœud mémorise l'identifiant et les coordonnées de son voisin.

Pour le maintien des tables de voisinage pendant le mode fonctionnel du réseau, les nœuds diffusent périodiquement des paquets de contrôle. Ces paquets contiennent l'identifiant, les coordonnées, l'énergie résiduelle « Remaining Energy » (RE) ainsi que le l'espace disponible dans chaque niveau de priorité de la file d'attente du nœud expéditeur. Par conséquent, les nœuds sont en mesure de garder une trace sur l'état des ressources de leurs voisins pour prendre les décisions convenables lors de la sélection des prochains sauts. Par ailleurs, grâce à la couche IEEE 802.11e MAC adoptée, les nœuds ont des statistiques locales sur le PLR moyen atteint pour chaque niveau de priorité de paquet, noté PLR^l . Un exemple d'une table de voisinage est donnée par le tableau 6.1.

Par conséquent, lors de la réception de chaque paquet de contrôle, le nœud met à jour l'entrée du nœud concerné et vérifie la validité de la totalité de ses entrées. En fait, à chaque réception, le nœud horodate l'arrivée du paquet et stocke cette information. Lorsque l'entrée est plus ancienne que la durée de validité, l'entrée est supprimée. Ceci est fait pour gérer les

Tableau 6.1 – Table de voisinage du protocole ERM

ID	Position	RE	ABSs	PLRs	Timestamp
85	(x,y,z)	0.5	(10,15)	(0.1, 0.21)	10 :19

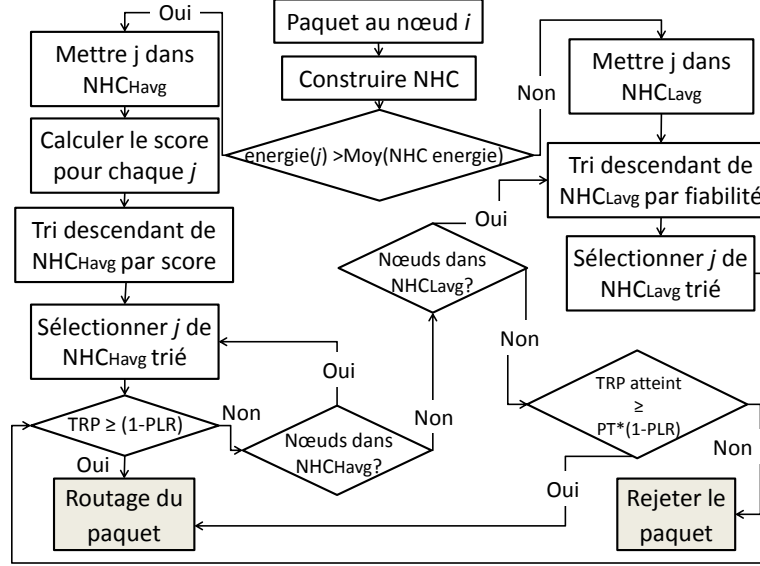


Figure 6.1 – L’algorithme de routage proposé où NHC_{avg} et NHC_{Lavg} sont deux sous-ensembles de NHC contenant les nœuds dont l’énergie résiduelle est supérieure et inférieure à l’énergie résiduelle moyenne de NHC, respectivement.

changements de topologie du réseau et prendre des décisions de routage sur la base d’informations correctes.

6.2.3 L’algorithme de routage

Les nœuds utilisent le protocole de routage en tant que source ou en tant que nœuds relais. Les différentes étapes de l’algorithme de routage sont reportées par l’organigramme donné par la figure 6.1. La première étape de l’algorithme du routage consiste à construire l’ensemble NHC, connaissant les coordonnées du Sink. En effet, cette étape permet de garantir la convergence du paquet vers la destination. Ensuite, l’énergie résiduelle moyenne, notée AvgRE, de l’ensemble NHC est calculée comme suit :

$$AvgRE = \frac{\sum_{i=1}^N RE(i)}{N} \quad (6.6)$$

Où N est la taille de l’ensemble NHC et la RE est obtenue à partir de la table de voisinage. En conséquence, deux sous-ensembles sont créés sur la base de la AvgRE ainsi estimée, à savoir le sous-ensemble NHC_{avg} et le sous-ensemble NHC_{Lavg} , qui contiennent respectivement les nœuds de NHC dont la RE est supérieure et inférieure à la moyenne AvgRE. Ensuite, pour chaque nœud j du sous-ensemble NHC_{avg} , un score compte tenu de sa fiabilité RP_{ij}^S et de sa distance du nœud courant i est calculé comme suit :

$$score(j) = \tau RP_{ij}^S + (1 - \tau) dist(i, j)^{-1} \quad (6.7)$$

Où RP_{ij}^S est obtenue par l’équation 6.2 et τ est un coefficient de pondération. Prendre la $dist(i, j)$ en compte permet d’envisager des nœuds avec une fiabilité appropriée et à proximité du nœud i .

Par conséquent, des délais plus courts peuvent être effectués du fait que le niveau de congestion, représenté par la considération du ABS dans l'estimation de RP_{ij}^S (voir les formules 6.4 et 6.3), est également pris en considération. Les nœuds sont triés en fonction de ces scores. Les nœuds sont ensuite sélectionnés en fonction de leur score et injectés un par un dans l'équation 6.5 jusqu'à ce que le TRP atteigne le PLR désiré, qui dépend de la priorité du paquet. Finalement, le paquet est envoyé à ces nœuds.

Quand les nœuds appartenant à NHC_{Havg} ne sont pas suffisants pour atteindre le PLR souhaité pour le paquet, le sous-ensemble NHC_{Lavg} est utilisé. En fait, dans cette situation, il est d'une grande importance de chercher la fiabilité plus que le délai. Par conséquent, les nœuds appartenant à NHC_{Lavg} sont triés en fonction de leur fiabilité RP_{ij}^S , puis injectés un par un dans l'équation 6.5 pour améliorer et atteindre la TRP rapidement.

Si tous les nœuds NHC_{Lavg} ont été utilisés et la fiabilité totale calculée TRP est toujours inférieure à la fiabilité désirée PLR par un pourcentage donné PT , le paquet est rejeté. Ici, le nœud baisse son taux de paquets jusqu'à ce que la TRP devienne réalisable pour les paquets suivants. Lorsque le nœud est un nœud source, l'encodeur vidéo est appelé à diminuer le paramètre du FR pour la même durée.

Dans le cas contraire, si un important pourcentage de la fiabilité désirée est atteint, le paquet est envoyé aux nœuds considérés. A la fin de chaque cycle, la couche réseau informe la couche application du TRP pour chaque priorité de paquet.

6.2.4 La couche MAC

Maintenant que les prochains sauts sont sélectionnés, le paquet est passé à la couche MAC pour être par la suite transmis. Si la couche MAC est en cours de réception ou d'envoi d'un paquet, le paquet courant est mis en file d'attente appropriée à sa priorité. La couche MAC rapporte en continu l'ABS, ainsi que le PLR moyen de chaque priorité à la couche réseau. Afin de reporter efficacement l'événement au Sink pendant le mode « Rush », les données de l'événement doivent être prioritaires à travers le réseau. Ce résultat est obtenu en utilisant la fonction Enhanced Distributed Coordination (EDCF) fournie par la norme IEEE 802.11e (IEEE, 2002). Nous attribuons à la ROI du mode « rush » la haute priorité, tandis que le BKGD et le mode « standby » sont affectés aux catégories d'accès de basse priorité.

6.3 La solution inter-couches proposée

Dans cette section, nous expliquons les interactions entre tous les composants présentés, formant ainsi une solution inter-couches. Tout d'abord, pour le premier déploiement du réseau, plusieurs tests doivent être effectués afin de déterminer les différents paramètres qui dépendent du contenu de la scène vidéo, en plus des valeurs des taux de perte de paquets souhaités, correspondant à la distorsion maximale de la vidéo tolérée par l'utilisateur. Après cette phase, le réseau est considéré comme opérationnel.

