

# *Égaliseur à Retour de Décisions Pondérées et à propagation d'erreurs limitée*

J.PALICOT

CNET /DMR/DDH  
C.C.E.T.T

Tel :02.99.12.42.87 Fax : 02.99.12.40.98  
BP59-35512CessonSevigné-France  
mail :jacques.palicot@cnet.francetelecom.fr

**Résumé-** Un égaliseur à retour de décisions pondérées est présenté dans cet article. Il s'affranchit du problème de la propagation des erreurs. Phénomène qui se produit lors de l'apparition d'une perturbation pendant la phase de poursuite de l'égaliseur. L'introduction d'une fonction de calcul de confiance de la sortie de l'égaliseur ERD permet de diminuer la propagation des erreurs. Deux méthodes différentes de calcul et d'utilisation de cette confiance sont présentées. Sans intervenir sur la structure de l'ERD, par une simple pondération des sorties de l'égaliseur, nous arrivons à diminuer, voire à supprimer, la propagation des erreurs pour une transmission numérique dans des canaux très perturbés. De plus, les performances de l'égaliseur à retour de décisions pondérées (ERDP) en mode autodidacte sont tout à fait satisfaisantes.

**Abstract-** In this paper a Weighted Decision Feedback Equalizer (WDFE) is presented. Unlike the classical one the proposed DFE does not suffer from the well-known error propagation phenomenon. This equalizer employs a device which computes a reliability value (i. e. a probability value for making the right decision). Two different techniques, which use this value in such a way as not to feed errors in the feedback loop, are described. The equalizer has been tested over several channels and promising simulation results are presented. In addition, as preliminary simulations show, the proposed Weighted Decision Feedback Equalizer (WDFE) offers very good performance in blind mode operation.

## **I- Introduction**

Cet article présente un moyen pour s'affranchir du problème de la propagation des erreurs lors de l'utilisation d'un égaliseur à retour de décisions (ERD).

Ce problème est en effet un problème majeur, bien connu et non résolu actuellement sauf dans [2], par une commutation structurelle et algorithmique en fonction d'un seuil d'Erreur Quadratique Moyenne (EQM). À cause de ce risque, difficilement quantifiable et prévisible, de propagation d'erreurs, l'ERD est très peu utilisé en pratique : les choix industriels allant, de préférence vers les solutions les plus fiables. Les seules utilisations connues correspondent soit à des canaux très faiblement perturbés (démodulateurs utilisant la norme de diffusion DVB-C sur des canaux câble par exemple) soit à des transmissions numériques incluant une séquence de référence transmise régulièrement. Une récente application industrielle d'envergure qui utilise un ERD est la proposition américaine (FCC) pour la diffusion de télévision numérique Hertzienne [3]. Pour pallier la propagation d'erreurs et converger lors de diffusion dans des canaux sévères une séquence de référence est transmise régulièrement toutes les 25 ms.

De nombreux auteurs ont étudié ce phénomène de propagation d'erreurs et des bornes permettant de «l'encadrer» ont été définies [4], [5]. Dans ce papier, nous considérons la propagation d'erreurs comme le résultat à la fois de la réinjection d'erreurs dans la partie réursive du

filtre ERD et de la divergence de l'algorithme LMS-DD de l'ERD (due en partie à une «fausse erreur», celle-ci est en effet calculée à partir de la décision erronée). Il est donc très difficile de distinguer la contribution exacte de chacun des deux problèmes dans la divergence globale de l'ERD, nous nous attacherons par conséquent à intervenir sur chacun des deux problèmes afin de diminuer globalement le phénomène de propagation des erreurs.

