

Problèmes Spécifiques aux Transmissions Sans Fils et Solutions

Introduction

Ces quelques pages peuvent être considérées à la fois comme un complément au cours de première année de Master de traitement du signal sur les lignes de transmission de l'information et également comme une transition vers le cours de Wifi de deuxième année. L'objectif est d'aborder les problèmes spécifiques aux transmissions radio et les diverses solutions qui se présentent. Contrairement aux transmissions guidées permettant de consacrer un lien exclusivement à une communication (c'est le cas de l'Ethernet commuté) tout en se protégeant efficacement (câble blindé, fibre optique) contre les perturbations extérieures, la transmission Hertzienne doit relever deux défis :

- **La transmission correcte des Zéros et des Uns** à haut débit est sérieusement compliquée par les nombreuses perturbations électromagnétiques, y compris celles engendrées par des transmissions sans fils concurrentes, qui se propagent librement et que les antennes ne peuvent éviter de capter. De plus, le signal émis n'étant pas guidé sur un câble jusqu'à sa destination, sa propagation s'effectue en général suivant des trajets multiples si bien que le récepteur est confronté à de nombreuses répliques plus ou moins retardées et atténuées de ce même signal. Identifier les bits dans ces conditions difficiles est une problématique de couche physique (**couche 1** du modèle OSI).
- Les stations d'un même canal-réseau sans fil doivent pouvoir **se partager rationnellement les ressources radio**, i.e. la bande de fréquences disponible sur ce canal. C'est une problématique d'**accès au média** donc de couche liaison de données (**couche 2** du modèle OSI), mais aussi de QoS, les ressources allouées devant s'adapter aux besoins des applications et ceci en temps réel. Des mécanismes d'accusé de réception et d'éventuelle retransmission sont aussi de la responsabilité de cette couche 2.

Nous nous concentrons ici sur la couche physique en explicitant les principes sur lesquels se basent les solutions visant à améliorer la qualité des transmissions mais il faut savoir qu'un certain nombre de ces solutions sont également souvent adoptées pour le partage rationnel des ressources radio (couche 2). Le cours de Wifi détaillera les couches 1 et 2 correspondant aux différentes normes 802.11 qui se sont succédées historiquement. Les techniques privilégiées par d'autres protocoles de transmission radio, du Bluetooth à la 4G, en passant par le GSM, UMTS, TNT seront également brièvement évoquées en insistant sur la logique qui a présidé à de tels choix.

Rappels et position du problème:

Nous avons passé en revue en première année les sources de dégradation du signal le long de sa ligne de transmission : atténuation, bruit, distorsion, interférence inter-symboles. Tout ce que nous avons expliqué demeure valable et les solutions générales à ces dégradations, telles que l'égalisation, encore applicables, mais nous devons réexaminer maintenant chacune d'elles dans le contexte de transmissions sans fils :

- **Atténuation/Bruit** : La transmission Hertzienne est, comme nous l'avons dit, intrinsèquement très bruitée et pour **améliorer le rapport signal sur bruit, sans que la puissance rayonnée des antennes ne dépasse les valeurs maximales autorisées**, il faut, dans la mesure du possible, distribuer le rayonnement de manière à favoriser certaines directions au détriment d'autres, autrement dit **augmenter le gain qui mesure la directivité des antennes**. Augmenter le gain en émission n'est en réalité pas tant utile pour augmenter la puissance rayonnée dans une direction donnée (la puissance isotrope maximale autorisée très faible en Wifi, typiquement 100 milliwatts, est facile à atteindre, et l'on ne peut pas concentrer cette puissance dans une direction donnée sans dépasser alors la limite sur la Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente, PIRE, qui est aussi de 100 mWatts) que pour réduire la puissance rayonnée dans les autres directions, ce qui économise de la puissance électrique consommée, et

supprime une source de bruit pour tous les récepteurs auxquels le faisceau radio n'est pas destiné. Mais si l'intérêt du gain en émission n'est pas évident il l'est par contre beaucoup plus en réception (augmenter le gain en émission d'une antenne revient à augmenter de façon identique son gain ou directivité en réception), puisque l'antenne devenant moins sensible aux ondes en provenance d'autres directions que celle de l'émetteur, qui ne lui sont pas destinées et qui donc constituent du bruit, **le signal sur bruit est significativement amélioré.**

