

Evaluation de mécanismes de contrôle d'erreur pour des transmissions multipoints sur des réseaux de mobiles

Tanguy Pérennou^{*,**} — Jérôme Lacan^{*,**} — Hanaa El Natour^{***}

* LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse cedex 4

** ENSICA, 1 place Emile Blouin, F-31056 Toulouse cedex 5
{tanguy.perennou, jerome.lacan}@ensica.fr

*** TESA, 2 rue Charles Camichel, F-31071 Toulouse cedex 7, BP 7122
hanaa.el-natour@tesa.prd.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un ensemble de traces de pertes de paquets recueillies lors de transmissions multipoints 802.11b réalisées dans des conditions de réception variables (récepteurs mobiles et fixes). Une approche originale consistant à « plaquer » a posteriori certains mécanismes de contrôle d'erreur sur ces observations est ensuite présentée. Cette approche permet d'évaluer les performances de ces mécanismes en fonction de leurs paramètres et de certaines propriétés du canal. En particulier, il est montré que des mécanismes relativement simples, basés sur des retransmissions et/ou des codes correcteurs d'erreurs de petite longueur, obtiennent dans ce contexte de très bonnes performances.

ABSTRACT. This article first presents several packet loss profiles collected during 802.11b multicast transmissions carried out under variable reception conditions (mobile and fixed receivers). Then, an original approach consisting in mapping a posteriori some error control mechanisms over these observations is presented. This approach allows to evaluate the performance of these mechanisms according to their parameters and various channel properties. It is shown in particular that relatively simple mechanisms based on retransmissions and/or error correcting codes of small length achieve very good performance in this context.

MOTS-CLÉS : réseaux mobiles, multipoints, mécanismes de contrôle d'erreur, simulations basées sur des traces.

KEYWORDS: mobile networks, multicast, error control mechanisms, trace-based simulation.

1. Introduction

Les progrès constants des technologies sans fil, et notamment des réseaux locaux de type 802.11b, offrent de nouvelles perspectives à certaines applications, notamment à celles utilisant des transmissions multipoints. On peut citer par exemple la diffusion de supports pédagogiques en temps-réel à des étudiants équipés d'ordinateurs portables, les opérations de déploiement de troupes dans un cadre militaire, ou en cas de catastrophe naturelle, le déploiement de tels réseaux pour améliorer la coordination des secours.

Toutefois, comme pour tous les types de liaisons multipoints, la gestion de la fiabilité est un problème important (voir par exemple (Servetto *et al.*, 2002) pour la diffusion multipoints de vidéo dans des réseaux locaux filaires, ou (Neumann *et al.*, 2004) pour la diffusion de flux multimédias sur un canal à diffusion sans voie de retour). En effet, si des mécanismes de retransmissions mis en place au niveau de la couche MAC de 802.11b permettent d'assurer une fiabilité quasi-totale pour les liaisons point-à-point, aucun mécanisme n'est prévu pour assurer le même type de fiabilité à des transmissions multipoints (ANSI/IEEE, 1999). Si les mécanismes proposés pour les transmissions multipoints terrestres (*e.g.* sur le MBONE) peuvent être globalement repris (Adamson *et al.*, 2004; Luby *et al.*, 2002), les caractéristiques particulières des pertes de paquets dans ce contexte rendent le choix de ces mécanismes très difficile. Plusieurs résultats récents ont été proposés, *e.g.* (McKinley *et al.*, 2002; Chumchu *et al.*, 2002), mais ne prennent pas en compte la simultanéité des pertes. Nous avons souhaité mieux prendre en compte les particularités des réseaux sans fil pour choisir les mécanismes de contrôle d'erreur.

Dans la partie 2, nous présentons les méthodes générales de contrôle d'erreur qui peuvent être utilisées, et nous détaillons les caractéristiques des pertes de paquets dans ce contexte. Nous présentons ensuite une approche originale permettant d'évaluer ces mécanismes dans ce contexte. La première étape de cette approche, présentée dans la partie 3, a consisté à recueillir un nombre conséquent de traces de transmissions multipoints dans différentes conditions de réception et avec différents types de machines. L'étape suivante, présentée dans la partie 4, a été réalisée en évaluant par simulation les performances de certains mécanismes de contrôle d'erreur sur les traces recueillies. Dans la partie 5, l'influence du choix du modèle de canal sur les performances de ces mécanismes est analysée.

2. Présentation du contexte

2.1. Les mécanismes classiques de contrôle d'erreur

Pour assurer la fiabilité des transmissions par paquet, on distingue habituellement trois grandes classes de mécanismes (Adamson *et al.*, 2004; Luby *et al.*, 2002) :

- les mécanismes réactifs ;
- les mécanismes proactifs ;
- les combinaisons de ces deux premiers types de mécanismes.

Cette partie détaille ces différents mécanismes et présente les différents avantages et inconvénients pour des transmissions multipoints.

2.1.1. *Les mécanismes réactifs (ARQ : Automatic Repeat reQuest)*

Le principe des mécanismes réactifs est d'assurer la fiabilité en utilisant des re-transmissions. Celles-ci sont déclenchées par des rapports de réceptions indiquant les pertes de paquets émis par les récepteurs (Tanenbaum, 1999). Ces pertes de paquets peuvent être détectées soit par des dépassements de délai (time-out), soit par l'analyse des numéros de séquence des paquets. Ces rapports de réception peuvent être de plusieurs types :

- acquittements positifs (ACK) : indication de réception d'un paquet reçu ;
- acquittements négatifs (NACK) : indication de non réception des paquets perdus ;
- acquittements sélectifs (SACK) : indication concernant la réception d'un groupe de paquets.

Ces différents types d'acquittements sont utilisés pour implémenter des stratégies de retransmissions dont les plus classiques sont :

- arrêt et attente (stop-and-wait) : l'émetteur attend d'avoir reçu un acquittement positif pour chaque paquet avant de transmettre le paquet suivant. S'il ne reçoit pas d'acquittement pendant une certaine durée, il retransmet le paquet ;
- mémoire à N paquets (go-back-N) : l'émetteur transmet plusieurs paquets sans attendre d'acquittement. Le récepteur émet des acquittements positifs pour signaler la réception d'un groupe de N paquets ou des acquittements négatifs dès qu'il détecte une perte de paquet. En cas de signalement de perte d'un paquet, tous les paquets non-acquittés sont retransmis ;
- répétition sélective (selective repeat) : l'émetteur utilise des acquittements sélectifs émis par le récepteur pour retransmettre seulement les paquets réellement perdus.

Le choix entre ces différentes stratégies se fait en fonction des contraintes liées au débit, à l'utilisation du lien (nombre d'acquittements), à la complexité d'implémentation ou au type même de la transmission (temps-réel, multipoint).

Dans le contexte de transmissions multipoints, le principal problème concernant l'utilisation de mécanismes réactifs est le passage à l'échelle lorsque le nombre de récepteurs devient important. En effet, si chaque récepteur envoie un rapport de réception, l'émetteur peut se trouver submergé de messages, ce qui peut altérer, voire interrompre, la transmission.

Plusieurs solutions sont proposées pour résoudre (partiellement) ce problème. La première consiste à diminuer au maximum le nombre d'acquittements émis par les récepteurs, par exemple en utilisant des techniques de suppression de feedback. L'utilisation d'acquittements négatifs, couplée à cette suppression, peut apporter un élément de réponse complémentaire. D'autres solutions utilisant la structure des arbres multipoints pour faire des retransmissions locales, sont également proposées, par exemple (Whetten *et al.*, 2003).

2.1.2. Les mécanismes proactifs (FEC : Forward Error Correction)

Le principe des mécanismes de correction d'erreur proactifs consiste à rajouter *a priori* des paquets de redondance permettant au récepteur de « récupérer » des paquets perdus. Plus précisément, à tout ensemble de k paquets, l'émetteur rajoute $n - k$ paquets de redondance calculés grâce à des codes correcteurs d'erreurs. Pour des codes optimaux en termes de capacité de correction, il suffit que k paquets quelconques soient reçus parmi les n paquets envoyés pour que le récepteur puisse récupérer les k paquets initiaux.

