

D.S.L. (« Digital Subscriber Line : ligne numérique chez l'abonné »)

D'après entre autres documents, un article d'Elektor

Voir aussi (en anglais !):

<http://www.planetee.com/planetee/servlet/DisplayDocument?ArticleID=5579>

I-Généralités

I-1. Introduction

Depuis le célèbre "Mr Watson, come here, I want you" de Graham Bell en 1876, la transmission sur fils de cuivre a beaucoup évolué. La paire torsadée est brevetée en 1881 pour la transmission de la voix peu après l'invention du téléphone. Quelques lignes enterrées à côté des lignes aériennes majoritaires. L'amélioration de la ligne reposait sur l'installation de bobines (inductances) à intervalles réguliers pour égaliser le spectre => limitation spectrale (aux US : encore ¼ du réseau). Autre amélioration : l'amplificateur électronique apparu dans les années 20, en même temps que la commutation automatique.

Dans les années 50, un grand pas : la modulation pour le multiplexage en fréquence sur des câbles coaxiaux reliant les centraux. Dans les années 60, apparaît la numérisation (PCM : MIC) avec transmission de la voix sur 64 kbits/sec (échantillonnage sur 8 bits à 8 kHz) puis le multiplexage temporel sur la paire torsadée, comme sur le câble coaxial et la fibre optique pour les grandes liaisons.

La norme Européenne PCM à 2048 Mbit/s transmet un multiple de 30 canaux (norme US : 24 canaux), chacun véhiculant 4 voix digitalisées. Deux canaux supplémentaires servent à la numérotation et la facturation.

Sur les distances courtes (entre l'abonné et le central : ce qu'on appelle **la boucle locale**) la tendance est aussi la transmission numérique, avec un déploiement de nouveaux supports : microondes, fibre optique (qui offre plusieurs TeraHertz de bande passante)... En parallèle, on recherche à utiliser l'infrastructure existante et y augmenter les capacités de transmission : la transmission DSL (dont ADSL) .

I-2. Transmission de données sur lignes téléphoniques

Les débuts (timides) datent des années 50 sous deux formes : on utilise un modem à fréquence acoustique (avec microphone et haut-parleur collés avec ventouses au combiné!) sur le réseau commuté (PSTN=RTC) avec deux fils, également sur réseau privé à 4 fils. La transmission était en FSK à 300 bits/s ou 1200 bits/s.

A suivi la modulation QPSK (4 phases) qui permet 2400 bits/s sur un canal de 1200Hz, puis (1967) des modems à égalisation ajustable avec une modulation 8-PSK : 4800 bits/s sur 1600 Hz. Les égaliseurs adaptatifs numériques ont permis une augmentation du débit : 9600 bits/s avec un nouveau schéma de modulation : QAM (1971). Le grand pas suivant est la généralisation de l'implémentation de QAM (modulations double : en phase et en quadrature sur cosinus et sinus) avec constellations jusqu'à $8 \times 8 = 64$ points : 14400 bits/s en 1984, 56 kbits/sec actuellement.

Si les premiers modems fonctionnaient avec un coupleur acoustique : microphone + haut-parleur, les taux 33600 bits/s puis 56kbits/s actuels ne peuvent être obtenus qu'avec des connexions directes. Ces taux sont possibles par le remplacement des impulsions (source de bruit) en numérotations par les tonalités, le développement de codages sophistiqués permettant un gain de codage de plus de

6dB, le développement de circuits VLSI d'égalisation numérique mettant en forme les signaux. Maintenant il est difficile d'aller plus loin car le rapport signal/bruit des lignes empêche l'utilisation complète de la bande passante.

I-3. Vers une meilleure utilisation des lignes de transmission

Les réseaux ISDN couplent les données numériques et la voix numérisée (norme en 1988) et sont appelées à remplacer en local la traditionnelle liaison analogique du P.O.T.S (*Plain Old Telephone Service*). L'accès de base comprend deux canaux de 64 kbits/s utilisables pour la voix numérisée chez l'abonné et un canal à faible taux 9600 bits/s. Un deuxième service ISDN (accès primaire) offre 30 +2 canaux à 64 kbits/s (analogie au PCM 30) sur deux paires torsadées, avec répéteurs tous les 2 km.