A une distance R de l'antenne émettrice, la surface S traversée par le rayonnement électromagnétique croissant en R^2 (par exemple un rayonnement isotrope traverse une surface sphérique égale à $4\pi R^2$), la puissance électromagnétique interceptée par la surface s d'une antenne réceptrice n'est qu'une fraction s/S de la puissance totale rayonnée. Cette fraction diminue donc en $1/R^2$ en espace libre mais peut être réduite significativement en $1/R^n$ ($n > 2$) en présence d'obstacles absorbant plus ou moins l'énergie électromagnétique dans un espace fermé de bureaux par exemple. Le bilan de la transmission peut être en définitive modélisé par la formule suivante :

$$P_r = P_e g_e \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^n g_r$$

où P_e est la puissance électrique totale rayonnée par l'antenne émettrice, donc $P_e/4\pi R^2$ serait la densité de puissance (puissance par unité de surface traversée) à la distance R de l'antenne si celle-ci était isotrope et la propagation libre dans le vide. Mais l'antenne est directive avec un gain en émission g_e , de sorte que la densité de puissance à la distance R de l'antenne dans le lobe principal, direction de puissance maximale d'émission, serait plutôt $g_e P_e/4\pi R^2$ toujours dans le vide. Avec le terme $(\lambda/4\pi R)^n$, où λ est la longueur d'onde transmise, on prend en compte le fait qu'il y a en réalité absorption par l'air et les obstacles mais aussi diffusion qui permet à une partie de l'énergie électromagnétique de s'échapper du lobe principal. Ces phénomènes augmentent avec la fréquence $f=c/\lambda$ et l'indice d'encombrement $n \geq 2$. Il ne reste plus qu'à multiplier par le gain de l'antenne réceptrice pour obtenir la puissance effectivement captée P_r par la formule. Nous vous invitons à revoir votre cours sur les ondes et antennes pour plus de détails.

Il faut néanmoins relativiser l'intérêt des antennes directives pour améliorer le rapport signal sur bruit dans le cas des réseaux sans fils où leur usage est surtout réservé aux liaisons point à point en visibilité directe, pont sans fil entre deux bâtiments par exemple. Les points d'accès tout comme les stations des réseaux sans fils, ces dernières étant nomades et mobiles, ont souvent besoin d'une couverture des antennes au contraire aussi étendue que possible. Ce sont alors des techniques beaucoup plus sophistiquées utilisant des multi antennes en émission comme en réception (MIMO) qui permettent en temps réel de **créer un faisceau virtuel directif (technique dite de Beamforming) entre l'émetteur et le récepteur.** Ceci est possible en ajustant les amplitudes et phases des signaux émis par les antennes pour créer une interférence constructive au récepteur, et même adaptative pour suivre le récepteur lorsque celui-ci est mobile. Nous traiterons en détails des techniques de MIMO à la fin du cours de Wifi.

Pour finir, dans le cas d'un réseau d'opérateur devant couvrir une vaste zone et de nombreux abonnés simultanément, il n'y a pas d'autre choix pour s'assurer un rapport signal sur bruit suffisant, que d'utiliser des **antennes puissantes surélevées** de telle sorte que les seuils sanitaires de densité de puissance autorisés ne soient pas dépassés au-delà d'une distance minimale, **périmètre de sécurité**, d'approche de l'antenne.

- **Distorsion et interférence inter-symboles:** Sans guide et en présence d'obstacles le signal radio se propage de l'émetteur au récepteur en suivant généralement de nombreux chemins par réflexions et diffusions multiples. Les nombreuses répliques ayant parcouru des distances et traversé des milieux d'absorptions variables ont donc non seulement subi des atténuations différentes, mais également parviennent au récepteur avec des retards variables. Cette **dispersion des délais de propagation résulte en un étalement du symbole total reçu**, superposition additive de toutes les répliques, par rapport au symbole émis. **Cet étalement est une contribution à la distorsion** supplémentaire de celles que nous avons envisagées et qui s'appliquaient aussi dans le cas de la propagation guidée. Il est d'autant plus important de la prendre en compte que cet **étalement des symboles peut résulter en une importante**

interférence inter-symboles, les symboles successifs débordant les uns sur les autres, phénomène qui limite le débit. La dispersion moyenne des délais dans un réseau sans fil est donc un paramètre crucial auquel doivent s'adapter les protocoles : de l'ordre de 0.4 microsecondes dans un réseau local sans fil s'étendant jusqu'à plusieurs centaines de mètres, et jusqu'à 4 microsecondes dans un réseau métropolitain ou d'opérateur de téléphonie mobile (Wimax, 2G à 4G) dont les cellules peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres.