Ce type de mécanisme a plusieurs intérêts pour les transmissions multipoints. Le premier est qu'à partir des mêmes n paquets émis, des récepteurs peuvent récupérer les k paquets de données même s'ils ont subi des pertes différentes. Un autre avantage est que le fait d'envoyer des paquets de redondance *a priori* permet de diminuer de manière considérable le nombre de retours des récepteurs (et donc d'éviter les problèmes d'engorgement au niveau de l'émetteur).

Toutefois, un point particulièrement important concerne la quantité de calcul, et donc la dépense d'énergie, nécessitée par les opérations de codage et de décodage sur des machines ayant de faibles ressources en termes de puissance et d'énergie. Nous avons voulu quantifier cette dépense d'énergie pour des codes classiques sur un PDA COMPAQ iPAQ 3870 sous Windows CE. Trois codes ont été testés, dont deux sont disponibles sur le web (Bloemer *et al.*, 1995) et (Rizzo, 1997) et un a été conçu et développé à l'ENSICA (Dairaine *et al.*, 2005). Ces trois codes sont dits *MDS* (*Maximum-Distance Separable*), c'est-à-dire que leur capacité de correction pour un bloc donné est optimale. Une autre famille de codes, basée sur les codes *LDPC* (*Low-Density Parity-Check*), est parfois utilisée pour combattre les pertes de paquets (Roca *et al.*, 2004). Si ces codes nécessitent moins de calculs pour les opérations de codage et de décodage que les *MDS*, leur capacité de correction par bloc de données est aussi inférieure (Plank *et al.*, 2004). Le choix entre ces deux familles de codes se fait en fonction des contraintes de l'application. Lorsque des gros blocs de données sont manipulés, les *LDPC* sont souvent la meilleure solution. Toutefois, dans le contexte de notre travail, les tailles de blocs sont variables et les codes sont combinés avec des retransmissions. Le choix de codes *MDS* nous paraît donc le plus approprié.

Le programme de test permet de calculer l'énergie consommée par le codage/décodage avec des appels système indiquant le niveau de la batterie au début et à la fin de l'exécution du programme. La consommation n'est autre que la diminution de l'énergie de la batterie du PDA en pourcentage.

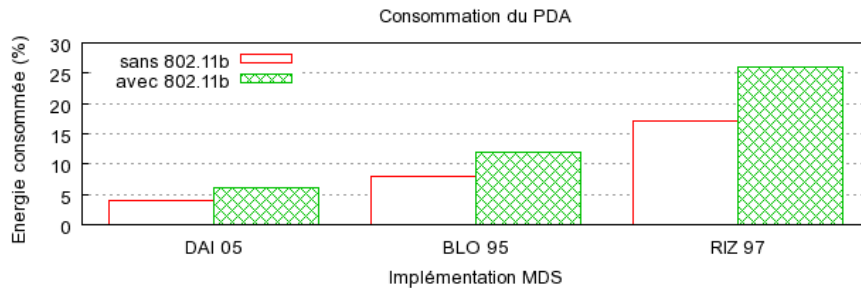


Figure 1. Consommation des opérations de codage/décodage sur un PDA

Le test consiste à coder puis décoder successivement un nombre donné de paquets de 1500 octets. Les paramètres des codes sont $n = 32$ et $k = 16$ (le choix de ces paramètres sera justifié dans le paragraphe 4). Dans un premier temps, on teste les codes sans carte 802.11b. Ensuite on réalise le même test mais avec la carte 802.11b branchée. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1. Chacun des tests présentés sur cette figure a eu une durée variant entre 45 minutes et 5 heures.

Cet histogramme montre que lorsque la carte 802.11b est introduite dans le PDA, la consommation augmente de moitié. En d'autres termes, la consommation du PDA générée par des codages/décodages est 2 fois supérieure à celle générée par l'écoute du réseau 802.11b. Bien que les trois codes n'aient pas les mêmes vitesses de codage/décodage, ce rapport reste constant. Cependant, il faut retenir que dans ces tests les opérations de codage et de décodage se font à 100 % du temps. Or, dans une transmission réelle, le codage et/ou le décodage n'ont lieu qu'une faible partie du temps et donc, la part d'énergie utilisée par les codes par rapport à celle utilisée pour l'écoute du réseau ou par le système d'exploitation sera très largement réduite. Ces tests montrent bien que, même si la part des codes n'est pas négligeable, on peut tout à fait envisager d'utiliser de tels codes sur des machines de faible puissance.

2.1.3. Combinaisons de mécanismes réactifs et proactifs

Il est possible de combiner efficacement les mécanismes réactifs et proactifs afin d'exploiter au mieux les avantages de ces deux systèmes. En effet, l'intérêt des mécanismes proactifs, notamment le fait qu'un paquet de redondance puisse compenser des pertes différentes chez plusieurs récepteurs, peut être diminué par une quantité trop importante de redondance (la bande passante est alors gâchée) ou trop faible (ces mécanismes ne sont plus suffisants). Une technique classique consiste à utiliser des retours des récepteurs pour ajuster la quantité de redondance nécessaire au taux de perte courant observé sur le canal. Ces combinaisons de mécanismes sont appelées **ARQ hybride** de type I (les paquets déjà reçus par le récepteur ne sont pas combinés avec les paquets de redondance reçus après la demande de retransmission) ou de type

II (tous les paquets relatifs à un même bloc de k paquets sont utilisés par le décodeur). Cette technique est souvent une très bonne solution pour les transmissions multipoints (Rizzo *et al.*, 1998).

2.2. Caractéristiques des pertes pour les liaisons multipoints sans fil

Dans le choix d'un mécanisme de contrôle d'erreur, un des facteurs particulièrement important est le type d'erreurs (de pertes) à combattre. Les paramètres caractérisant ces pertes sont :

- le **taux de perte moyen**. Sur des liaisons 802.11b avec infrastructure, ce taux est extrêmement variable suivant la position, le mouvement et la distance du récepteur par rapport au point d'accès ;

- la distribution temporelle (ou **corrélation temporelle**) des pertes : ce paramètre indique si, pour un récepteur donné, les pertes sont groupées ou plutôt réparties de manière uniforme. Dans notre contexte, les pertes sont relativement groupées car sujettes à des perturbations externes du signal radio dont la durée est supérieure à la durée d'émission d'un paquet ;

- la simultanéité des pertes entre les récepteurs (ou **corrélation spatiale**) : ce paramètre, lié aux transmissions multipoints, permet d'évaluer si les pertes observées par un récepteur sont indépendantes des pertes observées par les autres récepteurs. Cette corrélation est réelle dans ce cas car les perturbations qui provoqueront une perte chez un récepteur auront probablement la même conséquence sur des récepteurs proches. Si ces causes affectent le point d'accès, des répercussions seront probablement observées simultanément sur l'ensemble des récepteurs.

Ces trois paramètres sont absolument nécessaires pour pouvoir évaluer les différents mécanismes de contrôle d'erreur. Le taux de perte permet d'évaluer la qualité globale de la transmission. La distribution temporelle des pertes va permettre d'ajuster les paramètres k et n d'un code FEC. En effet, pour un taux d'erreur fixé, un code sera capable de corriger quasi-parfaitement des pertes isolées, mais pourra être totalement inefficace face à des pertes groupées. La corrélation des pertes entre les récepteurs est aussi importante car si un paquet est perdu par une grande proportion des récepteurs, la retransmission de ce paquet est utile à tous ces récepteurs, alors que pour des pertes indépendantes entre les récepteurs, la retransmission de chaque paquet perdu sera utile à peu de récepteurs. Dans ce cas, il sera préférable de retransmettre des paquets de redondance qui pourront compenser des pertes distinctes chez les différents récepteurs.

