

Les fondements de la modulation.

Dans cette partie, nous allons voir les méthodes élémentaires qui permettent de transporter un signal sur une porteuse, ce qui représente la moitié du travail de tout MoDem qui se respecte. (MoDem est une contraction de Modulateur-Démodulateur).

- La modulation permet de "bricoler" une porteuse pour qu'elle puisse transporter une information. C'est la partie émission des données.
- La démodulation consiste quant à elle à récupérer l'information utile en supprimant la porteuse.

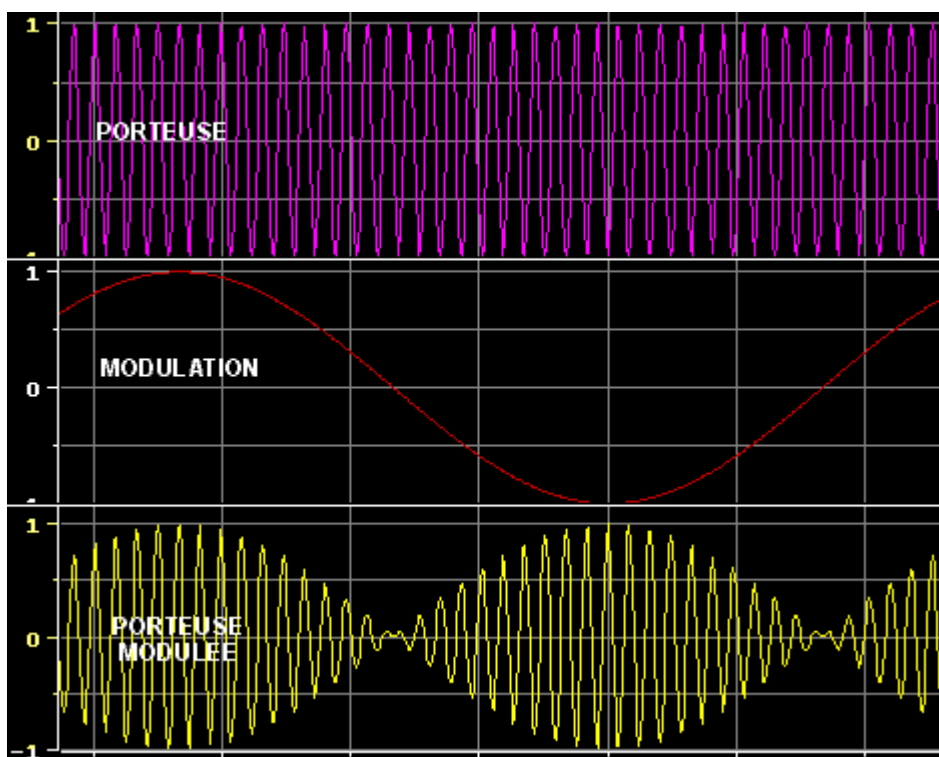


La modulation d'amplitude.

Position du problème.

- Nous disposons d'un oscillateur capable de générer un signal sinusoïdal à une fréquence de 123 MHz (au hasard). Ce signal est appelé "porteuse".
- Par ailleurs, nous disposons d'un autre oscillateur, également capable de générer un signal sinusoïdal à une fréquence de 3 MHz (toujours au hasard). Ce signal est appelé "modulation".
- Enfin, nous avons un tas de silicium capable d'effectuer le produit (au sens mathématique) de ces deux signaux.

Voici graphiquement la représentation dans le temps de ce qui vient d'être dit:



100n

200n

300n

time (Seconds)

Constatations.

La porteuse est "tordue" par l'opération. On voit clairement que son **enveloppe** a la forme du signal modulant que l'on a appelé **modulation**. En voyant le résultat, on comprend bien pourquoi cette méthode est appelée **modulation d'amplitude**, mais on comprend moins pourquoi faire cette cuisine.

Pourquoi faire, alors ?

Suivant le domaine d'application, le but recherché est légèrement différent.

En radio communications.

Les signaux électriques, lorsqu'ils atteignent des fréquences élevées, acquièrent des propriétés électromagnétiques qui leur permettent de se propager dans le vide et dans l'atmosphère, ce que ne sait pas faire un signal électrique de basse fréquence (les fréquences audibles par exemple, entre 20Hz et 20 KHz). Il devient alors possible de transporter de la musique autrement que dans des fils électriques. Pratique, en voiture par exemple...

Bien entendu, un autre tas de silicium est capable à l'autre bout d'effectuer l'opération inverse: la **démodulation** pour jeter la porteuse qui ne sert plus et récupérer la modulation. C'est le rôle des récepteurs radio.

Ce principe est naturellement utilisé aussi pour la télévision, le téléphone cellulaire etc.

En communication sur des câbles.

Ici, l'objectif est un peu différent. Les signaux électriques savent se propager dans un milieu conducteur. Mais suivez-moi bien.

Sur un câble bien conçu, il est possible de faire passer un signal électrique compris entre le courant continu (0Hz) et des fréquences assez élevées (disons 1GHz, un milliard de Hz, dans le cas d'un câble coaxial construit dans ce but). Si l'on utilise ce câble pour passer des signaux acoustiques (entre 20 Hz et 20KHz), c'est un peu comme si l'on construisait une autoroute à 6 voies pour y faire passer des vélos en file indienne.

Si en revanche, on utilise des porteuses modulées, judicieusement placées pour pouvoir les isoler les unes des autres à la réception avec des filtres (on sait bien le faire), on va pouvoir faire passer plusieurs signaux sur le même câble sans les mélanger! (multiplexage spatial).

C'est bien ce qu'il se produit sur LE câble (réseau câblé, celui de France Télécom Câble par exemple), puisque l'on y retrouve plusieurs chaînes de télévision, la radio, Les connexions Internet et il reste encore un peu de place.

Dans le cas de l'ADSL, nous y reviendrons plus loin, le multiplexage spatial est également utilisé.

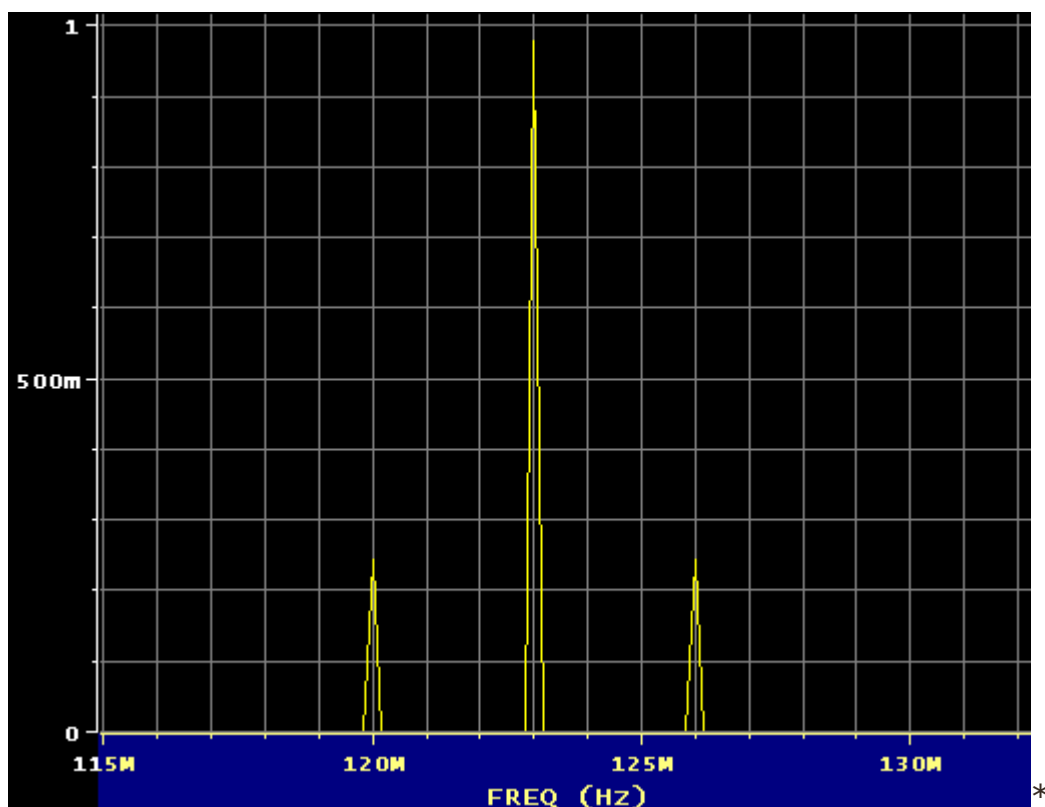
Le spectre de l'onde modulée.

Un certain FOURIER (Joseph FOURIER, 1768-1830) Physicien français a démontré qu'un signal périodique de forme quelconque peut toujours être décomposé en la somme de signaux sinusoïdaux, selon une série dite "de Fourier". Ces signaux sinusoïdaux sont appelés "harmoniques". Il n'est pas question de s'amuser ici à faire des calculs, juste de comprendre ce que c'est qu'un "spectre".

Un spectre de Fourier représente sur une échelle de fréquence, pour un signal périodique donné, la distribution des harmoniques ainsi que leur amplitude.

Dans le cas simple d'une porteuse sinusoïdale modulée en Amplitude par un autre signal sinusoïdal, le calcul reste simple, mais nous ne le ferons pas quand même. Ceux qui ont encore quelques souvenirs de lycée se rappelleront peut-être qu'un produit de sinus fait apparaître les cosinus de la somme et de la différence des angles. (Mais un cosinus peut se transformer en sinus).

Nous prenons donc une machine à calculer un peu perfectionnée et nous lui demandons de faire le travail à notre place:



Celle qui a fait ce calcul est TRES perfectionnée et EXTREMEMENT chère...

