

Travaux Dirigés

Accès haut débit : ADSL et modulation multi-porteuses

Objectifs du TD :

- Comprendre les principes de fonctionnement de l'accès haut débit par ADSL
- Revoir les notions présentées dans les chapitres CN.

L'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) est la technique aujourd'hui la plus utilisée en France pour l'accès à Internet des particuliers depuis leur domicile. Le principe de base de cette technique est d'utiliser la 'boucle locale' en cuivre qui a été initialement mise en place pour construire le réseau téléphonique.

En ADSL, pour la transmission entre le modem et le DSLAM, une modulation multi-porteuses appelée DMT (Discrete MultiTone) est utilisée. Cette dernière consiste à moduler un ensemble de porteuses régulièrement espacées de 4,3125 kHz avec des modulations de type QAM, dont le nombre de symboles varie entre 2 et 32 768. De plus, la rapidité de modulation sur chaque sous-bande fréquentielle (ou 'canal') correspond exactement à l'espacement des différentes porteuses et vaut donc 4,3125 kbauds. On dit alors que les porteuses sont orthogonales. Autrement dit, cette modulation est de type OFDM (orthogonal frequency division multiplexing).

Question 1. *Donnez une estimation du débit descendant brut maximal théorique possible qu'on peut obtenir en ADSL. Commentez cette valeur. On notera que le transport des flux de télévision nécessite que l'abonné dispose au minimum d'un débit effectif de l'ordre de 4 Mbit/s en voie descendante. Les flux audiovisuels de télévision en direct et en haute définition nécessitent eux que l'abonné dispose au minimum d'un débit de l'ordre de 8 Mbit/s en voie descendante.*

On rappelle que dans le cas d'une modulation QAM d'une porteuse de fréquence f_0 , un groupe de n bits (émis pendant une durée T où T est la durée du symboles, égale à l'inverse de la rapidité de modulation) est représenté par un complexe $c_k = p_k + jq_k$. L'association groupe de bits/complexe c_k est faite à l'aide du diagramme de constellation. Le signal émis pendant la durée T s'exprime alors

$$\text{comme : } s_k(t) = p_k \cos(2\pi f_0 t) + q_k \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2}\right).$$

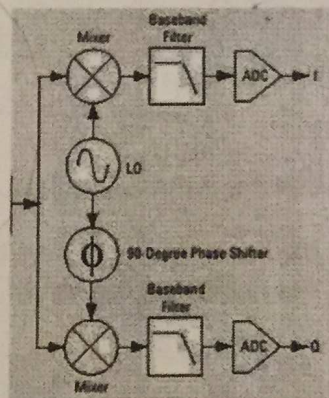


Figure 1 : schéma du démodulateur QAM

Question 2. Montrez que pour démoduler ce signal, il suffit de réaliser les étapes décrites dans la figure 1. Plus précisément : il suffit de multiplier le signal par $\cos(2\pi f_0 t)$ et de réaliser un filtrage de type passe-bas pour retrouver la valeur de p_k ; et de le multiplier par $\cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$ et de réaliser un filtrage de type passe-bas pour retrouver la valeur de q_k .

Question 3. Donnez l'expression mathématique du signal émis $s_k(t)$ à la sortie du modulateur QAM pendant la durée T , en fonction de seulement le coefficient complexe c_k . Remarquez que cette expression présente l'avantage de bien alléger l'écriture du signal $s_k(t)$: le complexe c_k donne à la fois l'information sur p_k et sur q_k et le modulateur QAM, réalisé physiquement avec deux branches, peut être vu mathématiquement comme une simple multiplication par $\exp(j2\pi f_0 t)$.

Question 4. Le modulateur ADSL se comporte comme N modulateurs QAM fonctionnant en parallèle. Comment s'exprime alors le signal $S_k(t)$ (sous forme complexe) émis pendant la durée T à la sortie du modulateur ADSL ? On rappelle que les N porteuses sont espacées d'un intervalle de fréquence constant et égal à la rapidité de modulation $1/T$.