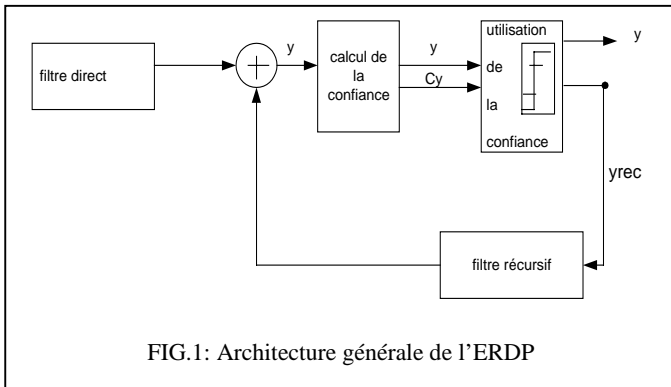
L'idée présentée dans cet article est la suivante : avant d'envoyer la décision (donc éventuellement une fausse décision) dans la partie réursive du filtre, nous calculons une valeur de confiance, un indice de vraisemblance, de cette décision. Cette valeur est ensuite utilisée suivant une certaine règle. Dans cet article, deux méthodes différentes, à la fois pour le calcul de la confiance et l'utilisation de celle-ci, sont présentées.

Une idée un peu similaire est suggérée dans [7], le cas de l'ERD n'y est cependant traité que de façon très rapide. Le contexte différent développé dans notre proposition s'attache plutôt à montrer les possibilités d'un Égaliseur à Retour de Décisions Pondérées (ERDP) pour limiter la propagation d'erreurs.

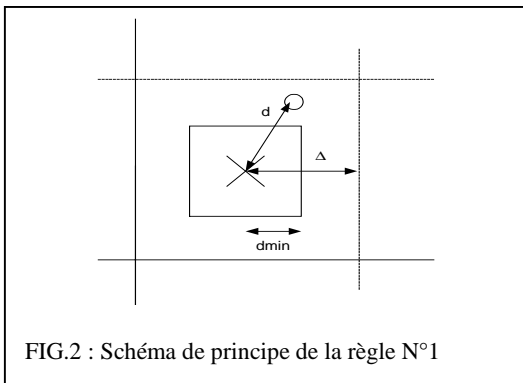
Les deux méthodes pour réaliser cet égaliseur sont présentées au second paragraphe, le troisième paragraphe présente les performances de l'ERDP.

## II- ERD avec mesure de confiance

La figure N°1 présente le synoptique de l'ERDP proposé. À l'ERD classique est ajouté deux fonctions : la première correspond au calcul de la confiance de la sortie  $y$  du filtre. La deuxième correspond à la règle d'utilisation de cette confiance. Dans ce papier, pour chaque fonction deux méthodes différentes sont présentées. Dans tous les cas, les coefficients des filtres directs et récursifs sont pilotés par un algorithme LMS-DD.



Afin de calculer la confiance de la sortie du filtre, deux solutions différentes ont été expérimentées.



### II-1- Première solution pour l'ERDP

#### II-1-1 Règle n°1 pour le calcul de la confiance

Cette première solution calcule la distance entre la donnée  $y$  et la décision la plus proche (le symbole le plus probable a priori celui qui serait décidé dans le cas de l'ERD classique) et réalise en même temps la règle d'utilisation de cette confiance :

La valeur de la confiance de la sortie du filtre global  $y$  est égale à  $(1-d/\Delta)$ .

#### II-1-2 Utilisation de la confiance

Cette première règle proposée d'utilisation de la confiance est la règle n° 1 suivante (éq. 1) :

- Si confiance suffisante (supérieure à un seuil minimal) alors la donnée récursive = décision
- Sinon alors donnée = sortie filtre avant décision

La mise en oeuvre de cette règle est excessivement simple (figure2). En effet l'utilisateur définit un seuil minimal appelé  $d_{min}$  (normalisé à  $\Delta$ ). Le seuil de confiance associé est égal à

$(1-d_{min}/\Delta)$ . Autour de l'éventuel symbole décidé on trace un carré ou un cercle de dimension  $d_{min}$ . Si la donnée  $y$  en sortie de l'égaliseur est à l'intérieur de ce carré alors la donnée récursive  $y_{rec}$  = décision sinon  $y_{rec} = y$ . À ce niveau, d'autres règles peuvent, bien entendu, être utilisées. C'est la règle qui m'a semblé la plus simple en effet si le seuil établi pour la confiance est très élevé alors nous sommes dans une configuration Egaliseur Linéaire Récursif classique (cas limite ou  $d_{min}=0$ ) sinon à l'inverse nous nous retrouvons dans un cas proche de l'ERD classique (cas ou  $d_{min} = \Delta$ ).