L'ISDN-BA exploite en Europe une bande passante est de 0 - 120 KHz pour une transmission à 160 kbits/sec (120 kBauds) sur paire torsadée avec 4 répéteurs pour 20 km. Le code est 4B3T/MMS43 (4 bits codés avec trois symboles ternaires). Les variantes DSL complètent l'offre sur ce type de marché.

L'HDSL (et HDSL2 aux US) pour réseau T1/E1 sans répéteurs, sans conditionnement de la transmission, transmet l'équivalent du PCM 30 ou ISDN accès primaire sur deux paires avec suppression d'échos en full duplex. Codes : 2B1Q. Une variante SDSL (single pair DSL) fonctionne sur 3 km sans répéteurs et permet la transmission simultanée du téléphone tout en utilisant l'infrastructure existante.

Le plus récent rejeton : le VSDL est prévu en deux versions : symétrique et asymétrique, avec taux sous multiples des taux SONET (transmission optique) (cinq versions : 13+2 Mbits/s, 13+13 Mbps, 26+2, 26+26, 52+2), sur faible distance (1550 m, 1000 m, 300 m)

I-4. L'ADSL

Le système qui reçoit le plus d'intérêt du public est l'ADSL adapté à la navigation sur Internet et la vidéo à la demande, bien qu'il soit en 2001 encore peu répandu en France.

Le partage du canal est essentiellement asymétrique avec un débit de transmission fonction de la distance entre l'abonné et le central. Le débit prévu est de 2Mbits/s en Europe, 1,5 Mbits/s aux US (pour permettre la transmission vidéo en qualité VHS). Le POTS est aussi véhiculé par la ligne et en Europe on essaie d'inclure l'ISDN-BA, dans la partie basse fréquence de la transmission (=> réduction du taux de 10%). La distance moyenne (Europe : 2,5 km, US 4,5 km) abonné-central permet une implémentation de l'ADSL sans trop grande modification de l'infrastructure. Le code est de type 4B3T en Europe.

La première norme ANSI date de 1995, l'ETSI rajoute l'inclusion de l'ISDN; elle choisit le procédé « discrete multitone (DMT)» (transmission multi-porteuse). Certains industriels voudraient rajouter dans la norme le QAM/CAP (sans porteuse).

Les champs d'application de la technique ADSL sont constitués par tous les services

multimédias qui sont indubitablement les principaux consommateurs actuel d'accès rapide à Internet. Les premiers essais d'ADSL ont toutefois aussi porté sur l'acceptation dans les domaines du téléachat, de l'enseignement à distance, de la vidéo à la demande, de la musique à la demande et ainsi de suite.

II- Les principes utilisés dans l'ADSL

Le grand principe : utiliser la ligne téléphonique dans une gamme de fréquences pour laquelle elle n'a pas été conçue => sur-utilisation de la boucle locale sans nouveau investissement.

II-1 Spectres utilisés et débits:

Sans ISDN : 0-4 (POTS) 25-138 (upstream) 138-1104 kHz (down stream)
 Avec ISDN : 0-120 (ISDN) 139-276 (upstream) 276-1104 kHz (down stream)
 Les débits ('bitrate' en Mb/s) et portées (en km) sur paires de 0,4 mm (espérés !):

Europe sans ISDN		Europe avec ISDN		US (sans ISDN)	
Bitrate	portée (km)	Bitrate	portée	Bitrate	portée
2	3,9	2	3,5	1,5	4,6
6	2,8	6	2,5	6,1	2,7
8	2,2	8	2		

