



## TRANSMISSIONS FEC/ARQ AVEC CODAGE POINÇONNE: PERFORMANCES SUR CANAL HF IONOSPHERIQUE

D. MEREL, D. PIREZ

*THOMSON-CSF, Division RGS, 66 rue du Fossé Blanc, 92231 Gennevilliers*

RÉSUMÉ

*Dans le cadre du développement de modems H.F. haut débit (débit utile en ligne supérieur ou égal à 2400 b/s dans 3kHz), l'association d'un codage poinçonné compatible en débit avec une procédure ARQ spécialement adaptée permet de gérer de manière automatique une dynamique de débit importante (700 b/s à 2kb/s); Pour la transmission de fichiers de données dans des conditions de canal ionosphérique dégradées, l'ensemble présente un débit utile nettement supérieur à la répétition sélective des blocs non décodés des procédures ARQ classiques.*

### I. INTRODUCTION

Pour des configurations de liaisons de données où l'on dispose à l'alternat d'une voie de retour, les performances en débit chutent rapidement lorsque le canal devient médiocre en terme de rapport s/b ou varie rapidement dans le temps. Une combinaison de la procédure de répétition avec des codes correcteurs pour former des systèmes hybrides les complète avantageusement dans les cas limites.

Les systèmes de type I ont un schéma de codage indépendant du nombre de répétitions de l'unité d'information concernée. L'assurance d'un taux de décodage est fournie par la diversité temporelle aux dépens du débit utile; celui-ci peut chuter rapidement et seule la combinaison à la réception des codes répétés d'un même bloc permet d'augmenter leur probabilité de décodage avec le nombre de répétitions [1].

Deux niveaux de codes sont employés dans les systèmes de type II: un codage allégé pour la première transmission d'un bloc pour bénéficier d'un débit utile nominal élevé pour des conditions de canal "passantes", une redondance accrue lors des répétitions ultérieures [2]. Cette décomposition en deux temps améliore le rendement de l'ensemble: un débit utile maximal élevé, une concaténation des codes internes et externes avec recombinaison éventuelle des séquences codées d'une même information initiale pour résister plus avant aux dégradations du canal.

L'utilisation des Codes Poinçonnés Compatibles en Débit systématise cette approche progressive: à chaque retransmission, le taux de codage d'un bloc de données initial s'accroît pour augmenter sensiblement la probabilité de décodage du bloc. Pour limiter le débit en ligne, seule l'information redondante différentielle est transmise;

ABSTRACT

*A broad automatic data rate adaptation is permitted for HF modems in degraded ionospheric propagation conditions by associating Rate Compatible Punctured Codes with a dedicated Automatic Repeat reQuest procedure. Transmission of data files with a high rate HF modem - raw data rate greater than 2400 b/s in a 3kHz frequency bandwidth - is automatically accorded with the channel capacity (700 b/s to 2kb/s) and securized with an useful rate much greater than usual selective repeat procedures.*

l'information déjà transmise reste mémorisée dans le récepteur pour les tentatives de décodage ultérieures.

### II. CODAGE

La redondance croissante est assurée par une famille de codes convolutionnels déduits d'un même code par différentes tables de poinçonnage: une part de l'information codée n'est pas immédiatement transmise selon un motif connu et périodique. A partir de codes de redondance entière importante est ainsi définie toute une famille de codes de redondance fractionnaire et compatibles en débit, car déclinés chacun par des tables de poinçonnage emboîtées les unes dans les autres: les bits poinçonnés pour le code d'indice N le sont déjà pour l'indice N-1; certains bits poinçonnés en N-1 sont transmis en N. Il a été montré que ces codes compatibles en débit sont presque aussi performants que les meilleurs codes convolutionnels connus de complexité comparable [3].

Dans la procédure ARQ à répétition sélective, chaque bloc est protégé par un code externe détecteur d'erreurs de faible redondance (Reed-Solomon); La première transmission est protégée par le code convolutionnel interne de redondance la plus faible (le plus poinçonné). En cas de détection d'erreurs en réception, seuls sont retransmis les symboles de redondance supplémentaires pour passer au code suivant de la famille.

