

Étalement de spectre

L'étalement de spectre est une technique de communication utilisée pour le partage de ressources (l'accès multiples).

Pourquoi étaler le spectre ?

Commençant par la célèbre expression qui détermine la capacité C d'un canal donnée par :

$$C = B_s \cdot \log \left(1 + \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (1)$$

C en $[b/s]$, caractérise le nombre maximum de bits par seconde qu'il est possible de transmettre avec une erreur aussi faible que possible.

B_s est la bande occupée par le signal émis en Hz . P_s est la puissance du signal émis en Watt (W). P_b est la puissance du bruit en Watt. Cette relation nous montre que pour transmettre, sans erreur, une quantité d'information C donnée, il est possible d'utiliser soit :

- Une bande B_s étroite et un fort rapport $\frac{P_s}{P_b}$
- Une bande large B_s et un faible rapport $\frac{P_s}{P_b}$.

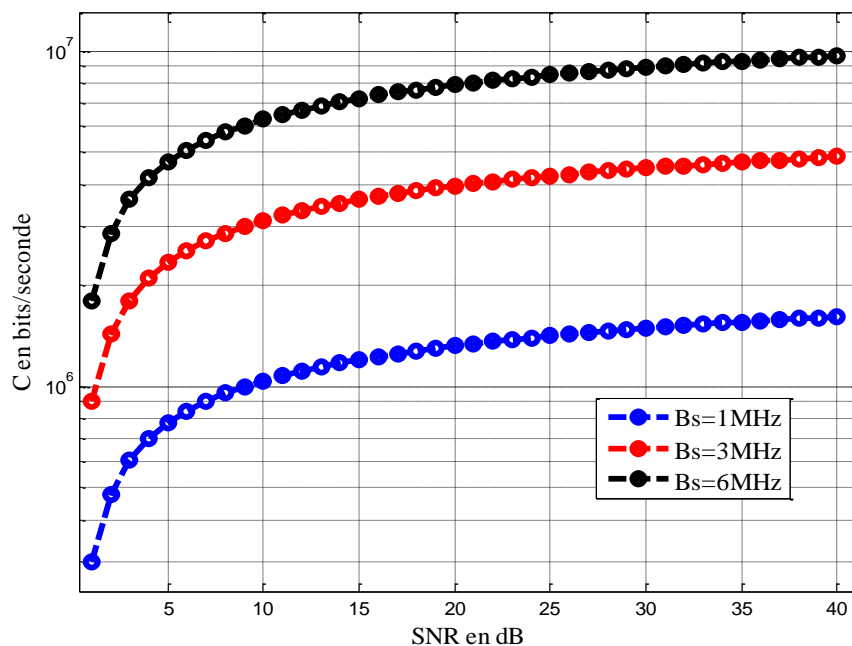


Figure.1. Capacité du canal en fonction du SNR

L'idée de l'étalement de spectre consiste donc à émettre un signal de bande largement supérieure à celle du signal utile afin d'obtenir de bonnes performances à la réception avec un rapport signal sur bruit réduit au minimum. La figure (1) illustre la variation de C en fonction du SNR pour différentes valeurs de la bande.

Motivation : une autre technique d'accès multiple I.

Techniques d'accès multiple classiques.

- Le FDMA : un utilisateur = une bande de fréquence distincte de celles des autres.
- Le TDMA : un utilisateur = un intervalle de temps différent de ceux alloués aux autres.

CDMA ➔ En pratique, mélange de FDMA et de TDMA.

Motivation : une autre technique d'accès multiple II.

Défauts du FDMA/TDMA : difficile de gérer les ressources de façon optimale.

- FDMA : pas bien adaptée à quelques types de communications comme la parole,
- TDMA : nécessite une parfaite synchronisation entre utilisateurs, ce qui n'est pas si simple à gérer.

Motivation : une autre technique d'accès multiple III.

Permettre aux utilisateurs d'émettre dans la même bande au même instant ➔ plus de problème pour gérer l'allocation des ressources. Question de fond : comment séparer les différents signaux correspondants aux différents utilisateurs ? Utiliser des transmultiplexeurs d'un type un peu particulier.

