



Université
de Toulouse



Thèse de Doctorat

Mécanismes de Fiabilité bi-directionnels “Couches Basses” Pour les Communications par Satellite

Rami Ali Ahmad

Directeur de thèse : Jérôme Lacan¹

Encadrants : Fabrice Arnal²

Mathieu Gineste²

Laurence Clarac³

¹Université de Toulouse, ISAE/DISC, TéSA, Toulouse, France

²Thales Alenia Space, Toulouse, France

³CNES, Toulouse, France

24 Juin 2016

Plan

Problématique

Canal et codage

- Canal Land Mobile Satellite (LMS)
- Codes correcteurs d'erreurs
- Information Mutuelle (IM)
- Capacité du canal

Méthode statique

- Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai
- Évaluation de performance
- Conclusion

Méthode adaptative

- HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite
- Évaluation de performance
- Conclusion

Tramage et encapsulation

- Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées
- Évaluation de performance
- Conclusion

Conclusion

Contexte

- Certaines zones ne sont pas couvertes par les liens terrestres.



Désert

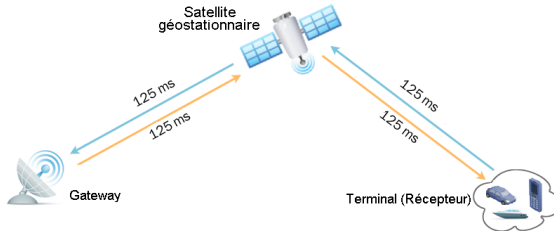


Zone rurale



Océan

Caractéristiques du lien dans les communications par satellite



Communication entre une gateway et un terminal via un satellite géostationnaire

- Long délai de propagation (250 ms via un satellite géostationnaire), dans le cas où le canal varie rapidement.
- Erreurs de transmission dues aux caractéristiques du canal.

Objectifs

- Un mécanisme qui assure la fiabilité de la communication.
- Maximiser l'efficacité d'utilisation de la bande passante.

Plan

Problématique

Canal et codage

- Canal Land Mobile Satellite (LMS)

- Codes correcteurs d'erreurs

- Information Mutuelle (IM)

- Capacité du canal

Méthode statique

- Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

- Évaluation de performance

- Conclusion

Méthode adaptative

- HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

- Évaluation de performance

- Conclusion

Tramage et encapsulation

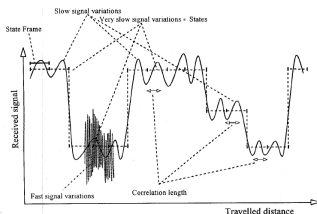
- Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

- Évaluation de performance

- Conclusion

Conclusion

Canal Land Mobile Satellite (LMS)



Les trois taux de variation du signal reçu

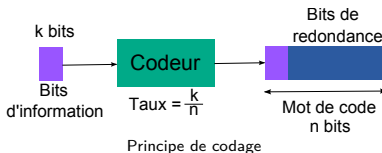
- ▶ Modèle statistique pour le canal LMS basé sur une chaîne de Markov à trois états⁽¹⁾.
- ▶ Distribution de Loo⁽²⁾ :
 - Le signal direct : distribution log-normale ;
 - La composante multitrajets : distribution Rayleigh .
- ▶ Les environnements du canal LMS : open, suburban, intermediate tree shadow (ITS), heavy tree shadow (HTS), etc.

1. F. Perez-Fontan and M.A. Vazquez-Castro and C. Enjamio-Cabado and J. Pita-Garcia and E. Kubista, "Statistical Modeling of the LMS Channel", In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume 50, pages 1549-1567, Nov. 2001.

2. C. Loo, "A Statistical Model for a Land Mobile Satellite Link", In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume vt-34, pages 122-127, Aug. 1985.

Codes correcteurs d'erreurs

- Génération des bits de redondance à partir des bits d'information à transmettre.
- Protection du message à transmettre contre les erreurs introduites par le canal.



- Ces codes sont utilisés pour assurer la fiabilité de la communication.

Information Mutuelle (IM)

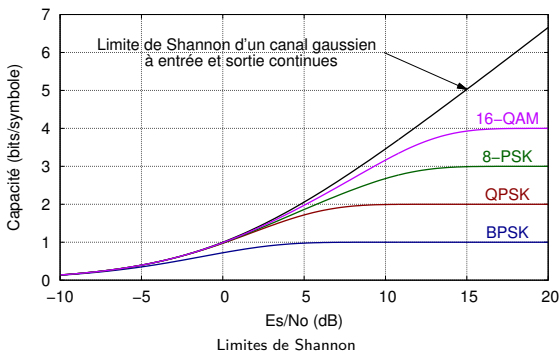
- ▶ L'information mutuelle (IM) peut être utilisée pour estimer le taux d'erreur de mots (Word Error Rate (WER)).
- ▶ L'information mutuelle est la quantité d'information partagée par le symbole X à l'entrée d'un canal et le symbole Y correspondant à sa sortie.
- ▶ Pour un canal à entrée et sortie discrètes, cette information est donnée par :

$$I(X; Y) = \sum_x \sum_y \Pr(X, Y) \log_2 \frac{\Pr(X|Y)}{\Pr(X)} \quad (1)$$

Capacité du canal

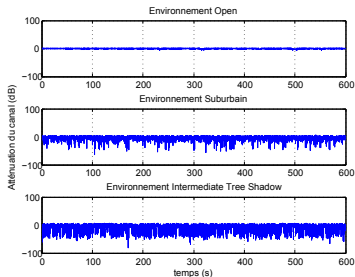
- La capacité d'un canal est le maximum de l'information mutuelle de ses variables aléatoires d'entrée et de sortie :

$$C = \max_{X,Y} I(X; Y) \quad (2)$$



Services tolérants au délai

- Les variations et les atténuations du canal LMS ne sont pas du même ordre pour les différents types d'environnement.



