HAL open science

Contributions à la fiabilisation du transport de la vidéo

Amine Bouabdallah

To cite this version:

Amine Bouabdallah. Contributions à la fiabilisation du transport de la vidéo. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2010. Français. NNT : 2010INPT0051 . tel-01068061

HAL Id: tel-01068061

https://theses.hal.science/tel-01068061

Submitted on 24 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Réseaux, Télécommunications, Systèmes et Architecture - RTSA

Présentée et soutenue par :
Amine Bouabdallah

le : vendredi 3 décembre 2010

Titre :

Contributions à la fiabilisation du transport de la vidéo

JURY

M. Kavé Salamatian (Rapporteur) - M. Daniel Augot (Président)
M. Fabrice Arnal (Examinateur) - M. Vincent Roca (Examinateur)
M. Michel Diaz (Directeur de Thèse) - M. Jérôme Lacan (co-Directeur de Thèse)

Ecole doctorale :
Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT)

Unité de recherche :
DMIA/ISAE - LAAS-CNRS

Directeur(s) de Thèse :
M. Michel Diaz
M. Jérôme Lacan

Rapporteurs :
M. Kavé Salamatian
M. Daniel Augot

Remerciements

Je voudrais dans ce paragraphe adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidées durant cette thèse. Naturellement, je vais commencer par M. Lacan Jérôme, mon encadrant direct, la personne qui m'a le plus aidée et avec laquelle j'ai le plus travaillé. Pour son aide et sa patience à mon égard, merci. M. Diaz michel pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, ses conseils avisés et son aide, spécialement durant la phase de rédaction, me furent précieux. M. Scénac Patrick, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire puis soutenu par la suite. M Arnal Fabrice pour m'avoir donner ses conseils durant toute la thèse.

Je voudrais aussi remercier M. Augot Daniel et M. Salamatian Kavé pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse dont la fin fut assez particulière. M. Roca vincent et M. Arnal Fabrice d'avoir accepter d'être membre du Jury. Je voudrais aussi adresser des remerciements appuyés à l'équipe administrative de l'INPT (Mme Carcasses, Mme Marmiroli et Mme Lacoste) ainsi que celle de l'école doctorale MITT pour m'avoir grandement facilité les dernières démarches d'avant soutenance ... Merci à vous. Une pensée aussi pour les membres du DMIA, je pense notamment à Emmanuel et Tanguy, ali et Tarek auparavant. Mes remerciements vont aussi aux créateurs du template loria avec lequel j'ai rédigé la thèse ainsi que le template JLTree avec lequel j'ai fait ma présentation.

Je voudrais aussi remercier mon père et ma mère pour leur soutient INDÉFECTIBLE depuis mon départ d'Algérie. Oh papa merci. Oh maman merci. A mon frère et ma sœur, pour m'avoir "dégagé la route", je leur dis merci. A mon épouse, invitée de cette fin de thèse, sa compagnie m'aura permis de dissiper bien des difficultés, je lui dis merci.

Sans rien enlever aux mérites des personnes précédemment citées, j'aime à penser que nul bien ne peut nous atteindre sans la bénédiction du Très-Haut, l'Unique, sans qui, rien de cela n'aurait put se passer. Alors louanges à Lui.

A Selim
Les tunnels ont une fin.

Résumé

Les applications vidéo rencontrent un franc succès dans les nouveaux réseaux de communication. Leur utilisation dans des contextes de plus en plus difficiles : réseaux de paquets non fiables (internet), diffusion vers des récepteurs mobiles via des canaux sans fil, ont requis le développement de nouvelles solutions plus efficaces et mieux adaptées. Les travaux de cette thèse sont une tentative de réponse à ces besoins. Les solutions qui ont été développées peuvent être regroupées en deux ensembles : des solutions issues de travaux nouveaux développés dans un contexte d'utilisation ordinaire et des solutions issues de l'amélioration et l'optimisation de travaux existants développés pour des contextes extrêmes. Le canal de Bernoulli a représenté pour nous le cadre de travail pour le développement des nouvelles solutions. Ainsi pour les applications de diffusion vidéo, nous avons ciblé la protection inégale et avons développé un mécanisme à protection inégale des données vidéo (DA-UEP). Ce mécanisme se situe à proximité de la source vidéo et adapte le niveau de protection des données à leur degré d'importance. Son originalité réside dans sa manière d'intégrer la particularité d'interdépendances des données vidéo dans le générateur de la protection inégale. Dans un travail d'approfondissement et d'exploration, nous avons combiné la protection inégale des couches hautes produite par DA-UEP avec de la protection inégale de la couche physique produite par de la modulation hiérarchique. L'optimisation de ce système a permis d'obtenir des gains significatifs et a validé le bien fondé de cette piste de recherche. Pour les communications vidéo interactives, nous avons évalué les performances du mécanisme Tetrys pour les communications vidéo. Ce mécanisme de codage à la volée avec intégration des acquittements a permis d'obtenir des résultats à la hauteur de ceux obtenus par la protection inégale dans un cadre de diffusion. Ces résultats ont aussi permis de mettre en avant tout le potentiel de ce mécanisme. Pour les canaux satellites mobiles, nous nous sommes intéressés à la diffusion vidéo vers des récepteurs mobiles. Dans ce cadre, nous avons évalué des mécanismes tels que les codes correcteurs d'erreurs, les entrelaceurs de la couche physique et de la couche liaison et les codes à effacement de niveau intermédiaire. Nous avons travaillé sur un canal réaliste en prenant en compte les contraintes pratiques telles que les temps de zapping et la vitesse de déplacement des récepteurs. Nous avons révélé les relations qui existent entre vitesse de déplacement, étalement spatial et qualité de réception. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence les combinaisons de mécanismes qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats en termes de fiabilité et de temps de zapping dans ce contexte particulier.

Mots-clés: Vidéo, Protection inégale, interdépendance de données, diffusion satellite.

Abstract

Video applications are growing more and more successful in the new communication networks. Their utilization in growing harder context as lossy packet network (Interne), satellite-mobile broadcasting wireless channel, call for the developments of more efficient and well adapted solutions. The work done in this thesis is an attempt to answer those new needs. The proposed solutions can be grouped into two sets : solutions based on new works developed for medium context and solutions based on the improvement and optimization of existing works developed for extremes contexts. The Bernoulli channel represented the working environment to develop new solutions. So for video streaming application, we targeted unequal protection mechanisms and developed dependency-aware unequal protection codes (DA-UEP). This mechanism is located near the source application and adapt the protection level to the importance of the data. Its originality comes from its ability to integrate video data dependencies into the protection generator. In a forward work of improvement and exploration, we combined DA-UEP unequal protection from high layers with hierarchical-modulation unequal protection from lower layer. The system optimization achieves substantial gains and validate the righteous of this research area. For conversational video applications, we evaluated the performances of Tetrys in the video communication context. This On-the-fly coding mechanism with acknowledgment integration achieves performances as high as those obtained by unequal protection in streaming context. Those performances also advances the high potential of this mechanism. The land mobile satellite channels represented the working environment to improve and optimize existing solutions. We particulary focus on satellite to mobile video broadcasting applications. In this context, we evaluated mechanisms such as forward errors correcting codes (FEC), data interleaving at physical or link layers and forward erasures correcting codes at intermediates layers. The evaluation is made on a realistic satellite channel and takes into account practical constraints such as the maximum zapping time and the user mobility at several speeds. We reveal the existing relations between user velocity, data spreading and reception quality. Consequently, We identified the combinations of mechanisms that give the best performance in terms of reliability and zapping time in this particular framework.

Keywords: Video. Unequal Protection. Data dependency. Satellite broadcasting.

Table des matières

Introduction **1**

1 Contexte 1

2 Contributions 1

3 Plan 2

Partie I Mécanismes de fiabilité utilisés sur les couches hautes **3**

Chapitre 1
Code à protection inégale intégrant les dépendances interdonnées

1.1 Introduction et contexte 5

1.1.1 La proactivité 5

1.1.2 La protection inégale 6

1.2 Le codage à protection inégale 6

1.2.1 Le processus de génération 6

1.2.2 L'adaptation aux données intra-dépendantes : application à la vidéo . 8

1.3 Simulation et résultats 8

1.4 Évaluation analytique 9

1.5 Échos autour de ce mécanisme 12

Chapitre 2
Tetrys : protection pour la vidéo conversationnelle

2.1 Contexte et problématique 15

2.2 Le codage à la volée et intégration des acquittements 16

2.3 La vidéo conférence avec Tetrys 16

2.4 Comprendre Tetrys à travers DA-UEP 17

Partie II Optimisation Multicouches **21**

Chapitre 3
La protection inégale à l'aide des codes à effacement DA-UEP et de la modulation hiérarchique

3.1 Contexte 23
3.2 Evaluations analytiques des mécanismes de fiabilité 24
3.2.1 La source vidéo FGS 24
3.2.2 DA-UEP 24
3.2.3 La modulation hiérarchique 26
3.3 L'optimisation conjointe 26
3.4 Résultats 27

Chapitre 4
Évaluation de mécanismes de fiabilité multicouche pour la diffusion satellite TV

4.1 Introduction et contexte 29
4.2 Le canal Satellite-mobile LMS 30
4.3 La pile protocolaire 31
4.3.1 Couche application : H.264 31
4.3.2 Les couches intermédiaires : RTP / UDP / IP ou ROHC 32
4.3.3 MPE et MPE-FEC 32
4.3.4 La couche physique 33
4.4 Amélioration de la robustesse 33
4.4.1 Les codes à effacements sur les couches intermédiaires 33
4.4.2 La dispersion sur la couche physique 33
4.5 Simulations 34
4.5.1 Scénario 1 : scénario de référence 34
4.5.2 Scénario 2 : l'étalement sur la couche physique 34
4.5.3 Scénario 3 : utilisation de codes à effacements sur la couche application 36
4.6 Conclusion 36

Conclusion **39**

Publications **41**

Bibliographie **43**

Table des figures

1.1 Protection inégale 8
1.2 Comparaison en PSNR entre DA-UEP, PET et MDS 9
1.3 Sous matrice de la matrice génératrice G d'un code DA-UEP de deux couches correspondant aux données reçues 10
1.4 Condition d'inversibilité pour la concaténation de deux matrices de cauchy non inversibles 11
1.5 Comparaison des performances théoriques et simulées d'un code DA-UEP de 2 couches 12

2.1 Tetrys : exemple illustratif 17
2.2 PSNR instantané 18
2.3 PSNR moyen : a) canal de bernoulli b) rafale 2 c) rafale 3 18

3.1 Système de protection inégale 25
3.2 Modulation hiérarchique QPSK/16QAM avec émulations par du bruit des symboles QPSK 26
3.3 Comparaison des distorsions vidéo des optimisations conjointe et non-conjointe. . 27
3.4 Évolution de la redondance allouée r_i aux couches de DA-UEP (axe gauche) et du paramètre λ de la modulation hiérarchique (axe droit) 27

4.1 évolution sur 1 km du rapport signal à bruit du canal ITS 31
4.2 Pile de protocoles de base 32
4.3 Relation entre vitesse de déplacement et dispersion 34
4.4 Scenario 1, Evolution trame/trame du PSNR 35
4.5 Influence du produit $T_s v$ sur le PSNR moyen de la vidéo reconstruite (R=250 kbps) 35
4.6 PSNR pour $v = 15$ m/s et pour (a) $T_{\text{block}} = 0$ s (sans FEC, mais avec un débit vidéo de 250 kbps), (b) $T_{\text{block}} = 1$ s, (c) $T_{\text{block}} = 2$ s and (d) $T_{\text{block}} = 3$ s, ... 37

Introduction

1 Contexte

Les applications vidéo connaissent un intérêt croissant de la part des utilisateurs des réseaux de communication. L'émergence de nouvelles technologies et la mise à la disposition des utilisateurs de larges bandes passantes ont favorisé ces dernière décennies l'essor de ces applications, et par la même, leur intégration dans des environnements de plus en plus divers. La diversité des contextes d'utilisation (internet, réseaux sans-fil, diffusion satellite...etc), et la multiplicité des modes (streaming, conversation) font de la fiabilisation du transport de la vidéo un large champ de recherche requérant une réponse spécifique presque pour chaque cas d'utilisation.

Intrinsèquement, la vidéo présente des propriétés susceptibles d'être exploitées pour optimiser la fiabilité de son transport. En particulier, les données vidéo n'ont pas le même poids dans la qualité finale perçue. Ainsi l'utilisation de mécanismes qui privilégieraient les données les plus importantes peut potentiellement apporter de nets gains de performance. Autre particularité, la vidéo peut tolérer la perte de certaines données sans effets majeurs sur la qualité finale et, peut, en même temps, rejeter une données arrivée tardivement même s'il elle est intégralement reçue. Les données vidéo font partie d'un flux cadencé et ont une durée de validité au delà de laquelle elles sont inutilisables. Ces deux particularités peuvent être exploitées par exemple pour relaxer la contrainte de fiabilité totale que l'on peut rencontrer lors de la fiabilisation de données conventionnelles et optimiser la vitesse de décodage au récepteur afin de fournir à l'application des données le plus rapidement possible. Fort de ce constat, nous avons, dans ce travail de thèse, fait la proposition d'un mécanisme de protection inégale destiné aux applications de streaming pour le cas unicast et multicast. Afin de maximiser l'exploitation de principe, nous avons combiné ce mécanisme avec un mécanisme de protection inégale complémentaire (modulation hiérarchique). Nous avons aussi participé à l'évaluation d'un mécanisme de codage à la volée qui optimise les délais de décodage des données. Ce mécanisme est destiné à la fiabilisation des applications de vidéo conférence point-à-point qui sont temporellement encore plus exigeantes. Le dernier cas d'application abordé était la diffusion satellite de contenu TV vers des récepturs mobiles.