Sur ce spectre calculé, on voit bien une composante à 123 MHz et deux autres, l'une à 120 MHz ($123-3$) et l'autre à 126 MHz ($123+3$).

Dans ce cas précis, si l'on construit un filtre qui ne laisserait passer que les fréquences comprises entre 110 MHz et 130 MHz, toute l'information passerait et on pourrait recommencer l'opération avec un autre signal en dehors de la plage de ce filtre, pour passer un signal différent du précédent, sans que ceux-ci se mélangent.

Ici, nous avons une largeur de canal de 6 MHz ($126-120$)

Notions connexes: BLD, BLU...

C'est dommage de ne pas en parler ici, même si ça ne sert pas en ce qui nous concerne (du moins, à ma connaissance). Vous pouvez [passer ce paragraphe](#), où profiter de l'occasion pour, peut-être, augmenter votre culture technologique. Dans le spectre ci-dessus, que peut-on remarquer ?

- Les deux "raies" à 120 et 126 MHz ont rigoureusement la même amplitude, l'information contenue dans chacune de ces raies est elle aussi rigoureusement identique. Si le signal modulant était un signal plus complexe, (nous en verrons un exemple plus loin) nous observerions une parfaite symétrie des deux distributions de raies de part et d'autre de la porteuse. Ces deux informations sont donc redondantes.
- La raie de la porteuse a une grosse amplitude et n'apporte aucune information sur la forme du signal modulant. Dans la pratique, son seul but est d'indiquer la fréquence de la porteuse.
- Dans le cas où nous devons créer une onde électromagnétique à partir de cette porteuse modulée, il va nous falloir de l'énergie pour la faire porter loin. Un amplificateur de puissance qui va consommer des watts électriques et restituer:
 - des watts HF pour l'onde électromagnétique (un peu)
 - des watts thermiques (beaucoup), à cause du rendement, toujours assez largement inférieur à 100%

Partant de ces observations, que pourrait-on conclure ?

- L'énergie consommée à l'émission va se répartir dans:
 - La raie de la porteuse (énergie perdue, il n'y a pas d'information là dedans, hormis celle de sa fréquence, qu'il faut tout de même connaître pour pouvoir démoduler correctement).
 - les deux bandes latérales, mais elles sont symétriques et une seule pourrait suffire, puisqu'elles contiennent toutes les deux les mêmes informations.

Donc...

Bande Latérale Double.

On va éliminer la raie de la porteuse et n'émettre que les bandes latérales. On va gagner ainsi en efficacité puisque l'énergie dissipée à émettre la raie de la porteuse ne sera justement plus dissipée... La fréquence de la porteuse reste facile à retrouver, puisqu'elle se situe au milieu du spectre.

Bande Latérale Unique.

Plus fort, on bloque la porteuse ET une bande latérale. L'énergie utilisée par l'amplificateur va être concentrée sur la seule partie qui contient

vraiment l'information. Le seul détail technique qui reste à résoudre est de savoir retrouver la fréquence de la porteuse, pour pouvoir démoduler.

Mais alors...

Pourquoi ne pas y avoir pensé plus tôt ? On y gagne :

- Très largement en rendement, pour une puissance électrique consommée, nous aurons une énergie plus importante dans la partie signifiante du signal.
- En largeur de canal aussi puisqu'il n'y passe plus qu'une bande latérale sans porteuse. Donc la largeur devient plus de deux fois inférieure à ce qu'il était nécessaire avant d'adopter cette technique.

Pour y avoir pensé, on y a pensé, on l'a même fait, tous les radio amateurs vous le diront. Il n'y a qu'un seul petit problème, c'est qu'à la réception, on ne peut plus reconstituer le signal utile avec un démodulateur simple. Pour y arriver, il va falloir d'abord reconstruire tout ce qui manque :

- La raie correspondant à la porteuse
- La bande latérale qu'on a éventuellement supprimée, dans le cas de la BLU.

Bien entendu, c'est faisable, au prix d'un récepteur qui devient plus complexe. Dans le cas de la BLD, c'est encore assez simple, il suffit de reconstruire la raie de la porteuse au milieu du spectre du signal reçu. Dans le cas de la BLU, c'est beaucoup plus compliqué.

La BLU est une technique très répandue sur les émetteurs mobiles qui doivent, avec peu d'énergie, disposer d'une longue portée. (Radio de bord sur des voiliers par exemple). En général, on est assez loin des normes "HIFI".

Cette méthode, utilisée en "graphie" (émission radio en morse) a permis avec des équipements très rudimentaires les premières liaisons radio à l'échelle mondiale.

Conclusions.

Dans cette page, nous avons vu :

- Le principe de modulation d'une porteuse en amplitude.
- La notion de spectre d'un signal.
- La notion de largeur de canal.
- Le multiplexage spacial.

Mais nous ne voyons pas encore à quoi ça peut nous servir. Imaginons maintenant que la porteuse à 123 MHz soit :

1. Modulée avec un signal à 3 Mhz pour signifier "1"
2. Pas modulée du tout pour signifier "0"

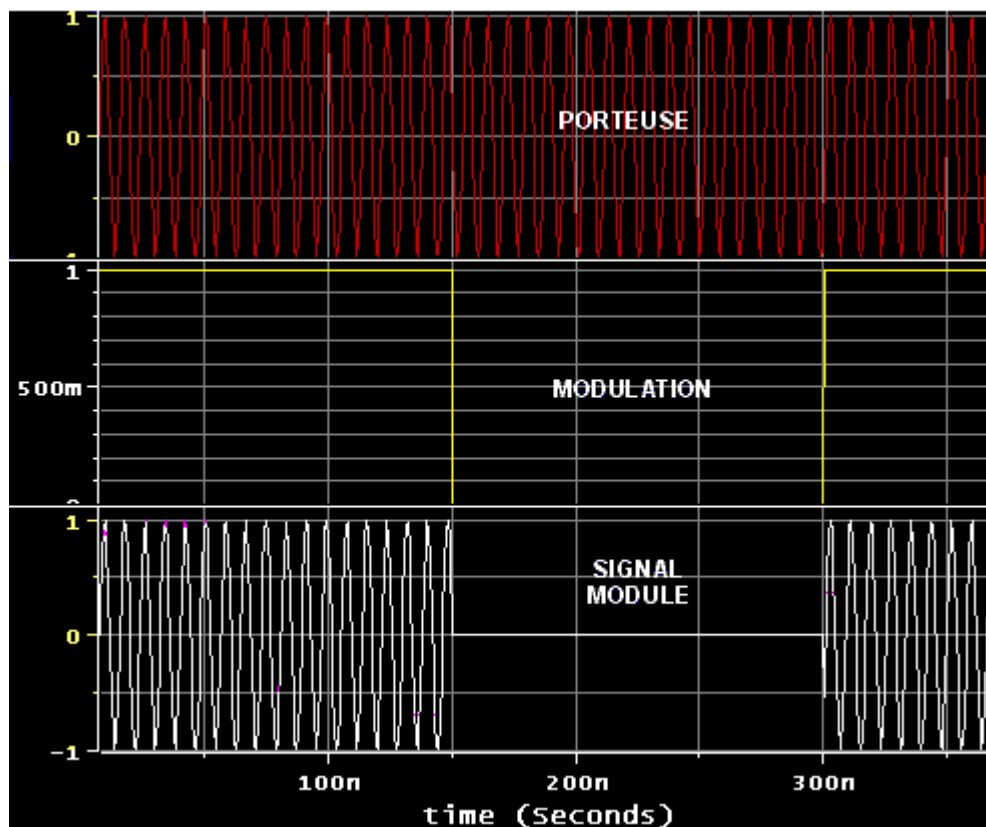
Pour pouvoir avoir des chances de reconstruire correctement l'information à l'arrivée, il faudra moduler au moins sur une demi période du signal modulant. On pourra donc envoyer les bits au rythme du double de la fréquence du signal modulant, soit 6Mbits/seconde. Ca vous paraît beaucoup? Pourtant c'est du gaspillage! On devrait arriver dans un canal aussi "large" à passer au moins 10 fois plus.

Pour l'instant, avec la méthode que nous avons vue, le seul moyen d'augmenter la bande passante, c'est d'augmenter la fréquence du signal modulant (sans dépasser la limite théorique de la moitié de la fréquence de la porteuse. Mais à la lumière de ce que nous avons vu, si nous multiplions par deux la fréquence de la modulation, nous multiplions également par deux la largeur du canal...

Comme la technique de la BLU n'est pas utilisable ici, Il va falloir trouver autre chose...

Du sinus au carré.

