

TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

EGALISATION AUTOADAPTATIVE D'UNE TRANSMISSION IONOSPHERIQUE
DE DONNEES

Mr. VAN UFFELEN

Société T.R.T

RESUME Dans un système de transmission autoadaptatif le signal reçu est corrigé pour compenser les distorsions apportées par le canal de transmission. L'application de ce principe aux liaisons ionosphériques, permet de s'affranchir des effets des chemins multiples avec un égaliseur apte à suivre les fluctuations du milieu de propagation.

Nous décrivons, au cours de cet exposé, une structure particulière de filtre qui satisfait aux contraintes imposées par les liaisons ionosphériques. Ce filtre est la base du système de transmission dont nous présentons les principales fonctions.

SUMMARY In an adaptive transmission system, corrections of the received signal are made in order to balance distortions afforded by the transmission path. The implementation of this principle to ionospheric links allows to get free of multipath effects by the mean of an equalizer which is able to follow the fluctuations of the propagation medium.

In this paper, a particular configuration of filter is described, which allows to satisfy at the constraints which are brought by ionospheric path characteristics.

This filter represents the basis of this data transmission system and here its main characteristics are explained.

EGALISATION AUTOADAPTATIVE D'UNE TRANSMISSION IONOSPHERIQUE DE
DONNEES -.

Monsieur VAN UFFELEN - Société T.R.T

Les transmissions de données sur canal ionosphérique sont limitées en vitesse par les distorsions dues à la propagation. Pour ce type de liaison, les systèmes dans lesquels l'information est transmise sur un multiplex de fréquences, permettent d'obtenir des débits binaires importants au prix d'un matériel complexe et d'une grande sensibilité aux fading sélectifs profonds.

Le Kineplex qui utilise ce principe, transmet dans sa version la plus élaborée, 3000 bits/s à l'aide de 20 sous-porteuses.

Cet exposé décrit un système dans lequel l'information est transmise en série à grande vitesse (1200 bauds dans cette première version), le signal reçu étant traité pour compenser les distorsions.

Dans un premier paragraphe sont rappelées les caractéristiques de la propagation ionosphérique.

Le deuxième paragraphe est consacré au filtre auto-adaptatif.

Dans une troisième partie sont présentées les méthodes de modulation, démodulation, synchronisation.

En conclusion, sont donnés quelques résultats de mesures en laboratoire.



I - PROPAGATION IONOSPHERIQUE

La propagation ionosphérique à des distances supérieures à 1000 Km s'effectue par réflexions sur les couches ionisées. Elle est caractérisée par l'existence de trajets multiples reliant l'émetteur au récepteur.

La réponse percussive du canal de transmission est liée aux propriétés des couches ionisées, qui sont une fonction aléatoire du temps et de la fréquence.

Le signal transmis subit un étalement dû aux trajets multiples et une modulation causée par les variations des propriétés du milieu de propagation.

Les fluctuations dont la durée est très inférieure à la durée du signal élémentaire ne sont mises en évidence que sous forme de valeur moyenne.

A l'opposé les variations lentes qui ont des durées beaucoup plus longues que le plus long signal émis, produisent une dégradation du rapport signal à bruit moyen.

Les variations intermédiaires, dont l'ordre de grandeur est la seconde, s'observent aisément sur le signal reçu. Leurs effets sur les performances de la liaison dépendent du traitement du signal à la réception.

L'étude qui a été menée a permis de mettre en évidence les moyens de combattre les effets de ce dernier type de variation.

L'ionosphère est considérée comme équivalente à un quadripôle dont la réponse percussive varie dans le temps et avec la fréquence de transmission. L'étalement de cette réponse percussive peut atteindre, en moyenne, 4 à 5 ms. Pour des propagations exceptionnelles la dispersion peut atteindre 10 ms.

La nature du bruit superposé au signal dépend de la fréquence utilisée, de l'heure et du lieu de réception.

Le bruit à considérer peut être aussi bien gaussien qu'impulsif, les performances sont évidemment différentes dans ces deux cas.

.../...

II - FILTRAGE AUTOADAPTATIF

Un filtre adapté à un canal de transmission possède une fonction de transfert inverse de celle de ce canal.

Un filtre autoadaptatif est un filtre dont les caractéristiques s'ajustent automatiquement à partir des signaux reçus dans le sens de l'adaptation. Il est composé d'un filtre à caractéristiques variables et d'un organe de calcul qui détermine les paramètres de l'élément variable.

Les études sur l'égalisation autoadaptative ont été très orientées vers son application aux transmissions de données à grand débit (4.800 à 9.600 bits/s) sur ligne téléphonique [1 à 5].

Ces canaux sont le plus souvent affectés de distorsions de phase, le rapport signal bruit y est généralement bon (de l'ordre de 30 dB), ce qui autorise, avec égalisation auto-adaptative, des transmissions à 3200 bauds avec une modulation à 3 niveaux en bande latérale résiduelle.

II.1 - Filtres à caractéristiques variables

L'exposé se limitera aux filtres échantillonnés réalisables avec des procédés numériques.

Deux types de filtres sont habituellement utilisés :

- filtre transversal
- filtre récursif avec circuit de décision inséré dans la boucle.

II.1.1 - Filtre transversal

Le schéma d'un filtre transversal est donné en figure II.1.1. Le signal filtré $y(kT)$ est la somme des produits des coefficients du filtre $A(i)$ par les échantillons correspondants du signal reçu $s[(k-i)T]$

$$y(kT) = \sum_{i=-N}^{+N} s[(k-i)T] \cdot A(i)$$

T est la période d'échantillonnage.

.../....



Le nombre de coefficients du filtre est impair et égal à $2N + 1$, mais ce n'est pas une nécessité.