2 Contributions

La première contribution de cette thèse est l'élaboration d'un mécanisme de protection inégale pour la vidéo. Ce mécanisme a été construit à base de codes à effacements proactifs. Sa particularité est d'intégrer les dépendances inter-données dans la génération de sa redondance. Pour ce mécanisme nous avons élaboré un cadre d'évaluation théorique et deux implémentaions en C et Matlab. La deuxième contribution a trait au travaux de soutien que nous avons fait pour le compte du CNES pour appuyer leurs propositions dans le cadre de l'élaboration de la norme de diffusion de vidéo mobile DVB-SH. Dans ce cadre, un travail d'identification et d'évaluation des

mécanismes de fiabilité d'un système de diffusion satellitaire a été accompli couche par couche. Des amélioration ont été proposées et les principaux compromis de performance ont été identifiés (PSNR / temps de zapping / occupation mémoire). Les solutions ont été simulées et évaluées.

3 Plan

La thèse comprend 4 chapitres en plus de l'introduction et de la conclusion. Ces 4 chapitres correspondent à 4 de nos publications les plus significatives. Ces chapitres sont organisés en deux parties. La première partie rassemble les travaux de fiabilisation développés pour les couches hautes de la pile protocolaire. Il s'agit en particulier du mécanisme de protection inégale DA-UEP auquel nous avons consacré le premier chapitre et au mécanisme de codage à la volée Tetrys auquel nous avons consacré le deuxième chapitre. Ces travaux ont aussi en commun d'être développés pour le canal de Bernoulli.
La deuxième partie a trait aux travaux d'optimisation multicouche étudiés pour des contextes extrêmes de transmission vidéo. Dans cette partie, le troisième chapitre a été consacré à l'optimisation conjointe de DA-UEP avec le mécanisme de modulation hiérarchique. Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'évaluation de mécanismes multi-couches pour la diffusion satellite-mobiles.

Première partie

Mécanismes de fiabilité utilisés sur les couches hautes

1

Code à protection inégale intégrant les dépendances interdonnées

Sommaire

1.1 Introduction et contexte **5**
1.1.1 La proactivité 5
1.1.2 La protection inégale 6
1.2 Le codage à protection inégale **6**
1.2.1 Le processus de génération 6
1.2.2 L'adaptation aux données intra-dépendantes : application à la vidéo 8
1.3 Simulation et résultats **8**
1.4 Évaluation analytique **9**
1.5 Échos autour de ce mécanisme **12**

1.1 Introduction et contexte

Nous abordons dans cette partie la publication de la référence [Bouabdallah and Lacan, 2006a]. Dans cette dernière, nous avons présenté un mécanisme proactif de protection inégale sur les couches hautes ; appliqué principalement sur les données vidéo.

La proactivé et l'inégalité de la protection sont les deux particularités qui situent et cadrent ce mécanisme. L'intégration des dépendances inter-données dans la génération de la protection inégale est la principale contribution de ce travail.

Dans ce qui suit, nous allons parler brièvement de la proactivité et de la protection inégale.

1.1.1 La proactivité

La proactivité suggère la protection des données en amont des pertes. Elle est nécessaire quand la protection réactive (celle qui se déclenche à la suite de la perte d'une donnée) n'est pas possible. On trouve généralement ces cas de figures dans les communications multimédia où les demandes de correction ou de retransmissions initiées à la suite de pertes sont inutiles, et ce, à cause des délais induits par ces procédures. En effet, en plus des contraintes sur l'intégrité des données, le travail sur les données multimédia implique des contraintes temporelles plus ou moins strictes (les données arrivées trop tard ne sont plus exploitables et donc inutiles). Les mécanismes de protection proactifs sont généralement basés sur l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs ou

de codes à effacement selon que le canal de transmission soit à erreur ou à effacement.
Dans notre cas, les objectifs de protection inégales dont nous reparlerons plus loin, impliquent une certaine proximité entre le générateur de données (la source) et le mécanisme de fiabilité. Dans une pile protocolaire de transmission, ceci implique aussi l'implantation du mécanisme de protection proactif sur les couches hautes de la pile : au dessus du protocole de transport et en dessous de la couche application. De cette position haute dans la pile, le mécanisme se verra imposer deux contraintes. D'une part, le canal observé est généralement un canal à effacement, puisque les mécanismes de contrôle d'erreurs des couches basses et intermédiaires procéderont à l'écartement de tout paquet de données non intègre (ce rejet des paquets non intègre des couches basses est perçu comme un effacement par le mécanisme proactif). D'autres part, les unités de données traitées par ce mécanisme se rapporteront forcément aux unités de données des couches hautes des piles protocolaires ; à savoir les paquets de données. Ces deux problèmes ont été abordés dans l'article de [Rizzo, 1997], où une méthodologie claire est présentée pour appliquer des codes à effacement à protection égale de type Reed-Solomon à des datagrammes de données.

1.1.2 La protection inégale

La protection inégale est l'autre particularité de ce mécanisme. Conceptuellement, ce principe consiste à offrir une protection différenciée aux données transmises, l'objectif étant, d'optimiser la distribution sur les différentes données de la ressource "protection". La protection inégale n'a de sens que si les données protégées ont, elles aussi, un impact différencié sur une quelconque métrique d'utilité considérée. De plus, comme c'est aussi une procédure de partage de ressource, le recours à cette technique n'est utile que lorsque cette ressource est manquante. En effet, il est inutile (voir contre productif) de rationaliser la distribution d'une ressource si elle est présente en nombre et peut bénéficier à tout le monde.
La mise en œuvre d'un mécanisme à protection inégale implique un travail conjoint et une connaissance partagée entre d'une part le mécanisme de fiabilité et la source des données (connaissance de l'importance des données), et d'autre part le mécanisme de fiabilité et le canal de communication (disponibilité de la ressource protection relativement au niveau des pertes). Il faut noter que cet aspect du problème (i.e. le partage de la connaissance entre les différentes entités) n'est pas abordé dans ce travail, car nous prenons l'hypothèse que cette transmission de connaissance entre les différentes couches est possible et faisable. On considère en particulier que le mécanisme de fiabilité a une connaissance étendue des caractéristiques des données source (type et taille des images,...etc). On se concentre par contre dans ce travail sur la procédure de fabrication de la protection inégale et sur l'intégration des particularités vidéo dans ce processus. Nous abordons ces deux points dans le paragraphe suivant.

1.2 Le codage à protection inégale

1.2.1 Le processus de génération

La génération de la protection inégale par des codes à effacements proactifs peut être accomplie soit à partir de codes séparés de rendement différents comme cela a été présenté dans plusieurs travaux dont ceux de [Heinzelman *et al.*, 2002], soit à partir d'un seul code construit de façon à produire une protection différenciée, telles que les solutions proposées dans [Hagenauer and Hagenaucr, 1989; Albanese *et al.*, 1996; Rahnavard *et al.*, 2007b; Rahnavard *et al.*, 2007a]. La première solution offre la simplicité de réalisation mais considère les données comme des entités distinctes et s'adapte mal à la complexité réelle des données sources. La seconde solution se

caractérise par une plus grande complexité de réalisation mais épouse mieux les caractéristiques des données vidéo. Parmi ces derniers travaux, le système à encodage prioritaire (PET) de [Albanese *et al.*, 1996] est la référence bibliographique que nous avons le plus souvent rencontrée. Notre solution se situe parmi les travaux de ce dernier registre.

La protection inégale revient pratiquement à offrir à des sous-ensemble d'unités d'information la robustesse contre un nombre variable de pertes ; ce nombre étant fonction du degré d'importance de la donnée. Ceci est possible si le code peut produire des unités de redondance dont le degré de combinaison est variable (i.e. le degré de combinaison est le nombre d'unités d'information impliquées dans la construction d'une unité de redondance). Ce degré est petit pour les données importantes et grand pour les données moins importantes. Nous justifierons cette affirmation par la suite.
Dans notre cas, nous avons commencé à construire notre mécanisme à partir d'un code à protection égale, à effacement, systématique et séparable à distance maximale (MDS) $C(k,n)$. Dans ce code, chaque unité de redondance est la résultante de la combinaison de k unités d'information "amplifiées". En présence de pertes (effacements), l'absence d'une unité d'information peut être corrigée par la présence d'une unité de redondance seulement si les $k-1$ autres informations impliquées dans la construction de cette unité de redondance sont disponibles. Afin de diminuer ce nombre "k-1" d'information requises à la correction et donc augmenter la probabilité de décodage, nous avons annulé la présence d'une partie des unités d'information dans la construction d'une partie des unité de redondance. Mathématiquement, cette annulation se fait par une amplification nulle. Cette façon de procéder a effectivement produit de la protection différenciée comme ont montré des simulations effectuées sur de petit exemples (voir le modèle dans l'équation 1.1) et dont les résultats sont illustrés dans la figure 1.1.

$$\begin{cases} \vec{X} * \left[I_4 \left| \begin{array}{ccc} \alpha_{1,5} & \alpha_{1,6} & \alpha_{1,7} \\ \alpha_{2,5} & \alpha_{2,6} & \alpha_{2,7} \\ \alpha_{3,5} & \alpha_{3,6} & \alpha_{3,7} \\ 0 & \alpha_{4,6} & \alpha_{4,7} \end{array} \right. \right] = \vec{Y_1} \\ \\ \vec{X} * \left[I_4 \left| \begin{array}{ccc} \alpha_{1,5} & \alpha_{1,6} & \alpha_{1,7} \\ \alpha_{2,5} & \alpha_{2,6} & \alpha_{2,7} \\ 0 & \alpha_{3,6} & \alpha_{3,7} \\ 0 & \alpha_{4,6} & \alpha_{4,7} \end{array} \right. \right] = \vec{Y_2} \\ \\ \vec{X} * \left[I_4 \left| \begin{array}{ccc} \alpha_{1,5} & \alpha_{1,6} & \alpha_{1,7} \\ 0 & \alpha_{2,6} & \alpha_{2,7} \\ 0 & \alpha_{3,6} & \alpha_{3,7} \\ 0 & \alpha_{4,6} & \alpha_{4,7} \end{array} \right. \right] = \vec{Y_3} \\ \\ \alpha_{i,j} \; coefficients \; de \; Cauchy \end{cases} \tag{1.1}$$

La présence d'un degré de combinaison différent pour les unités de redondance est le révélateur de la présence de la protection inégale dans le code construit. Un degré unique pour toute la redondance indiquerait une protection égale pour toutes les données. Cette dernière condition est une condition suffisante à la présence de la protection inégale dans le code construit. Cette condition d'existence de la protection inégale a ouvert la voie à plusieurs types d'implémentation. Pour notre part, les données vidéo étant notre objectif de protection, nous nous sommes donc

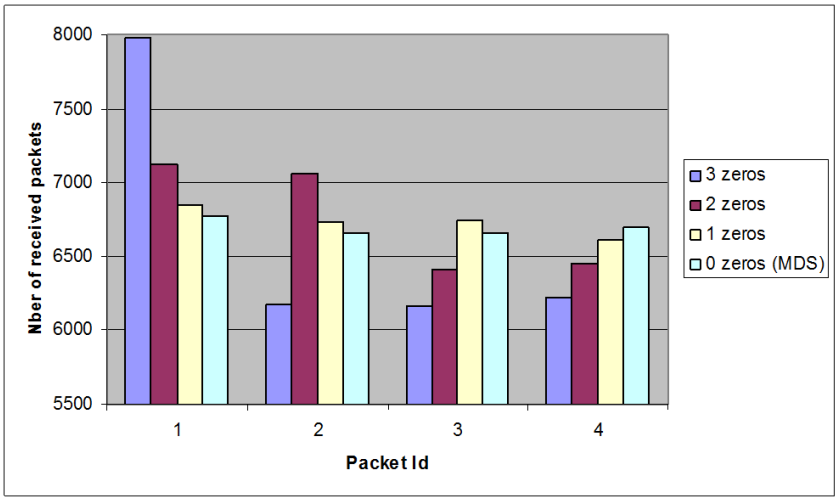


FIGURE 1.1 – Protection inégale

inspirés de leurs caractéristiques pour y puiser les règles de construction de notre code UEP.

1.2.2 L'adaptation aux données intra-dépendantes : application à la vidéo

La vidéo est une suite d'images riches en information qui nécessiterait un large volume de données pour être représentée dans son format naturel. Les redondances spatiales et temporelles, quand elle existent, sont exploitées pour diminuer la quantité de données compressée. L'information commune à plusieurs instants ou endroits est codée une seule fois. Son poids dans la qualité de la vidéo est d'autant plus important que sa présence est nécessaire au décodeur pour plusieurs instants et endroits d'une vidéo. L'information résiduelle est codée tout le long des séquences et est exploitable seulement si l'information commune liée est reçue. Cette relation de dépendance à reculons entre information résiduelle et information commune produit la différenciation d'importance entre les données. Nous avons voulu préserver cette particularité dans la construction de la redondance du code à protection inégale. Chaque donnée de protection doit inclure dans sa génération toutes les données d'information impliquées dans la restitution finale de la plus dépendante des données. Les données les plus dépendantes sont les moins importantes et seront impliquées dans la construction de la redondance dont le degré de combinaison serait le plus grand et inversement. Ceci satisfait la condition de présence de la protection inégale définie dans la section précédente.