La modulation sinusoïdale, c'est bien pour la radio, moins pour le numérique où l'on manipule des "0" et des "1". Il est alors plus simple de moduler avec un signal rectangulaire:

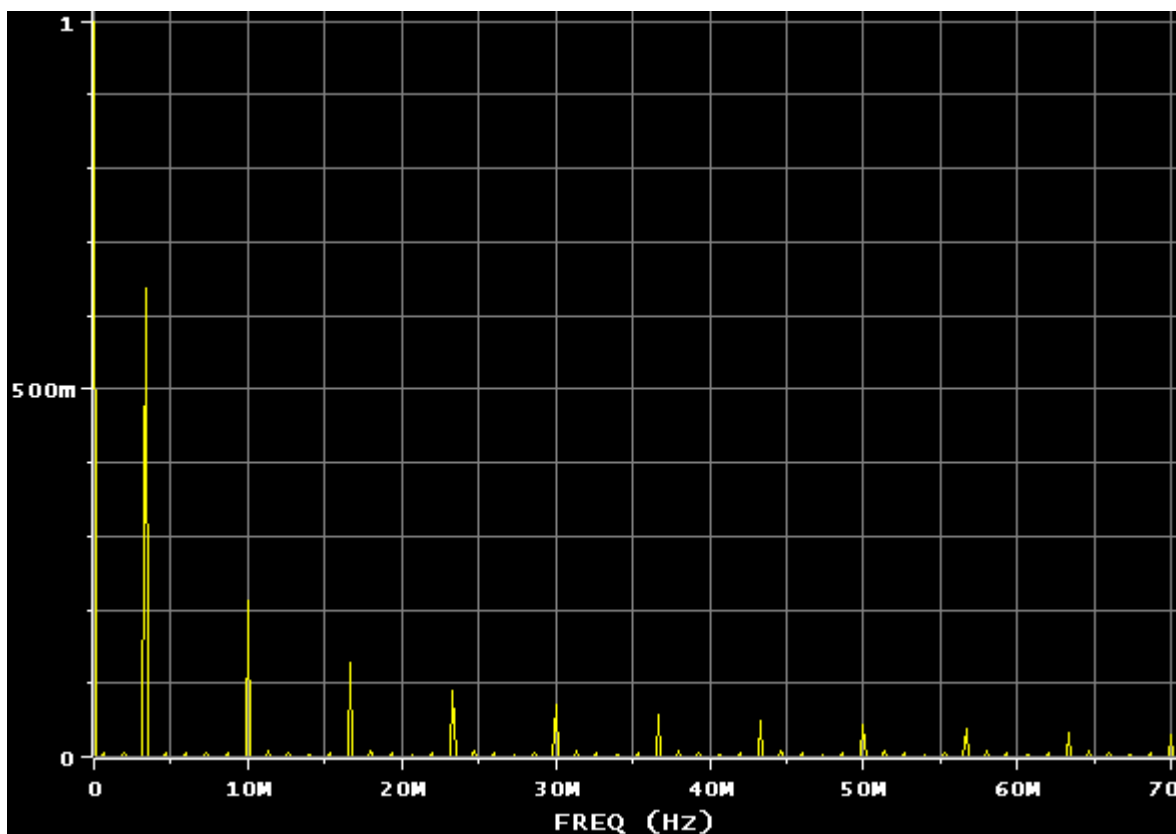


Cette méthode est bien connue des télégraphistes, où un "1" (porteuse) = un point ou un trait et un "0" (pas de porteuse) correspond à un silence. Même dans le cas

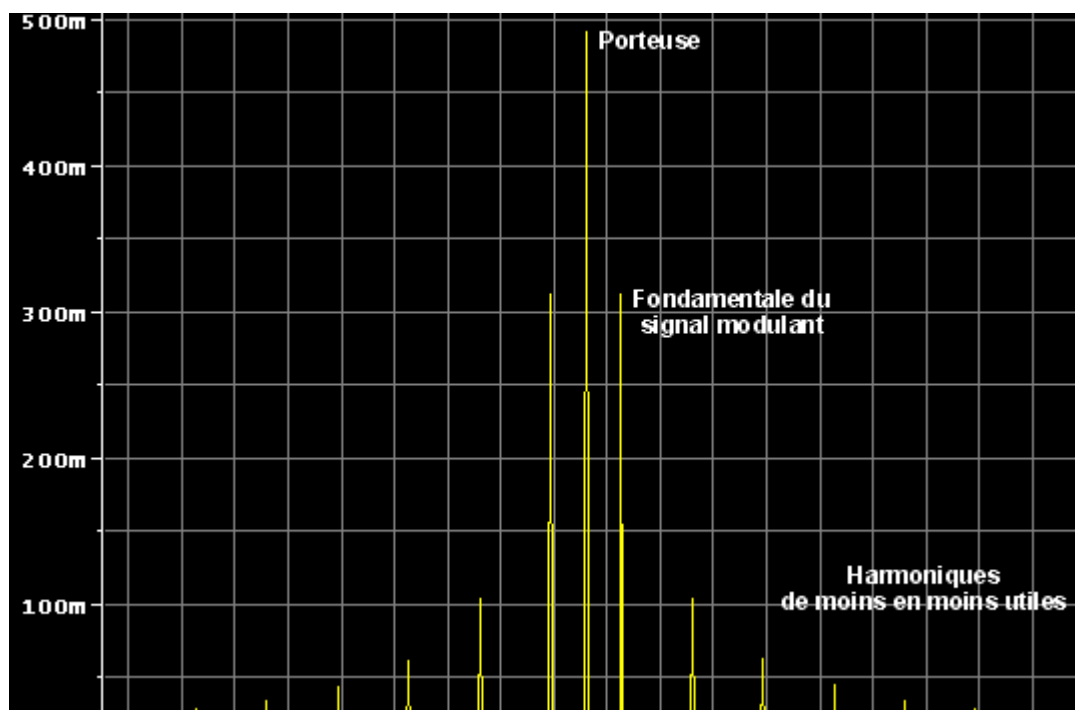
de virtuoses du morse, la fréquence moyenne du signal modulant est très faible, ce qui conduit à une largeur de canal dérisoire. Mais voyons tout de même les choses d'un peu plus près...

Spectre d'un signal carré.

Un signal carré, selon FOURIER, se décompose en une somme de sinus de fréquences de plus en plus élevées (multiples de la fréquence dite "fondamentale", égale à celle du signal carré lui-même). Voici le spectre d'un signal carré de 3 MHz:



Regardons maintenant le spectre de notre porteuse de 123 MHz modulée avec ce signal:





Comme on pouvait s'y attendre, on retrouve le spectre du signal carré placé de part et d'autre de la porteuse. La largeur du canal devient beaucoup plus importante à cause des harmoniques. Fort heureusement, il n'est pas utile de les laisser toutes passer pour être capable à la réception de restituer notre information. Si l'on doit juste se contenter de détecter la présence ou non de la porteuse, il suffira même de ne laisser passer que la fondamentale, se ramenant ainsi à une modulation sinusoïdale, comme on l'a vu plus haut.

Conclusions.

Par rapport au premier exemple de la porteuse modulée par un sinus, il n'y a pas beaucoup d'améliorations, on a même ajouté les harmoniques qui, si l'on doit les récupérer, nécessitent d'augmenter la largeur du canal. Mais le signal modulant est facile à fabriquer.

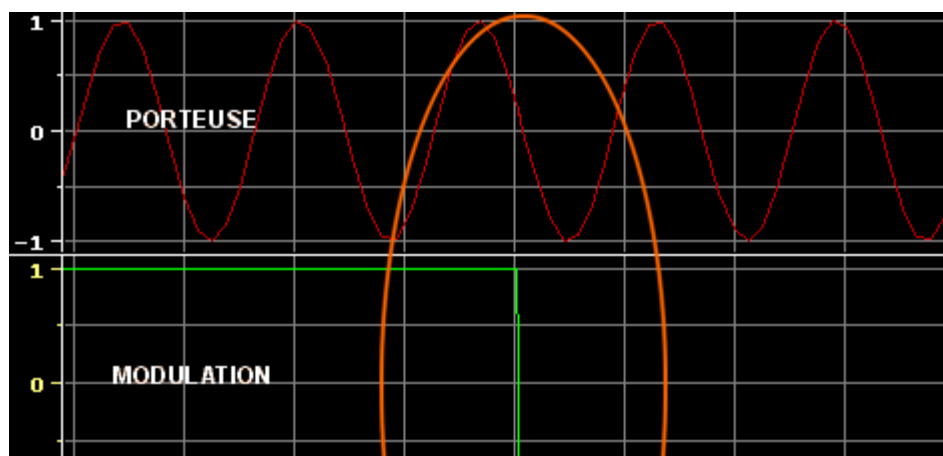
Remarque importante.

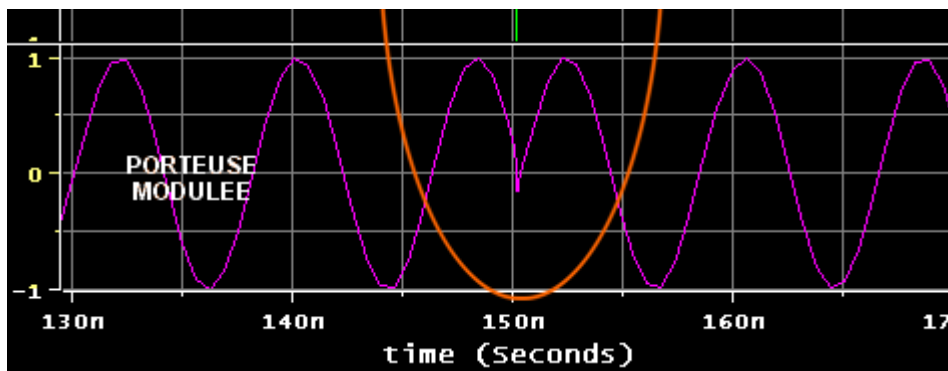
Nous avons toujours utilisé des signaux de modulation périodiques. Ce ne sera plus le cas lorsque nous aurons à passer des données. Ceci induit quelques ennuis:

- L'analyse de Fourier ne fonctionne QUE sur des signaux périodiques. Nous pouvons cependant créer artificiellement un spectre dans une unité de temps en admettant que le signal modulant observé dans cette unité de temps constitue une période d'un signal récurrent. Mais d'une unité de temps à la suivante, ce signal aura changé de forme, si bien que le spectre également. Les outils de mesure nous montreront alors une sorte de "spectre moyen" beaucoup plus flou que ce que nous montrent les exemples précédents. Ceci n'est pas grave et n'entame pas les réflexions faites jusqu'ici.