Plusieurs modèles permettant de reproduire ces pertes ont été proposés. Dans (Nguyen *et al.*, 1996), une modélisation relativement fine d'une transmission point-à-point à 2 Mbps a été proposée. Toutefois, la corrélation des pertes entre plusieurs récepteurs n'y est pas abordée. Le travail le plus complet est probablement celui présenté dans (Tang *et al.*, 2003) où le paramètre de corrélation entre les récepteurs est mesuré. Un modèle permettant de générer des pertes cohérentes est proposé. Il consiste

à générer indépendamment des pertes pour plusieurs récepteurs suivant un modèle de Gilbert-Elliot simplifié ou en utilisant les résultats de (Nguyen *et al.*, 1996), puis à recréer la corrélation entre les récepteurs en déplaçant les groupes d'erreurs de chaque récepteur. L'étude des mécanismes de contrôle d'erreur avec ce modèle n'a pas été réalisée.

Plusieurs travaux ont proposé des études de ces mécanismes de contrôle d'erreur dans ce contexte, par exemple (McKinley *et al.*, 2002; Chumchu *et al.*, 2002), mais aucun ne prend en compte le paramètre de corrélation entre les récepteurs, qui est particulièrement important ici.

2.3. Méthodologie proposée

Comme indiqué précédemment, le point qui nous paraît essentiel dans la définition des mécanismes de contrôle d'erreurs est que le profil des pertes à traiter soit le plus réaliste possible. Devant la difficulté à utiliser le modèle de (Tang *et al.*, 2003), nous avons préféré réaliser notre propre campagne de mesures pour collecter des traces de trafic réel (voir la partie suivante). Ensuite, plutôt que d'analyser ces traces pour construire un modèle et évaluer les mécanismes de contrôle d'erreur sur des traces générées par ce modèle, nous avons choisi d'évaluer ces mécanismes directement sur les traces observées, c'est-à-dire de calculer combien de paquets d'information auraient été reçus ou décodés si tel ou tel mécanisme avait été utilisé (voir figure 2).

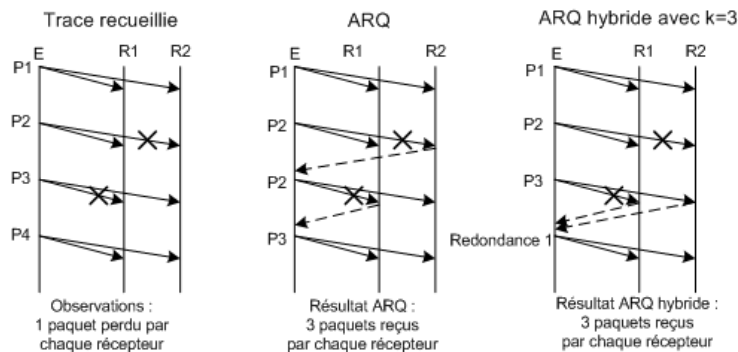


Figure 2. Mécanismes de contrôle d'erreur

Il faut noter que nous n'avons pas cherché à évaluer les mécanismes les plus avancés de la littérature. Notre but a simplement été d'évaluer le **potentiel** des différents mécanismes en les évaluant sous leur meilleur jour. Par exemple, le mécanisme ARQ hybride proposé est construit de telle sorte à n'envoyer aucun paquet inutile.

Cette méthode fait quelques hypothèses simplificatrices. Tout d'abord, il est supposé que le canal de retour véhiculant les acquittements ne subit pas de perte. Cette

hypothèse est très souvent faite, comme dans (Chumchu *et al.*, 2002), et nous semble réaliste si l'on utilise des transmissions point-à-point pour ces retours et dans la mesure où le nombre de récepteurs est faible (on déconseille généralement de dépasser 20 mobiles par point d'accès), ce qui ne devrait pas provoquer de congestions importantes au niveau du point d'accès. Dans le cas où des pertes surviendraient sur le canal de retour, tout dépend du type d'acquiescement utilisé. Si on perd un acquiescement, sélectif ou non, cela entraînera des retransmissions inutiles. Si on perd un acquiescement négatif, les mécanismes devront prévoir des retransmissions d'acquiescement négatif afin de garder la propriété de fiabilité des transmissions. Nous avons aussi supposé que le débit relativement réduit laissait le temps aux récepteurs de transmettre leurs acquiescements avant l'émission du paquet suivant. De plus, nous avons aussi fait l'hypothèse que ce débit relativement lent permettait aux récepteurs de détecter les pertes grâce à des dépassements de délai (*time-out*), comme indiqué sur la figure 2 où les récepteurs envoient un acquiescement négatif avant d'avoir reçu le paquet suivant. Dans le cas où le débit serait trop élevé pour permettre la transmission des acquiescements entre les paquets de données ou pour détecter les pertes sur *time-out*, les mécanismes décrits ici devront utiliser des techniques complémentaires du type fenêtre de transmission.

Les points forts de cette approche sont nombreux. En plus de la facilité d'implémentation et d'évaluation des différents mécanismes testés, il faut noter que les comparaisons des mécanismes se font exactement sur les mêmes traces. De plus, la facilité de test permet des évaluations très fines des différents paramètres. Par exemple, pour les mécanismes FEC, il a été possible de calculer de manière exhaustive les meilleures valeurs de k et de n pour chaque simulation.

3. Mesures de pertes

Cette section présente les mesures expérimentales de pertes de paquet dans un réseau 802.11b en mode infrastructure, avec différentes conditions de réception et de mobilité.

3.1. Plateforme expérimentale

Une plateforme de test sans fil a été mise en place afin de recueillir des mesures de pertes de paquets IP multicast. Elle repose sur un réseau 802.11b en mode infrastructure, constitué d'un point d'accès, de 10 nœuds avec une interface 802.11b, et d'un nœud avec une interface Ethernet, directement connecté au point d'accès. Différents types d'interfaces 802.11b (PCI, USB et PCMCIA) et d'architectures matérielles (PC, PC portable, Pocket PC) ont été utilisés.

Une première série de 5 expériences a été effectuée pendant laquelle tous les nœuds sont restés immobiles. Les nœuds sont placés à différents endroits, avec 0 à 4 cloisons de distance avec le point d'accès. Dans une seconde série de 6 expériences, 4 des

nœuds sont mobiles : chacun est porté par un opérateur marchant sans trajectoire précise tout en restant toujours à portée du point d'accès.

Dans chaque expérience d'une durée d'environ 1 minute 30, le nœud fixe *wifi-sender* émet un flux multicast vidéo MPEG/RTP, constitué de paquets mesurant entre 300 à 1400 octets avec un débit moyen de 500kbps. Le flux est produit par l'application Java Media Studio et diffusé en multipoint sur le réseau sans fil. L'émetteur ne se déplace dans aucune expérience et reste proche du point d'accès, avec une atténuation minimale du signal sur le lien. Les paquets MAC résultants sont automatiquement réémis par le point d'accès vers 9 nœuds par le réseau sans fil (*wifi-recv-n*, $n \in \{1, \dots, 9\}$) et vers 1 nœud par Ethernet (*eth-recv*).

Chaque expérience a ainsi permis d'enregistrer la suite des numéros de séquence des paquets RTP effectivement reçus par chacun des récepteurs. En 802.11b, il n'y a pas d'acquiescement ni de retransmission au niveau MAC pour les paquets multipoints (ANSI/IEEE, 1999). Un paquet UDP reçu a donc été transmis une seule fois de l'émetteur vers le point d'accès et une seule fois de ce dernier vers les récepteurs. En faisant l'hypothèse (vérifiée par les expériences) qu'aucun paquet n'est perdu sur le lien Ethernet, le récepteur Ethernet *eth-recv* permet donc de mesurer les pertes MAC sur le lien montant entre émetteur et point d'accès, les récepteurs sans fil permettant de mesurer les pertes MAC additionnelles sur le lien descendant.