En utilisant la transformée en z , la fonction de transfert $A(z)$ du filtre s'écrit :

$$A(z) = \left[A(-N)z^{-N} + A(-N+1)z^{-N+1} + \dots + A(0) + \dots + A(+N-1)z^{+N-1} + A(N)z^N \right] z^N$$

C'est une fonction polynomiale en possédant $2N$ racines.

II.1.2 - Filtre récursif avec décision insérée dans la boucle

Ce filtre n'est utilisable que si le signal transmis est un élément $\theta(k)$ d'un alphabet de dimension déterminée. Son schéma est donné en figure II.1.2.

Le signal filtré $y(kT)$ est égal à :

$$y(kT) = \sum_{i=-N}^0 S \left[(k-i)T \right] \cdot A(i) - \sum_{j=1}^L \hat{\theta}(k-j) B(j)$$

$\hat{\theta}(k-j)$ est l'élément de l'alphabet le plus proche de $y \left[(k-j)T \right]$. Si la décision est correcte $\hat{\theta}(k-j) = \theta(k-j)$.

Les $B(j)$ sont les coefficients de la partie récursive, au nombre de L .

A et S ont même signification que pour le filtre transversal.

Si l'égalisation est rigoureuse $y(kT)$ appartient à l'alphabet.

En employant la transformée en z la fonction de transfert du filtre récursif s'écrit :

$$G(z) = \frac{A(z)}{1+B(z)}$$

.../...

$$A(z) = \sum_{i=-N}^0 A(i) z^i$$

$$B(z) = \sum_{j=1}^L B(j) z^j$$

Le filtre récursif possède une fonction de transfert exprimée par le rapport de deux polynômes en z , avec N zéros dus à la partie transverse et L pôles dus à la partie récursive.

Ce filtre permet de soustraire du signal à égaliser, les interférences causées par les données reçues antérieurement.

La décision étant incluse dans la boucle, cette soustraction est faite avec un signal exempt de bruit,

Elle est donc rigoureuse en absence d'erreur de décision.

II.2 - Réglage du filtre variable

Dans un système d'égalisation autoadaptatif le filtre doit être réglé pour réduire les distorsions. Les distorsions restantes après filtrage peut être évaluées par :

- la probabilité d'erreur
- la distorsion crête
- l'erreur quadratique moyenne.

Les coefficients du filtre peuvent être calculés pour rendre minimal l'un quelconque de ces critères.

II.2.1 - Probabilité d'erreur

Rendre minimale la probabilité d'erreur correspond au but à atteindre, pour une transmission de données.

La réalisation d'un système utilisant ce critère est très complexe. C'est le cas, en particulier, pour l'égalisation d'une liaison ionosphérique, où les caractéristiques du canal ne sont pas connues, même au sens statistique.

.../...



II.2.2 - Distorsion crête

La distorsion crête est définie de la manière suivante : soient $h(i)$ les coefficients de la réponse percussive échantillonnée de l'ensemble canal de transmission et filtre autoadaptatif. La distorsion crête D_c est :

$$D_c = \frac{1}{h(0)} \sum_{i \neq 0} |h(i)|$$

Pour une égalisation parfaite nous avons :

$$h(0)=1 \quad h(i)=0 \text{ pour } i \neq 0$$

$$\text{d'où } D_c=0$$

L'algorithme appelé "zero forcing", permettant d'ajuster les coefficients pour satisfaire ce critère en utilisant le signal reçu, conduit à un organe de calcul simple. Il a été étudié de manière approfondie par LUCKY (2). Il présente l'inconvénient de ne converger que si le signal reçu satisfait à certaines conditions, dont l'une est que la distorsion crête soit inférieure à 1.

II.2.3 - Erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne est exprimée par :

$$\bar{\epsilon} = E \{ [S(kT) - \theta(k)]^2 \}$$

E désignant l'espérance mathématique.

Rendre minimale l'erreur quadratique moyenne consiste à réduire les distorsions suivant la méthode des moindres carrés.

L'algorithme utilisé pour déterminer les coefficients qui satisfont ce critère est plus complexe que celui rendant minimale la distorsion crête. Par contre, il converge quelles que soient les distorsions apportées au signal, sous réserve que le pas d'incrémentations Δ de l'algorithme soit suffisamment petit.

.../...

La détermination des coefficients d'un filtre transversal rendant minimale l'erreur quadratique moyenne a été faite par NIESSEN (3). Pour le filtre récursif il sera fait référence à MONSEN (6).

II.3 - Efficacité des différents filtres

Le filtre autoadaptatif voit la réponse percussionnelle échantillonnée du canal de transmission. Le canal de transmission sera défini comme la chaîne comprise entre la sortie du modulateur et l'entrée de l'échantillonneur précédant le filtre autoadaptatif.

En utilisant la transformée en z la réponse percussionnelle se met sous la forme :

$$H(z) = \sum_{i=-x}^{+x} h(i)z^i$$

Pratiquement cette réponse est bornée dans le temps

$$H(z) = \sum_{i=-n}^{+m} h(i)z^i$$

Les bornes n et m sont choisies pour que $h(0)$ soit l'échantillon de plus grande amplitude.

Le but de l'égalisation est de trouver une fonction de transfert $G(z)$ telle que :

$$H(z) \cdot G(z) = 1.$$

Souvent $G(z)$ n'est obtenue qu'à une certaine approximation près due soit au bruit, soit aux caractéristiques de la réponse percussionnelle et au filtre utilisé.

Comparons les performances des deux types de filtre en prenant comme critère celui de rendre l'erreur quadratique moyenne minimale.

.../...