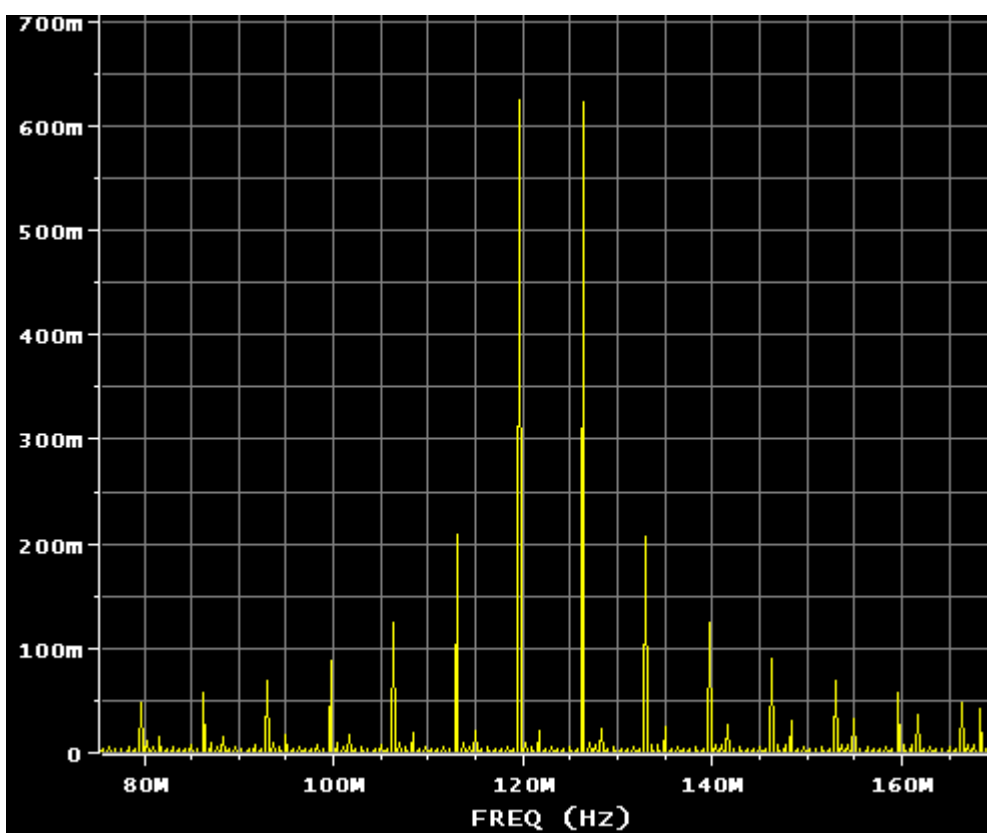
Un autre moyen...

Jusqu'ici, nous avons vu la modulation d'une porteuse en faisant varier son amplitude. Il existe un autre moyen beaucoup employé dans la transmission numérique: la modulation de phase:





Dans cet exemple, l'échelle de temps a été très dilatée pour bien voir ce qu'il se passe. La porteuse subit une rotation de phase de 180° au changement d'état du signal modulant, ce qui revient à multiplier la porteuse par "-1" sur un niveau "0" par exemple. Ce type de modulation peut également s'analyser par Fourier (bien que le calcul soit considérablement plus compliqué, mais on s'en fout, c'est la machine puissante et chère qui le fait):



Remarquez ici qu'il n'y a plus une seule raie de grande amplitude, mais deux, à 120 MHz et 126 MHz, avec une porteuse toujours à 123 MHz et une modulation à 3 MHz.

Conclusion.

Ici aussi, on pourra reconstituer l'information en ne conservant que ces deux raies, ce qui nous fait toujours un canal de l'ordre de 6 MHz

On n'a encore rien gagné, si ce n'est que l'on connaît une nouvelle méthode de modulation.

D'autres modulations sont également possibles :

- La modulation par sauts de phase. Même technique que vue plus haut, mais les déphasages peuvent être d'un angle inférieur.
- La modulation en fréquence, où le fréquence de la porteuse est modifiée par le signal modulant. Cette méthode est peu utilisée pour la transmission de données numériques.

Récapitulons.

Nous en avons vu principalement deux types de modulation:

- La modulation d'amplitude, qui ne touche pas à la fréquence de la porteuse, juste à son amplitude.
- La modulation de phase, qui ne touche pas à l'amplitude de la porteuse, juste à sa phase.

Eh bien, la solution vient d'être donnée, il suffit de combiner les deux types de modulation pour augmenter le rendement...

Et puis, on va même aller plus loin:

- Plutôt que de moduler l'amplitude sur deux niveaux, pourquoi pas sur "n" ?
- Plutôt que de moduler la phase par pas de 180 °, ce qui ne donne que deux possibilités, pourquoi ne pas le faire par pas de 90°, ce qui en donnerait 4 ?
- Mais que va-t-on y gagner exactement?

On est justement là pour le voir...

Définitions PRIMORDIALES...

Il est grand temps maintenant de tordre le cou à une confusion présente dans bien des esprits: Il y a normalement une **ENORME** différence entre un **bit** et un **baud**.

Le Bit.

C'est une valeur binaire (Binary Digit). Un bit = 0 ou Un bit=1. Il est impossible d'aller plus loin.

Le symbole.

Encore appelé "cellule". Nous avons vu qu'il fallait définir une durée minimale de modulation de la porteuse, pour pouvoir reconstruire le signal à la réception. Typiquement : Une demi période du signal modulant.

Dans la pratique, le nombre de symboles que l'on peut faire passer par unité de temps influe directement sur la largeur du canal.

Le Baud.

"The number of discrete signal events per second in a data transmission"

(Définition officielle.)

Un Baud est donc une unité de vitesse, parler de bauds/seconde n'a aucun sens . Lorsque l'on module une porteuse, on le fait avec une modulation d'une valeur donnée pendant un temps donné. Exemple:

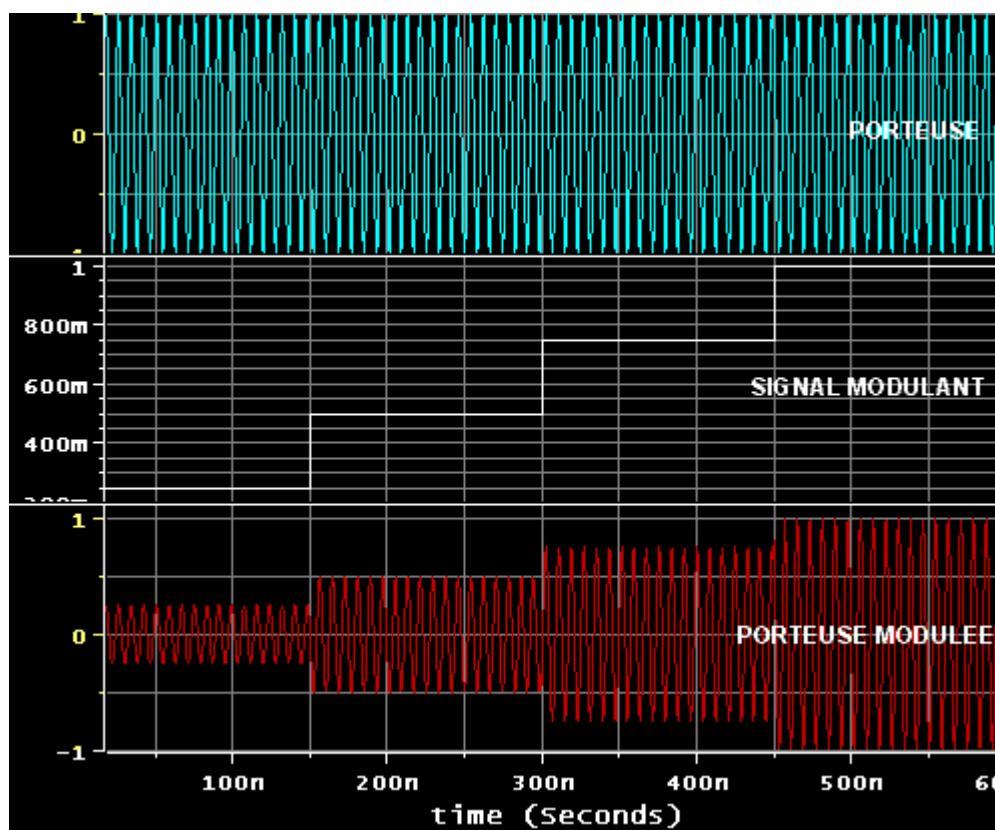
Je module une porteuse à 123 MHz avec un signal plat, pendant 0,15 μ S (micro seconde, 0.15×10^{-6} seconde). Ce signal plat peut prendre 4 valeurs: 0,25 ou 0,5 ou 0,75 ou encore 1.

Toutes les 0,15 μ S (i.e. toutes les 150 nS), je change la valeur du signal plat. Je construis des symboles (ie. cellules) qui contiennent 2 bits! Pourquoi?

$4=2^2$ autrement dit, on peut définir quatre valeurs différentes avec 2 bits:

Taux de modulation	0,25	0,5	0,75	1
Equivalent binaire	00	01	10	11

Voici ce que ça donne en simulation:



Si l'on s'y prend bien en choisissant judicieusement la durée de la cellule, le spectre de la porteuse modulée entrera dans la largeur du canal que l'on s'est donnée, et on y gagnera quand même en densité d'information transportée.

La vitesse en Bauds représente la quantité de ces cellules que l'on peut transporter par seconde. Dans notre exemple, $1/150.10^{-9}$ (les cellules font 150 nS) soit environ 6 mégabauds. Comme on transporte 2 bits par cellule, on est à environ 12 mégabits/seconde.

Un baud n'est donc pas forcément égal à 1 bit/seconde, il ne l'est même

quasiment jamais et un modem V90 ou V92 à 56 kb/s n'est certes pas un modem 56 000 bauds. Il est clairement impossible d'obtenir une largeur de canal de seulement 4 KHz en passant 56 000 symboles par seconde.

Vous l'avez compris, le jeu va maintenant consister à enfilez le plus grand nombre possible de bits dans un seul symbole...

