

UTILISATION DU CODAGE DANS LA TRANSMISSION  
DES TELEMESURES SPATIALES

Jean-Michel BOIS

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES  
18 Avenue Edouard Belin - 31055 TOULOUSE CEDEX

Ce papier fait le point sur l'application des techniques de codage canal dans les transmissions de télémesures spatiales. Après un bref rappel des caractéristiques spécifiques des télémesures spatiales et des codes jusqu'ici utilisés, l'accent est mis sur le travail de standardisation internationale du Comité Consultatif pour les systèmes de Données Spatiales (CCSDS). La deuxième partie est donc consacrée aux deux codes recommandés : Le code convolutionnel (7,1/2) et le code Reed-Solomon (255,223). L'intérêt de ces codes est analysée ainsi que leur mise en oeuvre. La troisième partie décrit les différentes méthodes de codage et de décodage. La dernière partie présente les méthodes et les architectures retenues par le Centre National d'Etudes Spatiales de Toulouse.

**1. INTRODUCTION**

La technologie actuelle permet la mise en oeuvre de techniques de détection et de correction d'erreurs très performantes. L'intérêt dans le domaine spatial est très net tant au niveau réduction des puissances des émetteurs embarqués et des diamètres des antennes sols, qu'au niveau qualité de la liaison. L'amélioration de la sûreté de la transmission permet d'approcher l'idéal qu'est un canal de transmission sans erreurs. La transmission des télémesures par paquets devient alors envisageable. En effet, contrairement aux réseaux sols et à la majorité des procédures de télécommande, la télémesure erronée ne peut pas être rémise et est définitivement perdue - par exemple, transmission temps réel des télémesures ARIANE, gros volume de données des télémesures image de SPOT. La souplesse de la transmission par paquets des télémesures n'est donc possible que si les entêtes sont parfaitement protégés par des codes détecteurs et correcteurs puissants.

Plusieurs codes ont déjà été utilisés dans le domaine spatial. Outre des codes de contrôles (CRC) et des codes simples comme ceux de Hamming, les premiers satellites à utiliser des codes complexes ont été les satellites US interplanétaires (Voyager, Pioneer), principalement des codes convolutionnels.

La sonde européenne GIOTTO a utilisé le code convolutionnel (7,1/2) et le code RS (255, 223) pour deux rythmes de bits (360 bits/s et 46 Kbits/s). Le satellite relais TDRS et la navette US utilisent un code convolutionnel (7,1/3). Le système international de télécommunication INTELSAT utilise un code de Golay 1/2 FEC avec un code BCH (127, 112). Pour les futures missions en cours de préparation, une standardisation apparaît déjà : Satellite européen ERS1 de télédétection - convolutionnel (7,12) 256 Kb/s satellite US et européen d'exploration de Jupiter GALILEO - convolutionnel (7,1/2) + RS (255, 223) 134 Kb/s ; plateforme EURECA - convolutionnel (7,1/2).

The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) member agencies have been cooperatively engineering a set of recommendations blue books for new standards to guide their respective future implementations.

This paper concerns only the Channel Coding techniques recommended for telemetry links. Channel Coding techniques which exploits redundancy to provide an error-correction capability can improve significantly the performance of the telemetry links.

A first part contains some information about the telemetries particularities and a presentation of the Consultative Committee for Space Data System (CCSDS). In the second part, we describe the convolutional (7,1/2) and the Reed-Solomon (223, 255) codes recommended by the CCSDS. Implementations considerations are studied in part three. Part four is devoted to CNES R & D actions.

Un travail d'harmonisation entre les agences spatiales sur l'ensemble des problèmes de transmission et traitement des données est en cours depuis 82. Le Comité Consultatif pour les Systèmes de Données Spatiales (CCSDS) a déjà publié des documents finaux sur la télémesure et la télécommande, et en particulier sur le codage canal. (ref 1). Les deux codes retenus et figés dans leurs caractéristiques fines sont le code convolutionnel (7,1/2) et le code Reed-Solomon (255, 223).