II-2. Codages repris dans l'ADSL

Codages en bande de base : PAM: pulse amplitude, PPM: pulse position, PDM: pulse duration. Pour la **Pulse Amplitude Modulation**: n bits sont transmis en utilisant des symboles à 2ⁿ niveaux d'amplitudes. La quantité d'information transmise est de n*f_s où f_s est le taux de transmissions des symboles. n peut ne pas être entier : 4/3 pour code 4B3T (4 bits pour 3 symboles ternaires qui donnent 27 états possibles). Ce code est un code **non saturé** dans la mesure où tous les états possibles ne sont pas utilisés pour la transmission. Si le code est saturé la bande passante nécessaire est réduite, mais la performance spectrale n'est pas nécessairement optimale ni la possibilité de détection d'erreurs.

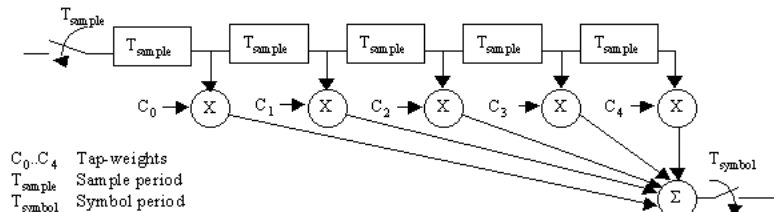
L'idée de véhiculer la voix ou l'ISDN en parallèle ne permet pas un codage en bande base, mais l'ADSL utilise un spectre légèrement décalé (qui commence à 26 kHz).

Récupération de la synchronisation

Elle dépend grandement du code utilisé. Le problème induit par les longues séquences de zéro peut être résolu par un brouilleur ou certains codes comme le HDB3 (insertion de marques alternées en cas de longue séquence). L'ouverture de l'oeil (diagramme de l'œil) rend compte de la facilité de synchronisation de l'échantillonnage en réception. Un circuit PLL (phase locked loop) ou un circuit oscillateur contrôlé numériquement) peut assurer la synchronisation.

Egalisation

But : rendre les spectres non superposés pour éviter l'interférence entre symboles: A partir de la réponse impulsionnelle de la chaîne de transmission, le signal est traité à l'émission de façon à ce que sa forme à l'arrivée soit la meilleure possible. L'égalisation linéaire est en général réalisée grâce à une ligne « tapped delay »:



II-3. Modulation d'amplitude en quadrature

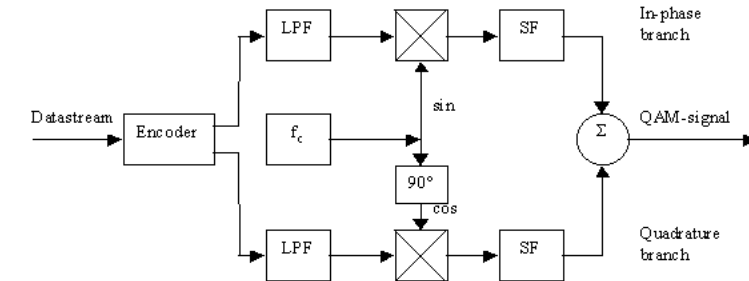
Deux signaux à la même fréquence : cosinus et sinus. Elle peut être vue comme une PAM en deux dimensions : constellation. Elle peut être vue aussi comme une TDM (multiplexage temporel) les sinus étant porteurs d'information quand les cosinus sont faibles en amplitude et vice-versa.. Le nombre de niveaux d'amplitude pour un taux d'erreur (BER) dépend du rapport signal sur bruit:

La 16-QAM demande 21,5 dB, la 64-QAM 27,5 dB pour un BER de 10⁻⁷

Taux de transmission des symboles = bande passante centrée sur la porteuse

Adaptation du taux de transfert => pas trop de complexité supplémentaire si l'on joue sur la taille de la constellation.

La forme optimale de la constellation : cercle minimisant l'énergie/symbole, mais efficacité pas suffisante pour justifier de la complexité (gain de 0,6 dB pour une constellation hexagonale).