Mais les réseaux sans fils ont aussi parfois d'autres contraintes à respecter, notamment lorsqu'ils exploitent des fréquences gratuites comme la bande ISM en 2.4 GHz déjà partagée par de nombreuses autres applications comme par exemple les radars. Il arrive que ces applications concentrent leur puissance d'émission dans une bande étroite de fréquences et pour ne pas les gêner et réciproquement, les réseaux 802.11 en 2.4GHz sont tenus de faire, au contraire, de l'**étalement de spectre**, c'est à dire d'émettre sur des canaux couvrant une large bande de fréquences, typiquement 20MHz. La puissance est ainsi diluée en fréquences, autrement dit, la densité spectrale de puissance est réduite de sorte que la fraction de puissance émise par un équipement Wifi dans la bande plus étroite de fréquences d'un radar, par exemple, restera limitée (par ailleurs les équipements Wifi sont conçus pour choisir, autant que possible, des canaux qui ne sont pas déjà occupés ou encombrés).

Conscients de toutes ces difficultés, nous devons donc rechercher diverses solutions de traitement du signal aux problèmes spécifiques aux réseaux sans fils que sont un canal très bruité et par conséquent susceptible de conduire à un taux élevé d'erreurs d'identification des bits, ainsi qu'une dispersion des délais de propagation résultant en distorsion et interférence inter-symboles. Ces solutions devront de plus répondre à l'exigence de pratiquer l'étalement de spectre.

Solutions :

- **La Diversité**

La diversité consiste à transmettre plusieurs fois le même bit dans des conditions différentes pour optimiser la probabilité qu'au moins une de ses transmissions soit correcte. Cette redondance, de même que celle qui consiste à rajouter des bits de codage pour la détection et correction d'erreurs, consomme donc inévitablement des ressources et diminue le débit utile. C'est le prix à payer pour aboutir, au final, après corrections d'erreurs, à un taux d'erreurs résiduelles faible.

La variable sur laquelle on joue en espérant que cela fera varier suffisamment les conditions de la transmission peut être l'instant de l'émission en diversité **temporelle**, la fréquence porteuse en diversité **fréquentielle**, le choix de l'antenne émettrice en diversité **spatiale** du MIMO. En effet, la qualité du signal est susceptible de varier en fonction de la fréquence, de la position de l'antenne et du temps, d'autant plus que les terminaux sont mobiles.

Mais même si chaque bit n'était transmis qu'une fois, remarquons que faire varier les conditions de transmission des bits successifs d'un flux est aussi une façon efficace d'accroître la probabilité qu'un bit mal identifié puisse être corrigé grâce au codage qui le lie aux autres bits d'un même mot si tous ces bits ont été transmis dans des conditions très différentes les uns des autres. En effet, ce sont les erreurs qui se produisent en rafales donc susceptibles d'affecter les bits d'un même mot qui posent problème car sont difficiles à corriger. Or ces rafales sont en général la conséquence momentanée de mauvaises conditions de transmission affectant une antenne à une fréquence et à un instant donnés. On évite alors les multiples erreurs affectant un même mot en transmettant les bits successifs de ce mot en diversité i.e. en pratiquant l'**entrelacement consistant à disperser ces bits successifs sur des tranches de temps, fréquences porteuses, ou antennes, aussi distantes que possible**.

Autrement dit, si pour un moment, une fréquence et une antenne données les conditions venaient à se dégrader jusqu'à produire une rafale d'erreurs, on s'attend à ce qu'après réception et dé-entrelacement, chacun des bits faux réattribué à son mot d'origine, se retrouve isolé dans ce mot donc bien plus facile à détecter et corriger.