Ce travail de standardisation constitue un tournant important dans la politique des agences spatiales en permettant l'uniformisation des équipements bord et sol, et le support mutuel entre agences.

**2. CODAGE CANAL CCSDS****2.1 Code convolutionnel (7,1/2)**

L'idée générale du codage convolutionnel est de lier les bits les uns aux autres, de telle façon qu'un bit perdu peut-être recalculé à partir des bits déjà reçus.

Le code convolutionnel (7,1/2) génère deux bits pour un bit à coder, à partir de ce bit et des six précédents.

Ce type de codage offre une bonne protection aux bits faux aléatoirement et uniformément répartis. En d'autres termes, il est recommandé pour un canal de transmission à bruit blanc, ce qui est le cas le plus courant en transmission spatiale.

Le choix des paramètres (7,1/2) est un bon compromis entre la puissance de correction du code et la complexité de réalisation du décodeur.



Comme tous les codes, la transition entre une bonne et une mauvaise transmission est très brutale. La détérioration n'est pas progressive comme lorsqu'il n'y a pas de codage. Par la nature même du code et des techniques associées de décodage, les bits erronés au-delà du seuil de correction ont tendance à se regrouper en paquets d'erreurs.

**2.2 Codage REED-SOLOMON (255, 223)**

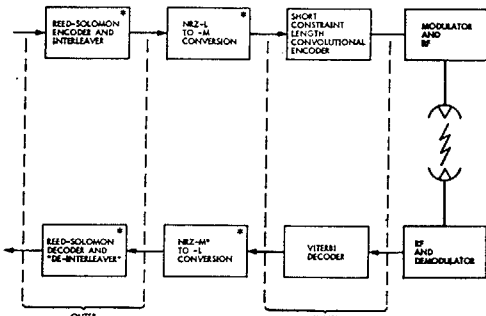
L'idée est d'ajouter à la suite de K symboles d'information plusieurs symboles de redondances pour former un bloc codé, ou mot, de N symboles.

Ce code protège bien des erreurs par paquets (bursts). Il est utilisé dans les supports de stockage (bandes ou disques magnétiques, compact-disque audio...), dans les transmissions avec interférences, et comme dans notre cas, derrière les décodeurs convolutionnels, ceux-ci générants des paquets d'erreurs au-delà de leur capacité de décodage.

**2.3 UTILISATION DES CODES CCSDS (réf 2,3,4)**

Deux architectures sont recommandées par le CCSDS :

- utilisation du code convolutionnel seul
- concaténation des deux codes, le code RS en code externe afin que le décodage RS corrige les erreurs éventuelles par paquet du décodeur convolutionnel.



\*- OPTIONAL (MAY BE BYPASSED)

Figure 1. Coding System Block Diagram.

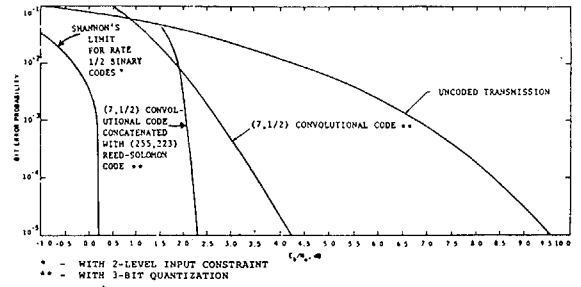
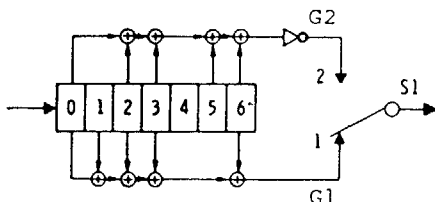
**3. METHODES DE CODAGE ET DE DECODAGE**

Ce chapitre présente les différentes techniques de codage et de décodage des deux codes CCSDS.