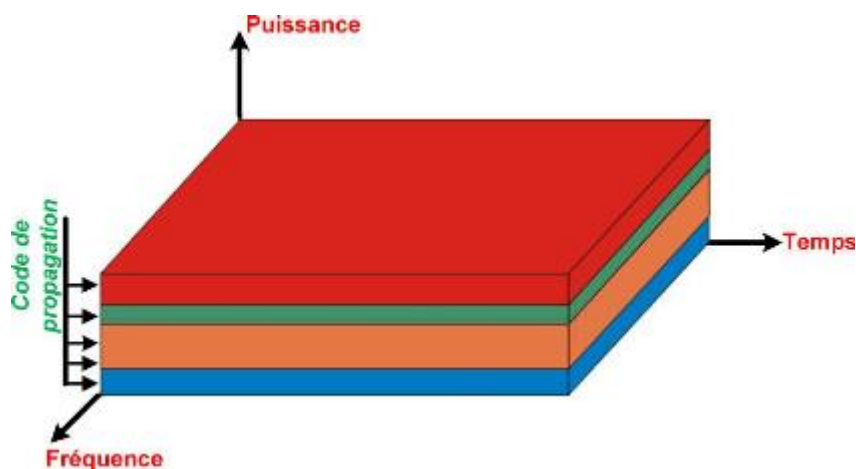


Figure.2. Répartition temps fréquence

Principe de l'étalement de spectre

Le CDMA consiste à utiliser une technique d'étalement par codes (DS-SS pour Direct Sequence Spread Spectrum), en utilisant une famille de codes orthogonaux ou pseudo- orthogonaux. Il permet la transmission simultanée de plusieurs canaux, chacun étant étalé en fréquence.

Le principe de l'étalement de spectre repose sur le codage de l'information à transmettre avec une séquence pseudo-aléatoire, connue seulement par les utilisateurs. La conséquence directe de ce codage est l'étalement de la densité spectrale de puissance du signal informatif sur une plus grande largeur de bande (figure (3)). Le signal transmis se comporte alors comme du bruit pour les autres utilisateurs.

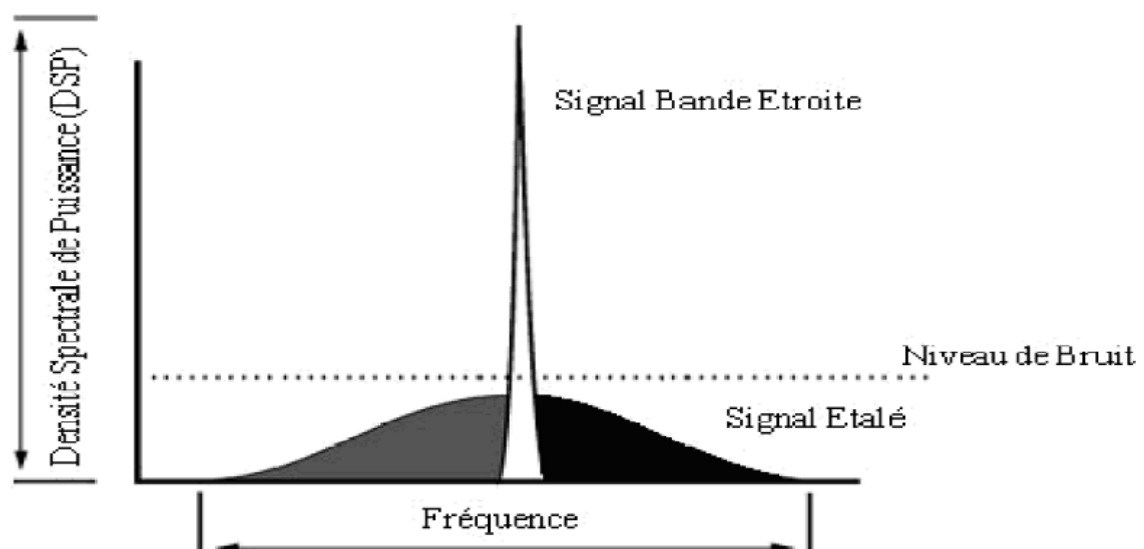


Figure.3. Principe d'étalement de spectre

Les avantages de l'étalement de spectre

- **Un canal unique pour tous les utilisateurs** : Les utilisateurs ne se voient plus attribuer un canal physique, c'est-à-dire une bande de fréquence, mais un code. Cela simplifie l'organisation des bandes de fréquence et change fondamentalement la notion de canal.

- **Une densité spectrale de puissance plus faible** : la puissance moyenne du signal reste la même, mais elle est étalée sur toute la bande de fréquence. Cette propriété entraîne une densité spectrale de puissance (qui représente la répartition de la puissance en fonction de la fréquence) plus faible. Ainsi, les autres systèmes de communication seront moins gênés par ce type de communication.