$$\text{Si } d < d_{min} \quad \text{alors } Y_{rec} = Y_{estimée} \quad (1)$$

$$\text{Sinon } Y_{rec} = Y$$

- si  $d_{min} = \Delta$ , nous sommes en présence d'un ERD classique, pour tous les points  $d < \Delta$
- si  $d_{min} = 0$ , nous sommes en présence d'un Egaliseur Linéaire Récursif

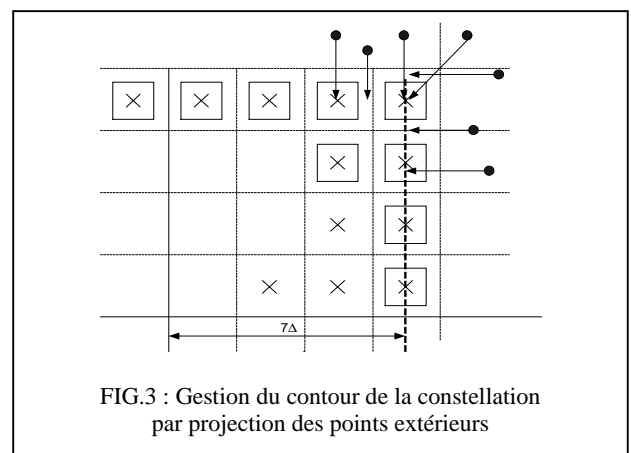
En ce qui concerne l'erreur de l'algorithme, la règle est la suivante :

$$\text{Si } d < d_{min} \text{ alors erreur} = Y_{rec} - y = \text{erreur classique} \quad (2)$$

$$\text{Sinon erreur} = 0$$

### II-1-3 Amélioration des performances avec gestion du contour de la constellation

Les performances de cet égaliseur peuvent être améliorées en gérant de manière différente les points extérieurs de la constellation. Le nombre de symboles concernés est de 28 dans le cas de la MAQ64. En effet lorsque la sortie du filtre est à l'extérieur de la constellation, même à une distance supérieure à  $d_{min}$ , le risque d'erreur est très faible et dans ce cas la sortie  $y$  est projetée sur le bord de la constellation (si le point est supérieur à  $7\Delta + d_{min}$  alors  $y$  est projeté sur le bord à  $7\Delta$  comme cela est présenté sur la figure n°3). Les règles sur  $Y_{rec}$  et l'erreur restent inchangées en considérant ce nouvel  $y$ . L'amélioration des performances est très sensible.



Il est donc très clair que les résultats vont être dépendants de la valeur  $d_{min}$  que se fixe l'utilisateur. Le  $d_{min}$  optimal sera dépendant du canal considéré et tout particulièrement du niveau de bruit. C'est pour cette raison que la seconde solution présentée ci-après est très séduisante car elle ne dépend pas d'une valeur  $d_{min}$ .

## II-2- Seconde solution pour l'ERDP

### II-2-1 Règle n°2 pour le calcul de la confiance

Cette seconde solution calcule une confiance suivant une formulation «plus classique», analogue à ce qui se pratique dans le monde du décodage canal à entrées pondérées (figure 4).

$$C_y = \frac{\text{Min} ( dx +, dy -, dx -, dy + )}{\Delta} \quad (3)$$

### II-2-2 Utilisation de la confiance

La règle proposée d'utilisation de cette seconde méthode de calcul de la confiance est la règle n° 2 suivante :

$$- Y_{rec} = C_y \cdot Y_{estimée} + (1 - C_y) \cdot y \quad (4)$$

$$- \text{erreur} = C_y \cdot (Y_{estimée} - y) = C_y \text{ erreur classique} \quad (5)$$

Lorsque  $C_y=0$  le filtre global est un filtre linéaire récursif, Alors que lorsque  $C_y=1$  l'égaliseur ( filtre +algorithme) est un ERD classique. L'ERDP peut donc être considéré comme une transition douce entre un égaliseur proche de l'égaliseur linéaire récursif et un ERD. En introduisant les valeurs des eq.4 et 5 dans l'équation classique du LMS pour le vecteur coefficient  $\vec{G}$  du filtre récursif, on obtient :

$$\vec{G}_k = \vec{G}_{k+1} - \mu C_y e_k \left[ \vec{C}_y \cdot \vec{y} + \left( 1 - C_y \right) \cdot \vec{y} \right] \quad (6)$$