Les modulations hybrides.

Amplitude.

Rien n'interdit, donc, de moduler une porteuse à la fois en amplitude et en phase. Nous avons une porteuse que nous modulons en amplitude, seulement avec deux niveaux:

Taux de modulation	0,5	1
Equivalent binaire	0	1

Bien entendu, avec cette méthode, nous ne transportons qu'un seul bit à la fois, chaque cellule ne contient qu'un bit.

Amplitude + phase.

Maintenant, nous allons en plus moduler en phase. Le déphasage sera nul ou égal à 180°

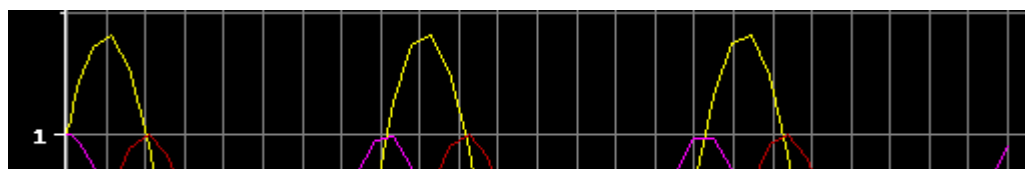
Taux de modulation	0,5	0,5	1	1
Déphasage	0	180	0	180
Equivalent binaire	00	01	10	11

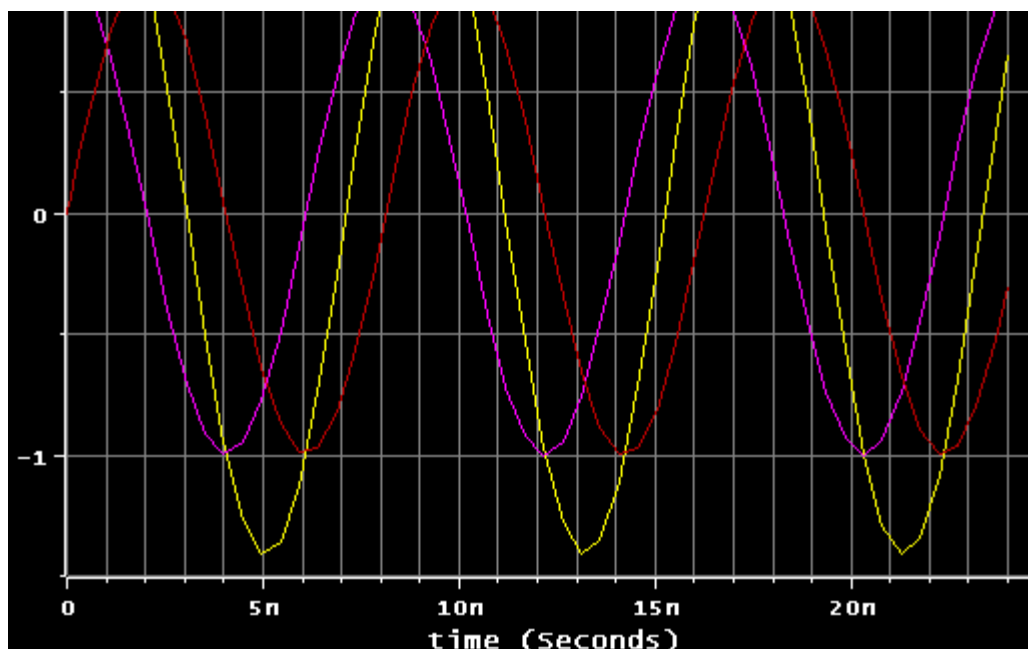
Pour chaque niveau d'amplitude, nous avons deux cas possibles. Au total, ça nous en fait 4. Cette fois-ci, nous transportons 2 bits à la fois dans chaque cellule. Nous avons augmenté le nombre de bits pas seconde sans augmenter le nombre de cellules pas seconde (bauds), donc nous améliorons le débit de données sans augmenter la largeur du canal.

Porteuses en quadrature.

Une astuce d'électronicien, un peu déroutante, mais efficace quand même. Nous allons utiliser maintenant non pas une, mais deux porteuses rigoureusement de même fréquence. Elles sont déphasées de 90°

Ce qui est déroutant, c'est que lorsque l'on additionne deux porteuses de fréquence f_0 en quadrature, on obtient une seule porteuse, toujours de fréquence f_0 :





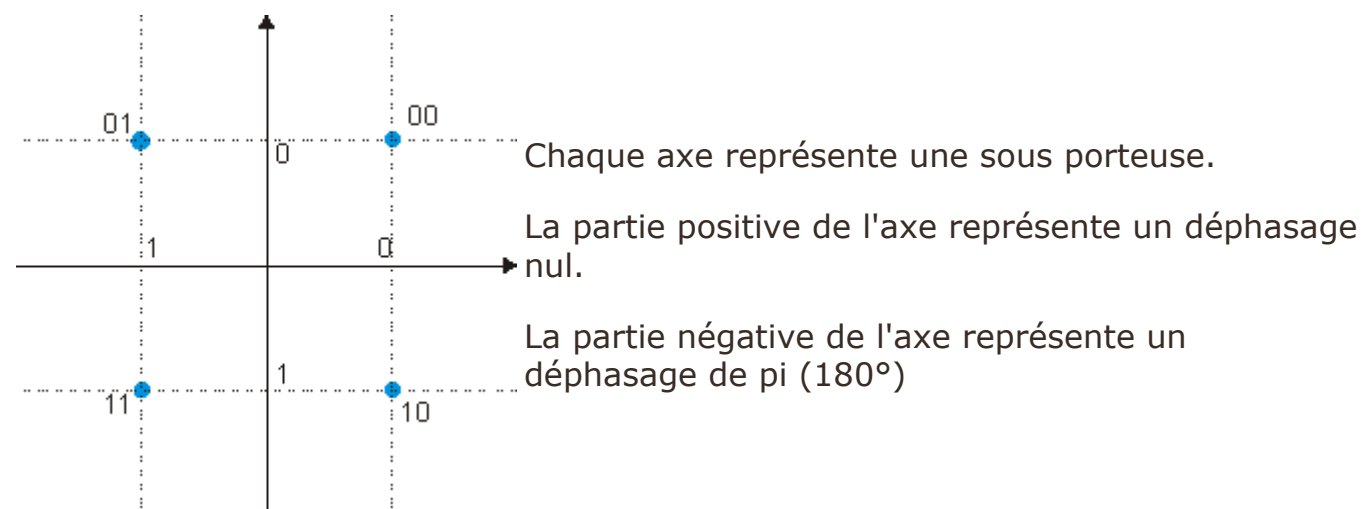
Mais rassurez-vous, les électroniciens ont plus d'un tour dans leur sac et savent parfaitement reconstituer les deux porteuses initiales à partir de la résultante.

L'avantage de cette méthode est que la porteuse résultante n'a pas changé de fréquence, mais comme les deux "sous-porteuses" en quadrature vont être modulées indépendamment l'une de l'autre, nous pourrons transporter deux fois plus d'informations par cellule.

Dans le cas le plus simple, nous allons provisoirement abandonner la modulation en amplitude pour ne garder que la modulation de phase.

Phase de la première sous porteuse	0	0	180	180
Phase de la seconde sous porteuse	0	180	0	180
Equivalent binaire	00	01	10	11

Cette façon de faire permet une représentation graphique dans un plan :

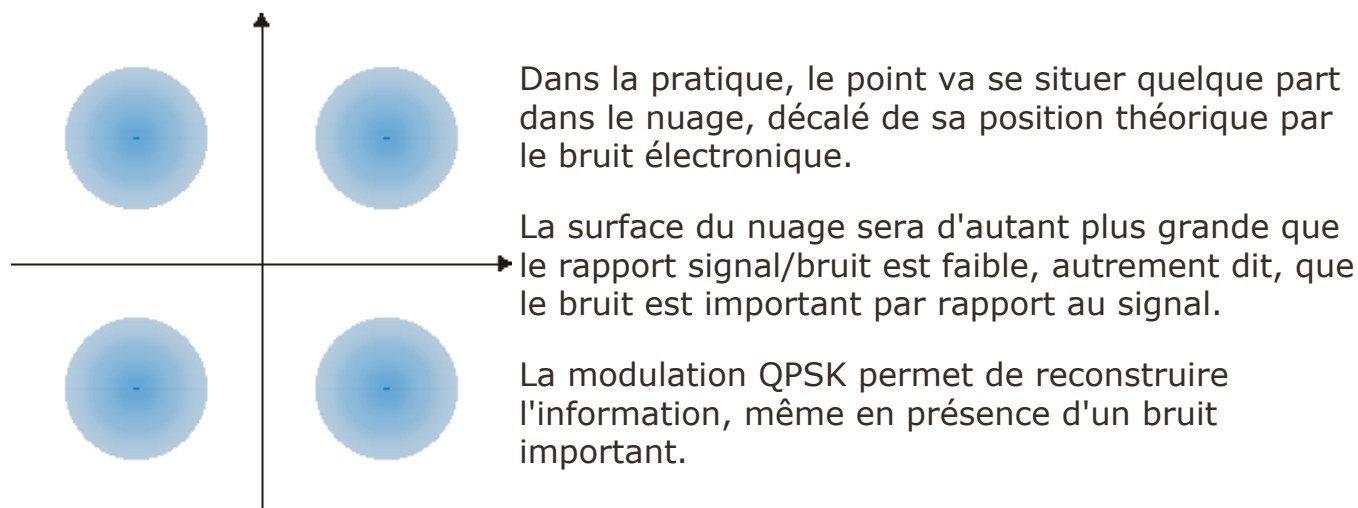


Par rapport à ce que nous venons de voir, nous ne gagnons rien de plus qu'une méthode supplémentaire, puisque le nombre de bits par cellule demeure inchangé. Cette méthode de modulation s'appelle QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Avant d'aller plus loin...