Une augmentation géométrique de la redondance des codes avec le nombre de répétitions est un compromis judicieux pour étager linéairement leurs capacités de décodage en fading de Rayleigh sur une échelle logarithmique pour les rapports S/B: dans un environnement variant rapidement au rythme des trames modem, la dynamique du canal est régulièrement parcourue, le



nombre de tentatives de décodage par bloc initial limité à un réel accroissement de leur probabilité de succès, et de ce fait le flux d'information à stocker reste limité chez l'appelé.

En outre, la technique employée pour le codage adaptatif à plusieurs niveaux réduit la complexité de calcul à celle d'un seul algorithme de décodage pour les différents poinçonnages, et en autorise la réalisation sur carte de traitement de signal.

### III. PROCEDURE

La procédure de transmission a pour but d'exploiter au mieux la propriété de redondance incrémentale des codes poinçonnés (Cf figure 3).

Le principe général, basé sur cette propriété, est de coder les blocs de données par un code RS externe détecteur d'erreurs, et d'appliquer ensuite à ce mot codé le code interne convolutionnel avec tous ses niveaux de poinçonnage. Les différents niveaux seront retransmis au fur et à mesure des tentatives de décodage.

Chaque trame ARQ gère l'information poinçonnée d'un nombre fixe de blocs de données; l'accusé émis à la réception de cette trame ARQ précise le décodage ou non de chacun des blocs.

La difficulté de réalisation d'une procédure ARQ tient dans l'incertitude que l'interlocuteur ait reçu correctement les informations de service qu'on lui a transmis. En particulier, la liaison retour est perturbée comme la liaison aller, et les accusés de réception des blocs peuvent ne pas être décodés. Il faut donc définir une procédure qui soit robuste à ce genre d'erreurs. Ceci est particulièrement vrai dans notre cas où les différents niveaux de retransmission des blocs au sein des trames donnent à celles-ci des longueurs variables : les accusés de réception ne sont pas émis à intervalles réguliers, et une mauvaise compréhension entre l'appelant et l'appelé peut avoir des conséquences catastrophiques.

La réponse que nous avons apportée à ce problème est d'émettre sur la voie aller un compte-rendu de l'accusé de réception. Ce compte-rendu est constitué par un bit indiquant si l'accusé a été correctement décodé. Ce bit peut être très protégé (répétition d'un ordre très élevé), et bénéficier de l'entrelacement sur la voie aller. On peut donc considérer qu'à moins d'une perte complète de la liaison, cette information passe. L'appelé est donc toujours informé de l'état de la procédure déroulée par l'appelant, que celui-ci réussisse ou non à décoder les accusés de réception (dans le cas négatif, on peut convenir par exemple de considérer que l'accusé indiquait un mauvais décodage de tous les blocs de la trame précédente).

Une autre caractéristique déjà abordée de cette procédure est l'entrelacement sur la voie aller. Cette caractéristique est nécessaire pour bénéficier de toutes les performances des codes convolutionnels sur un canal avec fading. Dans le cas présent, les durées d'entrelacement peuvent atteindre plusieurs dizaines de secondes. Il est donc impossible d'adopter le schéma de transmission classique dans lequel on émet un certain nombre de blocs et on attend l'accusé de réception de ces blocs avant d'émettre les suivants. Dans notre procédure, on commence à émettre les blocs suivants avant de recevoir l'accusé de réception des premiers blocs. La transmission d'une éventuelle redondance incrémentale pour ces premiers blocs n'interviendra

qu'à la trame suivante.

Ainsi, trame modem après trame modem, cette procédure adapte automatiquement le débit utile de la transmission au rythme de tentatives de décodage des mots codés; celui-ci s'établit implicitement mot par mot selon les réductions du poinçonnage apportées par les tentatives précédentes infructueuses sur les mêmes mots initialement codés. Cet ajustement à la capacité de transmission du canal est automatique: il ne nécessite pas d'arbitrage sur un niveau de codage a priori de la part du système opérant la communication. Redescendre l'adaptativité dans la couche système la plus proche du canal de transmission l'oblige à une complexité accrue pour assurer les logiques de répétition entre les automates de l'appelé et de l'appelant (fig. 1):

- au gré de la redondance incrémentale de longueur variable apportée à chacun des blocs de données selon leur niveau de retransmission, les trames ARQ sont de longueur variable, tout en restant synchrones avec le rythme des trames modem.