- **L'immunité aux interférences** : le système ne verra pas les autres signaux codés différemment et ne sera pas gêné par les signaux en bande étroite.
- **L'immunité aux effets de multi trajet** : si l'on considère que les ondes retardées arrivant sur le récepteur sont des interférences, le système ne verra pas non plus ces ondes.
- **Un accès aléatoire** : les utilisateurs pourront transmettre à tout moment. (Méthode d'accès aléatoire codée CDMA).
- **Le caractère privé de l'information** : l'information ne pourra pas être interceptée par un utilisateur ne possédant pas le code.
- **Un adressage par code** : en donnant un code à un seul récepteur, il sera adressé individuellement vis-à-vis des autres utilisateurs.

Tous ces avantages n'ont lieu qu'au détriment d'un seul facteur, l'efficacité spectrale. En effet, le même signal va occuper plus de bande ce qui signifie que le débit, pour une même bande donnée, sera plus faible.

Pour réaliser l'opération d'étalement de spectre, il existe deux principales techniques :

- Etalement par séquence directe, appelée aussi codage directe est bien connue dans la littérature sous le sigle DS-SS. Elle est réalisée en utilisant un signal ou une séquence pseudo-aléatoire, dont le débit numérique est supérieur à celui du signal contenant l'information.
- Etalement par saut de fréquence qui, comme son nom l'indique, consiste en une variation de la fréquence de transmission par sauts discrets pseudo-aléatoires. Elle est encore connue dans la littérature sous l'abréviation FH-SS pour Frequency Hopping Spread Spectrum.

Principe de l'étalement de spectre par séquence directe (DS-SS)

L'étalement de spectre par séquence directe se fait par la multiplication de l'information à transmettre de débit R_b par un code pseudo-aléatoire, aussi appelé signature, ayant un débit R_c .

On définit le gain de traitement N donné par :

$$N = \frac{R_c}{R_b} = \frac{T_b}{T_c} \quad (2)$$

Où : T_b , T_c représentent respectivement la durée d'un bit d'information et la durée d'une impulsion rectangulaire du code, appelée chip.

N est habituellement un entier, supérieur à 1 puisqu'il mesure l'étalement du spectre et représente le nombre de chips par bit d'information. On appelle également ce rapport gain de traitement

(processing gain). La valeur de ce paramètre représente la capacité des systèmes à étalement de spectre à rejeter l'interférence. C'est-à-dire que plus N est grand plus le système résiste au bruit. La figure (4) présente un schéma général d'un système à étalement de spectre par séquence directe.