L'instantiation de cette approche peut se faire à différents niveaux de granularité : bloc macrobloc, slice, trame, classe d'images ou couche vidéo (pour la vidéo scalable). En dehors de la vidéo scalable, plus fine est la granularité meilleurs sont les résultats escomptés. Dans notre cas, nous avons intégré les dépendances interdonnées au niveau trame. A notre connaissance, c'est le degré le plus fin de granularité évalué au moment de l'accomplissement de ce travail. Les travaux que nous avions rencontré utilisaient le mécanisme PET au niveau classe d'image (I, P ou B).

1.3 Simulation et résultats

Les résultats obtenus après simulations ont montré le net avantage qui peut exister à utiliser la protection inégale dans la protection de la vidéo. La figure 1.2 montre en général le gain apporté

par les techniques de protection inégale par rapport aux techniques classiques de protection égale et en particulier du net avantage que procure l'utilisation de DA-UEP par rapport à la technique de référence PET. Cette avantage revient globalement à une meilleure finesse dans la protection des données. PET aborde les données vidéo par classe d'image : I, P et B. Chaque classe comporte l'ensemble des trames de son type. En conséquence, les paliers de récupération des données sont éloignés et suivent les classes. DA-UEP par contre aborde les données par trame, les paliers de récupération sont ainsi plus rapprochés et permettent un meilleur suivi des conditions variables de transmission.

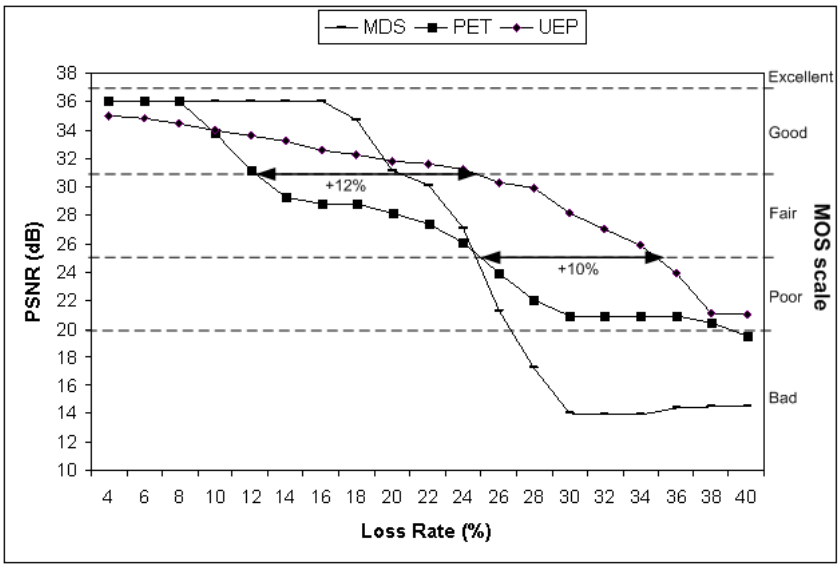


FIGURE 1.2 – Comparaison en PSNR entre DA-UEP, PET et MDS

1.4 Évaluation analytique

Dans cette partie nous présentons un modèle pour évaluer analytiquement les performances de DA-UEP. Ce modèle nous servira par la suite lors de l'optimisation d'un système de diffusion intégrant DA-UEP.
Pour des raisons de simplicité, notre modèle se base sur un code DA-UEP C à deux couches. Les longueurs des couches sources sont respectivement k_1 et k_2 et celles des couches de redondance sont r_1 et r_2. La matrice génératrice G d'un tel code a la forme suivante :

$$\begin{cases} \overrightarrow{X_1X_2} * \left[I_{k_1+k_2} \left| \begin{array}{cccccc} \alpha_{1,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \alpha_{1,r_1+r_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \alpha_{k_1,1} & \cdots & \alpha_{k_1,r_1+1} & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \alpha_{k_1+1,r_1+2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \alpha_{k_1+k_2,r_1+2} & \cdots & \alpha_{k_1+k_2,r_1+r_2} \end{array} \right. \right] = \vec{Y} \\ \alpha_{i,j} \; coefficients \; de \; Cauchy \end{cases} \tag{1.2}$$

Nous considérons que le vecteur $\vec{Y}$ est affecté par des pertes indépendantes. Les variables x_1 et x_2 comptabilisent le nombre de symboles perdus sur chaque couche de données, et y_1 et y_2 les comptabilisent sur chaque couche de redondance. Après simplification et permutation, l'inversibilité de la matrice reçue revient à l'étude de l'inversibilité d'une matrice générique de la forme de la figure 1.3.

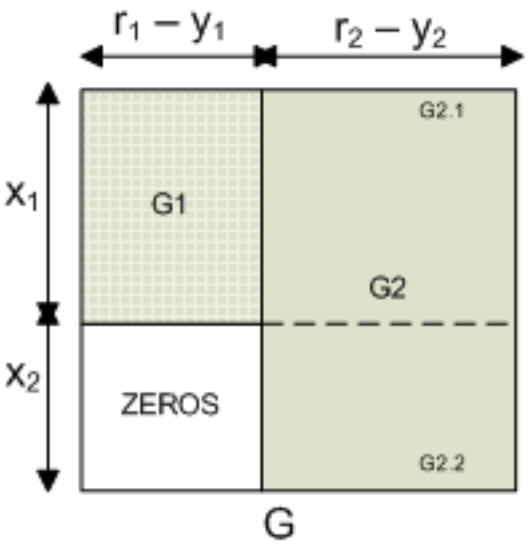


FIGURE 1.3 – Sous matrice de la matrice génératrice G d'un code DA-UEP de deux couches correspondant aux données reçues

En notant qu'un code DA-UEP de deux couches peut être représenté par deux codes MDS emboités $C_1(k_1, k_1 + r_1)$ et $C_2(k_1 + k_2, k_1 + k_2 + r_2)$, nous avons élaboré un modèle analytique à base de codes MDS entièrement définis et simplement évalués. Sur la figure précédente le code $C1$ est représenté par la surface grise hachurée en blanc G_1. Ce code peut être décodé indépendamment.
A partir de là, deux cas se distinguent :

1. La matrice G_1 est inversible : dans ce cas la couche 1 est entièrement décodée et l'inversibilité du reste de la matrice dépend du code résiduel $C_{2.2}$ de paramètre $(k_2, k_2 + r_2)$. Sur la figure 1.3, ce code est représenté par la surface grise en dessous des point-tillés notée $G_{2.2}$.
2. La matrice G_1 est non inversible : dans ce cas, on ne peut rien déduire sur la matrice G. La forme carrée de la matrice, notamment, ne garantie pas son inversibilité (le code n'est pas MDS). Dans ce cas aussi, nous avons deux possibilités :
   (a) La matrice G_2 est inversible : les deux couches sont alors décodées.
   (b) La matrice G_2 est non inversible mais la matrice G contient au moins autant de colonnes que de lignes(i.e. réception de plus de redondances que de pertes). A ce point là, aucun code MDS n'est inversible individuellement, mais le code global est décodable ; c'est- à-dire que son rang est supérieur à $x_1 + x_2$ Nous émettons l'hypothèse que la matrice G' (celle formée par la concaténation de la matrice G_2 et une partie de G_1) est inversible si la zone de zéros de la matrice G' n'atteint pas sa diagonale (voir la figure 1.4). De ce schéma nous avons tiré la condition mathématique $x_2 \leq r_2 - y_2$. Ce qui revient à tester l'inversibilité de la matrice $G_{2.2}$.

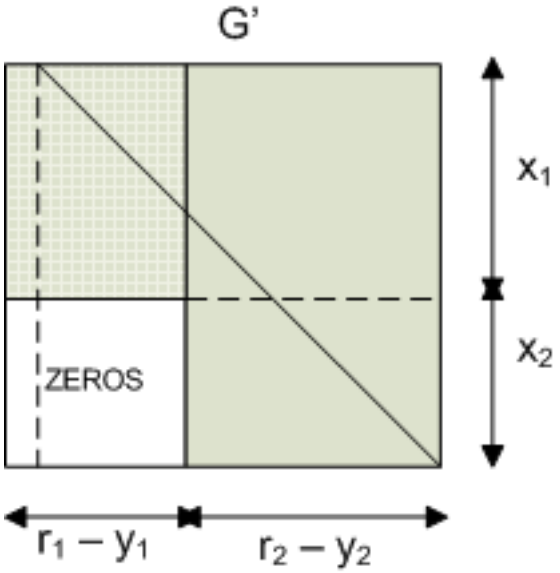


FIGURE 1.4 – Condition d'inversibilité pour la concaténation de deux matrices de cauchy non inversibles

Décodage des couches	Fonction	Événements correspondants
1 et 2	f_2	$G_1 \wedge G_{2.2}$ $\overline{G_1} \wedge G \wedge (1 - \overline{G_2} \wedge \overline{G_{2.2}})$
1 seulement	f_1	$G_1 \wedge \overline{G_{2.2}}$
Aucune		$\overline{G_1} \wedge \overline{G} \vee (\overline{G_2} \wedge \overline{G_{2.2}})$

TABLE 1.1 – Les événements associés au décodage d'un code DA-UEP de 2 couches. La notation G_i respectivement $\overline{G_i}$, indique que G_i est inversible, respectivement non inversible.

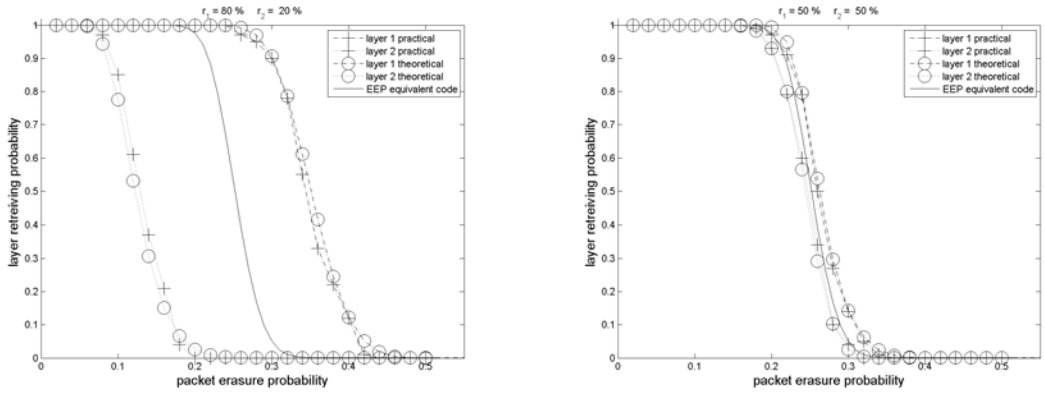
Dans ce dernier paragraphe nous énumérons exhaustivement tous les cas de figure qui peuvent se présenter. Dans le tableau 1.4, nous avons regroupé l'ensemble des événements qui mènent à la réception de chacune des couches. Ainsi nous avons pu pour chacune d'elle écrire la fonction d'évaluation analytique f_i (voit l'équation 1.4) de sa probabilité de décodage. Les événement impliqués dans ces fonctions f_i sont des tests sur l'inversibilité de la matrice génératrice d'un certain code MDS classique. Les probabilités associées à ces événements sont connues et peuvent être évaluées directement par la formule binomiale suivante :

$$P(Gi) = \sum_{j=0}^{ri} \binom{k_i + r_i}{j} \cdot p^j \cdot (1-p)^{(k_i+r_i-j)} \tag{1.3}$$

En somme, les fonction f_i sont des combinaisons de loi binomiale qui dépendent des variables du code k_i, r_i qui représentent les largeurs des couches de données et de redondance et de p, le taux de perte. La fonction d'évaluation globale f d'un code à n couches est décrite dans 1.4.

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_1(\vec{k_1}, \vec{r_1}, p) \\ f_2(\vec{k_2}, \vec{r_2}, p) \\ \vdots \\ f_n(\vec{k_n}, \vec{r_n}, p) \end{bmatrix} \tag{1.4}$$

Pour valider notre modèle nous avons simulé un code DA-UEP de deux couches avec plusieurs configurations. L'ensemble des résultats présentés dans la figure 1.5 montrent la proximité des résultats entres valeurs théoriques et valeurs de simulation. Ceci valide aussi l'hypothèse considérée sur l'inversion des matrices en escalier.



a) $r_1 = 80\%,\ r_2 = 20\%$ b) $r_1 = 50\%,\ r_2 = 50\%$

FIGURE 1.5 – Comparaison des performances théoriques et simulées d'un code DA-UEP de 2 couches

1.5 Échos autour de ce mécanisme

Il est à noter que l'idée d'utiliser la dépendance interdonnées comme critère pour la génération de la protection inégale était originale au moment de l'accomplissement de ces travaux. Plusieurs travaux postérieurs ont relevé cela et ont développé davantage ce concept. Nous pouvons citer le

travail de [Hellge *et al.*, 2008b; Hellge *et al.*, 2008c; Hellge *et al.*, 2008a] de l'équipe du Heinrich Hertz Institute où ce concept d'intégration de dépendance a été étendu pour couvrir les vidéo scalables. Ce travail a fait l'objet du brevet [Wiegand, 2009] dont DA-UEP est une des premières références. [Korhonen and Frossard, 2009] ont également repris ce concept pour proposer des codes comparés à DA-UEP.