II.3.1 - Filtre transversal

Le filtre transversal possède une fonction de transfert polynomiale en z . Les zéros de la réponse percussionnelle sont compensés par la création d'autres zéros. L'égalisation n'est donc rigoureuse que si le filtre a une longueur infinie.

Pour un filtre de longueur finie la qualité de l'égalisation est une fonction de la position du ou des zéros de la réponse percussionnelle échantillonnée du canal à égaliser, par rapport au cercle unité.

La figure II.3.1 montre la variation de l'erreur quadratique moyenne résiduelle en fonction du module de la racine de la réponse percussionnelle composée de deux échantillons distants d'une période d'échantillonnage. Les courbes sont relatives à deux longueurs de filtre (9 et 15 coefficients) ; le signal reçu est exempt de bruit.

L'égalisation est médiocre quand le module du zéro est voisin de 1. Pour un zéro égal à 1 l'erreur quadratique moyenne résiduelle est égale à :

$$\frac{1}{1+N} \quad \text{pour un filtre de longueur } N$$

99 coefficients seraient nécessaires pour obtenir une erreur quadratique moyenne de 10^{-2} .

Le filtre transversal n'égalise pas de manière satisfaisante les canaux dont la réponse percussionnelle échantillonnée possède des racines dont le module est proche de l'unité.

Ce cas peut se présenter dans une liaison ionosphérique.

.../...

II.3.2 - Filtre récursif

La fonction de transfert d'un tel filtre est le quotient de deux polynomes en z

$$G(z) = \frac{A(z)}{1+B(z)}$$

$A(z)$ ne comporte que des termes ayant une puissance négative ou nulle en z

$B(z)$ contient uniquement des termes ayant une puissance positive en z

La réponse percussionnelle après filtrage est :

$$\frac{A(z) \cdot H(z)}{1+B(z)}$$

Pour une égalisation parfaite le produit $A(z) \cdot H(z)$ doit être égal à $1+B(z)$. La partie récursive égalise la convolution des réponses percussionnelles de la partie transversale du filtre et du canal de transmission.

Le terme $B(z)$ ne comportant que des puissances positives en z n'a d'action que sur les coefficients à puissances positives de z du produit $A(z) \cdot H(z)$. Les coefficients correspondant aux puissances négatives de z ne peuvent être réduits que par la seule action de $A(z)$.

Le filtre récursif traite de manière différente les échantillons de la réponse percussionnelle suivant qu'ils correspondent à une puissance de z positive ou négative.

Les termes de $H(z)$ correspondant aux puissances négatives de z sont traités uniquement par la partie transverse.

Les autres termes sont traités simultanément par la partie transverse et la partie récursive.

.../...



Cette troncation de la réponse percussionnelle a deux conséquences :

1° - Elle modifie certaines propriétés de la réponse percussionnelle. Ainsi par exemple, l'égalisation d'un canal de transmission ne présentant que des distorsions de phase est obtenue avec un filtre transversal ayant une réponse en amplitude plate et une caractéristique de phase inverse. Le bruit superposé au signal se retrouve intégralement après filtrage.

Avec un filtre récursif, la réponse percussionnelle après troncation n'est plus caractéristique d'un canal exempt de distorsion d'amplitude. La partie transverse n'a donc pas une caractéristique d'amplitude plate et provoque une amplification du bruit.

Des simulations montrent qu'alors le filtre récursif est moins bon qu'un filtre transversal.

2° - La position de cette troncation, c'est à dire le choix de l'échantillon de la réponse percussionnelle placé en correspondance avec le coefficient $A(0)$ modifie profondément le résultat de l'égalisation. La courbe donnée en figure II.3.2 montre l'influence du choix du centrage avec un filtre récursif dont les parties transverse et récursive comprennent chacune 3 coefficients.

Ces nombres ont été adoptés en première analyse pour l'égalisation de liaisons ionosphériques.

Remarquons sur cette figure que :

- le centrage sur $h(-3)$ correspond à l'optimum
- le résultat est peu dégradé pour un centrage sur $h(-4), h(-2)$. En revanche la dégradation est importante si le centrage porte sur $h(-5)$ ou $h(-1)$ et au delà.
- le centrage optimal ne correspond pas à l'échantillon de plus grande amplitude.

.../...

Avec un milieu fluctuant, comme l'ionosphère, le centrage est également fluctuant. Or on ne peut le choisir qu'au début de la liaison. Ce centrage peut donc s'écarter rapidement de l'optimum et ne plus permettre une égalisation correcte.

A la limite on peut perdre totalement le signal, si par exemple les échantillons de la réponse percussionnelle $h(i)$ avec i inférieur ou égal à zéro, deviennent nuls.

Le filtre adapterait à nouveau si l'on effectuait un décalage sur la réponse $H(z)$ pour définir un nouvel $h(0)$ en perdant un ou plusieurs échantillons du signal reçu.

Ceci n'est pas acceptable dans de très nombreux cas.

II.4 - Filtre autoadaptatif pour liaisons ionosphériques

Dans l'application aux liaisons ionosphériques les filtres transversaux ou récursifs ne peuvent donner satisfaction. Le premier égalise de façon médiocre une réponse percussionnelle échantillonnée pourvue d'un ou plusieurs zéros voisins du cercle unité. Le second est très sensible au centrage de la réponse percussionnelle. Il a donc fallu chercher une structure de filtre qui permette de s'affranchir des défauts du filtre récursif classique et d'obtenir une égalisation satisfaisante, même si des zéros ont un module voisin de l'unité.

Ce nouveau filtre est du type récursif avec la décision insérée dans la boucle. Il correspond à la prolongation de la partie transversale vers les z positifs.