Cette méthode de modulation est d'une "solidité" à toute épreuve. En effet, le décodage à la réception va se borner à détecter dans quel quadrant se situe le point.

Hors, si la représentation graphique que nous venons de voir (appelée : Constellation) est d'une netteté quasi parfaite, voici ce que ça donne dans la réalité, avec les perturbations apportées par le bruit :



Cette modulation nous sera utile dans la suite, puisque les modems câble l'utilisent pour la voie remontante (upload)

QAM 16.

Quadrature Amplitude Modulation. Nous l'utilisons ici avec 16 états, simplement en introduisant deux niveaux de modulation d'amplitude, au lieu d'un seul.

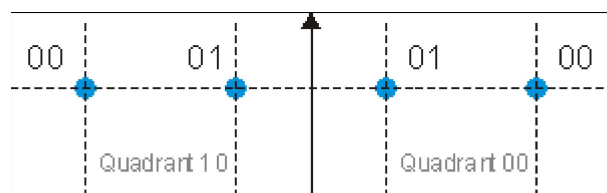
Pour chaque porteuse, nous reprenons le tableau déjà vu :

Taux de modulation	0,5	0,5	1	1
Déphasage	0	180	0	180
Equivalent binaire possible:	00	01	10	11

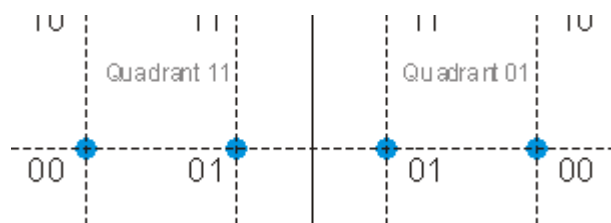
Mais, grâce aux deux sous porteuses en quadrature, nous allons cette fois-ci transporter 4 bits par cellule, donc 2^4 états possibles soit 16 états.

Remarque importante :

Nous avons augmenté le nombre de points de la constellation, mais pas la largeur du canal d'émission, puisque le nombre de symboles émis par seconde (bauds) n'a pas changé.

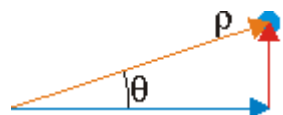


Dans la pratique, nous augmentons le débit sans augmentation de bande passante, mais au prix d'une relative fragilité du signal. En



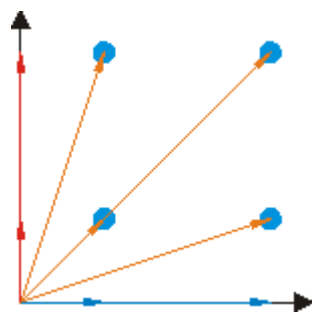
effet, les points de la constellation étant plus rapprochés, ils seront plus difficiles à décoder en cas de bruitage de la ligne.

De plus en plus compliqué.



Une autre façon de représenter la constellation consiste à utiliser un modèle vectoriel, qui est un outil mathématique plus adapté, parce que dans un repère polaire, il est représenté par un module (longueur) et un argument (angle). Comme nous avons ici deux porteuses en quadrature, nous aurons un point de fonctionnement qui sera défini par un vecteur égal à la somme de deux vecteurs en quadrature.

Si l'on reprend l'exemple de la modulation QAM 16, nous aurons par axe, donc par porteuse, deux vecteurs d'argument 0 et de modules représentant le taux de modulation d'amplitude utilisé et deux autres vecteurs de même module, mais d'argument égal à 180°.



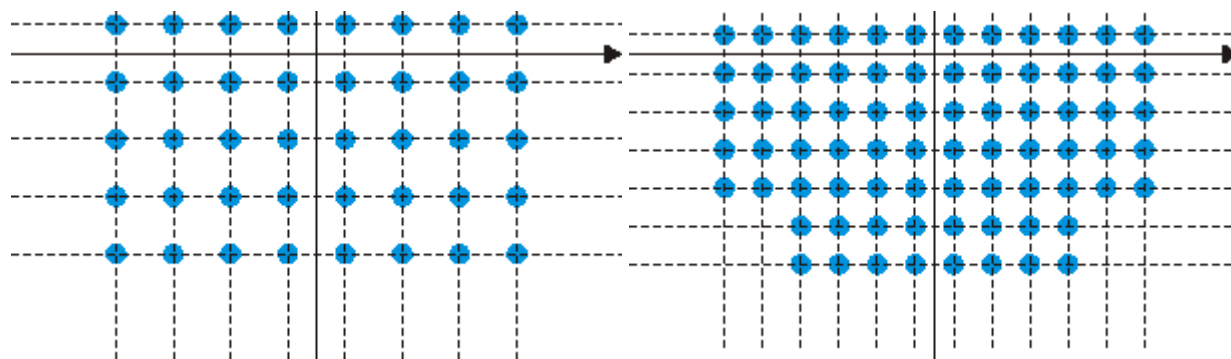
Comme les porteuses sont en quadrature, nous obtenons ceci, dessiné pour un seul quadrant. Bien entendu, la représentation complète reconstitue exactement la constellation vue plus haut.

Au bout du compte, nous pouvons même oublier la représentation quadratique et raisonner sur une seule porteuse, qui sera modulée avec une amplitude (module du vecteur, sa longueur) et une phase (argument du vecteur, son angle) calculée par cette méthode.

La répartition des valeurs de symboles sur la constellation ne se fait pas au hasard, elle est normalement prévue pour optimiser la réception, lorsque la constellation a été abîmée par le bruit. Le choix judicieux de cette répartition se fait au moyen d'algorithmes complexes, qui sortent largement du cadre de cet exposé, surtout destiné à expliquer qualitativement comment se fait le transport de données.

Des algorithmes plus ou moins compliqués permettent de définir des constellations contenant de plus en plus de points, c'est à dire de plus en plus de bits dans chaque symbole. Ainsi, nous utiliserons des modulations de type :

QAM 64 (2^6), 6 bits par symbole. QAM 128 (2^7), 7 bits par symbole



Gardons présent à l'esprit que ces manoeuvres ont comme conséquences :

- D'augmenter le débit en bits par seconde sans augmenter pour autant la largeur du canal de communication.
- De diminuer l'immunité au bruit du signal modulé.

Conclusions.

Les protocoles de transmission de données comportent toujours des algorithmes de correction d'erreur et des algorithmes de récupération en cas d'erreur (répétition de l'émission des données), mais plus il y aura d'erreurs, plus on perdra de temps, si bien que vouloir passer trop d'informations à la fois peut aboutir à une perte de temps. (Problème bien connu sur les modems RTC).

En général, les modems sont prévus pour pouvoir se replier sur des modes de modulation disposant de constellations moins denses, plus faciles à démoduler en cas de bruit. Le débit diminue, mais le taux d'erreurs aussi.

Les divers types de modulations que nous avons vu ne sont que des exemples. Le principe reste cependant toujours le même, à savoir:

- Construire des algorithmes qui permettent de passer le plus d'informations possible dans une largeur de canal donnée (le plus possible de bits par symbole, avec le nombre maximum de symboles par seconde que l'on peut utiliser sans déborder du canal).
- Prévoir des solutions de repli lorsque la qualité du signal en réception se détériore à cause du bruit électronique.

Ces règles sont bien connues des constructeurs de modems RTC, nous verrons également qu'elles sont applicables aussi bien pour les modems câble que les modems DSL.

Les limitations imposées par l'organisation du câble.

Avertissement.

Les valeurs indiquées ici sont des ordres de grandeur. Elles ne sont pas les valeurs exactes utilisées par les divers équipements.

Nous l'avons vu, la bande passante descendante (download) est dépendante:

- De la largeur du canal.
- Du mode de modulation.

La largeur de notre canal descendant impose une modulation à environ 6 MBauds (6 millions de symboles par seconde).

Pour la voie remontante, c'est un peu plus compliqué et ça dépend des technologies utilisées :

- Le Com21 utilise une largeur de canal de 1,8 MHz, ce qui donne environ 1,2 Mbauds.
- La norme Eurodocsis, plus souple, permet plusieurs largeurs de canaux : 200, 400, 800, 1 600 ou 3 200 KHz., ce qui donne, dans le meilleur des cas, environ 2,5 Mbauds.

En ce qui concerne les modes de modulation, il y a également des différences entre la technologie Com21 et la norme Eurodocsis :

- Com21 :
 - Downstream : QAM 64 (6 bits par symbole).
 - Upstream : QPSK (2 bits par symbole).
- Eurodocsis :
 - Downstream : QAM 64 ou QAM 128 (6 ou 7 bits par symbole).
 - Upstream : QPSK ou QAM 16 (2 ou 4 bits par symbole).

Finalement, dans le cas le plus favorable, nous obtenons les débits suivants :

- Com21 :
 - Downstream : 6 MBauds à 6 bits par baud, soit 36 Mbits par seconde.
 - Upstream : 1,2 Mbauds à 2 bits par baud, soit 2,4 Mbits par seconde.
- Eurodocsis :
 - Downstream : 6 Mbauds à 7 bits par baud, soit 42 Mbits par seconde.
 - Upstream : 2,5 Mbauds à 4 bits par baud, soit 10 Mbits/seconde, soit quatre fois plus que le Com21 (mais attention, dans le meilleur des cas).

Rappelons que ces chiffres sont des ordres de grandeur. On constate clairement l'avancée technologique que procure Eurodocsis, puisque, dans le meilleur des cas, sans toucher à l'infrastructure du réseau câblé, le débit remontant peut atteindre celui d'un réseau local 10BaseT.

Pourquoi tout de même ces limitations sur l'upstream ?