- **Étalement de spectre à saut de fréquences**

C'est la technique la plus simple à saisir : la bande de fréquences de notre canal, typiquement large de l'ordre de 20MHz en Wifi est divisée en de **multiples sous bandes étroites** qui sont **exploitées dans un ordre cyclique**, l'émetteur et le récepteur sautant **de façon synchronisée** d'une sous bande à

l'autre dans un ordre prédéterminé. On ne parle ici d'étalement de spectre que dans la mesure où dans la durée, la bande large totale est parcourue par le cycle de saut complet et aussi car la puissance d'émission dans chaque sous bande est toujours faible comme cela est exigé en étalement de spectre. Il n'en demeure pas moins qu'à tout moment, comme ce n'est qu'une sous bande étroite qui est exploitée (de largeur 1 MHz et pour une durée de l'ordre de 0.4 secondes en 802.11) par un couple émetteur récepteur, le **débit accessible par utilisateur** est nécessairement considérablement plus **faible** (ici 1 Mbits/s) que celui offert par des techniques d'étalement de spectre offrant momentanément à l'utilisateur la totalité de la bande de fréquences. C'est pourquoi le saut de fréquences FH (Frequency Hopping) ne fut qu'une étape du Wifi primitif. Cependant il demeure une technique appréciée et **privilegiée pour les protocoles de transmissions à faible débit et faible consommation d'énergie (Bluetooth LTE, Zigbee, Zwave,...) par appareil, ciblant les périphériques et autres objets connectés appelés à se multiplier, de l'Internet of Everything**. Parcourir toutes les sous bandes de fréquences offre également la garantie que si l'une d'elle présente des performances dégradées, avec un faible rapport signal sur bruit dû par exemple à la présence d'une source de bruit ou d'une interférence destructive, les paquets défectueux pourront toujours être retransmis après saut sur une sous bande de fréquences plus favorable à une bonne transmission.

Signalons au passage que la technique est **naturellement très sécurisée**, les espions éventuels n'ayant pratiquement aucune chance d'interpréter les données s'ils ne connaissent pas le cycle de saut de fréquences en cours. Enfin, l'exploitation simultanée de **très nombreux canaux non interférents** (au plus autant que de sous bandes), chacun ayant son propre cycle de sauts, est un autre intérêt majeur de cette technologie **pour un très grand nombre d'objets connectés**. Si le débit par appareil demeure faible, le débit cumulé total proportionnel au nombre d'appareils se partageant l'espace de communication peut même devenir tout à fait conséquent ce qui signifie que la ressource naturelle que constituent les fréquences y est appelée à être nettement moins gaspillée dans une exploitation de type IoT.

- **Étalement de spectre par codage**

Une technique qui permet de s'immuniser contre le bruit est parfois naturellement aussi performante pour faire cohabiter de multiples transmissions concurrentes puisque chacune d'elle est assimilable à du bruit pour toutes les autres. C'est le cas du **CDMA** qui est, comme nous allons voir, tout à la fois une **technique d'étalement de spectre minimisant les effets du bruit, ceux des trajets secondaires donc l'interférence inter-symbole**, mais pourrait aussi convenir en tant que stratégie de **partage d'un canal-réseau** (problématique de couche 2 : accès au média), cette dernière faculté n'étant toutefois pas exploitée en Wifi mais surtout dans les réseaux 3G UMTS (CDMA2000). En effet, tout espace de communication peut se partager de façon déterministe de quatre façons différentes :

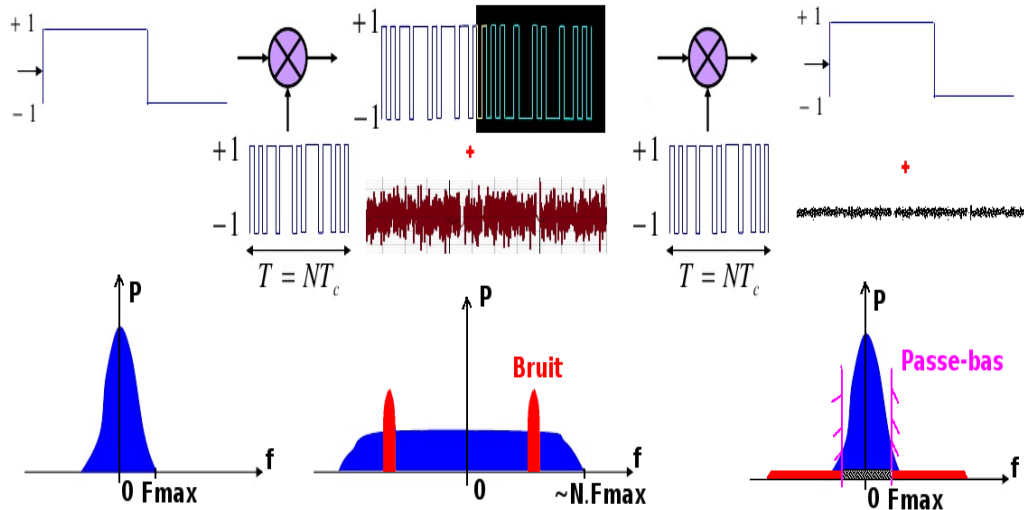
- par un découpage/partage dans le temps (TDMA : Time Division Multiple Access) comme dans le réseau téléphonique 2G qu'est le GSM.