Son schéma est donné en figure II.4.1.

Le terme $A(z)$ possède, maintenant, des coefficients de puissance positive de z

$$A(z) = \sum_{i=-N}^{+M} A(i) \cdot z^i$$

.../...



Remarquons que ce filtre a la faculté d'être aussi soit transversal en annulant les coefficients $B(j)$, soit récursif classique en annulant les termes $A(i)$ pour lesquels i est supérieur à zéro. En raison de cette propriété il a été appelé : "filtre récursif hybride".

L'étude mathématique de ce filtre montre que l'erreur quadratique moyenne est une fonction convexe des coefficients.

L'algorithme règle les coefficients du filtre pour que l'erreur quadratique moyenne converge vers l'unique minimum sous réserve que le pas delta soit suffisamment petit.

Les calculs montrent que la comparaison des erreurs quadratiques moyennes résiduelles obtenues par les trois filtres :

- filtre transversal possédant $2N + 1$ coefficients.
- filtre récursif classique possédant $N + 1$ coefficients pour sa partie transverse et L pour sa partie récursive.
- filtre récursif hybride ayant $2N + 1$ coefficients dans la partie transverse et L dans la partie récursive

conduit aux conclusions suivantes :

- le filtre récursif est toujours supérieur au filtre transversal
- les deux types de filtres récursifs sont équivalents si la réponse percussionnelle du canal ne possède pas de termes de puissances négatives de z
- dans le cas contraire le filtre récursif hybride est meilleur.

Le fait d'avoir prolongé la partie transverse vers les z positifs supprime la troncation de la réponse percussionnelle faite par le filtre récursif classique. En conséquence la partie récursive peut agir sur tous les échantillons $h(i)$ et diminue

.../...



considérablement la sensibilité du filtre au centrage. La figure II.4.2 donne la variation de l'erreur quadratique moyenne en fonction du centrage pour un filtre récursif hybride ayant 16 coefficients dans sa partie transverse et 8 dans sa partie récursive. Le bruit et la réponse impulsionnelle sont les mêmes que pour le filtre récursif classique (cf. § II.3.2).

Cette figure montre que :

- ce nouveau filtre est meilleur que le filtre récursif classique
- la marge pour le centrage est accrue puisque pour un centrage variant de $h(-4)$ à $h(+4)$ l'erreur quadratique moyenne varie dans un rapport 1,3.

On peut schématiser le processus d'égalisation d'un tel filtre de la manière suivante :

1° - La partie transverse est réglée pour que le produit $H(z) \cdot A(z)$ ne contienne pas de puissances négatives de z .

2° - La partie récursive annule tous les termes de puissance positive de z .



III - DESCRIPTION DU SYSTEME

Le système de transmission autoadaptatif pour liaisons ionosphériques est bâti autour du filtre récursif hybride il comprend les fonctions principales suivantes :

- modulation et démodulation
- égalisation
- synchronisation.

III.1 - Modulation et démodulation

La modulation et la démodulation doivent être choisies pour que le signal reçu puisse s'écrire, au bruit près, par une combinaison linéaire des données émises. Cette condition est satisfaite avec une modulation par inversion de phase et une démodulation cohérente. La démodulation est faite suivant deux axes en quadrature, ce qui permet de définir complètement le canal passe-bande.

III.2 - Egalisation

L'égalisation est faite avec un filtre récursif hybride ayant 16 coefficients dans la partie transversale et 8 dans la partie récursive. Ce filtre utilise les signaux issus des deux démodulateurs en quadrature. Il possède une structure complexe pour traiter ces signaux orthogonaux. L'algorithme utilisé rend minimale l'erreur quadratique moyenne. Son fonctionnement correct suppose que les données transmises soient aléatoires. Cette condition est approximativement réalisée par l'insertion d'un brouilleur à l'émission.

Pour faciliter l'égalisation au début de la liaison, une séquence initiale connue est transmise avant les données. Elle permet, connaissant à priori la décision correcte, d'assurer la convergence dans les meilleures conditions.

III.3 - Synchronisations

Il y a deux types de synchronisation :

.../...

-
- la synchronisation primaire qui restitue la phase de l'horloge des données reçues.
 - la synchronisation secondaire qui retrouve la séquence initiale.

III.3.1 - Synchronisation primaire

La synchronisation primaire fixe l'instant d'échantillonnage, avec un bruit de phase minimal. Cette fonction est assurée par un asservissement de phase numérique à bande variable qui utilise les transitions du signal reçu, détectées après un préfiltrage également numérique.

III.3.2 - Synchronisation secondaire

La séquence initiale est une séquence pseudo-aléatoire de longueur maximale. Sa phase à la réception est trouvée par un corrélateur numérique qui détermine la position de la séquence correspondant à l'échantillon d'amplitude maximale. C'est sur cette position que la réponse est centrée



IV - CONCLUSIONS

Le filtre mis au point pour satisfaire aux contraintes d'une liaison par voie ionosphérique, a un domaine d'application très vaste. Il peut être utilisé pour égaliser tout milieu dispersif stationnaire ou fluctuant.

La réalisation entièrement numérique du filtre autoadaptatif permet un traitement rigoureux des échantillons quantifiés. Le filtre est bâti autour d'une unité de calcul rapide (multiplicateur, additionneur, mémoire tampon), utilisée en temps partagé. Cette structure souple permet de réaliser l'un quelconque des trois filtres. Ainsi leurs performances respectives ont pu être comparées en laboratoire. Elles confirment la hiérarchie établie par les analyses mathématiques. En figure V sont tracées pour les trois filtres, les courbes du taux d'erreur après égalisation de la réponse $1 + 0,7z^{-1}$ en fonction du rapport signal bruit.