- avec un entrelacement conséquent, les temps de retournement d'alternat sont réduits en segmentant les trames ARQ transmises.

- le bon décodage du compte-rendu d'accusé constitue la clé de voute de la procédure.

### IV. SIMULATIONS

Le codage associé à la procédure est évalué dans un canal simulant les évanouissements selon une loi de Rayleigh. L'ensemble est donc supposé parfaitement entrelacé; on considérera cependant un retard d'entrelacement de 10 s.

La forme d'onde simulée suit la norme STANAG 4285: chaque trame comporte 128 symboles utiles modulés en MDP4; le débit brut d'information en ligne est de 1200 Bauds. Pour la démodulation pondérée, on suppose connaître parfaitement la qualité du canal.

La longueur de contrainte du code convolutif interne est de 5 (donc de complexité modérée) et son rapport  $R=1/3$ . La figure 4 détaille les niveaux de poinçonnage compatibles en débit d'une table cyclique de longueur  $P=8$ . [3] montre que ce schéma de poinçonnage 8/9, 8/10, 8/12, 8/16 et 8/24 est non catastrophique et fournit les performances optimales (Cf fig. 2) avec la matrice génératrice du code associé:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Le code externe RS(255,239,8) détecte et corrige les erreurs après les tentatives de décodage correspondant aux divers niveaux de poinçonnage; 9 trames modem sont d'abord transmises, puis 1, 2, 4 et 8, qui réassemblées et dépointonnées forment un ensemble de 24 trames modem à décoder.

Avec codage le débit en ligne varie entre 750 b/s et 2kb/s sur la voie aller; le débit utile s'en trouvera encore amoindri avec les informations de service sur les voies aller et retour. On suppose le même type de codage pour l'accusé, avec cependant un taux de répétition de 3, et enfin un décodage systématique des compte-rendus.



Chaque trame ARQ concerne 32 blocs de données différents, chacun avec son propre niveau de retransmission.

On supposera la procédure synchrone avec le rythme du modem; le temps de retournement est immédiat et l'accusé court (2 trames modem). De même, le compte-rendu dure une trame modem entrelacée avec les données utiles.

Tout bloc de données dont la transmission a débuté est transmis au plus tôt pour limiter l'encours de stockage intermédiaire en mémoire dans le processus de poinçonnage.

La figure 5 résume l'intérêt d'une telle approche globale:

- la dynamique de travail parcourue automatiquement est conséquente; Pour un rapport signal à bruit  $E_s/N_0$  variant entre 2 et 17 dB, le débit utile varie continuellement entre 700 b/s et 1800 b/s.

- Les gains sont d'environ 500 b/s à 800 b/s à  $E_s/N_0$  constant ou de 7 à 8 dB à débit utile constant par rapport à une procédure ARQ classique à répétition sélective fixé selon 3 modes distincts MDP2,4 et 8 dans les mêmes conditions de canal, supposé parfaitement entrelacé. Dans ces 3 modes le codage est concaténé: convolutif  $K=7$ ,  $R=1/2$  en interne, code détecteur CRC en externe.

- Le débit se rapproche en outre à 3 dB du débit critique théorique dans un tel canal.

Dans le même ordre d'idées, [1] montre aussi par ailleurs l'avantage du codage poinçonné par rapport aux techniques plus évoluées de combinaisons de codes avec répétition sélective avec une modélisation du canal diffus par une chaîne de Markov.

## V. CONCLUSION

On propose une approche globale pour la définition d'une liaison de transmission de données ARQ half duplex à fréquence fixe, adaptative en débit; l'association d'un codage poinçonné compatible en débit avec une procédure de répétition adaptée assure des débits utiles efficaces pour des conditions de propagation moyennement dégradées.

Les performances de la procédure avec codage adaptatif sont analysées en termes de débit utile sur un canal de référence. L'intérêt est désormais de les évaluer sur des liaisons réelles en tenant compte de diverses formes d'ondes haut- débit, série ou parallèle, et de la sensibilité à l'entrelacement.