Traces du canal LMS en bande S pour différents types d'environnement avec une vitesse du terminal de 60 Km/h

- Les services cibles : ceux qui acceptent un certain délai avant que le message ne soit complètement transmis.

Contraintes de délai

- Certains services ont des contraintes sur la transmission d'un pourcentage de messages avec un délai donné.
Des services aéronautiques sécuritaires définissent des contraintes de délai pour la livraison de 95% des messages
- Quelques services utilisés dans le cadre des standards satellitaires DVB-S2/DVB-RCS :

Web browsing File download
E-mail Instant messaging
P2P networks Video streaming
Audio streaming M2M

- Délai maximal théorique et nombre de transmissions autorisé :

$$D_{max} = N_{bits}R_b + N_{trans}RTT - \frac{RTT}{2} + N_{trans}D_r \quad (3)$$

N_{bits} : longueur du code considéré R_b : débit de transmission
 N_{trans} : nombre maximal de transmissions RTT : délai aller-retour
 D_r : délai de traitement de données au niveau du récepteur

$$N_{trans} = \frac{D_{max} + \frac{RTT}{2} - N_{bits}R_b}{RTT + D_r} \quad (4)$$

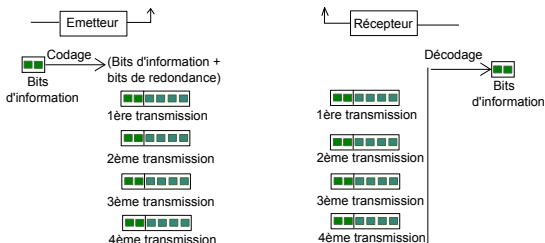
Hybrid Automatic Repeat reQuest

- ✓ Assurer la fiabilité de la communication.
- ✓ Maximiser l'efficacité d'utilisation de la bande passante.
- ✓ Respecter les contraintes de délai de service cible.

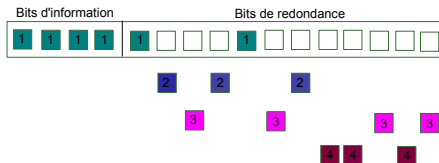
HARQ peut être une solution pertinente

- ▶ HARQ : combinaison d'ARQ avec des codes correcteurs d'erreurs.
- ▶ ARQ : le récepteur envoie un acquittement positif pour accuser la bonne réception des données envoyées par l'émetteur.

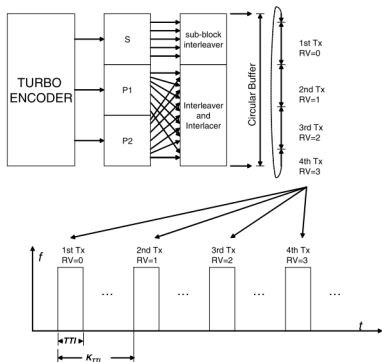
► HARQ type I : chase combining



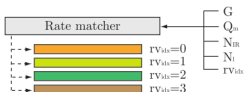
► HARQ type II : incremental redundancy



3GPP Long Term Evolution (Release 8)



Mémoire tampon circulaire



Quatre versions différentes de débit d'un bloc de code donné peuvent être produites en faisant varier le paramètre

RV

Allocation et adaptation de taux de transmission pour HARQ-IR⁽¹⁾.

- Allocation du taux de transmission : l'émetteur n'a aucune connaissance de l'état du canal.
- Adaptation du taux de transmission : l'émetteur utilise l'état du canal de la transmission précédente pour s'adapter.
- Une méthode utilisant le dynamic programming a été proposée pour calculer les taux de transmissions, en supposant la connaissance de la distribution statistique du canal.
- L'évaluation de performance avec un canal rayleigh-fading montre un gain significatif avec l'adaptation du taux par rapport à l'allocation du taux.
- Pour une valeur de SNR élevée, quelques transmissions sont suffisantes pour obtenir une efficacité proche de la capacité ergodique.

1. L. Szczecinski, S. R. Khosravirad, P. Duhamel, and M. Rahman., "Rate allocation and adaptation for incremental redundancy truncated HARQ", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, pages 2580-2590, June 2013.

Plan

Problématique

Canal et codage

Canal Land Mobile Satellite (LMS)

Codes correcteurs d'erreurs

Information Mutuelle (IM)

Capacité du canal

Méthode statique

Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

Évaluation de performance

Conclusion

Méthode adaptative

HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

Évaluation de performance

Conclusion

Tramage et encapsulation

Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

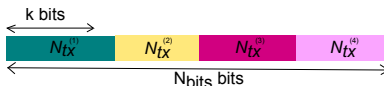
Évaluation de performance

Conclusion

Conclusion

Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

Efficacité



Nombres de bits à envoyer à chaque transmission, dans le cas où un maximum de 4 transmissions est autorisé

$$E = \frac{R \cdot \sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j}{\sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j \left(\sum_{l=1}^j q_l \right)} \log_2(M) \quad (\text{bits/Symbol}) \quad (5)$$

- ▶ R : taux de codage du code considéré ;
- ▶ P_j : probabilité de décodage à la $j^{\text{ème}}$ transmission ;
- ▶ M : l'ordre de modulation considéré ;
- ▶ N_{trans} : Nombre de transmissions maximal autorisé ;
- ▶ $q_l = \frac{N_{tx}^{(l)}}{N_{bits}}$: le rapport du nombre de bits envoyés à la $l^{\text{ème}}$ transmission sur le nombre de bits total, N_{bits} .