- f_c Carrier frequency
- LPF Lowpass filter
- SF Shaping filter
- 90° Phase rotator 90°

Habituellement Normalement la constellation est rectangulaire.

L'égalisation pour améliorer le spectre et diminuer l'interférence inter symboles, est du même type que pour la PAM.

Si en réception on sépare les deux phases, on aboutit au schéma suivant avec seulement deux coefficients:

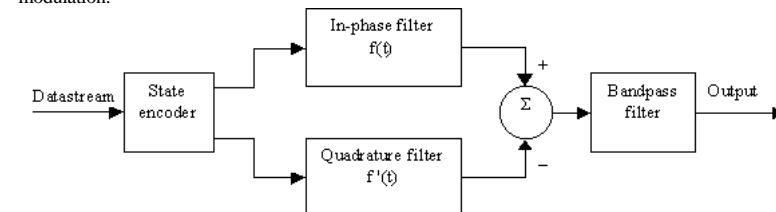
Carrierless Amplitude Modulation (CAP)

C'est une forme spéciale de QAM adaptée à l'implémentation numérique. En fait pour une fréquence porteuse donnée et un taux de symbole donnés, QAM et CAP sont identiques, seule la constellation subit une rotation correspondant à une implémentation différente peu complexe en numérique.

$$g(t) = \frac{\sin(\pi * f_c * t * (1 - \alpha)) + 4 * \alpha * f_c * t * \cos(\pi * f_c * t * (1 + \alpha))}{\pi * f_c * (1 - (4 * \alpha * f_c * t)^2)}$$

Signal en phase : f(t)=g(t)*cos(2*π*f_c*t), signal en quadrature : f'(t)=g(t)*sin(2*π*f_c*t)

Les signaux en phase et en quadrature sont directement injectés dans des filtres de Hilbert qui effectue la modulation.



II-4. Capacité théorique d'un canal

Le théorème de Shannon (1949) donne une limite théorique de la capacité d'un canal en bps en fonction des spectres de puissance signal $S(f)$ et du bruit $N(f)$ (ici considéré comme fonction de la fréquence) au niveau du récepteur sans d'ailleurs donner la moindre indication sur le codage pour l'atteindre !

$$C = \int_0^w \log_2(1 + S(f)/N(f)) df$$

Ce théorème ne permet pas de construire le codage qui permet d'atteindre la capacité limite, il permet les comparaisons entre les modes de modulation et codages plus ou moins sophistiqués, et les puissances nécessaires de signal. Pour les modulations les plus sophistiquées, le rapport de puissance de puissance est de 9.8 dB pour un signal non codé et peut être réduite à 3dB par le choix de codes treillis. Pour des niveaux élevés de rapport signal/bruit, un bit/symbole de plus réclame 3dB de plus de puissance transmise.

La prise en compte du « cross talk » réduit la validité de ceci dans la mesure où l'augmentation de puissance du signal d'un canal adjacent agit comme une augmentation du bruit.

La largeur de bande utilisée dépend de la fréquence de Nyquist $f_N = f_s / 2$ f_s étant la fréquence d'échantillonnage. Pour certains codes tels que le 2B1Q, la largeur de bande est voisine de f_N , mais elle atteint le double avec des codes tels que AMI ou 4B3T.

Pour les modulations QAM ou CAP la largeur atteint aussi le double (autrement dit égal au taux de transmission des symboles). Pour les transmissions multiporteuses (DMT) la bande est égale à la fréquence de Nyquist.

II-5. La division en sous-bandes du signal ADSL

Un signal DMT ADSL est composé en majeure partie d'un grand nombre de porteuses modulées indépendamment qui sont transmises par les deux fils de cuivre au-delà de la bande normale de la parole. La figure ~ représente le spectre de fréquence du signal : la norme ADSL initiale prévoit de laisser libre la gamme de fréquence entre 0 et 26 kHz pour la téléphonie analogique actuelle (POTS = Plain Old Telephone Service). Outre la bande vocale (de 300 Hz à 4,3 kHz), cette gamme contient des signaux tels que les impulsions de taxation (allemandes) de 16 kHz. Entre 26 kHz et 1,130 MHz se trouvent 256 canaux, occupant chacun 4,3125 kHz de largeur de bande. Les fréquences centrales des canaux sont aussi distantes de 4,3125 kHz.