En mode « standby », chaque trame est encodée en intra suivant un FR initial donné noté FR_{stand} . Compte tenu du PLR^{Actuel} , provenant de la dernière valeur enregistrée du TRP pour les paquets de basse priorité, le nœud peut approcher la distorsion de transmission que subira la vidéo en utilisant le modèle de l'équation 5.27, donné par :

$$E[D^n] = \lambda \frac{\sum_{k=1}^N E[D_k]}{N} + (1 - \lambda) E[D^{n-1}] \quad (6.8)$$

Ainsi, la distorsion d'encodage permise est déduite. Ensuite, grâce au modèle de distorsion d'encodage, un ensemble solution contenant les valeurs admissibles des paramètres QP et FSP

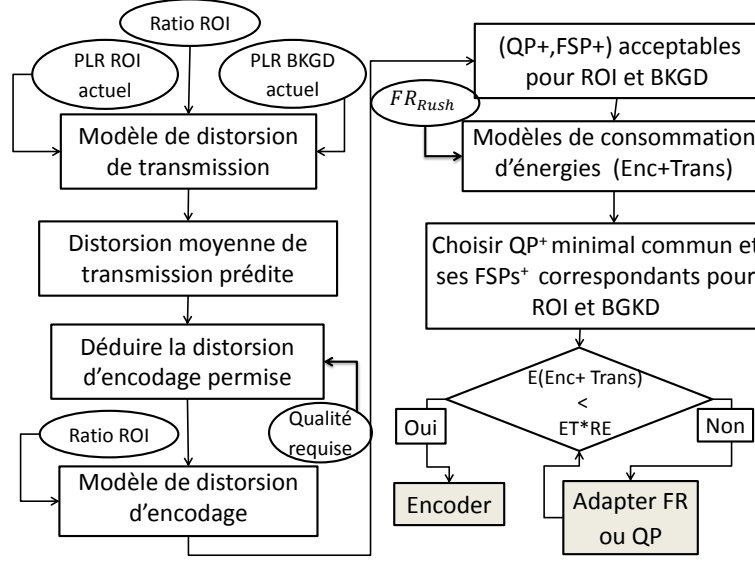


Figure 6.2 – L’organigramme du mode « rush »

correspondant est construit. Ces solutions sont notées QP^+ et FSP^+ . Comme présenté dans la sous-section 5.3.1 du chapitre 5, le modèle de distorsion d’encodage est donné par :

$$D_E(QP, FSP) = D_E(QP_{max}, FSP_{min}) \cdot \alpha_{ED}(QP, FSP_{min}) \cdot \beta_{ED}(QP, FSP) \quad (6.9)$$

Maintenant, chaque couple est injecté dans les modèles de consommation d’énergie de l’équation 5.8 et l’équation 5.14, données comme suit à titre de rappel :

$$E_E(QP, FSP) = E_E(QP_{min}, FSP_{max}) \cdot \alpha_{EE}(QP, FSP_{max}) \cdot \beta_{EE}(QP, FSP) \quad (6.10)$$

$$E_T(QP, FSP) = E_T(QP_{min}, FSP_{max}) \cdot \alpha_{TE}(QP, FSP_{max}) \cdot \beta_{TE}(QP, FSP) \quad (6.11)$$

Les énergies ainsi obtenues sont ensuite additionnées pour décider de la possibilité d’encoder et transmettre le flux ou pas. Si l’énergie résiduelle RE du nœud est supérieure à l’énergie requise par un seuil donné ET , le nœud peut encoder le flux vidéo et le transmettre à la couche réseau.

Dans le cas contraire, le nœud diminue le FR_{stand} adopté et réévalue les énergies requises, pour encoder et transmettre, de manière itérative. Lorsque le seuil minimal autorisé FR_{min} est atteint, le nœud augmente alors le QP^+ sélectionné et réévalue les énergies d’encodage et de transmission jusqu’à ce que le QP maximal autorisé est atteint. Si le nœud est toujours incapable d’encoder et transmettre, il éteint son module vidéo et demeure en tant que nœud relais.

Lorsqu’un événement est détecté par le module intelligent de détection de mouvements, le nœud concerné passe au mode « rush », où un FR_{Rush} initial plus élevé est adopté. Nous désignons par PLR_{ROI}^{Actuel} et PLR_{BKGD}^{Actuel} la dernière valeur enregistrée de TRP pour les paquets de haute et basse priorités respectivement. Dans la figure 6.2, l’organigramme explique la procédure adoptée lorsque deux priorités coexistent. Comme on peut le voir, elle est semblable à la procédure mentionnée ci-dessus pour le mode « standby », à l’exception de la sélection des couples QP^+ et FSP^+ . En effet, dans le mode « rush », la ROI et le BKGD sont quantifiés en utilisant le même QP . Par conséquent, une fois que les ensembles de solutions pour la ROI et le BKGD sont construits, le QP^+ commun minimal est sélectionné ainsi que les FSP correspondant pour chaque région, à savoir FSP_{ROI}^+ et FSP_{BKGD}^+ . Comme mentionné dans la sous-section 6.2.4, le mode « standby » et le BKGD dans le mode « rush » appartiennent au même niveau de priorité.

Tableau 6.2 – Paramètres de simulation

Paramétrage général			
Radio	40 m	Terrain	200x200 m ²
Bandwidth	250 kbps	Energie initiale	100 J
Taille de la file d'attente	100 Paquets	Nbr paquets par trame	33
Ratio de ROI	0.4	NE	50 s
PR_{SM}	3 pps	PR_{RM}	6 pps
PLR_{ROI}^{Requis}	0.25	PLR_{BKGD}^{Requis}	0.4
ET	0.04	PT	0.85
τ	0.8	FR_{min}	1
(QP_{min}, QP_{max})	(14,40)	(FSP_{min}, FSP_{max})	(3,12)
Seuil de capture	10 (dB)	Seuil de détection de porteuse	$1.559e^{-11}W$

Une fois le flux vidéo encodé, les données sont transmises à la couche réseau. Le protocole de routage ERMM est ensuite exécuté comme expliqué dans la section 6.2 et résumé par la figure 6.1.

6.4 Évaluation des performances

Afin de valider la solution proposée, nous effectuons plusieurs tests à l'aide de notre implémentation JM18.4 modifiée de la norme H.264/AVC. La séquence vidéo "Coastaguard" est utilisée d'une résolution spatiale QCIF à 30 images par seconde. Dans le tableau 6.2, nous présentons les différents paramètres utilisés pour les simulations. Pour le modèle de la consommation d'énergie d'encodage, nous posons $E_E(QP_{min}, FSP_{max}) = 24.91J$ et $(a, b, d) = (0.006, 0.35, 0.33)$. Les paramètres considérés pour le modèle de consommation d'énergie de transmission sont $(a, b, d) = (0.052, 0.67, 0.27)$ et $E_T(QP_{min}, FSP_{max}) = 6.4J$. Pour le modèle de la distorsion d'encodage, nous avons $D_E(QP_{max}, FSP_{min}) = 743$ et $(a, n, b, d) = (0.52, 14.32, -0.44, 5.4)$. Le paramètre du modèle de la distorsion de transmission λ est fixé à 0.65.

6.4.1 Évaluation à l'échelle du nœud vidéo source

Dans cette sous-section, nous évaluons le comportement du nœud source vidéo implémentant notre schéma d'encodage proposé intégrant les modèles de prédiction. Ainsi, nous comparons ce dernier avec un schéma dit basique. Le schéma d'encodage basique consiste à utiliser l'encodeur H.264/AVC en intra avec l'option FMO pour générer la ROI et le BKGD. Par ailleurs, ce schéma d'encodage utilise un QP et deux FR, correspondant aux modes « standby » et « rush », qui sont fixes. Ainsi, pour le schéma d'encodage basique, le QP est fixé à 40 et les FR des modes « standby » et « rush » sont fixés à 3.75 et 7.5 respectivement. Concernant le schéma d'encodage proposé, les FR_{stand} et FR_{rush} sont également initialisés à 3.75 et 7.5 respectivement. La distorsion maximale cible, en termes de MSE, est fixée à 500. Dans cette évaluation, nous alternons trois modes « standby » et trois modes « rush », comme illustré sur la figure 6.3, figure 6.4 et figure 6.5. Sur ces figures, un cycle consiste à recueillir les PLR^{Actuel} correspondant aux priorités des paquets, encoder le signal vidéo puis le transmettre. Pour une comparaison équitable, pour chaque cycle, les deux schémas sont sujets aux mêmes PLR^{Actuel} .