Le gain apporté par le nouveau filtre est pour un taux d'erreur de 10^{-3} , 2,25 dB par rapport au filtre transversal et 3 dB par rapport à un filtre récursif classique.

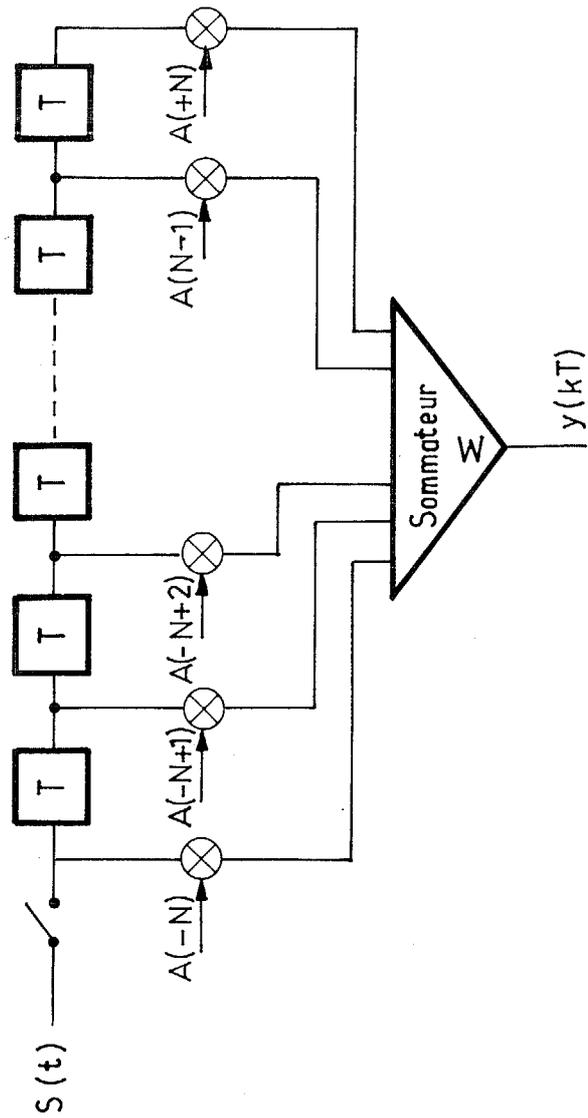
Cette étude et la réalisation du matériel ont été menées par T.R.T avec le soutien de la direction des recherches et moyens d'essais. (D.R.M.E).

Je tiens à rendre hommage à la mémoire de Monsieur SCHOONHEERE qui a participé activement à la conception et à la réalisation de ce système.

Je remercie également les techniciens qui ont pris part à la réalisation du matériel.