3.2. Traces recueillies

Les 5 expériences avec postes fixes ont permis de recueillir des traces similaires, de même que les 6 expériences mobiles. La figure 3 donne les traces de l'expérience (représentative des autres expériences) avec postes mobiles (*wifi-recv-2*, *wifi-recv-4*, *wifi-recv-5* et *wifi-recv-6*, ce dernier étant un PDA). En abscisse se trouve la séquence de paquets transmis et en ordonnée le cumul de paquets perdus consécutivement. Le taux de perte de chaque récepteur est donné entre parenthèses. Les nœuds sont séparés par une hauteur représentant 10 pertes consécutives. Les pics trop importants ont été écrêtés. Les récepteurs sont classés du plus proche au plus éloigné, à l'exception de *wifi-recv-1* qui est proche du point d'accès mais reçoit mal les paquets.

Les expériences montrent que pratiquement aucune donnée n'est perdue sur le lien montant, et que de nombreuses pertes sont observées sur le lien descendant. Elles sont liées au matériel utilisé, à la position du récepteur fixe ou à la mobilité. Certains pics de pertes simultanés attestent de l'occurrence de perturbations importantes sur le lien descendant, dont la cause n'a pu être diagnostiquée. Les pics d'amplitude très importante enregistrés sur *wifi-recv-1* révèlent une phase de déconnexion probablement due à un problème de configuration matériel. Plus généralement, on observe une quantité non négligeable de pertes consécutives et de pertes corrélées pour plusieurs récepteurs. Ces différentes corrélations sont étudiées dans la partie suivante.

3.3. Analyse des traces

Dans cette section nous nous attachons à mesurer la corrélation temporelle des pertes pour chaque récepteur ainsi que la corrélation spatiale des pertes pour l'ensemble des récepteurs. Nous reprenons ici les données de l'expérience illustrée par la figure 4 où 4 postes sont mobiles.

3.3.1. Corrélation temporelle des pertes de paquets

Pour chaque récepteur, la corrélation temporelle des pertes est caractérisée par la **longueur des périodes de pertes**, et la **longueur des périodes de bonne réception**. La longueur des périodes de pertes est mesurée en nombre de paquets pendant la durée de l'expérience, et on calcule la moyenne μ_T , l'écart type σ_T et le maximum \max_T de cette mesure. De même, on calcule $\mu_{T'}$, $\sigma_{T'}$ et $\max_{T'}$, la moyenne, l'écart type et le maximum des périodes de bonnes réception. Les minima de ces deux mesures, qui sont toujours égales à 1, ne sont pas donnés. Le tableau 1 récapitule ces données pour les données recueillies lors de l'expérience 11 (dont les pertes sont présentées sur la figure 4).

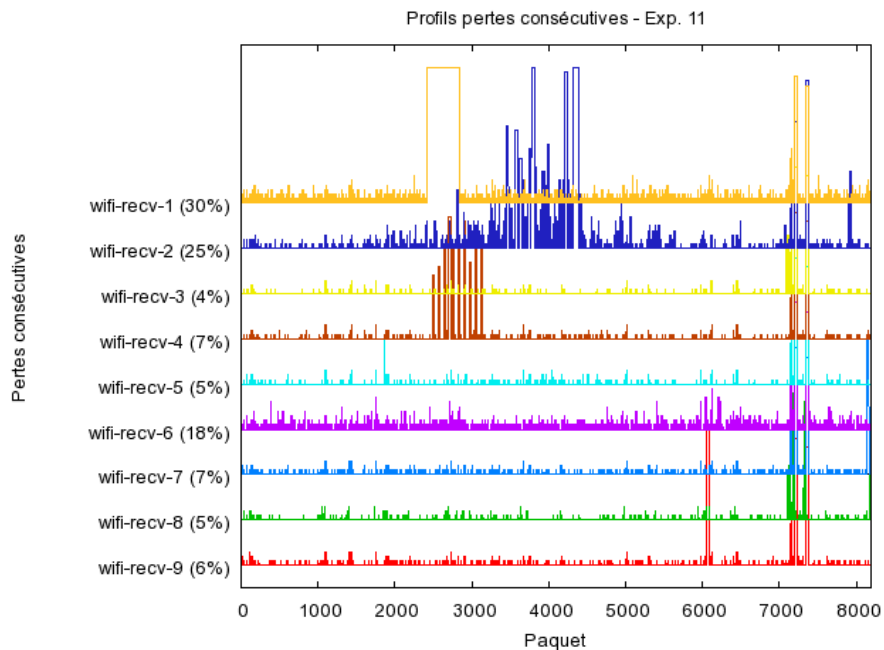


Figure 3. Profil de pertes avec postes mobiles

Machine	Périodes de pertes			Périodes sans pertes		
	μ_T	σ_T	\max_T	$\mu_{T'}$	$\sigma_{T'}$	$\max_{T'}$
wifi-recv-1	1.77	11.45	430	4.00	3.81	30
wifi-recv-2	2.52	4.39	62	7.44	14.18	128
wifi-recv-3	1.71	2.93	28	36.40	52.43	352
wifi-recv-4	2.02	4.03	28	23.27	29.60	177
wifi-recv-5	1.52	2.38	28	25.98	37.76	263
wifi-recv-6	1.51	1.54	28	6.66	6.39	41
wifi-recv-7	1.42	2.38	30	17.33	19.21	123
wifi-recv-8	1.60	2.63	28	30.03	44.67	335
wifi-recv-9	1.49	2.66	30	22.33	26.59	138
eth-recv	Pas de perte					
Moyenne	1.73	3.82	76.89	19.27	26.07	176.3

Tableau 1. Longueur des périodes de pertes et des périodes de bonne réception

L'importance des écarts types et des maxima obtenus pour la longueur des périodes de pertes montre que cette longueur est fortement variable. Afin de mieux illustrer cette variation, la distribution des longueurs des périodes de pertes a été établie : la figure 4 donne le nombre de périodes de pertes de longueur p en fonction de p .

La forte variation de la longueur des périodes de pertes a un impact important sur les performances des mécanismes de contrôle d'erreur, comme on le verra à la section 5. En particulier, cette caractéristique diminue la performance des mécanismes de type FEC par rapport à un canal où la variation de cette longueur serait faible (canal avec pertes uniformément réparties dans le temps).

3.3.2. Corrélation spatiale des pertes de paquets

La corrélation spatiale des pertes de paquets est caractérisée par la taille du groupe de récepteurs perdant un paquet donné. Le calcul a été effectué pour tous les paquets transmis dans le cadre de l'expérience illustrée par la figure 4. La moyenne μ_S , l'écart type σ_S , le minimum \min_S et le maximum \max_S de ces tailles de groupes sont donnés ci-dessous :

μ_S	σ_S	\min_S	\max_S
1.11	1.69	0	9

La taille des groupes perdant un paquet est elle aussi très variable, comme en témoigne l'importance de l'écart type et du maximum de cette taille. La figure 5 illustre l'évolution de cette taille pour chacun des 8192 paquets transmis au cours de l'expérience. La distribution de cette taille est donnée par la figure 6.