La figure 6.3 représente l'énergie consommée par le nœud vidéo source pour l'encodage et la transmission du signal vidéo. Comme il peut être constaté, le schéma d'encodage proposé est plus performant que celui de base et prolonge la durée de vie du nœud source. Ce comportement peut être expliqué par le fait que le schéma d'encodage proposé adapte dynamiquement sa

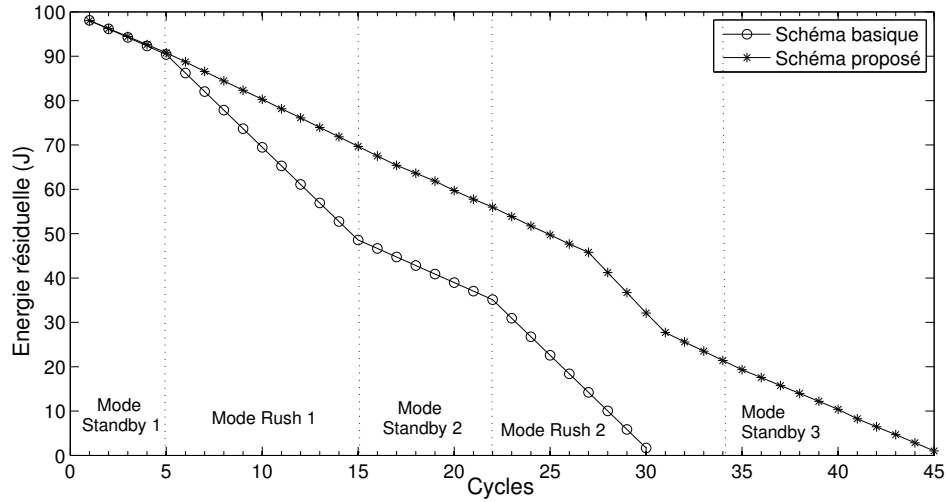


Figure 6.3 – Energie consommée au niveau du nœud vidéo source pour encoder puis transmettre le flux vidéo

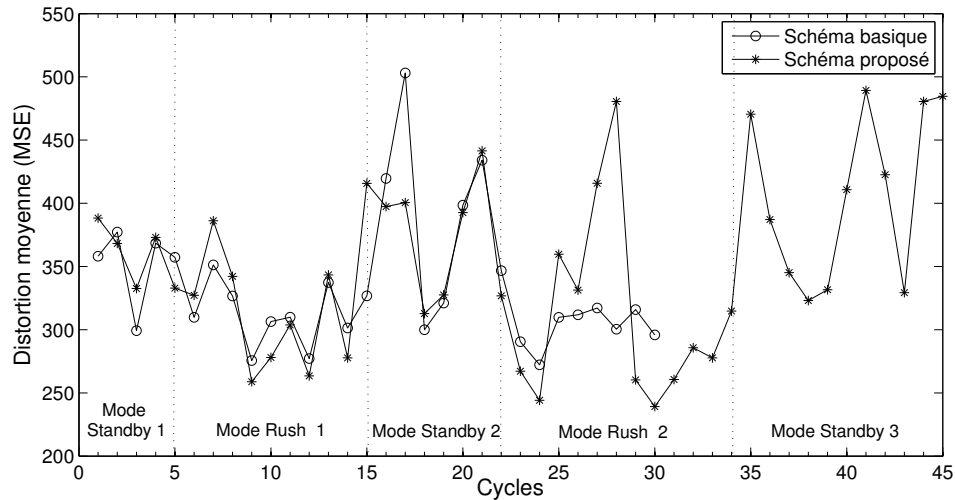


Figure 6.4 – Distorsion de bout-en-bout moyenne après dissimulation des pertes

configuration en fonction de l'énergie disponible. Par conséquent, en cas de besoin, le nœud diminue le FR de l'encodeur et augmente progressivement le QP afin de diminuer la consommation d'énergie tout répondant à la qualité souhaitée. L'extension moyenne observée de la durée de vie du nœud source au cours de ces cycles, introduite par l'adaptation des paramètres d'encodage moyennant l'algorithme défini dans la section 6.3, est d'environ 54%. Cette extension est d'un grand intérêt notamment pour éviter autant que possible les situations critiques, comme la mort du nœud pendant la couverture d'un événement.

La figure 6.4 montre la distorsion moyenne de bout-en-bout de la vidéo après la dissimulation des pertes. Nous observons que tenir compte de l'énergie résiduelle du nœud au cours du processus d'encodage permet au nœud d'étendre la durée de vie du nœud et ainsi rester disponible pour de prochains encodages et transmissions. Lorsque l'énergie résiduelle du nœud diminue, ce dernier a tendance à augmenter la distorsion, de manière contrôlée, pour économiser de l'énergie. De plus si ce cas coïncide avec un taux de perte de paquets important, la distorsion augmente d'avantage, comme illustré par la figure 6.4 pendant le troisième « standby ». Cependant, notre approche étend la durée de vie du nœud tout en restant au dessous du seuil de la distorsion

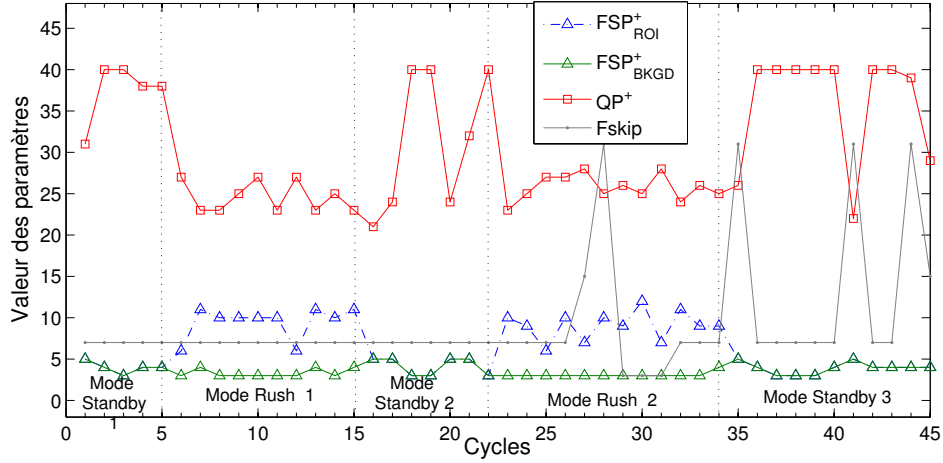


Figure 6.5 – Valeurs des paramètres d'exécutions

maximale exigée de 500.

Dans la figure 6.5, nous présentons la configuration adoptée par le schéma proposé lors de l'exécution. Notre schéma d'encodage sélectionne, au cours des modes « standby », des QP^+ relativement élevés pour économiser l'énergie tout en offrant une qualité vidéo acceptable. Durant les modes « rush », les FSP^+_{BKGD} sont inférieurs aux FSP^+_{ROI} pour compenser l'énergie consommée pour le choix du QP^+ sélectionné, afin de répondre à la qualité souhaitée.

6.4.2 Évaluation à l'échelle du réseau

Dans la suite, nous évaluons la solution inter-couches proposée en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité, de délai et qualité vidéo de bout-en-bout. Les protocoles utilisés ainsi que les modèles proposés sont implémentés dans le simulateur JSIM (Sobeih *et al.*, 2006). Nous considérons 100 nœuds uniformément déployés dans une zone d'intérêt où 50% d'entre eux sont des nœuds vidéo. Nous utilisons le modèle énergétique d'une carte sans fil AT&T Wavelan PCMCIA, implémenté dans le même simulateur. La puissance de transmission est fixée à $8.5872e^{-4}W$ pour un rayon de transmission de 40m. Pour la fiabilité des évaluations, les nœuds vidéo source et les instants des débuts des modes « rush » et « standby » sont générés aléatoirement dans chaque réalisation. Nous nous assurons aussi que les intervalles de transmission se chevauchent afin d'évaluer les solutions étudiées en présence de situations de congestion. Comme expliqué dans la section 6.3, une fois que le nœud vidéo a choisi les paramètres adéquats pour l'encodeur vidéo, l'énergie résiduelle de ce nœud est mise à jour en conséquence. Comme pour les simulations du chapitre 4, le flux est séparé en une série de NALU contenant des données ROI et une autre série de NALU contenant des données BKGD, et chaque NALU est encapsulée dans un paquet.

L'évaluation consiste en une séquence de deux modes « standby » séparés par un mode « rush », sous une contrainte de distorsion de 300. Nous étudions l'impact du nombre de nœuds source vidéo qui détectent l'événement sur les performances de notre solution. De plus, cette dernière est comparée à une solution inter-couches basique, composée du schéma d'encodage basique cité précédemment et le protocole de routage MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006).

Dans la figure 6.6, nous présentons le taux moyen de paquets reçus « Packet Delivery Ratio » (PDR) sur plus de 100 réalisations. D'après cette figure, les deux solutions sont en mesure de fournir une différenciation de services aux paquets de Haute Priorité (HP) et de Basse Priorité (BP). Cependant, en tenant compte de l'information du niveau de congestion, estimée par le taux moyen de perte de paquets du voisin en plus du nombre de paquets dans sa file d'attente actuel, le protocole proposé ERMM intégré dans notre solution fournit des taux réceptions

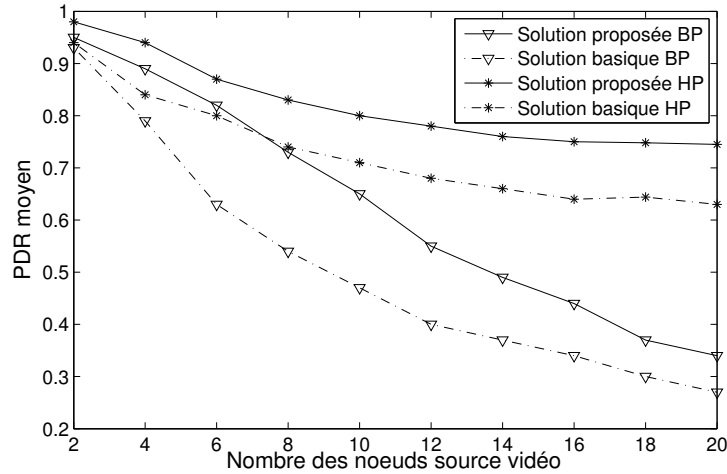


Figure 6.6 – Taux de paquets reçus moyen en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau

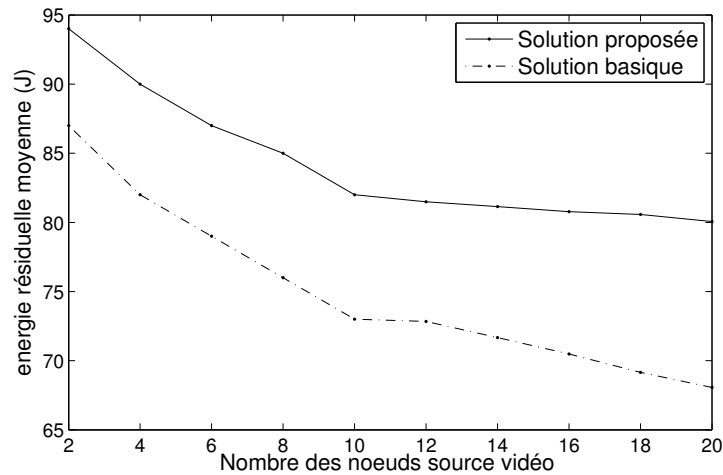


Figure 6.7 – Énergie résiduelle moyenne du réseau en fonction du nombre des nœuds sources vidéo

plus élevés pour les paquets de haute et de basse priorités. En outre, en cas de besoin, notre approche diminue le taux de génération de paquets (*i.e.* PR_{SM} ou PR_{RM}) pour soulager le réseau. Néanmoins, notre approche maintient le taux de paquets reçus désiré jusqu'à 12 nœuds source vidéo simultanés pour le flux de basse priorité, contre 8 nœuds source vidéo simultanés pour la solution basique pour le même flux. Pour le flux de haute priorité, le PDR souhaité de 0.75 est maintenu jusqu'à 20 nœuds source vidéo, alors qu'il n'est garanti que jusqu'à 10 nœuds source vidéo pour la solution basique. En moyenne, le taux de paquets reçus fourni par notre approche dépasse celui obtenu par la solution basique d'environ 12% et 20% pour le flux de haute et basse priorité respectivement. Par ailleurs, le PDR moyen assuré par notre approche sur les deux catégories est de 0.75.

La figure 6.7 expose l'énergie résiduelle moyenne au sein du réseau. Rappelons que nous tenons compte dans le bilan énergétique des énergies consommées pour l'encodage vidéo et celles dissipées par les transmissions (*i.e.* paquets de contrôle, paquets routés, émis et retransmis, ...). La figure 6.7 rapporte le fait que l'énergie résiduelle moyenne du réseau diminue tandis que le nombre de nœuds vidéo sources augmente, ce qui est un comportement évident. Comme précédemment rapporté par la figure 6.3, notre schéma d'encodage économise une quantité importante

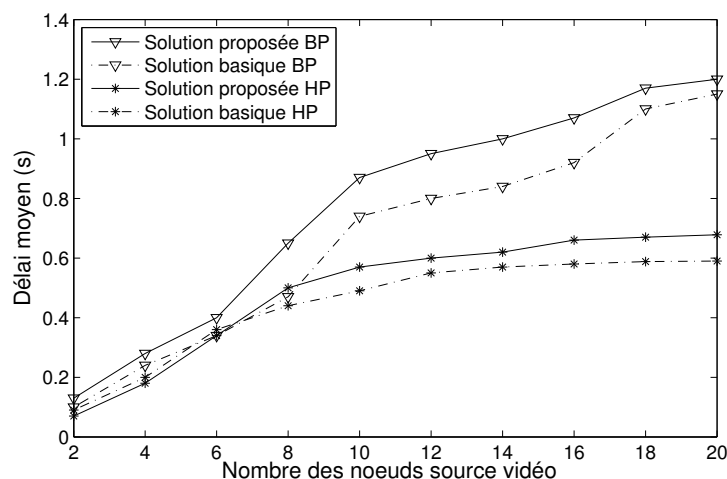


Figure 6.8 – Délai moyen en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau

d'énergie au niveau du nœud source vidéo. En combinant ce schéma d'encodage au protocole de routage proposé ERMM, d'avantage d'énergie est économisée. En effet, ce protocole favorise en premier les nœuds dont l'énergie résiduelle est supérieure à l'énergie moyenne calculée au niveau du voisinage. Par conséquent, la durée de vie globale du réseau est étendue d'environ 15%. L'énergie moyenne dissipée par le réseau dans sa globalité pour encoder et transmettre une image est de 33 mJ.

Dans la figure 6.8, nous présentons les résultats obtenus en termes de délais. Nous observons que la solution basique offre une réduction des délais de 3% pour le flux prioritaire et de 15% pour le flux le moins prioritaire, par rapport à notre solution proposée. Ce comportement est essentiellement dû à l'information du délai intégrée dans la métrique du protocole MMSPEED, tandis que le protocole proposé ERMM vise plus à fournir de l'efficacité énergétique et de la fiabilité. Néanmoins, le délai maximal de notre solution ne dépasse pas 1.2 s, ce qui peut être toléré dans une application de vidéosurveillance. Par ailleurs, le délai fourni par la solution proposée en moyenne est de 0.41s pour le flux HP et de 0.8s pour le flux BP.

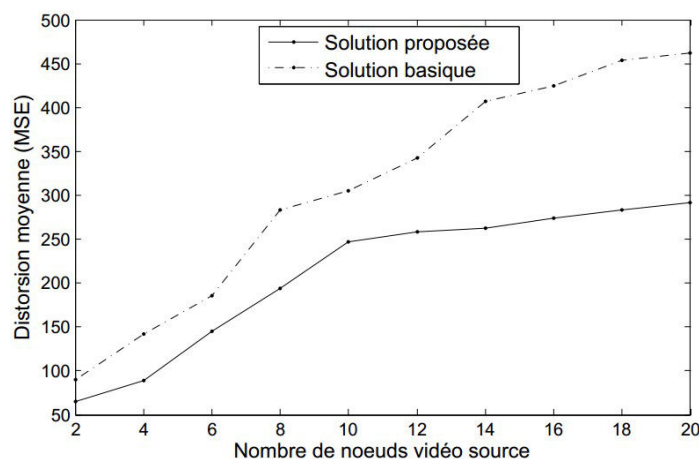


Figure 6.9 – Distorsion de bout-en-bout moyenne après dissimulation des pertes en fonction du nombre des nœuds source vidéo du réseau

Finalement, la distorsion moyenne de bout en bout vidéo après la dissimulation des pertes est donnée par la figure 6.9. La solution proposée fournit une qualité vidéo qui respecte la contrainte de distorsion maximale requise, tandis que la solution basique offre cette qualité jusqu'à 10 nœuds

sources vidéo. En moyenne, l'amélioration observée de la qualité de la vidéo de notre solution est d'environ 35%.

Nous reportons dans le tableau 6.3 quelques résultats visuels attestant l'efficacité de notre approche. En effet, ce tableau montre le flux vidéo reçu d'un des nœuds vidéo source après dissimulation des erreurs, qui consiste à copier la partie perdue à partir de l'image précédente. Grâce à la fiabilité améliorée du protocole de routage proposé ERM, que ce soit au niveau de la ROI ou du BKGD, notre approche permet de fournir des flux vidéo nettement meilleurs que ceux délivrés par la solution basique.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une solution inter-couches efficace en énergie pour prolonger la vie du réseau, sous la contrainte de la qualité vidéo de bout-en-bout dans les réseaux de capteurs vidéo sans fil. Cette solution intègre un schéma d'encodage vidéo adaptatif avec efficacité énergétique qui se base sur la norme H.264/AVC, qui fournit en sortie deux catégories de macroblocs différentiables en services, à savoir la ROI et le BKGD. Les modèles mathématiques pour prédire la consommation d'énergie et la distorsion causées par les phases d'encodage et de transmission, développés dans le chapitre 5, sont utilisés. Ces modèles permettent au schéma d'encodage vidéo proposé de choisir dynamiquement la configuration adéquate pour répondre à la qualité souhaitée tout en prolongeant la durée de vie du réseau. Un protocole de routage à multi-chemins fiable avec multi-priorité et efficacité énergétique est proposé pour acheminer les flux encodés. Ce protocole tire son efficacité énergétique du fait qu'il considère premièrement les nœuds ayant une énergie résiduelle supérieure à l'énergie moyenne sur un voisinage. De plus, ce protocole propose une métrique de fiabilité améliorée et offre une interaction plus prononcée avec le schéma d'encodage. Les simulations numériques réalisées sur le simulateur JSIM (Sobeih *et al.*, 2006) démontrent que la solution proposée étend la durée de vie du capteur vidéo de 54%, en tenant compte de l'énergie dissipée pour l'encodage et la transmission du flux vidéo. Par ailleurs, en considérant le réseau dans sa globalité, l'approche inter-couches proposée permet d'étendre la durée de vie du réseau de 15%, tout en améliorant la fiabilité de 12% et 20% pour les flux de haute et basse priorité respectivement. En termes de qualité vidéo de bout-en-bout, la solution proposée atteint une importante amélioration de 35%. Néanmoins, cette solution n'offre pas d'amélioration en termes de délais, mais ceux-ci demeurent très intéressants vis-à-vis aux approches de la littérature (*c.f.* tableau 2.1 et tableau 2.2).