Il y a plusieurs raisons. Parmi les plus évidentes "a priori":

- Les responsables de la conception des réseaux câblés ont, à mon sens, fait preuve de fort peu d'esprit "visionnaire". Le câble n'a pas été conçu pour être interactif, entendez par là que les voies remontantes n'étaient pas prévues au départ. Il a donc fallu "bricoler" un système pour ajouter ces voies remontantes. Cette opération n'étant pas si simple qu'elle en a l'air,

Principalement à cause de l'atténuation d'un signal électrique circulant dans un conducteur (nous verrons cela un peu plus bas).

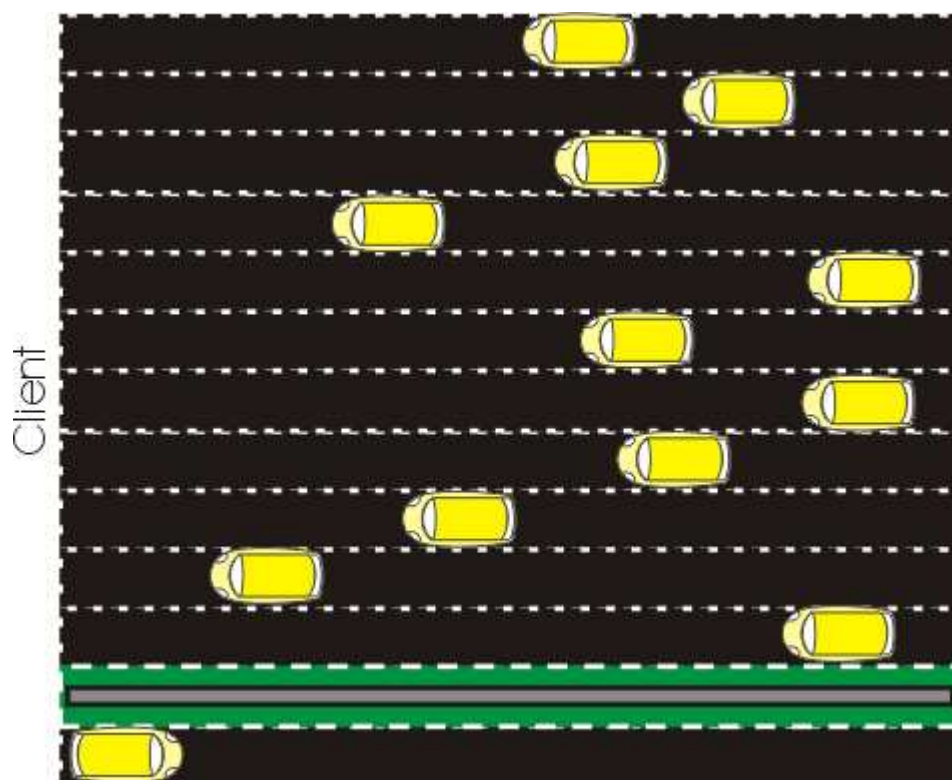
Du côté optique du réseau, la situation était la même, les voies remontantes n'étaient pas prévues. Une considérable remise à niveau de la partie fibre optique a donc également été nécessaire.

- La bande passante totale du câble est exploitée en grande partie par les services de télévision, avec des fréquences de porteuses qui devaient rester compatibles avec les récepteurs TV, pour ne pas nécessiter de coûteux changeurs de fréquences chez les clients. Actuellement, le développement des chaînes numériques imposant un décodeur apportera probablement plus de souplesse dans l'exploitation de la bande passante du câble.
- Le "surf" et le téléchargement, opérations de base de l'internaute d'hier, s'accommodent parfaitement d'une voie remontante plus restreinte, ces opérations étant toutes deux des descentes d'informations des serveurs vers les clients. Ne remontent que les requêtes et les signaux d'acquiescement des connexions TCP. Là encore, mauvaise vision du problème: il suffisait de comprendre que l'Internet irait dans le sens d'un réseau local, où les stations utilisent les serveurs pour y stocker des données (Flux remontant important), pour admettre que le le surf ne resterait pas longtemps la seule activité des internautes.

Le développement de la norme Eurodocsis va permettre de réduire l'écart des débits entre voies descendantes et remontantes, mais le système restera fondamentalement asymétrique.

A quoi ça ressemble?

Pour les utilisateurs d'équipements de type Com21, malheureusement à ça :



Imaginons une autoroute qui aurait une file dans un sens (upload) et 11 files dans l'autre (download).

Dans le cas "normal", surf et téléchargement FTP, La situation est à peu près équilibrée puisque le rapport données reçues / données envoyées est environ égal à 10.

Pour les utilisateurs d'équipements Eurodocsis, la situation est moins catastrophique, puisque, dans le meilleur des cas, la "largeur" de la voie

remontante n'est plus que le quart de celle de la voie descendante.

Et alors?

Un rapport de 10 entre voies descendante et montante est parfaitement inadapté aux évolutions de l'Internet. A la rigueur, un rapport de 4 est-il actuellement acceptable. C'est d'ailleurs celui qui est proposé pour les accès haut débit actuels :

- 512 Kbps en descente.
- 128 kpps en montée.

Eurodocsis permet d'ailleurs de conserver ce rapport à l'échelle du réseau lui-même, ce qui n'était pas le cas avec la solution Com21. Avec cette nouvelle norme, les possibilités sont largement étendues, d'autant qu'elle prévoit de gérer beaucoup plus finement le trafic transitant par le modem. Normalement, Eurodocsis devrait à terme permettre l'apparition d'offres très variées.

Les problèmes techniques de la voie remontante.

Les canaux Internet.

Ces canaux sont placés dans la partie inférieure du spectre du câble. La voie descendante aux alentours de 123 MHz, les voies remontantes autour des 23 MHz (au moins pour Marseille; ces fréquences peuvent être décalées sur d'autres sites).

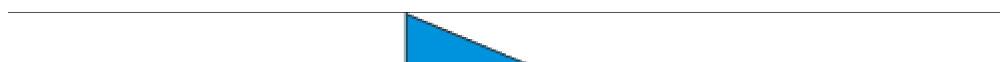
Problème grave: les "basses fréquences" (entre 5MHz et 30 MHz) sont soumises à beaucoup de perturbations. Les plus connues sont:

- la C.B. dans la bande des 27 MHz
- Les téléphones sans fil (pas les cellulaires, les téléphones d'intérieur) vers les 26 MHz
- Les "ondes courtes" entre 10 MHz et 18 MHz

Sans parler des diverses perturbations domestiques. C'est pour ces raisons que les voies remontantes sont actuellement modulées en phase uniquement (modulation QPSK), en QAM 16 dans le meilleur des cas. La modulation QPSK qui ne permet de passer que 2 bits par symbole est plus facile à décoder en présence de bruit, qui se traduit généralement par une modulation parasite, mais en amplitude principalement, et pas au niveau de la phase.

L'atténuation en ligne.

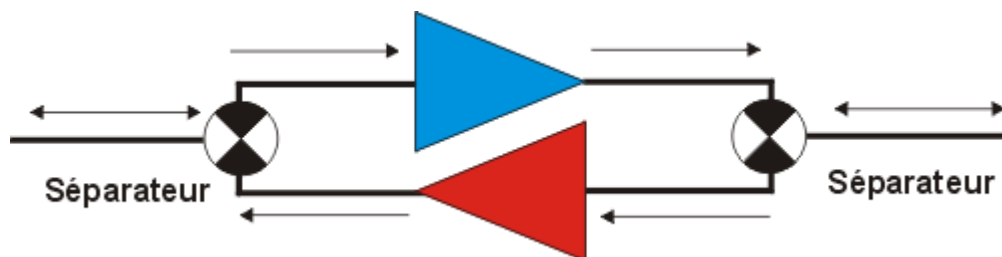
Il se trouve qu'un signal s'atténue lors de son transport dans un conducteur (aussi bien un signal électrique dans du cuivre qu'un signal lumineux dans une fibre optique). Il faut donc placer des amplificateurs le long de la ligne:





Le problème, c'est qu'un ampli, ça a une entrée et une sortie et qu'on ne peut évidemment pas les inverser...

Pour créer des voies remontantes dans la partie cuivre, il a donc fallu compliquer un peu le problème:



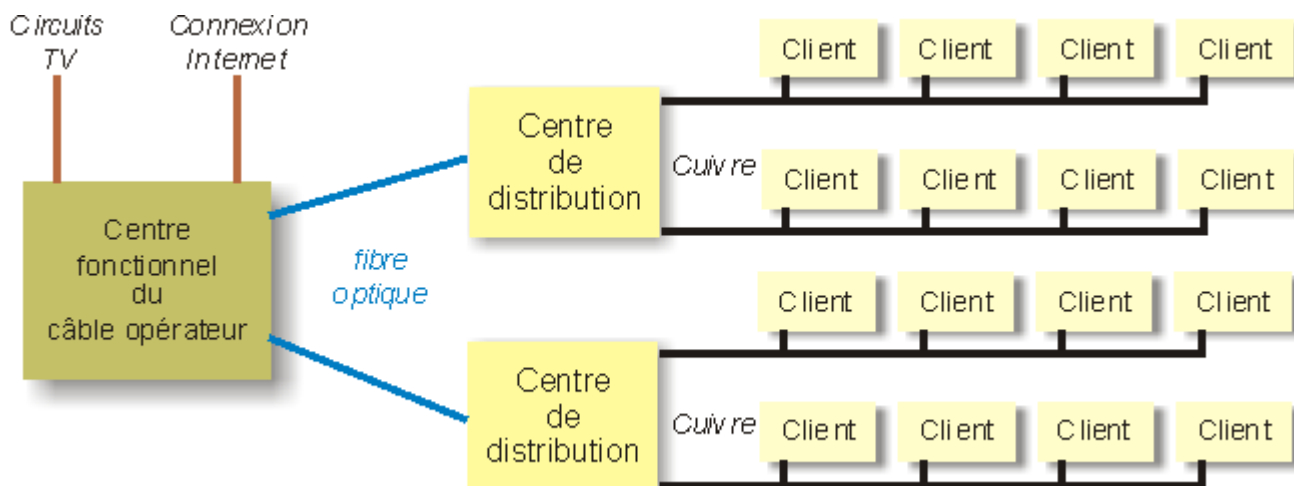
On n'est pas ici pour faire de l'électronique, mais il est aisé de comprendre que la mise à niveau ne s'est faite ni simplement, ni gratuitement.