- Version classique statique d'HARQ : envoie à chaque transmission un nombre de bits prédéfinie sans prendre en considération les variations du canal.

Transmission	1 ^{ère}	2 ^{ème}	- - -	$N_{trans}^{ème}$
Probabilité	$N_{tx}^{(1)}$	$N_{tx}^{(2)}$	- - -	$N_{tx}^{(N_{trans})}$

Tableau de nombre de bits à envoyer à chaque transmission, avec un maximum de N_{trans} transmissions

- **Proposition :** Définir une probabilité de décodage, P_j , fixe à chaque transmission.
 - P_j est la probabilité de décoder à la $j^{ème}$ transmission et ne pas décoder lors des transmissions précédentes.
 - Les valeurs des P_j sont choisies en fonction des contraintes de délai du service cible et fixées dès le début de la communication.
 - La somme des P_j dépend de la fiabilité globale de la communication requise par le service cible.

Transmission	1 ^{ère}	2 ^{ème}	- - -	$N_{trans}^{ème}$
Probabilité	P_1	P_2	- - -	$P_{N_{trans}}$

Tableau de probabilités de décodage à chaque transmission, avec un maximum de N_{trans} transmissions

► Hypothèses :

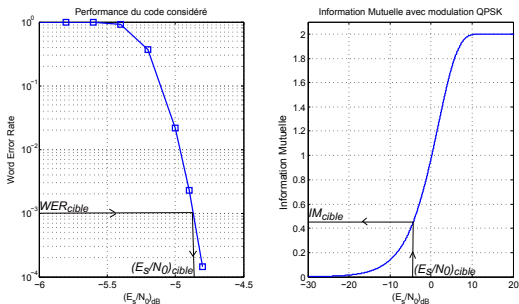
- Estimation parfaite du type d'environnement dans lequel le terminal mobile se déplace.
- Connaissance préalable de la distribution statistique des atténuations du canal pour chaque type d'environnement.
- Le canal est stationnaire pendant le temps de transmission des bits d'une transmission pour un mot de code donné.

► Principe :

- Nous calculons le nombre de bits à envoyer à chaque transmission, en fonction des probabilités P_j et de la CDF (fonction de répartition) des atténuations du canal.
- La méthode proposée utilise l'information mutuelle pour calculer les nombres de bits.

Caractéristiques de l'information mutuelle

- Pour qu'un mot de code soit décodé avec un certain WER_{cible} , il doit accumuler une certaine information mutuelle IM_{cible} .



Exemple de calcul de IM_{cible} en utilisant la courbe de performance du code considéré sur un canal gaussien et la courbe de l'information mutuelle (modulation QPSK)

Information mutuelle accumulée

- Le symbole reçu à la sortie du canal, y_k , peut être écrit de la manière suivante :

$$y_k = |\rho_k|^2 \sqrt{E_{s_k}} x_k + n_k \quad (6)$$

x_k : un symbole à l'entrée du canal E_{s_k} : l'énergie du symbole
 n_k : une réalisation de bruit $N_0/2$: variance du bruit
 $|\rho_k|^2$: l'atténuation du canal.

- Pour des entrées équiprobables et pour un canal symétrique, l'IM correspond à la capacité du canal.
- L'IM est calculée à partir de la capacité du canal gaussien, ayant $|\rho_k|^2 \frac{E_s}{N_0}$ comme paramètre d'entrée.
- Après la transmission d'un certain nombre de bits d'un mot de code donné, ce mot de code accumule une certaine quantité d'information mutuelle.

Information mutuelle accumulée

- E_s/N_0 référence est une valeur fixe de E_s/N_0 dans un contexte ciel clair (pour un terminal donné et sans atténuation).
- L' IM obtenue à la $j^{\text{ème}}$ transmission pour un mot de code donné peut être calculée comme suit :

$$IM^{(j)} = N_{tx}^{(j)} \cdot IM \left(|\rho^{(j)}|^2 \cdot \frac{E_s}{N_0} \right) \quad (7)$$

- * $|\rho^{(j)}|^2$ est le coefficient d'atténuation affectant les bits transmis à la $j^{\text{ème}}$ transmission ;
- * $N_{tx}^{(j)}$ est le nombre de bits transmis à la $j^{\text{ème}}$ transmission ;
- * $IM(\cdot)$ est la fonction fournissant la valeur de l' IM pour une valeur de E_s/N_0 donnée.

Information mutuelle accumulée

- L' IM par bit accumulée, $IM_{acc}^{(j)}$, pour un mot de code, dès la première transmission jusqu'à la $j^{ème}$, est donnée par :

$$IM_{acc}^{(j)} = \frac{N^{(j-1)} IM_{acc}^{(j-1)} + IM^{(j)}}{N^{(j)}} \quad (8)$$

- * $N^{(j)}$ est le nombre de bits total transmis pour un mot de code donné jusqu'à la $j^{ème}$ transmission ;
- * $IM_{acc}^{(0)} = 0$.