Question 5. En vous aidant de la figure 2 qui montre le schéma d'un modulateur ADSL, expliquez le principe de réalisation du signal OFDM.

Pour cela on précise que :

- 1) la Transformée de Fourier Discrète inverse de N coefficients complexes c_k donne N coefficients s_n avec n compris entre 0 et $N-1$ définis par l'équation suivante :

$$s_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(2j\pi n \frac{k}{N}) ,$$

- 2) le CNA (convertisseur numérique/analogique) interpole les échantillons à la fréquence de travail N/T , pour délivrer un signal continu dans le temps,
- 3) le modulateur réalise une modulation de type QAM à la fréquence f_0 .

Aide : reprenez d'abord l'expression du signal à la sortie du CNA calculé à la question précédente, écrivez l'expression du signal à l'entrée du CNA et montrez qu'il est bien égal à celui à la sortie de la TF inverse.

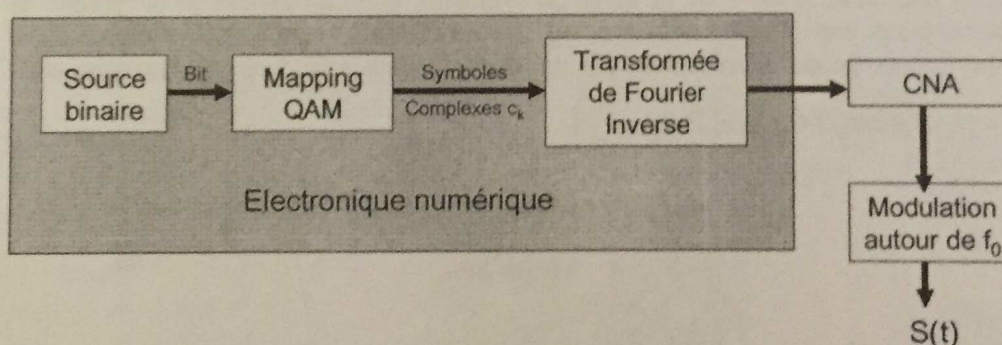
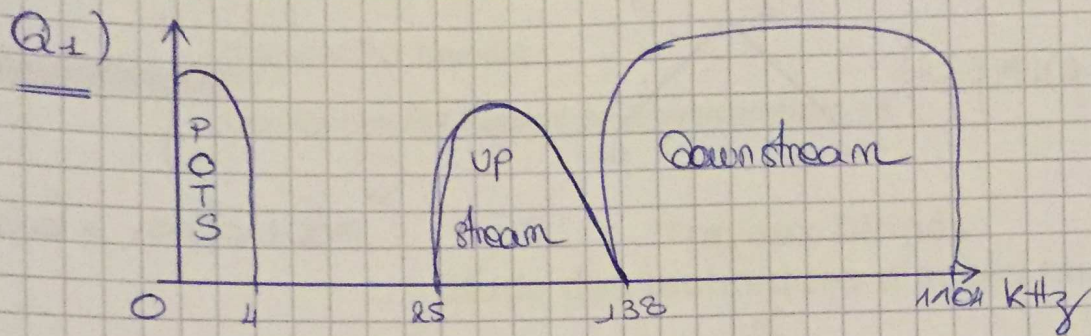


Figure 2 : Principe du modulateur ADSL

Question 6. Expliquez pourquoi il est finalement facile de réaliser cette modulation multi-porteuses si l'on dispose de processeurs numériques suffisamment puissants.