- par un découpage/partage en fréquence (FDMA : Frequency Division Multiple Access) universellement employé soit pour délimiter des canaux-réseaux différents comme en Wifi soit pour se partager un même canal-réseau, par exemple en saut de fréquence comme nous l'avons vu ou par des technologies plus élaborées telles que l'OFDMA et le SCFDMA qui sont au cœur des réseaux d'opérateur 4G et dont nous aurons à reparler.

- en usant de polarisations différentes des ondes électromagnétiques ce qui est moins exploité.

- par **codes différents (CDMA : Code Division Multiple Access)**. Par analogie, il vous serait sans doutes plus facile de comprendre un camarade parlant français au milieu d'une classe d'autres étudiants parlant simultanément en langue étrangère plutôt qu'en français. De même le CDMA autorise des communications simultanées et sur la même fréquence mais utilisant des codes de communication distincts.

Nous avons déjà expliqué le principe de l'embrouillage en cours de traitement du signal : l'émetteur codant une suite binaire quelconque s_i de bits utiles à transmettre en la multipliant par une séquence pseudo-aléatoire Pa_i , le détecteur n'avait plus qu'à multiplier binairement (ou exclusif) le signal reçu par la même séquence pseudo-aléatoire pour la décoder, c'est à dire retrouver les bits initiaux. Supposons maintenant que la séquence pseudo-aléatoire comporte des transitions beaucoup plus fréquentes que la séquence initiale s_i . Ce sera alors aussi le cas de la séquence codée, et un exemple qui le montre est illustré sur la figure suivante :



Naturellement ceci se traduit par un spectre du signal codé s'étalant jusqu'à de bien plus hautes fréquences que le spectre du signal avant codage. On réalise bien ainsi ce qui est exigé pour communiquer sur la bande ISM : faire de l'étalement de spectre. Évidemment, le récepteur en décodant ce signal fait alors exactement l'inverse d'un étalement puisqu'il retrouve le signal initial qui était à bande étroite. Il est intéressant maintenant de se demander ce qu'il advient lors de ce décodage, d'une composante additionnelle indésirable qui serait venue se superposer à notre signal. Cette dernière n'ayant aucune corrélation particulière avec la séquence pseudo-aléatoire, il n'y a aucune raison que le décodage de ce « bruit » aboutisse à un spectre qui ne soit pas au moins aussi étalé que celui de la séquence pseudo aléatoire par laquelle ce bruit est multiplié au niveau du décodeur. Comme le montre la figure, au bout du compte, notre signal décodé se retrouve dans sa bande étroite initiale tandis que toute la puissance de la composante indésirable (Bruit) est au contraire étalée (si elle ne l'était pas déjà), diluée sur une beaucoup plus large plage de fréquences ce qui permet alors d'en éliminer l'essentiel par filtrage.

Ce principe est efficace non seulement contre le bruit électromagnétique ambiant mais aussi pour éliminer la contribution d'une communication concurrente codée sur une autre séquence pseudo-aléatoire. Comme nous l'avions annoncé, plusieurs communications peuvent par conséquent se partager simultanément une même bande de spectre étalé sans se gêner : dès lors que les différentes séquences pseudo-aléatoires sont décorrélées, un récepteur-décodeur ne récupère en bande étroite que le signal qui a été codé avec la séquence pseudo-aléatoire qu'il utilise. Tous les autres demeurent étalés donc facilement éliminés par filtrage.