Calcul du nombre de bits envoyés à chaque transmission

- Un mot de code décodé avec WER_{cible} , doit vérifier la relation suivante :

$$N^{(j)} IM_{acc}^{(j)} \geq N_{bits} IM_{cible} \quad (9)$$

- $IM_{requis}^{(j+1)}$ vérifie l'équation :

$$\Pr \left(IM_{reçue} \geq IM_{requis}^{(j+1)} \right) = P \quad (10)$$

- Pour un mot de code non décodé à la $j^{ème}$ transmission, celui ci est décodé à la prochaine retransmission avec une probabilité P_{j+1} prédéfinie si et seulement si :

$$N^{(j)} IM_{acc}^{(j)} + N_{requis}^{(j+1)} IM_{requis}^{(j+1)} \geq N_{bits} IM_{cible} \quad (11)$$

- $N_{requis}^{(j+1)}$ est le nombre de bits à transmettre à la $(j + 1)^{ème}$:

$$N_{requis}^{(j+1)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - N^{(j)} IM_{acc}^{(j)}}{IM_{requis}^{(j+1)}} \quad (12)$$

Calcul de $IM_{requis}^{(j+1)}$

- p_{j+1} : Probabilité de décoder à la $(j+1)^{ème}$ transmission sachant qu'il n'y a pas eu de décodage à la $j^{ème}$ transmission.

$$p_{j+1} = \frac{P_{j+1}}{(1 - \sum_{k=1}^j P_k)} \quad (13)$$

Transmission	1 ^{ère}	2 ^{ème}	- - -	$N_{trans}^{ème}$
Probabilité	P_1	P_2	- - -	$P_{N_{trans}}$

Tableau de probabilités de décodage à chaque transmission, avec un maximum de N_{trans} transmissions

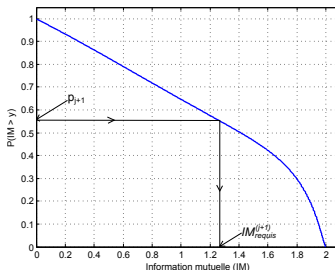
$$\Pr \left(IM_{reçue} \geq IM_{requis}^{(j+1)} \right) = p_{j+1} \quad (14)$$

Calcul de $IM_{requis}^{(j+1)}$

- L'information mutuelle reçue est donnée par :

$$IM_{reçue} = IM \left(|\rho|^2 \cdot \frac{E_s}{N_0} \right) \quad (15)$$

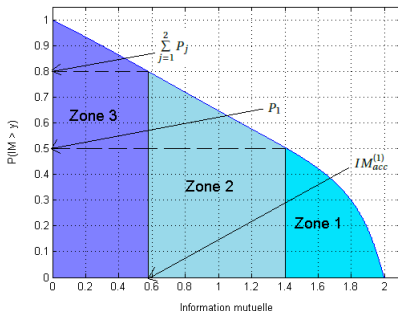
- Fonction de répartition inverse : Probabilité d'avoir une valeur d'atténuation plus grande qu'une valeur donnée ($P(|\rho|^2 > x)$).



La fonction de répartition inverse du niveau d'information mutuelle reçu sur le canal LMS

Calcul de $IM_{acc}^{(j)}$

- Seuls les mots de code accumulant des quantités d'information mutuelle supérieures ou égales au niveau d' IM qui correspond à la probabilité $\sum_{i=1}^j P_i$ sont décodés.



La fonction de répartition inverse du niveau d'information mutuelle reçu et les différentes zones qui correspondent aux probabilités définies à chaque transmission

- $IM_{acc}^{(j)}$ doit correspondre à la valeur minimale de l'information mutuelle dans la zone $(j+1)$.

Optimisation des probabilités de décodage

- L'efficacité dépend de plusieurs paramètres : E_s/N_0 , nombre de transmissions autorisées, nombre de bits envoyés à chaque transmission.

$$E = \frac{R \cdot \sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j}{\sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j \left(\sum_{l=1}^j q_l \right)} \log_2(M) \quad (\text{bits/Symbol}) \quad (16)$$

- Le nombre de bits à envoyer à la $j^{\text{ème}}$ transmission peut être calculé de la manière suivante :

$$N_{requis}^{(j+1)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - \sum_{l=1}^j N_{tx}^{(l)} IM_{acc}^{(j)}}{IM_{requis}^{(j+1)}} \quad (17)$$

$$q_{j+1} = \frac{IM_{cible} - \sum_{l=1}^j q_l IM_{acc}^{(j)}}{IM_{requis}^{(j+1)}} \quad (18)$$

- Pour chaque combinaison de probabilités, $[P_1, P_2, \dots, P_{N_{trans}}]$, nous calculons les q_l , $l = 1, \dots, N_{trans}$.

Optimisation des probabilités de décodage

- Des services qui imposent des contraintes de délai sur la délivrance d'un pourcentage des messages, par exemple :

$$P_1 + P_2 = 0.95 ,$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0.99$$

(Service 1, Environnement 1, E_s/N_0)	$N_{tx1}^{(1)}$	$N_{tx1}^{(2)}$	$N_{tx1}^{(3)}$	$N_{tx1}^{(4)}$
(Service 1, Environnement 2, E_s/N_0)	$N_{tx2}^{(2)}$	$N_{tx2}^{(2)}$	$N_{tx2}^{(3)}$	$N_{tx2}^{(4)}$
(Service 2, Environnement 1, E_s/N_0)	$N_{tx3}^{(1)}$	$N_{tx3}^{(2)}$	-	-
(Service 2, Environnement 2, E_s/N_0)	$N_{tx4}^{(1)}$	$N_{tx4}^{(2)}$	-	-

Un exemple de tableau contenant les différentes combinaisons de services cibles et types d'environnement ainsi que les nombres de bits optimaux correspondants