2

Tetrys : protection pour la vidéo conversationnelle

Sommaire

2.1 Contexte et problématique 15
2.2 Le codage à la volée et intégration des acquittements 16
2.3 La vidéo conférence avec Tetrys 16
2.4 Comprendre Tetrys à travers DA-UEP 17

2.1 Contexte et problématique

Dans cette partie nous abordons le travail de la référence [Tournoux *et al.*, 2009b] où nous avons présenté les évaluations du mécanisme Tetrys dans le contexte de la vidéo conversationnelle [1].
Les spécificités des applications de la vidéo conversationnelle sont différentes de ceux de la diffusion vidéo unidirectionnelle dans le sens où les contraintes temporelles sont encore plus fortes. On estime (voir [Wenger, 2003]) qu'une application de vidéo conférence est possible dans de bonnes conditions si le délai de transit aller-retour des données vidéo est de l'ordre de 100 ms. A titre de comparaison, une diffusion vidéo unidirectionnelle peut tolérer une latence de plusieurs secondes. Les mécanismes de fiabilité introduits dans le cadre d'un scénario de diffusion ne sont pas suffisants pour à la fois fiabiliser une communication vidéo bidirectionnelle et garantir une faible latence de transmission. L'utilisation de codes en bloc en particulier, tel que DA-UEP, ne peut pas répondre aux nouvelles contraintes temporelles imposées par ce type d'application. En effet, si la longueur des codes en bloc utilisés est grande, on verra s'établir dans la communication une latence insupportable pour ces applications (temps de bufferisation pour l'encodage et le décodage). Si au contraire nous maintenons des codes de petites longueurs, la latence induite sera petite mais l'occurrence éventuelle de pertes en rafale (comme on peut s'y attendre) peut facilement dépasser les capacités de correction du mécanisme en question.

C'est dans ce contexte et pour palier aux manquements des codes en blocs que Tetrys a été introduit. Les détails de son fonctionnement sont donnés dans les sections suivantes.

1. Il est à noter que ce mécanisme a été développé initialement par Jérôme Lacan et Emmanuel Lochin puis repris intégralement et porté par Pierre-Ugo Tournoux dans sa thèse. Notre contribution dans ce mécanisme avait trait à son utilisation dans un contexte de vidéo conférence.

2.2 Le codage à la volée et intégration des acquittements

Tetrys est un mécanisme de codage à la volée avec intégration éventuelle (s'ils sont reçus) des acquittements retours. Initialement destinés aux réseaux tolérant aux delais (Delay Tolerant Network, DTN) (voir le travail de [Lacan and Lochin, 2008]), Tetrys a été orienté dans [Tournoux *et al.*, 2009b] pour couvrir les applications multimédia et particulièrement la vidéo conversationnelles. Dans ce dernier travail, ce mécanisme a notamment été amélioré par la prise en compte du concept de "paquet vu" (seen packet) introduit dans le travail de [Sundararajan *et al.*, 2008]. Le principe de base du fonctionnement de Tetrys est d'introduire régulièrement au cours d'une conversation des paquets de redondance construits par la combinaison des paquets sources disponibles à l'émetteur et non encore acquittés par le récepteur. Ainsi faisant, ce mécanisme permet de maintenir une latence faible tout en garantissant une robustesse forte, voire totale. La principale conséquence de ce fonctionnement est d'établir une distinction claire entre la fenêtre d'encodage et la fenêtre d'insertion de la redondance du code. Comme nous le verrons plus loin, ces deux fenêtres contrôlent la robustesse et la latence de ce mécanisme de fiabilité.
La fenêtre d'encodage rassemble l'ensemble des paquets impliqués dans la construction de la prochaine redondance. Ce sont les paquets produits par l'application et non-acquittés par le récepteur. La longueur de cette fenêtre est potentiellement infinie et représente un indicateur sur la capacité à moyenner du mécanisme (gestion des pertes en rafales). Cette capacité à moyenner procure à Tetrys la robustesse nécessaire aux perte en rafales si tant est que la redondance introduite est suffisante. La fenêtre d'insertion de la redondance par contre représente le nombre de paquets sources attendus avant la génération d'un paquet de redondance et son introduction dans le flux de données. Cette fenêtre indique le temps d'attente minimal avant chaque encodage et respectivement chaque tentative de décodage. Sa longueur, qui dans Tetrys définit aussi le taux de redondance du code, a un impact direct sur le délai de décodage.
Dans un FEC classique les fenêtres d'encodage et de redondance se confondent. Ceci explique le mauvais compromis produit par ces mécanismes en terme de délai de décodage (latence) et capacité de correction (robustesse face aux pertes en rafales).

Pratiquement dans Tetrys, les paquets de redondances sont insérés à intervalle régulier k. Au terme de k nouveaux paquets sources, un nouveau paquet de redondance est produit à partir de tous les paquets sources non encore acquittés[2] . La fenêtre d'encodage est régulièrement mise à jour grâce aux acquittements envoyés par le récepteur et reçus par l'émetteur. Les paquets acquittés sont retirés de la fenêtre et l'espace correspondant dans les buffers est libéré. Cette finalité est d'ailleurs la principale utilité des acquittements. L'exemple de la figure 2.1 va nous permettre d'illustrer le fonctionnement basique de Tetrys. La fenêtre d'insertion de redondance est de longueur $k = 2$. La fenêtre d'encodage varie au cours de la transmission et est détaillée dans les indices des paquets de redondance en rouge.

2.3 La vidéo conférence avec Tetrys

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la vidéoconférence impose une latence maximale estimée à 100ms. Si les paquets arrivent ou sont décodés 100 ms après la date de leur envoi, il seront considérés perdus parce qu'inutiles. Si nous considérons le temps de traversée nul, l'émetteur a donc 100 ms pour corriger d'éventuelles pertes à partir de la date d'émission du

2. Il est à noter que sur l'ensemble d'une communication, tetrys impose un taux de redondance $R = 1/(k+1)$. Nous verrons plus loin, notamment dans le paragraphe de comparaison entre DA-UEP et Tetrys (section 2.4), que ce taux de redondance peut évoluer instantanément paquet par paquet

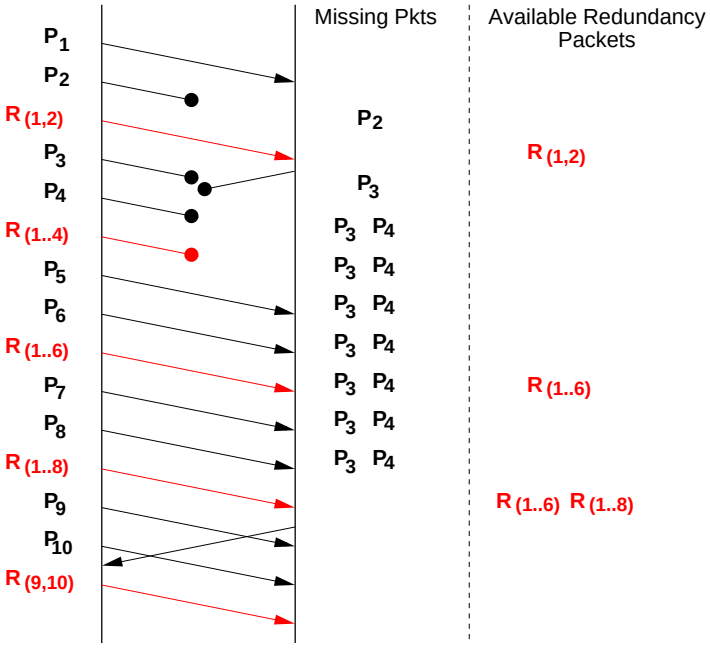


FIGURE 2.1 – Tetrys : exemple illustratif

paquet. La traduction de ce délai (temporel) en terme de capacité de correction du code se fait par le biais du débit de paquets à l'émission. En effet, plus le débit est grand, plus les paquets vont passer dans la fenêtre d'envoi et plus de paquets de redondances seront susceptibles d'être reçus par le récepteur. Nous voyons ici que le débit à l'émission peut jouer un rôle majeur dans la capacité de correction du mécanisme Tetrys. Ceci est notamment important pour les données vidéo, quand on sait qu'elle gênèrent instantanément (à l'échelle de la trame) des données à un débit grandement variable.

Les simulations que nous avons menées ont clairement montré ce phénomène. Sur le graphique du haut de la figure 2.2 est montré le débit par tranche de 100ms de l'application vidéo, sur la figure du bas nous montrons la valeur du PSNR instantané. Nous voyons bien comment le PSNR prend ses plus grandes valeurs quand le débit est maximum. On peut aussi y voir le gain instantané obtenu en comparaison avec les codes en bloc. Il est aussi à noter que les gain obtenus quand le débit est grand sont d'autant plus accentués que les données concernées sont des images dont le poids est plus important pour la qualité finale (image de type I). Ceci est notamment visible grâce aux histogrammes empilés.

Dans ces conditions les performances moyennes ne peuvent que suivre et confirmer les performances instantanées comme nous pouvons le voir sur les courbes de la figure 2.3 : la figure *a* pour le canal de Bernoulli (pertes isolées) et la b) pour le canal de Gilbert-Elliot ayant une longueur moyenne de bursts de perte de 3.

2.4 Comprendre Tetrys à travers DA-UEP

Cette section a pour but de tisser un lien entre DA-UEP et Tetrys. A partir de l'exemple précédent nous avons construit la matrice génératrice qui suit l'évolution temporelle de la com-

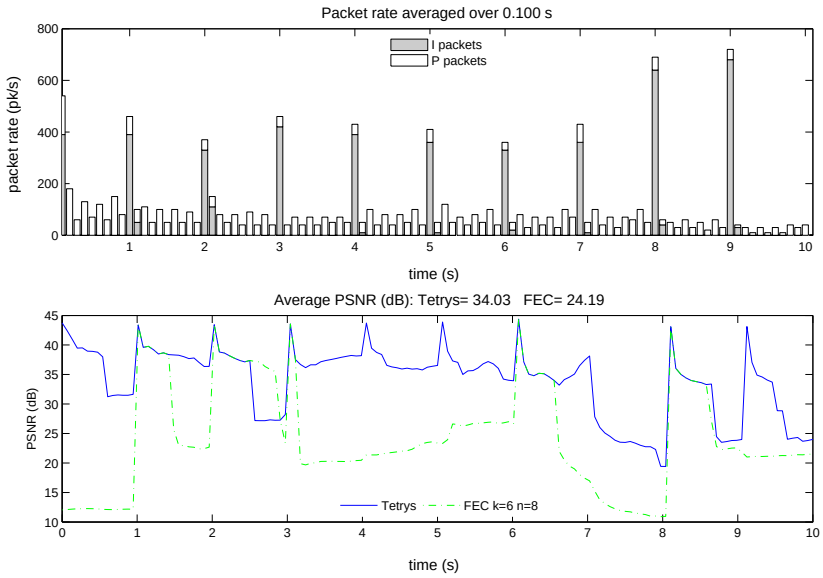
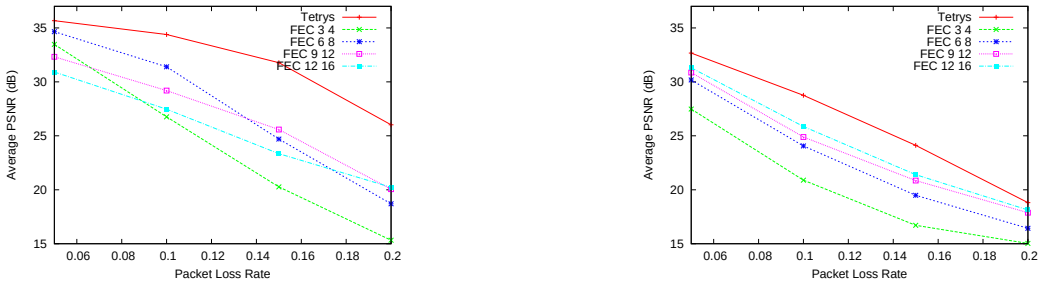


FIGURE 2.2 – PSNR instantané



a b

FIGURE 2.3 – PSNR moyen : a) canal de bernoulli b) rafale 2 c) rafale 3

munication (voir l'Equation 2.1).

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_{10} \end{bmatrix}^t \times \overset{\xrightarrow{\qquad\qquad\qquad\qquad Temps \qquad\qquad\qquad\qquad}}{\begin{bmatrix}
1 & 0 & \alpha_{1,11} & 0 & 0 & \alpha_{1,12} & 0 & 0 & \alpha_{1,13} & 0 & 0 & \alpha_{1,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & \alpha_{2,11} & 0 & 0 & \alpha_{2,12} & 0 & 0 & \alpha_{2,13} & 0 & 0 & \alpha_{2,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_{3,12} & 0 & 0 & \alpha_{3,13} & 0 & 0 & \alpha_{3,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_{4,12} & 0 & 0 & \alpha_{4,13} & 0 & 0 & \alpha_{4,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_{5,13} & 0 & 0 & \alpha_{5,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_{6,13} & 0 & 0 & \alpha_{6,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_{7,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_{8,14} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_{9,15} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_{10,15}
\end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ R_{(1,2)} \\ P_3 \\ P_4 \\ R_{(1,4)} \\ P_5 \\ P_6 \\ R_{(1,6)} \\ P_7 \\ P_8 \\ R_{(1,8)} \\ P_9 \\ P_10 \\ R_{(9,10)} \end{bmatrix}^t$$

$\alpha_{i,j}$ coefficients aléatoires

(2.1)

En faisant abstraction de l'échelle temporelle et en travaillant sur un bloc précis (notamment le bloc formé des paquets P1 à P8), nous pouvons par le biais de permutations reconstruire cette matrice pour lui donner la forme suivante :

$$\left[\begin{array}{c|cccc}
 & \alpha_{1,11} & \alpha_{1,12} & \alpha_{1,13} & \alpha_{1,14} \\
 & \alpha_{2,11} & \alpha_{2,12} & \alpha_{2,13} & \alpha_{2,14} \\
 & 0 & \alpha_{3,12} & \alpha_{3,13} & \alpha_{3,14} \\
 & 0 & \alpha_{4,12} & \alpha_{4,13} & \alpha_{4,14} \\
I_{10} & 0 & 0 & \alpha_{5,13} & \alpha_{5,14} \\
 & 0 & 0 & \alpha_{6,13} & \alpha_{6,14} \\
 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{7,14} \\
 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{8,14} \\
 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}\right] \tag{2.2}$$

$\alpha_{i,j}$ coefficients aléatoires

Cette matrice a la forme d'une matrice DA-UEP. Nous pouvons dire que pour une vue en bloc, Tetrys applique une protection incrémentale aux paquets perdus. L'importance des paquets sources est liée à leur date d'émission. Parmi les paquets perdus, les premiers envoyés sont les mieux protégés. Autrement dit, à l'échelle d'un bloc, Tetrys applique une protection inégale aux paquets perdus (et seulement à ceux-là !). Le critère d'importance des données est leur ordre dans la séquence d'émission.