Faire de l'étalement de spectre, filtrer le bruit, crypter ses données et permettre à plusieurs communications de se partager une même bande de fréquences sans se gêner, tout cela simultanément, est déjà une performance, mais le CDMA réalise une prouesse supplémentaire: l'élimination par filtrage des répliques plus ou moins retardées et atténuées dues aux trajets multiples ! Cela est possible si la séquence pseudo-aléatoire utilisée est choisie de telle sorte que sa fonction d'auto-corrélation soit très étroite afin que la réplique en retard se décorrèle très rapidement du signal principal au fur et à mesure que son délai augmente. Le tableau ci-contre donne un exemple simplifié qui illustre comment sa fonction d'auto-corrélation évolue au fur et à mesure que l'on décale un mot de 7 bits, d'un certain nombre de bits par rapport à lui même.

On a adopté ici une définition simplifiée de la fonction d'inter-corrélation entre deux mots qui n'est autre que la différence entre le nombre de bits

i	S(i)	$R_{s,s}(i)$
0	0111001	7
1	1110010	-1
2	1100101	-1
3	1001011	-1
4	0010111	-1
5	0101110	-1
6	1011100	-1
7	0111001	7

Autocorrélation en fonction du décalage i

identiques et le nombre de bits différents de ces mots. Ainsi on constate que le mot choisi ne l'a pas été au hasard : sa fonction d'auto-corrélation devient très faible (-1) pour un décalage d'au moins un bit. De même, si une séquence pseudo aléatoire Pa_i a une auto-corrélation qui devient très faible dès qu'on la décale d'un bit par rapport à elle-même, cela nous assure que sur toute réplique d'un signal (codé avec Pa_i) parvenant au récepteur avec un délai δt de l'ordre de ou supérieur ou égal à la durée correspondant à 1 bit, le décodage échouera et le spectre de cette contribution restera étalé et par conséquent facile à filtrer. En effet, ce décodage consiste dans ce cas à multiplier la séquence codée décalée $[s_j \cdot Pa_i](t - \delta t)$ par $[Pa_i](t)$ ce qui ne nous redonne pas s_j . **En filtrant les répliques donc en réduisant l'étalement temporel de chaque symbole, c'est bien entendu le problème de l'interférence inter-symbole que l'on résout du même coup.**

Dans ce dernier exemple, pour expliquer le calcul de la fonction d'auto-corrélation nous en sommes venus à considérer, plutôt qu'une séquence pseudo-aléatoire générée par un algorithme, un simple mot. De fait, comme pour les séquences pseudo-aléatoires, il est possible de choisir des mots possédant une fonction d'auto-corrélation très étroite. Si maintenant on choisit également ces **mots faiblement corrélés entre eux (faiblement inter-corrélés)**, cette dernière propriété est alors exploitable non plus pour se partager un même canal réseau entre plusieurs communications simultanées comme c'était le cas avec les séquences pseudo-aléatoires, mais plutôt **pour transmettre des mots faciles à distinguer les uns des autres**. C'est ce que faisait une version basée sur le **CDMA du 802.11 primitif**. Il s'agissait par exemple, pour un bit 1 d'information, de transmettre une séquence de 11 bits, dite séquence de Barker, et pour un bit 0 la séquence inverse : on a donc deux mots possibles à transmettre qui non seulement possèdent une fonction d'auto-corrélation très étroite mais encore sont très peu inter-corrélés. A nouveau le récepteur ne fait que multiplier la séquence reçue par celle ayant servi à coder, la séquence de Barker, pour retrouver soit 1 soit 0.

Cette technique baptisée **DS : Séquence Directe**, n'offre que de faibles débits car on voit que la séquence de Barker ne sert à transmettre qu'un bit utile, là où on aurait pu en espérer jusqu'à 11. Avec le **802.11b le Wifi a généralisé la technique DS** en exploitant un ensemble plus important, véritable **dictionnaire de mots appelés CCK, judicieusement choisis pour leurs fonctions d'auto-corrélation très étroite**. Ces mots sont également sélectionnés pour la **très faible inter-corrélation** de chacun avec tous les autres, ceci pour faciliter l'identification, reconnaissance de ces mots par le récepteur puisqu'ils ne se « ressemblent » pas. Concrètement, il n'est plus alors question de multiplier le bit à transmettre par une séquence pseudo-aléatoire ou une séquence de type Barker, mais d'associer à chaque mot de bits utiles que l'on désire transmettre, un mot CCK de notre dictionnaire que l'on transmet à la place.