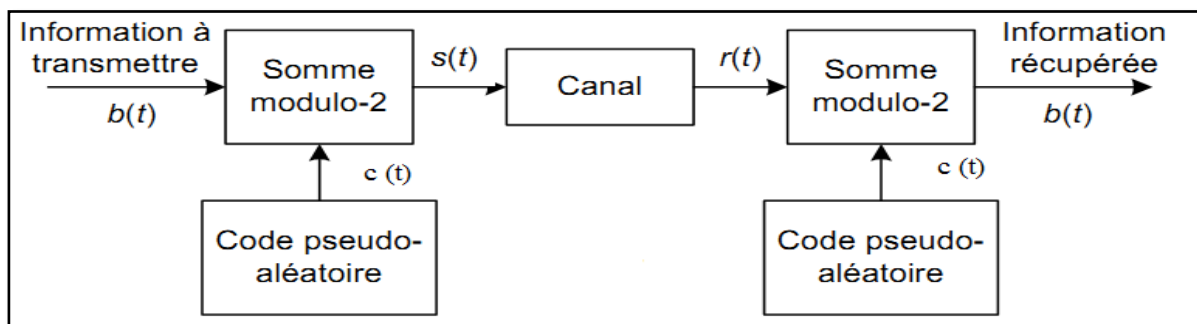


Figure.4. Schéma général d'un système à étalement de spectre en séquence directe

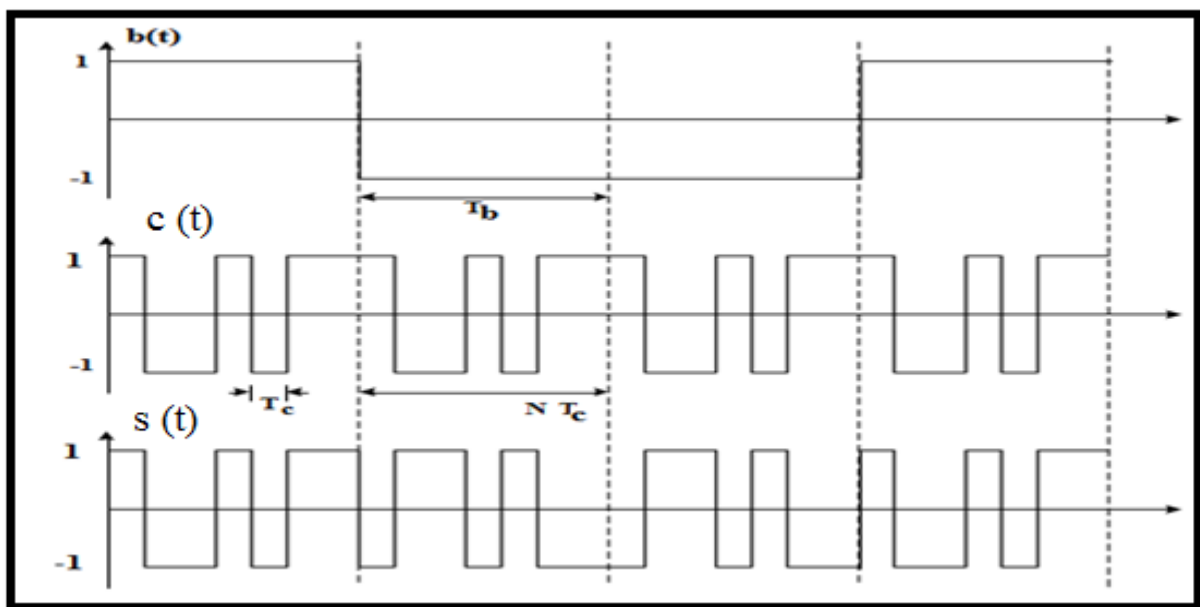


Figure.5. Multiplication par code d'Etalement

La figure (5) montre le principe d'étalement de spectre. On peut remarquer que le signal transmis $s(t)$ est égale au code $c(t)$ lorsque $b(t)$ vaut $+1$ alors qu'il est égale à $-c(t)$ lorsque $b(t)$ vaut -1 .

Au niveau du récepteur, en multipliant le signal reçu $r(t)$ par un code pseudo-aléatoire ($c(t)$) similaire à celui appliqué à l'émission, on récupère l'information transmise lorsque les deux signaux multipliés sont synchronisés. En effet, l'influence du code pseudo-aléatoire est ainsi éliminée.

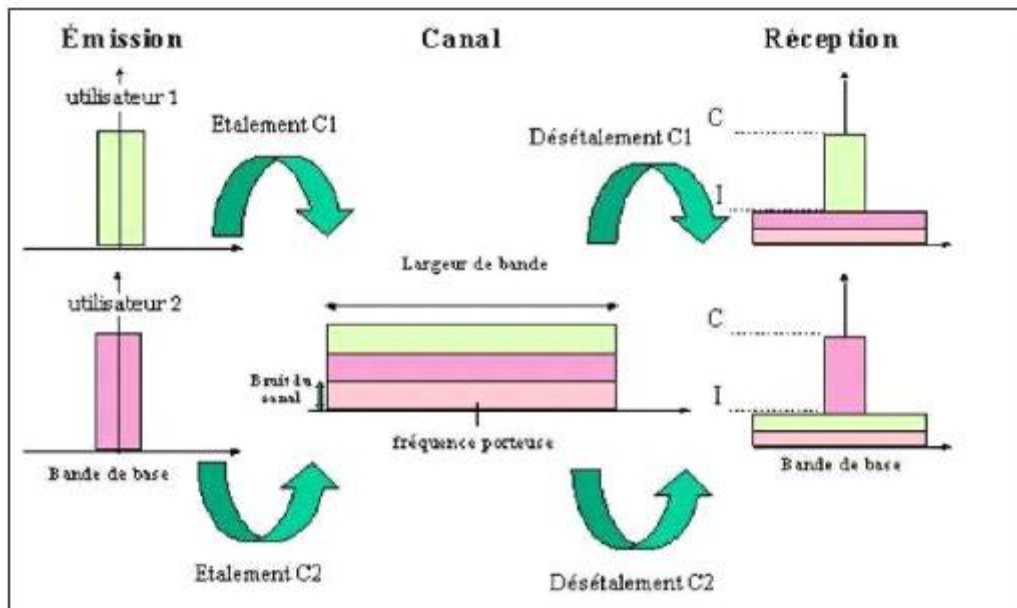


Figure.6. Étalement et désétalement du spectre

Dans un système à plusieurs utilisateurs, chaque utilisateur possède un code pseudo-aléatoire qui lui est propre, ce qui oblige le récepteur à connaître le code pseudo aléatoire associé à l'utilisateur qui l'intéresse permettant ainsi une séparation entre les différents utilisateurs du système (Voir figure (6)).