TD : Accès Haut-Débit

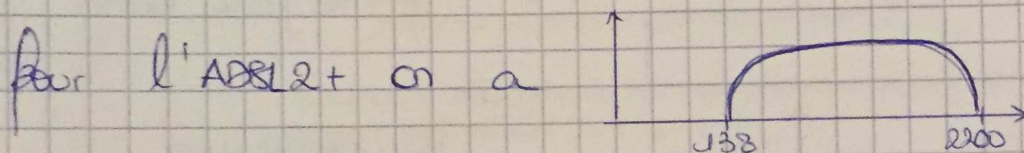


On a $(1104 - 138) / 4,3125 = 224$ sous bandes

QAM 32768 \rightarrow 15 bit / symbole ($\log_2 32768 = 15$)

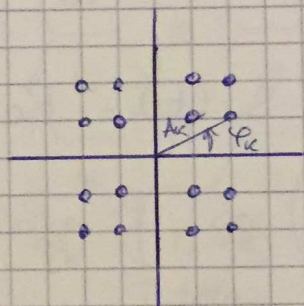
$R = 4,3125$ Kbaud (Débit symbole)

$\Rightarrow D_{\max} = 224 \times 4,3125 \times 15 = 14,49 \text{ Mb/s}$



On trouve alors $D_{\max} = 30,93 \text{ Mb/s}$

Q₂) QAM16
Diagramme des constellations



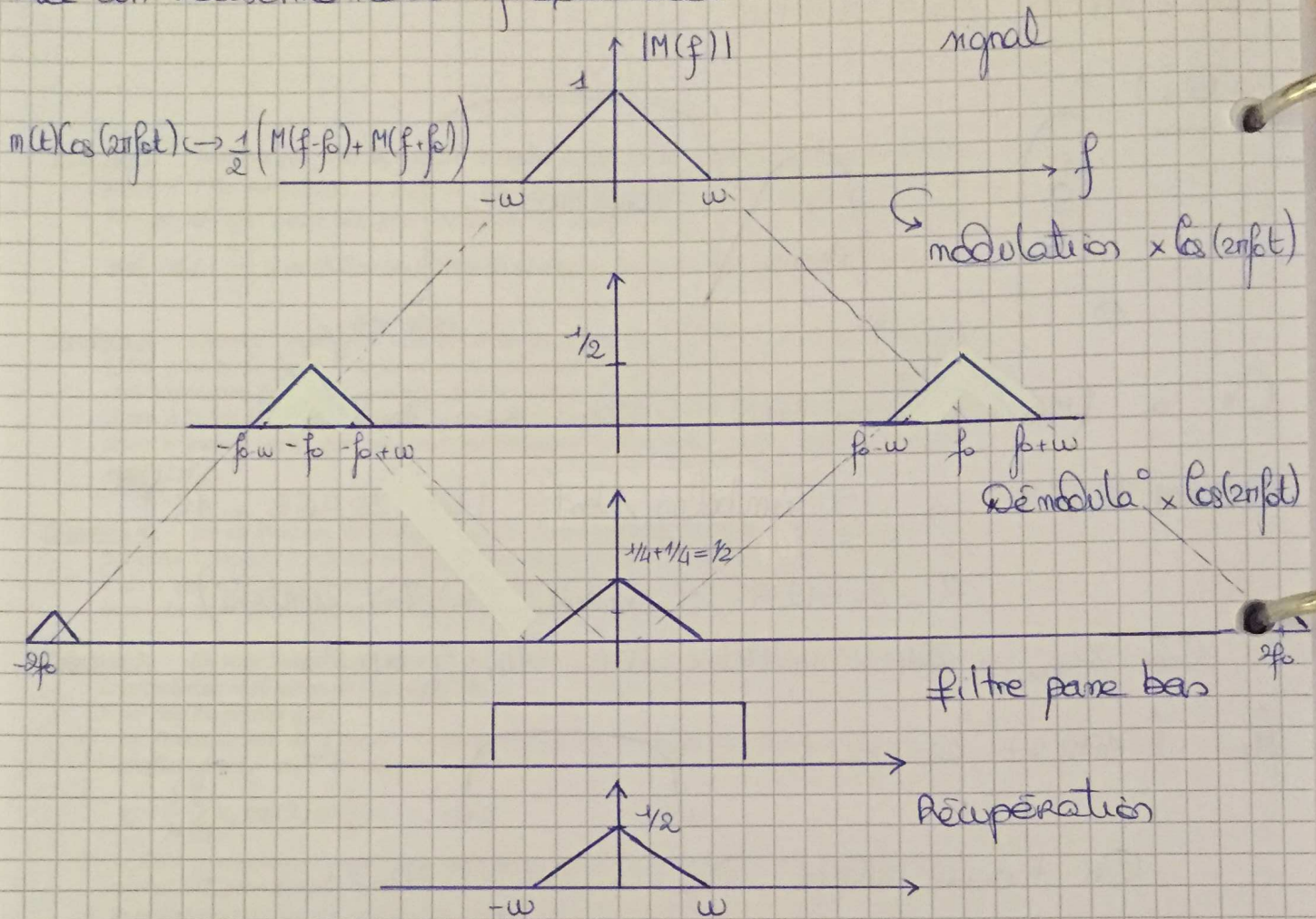
$s = A_k e^{j\varphi_k}$

On a $\cos(2\pi f_0 t) s(t) = P_k \left(\frac{1 + \cos(2\pi f_0 t)}{2} \right) - \frac{q_k}{2} \sin(2\pi(2f_0)t)$

Avec un filtre passe bas on récupère $\left(\cos(2\pi f_0 t) s(t) \right)_{\text{filtre}} = \frac{P_k}{2}$