La forte variation des tailles des groupes observée ici a un impact important sur les performances des mécanismes de contrôle d'erreur (voir section 5), qui s'ajoute à

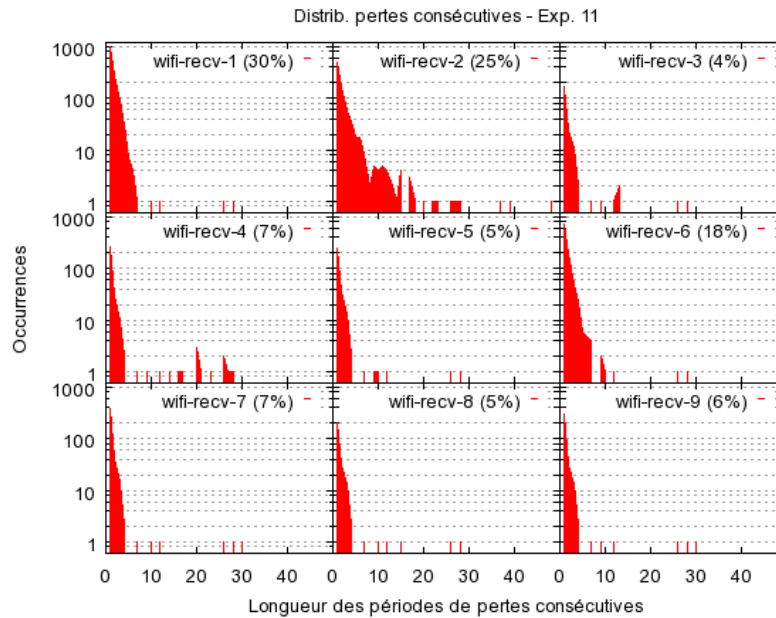


Figure 4. Distribution des longueurs des périodes de pertes

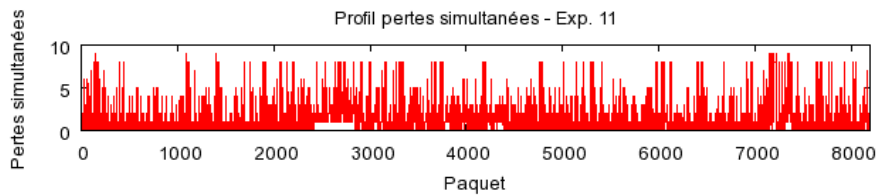


Figure 5. Evolution du nombre de récepteurs perdant un paquet

l'impact de la variation de la longueur des périodes de perte observée précédemment. Si une perte concerne peu de récepteurs, un mécanisme de type FEC sera le plus performant, mais si elle concerne beaucoup de récepteurs, un mécanisme de type ARQ sera plus performant.

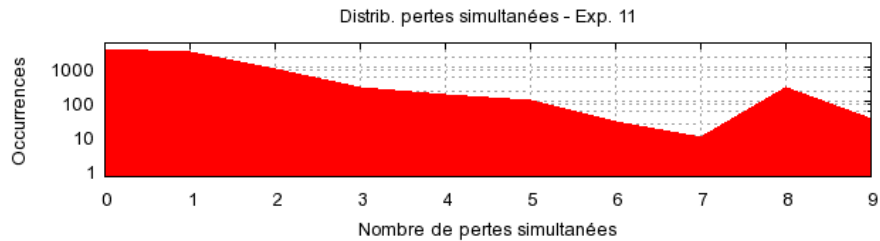


Figure 6. Distribution du nombre de récepteurs perdant un paquet

3.3.3. Bilan global des corrélations temporelles et spatiales

Pour valider les interprétations présentées à partir des données recueillies lors de l'expérience 11, nous présentons le tableau 2 récapitulant les moyennes des paramètres quantifiant la corrélation temporelle et les paramètres quantifiant la corrélation spatiale pour les 11 expériences, c'est-à-dire μ_T , σ_T , μ_S et σ_S .

Expérience	Corrélation temporelle		Corrélation spatiale	
	μ_T	σ_T	μ_S	σ_S
1	1.56	2.57	1.01	1.27
2	1.53	2.93	1.05	1.50
3	1.62	2.91	1.13	1.23
4	1.65	2.99	1.33	1.19
5	1.67	3.05	1.08	1.42
6	1.52	2.97	0.92	1.42
7	1.63	7.87	0.99	1.26
8	1.61	3.33	1.12	1.15
9	1.59	3.62	0.84	1.16
10	1.44	2.98	0.72	1.15
11	1.73	3.82	1.11	1.69

Tableau 2. Bilan des corrélations temporelles et spatiales

On observe dans toutes les expériences de fortes variations de la corrélation spatiale et de la corrélation temporelle. Nous montrerons à la section 5 que ces variations ont un rôle important sur les performances des mécanismes de contrôle d'erreur.

4. Simulation de mécanismes de contrôle d'erreur

Dans cette section, trois mécanismes de contrôle d'erreur au niveau MAC sont étudiés : un mécanisme réactif de type ARQ (Automatic Repeat Request), un mécanisme proactif de type FEC (Forward Error Correction) et un mécanisme ARQ hybride de

type II. Ces mécanismes sont représentatifs de la diversité des moyens de contrôle d'erreur.

Les traces expérimentales obtenues sont utilisées pour simuler les pertes de paquets d'information et de redondance. On fait l'hypothèse simplificatrice qu'aucun acquittement n'est perdu et que leur transmission ne modifie pas la séquence de pertes des paquets d'information ou de redondance.

On simule dans un premier temps un mécanisme de type ARQ. Chaque paquet émis doit être reçu par chacun des récepteurs. Le paquet est retransmis en multicast jusqu'à ce que tous les récepteurs l'aient reçu.

On simule ensuite un mécanisme de type FEC. Les paquets émis sont issus d'une phase de codage qui génère $n - k$ paquets de redondance à partir d'un bloc de k paquets d'information. L'émetteur transmet ainsi n paquets consécutifs pour chaque bloc. Si le récepteur reçoit k paquets ou plus parmi ces n , on considère que le bloc a été correctement reçu et on comptabilise k paquets correctement reçus (on suppose que le code est de type MDS, et donc optimal en termes de capacité de correction pour un bloc donné). Si le récepteur reçoit moins de k paquets, le bloc ne peut pas être décodé et on considère qu'il est entièrement perdu : aucun paquet n'est comptabilisé ; la comptabilisation des paquets reçus correctement correspond au mécanisme ARQ hybride de type II, décrit ci-après. Pour obtenir une transmission fiable, l'émetteur doit alors retransmettre entièrement le bloc, soit n paquets consécutifs, jusqu'à ce qu'il soit décodé par chaque récepteur ; arrêter les retransmissions après plusieurs tentatives infructueuses reviendrait à accepter une transmission non fiable. Il faut noter que nous avons volontairement limité les valeurs de n (et donc celles de k) à 256. Ceci a été fait dans le but de choisir des paramètres réalistes. En effet, un choix de paramètres supérieur entraîne l'utilisation de codes moins performants (les coefficients des mots des codes ne peuvent plus être des octets), mais aussi oblige le décodeur à attendre l'arrivée d'un grand nombre de paquets (entre k et n) avant de décoder, ce qui peut être gênant pour des transmissions temps-réel ou semi-temps-réel.

Enfin, on simule un mécanisme de type ARQ hybride de type II, qui associe FEC et ARQ de la manière suivante : un bloc est découpé en k paquets d'information puis l'émetteur transmet en séquence ces k paquets. Chaque récepteur envoie alors un acquittement précisant le nombre de paquets perdus r_i , où $i \in \{1, \dots, 10\}$, parmi les k paquets transmis. L'émetteur calcule le maximum r_{\max} de ces valeurs, encode r_{\max} nouveaux paquets de redondance puis les transmet. Le processus se répète jusqu'à ce que tous les récepteurs aient reçu au moins k paquets. Ici aussi, les valeurs de k ont été limitées à 256.

La figure 7 présente les résultats de la simulation de chacun de ces 3 mécanismes sur chacune des 11 expériences (constituée chacune de 10 transmissions « simultanées »). Pour chaque mécanisme et chaque expérience, on calcule, à partir des 8192 paquets d'information et/ou de redondance transmis, le pourcentage de paquets d'information reçus ou décodés par tous les récepteurs. Dans chaque expérience, la valeur donnée pour le mécanisme FEC (respectivement ARQ hybride de type II) correspond

au couple (k, n) (respectivement au k) permettant de maximiser ce nombre de paquets reçus. Ces valeurs diffèrent assez largement entre les 11 expériences.