Principe spectral

Du point de vue spectral, la multiplication des données avec la séquence de code produit un étalement du spectre du signal transmis (figures (7) et (8-a)). Si on suppose un canal simple ne comportant que du bruit thermique et une source d'interférence à bande étroite, le signal reçu par le récepteur sera donc composé de trois éléments (figure (8. b)), soit le signal transmis étalé, le bruit thermique et l'interférence à bande étroite. En multipliant une nouvelle fois par le code lors de la réception, le signal désiré est déséparé. Le spectre du bruit thermique demeure intouché par la multiplication par le code, c'est -à-dire qu'il n'est ni étalé ni comprimé. L'interférence à bande étroite, par contre, subit une première multiplication par le code lors de la réception, ce qui cause un étalement et réduit considérablement son impact sur le signal désiré, voir figure (8).

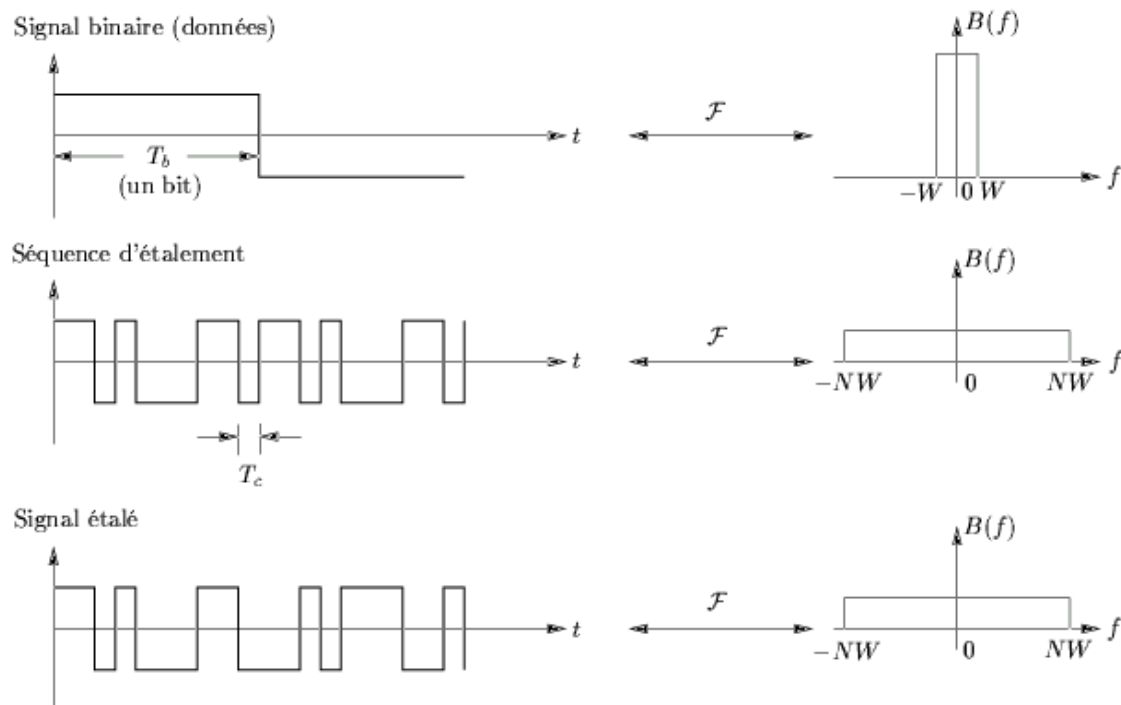


Figure.7. Etallement du signal utile

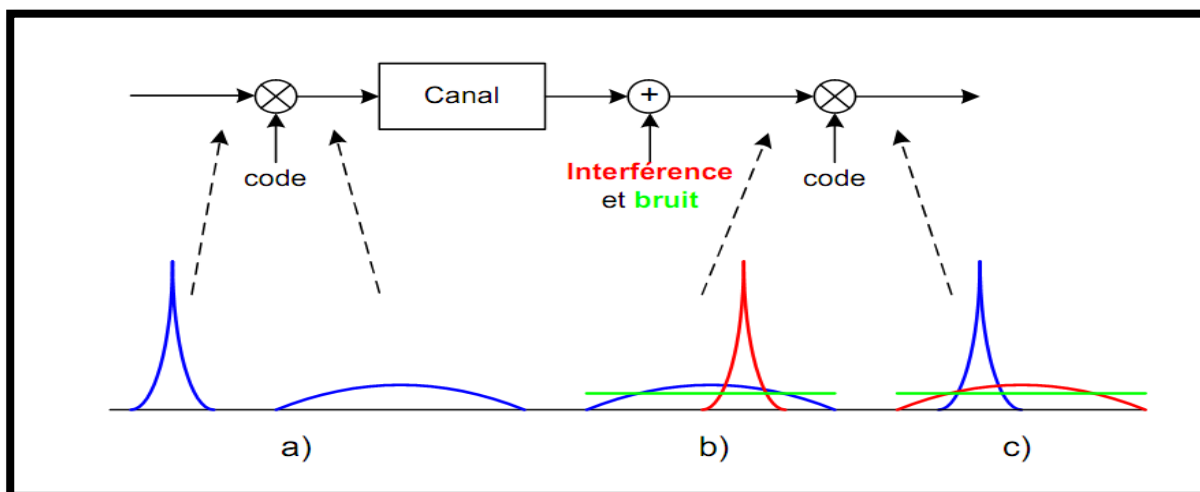


Figure.8. Représentation fréquentielle du principe d'étalement spectral

Codes d'étalement

En communication synchrone, les messages des utilisateurs sont émis dans le canal sans retard relatif. Lorsque le récepteur est synchronisé sur le message reçu, la séparation des utilisateurs peut être faite grâce à ces codes orthogonaux, les codes de Walsh-Hadamard sont dans ce cas les codes les plus utilisés. Lorsque la communication est asynchrone, cas de communication le plus délicat, les

messages sont émis avec des retards relatifs qui ne sont pas connus à priori. Dans ce cas, ces codes ne sont plus utilisés, car ils perdent leurs propriétés d'orthogonalité quand ils sont décalés les uns par rapport aux autres. Parmi les codes les plus utilisés pour ce type de communications asynchrones : les codes Gold, les codes de Kasami, spécifiés pour la liaison montante du système UMTS.

Les codes qui sont utilisés en pratique dans les systèmes à séquence directe sont les codes de Walsh-Hadamard, les codes PN, les codes de Gold. Les séquences de Walsh sont parfaitement orthogonales, alors que les autres possèdent des valeurs d'intercorrélation non nulle.