Chaque porteuse upstream et downstream est modulée QAM (amplitude en quadrature) et contient entre 2 bits/s par Hz et un maximum de 15 bits/s par Hz. Le débit des informations est adaptatif, c'est-à-dire que chaque porteuse se voit attribuer son propre paramétrage QAM (... , 64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK) lors de la phase d'initialisation en fonction du rapport signal/bruit. Plus le rapport signal/bruit est élevé et plus le degré de modulation QAM est élevé, et donc plus les bits/s et les Hz le sont. Une porteuse individuelle du signal DMT peut transmettre 64,7 kbits/s (16 bits*4kBauds), ce qui représente théoriquement une capacité maximale de plus de 16 Mbits/s avec 256 porteuses.

De mauvaises conditions de liaison ou une longueur relativement élevée de celle-ci ont pour effet de diminuer la valence pour une porteuse, donc le degré de modulation QAM lors de l'établissement de la liaison pour assurer une transmission fiable avec cette porteuse. Il peut même arriver que des plages entières de porteuses soient éliminées du signal DMT parce qu'une atténuation trop élevée, des sources de perturbations locales, etc. rendent les fréquences correspondantes inutili-

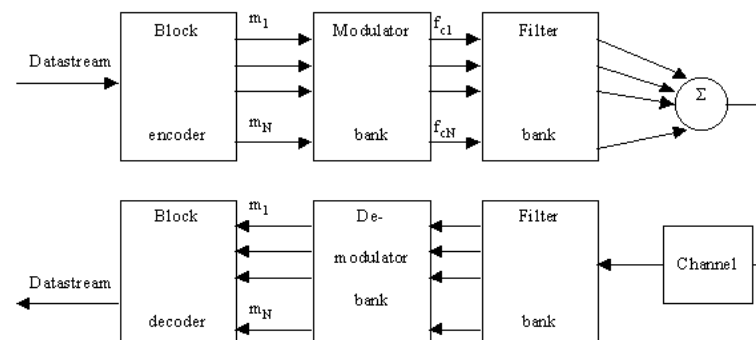
sables.

Selon la norme, il existe deux façons d'attribuer chaque porteuse downstream et upstream on peut faire appel au mode de fonctionnement FDM (*Frequency Division Multiplexing*, figure 1-a et figure 1-b) qui est relativement peu complexe pour répartir les gammes de fréquence entre downstream et upstream. Les 26 premières porteuses constituent le canal upstream, tandis que les porteuses 27 à 256 contiennent les données downstream. On peut aussi, selon la norme ADSL, travailler en mode de compensation d'écho. Dans ce cas, les directions downstream et upstream se partagent une gamme de fréquence commune (porteuses de 1 à 26). L'équipement terminal permet de séparer les données downstream et upstream selon leur direction. Cela conduit bien entendu à une capacité accrue du flux de données en direction downstream, car les 112 kHz initiaux de la bande ADSL contiennent les porteuses qui peuvent être correctement transmises. Les fréquences plus élevées sont plus fortement amorties. Pour que ce processus fonctionne correctement, il est indispensable d'utiliser un correcteur d'écho qui élimine le restant éventuel de l'autre flux de données. La norme ADSL décrit par ailleurs ce second procédé d'attribution des fréquences sous le nom de *Category 2 ADSL*.

Les différences de niveau atteignant 50 dB entre les porteuses inférieures et supérieures sont provoquées par les distorsions dues à l'atténuation et doivent être détectées par les égalisateurs de canaux extrêmement raffinés du modem ADSL. Les porteuses trop affaiblies ne peuvent transmettre les données. Grâce au codage dynamique des conducteurs (qui dépend port signal/bruit mesuré) et à l'égalisateur de canaux, on parvient toutefois à tirer parti de conditions aussi défavorables pour effectuer la transmission de données. La figure 2 reproduit schématiquement le comportement du rapport S/N et du débit binaire attribué en fonction du numéro de porteuse (1 à 256).