**3.1 Codage convolutionnel**

Le code CCSDS a donc les caractéristiques suivantes :

- Taux de codage : 1/2 c'est à dire 2 bits par bit d'information.
- Longueur de contrainte : 7 bits
- Vecteurs de connection : G1=1111001 ; G2=1011011
- Relation de phase : le bit G1 est le premier généré
- Inversion : le bit G2 est inversé



Performance of various codes in a Gaussian channel.

**3.2 Techniques de décodage convolutionnel**

Deux techniques permettent le décodage convolutionnel. Nous examinerons en détail la méthode usuelle du maximum de vraisemblance dite de "Viterbi". Mais nous indiquerons d'abord la philosophie de décodage et la méthode dite séquentielle.

**3.2.1. Philosophie de décodage**

L'idée générale est de trouver, à posteriori, la séquence de bits d'information la plus vraisemblable permettant de générer le symbole codé reçu.

**3.2.2. Décodage séquentiel (ref 5)**

Le décodage séquentiel explore les chemins les plus vraisemblables. Cependant, compte tenu du caractère aléatoire de la procédure, le décodeur peut s'engager sur des chemins incorrects. Il doit dans ce cas revenir en arrière pour retrouver ce chemin. L'importance du retour en arrière est variable.

En fonction du rapport signal sur bruit du message, le temps de décodage est donc plus ou moins long. Le décodeur est donc performant lorsqu'il y a peu d'erreurs. Par contre, le temps de décodage peut devenir prohibitif. Le problème de "tamponnage" des flots de données d'entrée et de sortie est difficile à résoudre.

**3.2.3. Technique de VITERBI**

Une autre méthode du maximum de vraisemblance appliquée au décodage convolutionnel a été proposée en 1967 par A.J. Viterbi.

L'algorithme de Viterbi donne une solution récursive optimale à l'estimation de la séquence d'états d'un processus de Markov à nombre d'états fini sur un temps discret.

La solution de Viterbi, contrairement au décodage séquentiel, est optimale car tous les chemins sont explorés. A chaque symbole reçu, le décodeur analyse toutes les possibilités. Le volume de calcul est important, mais est fixe pour un code donné. Le rythme de décodage est donc constant, et ne nécessite pas de tampons d'entrée/sortie.

Cette technique est réservée au petit code (K inférieur à 7). Pour des codes plus long, on prendra le décodage séquentiel.

Dans le cas du code convolutionnel CCSDS, c'est la méthode de Viterbi qui est utilisée. Deux architectures de décodeur Viterbi sont possibles.

**3.2.3.1. Architecture séquentielle**

Dans le cas du code (7, 1/2), la partie principale du décodeur - logique de calcul des métriques d'état et mémorisation des métriques (schéma 5) - est à répéter 64 fois pour décodé un bit. Si la complexité du décodeur séquentiel est moyenne, le débit est limité (environ 100 Kbits/s).

3.2.3.2. Architecture parallèle

La partie centrale de l'algorithme est effectuée par 64 processeurs élémentaires travaillant en parallèle. La complexité devient grande (environ 2500 équivalents boîtiers 16 broches), par contre le débit peut dépasser le Mbits/s.