L'autocorrélation périodique (discrète) est habituellement définie comme la mesure de vraisemblance entre un code cyclique c et une copie de ce même code décalé. La fonction d'autocorrélation $R[\tau]$ pour un décalage de τ par rapport au code de référence est donnée par:

$$R[\tau] = \sum_{i=1}^N c_i c_{i-\tau} \quad (3)$$

La corrélation croisée (discrète) est la mesure de la ressemblance entre deux codes distincts, c et u . On obtient la définition générale de la corrélation croisée en remplaçant $c_{i-\tau}$ par $u_{i-\tau}$ dans l'équation (3), soit :

$$R[\tau] = \sum_{i=1}^N c_i u_{i-\tau} \quad (4)$$

Génération des codes d'étalement

Nous avons employé le terme pseudo-aléatoire pour parler des codes utilisés pour étaler le signal. Ces codes sont constitués de deux mots « pseudo » et « aléatoire » conférant à ce type de codes des propriétés assez intéressantes justifiant leur utilisation dans un système de radiocommunication. En effet, le code n'est pas complément aléatoire, car il est heureusement possible à le régénérer à la réception pour récupérer l'information transmise, pourvu que l'émetteur et le récepteur soient parfaitement synchronisés. Un code pseudo-aléatoire est donc un code binaire dont les propriétés statiques ressemblent à celles d'une séquence binaire aléatoire. Par exemple, un code pseudo aléatoire PN (pour pseudo noise code en anglais) est généré par un registre à décalage reboucle illustré dans la figure (9). Il représente l'une des manières les plus courantes pour générer des codes pseudo-aléatoires. Son fonctionnement est le suivant : une fois initialisés les différents états du registre, le bit en sortie est calculé à chaque coup d'horloge en additionnant modulo 2 tous les bits présents à chaque état. Les bits sont ensuite décalés de manière circulaire pour réinitialiser les états et calculer le bit suivant. Ce registre, dont le nom complet est « registre linéaire à décalage avec contreréaction » de l'anglais Linear Feedback Shift Register (LFSR), est dit périodique, car quelles que soient les valeurs