II-6. Modulation multiporteuse (DMT)

Connue depuis 40 ans mais trop complexe en analogique, celle-ci est devenue populaire récemment. Différents noms : OQAM (orthogonal ...), DM (orthogonal frequency division multiplexing) **DMT : discrete multitone**. Principe : On partage la largeur de bande du canal en sous canaux, chacun ayant leur porteuse : les bits sont répartis de façon adaptative sur chaque sous-



m_1, m_N blocks of bits for subchannel 1 to N
 N Total number of subchannels
 f_{c1}, f_{cN} Carrier frequencies of subchannel 1 to N

$$\text{Débit total d'information (bit/s)} = C = f_{\text{symbol}} \sum_{i=1}^N m_i$$

m_i : nombre de bits attribués à chacun des N sous-canaux.

L'optimisation du nombre de bits par canal peut se faire selon trois critères: puissance transmise, BER (bit error rate) et débit total d'information. Deux sont fixés par l'environnement est le troisième est ajusté. L'allocation est optimale (d'après les observations) si le BER par sous-canal est approximativement égal.

Si des bruits à bande étroite et stationnaire perturbe la transmission, les canaux correspondant se verront attribuer des constellations de petite taille.

Capacités (en Mbps) pour différents modèles de câbles (Quad, paire torsadée...0.5 ou 0.4 mm) et selon la bande passante laissée pour le POTS (téléphone) ou ISDN (RNIS):

câbles enterrés	Paire torsadée		Quad 0,5 mm	
	POTS	ISDN	POTS	ISDN
2 km, monde réel	12.7	11.34	14.45	12.86
4 km, monde réel	10.19	9.35	11.52	10.44

Sans cross-talk				
2 km, monde réel	24,9	21,6	24,9	21,6
4 km, monde réel	15.47	12.71	15.47	12.71

canal montant				
2 km, monde réel	1.51	1.80	1.74	1.80
4 km, monde réel	0.99	0.82	1.22	1.02

câbles enterrés	Paire torsadée		Quad 0,4 mm	
	POTS	ISDN	POTS	ISDN
2 km, monde réel	12.56	11.22	14.29	12.71
4 km, monde réel	6.42	5.61	7.11	6.06

Sans cross-talk				
2 km, monde réel	21.86	18.68	21.85	18.59
4 km, monde réel	9.70	6.97	9.70	6.97

canal montant				
2 km, monde réel	1.49	1.48	1.72	1.59
4 km, monde réel	0.94	0.59	1.17	0.79

La capacité est approximée par :

$$C = \sum_{i=1}^N W/N \log_2(1 + P_T(i) * |H(i)|^2 / N(i))$$

N nombre de sous-canaux, W limite supérieure de bande du signal transmis de puissance $P_T(i)$

i, indice du canal, $|H(i)|^2$: fonction de transfert du canal en terme de puissance.

Taux maximal de transmission avec marge de sécurité de 6dB

En pratique on n'atteint pas les taux maxima (8 Mbits/s) car la qualité de la transmission intervient. En fonction des conditions du raccordement, ADSL s'adapte même dynamiquement au cours d'une communication lorsque les grandeurs parasites (par exemple la diaphonie causée par une autre ligne téléphonique du faisceau) varient.