Tableau 6.3 – Résultats visuels de la solution basique et proposée pour 8 nœuds sources vidéo simultanés

Solution basique	Solution proposée
Image 67	
	
Image 69	
	
Image 72	
	
Image 82	
	



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Les récents progrès technologiques ont permis l'émergence de petits appareils à faible consommation dotés à la fois de capacités de captures, de traitements et de communications sans fil. Cependant, ces nœuds souffrent du manque de ressources et surtout celles énergétiques, du fait qu'ils sont alimentés par une batterie dont le remplacement est indésirable et dans certains cas impossible. Les réseaux constitués de ces nœuds, communément appelés réseaux de capteurs sans fil, attirent une attention considérable. La majorité de cette attention, cependant, a été concentrée sur l'efficacité énergétique de la phase de transmission. Ceci est en effet dû au fait que les données transmises sont scalaires, telles la température et l'humidité, et ne nécessitent pas alors un traitement important.

L'introduction de capteurs images et vidéo, en vue d'enrichir davantage les applications envisagées par des données visuelles, pousse à revoir les contraintes et redéfinir les problématiques à traiter dans ces réseaux. En effet, ils soulèvent de nouveaux défis tels que le traitement efficace en énergie de l'image et de la vidéo, ainsi que la nécessité d'offrir de la qualité de service pour atteindre la qualité visuelle requise par l'utilisateur. Face à ces exigences et contraintes inhérentes aux nœuds, les chercheurs ont vu dans la conception inter-couches une solution très attractive. En effet, cette approche consiste à réaliser une interaction plus riche entre les différentes couches pour réaliser des performances plus importantes et à complexité réduite. Dans cette thèse nous adoptons l'approche inter-couches dans la conception de solutions pour le support de flux vidéo dans les RCVSF.

Dans cette thèse, nous avons commencé par présenter et démontrer l'efficacité de la considération de l'espace disponible dans la file d'attente pour deux protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs. Le premier protocole SPEED (He *et al.*, 2005a) offre un service unique alors que le second MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006) est un protocole multi-service. A l'issue de cette étude, nous avons proposé des versions améliorées en délai et en fiabilité, des protocoles SPEED et MMSPEED, que nous nommons QBSA-SPEED et QBSA-MMSPEED. En effet, les résultats des simulations réalisées sur le simulateur JSIM (Sobeih *et al.*, 2006) montrent que QBSA-SPEED améliore en moyenne le délai de 26% et la fiabilité de 14%, comparé à SPEED. Par ailleurs, QBSA-MMSPEED améliore en moyenne le délai de 23% et la fiabilité de 5%, comparé à MMSPEED.

Par la suite, une première solution inter-couches pour le support du flux vidéo dans les RCVSF est proposée. L'approche repose sur un schéma d'encodage vidéo adaptatif et efficace en énergie basé sur la norme vidéo H.264/AVC. Le schéma fournit en sortie deux catégories de macrobloc à savoir la ROI et le BKGD. Nous avons montré par des simulations que le schéma d'encodage est en mesure d'atteindre une qualité globale de 25 dB avec une efficacité énergétique de 75.4% par rapport à un schéma classique. Ainsi, nous avons prouvé son efficacité en termes de qualité et d'efficacité énergétique. Les flux ainsi générés sont acheminés par un

protocole multi-chemins avec différenciation de service entre les ROI et les BKGD, que nous nommons EQBSA-MMSPEED. Ce dernier adopte une fonction d'attribution de scores étendue, qui pondère entre l'énergie résiduelle des nœuds, l'espace disponible dans leurs files d'attente ainsi que leur délai. Par ailleurs, ce protocole introduit une procédure afin de repousse le rejet du paquet autant que possible. Le protocole EQBSA-MMSPEED atteint 33% d'extension de durée de vie moyenne et introduit une amélioration moyenne en délai de 5% par rapport à QBSA-MMSPEED et de 10% par rapport à MMSPEED. Par ailleurs, EQBSA-MMSPEED offre une amélioration moyenne en fiabilité de 23% comparé à QBSA-MMSPEED et de 34% comparé à MMSPEED. En termes de qualité vidéo, l'approche inter-couches utilisant EQBSA-MMSPEED comme protocole de routage augmente de 3 dB la qualité moyenne de la vidéo reçue par rapport à MMSPEED et QBSA-MMSPEED. Cependant la solution proposée ne considère pas l'énergie consommée durant la phase de l'encodage et nécessite davantage d'adaptabilité par rapport aux ressources et à l'état du réseau.

A cet effet, nous avons analysé les comportements de l'énergie consommée ainsi que la distorsion dues à l'encodage et la transmission de la vidéo par le nœud source. Par la suite, nous avons proposé des modèles en adéquation avec les comportements physiques de ces quantités, en fonction des paramètres de contrôle de notre schéma d'encodage proposé dans le chapitre 4, à savoir le FR, le QP et le FSP. En effet, les énergies d'encodage et de transmission sont modélisées en premier en fonction du QP et du FSP, comme étant l'énergie maximale atteinte au point (QP_{min}, FSP_{max}) , qui est diminuée par l'effet de la quantification puis diminuée par l'effet de la sélection fréquentielle dépendant du QP adopté. L'erreur de prédiction moyenne du modèle de la consommation de l'énergie d'encodage et de transmission est de 6% et 4% respectivement. En second, cette énergie maximale est davantage réduite par un autre levier qui agit sur le nombre d'images à encoder et à transmettre, à savoir le FR. Dans le même sens, la distorsion de l'encodage est modélisée en fonction du QP et du FSP, comme étant la distorsion maximale atteinte au point (QP_{max}, FSP_{min}) qui est atténuée par l'effet la diminution de la quantification, puis atténuée par l'augmentation du paramètre de la sélection fréquentielle dont l'effet dépend du QP adopté. L'erreur de prédiction moyenne de ce modèle est estimée à 4%. Enfin, la distorsion de la transmission, après dissimulation des pertes, est modélisée en fonction du taux de paquets perdus, comme étant une pondération entre la distorsion due à la dissimulation des pertes et celle due à la dissimulation à partir d'images sujettes elles-même aux pertes. L'erreur de prédiction moyenne de ce modèle est de 9%. Ces modèles ont pour objectif de permettre au schéma d'encodage vidéo proposé de choisir dynamiquement la configuration appropriée pour répondre à la qualité souhaitée tout en prolongeant la durée de vie du réseau.

Grâce à ces modèles, nous avons proposé une solution inter-couches efficace en énergie pour prolonger la vie du réseau, sous la contrainte de la qualité vidéo de bout-en-bout dans les RCVSF. Cette solution intègre le schéma d'encodage vidéo adaptatif proposé enrichi de modèles mathématiques développés pour prédire la consommation d'énergie et la distorsion causées par les phases d'encodage et de transmission. Un protocole de routage à multi-chemins fiable avec multi-priorité et efficacité énergétique est proposé pour acheminer les flux encodés, noté ERMM. Ce protocole tire son efficacité énergétique du fait qu'il ne considère que les nœuds voisins ayant une énergie résiduelle supérieure à l'énergie moyenne sur un voisinage. Par ailleurs, ce protocole propose une métrique de fiabilité améliorée et offre une interaction plus prononcée avec le schéma d'encodage. L'évaluation de l'approche inter-couches proposée est effectuée en comparaison à une solution inter-couches basique, composée d'un schéma d'encodage basique associé au protocole de routage MMSPEED. Les simulations numériques réalisées sur le simulateur JSIM (Sobeih *et al.*, 2006) démontrent que la solution proposée étend la durée de vie du capteur vidéo de 54%, en tenant compte de l'énergie dissipée pour l'encodage et la transmission du flux vidéo. Par ailleurs, en considérant le réseau dans sa globalité, l'approche inter-couches proposée permet d'étendre la durée de vie du réseau de 15%, tout en améliorant la fiabilité de 12% et 20% pour

les flux de haute et basse priorité respectivement. En termes de qualité vidéo de bout-en-bout, la solution proposée atteint une importante amélioration de 35%. Néanmoins, cette solution n'offre pas d'amélioration en termes de délais, mais ceux-ci demeurent très intéressants vis-à-vis aux approches de la littérature (*c.f.* tableau 2.1 et tableau 2.2).

