

Chapitre 1

Travaux Dirigés : MoDem ADSL

Chapitre 2

Travaux Dirigés : MoDem ADSL

2.1 Généralités

L'ADSL offre des services numériques rapides sur le réseau cuivré existant en superposition et sans interférence avec le service téléphonique analogique traditionnel. La figure 2.1 présente les bandes de fréquence occupées par les différents services :

- Le service téléphonique classique occupe la bande 0 à 4 kHz.
- Le service multimédia ADSL en liaison montante occupe 27 canaux de largeur 4,3 kHz à partir de 25 kHz.
- Le service multimédia ADSL en liaison descendante occupe 223 canaux de largeur 4,3 kHz jusqu'à la fréquence maximale de 1,1 MHz.

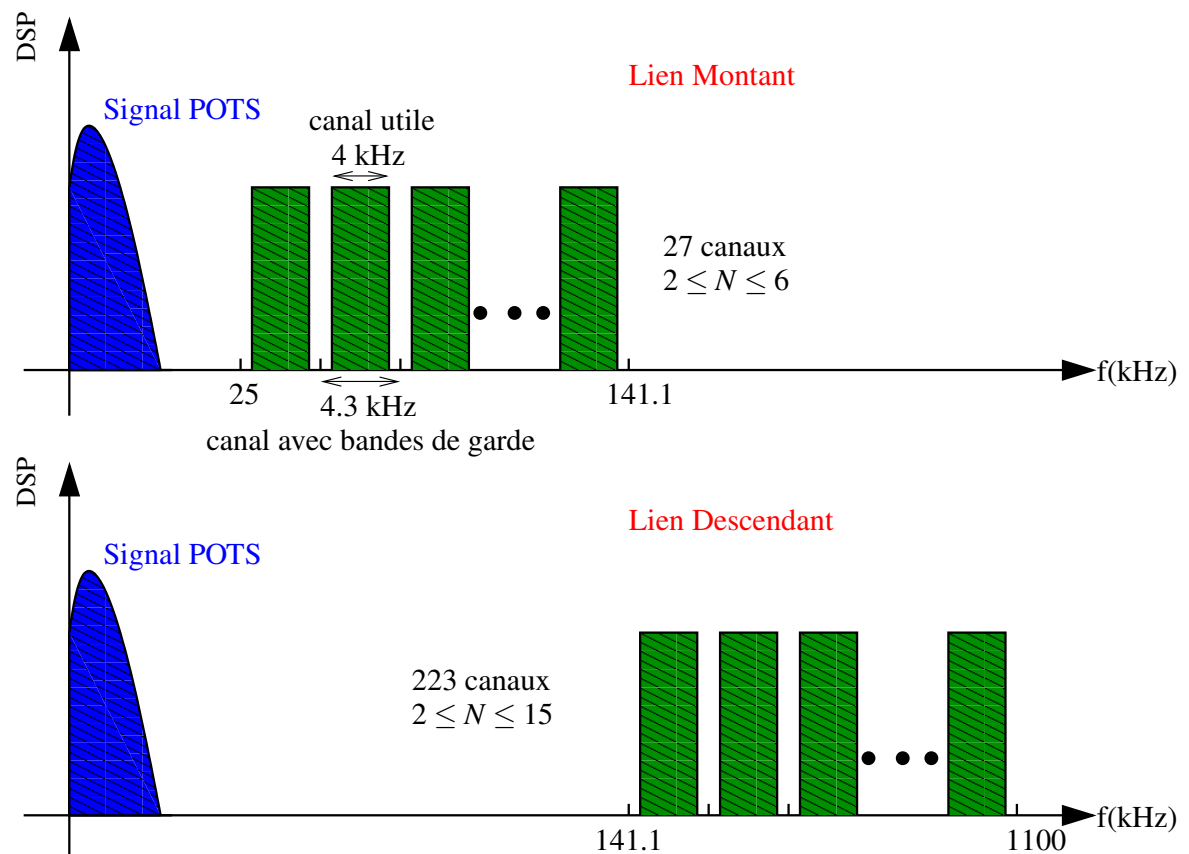


FIGURE 2.1 – Allocation des fréquences pour les signaux transmis sur une paire torsadée

Cette répartition des canaux permet au client de recevoir du serveur bien plus d'informations qu'il est capable d'en générer. Chaque sous-canal présente une modulation d'amplitude

en quadrature (QAM) sur 2^N niveaux, N variant entre 2 et 15 pour la liaison descendante et entre 2 et 6 pour la liaison montante. Une plus grande précision est transmise en liaison descendante car le signal atténué en bout de ligne est moins soumis à la diaphonie chez le client qu'au niveau du central téléphonique. La superposition des signaux de l'ensemble des canaux génère un symbole DMT (Discrete Multi Tone) et la durée de chaque symbole est fixée à $250\mu s$.