Cette représentation nous permet aussi de voir facilement que Tetrys et DA-UEP utilisent la même base mathématique pour inverser les matrices et corriger les pertes (algorithme d'inversion Gauss-Jacobi).

Deuxième partie

Optimisation Multicouches

3

La protection inégale à l'aide des codes à effacement DA-UEP et de la modulation hiérarchique

Sommaire

3.1 Contexte **23**
3.2 Evaluations analytiques des mécanismes de fiabilité **24**
3.2.1 La source vidéo FGS 24
3.2.2 DA-UEP 24
3.2.3 La modulation hiérarchique 26
3.3 L'optimisation conjointe **26**
3.4 Résultats **27**

3.1 Contexte

Dans cette partie nous abordons le travail présenté dans la publication [Pradas *et al.*, 2009]. Notre volonté dans ce travail était d'optimiser un système de diffusion protocolaire de vidéo en couches (scalable). La particularité du système est de combiner deux mécanismes de protection inégale dans un contexte de diffusion vidéo pour un récepteur mobile via un canal de Rayleigh fixe.
La motivation d'équiper le système de diffusion de deux mécanismes de protection inégale est de permettre au mécanisme de fiabilité de s'adapter aux deux point fluctuant du système de diffusion : la source et le canal. En effet comme nous l'avions évoqué dans la section 1.1.2, la protection inégale est d'autant plus efficace que l'adaptation entre le mécanisme de protection et l'application source d'une part et le canal d'autre part est la mieux réalisée.

La vidéo en couches sied particulièrement bien à la diffusion sur des canaux mobiles dans lesquels la qualité du signal à la réception peut varier dans de grandes proportions. En effet, le principe de base de cette technologie est de générer un flux binaire vidéo de haute qualité qui intrinsèquement intègre des sous-flux de qualité inférieure. Ainsi les utilisateurs pourront décoder les sous-flux binaires disponibles en conformance aux conditions de réception dans lesquelles ils se trouvent. Certaines implémentations du principe de vidéo en couches représentent aussi un cas d'application opportun pour la protection inégale. C'est le cas des codeurs de vidéo scalable à

granularité fine (FGS[3]). Dans cette variante, les codeurs génèrent un flux composé d'une couche vidéo de base de qualité minimum et d'une ou plusieurs couches d'amélioration progressives. Les couches d'amélioration peuvent être exploitées au fur et à mesure de leurs réception à la condition de la réception au préalable des couches inférieures. Cette relation de dépendance, similaire par ailleurs à celle existant entre les trames d'une vidéo simple (voir 1.2.2), impose naturellement un ordre d'importance entre les couches vidéo successives. La couche de base en est évidemment la plus importante et s'en suivent successivement les autres. C'est aussi assez naturellement que nous avons opté pour DA-UEP comme premier mécanisme de protection inégale à proximité des données sources.

Pour optimiser l'exploitation des ressources canal, nous avons opté pour le mécanisme de modulation hiérarchique (MH). Il a été montré dans [Fernandez and Castro, 2009; Shamai and Steiner, 2003] l'efficacité et le gain obtenu par cette solution. Ce mécanisme permet la combinaison dans un flux binaire unique de deux signaux d'information distincts : un signal de base de débit inférieur et un signal complémentaire de débit supérieur. Ainsi selon la qualité de réception le récepteur peut obtenir la totalité ou une partie du signal émis. Ce mécanisme a l'inconvénient, dans sa forme standardisée, de n'offrir que deux niveaux de protection. Ce manque de finesse de granularité peut desservir les performances globales du système. C'est aussi pour cette raison que l'utilisation d'un mécanisme complémentaire est nécessaire.

En plus de ces mécanismes à protection inégale, le système étudié comprend aussi un mécanisme standard de protection égale dont la fonction dans notre système d'optimisation est de traduire le taux d'erreurs binaire fourni en sortie de la modulation hiérarchique en taux d'effacements disponible en entrée de DA-UEP. Cette étape se fait via un code à effacement dont les performances peuvent se calculer via l'équation 1.3. L'aspect général du système que nous avons optimisé est schématisé dans la figure 3.1.

3.2 Evaluations analytiques des mécanismes de fiabilité

Dans le but de construire un système d'optimisation global, nous avons présenté pour chaque mécanisme impliqué dans le système d'optimisation son évaluation analytique.

3.2.1 La source vidéo FGS

La qualité vidéo est la métrique finale d'évaluation. Elle représente la courbe d'utilité du système d'optimisation. Nous l'avons génériquement caractérisé par une approximation classique de la courbe distorsion-débit. Suivant le modèle communément admis, nous avons considéré une source vidéo dont la distorsion décroît exponentiellement avec le débit selon la forme de l'équation suivante :

$$D(R) = S_v \times exp(-\alpha R) \tag{3.1}$$

où $S_v = 100$ est l'entropie de la source et correspond à sa distorsion maximale. Le paramètre α permet de caractériser la vitesse de décroissance de la distorsion.

3.2.2 DA-UEP

Pour DA-UEP nous avons utilisé le cadre théorique développé dans la section 1.4. Néanmoins, cette fonction a été adaptée à deux niveaux :

3. Fine Granularity Scalabilty

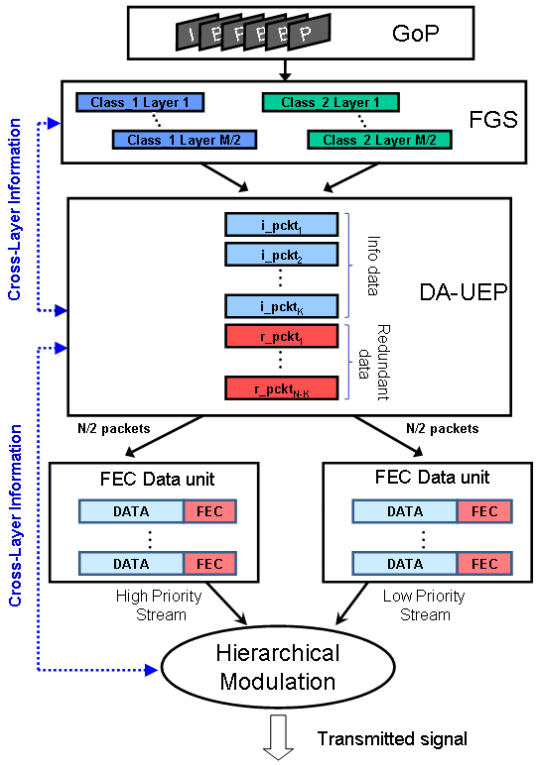


FIGURE 3.1 – Système de protection inégale

Taux de perte variant

La mécanisme de modulation hiérarchique produit à sa sortie un flux impacté par deux taux de perte différents, c'est-à-dire un taux de perte pour chaque classe de données. Afin de prendre en compte cette particularité, la fonction d'évaluation analytique de DA-UEP a été modifiée. Les données de chaque couche se voient affectées par le taux de perte de la couche de la modulation hiérarchique auxquelles ils correspondent.

Temps d'exécution

Les fonctions d'évaluation analytique f_i reposent sur des formules binomiales discrètes très gourmandes en temps de calcul (voir équation 1.3). Pour accélérer le temps de calcul des fonctions f_i,et ce en vue de les insérer dans un mécanisme d'optimisation itératif, nous avons utilisé l'approximation de la loi binomiale discrete par la loi normale continue dans les limites du domaine de validité de cette approximation (voir l'equation 3.2). Ainsi la formule de l'équation 1.3 peut être approximée par la formule suivante :

$$\begin{cases} \mathcal{B}(n,p) \approx \mathcal{N}(\mu = np, \sigma = \sqrt{np(1-p)}) \\ n \geq 30 \ \& \ np(1-p) \geq 5 \end{cases} \tag{3.2}$$

$$P(Gi) \approx \frac{1}{2}\left(1 + erf\left(\frac{t + 0.5 - n_i p}{\sqrt{2} n_i p(1-p)}\right)\right) \tag{3.3}$$

avec $n_i = k_i + r_i$. Ainsi nous utilisons les fonctions $\hat{f}_i \approx f_i$ quand c'est possible.

3.2.3 La modulation hiérarchique

Pour la modulation hiérarchique, l'implémentation retenue pour le standard DVB-SH a été choisi. Cette variante intègre dans une modulation hiérachique 16QAM/QPSK un flux de haute priorité protégé par une modulation QPSK et un flux de basse priorité protégé par une 16QAM. Le schéma de la figure 3.2 détaille le mappage des symboles.

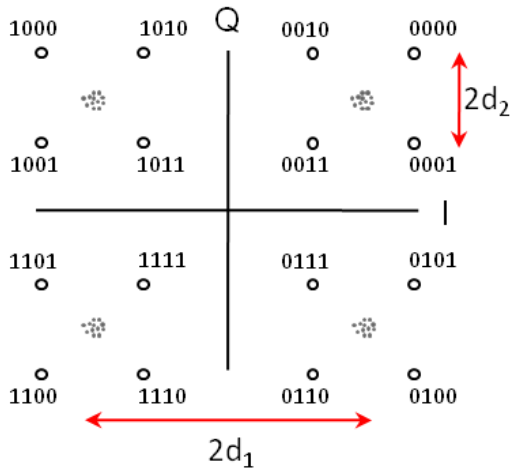


FIGURE 3.2 – Modulation hiérarchique QPSK/16QAM avec émulations par du bruit des symboles QPSK

Un paramètre important du mécanisme est le paramètre $\lambda = d_2/d_1$. Ce ratio permet de caractériser le partage de l'énergie disponible entre les deux sous-flux de données. Les performances en terme de taux d'erreurs bit (BER) se calculent par les formules des équations suivantes :

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{4}\left(U(1,-1) + U(1,1)\right) \tag{3.4}$$

$$BER_{16QAM} = \frac{1}{4}\left(2U(0,1) + U(2,-1) - U(2,1)\right) \tag{3.5}$$

avec :

$$U(a,b) = erfc\left(\frac{ad_1 + bd_2}{\sqrt{N_o}}\right) \tag{3.6}$$

3.3 L'optimisation conjointe

La présence des mécanismes de protection inégale dans le système de communication implique l'utilisation d'une procédure d'optimisation pour répartir au mieux la protection allouée à chaque classe de données de chaque mécanisme. Le système d'optimisation que nous avons mis en place dans notre cas est formalisé dans l'équation 3.8. L'intégration des formules précédentes dans une formule globale a donné la fonction objectif de notre système d'optimisation (voir l'équation 3.7). Nous considérons le nombre et la largeur des couches $\vec{k}$ fixes et connus. La redondance globale

de DA-UEP est fixée à r_{max}. L'optimisation se fait sur le vecteur $\vec{x} = \{\vec{r}, \lambda\}$.

$$D_t = \sum_{i=1}^{M} \hat{f}_i(\vec{k_i}, \vec{r_i}, P^{HP}(\lambda), P^{BP}(\lambda)) \times D(R_i) \tag{3.7}$$

$$\begin{cases} \arg\min_{\vec{r},\lambda} \quad D_t(\vec{r}, \lambda) \\ t.q. \quad \sum_{i=1}^{M} r_i = r_{max}, \ 0 \leq \lambda \leq 0.5 \end{cases} \tag{3.8}$$

3.4 Résultats

Les résultats de l'optimisation conjointe ont clairement montré l'avantage de cette technique par rapport à l'utilisation unique de l'un ou l'autre des mécanismes de protection inégale. Nous avons pu constater sur la figure 3.3 un gain allant jusqu'à 40% sur la courbe de distorsion. La figure 3.4 illustre l'évolution des paramètres de DA-UEP et de la modulation hiérarchique au cours des simulations.

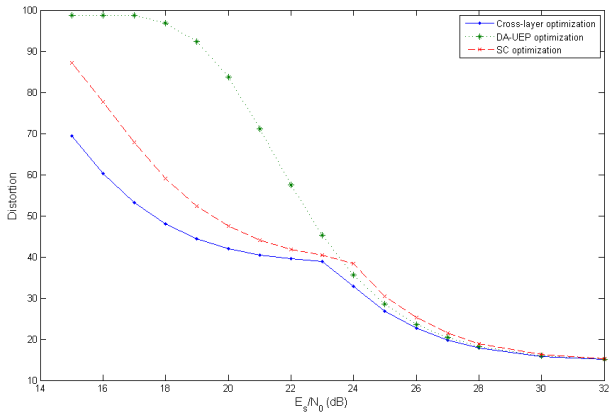


FIGURE 3.3 – Comparaison des distorsions vidéo des optimisations conjointe et non-conjointe.