Les débits downstream (descendant) et upstream les plus élevés possibles dépendent fortement des caractéristiques du raccordement utilisé : la longueur de la liaison avec le central joue un rôle décisif. La distance entre le centre et l'abonné est en moyenne d'environ 2-3 km en Europe. ADSL permet théoriquement de transférer de 6 Mbits/s à 8 Mbits/s par des lignes ne dépassant pas 3 km sans

perturbations excessives. La section des conducteurs d'un raccordement d'abonné constitue un autre facteur de qualité. Le torsadage des conducteurs signifie en principe que l'impédance de la ligne est constante, mais cette situation idéale peut être fortement compromise par les épissures, le passage à d'autres types de conducteurs, les boîtiers des connexions et les terminaux raccordés. Le débit maximum est alors plus ou moins fortement limité par le signal réfléchi aux points de réflexion. La qualité du câblage chez l'abonné n'est enfin pas le moindre facteur déterminant la vitesse du débit downstream. L'utilisation des autres conducteurs du faisceau joue aussi un rôle. S'ils assurent aussi des transmissions ADSL, il faut compter avec la diaphonie entre paires voisines. Une commutation des conducteurs pour améliorer le découplage des deux itinéraires ADSL améliore parfois la situation, à condition que le trafic ADSL ne soit pas trop élevé.

Débit des liaisons ADSL

Débit maximal R_{max} pour une modulation non codée DMT en bit/s

$$R_{max} = \int_{f_{low}}^{f_{up}} \log_2(1 + 3 * SNR(f) / Q^{-1}(BER/4)) \cdot df$$

$$\text{Avec } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2/2) \cdot du$$

BER : bit error rate, SNR(f) : Rapport Signal/bruit à la fréquence f.

Après calculs et simplifications : on considère 9,8 dB = rapport standard SNR pour un BER=10⁻⁷.

$$R_{max} = \int_{f_{low}}^{f_{up}} \log_2(1 + 10^{[SNRdB(f)-9.8 \text{ dB} - CP_Loss + 13]/10}) \cdot df$$

CP préfixe de code (longueur 40) ; I³ : Gain de codage en dB

2*N = longueur d'un bloc DMT, N est le nombre de canaux (256)

Le nombre de bits assigné au canal k se calcule de façon analogue :

$$B_k = \log_2(1 + \frac{3 * SNR_k}{Q^{-1}(BER/4)}) \text{ ou } B_k = \log_2(1 + \frac{PSD_{signal}(k) * |H(k)|^2}{PSD_{noise}(k) * G})$$

Avec $G = 10^{[9.8 - I + 10 \log(2N/(2N - CP])}$

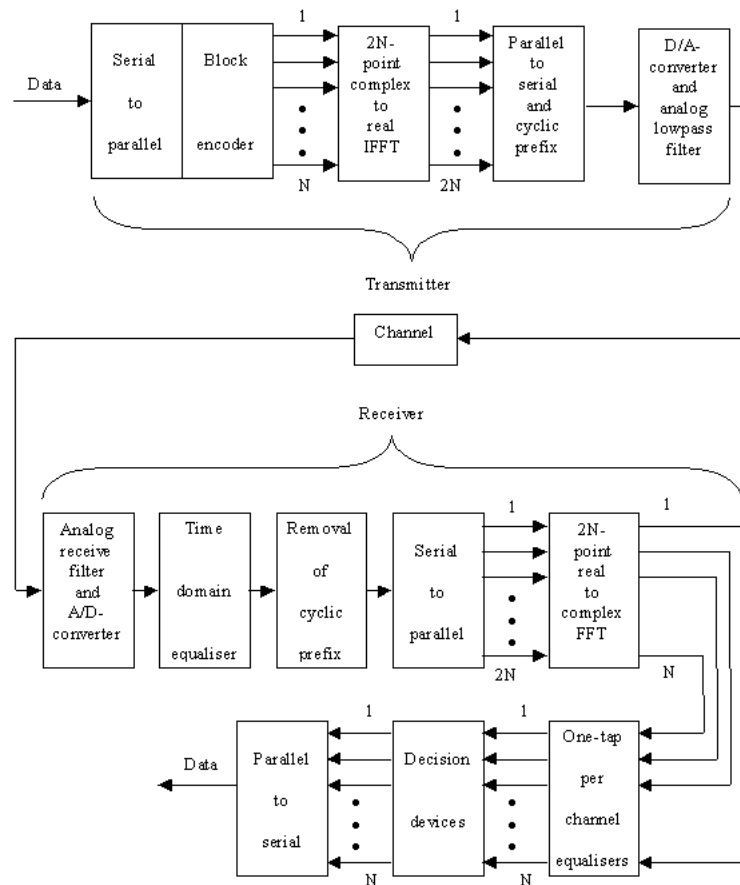
PSD : densité de puissance spectrale signal ou bruit pour le canal k, $|H(k)|^2$ est la fonction de transfert de puissance moyenne pour le canal k.