Le récepteur non plus n'a plus à multiplier le mot reçu par la séquence (PA ou DS) ayant servi à coder, mais plutôt à calculer la fonction d'inter-corrélation entre le mot reçu et tous les mots possibles du dictionnaire (Cf cours de première année). Si l'un de ces derniers correspond au mot qui a été effectivement transmis, une inter-corrélation maximale doit être obtenue avec celui-ci et minimale avec tous les autres permettant du même coup de l'identifier sûrement et de le traduire pour retrouver le mot d'information utile initial. **Le débit progresse** alors nettement par rapport au 802.11 à séquence directe pour atteindre **11Mbits/s puisque chaque mot CCK code désormais pour un mot de 11 bits d'information**.

Les autres avantages offerts par ce codage, à savoir, comme en CDMA, l'étalement de spectre, la réduction du bruit et des répliques donc de l'interférence inter-symbole, sont évidemment toujours essentiels.

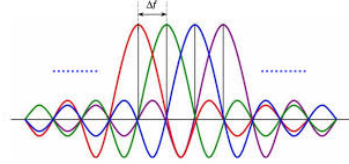
- **Étalement de spectre OFDM**

La stratégie de l'OFDM pour étaler le spectre de notre signal sur une bande de fréquences de 20MHz est tout simplement de **subdiviser celle-ci en multiples sous bandes porteuses (n=48 en Wifi), chacune d'elle véhiculant une fraction (1/n) du débit total**. Le nombre de symboles transmis par seconde sur l'une de ces sous-porteuses étant divisé par n, les symboles s'y succèdent beaucoup plus espacés dans le temps, ce qui **réduit drastiquement l'interférence inter-symboles**.

Sur chaque sous porteuse la modulation est adaptative chaque symbole codant éventuellement pour un bit unique (modulation ASK ou PSK par exemple) si les conditions de transmission sont

mauvaises, ou k bits (en modulation APSK) si les conditions s'y prêtent. Avec 48 sous porteuses, le symbole OFDM total véhicule donc jusqu'à $48.k = 288$ bits (pour $k=6$, en 64QAM) simultanément.

L'Orthogonal Frequency Digital Multiplexing doit sa dénomination au fait que les fréquences porteuses sont dites orthogonales, ce qui traduit le fait que même si les bandes de sous porteuses contiguës se recouvrent partiellement, étroitement serrées qu'elles sont pour exploiter au mieux l'espace fréquentiel disponible, l'influence réciproque est minimisée grâce au fait que la fréquence d'émission maximum de chacune coïncide avec un nul d'émission pour toutes les autres :



Enfin, on se souvient que la distorsion d'un symbole sur une ligne de transmission résulte du fait que toutes les fréquences qui le composent ne sont pas transmises également i.e la fonction de transfert $H(f)$ varie. Un symbole n'occupant qu'une bande de fréquences très étroite sur chaque sous porteuse, $H(f)$ peut y être considérée constante, autrement dit l'OFDM est pratiquement sans distorsion.

Last but not least, le grand nombre de sous porteuses fait de l'OFDM le système idéalement adapté à une pratique efficace de l'entrelacement consistant à répartir les bits successifs de données sur des sous porteuses non contiguës parmi toutes celles disponibles, et par conséquent, lorsque ces bits sont les mêmes (répétés), une pratique particulièrement performante de la diversité en fréquences.

C'est grâce à toutes ces bonnes propriétés de couche physique, qui assurent sa robustesse et son adaptabilité, que l'OFDM s'est finalement imposé sur tous les systèmes de transmission haut débit modernes: ADSL, Wifi, Wimax, 3G, 4G, TNT. Mais les multi-porteuses offrent de plus un moyen simple et efficace de répartir intelligemment les ressources en fonction des besoins des utilisateurs et applications (QoS) en leur attribuant un nombre plus ou moins grand de sous porteuses pour une durée plus ou moins longue. Le Wifi n'a pas été conçu pour ce partage rationalisé des fréquences et du temps qui devient crucial et s'impose (avec l'OFDMAccess et le TDMAccess) pour minimiser le gaspillage dans les réseaux cellulaires où un grand nombre d'utilisateurs sont amenés à se partager la même bande de fréquences d'une cellule du réseau.