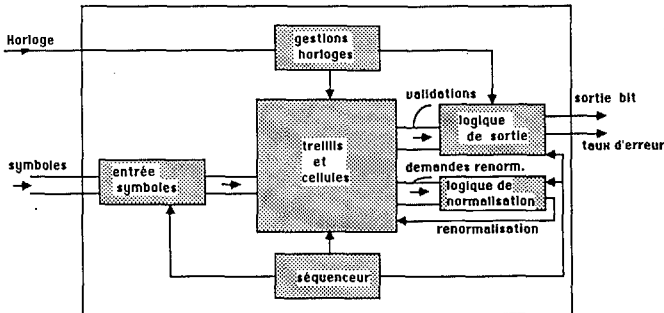


figure 4 . organisation d'un décodeur VITERBI

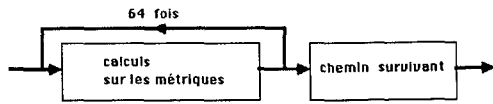


figure 5 .DECODAGE DE VITERBI SEQUENTIEL

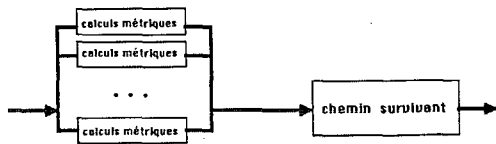


figure 6 .DECODAGE DE VITERBI PARALLELE

3.3. Technique de codage Reed-Solomon

Les paramètres caractéristiques des codes Reed-Solomon sont (avec les valeurs pour le code CCSDS) :

- M nombre de bits par symbole (8)
- K nombre de symboles d'information (223)
- N nombre total de symboles par bloc (par mot) (255)
- E capacité de correction du code (16 symb., soit 16\*8 bits)
- N-K = 2E nombre de symboles de contrôle (32)
- d = 2E + 1 distance minimale de Hamming du code (33)

Les symboles d'un code RS sont pris dans le corps fini de Galois de 2\*\*M éléments (256 pour le CCSDS). Deux mots de code de N symboles différents d'au moins d symboles.

On se reportera à une autre communication de Mlle Lambert et M. Rocher (Réf. 6) qui explicite les techniques de codage.

3.4. Techniques de décodage Reed-Solomon

Les étapes de décodage Reed-Solomon sont les suivantes :

- calcul des syndromes, c'est-à-dire de coefficients indicateurs d'erreurs dans le bloc. S'il n'y en a pas, les syndromes sont nuls ;
- calcul et factorisation du polynôme localisateur. Comme son nom l'indique, il permet de savoir combien il y a d'erreurs et où elles se trouvent dans le bloc (au niveau du symbole) ;

- calcul du polynôme des erreurs. Il donne la valeur de correction au niveau du bit ;
- correction.

Reprenons chaque étape et leurs algorithmes associés (Réf. 9).

3.4.1. Syndromes

- Evaluation directe ou par traces-duales (Berlekamp). Il s'agit en fait d'un recodage à partir des bits d'information. Si le reste calculé est identique au reste transmis, on conclue qu'il n'y a pas d'erreurs.
- Transformée discrète, algorithmes rapides de Winograd, Wagh et Morgera. Ces algorithmes donnent un jeu de coefficients utilisables par certains algorithmes des étapes suivantes.

3.4.2. Polynôme localisateur.calcul

Quatre algorithmes sont possibles. L'utilisation de l'un ou l'autre dépend du choix fait pour le calcul des syndromes.

- algorithme de Dornstetter
- algorithme de Berlekamp
- algorithme des fractions continues
- algorithme du PGCD étendu, ou d'Euclide modifié.

3.4.3. Polynôme localisateur.factorisation

Trois algorithmes existent. Comme précédemment le choix dépend des choix antérieurs.

- recherche de Chien : essai l'un après l'autre de toutes les racines possibles
- factorisation polynomiale
- factorisation par transformée.

3.4.4. Calcul des erreurs

- Récurrence à partir des coefficients du localisateur et transformée discrète inverse.utilisation d'algorithmes de transformée rapides. Cette méthode ne nécessite pas la factorisation du polynôme localisateur.

- Utilisation du polynôme évaluateur.

3.4.5. Correction

Ajout, dans le corps de Galois, des erreurs calculées avec les symboles reçus.

3.4.6. Enchaînements d'algorithmes

Plusieurs schémas sont possibles. On peut citer :

- algorithme systolique  
évaluation directe syndromes + PGCD étendu + récurrence et transformée discrète inverse ;
- architecture mixte matériel-logiciel  
évaluation directe ou Berlekamp + l'un des algorithmes de calcul du polynôme localisateur + Chien ou factorisation par transformée + polynôme évaluateur ;
- architectures programmables  
Winograd + PGCD étendu + factorisation par transformée + polynôme évaluateur ou Winograd + PGCD étendu + récurrence et Winograd inverse.