Perspectives

Le présent travail peut être considéré comme un premier contact avec la problématique en question. Les solutions proposées sont certainement incomplètes et peuvent bien sur être améliorées. Afin d'améliorer la résilience aux erreurs et réduire l'énergie dissipée lors de la transmission, le codage par descriptions multiples peut être utilisé en transmettant, par exemple, deux descriptions de la ROI et une seule appartenant au BKGD. La protection inégale des données est aussi une possibilité à étudier grâce à la séparation des flux en ROI/BKGD introduite au niveau de la couche application. Par ailleurs, cette séparation de flux est réalisée d'une manière statique. Une séparation ROI/BKGD dynamique serait plus intéressante en intégrant des schémas simples et adaptés de détection d'objets d'intérêt de la scène. En vue davantage de réduction de la consommation d'énergie, le codage à multivues (MVC) peut aussi être adopté, tout en préservant le schéma à scalabilité ROI/BKGD. Il reste toutefois des efforts à fournir au niveau de l'affichage du flux, afin d'améliorer la qualité d'expérience de l'utilisateur, vu la dégradation introduite par l'utilisation de FR assez bas.

Au niveau du routage, des méthodes de décisions sur la base de multiples attributs inspirées de la nature et basées sur la théorie des jeux peuvent être adoptées. En général, de notre point de vue, les protocoles adoptant ces paradigmes continueront à être publiés que ce soit pour la qualité des travaux ou pour l'attractivité de toutes leurs formules mathématiques. Ce qui est sûr, c'est que le schéma de routage à multi-chemins avec différenciation de service est le schéma à adopter. Nous voyons dans le protocole MMSPEED (Felemban *et al.*, 2006) ainsi que ses dérivés un potentiel de futurs standard de routage pour les RCSF.

A long termes, nous envisageons d'examiner de plus près certaines directions que nous considérons comme intéressantes. La première est l'étude et le développement de schémas d'encodage distribués, une solution qui fait l'objet de beaucoup d'attention. Ce paradigme de codage permet de part sa conception de basculer la complexité au niveau du décodeur et de ne pas nécessiter d'estimation de mouvement au niveau de l'encodeur. La deuxième direction est l'utilisation du paradigme de l'échantillonnage compressé (en anglais Compressive Sensing) qui permet une reconstitution assez fiable de l'information à partir d'échantillons au-dessous du seuil d'échantillonnage de Nyquist. Pudlewski *et al.* (2012) montrent que l'échantillonnage compressé peut offrir une alternative aux encodeurs vidéo traditionnels en permettant des systèmes visuels, capables de collecter et de compresser les données simultanément, à très faible complexité de calcul au niveau de l'encodeur. Finalement, il est clair que les RCSF, sous toutes leurs formes, constituent un moyen très précieux pour collecter d'immenses volumes de données de différents environnements et phénomènes physiques. Avec tous ces objets et appareils connectés à Internet, et dans la vision du « Internet of Things », il est primordiale de commencer à penser à comment les RCSF viendront faire part de ce nouveau paradigme. En effet, plusieurs appels à contribution spéciale de la part de plusieurs journaux spécialisés ont été initiés en vue d'accompagner cette préoccupation d'actualité.

Les réseaux de capteurs sans fil et le Maroc

La rédaction de ce manuscrit a coïncidé avec une catastrophe naturelle, qui a conduit à une douloureuse perte humaine de près de 32 citoyens marocains¹, dans des inondations survenues à la commune de Guelmim au sud du Maroc. La couverture médiatique a souligné l'existence de carences dans la gestion des inondations et des infrastructures défaillantes, après des intempéries.

Il est clair que face à une nature déchainée, cumulant des précipitations dépassant les 400 millimètres en moins de 48 heures, nul ne peut prétendre pouvoir éviter la catastrophe. Cependant, il est clair qu'en adoptant une politique de prévention sur la base d'informations assez précises, les pertes humaines seraient limitées.

De notre point de vue, nous pensons que les RCSF sont très adaptés à « l'environnement » Marocain : déploiement facile, pas de besoins de maintenance en continue, acheminement des informations jusqu'aux bureaux des décideurs. Les nœuds peuvent être mis à disposition tout au long des lits des fleuves, avoisinant des zones habitées, pour suivre en temps réel le niveau des eaux et prévoir des opérations d'évacuation si nécessaire. Les nœuds capteurs peuvent aussi être incrustés dans tout édifice à risque, permettant ainsi de relayer l'information sur l'état de santé des ponts, des terrains glissant et d'autres infrastructures en temps réel. Ceci permettra aux autorités responsables d'intervenir pour la maintenance afin d'éviter de telles pertes. Un tel déploiement a été fait sur le Golden Gate Bridge à San Francisco en 2007 Kim *et al.* (2007) où un système de capteurs surveille la vibration ambiante de la structure, tout en recueillant des données synchrones provenant des accéléromètres installés sur la structure. L'équipe de travail de ce projet a souligné dans sa publication le fait que le prototype du système sans fil utilisé coûte environ 600\$ par nœud, alors qu'il coûte des milliers de dollars par nœud, pour les mêmes fonctionnalités, dans un réseau filaire classique sur PC. Comparé au réseau filaire, l'installation et l'entretien sont faciles et peu coûteux dans un RCSF et la perturbation du fonctionnement de la structure est minime.

Le Maroc, étant un pays où l'eau se raréfie et devient une ressource de plus en plus précieuse, peut réduire l'effet de cette problématique en employant les RCSF dans son agriculture. Ces derniers seront implantés dans le sol et pourront alors recueillir diverses informations sur ses caractéristiques. Par conséquent, les propriétaires pourront mieux cibler les traitements pour de meilleurs récoltes et aussi avoir un système d'irrigation répondant aux besoins précis des plantes. En effet, sur la base des paramètres recueillis en termes d'humidité et celle requise, par rapport au produit visé, des nœuds peuvent actionner ou éteindre des systèmes d'irrigations automatiquement selon le besoin, la saison, les précipitations, etc. Ces nœuds pourront aussi bénéficier du soleil du Maroc et recharger leur batteries grâce aux cellules solaires qui sont de plus en plus démocratisées, et par conséquent la durée de vie du réseau pourra être étendue.

1. http://afrique.lepoint.fr/actualites/inondations-la-charge-de-la-presse-marocaine-25-11-2014-1884458_2365.php



LISTE DES PUBLICATIONS

Journaux Internationaux avec comité de lecture

- Othmane Alaoui-Fdili**, François-Xavier Coudoux, Youssef Fakhri, Patrick Corlay and Driss Aboutajdine, "**Energy-efficient cross-layer framework for video delivery over Wireless Video Sensor Networks**", *Soumis à Ad Hoc Networks, Elsevier*.
- Othmane Alaoui-Fdili**, Youssef Fakhri and Driss Aboutajdine, "**Impact of queue buffer size awareness on single and multiservice real-time routing protocols for WSNs**", *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, Vol 4, No 2, August 2012.

Conférences Internationales avec comité de lecture

- Othmane Alaoui-Fdili**, Patrick Corlay, Youssef Fakhri, François-Xavier Coudoux and Driss Aboutajdine, "**A Cross-Layer Approach for Video Delivery over Wireless Video Sensor Networks**", *7th International Symposium on signal, Image, Video and Communications 2014 (ISIVC 2014)*, 19-22 November, Marrakech, Morocco.
- Othmane Alaoui-Fdili**, Fakhri Youssef, Patrick Corlay, François-Xavier Coudoux and Driss Aboutajdine, "**Energy Consumption Analysis and Modelling of a H.264/AVC Intra-only Based Encoder Dedicated to WVSNS**", *21st IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (ICIP 2014)*, 27-30 October, Paris, France.
- Othmane Alaoui-Fdili**, François-Xavier Coudoux, Fakhri Youssef, Patrick Corlay and Driss Aboutajdine, "**Energy Efficient Adaptive Video Compression Scheme for WVSNS**", *21st European Signal Processing Conference 2013 (EUSIPCO 2013)*, 9-13 September, Marrakech, Morocco.
- Othmane Alaoui-Fdili**, Youssef Fakhri and Driss Aboutajdine, "**Impact of Buffer Size Awareness on a Real-Time Routing Protocol for Wireless Sensor Networks**", *4th international Workshop on Information Technologies and Communication 2011 (WO-TIC'11)*, 13-15 October 2011, Casablanca, Morocco.
- Othmane Alaoui-Fdili**, Youssef Fakhri and Driss Aboutajdine, "**Routing Protocols Based On Quality Of Service In Wireless Sensor Networks**", *Colloque International Telecom'2011 & 7èmes JFMMA 2011*, 16-18 March, Tangier, Morocco.