Question 2.1.1. *Quel est le débit théorique maximal de la ligne (en liaison montante et descendante) ?*

Réponse 2.1.1. La fréquence des symboles est de 4 KHz. Chaque symbole contient 223 canaux pour la liaison descendante avec 2 à 15 bits d'information par canal

Débit maximal liaison descendante

$$D_{max} = 4 \cdot 10^3 \times 223 \times 15 = 13.38 \text{ Mbits/s}$$

Débit maximal liaison montante

$$D_{max} = 4 \cdot 10^3 \times 27 \times 6 = 648 \text{ Kbits/s}$$

Les débits réels sont fixés par autotest en fonction de l'état de la ligne. Certains sous-canaux peuvent être inutilisables ou le nombre de niveaux par sous-canal peut être réduit. La qualité suffisante pour qu'un symbole DMT puisse contenir 15 bits par sous-canal correspond à un SNR par canal de 80 dB. Le SNR (Signal to Noise Ratio) correspond au rapport entre la puissance utile d'un sous canal et la puissance du bruit à la même fréquence.

2.2 Numérisation d'un signal ADSL liaison descendante

Nous étudions la transmission de données du central téléphonique vers le particulier sur la boucle locale. Le signal circule sur une paire torsadée en cuivre et l'information complète véhiculée est prélevée grâce à un coupleur. A partir de là, le signal analogique doit être numérisé car l'ensemble du traitement de démodulation est effectué en numérique.

Question 2.2.1. *Sachant que le signal prélevé en bout de ligne est atténué et bruité, quels sont les trois éléments fondamentaux que contient la chaîne de numérisation ?*

Réponse 2.2.1. Les trois éléments fondamentaux nécessaires dans une telle chaîne de numérisation sont l'amplification, le filtrage et la conversion analogique numérique.

2.3 Filtrage

Un filtre (splitter) est utilisé pour séparer les signaux ADSL liaison descendante des signaux POTS (Plain Old Telephone Service). L'atténuation fournie en bande atténuée doit réduire le signal téléphonique classique de 60 dB. L'atténuation maximale autorisée dans la bande passante est de 1 dB.

Question 2.3.1. *Déterminer le gabarit du filtre de sélection de bande.*

Réponse 2.3.1. Le gabarit du filtre passe haut est illustré dans la figure 2.2

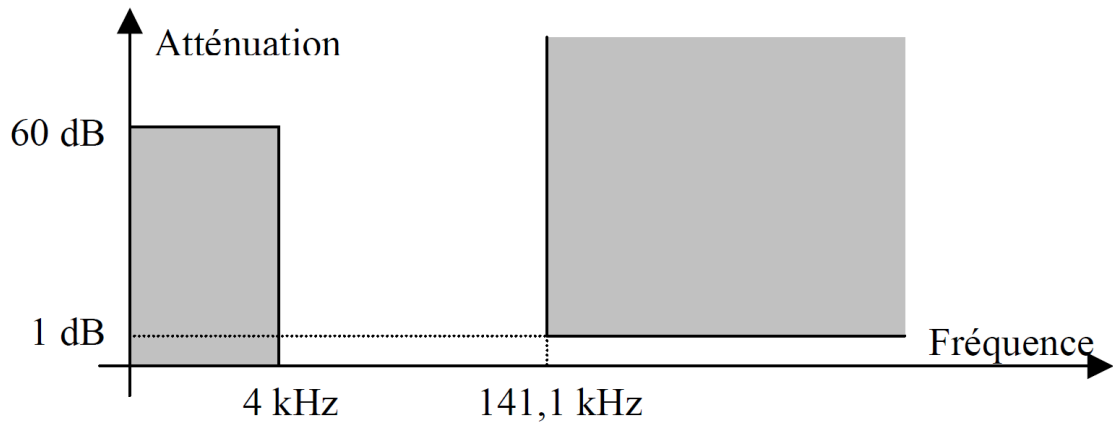


FIGURE 2.2 – Gabarit du filtre passe haut

Question 2.3.2. Pour réaliser ce filtrage, on utilise un filtre actif passe-haut Butterworth d'ordre n . Montrer que l'atténuation de ce filtre à la fréquence f , $A(f)$, peut se mettre sous la forme :

$$A(f) = 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \left(\frac{f_0}{f} \right)^{2n} \right)$$

Réponse 2.3.2.

$$A(f)_{\text{PasseBas}} = 10 \cdot \log_{10} (1 + \epsilon^2 \Omega^{2n})$$

En utilisant la transformée, passe bas \rightarrow passe haut $|\Omega| = \left| \frac{f_2}{f} \right|$

$$A(f)_{\text{PasseHaut}} = 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \epsilon^2 \left(\frac{f_2}{f} \right)^{2n} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \left(\frac{f_0}{f} \right)^{2n} \right) \text{ avec } f_0 = f_2 \cdot \epsilon^{\frac{1}{n}}$$

Question 2.3.3. Déterminer les valeurs de f_0 et n (entier) pour respecter le gabarit voulu.