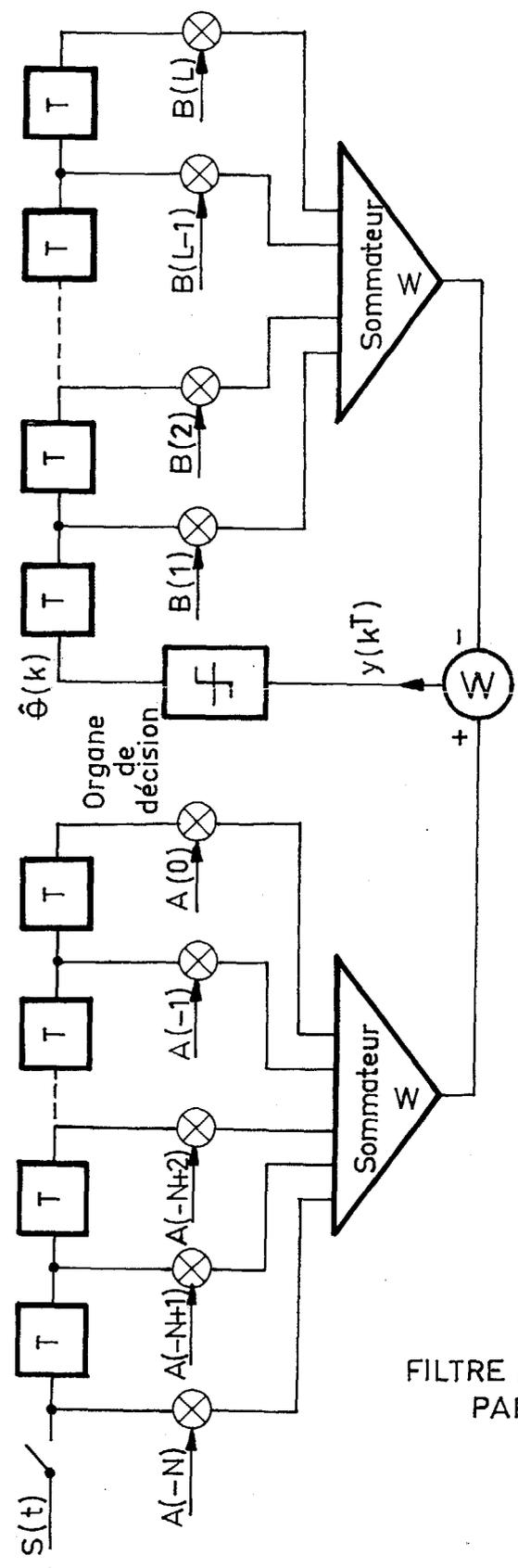
REFERENCES

- 1 - R.W LUCKY, BR RUDIN. AN AUTOMATIC EQUALIZER FOR GENERAL PURPOSE COMMUNICATION CHANNELS.
BSTJ NOV 1967 pp 2179 - 2208.
- 2 - R.W LUCKY. TECHNIQUES FOR AN ADAPTIVE EQUALIZATION OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS.
BSTJ FEB 1966 pp 255 - 286.
- 3 - C.W NIESSEN, A.K WILLIM - ADAPTIVE EQUALIZER FOR PULSE TRANSMISSION
I.E.E.E TRANS. COM 18. AUG 1970 pp 377 - 395.
- 4 - A. LENDER - DECISION - DIRECTED DIGITAL ADAPTIVE EQUALIZATION TECHNIQUE FOR HIGH SPEED DATA TRANSMISSION.
I.E.E.E TRANS COM 18. OCT 1970 pp 625 - 632.
- 5 - J.G PROAKIS, J.H MILLER - AN ADAPTIVE RECEIVER FOR DIGITAL SIGNALING THROUGH CHANNELS WITH INTERSYMBOL INTERFERENCE
I.E.E.E TRANS. IT 15. JULY 1969 pp 484 - 487.
- 6 - P. MONSEN . FEEDBACK EQUALIZATION FOR FADING DISPERSIVE CHANNELS
I.E.E.E TRANS 1971 IT 17 pp 56 - 64.