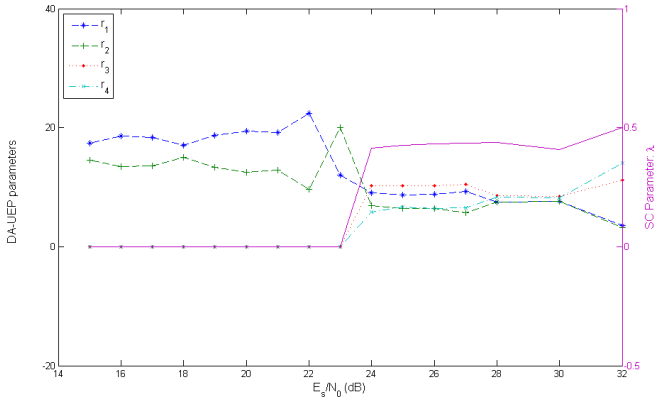


FIGURE 3.4 – Évolution de la redondance allouée r_i aux couches de DA-UEP (axe gauche) et du paramètre λ de la modulation hiérarchique (axe droit)

4

Évaluation de mécanismes de fiabilité multicouche pour la diffusion satellite TV

Sommaire

4.1 Introduction et contexte **29**
4.2 Le canal Satellite-mobile LMS **30**
4.3 La pile protocolaire **31**
4.3.1 Couche application : H.264 31
4.3.2 Les couches intermédiaires : RTP / UDP / IP ou ROHC 32
4.3.3 MPE et MPE-FEC 32
4.3.4 La couche physique 33
4.4 Amélioration de la robustesse **33**
4.4.1 Les codes à effacements sur les couches intermédiaires 33
4.4.2 La dispersion sur la couche physique 33
4.5 Simulations **34**
4.5.1 Scénario 1 : scénario de référence 34
4.5.2 Scénario 2 : l'étalement sur la couche physique 34
4.5.3 Scénario 3 : utilisation de codes à effacements sur la couche application 36
4.6 Conclusion **36**

4.1 Introduction et contexte

Dans cette partie nous abordons le travail de la publication [Bouabdallah *et al.*, 2007]. Cette publication est essentiellement le fruit d'une étude que nous avons menée avec le laboratoire LSS de Supélec pour le compte du centre national d'études spatiales (CNES). Dans cette collaboration, nous avons mené deux études successives qui se sont étalées sur 18 mois à partir de septembre 2005. La partie que nous avons publiée et que nous développerons dans la suite de ce chapitre correspond à la première étude. Pour des raisons de confidentialité les résultats de la seconde étude n'ont pas pu être soumis à publication. En plus d'être une source de financement, ces deux études ont aussi été aussi une excellente opportunité pour accomplir, au début de notre thèse, une recherche bibliographie assez large sur l'ensemble des mécanismes de fiabilité existants pour les différentes couches protocolaires d'un système de communication.

Le contexte général de l'étude était la diffusion satellite de contenus TV vers des récepteurs mobiles ; la mobilité des récepteurs étant la principale valeur ajoutée de ce système et l'origine de la plupart des problématique liées à ce contexte. Par le passé, la problématique liée à la diffusion satellite vers des récepteurs immobiles situés dans la ligne de vue du satellite a été solutionnée et standardisée dans différentes normes telles que les normes du consortium Digital Video Broadcasting (DVB) en Europe. Par contre, la présence de récepteurs mobiles dans le système de diffusion représentaient, au moment de la conduite de l'étude, un challenge supplémentaire. Il est à noter que différents organismes de standardisation développaient parallèlement, pour ce contexte, leurs propres solutions : MBMS pour le 3GPP, une variante de DVB-H [4] pour le DVB et la S-DMB (Satellite Digital Multimedia Broadcasting). Bien qu'aucune de ces propositions n'offrait alors de solution tranchée, S-DMB correspondait le mieux au contexte ciblé (diffusion satellite vers mobiles sans canal de retour) et présentait un coût de déploiement modéré par rapport aux autres technologies. Comme preuve de sa viabilité, cette technologie était déjà opérationnelle en Corée-du-Sud.
Les problématiques liées aux canaux de transmission sont similaires à celles rencontrées dans un contexte de transmission sans fil. Le canal dépend de l'emplacement de réception et varie donc en fonction du temps quand le récepteur se déplace. Néanmoins, la combinaison de phénomènes tels que les multi-trajets et le shadowing (non visibilité direct du satellite) crée des dynamiques de signal très importantes sur des distances très courtes qui devaient être prises en comptes. D'autre problématiques telle que le temps de zapping (temps de basculement entre services) devaient aussi être considérées.

Les solutions existantes pour le contexte S-DMB s'appuyaient sur des solutions génériques inspirées de solutions éprouvées pour des contextes similaires (DVB-H). Ces solutions pouvaient faire appel, entre autres, à l'utilisation d'entrelaceurs et de codes correcteurs d'erreurs sur la couche physique, de codes à effacements sur les couches intermédiaires et application, ainsi que des mécanismes de masquage d'erreurs sur la couche application. Notre but était de présenter les solutions efficaces pour le contexte SDMB en étudiant, dans un premier temps, la pertinence et l'efficacité des mécanismes de fiabilité proposés dans ce nouveau contexte et dans un second temps leur optimisation conjointe dans ce contexte.

Dans ce qui suit nous allons expliciter plus en détail le système de diffusion évalué et identifier les différents mécanismes susceptibles d'améliorer les performance globales du système.

4.2 Le canal Satellite-mobile LMS

La principale nouveauté de ce canal est le fait qu'il prenne en compte à la fois le mouvement du satellite et du récepteur mobile. La partie propagation du canal est un modèle à trois états (ligne de vue [5]/shadowing/Bloquage) basé sur une chaîne de Markov du premier ordre [Fontán *et al.*, 2002]. Les différents états représentent les variations très lentes du signal direct et donc du canal. Au sein de chaque état les variations lentes et rapide du signal reçu (multi-trajets et le signal direct) sont modélisées par une distribution de Loo [Loo, 1985] dont les paramètres dépendent de l'état de la chaîne de Markov considéré. La distribution de Loo est très générique et peut dans ses cas extrêmes représenter aussi bien une distribution de Rayleigh, de Rice qu'une distribution de Gauss. La distance de corrélation, qui représente un indicateur sur la force du shadowing dans un état de la chaîne de Markov est de l'ordre de 1.5 m pour le canal ITS (Intermediate Tree Shadowed).

4. ce qui allait devenir par la suite la norme DVB-SH (Satellite to Handheld)
5. line of sight(LOS)

Pratiquement, le canal simulé est basé sur des séries de propagation fournies par le CNES permettant d'obtenir un niveau de bruit variable au cours d'un déplacement. Ces séries indiquent les amplitudes de l'affaiblissement de propagation sur des segments de 0.004545 m le long d'un parcours d'une longueur totale d'un kilomètre. Le canal est ainsi découpé en 220000 segments et son allure peut être visualisée sur la figure 4.1.

Pour chaque valeur α_{dB}, nous avons calculé le rapport porteuse-sur-bruit C/N_{dB} avec la formule suivante :

$$C/N = Marge\_Shadowing + C/N\_requis - \alpha_{dB}$$

La marge de shadowing a été fixée à $10dB$ et le C/N_{requis} pour un codage canal utilisant les turbocodes est de l'ordre de $0dB$. La densité monolatérale du bruit N_0 est ensuite obtenue en utilisant la formule :

$$C/N = E_s/N_0$$

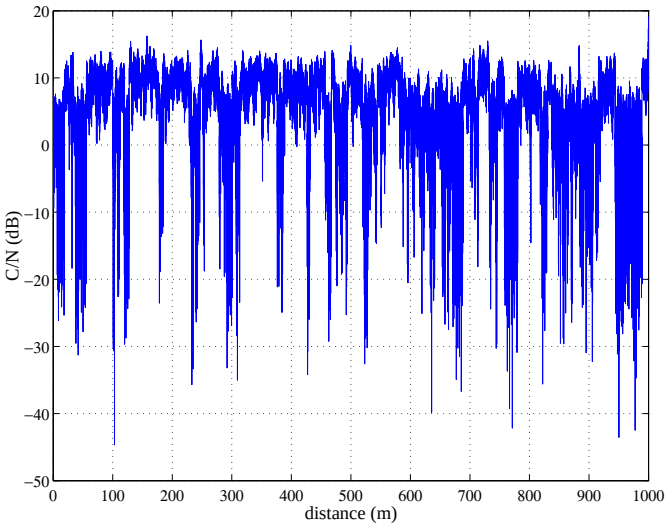


FIGURE 4.1 – évolution sur 1 km du rapport signal à bruit du canal ITS

4.3 La pile protocolaire

La pile de protocole de base qui a été simulée est inspirée du DVB-H. Elle est représentée sur la figure 4.2. Nous allons dans ce qui suit brièvement détailler les différentes couches de cette pile.

4.3.1 Couche application : H.264

Nous avons considéré le codeur vidéo H.264[ITU-T and ISO/IEC JTC 1, 2003]. Ce codeur est composé de deux couches : la couche de codage vidéo (VCL) en charge de la compression vidéo et la couche d'abstraction du réseau (NAL)en charge de l'interfaçage entre le codeur vidéo et les couches protocolaires adjacentes. Cette dernière couche produit des unités de vidéo NALU

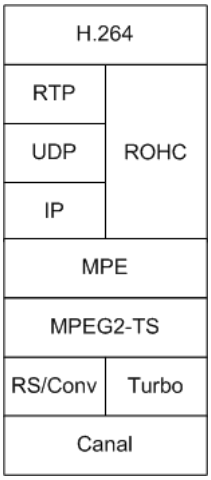


FIGURE 4.2 – Pile de protocoles de base

qui peuvent être concaténées pour former un train binaire adapté à une encapsulation dans des paquets du protocole de transport RTP.

4.3.2 Les couches intermédiaires : RTP / UDP / IP ou ROHC

Ces 3 couches sont traitées dans la même partie car nous n'avons pas réalisé d'opérations de segmentation/ré-assemblage à ces niveaux. Par conséquent, coté émetteur, les unités de données obtenues à la sortie de la couche IP sont celles en entrée de la couche RTP auxquelles ont été rajoutés les entêtes de ces 3 protocoles. La somme des tailles des entêtes des protocoles RTP/UDP/IP est au minimum de 40 octets si IPv4 est utilisé et de 60 octets si IPv6 est utilisé. Si l'on considère que les tailles des paquets RTP générés par le codeur H.264 sont entre 100 et 400 octets, on s'aperçoit que la proportion d'entête/charge utile peut être réellement importante (quasiment 1/2 dans certains cas).

La redondance dans ces entêtes étant considérable, la solution consistant à utiliser un mécanisme de compression d'entête semble tout à fait naturelle. ROHC [Bormann and al., 2001] semble le plus efficace dans notre contexte car il intègre par construction les protocoles RTP, UDP et IP.

4.3.3 MPE et MPE-FEC

Le protocole MPE défini dans [ETSI,] est utilisé pour transporter de l'IP sur DVB-H. Il peut être accompagné de l'utilisation de MPE-FEC, aussi défini dans [ETSI,]. Son but est d'adapter les paquets IP de taille variable au paquets MPEG2-TS de longueur fixe.

L'entête de MPE a une longueur de 12 octets, dont 12 bits représentant la longueur du paquet et 48 bits représentant l'adresse MAC. Un CRC de 4 octets, protégeant l'ensemble du paquet, est rajouté en fin de paquet. Si MPE-FEC est utilisé, un entête de 8 octets est rajouté ainsi qu'un autre CRC de 4 octets. Notons que l'encapsulation MPE-FEC est réalisée avant celle MPE, coté émetteur.

4.3.4 La couche physique

La couche physique comprend la modulation, le codage correcteur erreurs et éventuellement un entrelaceur. Nous avons supposé une modulation parfaite d'un signal TDM dont nous pensions qu'il peut être représentatif aussi d'un signal OFDM. En effet, un symbole OFDM dure quelque centaines de microsecondes pendant lesquels le canal est quasi-stable. Un turbo-code de rendement 1/3 a été choisi. Ce codage traite des blocs de longueur $188 \times 8 = 1504$ bits correspondant à la taille d'un paquet MPEG2-TS provenant de la couche supérieure. La principale fonctionnalité de cette couche est le filtrage des données et la suppression des paquets non identifiés.

Le turbo-code utilisé est un dérivé de celui du 3GPP pour W-CDMA[ETSI, 2005]. Il est constitué de deux codes récursifs parallèles séparés par un entrelaceur bit de longueur $188 \times 8 = 1504$. Ces codes ont une longueur de contrainte de 4 et des polynômes générateurs $g_0 = 015$ et $g_1 = 017$. Ils reproduisent ainsi le turbo-code utilisé sur UMTS. Les bits sont ensuite groupés par paire pour être transformés en symboles QPSK.

4.4 Amélioration de la robustesse

En plus de la couche application qui peut être renforcée en utilisant les mécanismes de masquage d'erreurs et en optimisant la taille des NALU sur le réseau, les autres couches protocolaires peuvent voir leur robustesse améliorée par les solutions présentées ci-dessous.

4.4.1 Les codes à effacements sur les couches intermédiaires

Les codes à effacement peuvent être utilisés sur les différentes couches intermédiaires. Néanmoins, le mécanisme MPE-FEC de la couche MPE se voit imposer une limite de longueur de code de 255 paquets. Cette limite amoindrit les performances du code et cette solution n'a pas été retenue. Des codes à effacement MDS ont été par contre intégrés entre la couche application et la couche ROHC pour relaxer la contrainte de longueur de la couche MPE. Cette longueur est traduite en temps T_{block} par le biais du débit d'émission et inversement. Le paramètre T_{block} a une influence directe aussi bien sur la robustesse du code que sur le temps de zapping puisqu'il faut attendre entre T_{block} et $2T_{block}$ pour pouvoir décoder un mot du code et passer ces données à l'utilisateur.