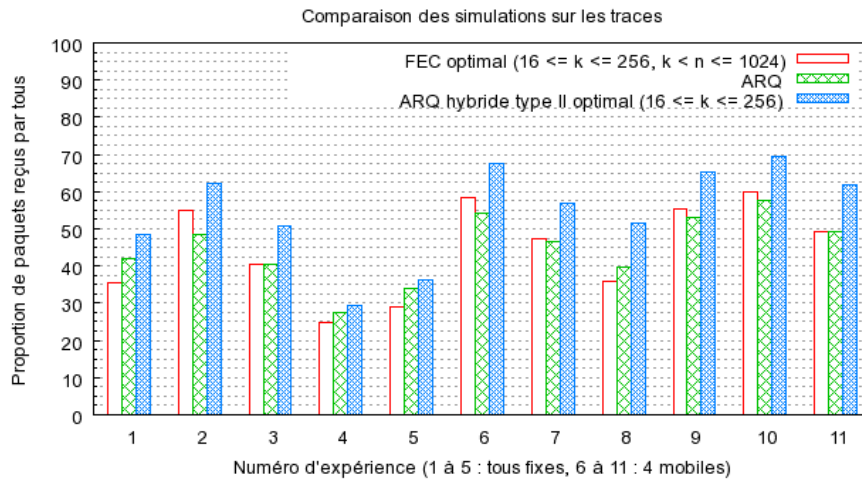


Figure 7. Simulations avec tous les récepteurs

Ces résultats montrent que dans tous les cas le mécanisme ARQ hybride obtient les meilleures performances. Toutefois, il faut noter qu'il ne se détache clairement des 2 autres mécanismes dans aucune des expériences. Des résultats similaires (non présentés ici) sont obtenus en limitant la simulation aux 7 meilleurs ou aux 3 moins bons récepteurs (et donc en faisant varier de manière significative le taux de perte moyen).

Exp.	k_{\max}	Perf. pour k_{\max}	$k = 64$	$k = 32$	$k = 16$
1	245	48,36	98,8	98,7	97,3
2	245	62,02	97	95	92,4
3	161	50,76	97,3	96,3	94,1
4	244	29,48	98,9	98,9	99
5	247	36,42	99,1	99	98,6
6	198	67,74	98,8	97,2	94,8
7	206	56,91	98,6	96,5	94,5
8	220	51,34	96,5	94,7	92,4
9	221	65,35	97,9	96,7	94,4
10	203	69,40	98,9	97,3	94,6
11	218	61,78	97,1	95,4	92,7

Tableau 3. Performances maximales obtenues et performances relatives pour des valeurs de k fixées (mécanisme ARQ hybride)

Pour approfondir l'analyse des résultats pour ARQ hybride, nous avons indiqué dans le tableau 3 (2^e colonne) les valeurs de k permettant d'atteindre les meilleures performances (3^e colonne). Comme on aurait pu le prévoir, les performances maximales sont atteintes pour des valeurs de k proches des plus grandes valeurs autorisées. Toutefois, nous avons rapporté dans le tableau 3 le rapport de performance entre le k optimal et des valeurs de k fixées (exprimés ici en pourcentage). Une conclusion importante pour l'implémentation de ces mécanismes est que, même pour de petites valeurs de k (par exemple 16), les performances obtenues sont proches du maximum. Ceci est particulièrement intéressant car l'utilisation de petites valeurs de k permet d'améliorer la vitesse de décodage (complexité quadratique par rapport à k), l'utilisation mémoire (utilisation possible sur des machines à faible capacité) et de réduire les délais induits par l'attente de blocs de données complets (délais gênants pour des transmissions temps-réels). Ces résultats expliquent le choix du paramètre $k = 16$ pour les tests de consommation d'énergie du PDA présentés dans la partie 2.1.2.

Sous des hypothèses de pertes différentes (pertes indépendantes et uniformes), les travaux décrits dans (Rizzo *et al.*, 1998) et (Chumchu *et al.*, 2002) concluent à une nette supériorité des FECs pour des mécanismes similaires et où les acquittements ne sont pas pris en compte. Cette différence d'appréciation peut s'expliquer en observant la forte corrélation spatiale et temporelle des pertes, mise en évidence par les campagnes de mesures effectuées. Une analyse de ces différentes corrélations est présentée dans la partie suivante.

5. Impact de la corrélation

Nous avons précédemment émis l'hypothèse que les différences de conclusions entre nos travaux et ceux présentés dans (Rizzo *et al.*, 1998) ou (Chumchu *et al.*, 2002) étaient dues aux différences de modèle de canal (pertes uniformément réparties dans (Rizzo *et al.*, 1998) ou (Chumchu *et al.*, 2002) contre pertes observées ici). Pour vérifier cette hypothèse, nous avons analysé les différents mécanismes de contrôle d'erreur sur plusieurs types de traces :

- 1) traces observées,
- 2) traces observées modifiées de telle sorte à supprimer la corrélation spatiale,
- 3) traces observées modifiées de telle sorte à supprimer la corrélation temporelle,
- 4) traces avec des pertes uniformément réparties par récepteur,
- 5) traces avec des pertes uniformément réparties identiques pour tous les récepteurs.

Pour minimiser la corrélation spatiale (cas 2), nous avons considéré les traces observées pour chaque récepteur et nous avons décalé cycliquement les traces de chaque récepteur indépendamment. De cette sorte, les taux de perte et les périodes de pertes consécutives pour chaque récepteur sont conservés, mais ils ne sont plus « synchronisés » entre les différents récepteurs (voir figure 8).

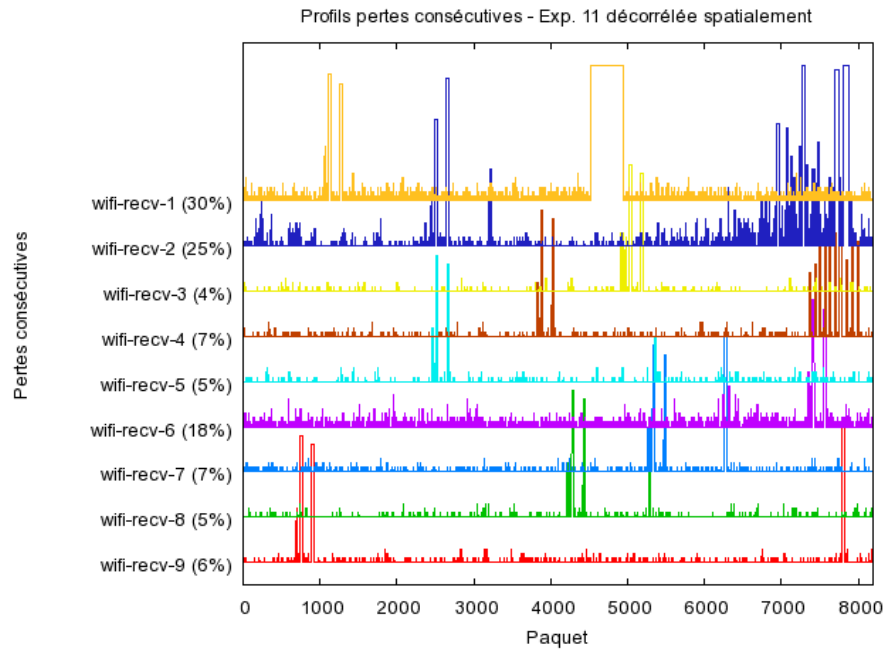


Figure 8. Décorrélation spatiale de l'expérience 11

Pour minimiser la corrélation temporelle tout en conservant la corrélation spatiale (cas 3), nous avons simplement considéré chaque paquet indépendamment et nous avons permuté aléatoirement l'ordre de réception des paquets. Il faut noter que pour conserver la corrélation spatiale, nous avons effectué les mêmes permutations pour chacun des récepteurs.

Les traces avec des pertes *uniformément réparties par récepteur* (cas 4) ont été générées de telle sorte à obtenir un taux de perte égal au taux de perte observé pour chaque récepteur. Ces traces peuvent donc être considérées comme des traces observées dont on aurait minimisé les corrélations spatiale et temporelle.