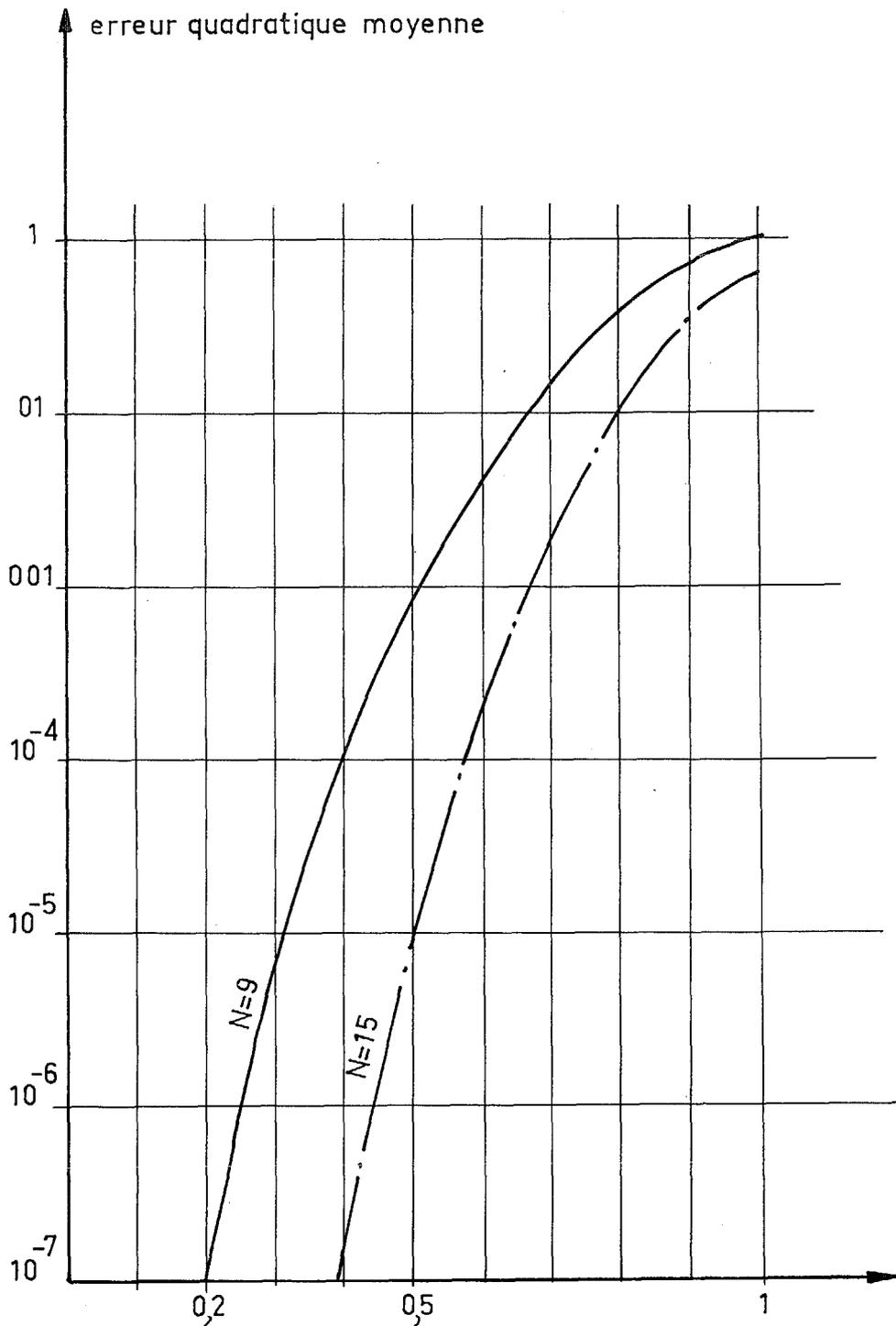
FILTRE TRANSVERSAL

FIGURE II-1-1



FILTRE RECURSIF CONTROLE
PAR LA DECISION

FIGURE II-1-2



MODULE DU ZERO DE LA REponse PERCUSSIONNELLE FIG:II-3-1

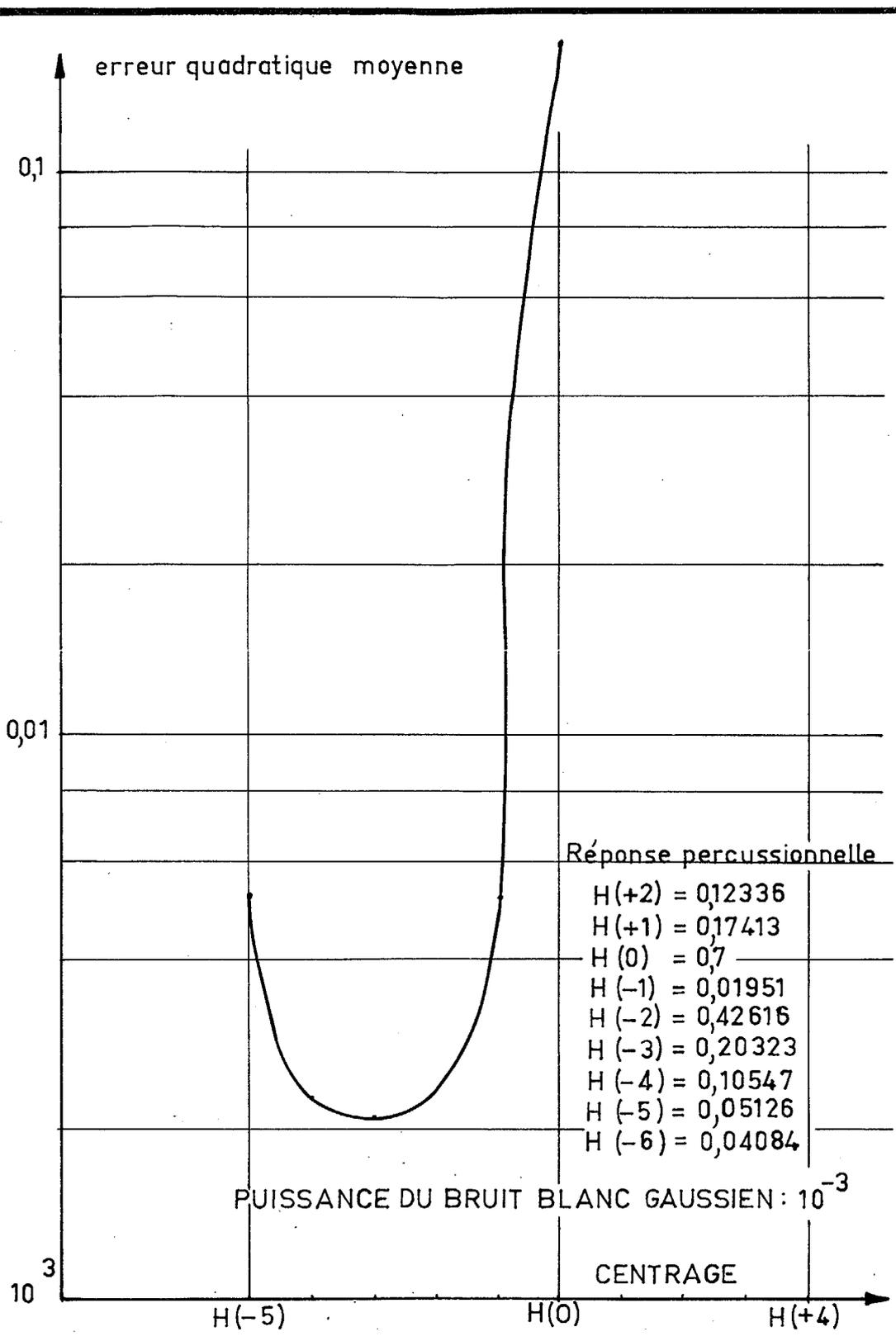
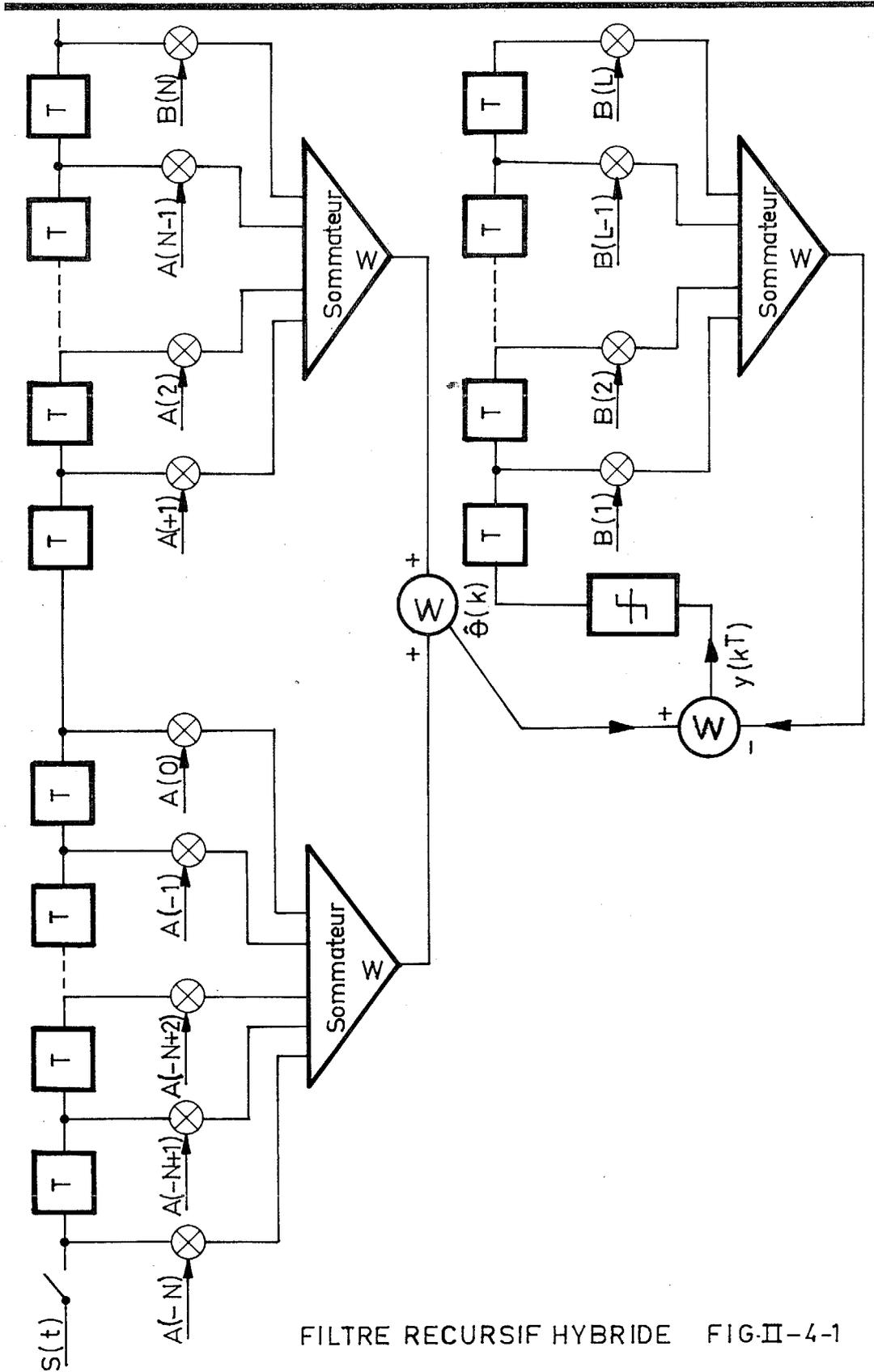