Exemple de calcul

Transmission	1	2	3
Probabilité	0.5	0.3	0.2

$$p_1 = 0.5 \quad p_2 = \frac{0.3}{1 - 0.5} = 0.6 \quad p_3 = \frac{0.2}{1 - 0.8} = 1$$



$$IM_{requis}^{(1)} = 1.4146 \quad IM_{requis}^{(2)} = 1.1342 \quad IM_{requis}^{(3)} = 0.002$$

$$IM_{acc}^{(0)} = 0 \quad IM_{acc}^{(1)} = 0.5775 \quad IM_{acc}^{(2)} = 0.002$$

$$N_{requis}^{(1)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - N^{(0)} IM_{acc}^{(0)}}{IM_{requis}^{(1)}} = \frac{21761 - 0}{1.4146} = 15383 \text{ bits}$$

$$N_{requis}^{(2)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - N^{(1)} IM_{acc}^{(1)}}{IM_{requis}^{(2)}} = \frac{21761 - 15383 \cdot 0.5775}{1.1342} = 11354 \text{ bits}$$

$$N_{requis}^{(3)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - N^{(2)} IM_{acc}^{(2)}}{IM_{requis}^{(3)}} = \frac{21761 - (15383 + 11354) \cdot 0.002}{0.002} = 1.08 \cdot 10^7 \text{ bits}$$

$$\sum_{j=1}^3 N_{requis}^{(j)} > N_{bits}$$

$$\Rightarrow N_{requis}^{(3)} = N_{bits} - \sum_{j=1}^2 N_{requis}^{(j)} = 53520 - (15383 + 11354) = 26783 \text{ bits}$$

Exemple numérique du calcul de nombres de bits à envoyer (Environnement ITS, $E_s/N_0 = 7$ dB, Turbo code (8920,1/6), trois transmissions maximales, $WER_{cible} = 10^{-4}$)

Évaluation de performance

Paramètres système

- ▶ Orbite Satellite : Géostationnaire (GEO)
- ▶ Délai aller-retour (en anglais, Round Trip Time (RTT)) : 500 ms
- ▶ Bande de fréquence : S
- ▶ Élévation : 40°
- ▶ Canal land mobile satellite (LMS), environnement ITS
- ▶ Vitesse du terminal mobile : 60 Km/h
- ▶ Distance parcourue : 10 Km
- ▶ Code correcteur d'erreurs (FEC) Turbo Codes (défini dans CCSDS)
- ▶ Taux de codage : $1/6$
- ▶ Longueur du mot de code (N_{bits}) : 53520 bits (bits d'information : 8920 bits)
- ▶ Modulation : Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)
- ▶ Temps symbole : $4 \cdot 10^{-6}$ secondes, débit binaire (R_b) : 500 Kbps
- ▶ WER_{cible} (pour décodage) : 10^{-4} , IM_{cible} : 0.4066

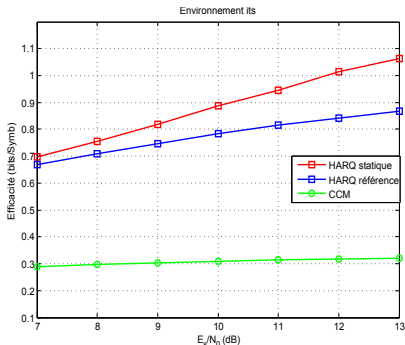
Comparaison de la méthode proposée avec d'autres schémas HARQ

- ▶ HARQ statique : prend en considération les valeurs de probabilités de décodage optimales ;
- ▶ HARQ référence : transmet le même nombre de bits à chaque transmission (qui correspond à la longueur du mot de code divisé par le nombre de transmissions maximal). Il est égal dans ce cas à 17840 bits ;
- ▶ CCM (Constant Coding and Modulation) : Exigence de décodage dès la première transmission. Le taux de codage est le même pour tous les mots de code (pour un E_s/N_0 donné).

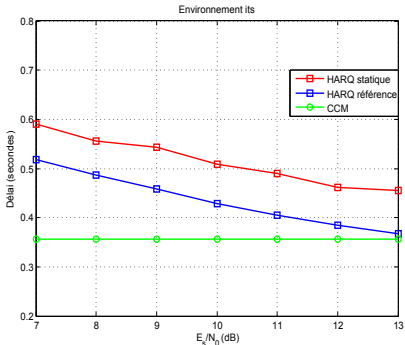
Le service cible supporte un délai maximal D_{max} égal à 1.5 secondes

Le nombre de transmissions maximal est égal à 3

Résultats - Environnement ITS



Efficacité obtenue avec les différents schémas



Délai moyen obtenu avec les différents schémas

- Le gain d'efficacité par rapport à l'HARQ référence varie entre 4% et 22%. Par rapport au CCM ce gain est entre 140% et 230%.
- Le délai moyen obtenu dans un environnement ITS et avec le CCM est constant en fonction de E_s/N_0 .

Conclusion

- ▶ Proposition d'un mécanisme qui assure la fiabilité de la communication et optimise l'efficacité, pour un service tolérant au délai.
- ▶ Calcul du nombre de bits à envoyer à chaque transmission, en fonction des probabilités de décodage prédéfinies.
- ▶ Ces probabilités de décodage respectent les contraintes de délai exigées par le service cible.
- ▶ Une phase d'optimisation a été proposée, pour maximiser l'efficacité d'utilisation de la bande passante.
- ▶ L'évaluation de performance a montré un gain en terme d'efficacité de notre méthode par rapport aux stratégies considérées.

Conférence internationale

R. Ali Ahmad, J. Lacan, F. Arnal, M. Gineste and L. Clarac, "Enhanced HARQ for Delay Tolerant Services in Mobile Satellite Communications". in *The Seventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications SPACOMM 2015*, Barcelona, Spain, April 2015.