#### 4. ACTIONS MENEES PAR LE CNES

Membre actif du CCSDS, Le Centre National d'Etudes Spatiales a conduit depuis deux ans plusieurs actions :

- Etat de l'art sur les codes et évaluation des recommandations CCSDS Université de Toulon GECT Prof. Harari et Wolfmann (Réf. 7) ;
- Réalisation d'une chaîne logicielle de codage et décodage et simulation de solutions originales pour les décodeurs CCSDS Université P. Sabatier Toulouse AAEC Prof. Poli (Réf. 8) ;
- Etat de l'art technique et propositions de réalisations matérielles Enertec/Schlumberger (Réf. 9) ;

Plusieurs réalisations sont en cours :

- Codage convolutionnel et RS, banc de simulation (Réf. 6) ;
- décodeur Viterbi 100 Kbits/s à architecture séquentielle, en technologie traditionnelle.
- Décodeur RS 100 Kbits/s. Le système est bâti autour d'un bus VME. Une carte 68000 gère les entrées/sorties et multiplexe les blocs RS sur plusieurs cartes 68020 pour décodage. La gamme visée est de 100 Kbits/s à 1 M bits/sselon le nombre de cartes de traitement. L'enchaînement des algorithmes choisi est systolique (ref.10) ;
- Des études sont en cours pour la réalisation de décodeurs VLSI pour la gamme 10 Mbits/s.

#### 5. CONCLUSION

La standardisation dans le domaine des transmissions spatiales et en particulier les codes correcteurs télémesures est une étape importante au niveau coopération internationale. Les codes retenus, déjà largement utilisés dans différentes versions, permettent une transmission pratiquement sans erreur. L'utilisation de la notion de paquet devient possible.

Les efforts en cours au niveau des agences pour la réalisation d'équipements sont considérables. La montée en débit nécessite d'une part l'utilisation de technologie de pointe et l'utilisation d'algorithmes rapides et relativement simples à mettre en oeuvre. Le travail théorique sur ces codes est donc fondamental pour les équipements futurs.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] "Telemetry channel coding" .blue book. Consultative Committee for Space Data Systems - mai 84.
- [2] Bois-Rocher - "Télémesure par paquets. Paramètres typiques" - Doc. CNES CT/DTI/CM/TT n.86/115 - avril 86.
- [3] Rocher - "Télémesures par paquets et codage des télémesures" - Doc. CNES CT/DTI/CM/TT n.06 - janvier 85.
- [4] Rocher - "Codage canal télémesure CCSDS. performances, applicabilité et considérations d'utilisation" Doc. CNES CT/DTI/CM/TT n.86/159 - mai 86.
- [5] Benhallam - "Comparaison entre différentes procédures de décodage des codes convolutionnels" - Note interne - Lab. Traitement du signal GAPSE/ENSEEIH - avril 85.
- [6] Lambert-Rocher - "Réalisation matérielle d'une chaîne intégrée de codage canal. Banc de simulation d'une transmission codée" - GRETSI - Nice 87.
- [7] Wolfmann-Harari - "Bilan et perspectives sur le codage et le décodage du code de Reed-Solomon (255,223,33)" - Rapport de fin d'étude - Contrat GECT (Groupe d'Etude du Codage de Toulon)/CNES - octobre 85.
- [8] Poli-Thiong Ly-Randriananja - "Logiciel de simulation du codage/décodage des codes Reed-Solomon et convolutionnels proposés par le CCSDS" - Contrat AAEC-Lab. LSI - Université P. Sabatier - Toulouse/CNES - mars 86.
- [9] Culioli-Muller - "Etude de faisabilité d'un décodeur pour code Reed-Solomon et code convolutionnel concaténés" - Rapport de fin d'étude - Contrat ENERTEC/GIERS/CNES - août 85.
- [10] Ferreo - "Etude d'une méthode de décodage des télémesures Reed-Solomon" - Doc. CNES CT/DTI/CM/TT n.86/207 - juin 86.