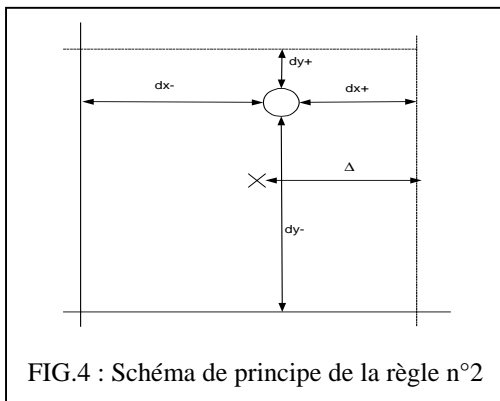


FIG.4 : Schéma de principe de la règle n°2

On constate que le pas de convergence de l'algorithme devient un pas adaptatif à chaque itération. Il est pondéré par la confiance de la sortie considérée.

### II-2-3 Amélioration des performances avec la gestion du contour de la constellation

Avec cette seconde règle une amélioration des performances est aussi possible en gérant de manière différente les points extérieurs de la constellation. Cette fois tous les points dont la distance est supérieure à  $7\Delta$  sont projetés sur  $7\Delta$ .

## III- Analyse des performances

Le contexte de simulation est issu de [6]. Il s'agit de la transmission d'une MAQ 64 suivant le schéma DVB-câble à travers deux canaux stationnaires différents. Le premier issu de [6] est un canal légèrement perturbé. En effet il comprend un écho de 10 dB à 30Ts. Le second issu de [6] et de [2] est un canal très fortement perturbé et très difficile à égaliser. Il est défini par la réponse impulsionnelle suivante :

$$h = (0.8264, -0.1653, 0.8512, 0.1636, 0.81)$$

Pour ces deux canaux une perturbation a été volontairement ajoutée pendant la phase de poursuite des égaliseurs ceci afin

de générer un phénomène de propagation d'erreurs dans le cas de l'ERD classique et de valider l'efficacité de la solution proposée. Tous les égaliseurs, optimisés par un LMS-DD, ont convergé à l'aide d'une séquence d'apprentissage. En effet le propos de cet article n'est pas l'égalisation autodidacte mais la suppression de la propagation des erreurs en phase de poursuite. Nous avons tracé les résultats obtenus avec un ERD optimal. L'ERD optimal est un égaliseur «virtuel» car les données utilisées pour le filtre récursif et l'algorithme sont les données émises ! Donc si elles sont connues au récepteur, il n'est pas besoin d'égaliser. Cependant plusieurs auteurs [6], [2] considèrent que c'est l'ERD avec laquelle il faut se comparer parce qu'il possède les performances optimales. Nous avons tracé aussi les performances d'un ERD classique qui part vite en propagation d'erreurs lorsque la non-stationnarité apparaît. Toutes les courbes représentent l'EQM vraie en fonction du nombre d'itérations, ceci afin d'éviter les problèmes de mesure et d'interprétation lorsque l'on utilise l'EQM estimée.

### III-1- Résultats pour la 1<sup>ère</sup> solution de l'ERDP

La figure N°5 présente les résultats obtenus avec le canal n°1 et la figure n°6 avec le canal n°2; la perturbation ajoutée étant, dans ces deux cas, une augmentation temporaire de la puissance du bruit (la période d'apprentissage étant de 5000 itérations, la convergence obtenue est moins bonne fig.6 que fig.5 le canal étant beaucoup plus sévère) . Dans ces deux cas après la convergence apparaît la propagation d'erreurs de l'ERD classique alors que la solution proposée pour une valeur de  $d_{min}=0.6$  reste stable (fig.5) ou converge de nouveau (fig.6).