Plan

Problématique

Canal et codage

Canal Land Mobile Satellite (LMS)

Codes correcteurs d'erreurs

Information Mutuelle (IM)

Capacité du canal

Méthode statique

Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

Évaluation de performance

Conclusion

Méthode adaptative

HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

Évaluation de performance

Conclusion

Tramage et encapsulation

Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

Évaluation de performance

Conclusion

Conclusion

HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

- ▶ La version statique d'HARQ-IR n'est pas optimale du point de vue efficacité.
- ▶ La méthode HARQ adaptatif s'adapte aux variations du canal pour chaque mot de code, à chaque transmission.
- ▶ Elle calcule à chaque fois le nombre de bits nécessaire pour décoder le mot de code à la prochaine transmission avec une probabilité de décodage prédéfinie.
- ▶ Le nombre de bits calculé est envoyé dans un acquittement vers l'émetteur. Il est donné par l'équation suivante :

$$N_{requis}^{(j+1)} = \frac{N_{bits} IM_{cible} - N^{(j)} IM_{acc}^{(j)}}{IM_{requis}^{(j+1)}} \quad (19)$$

- ▶ Calcul de $IM_{requis}^{(j+1)}$ en fonction de p_{j+1} et de la fonction de répartition inverse du niveau d'information mutuelle reçu.

$$p_{j+1} = \frac{P_{j+1}}{(1 - \sum_{k=1}^j P_k)} \quad (20)$$

Optimisation des probabilités de décodage

- ▶ Minimiser $\sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j \left(\sum_{l=1}^j q_l \right)$.
- ▶ $N_{requis}^{(j+1)}$, le nombre de bits moyen à transmettre à la $j^{ème}$ transmission, est donné par :

$$N_{requis}^{(j+1)} = \sum_{im_1} \cdots \sum_{im_j} \frac{N_{bits} IM_{cible} - N_{tx}^{(1)} im_1 - \cdots - N_{tx}^{(j)} im_j}{IM_{requis}^{(j+1)}} P(im_1, \cdots im_j) \quad (21)$$

- * im_j est l'information mutuelle par bit à la $j^{ème}$ transmission ;
 - * $P(im_j)$ est la probabilité d'obtenir im_j ;
 - * $N_{tx}^{(j)}$ est le nombre de bits transmis à la $j^{ème}$ transmission.
- ▶ Les différentes im_j sont indépendantes :

$$q_{j+1} = \frac{IM_{cible}}{IM_{requis}^{(j+1)}} - \frac{1}{IM_{requis}^{(j+1)}} \sum_{im_1} \cdots \sum_{im_j} (q_j im_1 + \cdots q_j im_j) P(im_1) \cdots P(im_j) \quad (22)$$

- ▶ Trouver la combinaison de probabilités de décodage à chaque transmission

$$[P_1, P_2, \dots, P_{N_{trans}}] \text{ qui minimise } \sum_{j=1}^{N_{trans}} P_j \left(\sum_{l=1}^j q_l \right)$$

Exemple de calcul

Transmission	1	2	3
Probabilité	0.5	0.3	0.2

$$p_1 = 0.5$$

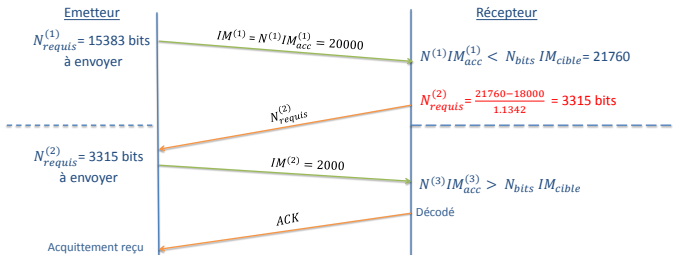
$$p_2 = \frac{0.3}{1 - 0.5} = 0.6$$

$$p_3 = \frac{0.2}{1 - 0.8} = 1$$

$$IM_{requis}^{(1)} = 1.4146$$

$$IM_{requis}^{(2)} = 1.1342$$

$$IM_{requis}^{(3)} = 0.002$$



Exemple numérique sur le calcul de nombres de bits à envoyer (Environnement ITS, $E_s/N_0 = 7$ dB, Turbo code (8920, 1/6), trois transmissions maximales, $WER_{cible} = 10^{-4}$).

Évaluation de performance

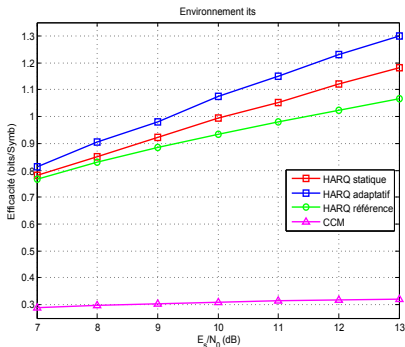
Comparaison de la méthode adaptative avec d'autres schémas HARQ

- ▶ HARQ adaptatif : prend en considération les valeurs de probabilités de décodage optimales pour le cas adaptatif ;
- ▶ HARQ statique : prend en considération les valeurs de probabilités de décodage optimales pour le cas statique ;
- ▶ HARQ référence : transmet le même nombre de bits à chaque transmission (qui correspond à la longueur du mot de code divisé par le nombre de transmissions maximal), qui est égal dans ce cas à 13380 bits ;
- ▶ CCM (Constant Coding and Modulation) : Exigence de décodage dès la première transmission. Le taux de codage est le même pour tous les mots de code (pour un E_s/N_0 donné).

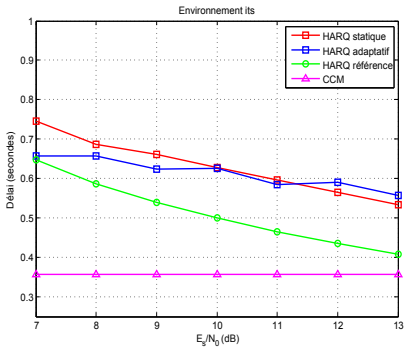
Le service cible supporte un délai maximal D_{max} égal à 2 secondes

Le nombre de transmissions maximal est égal à 4

Résultats - Environnement ITS



Efficacité obtenue avec les différents schémas



Délai moyen obtenu avec les différents schémas

- l'HARQ adaptatif a un gain intéressant en terme d'efficacité par rapport à l'HARQ statique, il varie entre 4% et 10%.
- Le gain en terme d'efficacité varie entre 8% et 21% par rapport à l'HARQ référence et entre 180% et 320% par rapport à CCM.
- Le délai obtenu avec la méthode adaptative est parfois meilleur que celui obtenu avec la méthode statique.