Des solutions?

Il y en a bien entendu.

Eurodocsis en est une, nous l'avons vu.

L'autre solution passe par une réorganisation du réseau. Tout le réseau câblé n'est pas constitué de cuivre. Après être passé par divers étapes plus ou moins contradictoires, l'architecture actuelle consiste en un savant mélange de fibre optique et de cuivre. Pour aller vite, l'architecture générale ressemble à peu près à ceci :



Les clients sont connectés par du cuivre à des centres de distribution, eux-mêmes connectés au centre fonctionnel du câble opérateur par de la fibre optique.

En gardant ce type d'architecture, l'évolution passe par une augmentation des centres de distribution, qui alimenteront un nombre moins important de clients. Cette mesure offre deux avantages :

- Les portions de réseau cuivre, qui sont les seules à souffrir des bruits électromagnétiques, se trouvent raccourcies.

- Le nombre de clients étant plus réduit par centre, l'équilibrage des débits sera plus facile à réaliser

Au jeu de l'évolution des réseaux, il est probable que le câble ait plus d'atouts que la boucle locale téléphonique.

Les technologies xDSL utilisent la boucle locale de téléphonie fixe.

Axiomes de base.

Soit une formidable pelote de paires de cuivre destinée à raccorder l'immense majorité des habitants d'une ville donnée au réseau téléphonique. Que faire de ce fatras de câbles, lorsque les possibilités d'expansion deviennent quasi nulles, le taux de pénétration atteignant plus de 90%, pire, lorsque la téléphonie mobile fait régresser ce taux de pénétration ?

Reconvertir ce machin en réseau d'accès Internet à haut débit bien sûr, comment ne pas y avoir pensé plus tôt ?

Tous simplement, parce que techniquement, c'est une prouesse assez phénoménale. Le pire, c'est que ça fonctionne plutôt bien...

Il est intéressant de constater que le transfert de données numériques par le réseau téléphonique commuté a toujours été du domaine du "bidouillage". Nous allons voir qu' xDSL ne déroge pas à cette règle.

La paire de cuivre PTT.

Autour des années 75, La téléphonie française est dans un état affligeant (le célèbre sketch du regretté Fernand RAYNAUD : "le 22 à Asnières" en est une illustration humoristique, mais il n'y a pas réellement de quoi rire). Le Général De Gaulle décide de remédier à cette situation peu flatteuse pour l'état français. Des efforts considérables sont entrepris pour construire un réseau téléphonique exemplaire. Quinze ans plus tard, c'est chose faite. Aujourd'hui une infime minorité de français ne dispose pas du téléphone. Mais ce n'est qu'un réseau téléphonique, surtout dans la "boucle locale". (Sur les grosses artères, le réseau de type ATM est quant à lui capable de véhiculer indifféremment tout type de données numériques. La téléphonie elle même, analogique sur la boucle locale, est d'ailleurs transportée de manière numérique sur le réseau ATM).

Caractéristiques générales.

Chaque client est raccordé à un central en point à point par l'intermédiaire d'une paire de fils de cuivre. Cette paire de cuivre est destinée à faire passer une boucle de courant qui sera modulée en amplitude par le signal vocal, en mode analogique (le réseau ISDN, appelé NUMERIS en France est autre chose. Il est conçu nativement pour transporter des données numériques sur la boucle locale, même s'il s'agit de téléphonie. Complètement incompatible avec l' ADSL, du moins dans

son implémentation France Télécom⁽¹⁾, nous n'en dirons pas plus ici).

Le signal vocal s'accommode d'une bande passante assez faible. En gros, de 400 Hz à 4 KHz. Les modems RTC vont déployer des trésors d'ingéniosité pour arriver à passer des débits théoriques allant jusqu'à 56 Kbps dans un canal aussi étroit.

Cependant, il est envisageable de faire voyager sur ce fil des signaux d'une fréquence supérieure. Jusqu'où peut-on aller ? Toute la question est là. Ca dépend de beaucoup de paramètres :

- La qualité de la paire de cuivre.
- La qualité des divers raccordements faits entre le central et le client
- La longueur de la paire de cuivre.

Quoi qu'il en soit, on arrivera toujours à monter plus haut que 4 KHz. L'idée est d'exploiter cette réserve pour y passer un signal modulé, qui ne se mélangera pas avec la bande téléphonique.

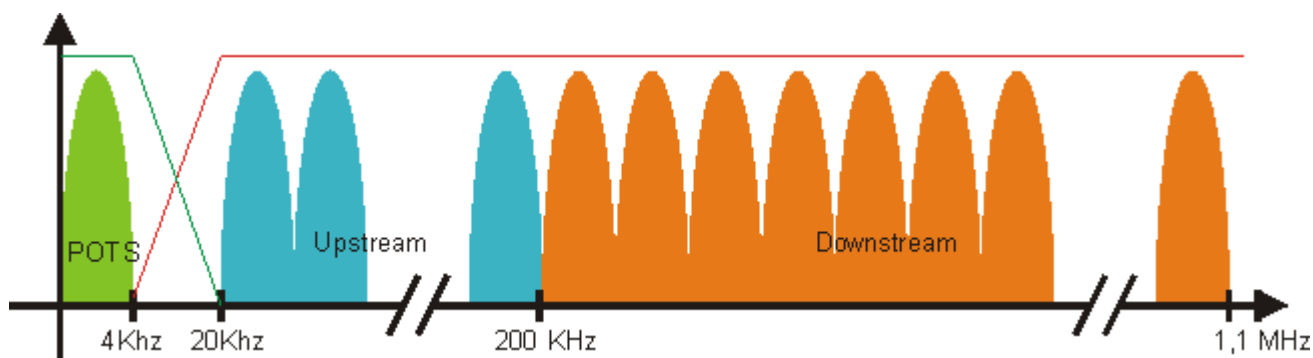
DSL en général.

Digital Subscriber Line. Disons que c'est un ensemble de moyens normalisés pour transporter de l'information numérique sur une ligne téléphonique "classique". ADSL (le A voulant dire "Assimetric"), n'est qu'un sous ensemble de DSL. Pour être tout à fait précis, l'enjeu est de transporter le maximum de densité d'informations numériques sur la boucle locale, jusqu'au point d'entrée du réseau ATM, sans toucher au système téléphonique en place.

Les diverses technologies DSL ne fonctionnent pas toutes de la façon qui va être décrite par la suite. Nous ne nous intéresserons ici qu'au cas particulier de l'ADSL.

Une modulation compliquée.

La technologie ADSL utilise un système de modulation appelé DMT (Discrete Multi Tone). Disons que le principe consiste à construire des canaux de 4 KHz de large, placés les uns à côté des autres, jusqu'au bout de la bande passante de la paire de cuivre. La technologie annonce 1,1MHz pour une ligne ne dépassant pas 5,5 Km de long (ce qui fait fort peu, les lignes ne se tirant pas en ligne droite). Le problème principal est que la paire de cuivre utilisée pour construire la boucle locale n'a absolument pas été prévue pour monter en fréquence et qu'elle introduit une forte atténuation du signal en fonction de sa longueur.



Mise en place du système.

Le premier canal est utilisé par la téléphonie analogique. Appelé POTS (Plain Old Telephone Service), il constitue l'usage "normal" de la ligne téléphonique.

Une sorte de "no man's land" est réservée entre 4 KHz et 20 KHz, de manière à pouvoir facilement isoler le POTS de tout ce qui va se passer au dessus. Le fameux "splitter", filtre à placer sur chaque prise téléphonique, est là pour séparer les deux services.

Entre 20 KHz et 200 KHz, on trouve les canaux qui serviront à l'émission des données.

Entre 200 KHz et 1,1 MHz, nous avons les canaux réservés à la réception des données.

Chaque canal est modulé par une méthode QAM.

L'artifice sublime.

Il faut maintenant exploiter au mieux ces canaux :

- Chaque canal sera exploité avec une constellation adaptée au bruit rencontré sur le canal. Ainsi, certains canaux pourront fournir un débit important, tandis que d'autres en fourniront très peu, voire pas du tout. Cette méthode flexible permet d'exploiter au mieux la ligne même dans un milieu hostile.
- Une répartition spatiale des données sera effectuée sur l'ensemble des canaux concernés. Autrement dit, le flux de données sera découpé en tranche, chaque tranche étant acheminée par un canal différent.

Si dans la théorie, on peut aller assez loin en matière de débit, la sagesse veut, pour un lien ADSL, que l'on ne garantisse pas plus, sur une ligne de 5,5 Km de longueur maximum, que :

- 1,5 Mbps en voie descendante.
- 512 Kbps en voie montante.

On le voit clairement, même si l'Internet à haut débit par l'ADSL fait aujourd'hui bonne figure, le système reste un moyen technologiquement très sophistiqué, pour exploiter au mieux une installation existante, inadaptée à la transmission haut débit, sans avoir à y toucher. Dans l'avenir, il faudra reconstruire toute l'architecture de la boucle locale pour assurer avec des technologies xDSL autant de services que ce que peut déjà en assurer le câble TV.

Ceci n'enlève rien à la technologie elle-même, qui, appliquée à un support de qualité et de grande bande passante offre un moyen extraordinairement souple et performant pour le transport de données.