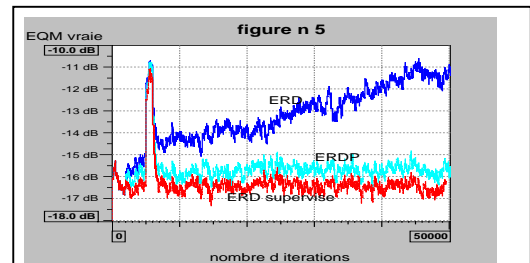


FIG.5 : performance de l'ERDP comparée à celle de l'ERD classique.  
Channel 1 SNR=17dB  
Règle 1 avec  $d_{min}=0.6$

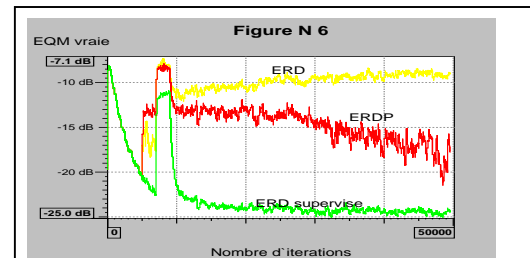


FIG.6 : performance de l'ERDP comparée à celle de l'ERD classique.  
Channel 2 SNR=30dB  
Règle 1 avec  $d_{min}=0.6$

Sur la figure n°7 sont présentées les performances de l'ERDP en fonction de  $d_{min}$  dans les deux situations avec et sans gestion du contour de la constellation pour la règle n°1. On peut constater que dans cette situation le  $d_{min}$  optimal est proche de 0.9 et que la gestion du contour apporte une amélioration sensible. De nombreux résultats ont montré que la vitesse de convergence s'accroît avec l'augmentation de  $d_{min}$ , avec cependant des pics de remontée d'EQM plus importants et plus nombreux. Ceci est évident car plus  $d_{min}$  est important plus le nombre d'erreurs pris en compte par l'ERDP sera élevé.

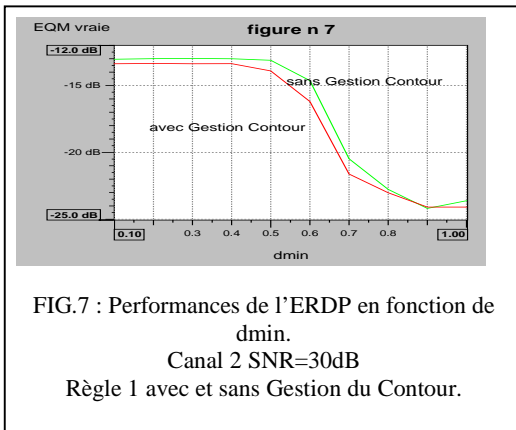


FIG.7 : Performances de l'ERDP en fonction de  $d_{min}$ .  
Canal 2 SNR=30dB  
Règle 1 avec et sans Gestion du Contour.

### III-2- Résultats pour la 2<sup>nd</sup>e solution de l'ERDP

La figure n°8 présente le même type de résultats, pour le canal n°2 mais cette fois la perturbation ajoutée est un écho temporaire dans la réponse impulsionnelle, et l'ERDP utilise la seconde règle. De nouveau on peut constater une très grande efficacité de l'ERDP.

Même si cette étude ne fait pas directement l'objet de cet article, les performances de l'ERDP en mode autodidacte, très satisfaisantes, sont présentées. Lors de cette simulation comme le mode autodidacte ne fonctionnait pas avec une MAQ64 nous avons transmis une MAQ16, dans le canal 2 sans ajout de non-stationnarité.

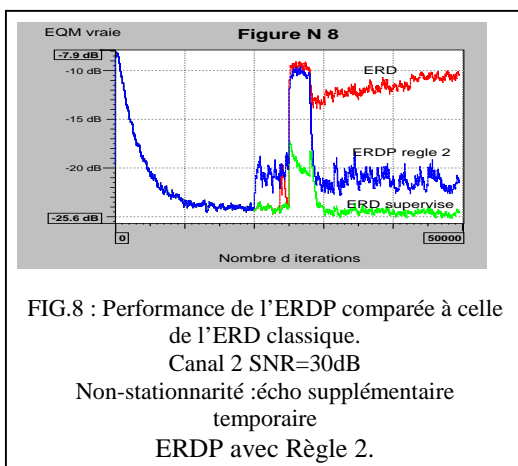


FIG.8 : Performance de l'ERDP comparée à celle de l'ERD classique.  
Canal 2 SNR=30dB  
Non-stationnarité :écho supplémentaire temporaire  
ERDP avec Règle 2.