Conclusion

- ▶ Introduction de l'aspect adaptatif par rapport à l'HARQ statique.
- ▶ Elle consiste à s'adapter à chaque transmission aux variations du canal.
- ▶ L'HARQ adaptatif est meilleur, en terme d'efficacité, par rapport à d'autres schémas évalués.

Conférence internationale

R. Ali Ahmad, J. Lacan, F. Arnal, M. Gineste and L. Clarac, "Enhancing Satellite System Throughput Using Adaptive HARQ for Delay Tolerant Services in Mobile Communications". in *Wireless Telecommunications Symposium WTS*, New York City, USA, April 2015.

Plan

Problématique

Canal et codage

- Canal Land Mobile Satellite (LMS)

- Codes correcteurs d'erreurs

- Information Mutuelle (IM)

- Capacité du canal

Méthode statique

- Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

- Évaluation de performance

- Conclusion

Méthode adaptative

- HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

- Évaluation de performance

- Conclusion

Tramage et encapsulation

- Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

- Évaluation de performance

- Conclusion

Conclusion

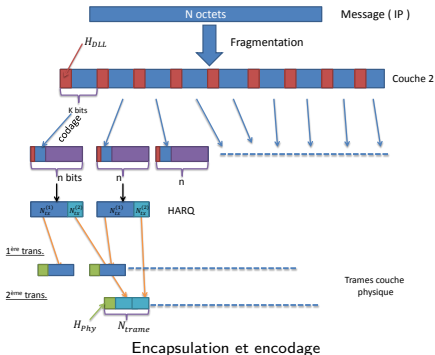
Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

- ▶ Dans les systèmes réels, les données sont envoyées dans des trames “couche physique” avec des tailles et des entêtes définies ainsi que des symboles pilotes.
- ▶ Ces entêtes et symboles pilotes engendrent une baisse de performance, en terme d'efficacité, des méthodes proposées.

Objectifs

1. Trouver les tailles optimales de trame et les codes à utiliser.
2. Définir la meilleure stratégie de transmission à adopter par l'émetteur.

Structure de trame et encapsulation

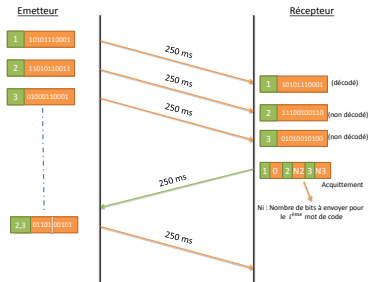


Notation	Signification
N (octets)	Taille de message IP
H_{DLL}	Entête (header) ajoutée au fragment au niveau couche 2 (Data Link Layer)
k (bits)	Nombre de bits à l'entrée de l'encodeur (formés par H_{DLL} et le fragment)
n (bits)	Nombre de bits à la sortie de l'encodeur (ayant un taux de codage égale à $\frac{k}{n}$)
$N_{tx}^{(j)}$	Nombre de bits à transmettre à la $j^{ème}$ transmission, parmi les n bits
H_{phy}	Entête (header) ajoutée à la trame couche physique
N_{frame}	Taille de la trame couche physique (y compris l'entête H_{phy})

Mécanisme d'agrégation de plusieurs mots de code

- Pour un mot de code non décodé à la transmission actuelle, deux possibilités :
 1. Le nombre de bits à envoyer à la prochaine transmission est une valeur proche, à un pourcentage près, de la taille de la partie utile de la trame.
 2. Le pourcentage du nombre de bits à envoyer sur la taille de la partie utile de la trame est inférieur au pourcentage fixé.

$$N_T = \frac{D_{max} - De_{max}}{N_{trans}(T_{trame}R_b)} \quad (23)$$



Mécanisme d'agrégation de plusieurs mots de code(méthode adaptative)

Évaluation de performance

- Contexte voie aller, en considérant que l'émetteur transmet les données avec un flux continu.
- Pour un environnement et un service donnés, la taille de la partie utile de la trame (sans l'entête) est égale au nombre de bits à envoyer à la première transmission.

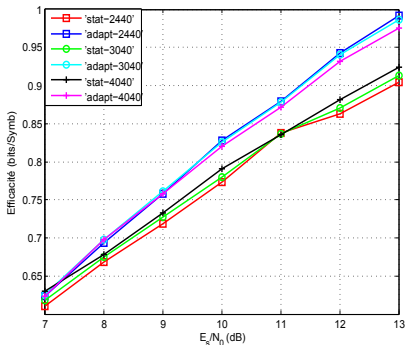
Exemple de paramètres système

Message (IP) (Octets)	Taille de la trame couche physique (Entête, partie utile) en bits	Overhead couche physique	Turbo code (k,n)
1500	3500(560,2940)	16%	(2440,14640)
1500	4400(700,3700)	16%	(3040,18240)
1500	5800(930,4870)	16%	(4040,24240)