Journées Nationales

•**Othmane Alaoui-Fdili**, François-Xavier Coudoux, Youssef Fakhri, Patrick Corlay et Driss Aboutajdine, "**Schémas de compression efficace en énergie pour les réseaux de capteur vidéo sans fil**", *Secondes journées Franco-Libanaises, JFL2*, 22-25 octobre 2013, Dunkerque, France.



BIBLIOGRAPHIE

- ADAN, I. et RESING, J. (2002). Queueing theory. *Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology*.
- AGHDASI, H., ABBASPOUR, M., MOGHADAM, M. et SAMEI, Y. (2008). An energy-efficient and high-quality video transmission architecture in wireless video-based sensor networks. *Sensors*, pages 4529–4559.
- AIELLO, G. R. et ROGERSON, G. D. (2003). Ultra-wideband wireless systems. *Microwave Magazine, IEEE*, 4(2):36–47.
- AKYILDIZ, I. F. et KASIMOGLU, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks : research challenges. *Ad hoc networks*, 2(4):351–367.
- AKYILDIZ, I. F., MELODIA, T. et CHOWDURY, K. (2007). Wireless multimedia sensor networks : A survey. *Comput Netw*, 51:921–960.
- AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D. et MELODIA, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks : research challenges. *Ad hoc networks*, 3(3):257–279.
- AKYILDIZ, I. F. et STUNTEBECK, E. P. (2006). Wireless underground sensor networks : Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 4(6):669–686.
- AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y. et CAYIRCI, E. (2002). Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38:393–422.
- AKYILDIZ, I. F. et VURAN, M. C. (2010). *Wireless sensor networks*, volume 4. John Wiley & Sons.
- ALMALKAWI, I., ZAPATA, M. G., AL-KARAKI, J. et MORILLO-POZO, J. (2010). Wireless multimedia sensor networks : current trends and future directions. *Sensors*, pages 6662–6717.
- BAMBANG, A., VICTOR, C. et N.PANOS (2011). Energy efficient multiple description coding for video sensor network. *In The International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications Workshops*, pages 153–158.
- BELLAICHE, P. (2002). *Les secrets de l'image vidéo*. GiantChair, 4 édition.
- BOICE, J., LU, X., MARGI, C., STANEK, G., ZHANG, G., MANDUCHI, R. et OBRACZKA, K. (2006). Meerkats : A power-aware, self-managing wireless camera network for wide area monitoring. *In Proc. Workshop on Distributed Smart Cameras*.
- BOLUK, P., IRGAN, K., BAYDERE, S. et HARMANCI, E. (2011a). Iqar : Image quality aware routing for wireless multimedia sensor networks. *In Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, pages 394–399.

- BOLUK, P. S., BAYDERE, S. et HARMANCI, A. E. (2011b). Perceptual quality-based image communication service framework for wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 14(1):1–18.
- BOLUK, P. S., BAYDERE, S. et HARMANCI, A. E. (2011c). Robust image transmission over wireless sensor networks. *Mob Netw Appl*, 16(2):149–170.
- BORGES, L., VELEZ, F. et LEBRES, A. (2014). Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications. *IEEE Commun Surv Tutor*.
- CALHOUN, B., DALY, D., VERMA, N., FINCHLSTEIN, D., WENTZLOFF, D., WANG, A., CHO, S. et CHANDRAKASAN, A. (2005). Design considerations for ultra-low energy wireless microsensor nodes. *Computers, IEEE Transactions on*, 54(6):727–740.
- CHEN, D. et VARSHNEY, P. K. (2004). Qos support in wireless sensor networks : A survey. In *Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004), Las Vegas, Nevada, USA*.
- CHEN, M., LEUNG, V., MAO, S. et YUAN, Y. (2007). Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30(17):3368–3383.
- CHEN, M., LEUNG, V. C. M., MAO, S. et LI, M. (2008). Cross-layer and path priority scheduling based real-time video communications over wireless sensor networks. In *Vehicular Technology Conference*, pages 2873–2877.
- CHONG, C.-Y. et KUMAR, S. (2003). Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8):1247–1256.
- CHRISTOPOULOS, C., SKODRAS, A. et EBRAHIMI, T. (2000). The jpeg2000 still image coding system : an overview. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 46(4):1103–1127.
- COSTA, D. G. et GUEDES, L. A. (2011). A survey on multimedia-based cross-layer optimization in visual sensor networks. *Sensors*, 11(5):5439–5468.
- DARGIE, W. et POELLABAUER, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks : theory and practice*. John Wiley & Sons.
- DEKNUDT, C. (2011). *Mise en oeuvre d'architectures de transcodage vidéo H. 264/AVC et SVC : application à la transmission optimisée de la vidéo haute définition*. Thèse de doctorat, Valenciennes.
- DEKNUDT, C., CORLAY, P., BACQUET, A., ZWINGELSTEIN-COLIN, M. et COUDOUX, F. (2010). Reduced complexity H.264/AVC transrating based on frequency selectivity for high-definition streams. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, pages 2430–2437.
- DUNKELS, A., GRONVALL, B. et VOIGT, T. (2004). Contiki – a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In *The Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, pages 455–462.
- DUNKELS, A., OSTERLIND, F. et HE, Z. (2007). An adaptive communication architecture for wireless sensor networks. In *The International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 335–349.
- ESTRIN, D., CULLER, D., PISTER, K. et SUKHATME, G. (2002). Connecting the physical world with pervasive networks. *Pervasive Computing, IEEE*, 1(1):59–69.

- FELEMBAN, E., CHANG-GUN, L. et EKICI, E. (2006). MMSPEED : multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks. *IEEE Trans Mob Comput*, 5(6):738–754.
- FELEMBAN, E., SHEIKH, A. A. et MANZOOR, M. A. (2014). Improving response time in time critical visual sensor network applications. *Ad Hoc Networks*, 23:65–79.
- GUPTA, G. et YOUNIS, M. (2003). Load-balanced clustering of wireless sensor networks. *In Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1848–1852 vol.3.
- HALL, P., HAO, Y., NECHAYEV, Y., ALOMAINY, A., CONSTANTINOU, C., PARINI, C., KAMARUDIN, M., SALIM, T., HEE, D., DUBROVKA, R., OWADALLY, A., SONG, W., SERRA, A., NEPA, P., GALLO, M. et BOZZETTI, M. (2007). Antennas and propagation for on-body communication systems. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 49(3):41–58.
- HE, T., STANKOVIC, J., LU, C. et ABDELZAHER, T. (2005a). A spatiotemporal communication protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, pages 995–1006.
- HE, Y., LEE, I. et GUAN, L. (2009). Distributed algorithms for network lifetime maximization in wireless visual sensor networks. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol*, 19(5):704–718.
- HE, Z., CHENG, W. et CHEN, X. (2008a). Energy minimization of portable video communication devices based on power-rate-distortion optimization. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 18(5):596–608.
- HE, Z., EGGERT, J., CHENG, W., ZHAO, X., MILLSPAUGH, J., MOLL, R., BERINGER, J. et SARTWELL, J. (2008b). Energy-aware portable video communication system design for wildlife activity monitoring. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 8(2):25–37.
- HE, Z., LIANG, Y., CHEN, L., AHMAD, I. et WU, D. (2005b). Power-rate-distortion analysis for wireless video communication under energy constraints. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol*, 15(5):645–658.
- HE, Z. et WU, D. (2006). Resource allocation and performance analysis of wireless video sensors. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 16(5):590–599.
- HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A. et BALAKRISHNAN, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *In The Annual Hawaii International Conference on System Sciences*.
- HERTLEER, C., HERTLEER, C., ROGIER, H. et VALLOZZI, L. (2009). Off-body communication for protective clothing. *In Wearable and Implantable Body Sensor Networks. BSN. Sixth International Workshop on*, pages 301–304.
- HEYDON, R. et HUNN, N. (2012). Bluetooth Low Energy. *CSR Presentation, Bluetooth SIG*.
- HOQUE, M., SIEKKINEN, M. et NURMINEN, J. (2014). Energy efficient multimedia streaming to mobile devices : a survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 16(1):579–597.
- HURBAIN, I. (2004). The MPEG4/AVC standard : description and basic tasks splitting. Rapport technique, Centre de recherche en informatique, Ecole des Mines de Paris.