initiales, c'est-à-dire les valeurs prises par « a_i », on retrouve ces mêmes valeurs après un nombre fini de périodes d'horloge. Comme le registre comprend « n » états représentés par les valeurs binaires de « a_i », il est possible de générer « 2^n » codes pseudo-aléatoires. Il en résulte aussi que la période de la séquence n'est jamais supérieure à « $2^n - 1$ ».

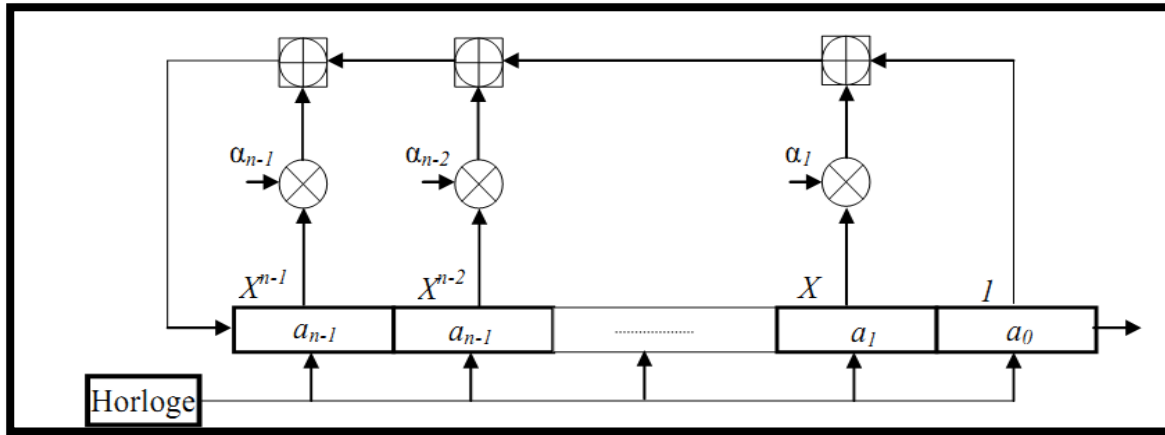


Figure .9. Schéma générique d'un registre à décalage

Génération des codes Walsh-Hadamard

Les codes orthogonaux utilisés en DS-CDMA sont choisis d'après un ensemble de fonctions proposées en 1923 par le mathématicien américain Walsh. Du fait que les séquences de Walsh sont orthogonales, les communications sont immunisées par rapport aux interférences des utilisateurs entre eux si la synchronisation est correctement réalisée.

Il existe plusieurs manières de générer les séquences de Walsh. La génération par des matrices de Hadamard est l'une des plus communes. Les matrices de Hadamard peuvent être générées de manière récursive :

On part d'un motif $W_1 = [1]$ et l'on ne considère que les matrices carrées d'une dimension L multiple de 2. Ainsi, la matrice W_L s'écrit :

$$W_L = \begin{pmatrix} W_{L/2} & W_{L/2} \\ W_{L/2} & \overline{W_{L/2}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\overline{W_{L/2}}$ Correspondant au complément de $W_{L/2}$ par rapport à 1.

Exemples :