4.4.2 La dispersion sur la couche physique

Pour combattre la forte corrélation spatiale du canal satellite mobile, une solution classique est l'étalement des données transmises. La principe de base d'un tel mécanisme est de fractionner les longs bursts d'erreurs observés sur le canal de transmission pour les présenter en petits bursts d'erreurs corrigibles par les codes correcteurs d'erreurs en aval. Pratiquement, deux solutions se présentent pour réaliser l'étalement : la première se fait naturellement lors du déplacement du récepteur mobile et est directement proportionnelle à la vitesse de déplacement. La deuxième est réalisable à travers l'utilisation de mécanismes d'entrelacement caractérisés par une certaine profondeur d'entrelacement. Il peut être observé que deux systèmes d'étalement sont équivalents si le produit $vitesse \times profondeur d'entrelacement$ est égale pour les deux (voir la figure 4.3).

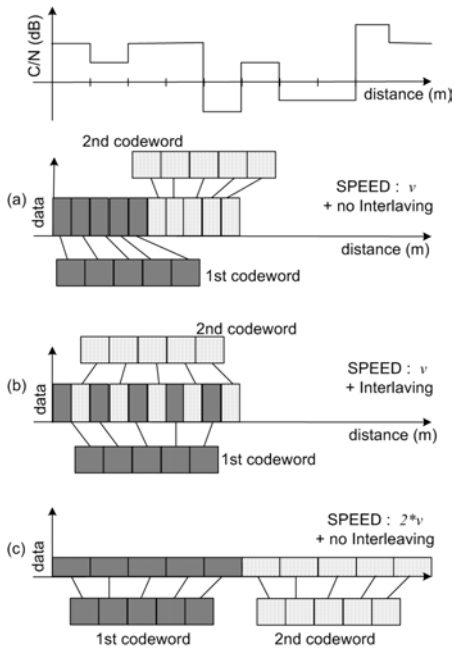


FIGURE 4.3 – Relation entre vitesse de déplacement et dispersion

4.5 Simulations

Le pile protocolaire présentée à la section 4.3 a été implémentée dans un simulateur unique et différents scénarii ont été comparés. Trois vitesses de déplacements ont été prises en compte, $v = 1.5$ m/s pour le représenter le cas du piéton $v = 15$ m/s pour représenter le déplacement d'un véhicule en zone urbaine et $v = 31$ m/s pour les déplacements sur les voies rapides. La vidéo a été codée a des débits allant de 100 kbps à 250 Kbps en combinaison avec différents codes à effacements selon le scénario choisi.

4.5.1 Scénario 1 : scénario de référence

Ce scénario correspond à l'implémentation directe de la pile protocolaire de la section 4.3. Aucune amélioration de robustesse n'a été apportée et la vidéo est codée à 250 kbps. Les performances en PSNR illustrées sur la figure 4.4 montrent la fragilité d'un tel système et la nécessité d'augmenter sa robustesse aux pertes en rafale.

4.5.2 Scénario 2 : l'étalement sur la couche physique

Dans ce scénario la robustesse a été renforcée par rapport au scénario de référence en étalant un mot du turbocode sur plusieurs slots de temps. Le but recherché est de permettre aux mécanisme du turbocode de bénéficier de toute la diversité du canal - spécialement les zones de bonne réception.

En plus de l'étalement naturel provoqué par la vitesse de déplacement du récepteur, nous avons ajouté un entrelaceur ligne colonne de différentes profondeurs temporelles T_S. Le produit $Ts \times v$ étant la principale caractéristique d'un système d'étalement, nous avons tracé son influence sur la qualité de la réception vidéo (mesurée en PSNR) sur la figure 4.5 Les résultats montrent

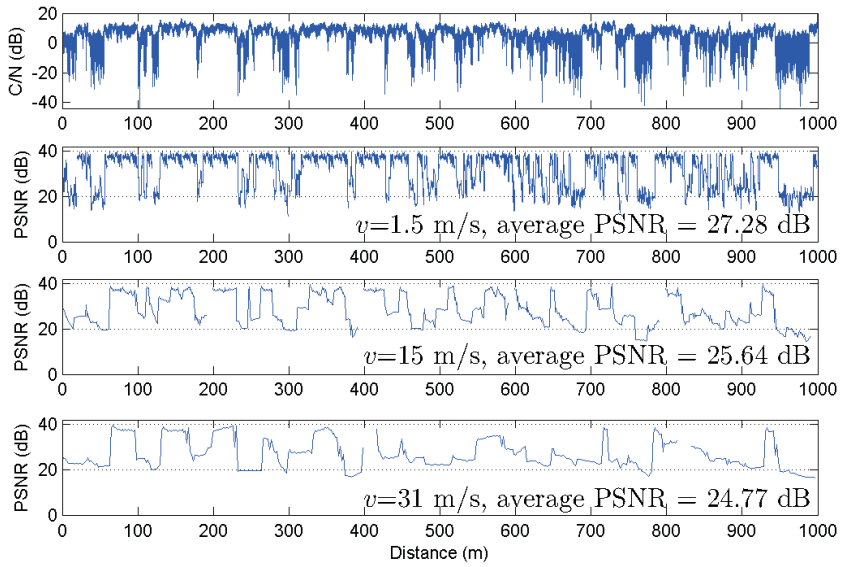


FIGURE 4.4 – Scenario 1, Evolution trame/trame du PSNR

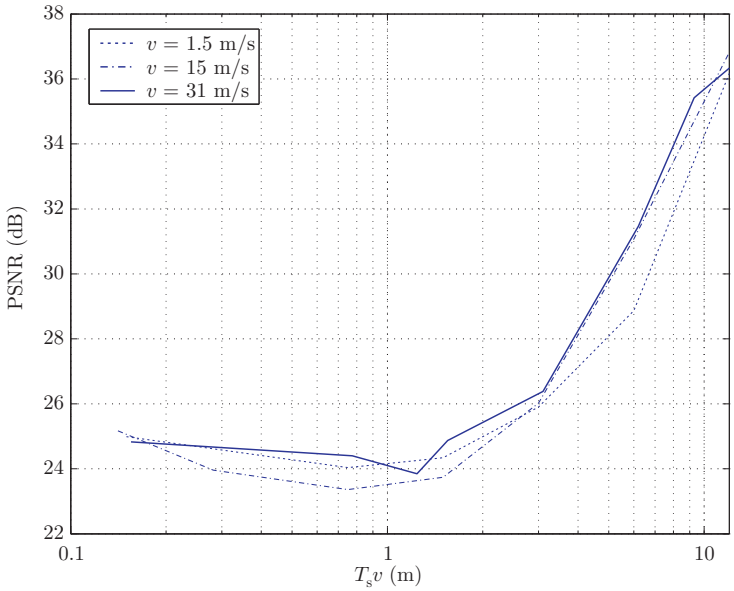


FIGURE 4.5 – Influence du produit $T_s v$ sur le PSNR moyen de la vidéo reconstruite (R=250 kbps)

un accroissement des performances rapide après dépassement d'un certain seuil d'étalements pour arriver à une vidéo quasi-parfaite pour $Ts \times v \geq 9$ m et ce, pour toutes les vitesses de déplacement. Néanmoins, pour le cas piéton où $v = 1.5$ m/s, l'inconvénient de cette méthode provient de ses performances en terme de temps de zapping. Sachant que le temps de zapping maximal est égale à $2T_s$, il faudrait que $T_s \geq 6$ s pour maintenir une bonne qualité de vidéo.

4.5.3 Scénario 3 : utilisation de codes à effacements sur la couche application

Dans ce scénario, un code MDS de rendement 3/5 a été utilisé en dessous de la couche application. Cette dernière intègre un codeur vidéo de débit 150 *kbps* afin que le débit à la couche physique soit toujours de 250 kbps. Les performances des codes de longueur $T_{block} = 1$, 2 et 3 secondes pour les différentes vitesses sont présentées dans le tableau 4.1.

T_{block} Speed	0 s sans FEC	1 s	2 s	3 s
1.5 m/s	27.28 (0.12)	28.80 (0.07)	29.16 (0.07)	29.39 (0.07)
15 m/s	25.64 (0.17)	27.84 (0.10)	30.08 (0.06)	32.68 (0.02)
31 m/s	24.77 (0.18)	29.41 (0.09)	30.51 (0.05)	31.73 (0.04)

TABLE 4.1 – PSNR Moyen (PLR) pour $v = 1.5$, $v = 15$ and $v = 31$ m/s et pour $T_{\text{block}} = 0$ (sans FEC), 1, 2 et 3 secondes.

La figure 4.6 montre que l'utilisation de codes à effacements améliore nettement les performances du système. Pour les vitesses 15 et 31 m/s, l'apport est clair et d'autant plus grand que T_{bloc} augmente. Pour la vitesse 1.5 m/s l'amélioration est moins importante car à cette vitesse la longueur des bursts est supérieure à la capacité de correction des codes pour les différents T_{bloc}. Les performances en terme de temps de zapping peuvent ne pas être suffisantes. Les valeurs maximales varient entre 2 et 6 secondes.

En plus de ces précédents résultats, d'autres évaluations ont été réalisées afin d'optimiser le partage de la bande passante entre la redondance des codes à effacements des couches intermédiaires et le débit de la vidéo à la couche application. Une augmentation de la redondance implique un système plus robuste, mais impose aussi une réduction du débit vidéo et donc de la qualité nominale de la vidéo. Nos simulations ont été réalisées avec des codes à effacements de rendement 2/3, 3/5 et 4/5. Pour chaque rendement le débit de la vidéo a été adapté en conséquence pour maintenir un débit stable de 250 kbps à l'entrée de la couche physique. Le tableau 4.2 résume les résultats pour la vitesse $v = 15$ m/s. Pour les petites valeurs de T_{bloc}, l'augmentation de la redondance améliore la qualité perçue. Pour les grandes valeurs de T_{bloc}, il est préférable d'utiliser une vidéo de meilleure qualité nominale et moins de redondance pour le code à effacements.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la problématique de la diffusion de contenus vidéo sur un lien satellite-mobiles. A plus d'un égard, ce contexte présente de véritables difficultés pour assurer une diffusion fiable de la vidéo. Le solution classique héritée des contextes similaires tels que le DVB-H ont montré leurs limites pour contrecarrer les longues absences de signal du canal mobile-satellite. L'apport de mécanismes complémentaires de fiabilité tel que les entrelaceurs couches physique et les codes à effacements aux couches intermédiaires est indispensable même

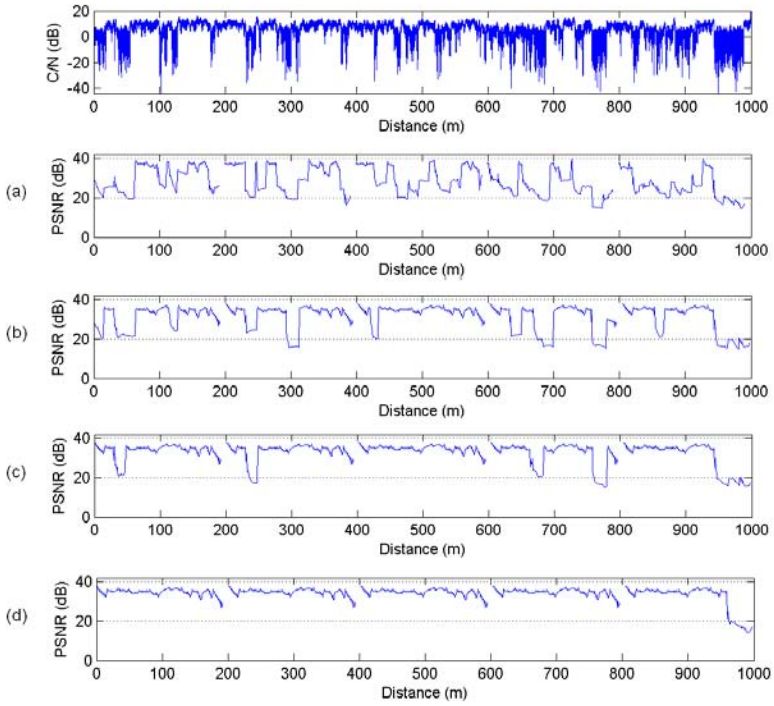


FIGURE 4.6 – PSNR pour $v = 15$ m/s et pour (a) $T_{\text{block}} = 0$ s (sans FEC, mais avec un débit vidéo de 250 kbps), (b) $T_{\text{block}} = 1$ s, (c) $T_{\text{block}} = 2$ s and (d) $T_{\text{block}} = 3$ s,

	T_{block} (s)				
R	0	1	2	3	Noise-free
250 kbps	24.5				36.8
200 kbps	24.6	26.2 RS(261, 157)	26.5 RS(521, 313)	27.5 RS(782, 469)	35.8
150 kbps	23.9	28.2 RS(196, 118)	30.1 RS(391, 235)	30.8 RS(586, 252)	34.4
100 kbps	23.1	28.4 RS(131, 79)	30.1 RS(261, 157)	30.1 RS(391, 233)	32.3

TABLE 4.2 – PSNR moyen (dB) pour $v = 15$ m/s et pour différentes combinaisons de codage de taux R et T_{block}.

s'il est fait au prix d'une augmentation conséquente du temps de zapping. La solution à base d'entrelaceurs sur la couche physique a obtenu les meilleurs résultats. Néanmoins, la nécessité de stocker des quantité de plus en plus grande de données au niveau de la couche physique peut rendre son coût d'implémentation prohibitif, les récepteurs mobiles ayant des ressource mémoires limitées. Cette solution doit être comparée à celle basée sur les codes à effacements aux couches intermédiaires qui obtient des performances légèrement inférieures, mais qui nécessite moins de ressources mémoire. Ces deux solutions sont notamment celles retenues par la norme DVB-SH apparue postérieurement à cette étude.

Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, nous avons mené un ensemble de travaux de recherche autour du thème de la fiabilisation du transport de la vidéo. Nous avons ainsi proposé des solutions dans différents champs d'application afférents à ce thème. Dans le contexte des communications vidéo unidirectionnelles unicast et/ou multicast (streaming vidéo), nous avons développé un mécanisme de protection inégale par codes à effacements proactifs (DA-UEP). Ce code a montré des gains significatifs en terme de PSNR en comparaison avec les codes à protection égale classique et du mécanisme de protection inégale de référence (PET). Dans le contexte des communications vidéo bidirectionnelles, nous avons évalué les performances du mécanisme de codage à la volée : Tetrys. Dans un contexte dont les contraintes temporelles sont très fortes, Tetrys a montré des performances de l'ordre de celle obtenues pour DA-UEP dans le contexte du streaming. Néanmoins, l'utilisation de Tetrys dans un contexte de streaming (sans canal de retour) n'est pas souhaitable (problème lié à la taille des buffers d'émission) bien que rien ne l'empêche théoriquement. Dans un second volet de la thèse, nous nous sommes intéressés à l'optimisation de système de diffusion de contenus vidéo. Nous avons d'abord travaillé sur un systèmes de diffusion de vidéo en couche combinant deux mécanismes de protection inégale insérés aux deux points variants du système : le canal et la source. La répartition de la protection dans ces deux points a fait l'objet d'une optimisation conjointe. Les performances du système conjointement optimisé ont été nettement meilleures que celles obtenues par l'optimisation séparée de chaque mécanisme de protection inégale pris indépendamment. Le dernier contexte abordé est celui de la diffusion satellite de contenu TV vers des récepteurs mobiles. Dans ce contexte, nous avons mené des campagnes de simulations pour identifier les meilleures solutions. Les solutions classiques inspirées des contexte similaires (Diffusion terrestre DVB-H) n'ont pas donné satisfaction. L'utilisation d'entrelaceurs à la couche physique ainsi que l'introduction de codes à effacements au niveau des couches intermédiaires ont tout deux apporté un gain de performance significatif et proportionnel au temps de buffferisation que l'on permet dans le système. Néanmoins les solutions à base de codes à effacements ont été par la suite retenues dans la norme DVB-SH pour leur faible occupation des espace mémoire ; ressource critique dans les appareils de réception mobile. Pour l'ensemble de ces travaux, un ensemble de points devront être étudiés en vue d'obtenir de possibles améliorations :

- Amélioration du critère de classement des trames dans UEP : jusqu'alors le critère choisi pour décider de l'importance des données est la "précédence temporelle ". Dans un travail futur il serait intéressant de tester d'autres critères telle que par exemple l'information mutuelle entre trames.
- Théorie de l'information et protection inégale : en se munissant des outils de la théorie de l'information, il serait utile de mettre en evidence les performances limites de cette technique pour la source cible (la vidéo par exemple).
- Optimisation de DA-UEP pour la vidéo scalable : D'un point de vue pratique il serait intéressant de relaxer les contraintes sur le nombre de couches vidéo, leur largeurs , ainsi que la quantité de redondance totale allouée. Ceci reviendrait pour un budget de transmission

totale à trouver la meilleure répartition entre redondance et débit de la source.

- Pour Tetrys : estimer ce qu'apporterait l'intégration d'un mécanisme UEP natif dans Tetrys. Bien que Tetrys atteigne déjà les performances d'un mécanisme UEP , le renforcement de Tetrys par une connaissance des données qu'il manipule serait une piste à étudier.

Publications

Revues

1. P. Tournoux, E. Lochin, J. Lacan, A. Bouabdallah, and V. Roca. On-the-fly coding for time-constrained applications. *En cours de révison mineur après soumission à IEEE Transactions on Multimedia.*
2. A. Bouabdallah, M. Kieffer, J. Lacan, G. Sabeva, P. Duhamel, G. Scot, and C. Bazile. Evaluation of Cross Layer Reliability Mechanisms for Satellite Digital Multimedia Broadcasting. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 53(1) :391–404, March 2007.
3. A. Bouabdallah and J. Lacan. Dependency-aware unequal erasure protection codes. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 7 :27–33, 2006.

Conférences Internationales

4. D. Pradas, A. Bouabdallah, J. Lacan, M. Bousquet, and M. Vasquez. Cross-layer. *Globecom, Hawaï*, October 2009.
5. P.U Tournoux, A. Bouabdallah, J. Lacan, and E. Lochin. On-the-fly coding for real time applications. *ACM Multimedia, Bejing*, October 2009.
6. T. Perrenou, A. Bouabdallah, A. Brunstrom, J Garcia, and P. Hurtig. Ip-level satellite link emulation with kaunet. *IWSSC workshop, Sienna*, September 2009.
7. A. Bouabdallah and J. Lacan. Dependency-aware unequal erasure protection codes. *Packet Video Workshop, Hangzhou, China*, Vol21, May 2006.
8. A. Bouabdallah, J. Lacan, and M. Diaz. Adaptive dependency-aware unequal erasure protection codes. *JSSC workshop, Soëlden 2006*, March 2006.

Travaux de standardisation

9. V. Roca, M. Cunche, J. Lacan, A. Bouabdallah, and K. Matsuzono. Simple Reed-Solomon Forward Error Correction (FEC) Scheme for FECFRAME. Internet-Draft draft-roca-fecframe-simple-rs-01, Internet Engineering Task Force, October 2010. Work in progress.

Conférence francophone

10. P.U Tournoux, A. Bouabdallah, J. Lacan, and E. Lochin. Codage à la volée pour les application temps réels. *CFIP , la réunion, france*, October 2009.

Bibliographie

[Albanese *et al.*, 1994] Andres Albanese, Johannes Blomer, Jeff Edmonds, Michael Luby, and Madhu Sudan. Priority Encoding Transmission. In *35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science-FOCS*, pages 604–612, 1994.

[Albanese *et al.*, 1996] A. Albanese, J. Blomer, J. Edmonds, M. Luby, and M. Sudan. Priority encoding transmission. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 42(6) :1737–1744, 1996.

[Bormann and al., 2001] C. Bormann and al. *RObust Header Compression (ROHC) :Framework and four profiles : RTP, UDP, ESP, and uncompressed*, July 2001. Request for Comments : 3095, Standards Track.

[Bouabdallah and Lacan, 2006a] A. Bouabdallah and J. Lacan. Dependency-aware unequal erasure protection codes. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 7 :27–33, 2006.

[Bouabdallah and Lacan, 2006b] A. Bouabdallah and J. Lacan. Dependency-aware unequal erasure protection codes. *Packet Video Workshop, Hangzhou, China*, Vol21, May 2006.

[Bouabdallah and Lacan, 2006c] A. Bouabdallah and J. Lacan. Dependency-aware unequal erasure protection codes. *Newcom Workshop, Toulouse, France*, Vol21, May 2006.

[Bouabdallah *et al.*, 2006] A. Bouabdallah, J. Lacan, and M. Diaz. Adaptive dependency-aware unequal erasure protection codes. *JSSC workshop, Soëlden 2006*, March 2006.

[Bouabdallah *et al.*, 2007] A. Bouabdallah, M. Kieffer, J. Lacan, G. Sabeva, P. Duhamel, G. Scot, and C. Bazile. Evaluation of Cross Layer Reliability Mechanisms for Satellite Digital Multimedia Broadcasting. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 53(1) :391–404, March 2007.

[ETSI,] ETSI. Digital video broadcasting (dvb) ; dvb specification for data broadcasting. EN 301 192.

[ETSI, 2005] ETSI. Universal mobile telecommunications system (UMTS) ; multiplexing and channel coding (FDD) (3GPP TS 25.212 version 6.7.0 release 6). Technical report, ETSI TS 125 212 V6.7.0, dec. 2005.

[Fernandez and Castro, 2009] D.P. Fernandez and V. Castro. Multicast Transmission Optimization over Hybrid DVB-SH Systems. In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pages 1–5. IEEE, 2009.

[Fontán *et al.*, 2002] F.P. Fontán, M. Vazquez-Castro, C.E. Cabado, J.P. Garcia, and E. Kubista. Statistical modeling of the LMS channel. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 50(6) :1549–1567, 2002.

[Hagenauer and Hagenaucr, 1989] J. Hagenauer and J. Hagenaucr. Unequal Error Protection (UEP) for Statistically Time-Varying Channels. In *Proceedings ITG-Conference Stochastic Models and Methods in Information Technology*, pages 253–262. Citeseer, 1989.

[Heinzelman *et al.*, 2002] W.R. Heinzelman, M. Budagavi, and R. Talluri. Unequal error protection of MPEG-4 compressed video. In *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on*, volume 2, pages 530–534. IEEE, 2002.

[Hellge *et al.*, 2008a] C. Hellge, T. Schierl, and T. Wiegand. Mobile TV using scalable video coding and layer-aware forward error correction. In *Multimedia and Expo, 2008 IEEE International Conference on*, pages 1177–1180. IEEE, 2008.

[Hellge *et al.*, 2008b] C. Hellge, T. Schierl, and T. Wiegand. Receiver driven layered multicast with layer-aware forward error correction. In *ICIP*, pages 2304–2307, 2008.

[Hellge *et al.*, 2008c] Cornelius Hellge, Thomas Schierl, and Thomas Wiegand. Multidimensional layered forward error correction using rateless codes. In *ICC*, pages 480–484. IEEE, 2008.

[ITU-T and ISO/IEC JTC 1, 2003] ITU-T and ISO/IEC JTC 1. Advanced video coding for generic audiovisual services. Technical report, ITU-T Rec. H.264, and ISO/IEC 14496-10 AVC, nov. 2003.

[Korhonen and Frossard, 2009] J. Korhonen and P. Frossard. Flexible forward error correction codes with application to partial media data recovery. *Signal Processing :Image Communication*, 24(3) :229–242, mar 2009.

[Lacan and Lochin, 2008] J. Lacan and E. Lochin. Rethinking reliability for long-delay networks. In *Satellite and Space Communications, 2008. IWSSC 2008. IEEE International Workshop on*, pages 90–94. IEEE, 2008.

[Loo, 1985] C. Loo. A statistical model for a land mobile satellite link. *IEEE transactions on vehicular technology*, 34(3) :122–127, 1985.

[Perrenou *et al.*, 2009] T. Perrenou, A. Bouabdallah, A. Brunstrom, J Garcia, and P. Hurtig. Ip-level satellite link emulation with kaunet. *IWSSC workshop, Sienna*, September 2009.

[Pradas *et al.*, 2009] D. Pradas, A. Bouabdallah, J. Lacan, M. Bousquet, and M. Vasquez. Cross-layer. *Globecom, Hawaï*, October 2009.

[Rahnavard *et al.*, 2007a] Nazanin Rahnavard, Hossein Pishro-Nik, and Faramarz Fekri. Unequal error protection using partially regular LDPC codes. *IEEE Transactions on Communications*, 55(3), 2007.

[Rahnavard *et al.*, 2007b] Nazanin Rahnavard, Badri N. Vellambi, and Faramarz Fekri. Rateless codes with unequal error protection property. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(4), 2007.

[Rizzo,] L. Rizzo. On the feasibility of software FEC. available at http ://www.iet.unipi.it/ luigi/softfec.ps.

[Rizzo, 1997] L. Rizzo. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 27(2) :24–36, 1997.

[Roca *et al.*, 2010] V. Roca, M. Cunche, J. Lacan, A. Bouabdallah, and K. Matsuzono. Simple Reed-Solomon Forward Error Correction (FEC) Scheme for FECFRAME. Internet-Draft draft-roca-fecframe-simple-rs-01, Internet Engineering Task Force, October 2010. Work in progress.

[Shamai and Steiner, 2003] S. Shamai and A. Steiner. A broadcast approach for a single-user slowly fading MIMO channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10) :2617–2635, 2003.

[Sundararajan *et al.*, 2008] K. Sundararajan, D. Shah, and M. Médard. ARQ for network coding. In *Information Theory, 2008. ISIT 2008. IEEE International Symposium on*, pages 1651–1655. IEEE, 2008.

[Tournoux *et al.*,] P. Tournoux, E. Lochin, J. Lacan, A. Bouabdallah, and V. Roca. On-the-fly coding for time-constrained applications». *En cours de révison mineur après soumission à IEEE Transactions on Multimedia.*

[Tournoux *et al.*, 2009a] P.U Tournoux, A. Bouabdallah, J. Lacan, and E. Lochin. Codage à la volée pour les application temps réels. *CFIP , la réunion, france*, October 2009.

[Tournoux *et al.*, 2009b] P.U Tournoux, A. Bouabdallah, J. Lacan, and E. Lochin. On-the-fly coding for real time applications. *ACM Multimedia, Bejing*, October 2009.

[Wenger, 2003] S. Wenger. H. 264/AVC over IP. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 13(7) :645–656, 2003.

[Wiegand, 2009] DE) Hellge Cornelius (Berlin DE) Schierl Thomas (Berlin DE) Wiegand, Thomas (Berlin. *Information Signal, Apparatus and Method for Encoding an Information Content, and Apparatus and Method for Error Correcting an Information Signal*, March 2009.