- IEEE (2002). IEEE std 802.11e/D3.3 draft supplement to IEEE standard for telecommunications and information exchange between systems LAN/MAN specific requirements. part 11 : Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY).
- IEEE (2006). IEEE Standard for information technology-Telecommunications and Information exchange between systems-local and metropolitan area networks. Specific requirements Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. *IEEE Standard*.
- INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D., HEIDEMANN, J. et SILVA, F. (2003). Directed diffusion for wireless sensor networking. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 11(1):2–16.
- IRGAN, K., UNSALAN, C. et BAYDERE, S. (2014). Low-cost prioritization of image blocks in wireless sensor networks for border surveillance. *J Netw Comput Appl*, 38:54–64.
- ITU-T (2009). Advanced video coding for generic audiovisual services.
- JURDAK, R. (2007). *Wireless ad hoc and sensor networks : A cross-layer design perspective*. Springer.
- KIM, S., PAKZAD, S., CULLER, D., DEMMEL, J., FENVES, G., GLASER, S. et TURON, M. (2007). Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on*, pages 254–263. IEEE.
- KINGMAN, J. (1993). Poisson processes. *Encyclopedia of Biostatistics*.
- LAMBERT, P., NEVE, W. D., DHONDT, Y. et de WALLE, R. V. (2006). Flexible macroblock ordering in H.264/AVC. *J Vis Commun Image Represent*, 17(2):358–375. Introduction : Special Issue on emerging H.264/AVC video coding standard.
- LECUIRE, V., DURAN-FAUNDEZ, C. et KROMMENACKER, N. (2007). Energy-efficient transmission of wavelet-based images in wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2007.
- LI, S., NEELISETTI, R. K., LIU, C. et LIM, A. (2010). Efficient multi-path protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Wireless and Mobile Networks*, 2(1):110–130.
- LUCAS, J. M. et SACCUCCI, M. S. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes : properties and enhancements. *Technometrics*, 32(1):1–12.
- MACIT, M., GUNGOR, V. C. et TUNA, G. (2014). Comparison of QoS-aware single-path vs. multi-path routing protocols for image transmission in wireless multimedia sensor networks. *Ad Hoc Netw*, 19:132–141.
- MAMMERI, A., KHOUMSI, A., ZIOU, D. et HADJOU, B. (2008a). Energy-efficient transmission scheme of jpeg images over visual sensor networks. In *Local Computer Networks, 2008. LCN 2008. 33rd IEEE Conference on*, pages 639–647.
- MAMMERI, A., KHOUMSI, A., ZIOU, D. et HADJOU, B. (2008b). Modeling and adapting JPEG to the energy requirements of VSN. In *The International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 806–811.
- MCOUAT, J. (2013). *Wireless Sensor Networks : Principles, Design and Applications*. Springer Science & Business Media.

- MEHTA, H., OWENS, R. M. et IRWIN, M. J. (1996). Instruction level power profiling. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 6, pages 3326–3329. IEEE.
- MONTENEGRO, G., KUSHALNAGAR, N., HUI, J. et CULLER, D. (2007). Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks. *Internet proposed standard RFC*, 4944.
- OSTERMANN, J., BORMANS, J., LIST, P., MARPE, D., NARROSCHE, M., PEREIRA, F., STOCKHAMMER, T. et WEDI, T. (2004). Video coding with H.264/AVC : tools, performance, and complexity. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 4(1):7–28.
- POLITIS, I., TSAGKAROPOULOS, M., DAGIUKLAS, T. et KOTSOPOULOS, S. (2008). Power efficient video multipath transmission over wireless multimedia sensor networks. *Mob Netw Appl*, pages 274–284.
- PUDLEWSKI, S., PRASANNA, A. et MELODIA, T. (2012). Compressed-sensing-enabled video streaming for wireless multimedia sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 11(6):1060–1072.
- RABAEY, J., AMMER, J., OTIS, B., BURGHARDT, F., CHEE, Y., PLETCHER, N., SHEETS, M. et QIN, H. (2006). Ultra-low-power design. *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, 22(4):23–29.
- RICHARDSON, I. (2006). H.264 and MPEG-4 video compression. *Wiley Press*.
- RUI, D., PU, W. et AKYILDIZ, I. (2012). Correlation-aware QoS routing with differential coding for wireless video sensor networks. *IEEE Trans Multimed*, 14(5):1469–1479.
- SAHIN, D., GUNGOR, V. C., KOCAK, T. et TUNA, G. (2014). Quality-of-service differentiation in single-path and multi-path routing for wireless sensor network-based smart grid applications. *Ad Hoc Netw*, 22:43–60.
- SARIF, B. A., POURAZAD, M. T., NASIOPOULOS, P. et LEUNG, V. (2013). Encoding and communication energy consumption trade-off in h. 264/avc based video sensor network. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2013 IEEE 14th International Symposium and Workshops on a*, pages 1–6. IEEE.
- SARISARAY, P., IRGAN, K., BAYDERE, S. et HARMANCI, E. (2010). Image quality estimation in wireless multimedia sensor networks : an experimental study. In *7th International ICST Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems*.
- SHAH, G., LIANG, W. et AKAN, O. (2012). Cross-layer framework for QoS support in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Trans Multimed*, 14(5):1442–1455.
- SHAIKH, F. K., CHOWDHRY, B. S., AMMARI, H., UQAILI, M. A. et SHAH, A. (2013). *Wireless Sensor Networks for Developing Countries*. Springer.
- SHU, L., HAUSWIRTH, M., ZHANG, Y., MA, J., MIN, G. et WANG, Y. (2010a). Cross layer optimization for data gathering in wireless multimedia sensor networks within expected network lifetime. *J. UCS*, 16(10):1343–1367.
- SHU, L., ZHANG, Y., YANG, L. T., WANG, Y., HAUSWIRTH, M. et XIONG, N. (2010b). Tpgf : geographic routing in wireless multimedia sensor networks. *Telecommunication Systems*, 44(1-2):79–95.

- SOBEIH, A., HOU, J., KUNG, L., LI, N., ZHANG, H., CHEN, W., TYAN, H. et LIM, H. (2006). J-sim : a simulation and emulation environment for wireless sensor networks. *IEEE Wirel Commun*, 13(4):104–119.
- SORO, S. et HEINZELMAN, W. (2009). A survey of visual sensor networks. *Advances in Multimedia*, 2009.
- SPECIFICATION, Z. (2008). Zigbee standards organization. *Document 053474r17*, Jan, 17.
- SRIVASTAVA, V. et MOTANI, M. (2005). Cross-layer design : a survey and the road ahead. *Communications Magazine, IEEE*, 43(12):112–119.
- SUHONEN, J., KOHVAKKA, M., KASEVA, V., HÄMÄLÄINEN, T. D. et HÄNNIKÄINEN, M. (2012). *Low-power Wireless Sensor Networks : Protocols, Services and Applications*. Springer.
- TAVLI, B., BICAKCI, K., ZILAN, R. et BARCELO-ORDINAS, J. (2012). A survey of visual sensor network platforms. *Multimedia Tools and Applications*, 60(3):689–726.
- ULLAH, S., AHMAD, J., KHALID, J. et KHAYAM, S. (2011). Energy and distortion analysis of video compression schemes for wireless video sensor networks. *In Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 822–82, Baltimore, MD, USA.
- WANG, W., PENG, D., WANG, H., SHARIF, H. et CHEN, H.-H. (2008). Energy-constrained distortion reduction optimization for wavelet-based coded image transmission in wireless sensor networks. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 10(6):1169–1180.
- WENGER, S. et HOROWITZ, M. (2002). FMO : Flexible Macrobblock Ordering. *JVT-C089*.
- WIEGAND, T., SULLIVAN, G., BJONTEGAARD, G. et LUTHRA, A. (2003). Overview of the h.264/avc video coding standard. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 13(7):560–576.
- WYNER, A. D. et ZIV, J. (1976). The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 22(1):1–10.
- XU, N. (2002). A survey of sensor network applications. *IEEE Communications Magazine*, 40.
- YANG, G.-Z. et YACOB, M. (2006). *Body sensor networks*. Springer.
- YAP, F. G. et YEN, H.-H. (2014). A survey on sensor coverage and visual data capturing/processing/transmission in wireless visual sensor networks. *Sensors*, 14(2):3506–3527.
- YU, W., SAHINOGLU, Z. et VETRO, A. (2004). Energy efficient jpeg 2000 image transmission over wireless sensor networks. *In Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE*, volume 5, pages 2738–2743 Vol.5.
- ZANELLA, A., BUI, N., CASTELLANI, A., VANGELISTA, L. et ZORZI, M. (2014). Internet of things for smart cities. *Internet of Things Journal, IEEE*, 1(1):22–32.
- ZHAI, F., EISENBERG, Y., PAPPAS, T., BERRY, R. et KATSAGGELOS, A. (2006). Rate-distortion optimized hybrid error control for real-time packetized video transmission. *IEEE Trans Image Process*, 15(1):40–53.
- ZHANG, J. et DING, J. (2010). Cross-layer optimization for video streaming over wireless multimedia sensor networks. *In The International Conference on Computer Application and System Modeling*, pages 295–298.

- ZHENG, J. et JAMALIPOUR, A. (2009). *Wireless sensor networks : a networking perspective*. John Wiley & Sons.
- ZOU, J., XIONG, H., LI, C., ZHANG, R. et HE, Z. (2011). Lifetime and distortion optimization with joint source/channel rate adaptation and network coding-based error control in wireless video sensor networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 60(3):1182–1194.