Comme il est spécifié dans [2] aucun égaliseur autodidacte classique ([7], [8] et [9]), ne fonctionnent dans ces conditions. Les performances sont donc à comparer à celles de [2] et à celles de l'ERD supervisé.

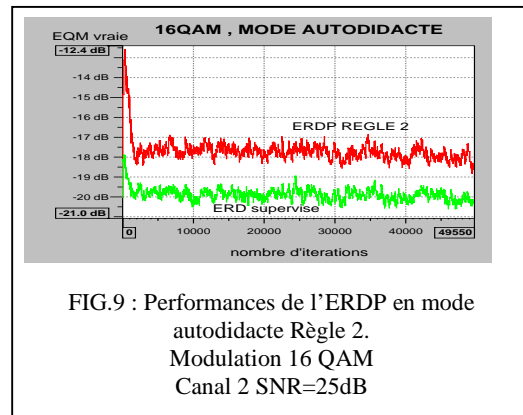


FIG.9 : Performances de l'ERDP en mode autodidacte Règle 2.  
Modulation 16 QAM  
Canal 2 SNR=25dB

Nous constatons sur la figure 9 une EQM résiduelle supérieure de 2dB à celle de l'ERD supervisé, ce qui s'explique par le bruit ramené dans la partie réursive.

## IV- conclusion

La solution proposée s'avère donc très efficace car il faut en effet comparer les améliorations aux résultats de l'ERD avec propagation d'erreurs. Il apparaît que la seconde méthode de calcul de la confiance offre l'intérêt d'être entièrement automatique et indépendante de l'utilisateur. Il est bien entendu possible d'imaginer toute combinaison des lois présentées ici à la fois pour le calcul de la confiance et l'utilisation de celle-ci.

L'ERDP, outre ses performances présentées dans cet article, par cette nouvelle idée d'introduire une confiance dans la structure même de l'égaliseur, ouvre la porte à d'autres études et à une solution d'ERD autodidacte performante.

### Remerciements:

L'auteur tiens à remercier Christian Roland du CCETT et Moïse Djoko Kouam de Gainve Conseil pour leur utile contribution à ce travail.

### Références :

- [1] : J.G. Proakis, «Digital Communications», McGraw-Hill Book, 1989
- [2] : J. Labat, O. Macchi, C. Laot, «Adaptive Decision Feedback Equalization :Can you skip the training period ? » IEEE Trans.on com.vol46 n°7, July 1998
- [3] :R. Hopkins, «Digital Terrestrial HDTV For North America :The Grand Alliance HDTV System» IEEE trans. on cons.elec. vol 40, n°3, August 1994
- [4] : D.L. Duttweiler, J.E. Mazo, D. Gmesserschmitt, « An upper bound on the error probability in decision feedback equalization », IEEE Trans.on Inf.Theory vol IT20, July 1974.
- [5] : C. Lutkemeyer, T.G. Noll, «A Probability state model for the calculation of the BER degradation due to error propagation in decision feedback equalizers » ITC Porto Carras Greece, June 1998.
- [6] : D. Mottier, «Association des fonctions d'égalisation, de synchronisation et de décodage canal pour les modulations à grande efficacité spectrale » Thèse INSA Rennes novembre 1997.
- [7] :G. Picchi, G. Prati, «Blind equalization and carrier recovery using a « stop and go » decision directed algorithm » IEEE trans on com vol 35, september 1987.
- [8] : K. Hilal, P. Duhamel, "A blind equalizer allowing soft transition between the CMA and the DD algorithm for PSK modulated signals" in proc ICC, Geneva, Switzerland, Mai 1993.
- [9] : D.N. Godart "Self-recovering equalization and carrier tracking in two dimensional data communications system", IEEE trans.on. com.vol COM28, nov 1980.