Réponse 2.3.3. $D = 1965.2$ $\Omega_s = \frac{141.1}{4} = 35.35$ $n > 2.13 \Rightarrow n = 3$
 $\epsilon = \sqrt{(10^{0.1} - 1)} = 0.5088$ $f_0 = \epsilon^{\frac{1}{n}} \cdot 141.1 = 112 \text{ KHz}$

Question 2.3.4. Justifier que la bande transmise en hautes fréquences par le filtre réel n'est pas infinie.

Réponse 2.3.4. Un filtre actif utilise des amplificateurs opérationnels constitués avec des transistors. Le comportement harmonique des transistors se traduit par des fréquences de coupure en haute fréquence et donc le filtre passe haut est toujours en réalité un filtre passe bande dont la fréquence de coupure haute est fixée par la technologie.

2.4 Amplification

Les standards ADSL définissent les niveaux de puissance des signaux transmis en liaison descendante. Les densités spectrales de puissance reçues dans les 223 sous-canaux sont quasiment identiques et comprises entre $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ V}^2/\text{Hz}$ et $2 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2/\text{Hz}$ ¹ en fonction de l'atténuation de la boucle qui dépend principalement de sa longueur. Nous savons aussi que

1. La densité spectrale devrait s'exprimer en toute rigueur en $\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$ ce qui est équivalent à W/Hz mais il est courant de l'exprimer en V^2/Hz si on considère une résistance de conversion constante.

pour toute la plage de l'atténuation de la boucle, le rapport entre la tension maximale V_{peak} et la tension efficace V_{rms} du signal reçu est de 8 dB. L'objectif de l'amplificateur est d'amplifier les symboles DMT afin d'occuper l'intégralité de la pleine échelle du convertisseur analogique numérique de ± 4 V.

Question 2.4.1. *Calculer la tension efficace pour la plage des puissances reçues. Nous rappelons que la puissance est l'intégrale de la densité spectrale de puissance sur la bande de fréquence d'intérêt.*

Réponse 2.4.1. $V_{rms-min}^2 = B \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} = 0.119 \text{ V}^2 \Rightarrow V_{rms-min} = 0.35 \text{ V}$. En faisant le même calcul, on obtient $V_{rms-max} = 1.38 \text{ V}$

Question 2.4.2. *Déduisez-en la plage de tension maximale V_{peak} que nous avons à l'entrée de l'amplificateur.*

Réponse 2.4.2. $20 \log \frac{V_{peak-min}}{V_{rms-min}} = 8 \Rightarrow V_{peak-min} = 0.88 \text{ V}$. En faisant le même calcul, on obtient $V_{peak-max} = 3.47 \text{ V}$

Question 2.4.3. *Expliquer pourquoi il serait judicieux d'utiliser un amplificateur à gain programmable (PGA) et donner la plage des valeurs de son gain en dB ?*

Réponse 2.4.3. Pour ramener ces amplitudes peak au niveau de la pleine échelle du CAN, il faut un amplificateur à gain variable dont le gain est compris entre 1.2 et 13.2 dB

2.5 Conversion

Un convertisseur analogique numérique (CAN) assure la numérisation des symboles DMT. Vu le faible rapport entre la fréquence maximale du signal et sa bande passante, on décide de faire la numérisation sans transposition de fréquence.

Question 2.5.1. *Quelle est la fréquence minimale pour l'échantillonnage du signal en entrée ?*

Réponse 2.5.1. $f_e = 2 \times 1.1 \cdot 10^6 = 2.2 \text{ MHz}$

Dans le budget de bruit du système, 50% sont alloués au CAN.

Question 2.5.2. *Calculer la résolution minimale (en dB) requise pour le CAN.*

Réponse 2.5.2. Le SNR à la sortie du CAN doit être supérieur à 80 dB. Le CAN a 50% du budget du bruit du système, en conséquent

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{Bruit_{total-recepteur}} \right) = 80 \text{ dB} ; 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{0.5 \cdot Bruit_{total-recepteur}} \right) = SNR_{CAN} \\ \Rightarrow SNR_{CAN} = 83 \text{ dB}$$

Dans le budget du CAN, 30% sont alloués au bruit de quantification. (Les 70 % restants sont alloués aux autres imperfections et bruit du CAN).

Question 2.5.3. *Calculer le nombre de bits de quantification nécessaire pour le CAN.*

Réponse 2.5.3.

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{Bruit_{total-CAN}} \right) = 83 \text{ dB} ; 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{0.3 \cdot Bruit_{total-CAN}} \right) = SNR_{quant} \\ \Rightarrow SNR_{quant} = 88.23 \text{ dB} \Rightarrow n_{bits} = \frac{88.23 - 1.76}{6.02} = 14.36$$

Nous prendrons ainsi un CAN avec 15 bits de quantification