Complétée pour des débits supérieurs par des techniques de modulations codées en treillis [4], l'approche combinée FEC/ARQ ainsi constituée permet d'assurer l'adaptativité en débit d'une liaison de données HF point-à-point fréquence fixe à l'alternat, c'est à dire assurer automatiquement sa disponibilité au débit le plus élevé possible pour une intégrité des messages spécifiée par le codage de la liaison ARQ.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] KALLEL. "Analysis of Memory and Incremental Redundancy ARQ Schemes Over a Nonstationary Channel", IEEE Trans. on Communications Vol.40 n°9 pp. 1474-1480

[2] LIN,COSTELLO. "Automatic Repeat ReQuest Error Control Schemes", IEEE Communications Magazine Vol.22 n°12

[3] HAGENAUER. "Hybrid ARQ/FEC Protocols on Fading Channels Using Rate Compatible Punctured Convolutional Coding", IEEE ICC 1987 21.4.1

[4] P. PITTET, D. PIREZ. "Modulations codées adaptées au fading de Rayleigh: performances sur canal HF ionosphérique", 14<sup>e</sup> colloque GRETSI 1993 Juan-les-pins.

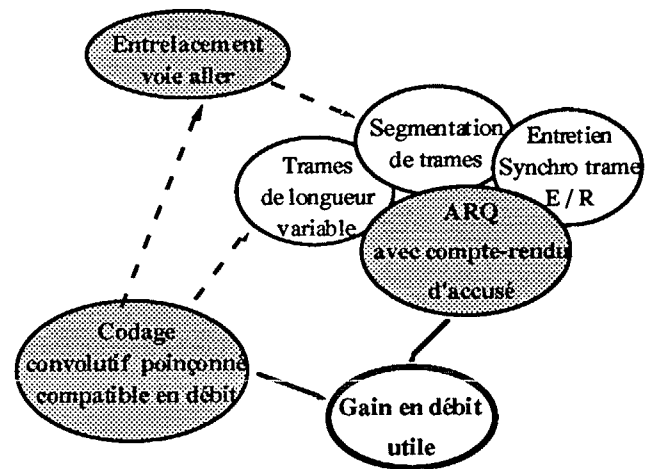


fig.1 Transmission FEC/ARQ avec Codes Poinçonnés

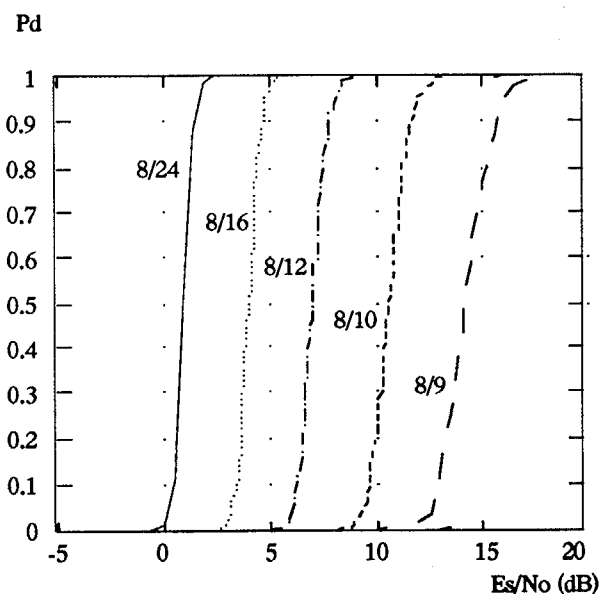


fig.2 Probabilité de décodage concaténé convolutif - RS selon divers niveaux de poinçonnage.