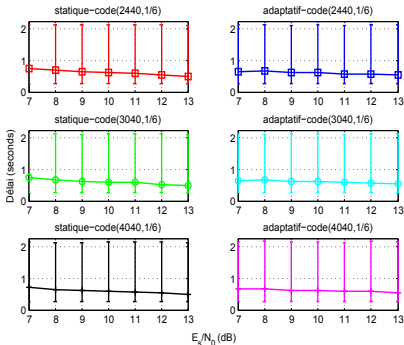
Tailles de trame, codes et overhead considérés pour des messages IP de taille 1500 octets

$$D_{max}=2.25 \text{ s} \quad N_{trans}=4$$

Résultats - Environnement ITS

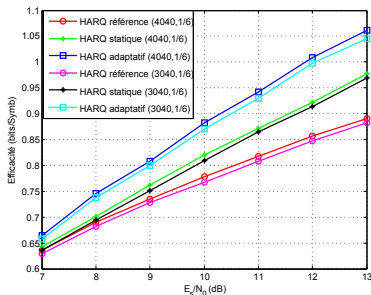


Efficacité obtenue avec les méthodes proposées



Délais obtenus avec les méthodes proposées

- ▶ L'HARQ adaptatif utilisant le code (4040,1/6) a donné une efficacité inférieure à celle obtenue avec l'HARQ adaptatif utilisant le code (3040,1/6).
- ▶ La valeur de N_T , dans le cas des trames de taille 5800 bits, est assez petite, vu que la taille de la trame augmente.
- ▶ **Solution** : considérer le code long et robuste (4040,1/6) mais en prenant en compte une petite taille de trame.



Efficacité obtenue avec les méthodes considérées en utilisant les codes (4040,1/6) et (3040,1/6), et trames à petite taille, pour des messages IP de taille 1500 octets

- ▶ L'HARQ adaptatif utilisant le code (4040,1/6) a des gains importants par rapport à l'HARQ statique et l'HARQ référence utilisant le code (4040,1/6).
- ▶ Ce gain varie entre 3% et 9% par rapport à l'HARQ statique et entre 3% et 19% par rapport à l'HARQ référence.

Conclusion

- ▶ Évaluation de la performance de nos méthodes adaptative et statique en ajoutant des paramètres système (tramage et entêtes contenant de symboles pilotes et informations de signalisation et d'identification).
- ▶ Il est possible d'agréger les bits de plusieurs mots de code dans la même trame.
- ▶ Pour avoir une meilleure efficacité, il faut considérer un code long et robuste et des trames de petite taille.
- ▶ Il serait intéressant d'étudier la performance des méthodes proposées dans le cas de la voie retour.

Revue internationale

R. Ali Ahmad, J. Lacan, F. Arnal, M. Gineste and L. Clarac, HARQ Based Mechanism to Improve Satellite System Throughput for Delay Tolerant Services in Mobile Communications (en cours de rédaction).

Plan

Problématique

Canal et codage

Canal Land Mobile Satellite (LMS)

Codes correcteurs d'erreurs

Information Mutuelle (IM)

Capacité du canal

Méthode statique

Méthode de fiabilisation basée sur l'HARQ statique pour les services tolérants au délai

Évaluation de performance

Conclusion

Méthode adaptative

HARQ adaptatif pour les services tolérants au délai dans les communications par satellite

Évaluation de performance

Conclusion

Tramage et encapsulation

Structure de trame et encapsulation et leur impact sur la performance de techniques proposées

Évaluation de performance

Conclusion

Conclusion

Résumé

1. Méthode de fiabilisation statique

- ▶ Basée sur l'HARQ statique et s'adresse aux services "tolérants au délai".
- ▶ Une probabilité de décodage est prédéfinie à chaque transmission et qui maximise l'efficacité.
- ▶ Un gain en terme d'efficacité est obtenu par rapport à une méthode HARQ statique classique.

2. Méthode de fiabilisation adaptative

- ▶ Elle s'adapte aux variations du canal.
- ▶ Le récepteur calcule le nombre de bits à envoyer par l'émetteur à la prochaine retransmission.
- ▶ Un gain significatif en terme d'efficacité est obtenu avec cette méthode.

3. L'impact du tramage et d'encapsulation sur les méthodes proposées

- ▶ Proposition d'une structure de trame pour une couche physique implémentant les mécanismes proposés.
- ▶ Proposition d'une technique de transmission pour agréger les données dans une même trame.
- ▶ Il est plus efficace d'utiliser un code long et robuste et des trames de petites tailles.

Faisabilité et complexité

► Faisabilité :

1. La méthode proposée suppose la connaissance parfaite du type d'environnement dans lequel le mobile évolue.
2. La liaison retour ne présente pas d'erreurs, l'acquittement n'est jamais perdu.
3. Les bits reçus pour un mot de code donné doivent être stockés dans une mémoire tampon tant que le mot de code n'est pas encore décodé.

► Complexité :

1. Notre simulateur utilise l'information mutuelle pour décider si le mot de code est décodé ou non : réduction des temps des simulations.
2. Dans un système réel, le récepteur peut éviter la phase de décodage quand l'information mutuelle accumulée n'est pas suffisante pour décoder.
3. Il serait utile d'utiliser les méthodes HARQ proposées dans les terminaux à bas coûts (IoT).

Perspectives

- ▶ Améliorer l'algorithme d'optimisation des probabilités de décodage, en terme de rapidité et complexité.
- ▶ Évaluer l'impact des erreurs d'estimation de l'environnement sur la performance des méthodes proposées.
- ▶ Étudier l'interaction entre les mécanismes de fiabilité proposés et les couches hautes, afin de parvenir à une optimisation conjointe.
- ▶ Étudier la performance des mécanismes proposés dans des contextes sur les autres orbites, MEO (Medium Earth Orbit) et LEO (Low Earth Orbit), comme la constellation type IRIDIUM NEXT par exemple.
- ▶ Évaluer la performance des méthodes proposées avec d'autres canaux, le canal optique par exemple.
- ▶ Étudier la possibilité d'implémenter les mécanismes HARQ proposés dans les futures technologies, la 5G par exemple.

Merci pour votre attention

Questions ?