FIGURE II-3-2



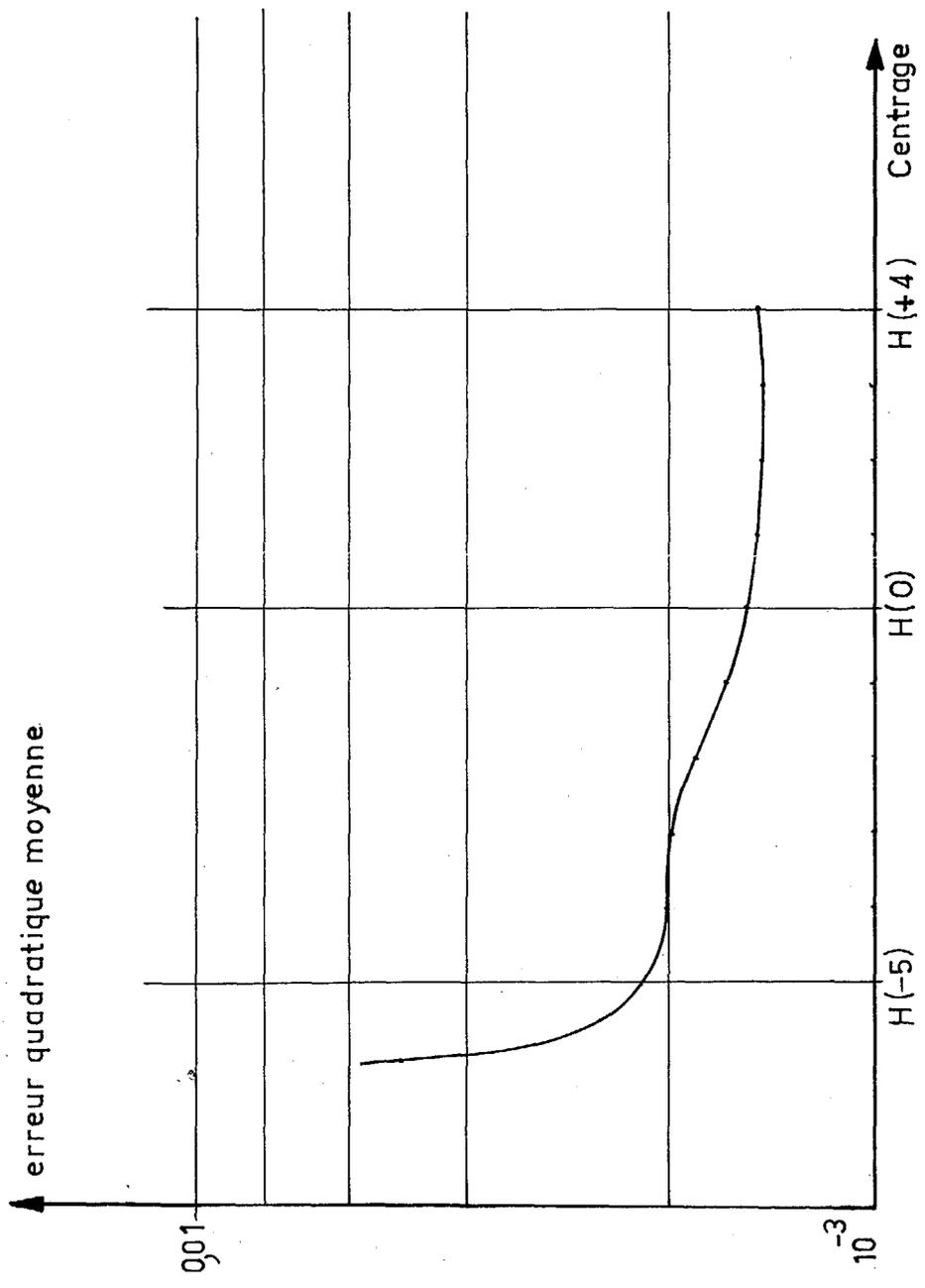


FIGURE II-4-2