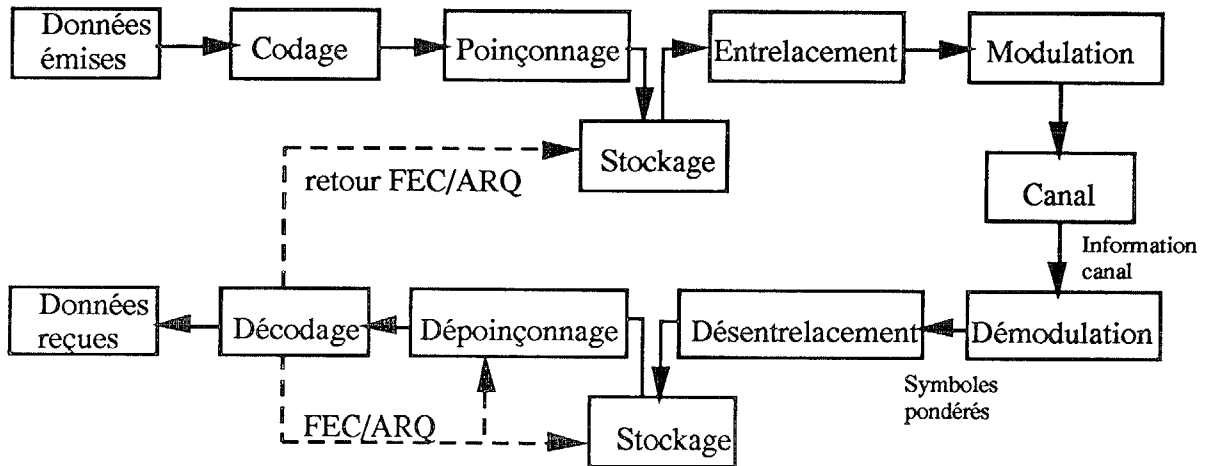
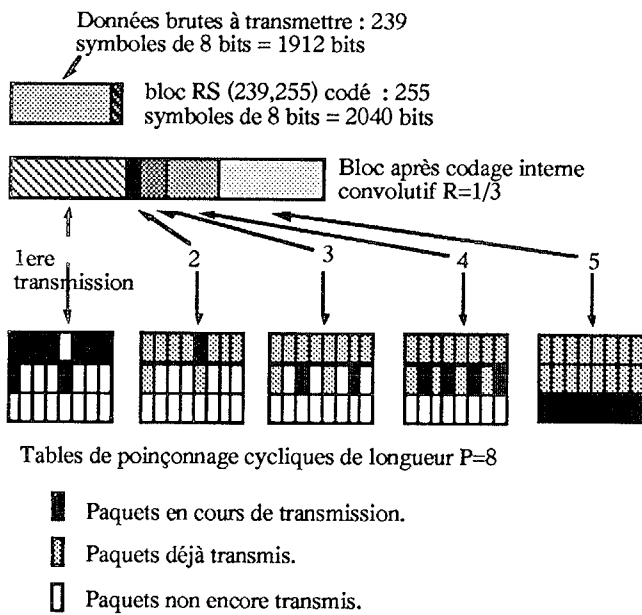
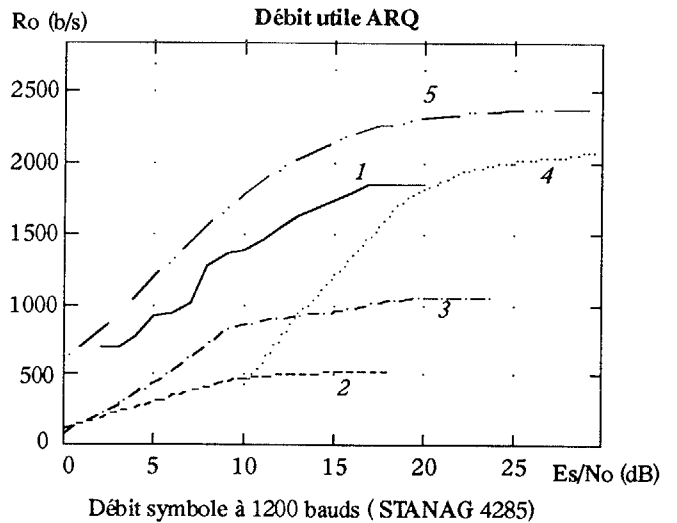


fig. 3 Synoptique de la transmission FEC/ARQ utilisant les codes poinçonnés.



1ere émission :	9/24 transmis	-> 9 dépoinçonnés
2nde :	1/24	-> 10
3eme :	2/24	-> 12
4eme :	4/24	-> 16
5eme :	8/24	-> 24



- 1 - Codes poinçonnés QPSK :  
code interne : convolutif K=5, R=1/3.  
code externe : RS(255,239,8).
- 2 - FEC/ARQ BPSK
- 3 - FEC/ARQ QPSK
- 4 - FEC/ARQ 8PSK  
code interne : convolutif K=7, R=1/2.  
code externe : CRC(544,512).
- 5 - Débit critique QPSK en fading de Rayleigh.

Fig.4 Schéma de poinçonnage sur la liaison aller.

fig.5 Evaluation du débit utile dans un canal de Rayleigh parfaitement entrelacé.