Le dernier type de traces (cas 5) correspond à une transmission où tous les récepteurs observent le même taux de perte (uniformément réparties. Ce taux de perte est égal à la moyenne des taux de perte observés (sur le canal réel) pour les différents récepteurs. Une évaluation des corrélations pour les différents modèles de canal testés est proposée sur le tableau 4. L'indicateur utilisé pour caractériser la corrélation temporelle est celui introduit dans la partie 3.3.1, c'est-à-dire la longueur des périodes de pertes (moyenne μ_T et écart type σ_T). Pour la corrélation spatiale, l'indicateur utilisé

est celui présenté dans la partie 3.3.2, c'est-à-dire le nombre de récepteurs qui perdent simultanément un paquet (moyenne μ_S et écart type σ_S).

La méthode de calcul utilisée pour estimer ces différentes décorrélations a consisté à simuler un grand nombre de décorrélations (250000 pour la décorrélation spatiale et 400 pour la décorrélation temporelle) et à calculer les valeurs moyennes des moyennes et des écarts types.

	Expérience 6				Expérience 11			
	Cor. T		Cor. S		Cor. T		Cor. S	
	μ_T	σ_T	μ_S	σ_S	μ_T	σ_T	μ_S	σ_S
Traces réelles	1.52	2.97	0.92	1.42	1.73	3.82	1.11	1.69
Traces sans Cor. T	1.13	0.36	0.92	1.42	1.17	0.44	1.11	1.69
Traces sans Cor. S	1.52	2.97	0.92	0.86	1.73	3.82	1.11	0.95
Pertes uniformes (cas 4)	1.11	0.30	0.92	0.86	1.14	0.36	1.11	0.95
Pertes uniformes (cas 5)	1.12	0.37	1.02	0.96	1.14	0.40	1.24	1.05

Tableau 4. *Corrélations temporelles (Cor. T) et spatiales (Cor. S)*

Les résultats donnés dans ce tableau 4 montrent que les opérations proposées pour supprimer les corrélations spatiales et temporelles des traces observées sont valides. En effet, les valeurs de *Corrélation temporelle* des *Traces sans corrélation temporelle* sont très proches de celles des *Traces avec pertes uniformes* (qui conservent les taux de perte initiaux pour chaque récepteur) alors que leurs valeurs de *Corrélation spatiale* sont celles des *Traces réelles*. De même, les valeurs de *Corrélation spatiale* des *Traces sans corrélation spatiale* sont très proches de celles des *Traces avec pertes uniformes* alors que leurs valeurs de *Corrélation temporelle* sont celles des *Traces réelles*.

Le but final de ce travail étant d'analyser l'impact de ces différents modèles de canal sur les mécanismes de contrôle d'erreur, nous avons refait les mêmes simulations que celles présentées dans la partie 4, mais en les appliquant aux différents modèles de canal. Pour cela, pour chaque type de canal (sans corrélation temporelle, sans corrélation spatiale, pertes uniformes), nous avons extrait des différents canaux décorrelés obtenus un canal dont les paramètres correspondent aux moyennes obtenues (c'est-à-dire aux valeurs présentées dans le tableau 4).

Sur la figure 9, nous présentons les résultats de ces analyses pour l'expérience 11. Des résultats similaires ont été obtenus lors des autres expériences. Ces résultats mettent en évidence les différences d'interprétations possibles des performances des mécanismes de contrôle d'erreur sur des modèles de canal dont les taux de perte sont globalement égaux.

En effet, la différence entre les performances sur le canal observé et celles sur le canal où tous les récepteurs ont le même taux de perte uniforme est importante. Cette différence porte en premier lieu sur les niveaux de performances. Par exemple, le niveau atteint par les FEC passe d'environ 4000 à plus de 6500 paquets reçus. Une autre différence, plus importante, est que les différents mécanismes n'ont pas les

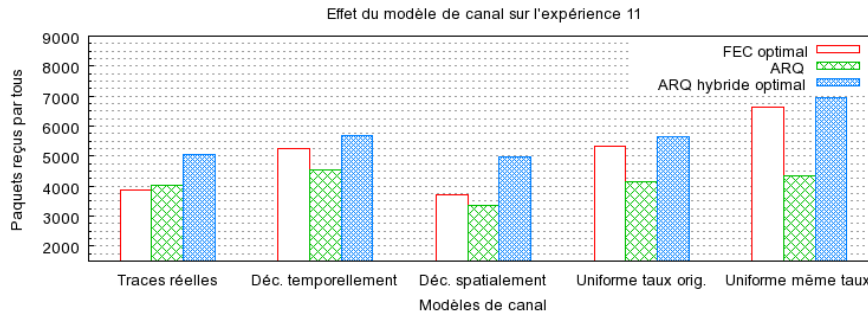


Figure 9. Impact du modèle de canal

mêmes types de variation suivant les modèles de canal. Par exemple, pour les deux modèles de canal évoqués plus haut, le mécanisme d'ARQ passe seulement d'environ 4000 à 4200 paquets. Il en résulte que les comparaisons de mécanismes proposées à partir d'un modèle de canal avec des pertes uniformes à taux constant entre les récepteurs ne sont pas forcément valables en terme de valeur pure, mais aussi de choix entre les mécanismes.

Ces observations restent la plupart du temps valables pour les autres modèles de canal modifiés à partir du canal réel de telle sorte à minimiser un ou plusieurs paramètres. En effet, par rapport aux traces réelles, sur le canal décorrélé temporellement, les FEC ont un niveau de performance nettement supérieur (augmentation de plus de 1200 paquets) alors que les mécanismes utilisant ARQ progressent environ « seulement » de 500 paquets. Ceci s'explique principalement par le fait que les FEC sont plus performants pour des pertes uniformes que pour des bursts de pertes (à taux de perte constant).

Les performances sur le modèle de canal où les pertes sont uniformément réparties, mais où le taux de perte est conservé pour chaque récepteur, sont équivalentes à celles sur le canal décorrélé temporellement. Les comparaisons avec le canal observé sont donc similaires.

Sur le canal décorrélé spatialement, on observe que les performances de tous les mécanismes sont légèrement dégradées par rapport au canal réel, mais dans un ordre de grandeur relativement proche. Cette dégradation peut s'expliquer intuitivement par le fait que les bursts de pertes sont conservés mais qu'ils sont en plus désynchronisés entre les récepteurs, ce qui complique d'autant plus la tâche des mécanismes basés sur les FEC. De même, les performances de l'ARQ sont diminuées car la corrélation spatiale du canal réel impliquait des pertes communes à plusieurs récepteurs, qui pouvaient être ainsi compensées par une seule retransmission.

Ces différentes observations semblent indiquer que la corrélation temporelle est le facteur essentiel concernant les mécanismes dans un canal réel et que la corrélation spatiale est moins déterminante.

6. Conclusion

Nous avons collecté des traces de trafic multipoints réel sur un réseau sans fil, puis plaqué sur ces traces des mécanismes de contrôle d'erreur afin de les évaluer avec des profils de pertes réalistes. Les résultats obtenus indiquent que le mécanisme ARQ hybride est le plus performant, mais que sa supériorité par rapport aux autres mécanismes n'est pas si nette que ne l'indiquent certains travaux antérieurs utilisant des modèles de pertes uniformes et indépendantes peu adaptés aux réseaux sans fil. En effet, un point qui nous semble particulièrement important est le bon comportement (sur des traces réelles) des mécanismes fondés sur les retransmissions. Nous avons conforté cette hypothèse par l'évaluation de ces mécanismes sur des modèles de canal dont nous avons fait varier indépendamment puis simultanément les corrélations spatiale et temporelle du canal sans modifier le taux de perte.