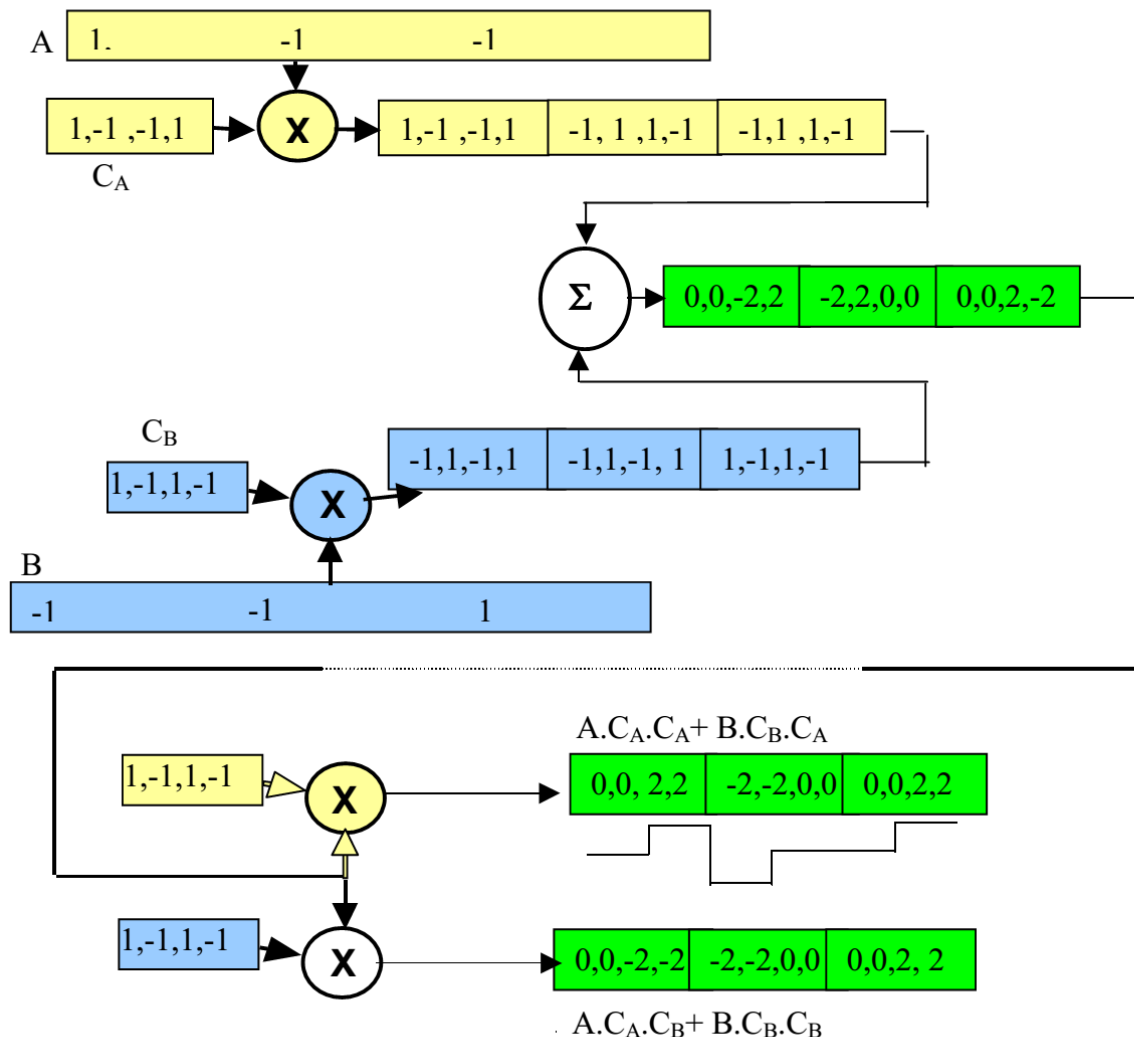
$$W_1 = (1), \quad W_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad W_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

On remarque que les lignes des matrices de Walsh sont orthogonales entre elles et correspondent de ce fait aux séquences de codes qui nous intéressent. Ces codes ont une période $M = 2^m$ (m étant le nombre d'itérations).

Exemple de la CDMA

Il existe plusieurs variantes : on décrit ci-dessous le CDMA DS-SS.

Exemple :



- Le message A de l'émetteur A, représentée par une séquence de +1, -1 traduisant la séquence de bits 1 et 0 logiques, est multiplié par un code : une séquence de +1 et -1 (les « chips ») judicieusement choisie, et dont les transitions sont m fois plus fréquentes. Idem pour un émetteur du message B : message multiplié par un code B.

- Les séquences produites $A \cdot C_A$ et $B \cdot C_B$ sont ajoutées et transmises.
- A la réception, le destinataire du message A multiplie la séquence reçue par le code C_A , idem pour le destinataire du message B. Si les codes sont bien choisis, sur la durée d'un bit, (donc de m chips), la moyenne de $C_A \cdot C_A$ et de $C_B \cdot C_B$ est égale à $m/2$, tandis que $C_A \cdot C_B$ a une moyenne nulle : Les codes C_A et C_B sont dits « orthogonaux » (Somme des produits des éléments correspondants [=produit scalaire]=0).