De même $\left(\cos(2\pi f_0 t + \pi/2) s(t) \right)_{\text{filtre}} = \frac{q_k}{2}$

Avec un raisonnement fréquentiel



Q3) On a classiquement $s_k(t) = \text{Re}(c_k e^{j2\pi f_0 t})$

Q4) $s_k = \text{Re}\left(\sum_{i=0}^{N-1} c_i e^{j2\pi f_i t}\right)$ où $f_i = f_0 + \frac{i}{T}$

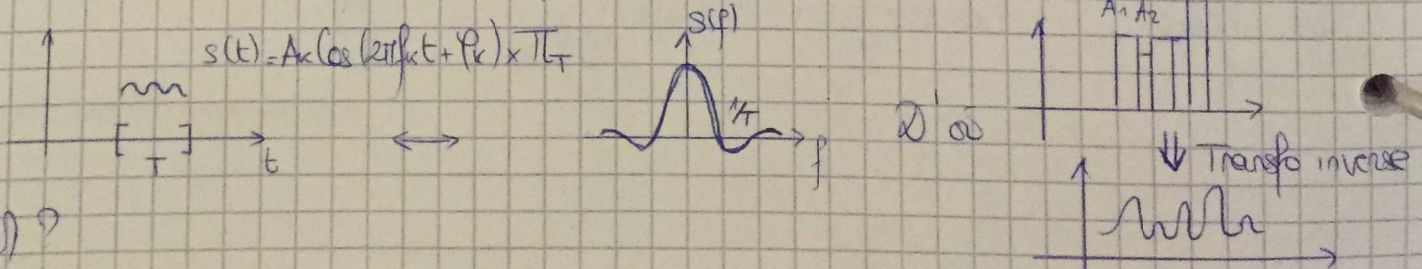
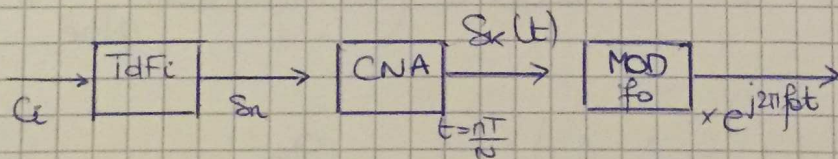
$= \text{Re}\left(\underbrace{\sum_{i=0}^{N-1} c_i e^{j2\pi \frac{i}{T} t}}_{\text{TF inverse}} \underbrace{e^{j2\pi f_0 t}}_{\text{modulation}}\right)$

f_0 f

TF inverse

Q5) On a $s_k|_{t=\frac{nT}{N}} = \sum_{i=0}^{N-1} c_i e^{j2\pi \frac{n}{N} i} = N \widehat{s}_n$

TF inverse



Q6) ?