L'utilisation de la méthode de placage a aussi permis d'évaluer facilement les performances de chaque mécanisme en faisant varier leurs différents paramètres. En ce qui concerne le mécanisme le plus performant (ARQ hybride), nous avons en particulier pu vérifier que l'utilisation de petites valeurs de k n'altérerait pas de manière importante les performances en terme de correction. Ceci est particulièrement intéressant car ce type de paramètres peut être utilisé par quasiment n'importe quel type de machine (voir les tests de consommation sur un PDA dans la partie 2.1.2) et pour n'importe quel type d'application (y compris les applications temps-réels car les délais induits par l'utilisation des codes restent raisonnables). Il faut noter que pour des applications ciblées comme le transfert de gros fichiers où les délais ne sont plus importants, il sera probablement plus intéressant de s'orienter vers des codes utilisant des plus gros blocs, et donc probablement vers des codes de type LDPC.

Concernant les travaux futurs, nous envisageons maintenant d'améliorer la précision de la méthode de placage utilisée en simulant aussi la transmission de différents types d'acquiescement (positif, négatif, sélectif, en point à point ou en multipoints). Une autre extension possible de ces résultats concernera des transmissions multimédias avec des contraintes qui pourront être de type temps-réel (vidéo-conférence ou téléphonie sur IP), de type semi-temps-réel (streaming) ou simplement de type diffusion de gros fichiers.

Remerciements

Merci à Emmanuel Conchon, Laurent Dairaine et Jérôme Fimes pour leur aide dans la collecte et l'interprétation des traces réelles.

7. Bibliographie

- Adamson B., Borman G., Handley M., Macker J., « NACK-Oriented Reliable Multicast Protocol (NORM) », *IETF draft-ietf-rmt-pi-norm-10.txt*, July, 2004. Expires January 2005.
- ANSI/IEEE, « ANSI/IEEE Std 802.11 : Wireless LAN MAC and PHY Specifications », 1999.
- Bloemer J., Kalfane M., Karpinski M., Karp R., Luby M., Zuckerman D., « An XOR-Based Erasure-Resilient Coding Scheme », *Technical Report ICSI TR-95-048*, August, 1995.
- Chumchu P., Seneviratne A., « Adaptive Packet Level Redundancy Mechanisms for Reliable Mobile Multicast : Proposed Architecture and Performance Analysis », *Proceedings of ICITTA'2002*, 2002.
- Dairaine L., Lacan J., Lancerica L., Fimes J., « Content-Access QoS in Peer-to-Peer Networks Using a Fast MDS Erasure Code », *to appear in Computer Communications*, 2005.
- Luby M., Gemmell J., Vicisano L., Rizzo L., Crowcroft J., « Asynchronous Layered Coding (ALC) Protocol Instantiation », *IETF Request for Comments : 3450*, December, 2002.
- McKinley P., Tang C., Mani A., « A Study of Adaptive Forward Error Correction for Wireless Collaborative Computing », *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, sept., 2002.
- Neumann C., Roca V., « Analysis of FEC Codes for Partially Reliable Media Broadcasting Schemes », *2nd ACM International Workshop on Multimedia Interactive Protocols and Systems (MIPS'04), Grenoble, France*, November, 2004.
- Nguyen G., Katz R., Noble B., « A Trace-Based Approach for Modeling Wireless Channel Behaviour », *Proceedings of Winter Simulation Conference*, 1996.
- Plank J. S., Thomason M. G., « A Practical Analysis of Low-Density Parity-Check Erasure Codes for Wide-Area Storage Applications », *DSN-2004 : The International Conference on Dependable Systems and Networks*, IEEE, June, 2004.
- Rizzo L., « Effective Erasure Codes For Reliable Computer Communication Protocols », *ACM Computer Communication Review*, vol. 27, n° 2, p. 24-36, April, 1997.
- Rizzo L., Vicisano L., « RMDP : an FEC-based Reliable Multicast Protocol for Wireless Environments », *Mobile Comp. and Comm. Rev.*, 1998.
- Roca V., Neumann C., Design, Evaluation and Comparison of Four Large Block FEC Codecs, LDPC, LDGM, LDGM Staircase and LDGM Triangle, plus a Reed-Solomon Small Block FEC Codec, Research Report RR-5225, INRIA, June, 2004.
- Servetto S., Puri R., Wagner J.-P., Scholtes P., Vetterli M., « Video Multicast in (Large) Local Area Networks », *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, 2002.
- Tanenbaum A., *Réseaux, 3ème édition*, Dunod, (Computer Networks, 3rd edition, Prentice Hall, 1996), 1999.
- Tang C., McKinley P., « Modeling Multicast Packet Losses in Wireless LANs », *Proceedings of MSWiM'03*, 2003.
- Whetten B., Chiu D., Kadansky M., Koh S. J., Taskale G., « Tree-Based ACK (TRACK) Building Block for Reliable Multicast Transport », *IETF draft-chiu-rmt-bb-track-03.txt*, December, 2003.

Article reçu le 22 avril 2004

Version révisée le 29 décembre 2004

Tanguy Pérennou est docteur en Informatique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Il est enseignant chercheur à l'ENSICA (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques) et membre du LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS) depuis 2001. Ses travaux de recherche portent sur la caractérisation et l'émulation des réseaux sans fil.

Jérôme Lacan est docteur en Informatique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Il a été nommé maître de conférences à l'Université de Franche-Comté en 1999 et est détaché à l'ENSICA depuis 2001. Ses thèmes de recherche concernent principalement les techniques de fiabilisation dans les réseaux et notamment celles basées sur les codes correcteurs d'erreurs.

Hanaa El Natour est ingénieur en réseaux et télécommunications. Actuellement elle prépare une thèse entre le laboratoire de Traitement du Signal et de Télécommunications (LTST) à l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et le laboratoire de Télécommunications Spatiales et Aéronautiques (TéSA). Ses travaux portent sur la localisation indoor par satellites GPS et Galileo à l'aide de récepteurs introduits dans les mobiles de troisième et quatrième génération.

ANNEXE POUR LE SERVICE FABRICATION
A FOURNIR PAR LES AUTEURS AVEC UN EXEMPLAIRE PAPIER
DE LEUR ARTICLE ET LE COPYRIGHT SIGNE PAR COURRIER
LE FICHER PDF CORRESPONDANT SERA ENVOYE PAR E-MAIL

1. ARTICLE POUR LA REVUE :
RTSI - TSI – 24/2005. Multimédia mobile
2. AUTEURS :
Tanguy Pérennou^{,**} — Jérôme Lacan^{*,**} — Hanaa El Natour^{***}*
3. TITRE DE L'ARTICLE :
Evaluation de mécanismes de contrôle d'erreur pour des transmissions multipoints sur des réseaux de mobiles
4. TITRE ABRÉGÉ POUR LE HAUT DE PAGE MOINS DE 40 SIGNES :
Contrôle d'erreur pour réseaux mobiles
5. DATE DE CETTE VERSION :
8 décembre 2005
6. COORDONNÉES DES AUTEURS :
 - adresse postale :
 - * LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse cedex 4
 - ** ENSICA, 1 place Emile Blouin, F-31056 Toulouse cedex 5
 - {tanguy.perennou, jerome.lacan}@ensica.fr
 - *** TéSA, 2 rue Charles Camichel, F-31071 Toulouse cedex 7, BP 7122
 - hanaa.el-natour@tesa.prd.fr

 - téléphone : +33 5 61 61 87 16
 - télécopie : +33 5 61 61 86 88
 - e-mail : tanguy.perennou@ensica.fr, jerome.lacan@ensica.fr, hanaa.el-natour@tesa.prd.fr
7. LOGICIEL UTILISÉ POUR LA PRÉPARATION DE CET ARTICLE :
L^AT_EX, avec le fichier de style article-hermes.cls,
version 1.21 du 2003/12/03.
8. FORMULAIRE DE COPYRIGHT :
Retourner le formulaire de copyright signé par les auteurs, téléchargé sur :
<http://www.revuesonline.com>

SERVICE ÉDITORIAL – HERMES-LAVOISIER
14 rue de Provigny, F-94236 Cachan cedex
Tél. : 01-47-40-67-67
E-mail : revues@lavoisier.fr
Serveur web : <http://www.revuesonline.com>