Le maximum a été limité à 16 bits /canal ce qui théoriquement permet encore d'atteindre le débit maximum de 8 Mbits/s (2000 symb/sec*230*16).

III - Equipement ADSL

III-1. MODEMS

La structure des modems utilisés avec ADSL est représentée de manière schématique et simplifiée dans la figure 3. Le circuit est en principe identique côté central. La seule différence réside dans la distribution d'ADSL à plusieurs abonnés (par exemple 4). On parle alors aussi de DSLM (*Digital Subscriber Line Multiplexer*).



Les données envoyées (données upstream côté abonné, données downstream côté central) sont transmises à un codeur qui attribue les N porteuses du signal DMT. Cela est effectué sur la base du tableau de chargement des bits (*Bit Loading*) créé lors de l'établissement de la connexion qui indique le nombre de bits/s que chaque porteuse est en mesure de transmettre.

Le codeur effectue aussi une correction Reed-Solomon FEC (*Forward Error Correction*). Les bits sont ensuite traités en parallèle par un C.I. qui effectue une IFFT (transformée de Fourier rapide inverse). On construit ainsi à partir des N bits considérés comme un spectre numérique (ensemble des porteuses individuelles) le signal temporel associé. Un en-tête de synchronisation est ajouté cycliquement après la conversion parallèle/série.

La distorsion des signaux émis et reçus provoquée intentionnellement par le supprimeur d'écho compense les échos de la liaison. Il se règle automatiquement lors de l'établissement de la connexion par une séquence d'apprentissage. Le signal émis (Tx) peut être finalement être converti D/A et envoyé

à la ligne au moyen d'un duplexeur séparant les voies d'émission et de réception.

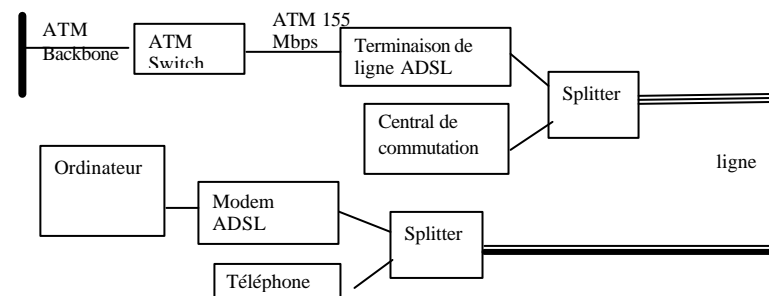
Le signal reçu (Rx) passe d'un duplexeur à un convertisseur A/D qui envoie lui aussi le signal d'entrée numérisé à un supprimeur d'écho. Comme pour l'émission, le supprimeur d'écho « répare » les dommages causés par l'écho de la liaison au flux de données reçu. Un égaliseur, réglé toujours par des séquences d'apprentissage lors de l'établissement de la connexion, puis lors de l'utilisation de celle-ci, élimine la distorsion de la courbe de réponse. L'en-tête du flux de données est ensuite extrait. Une fois la conversion série/parallèle effectuée, un segment exactement défini du signal temporel numérisé est envoyé au composant FFT (*Fast Fourier Transform*) sous forme de mot de $2N$ bits. La transformée de Fourier rapide permet de revenir des $2N$ bits du domaine temporel au domaine de fréquence, ce qui fournit les états de phase de la porteuse modulée QAM sous la forme de N bits en parallèle. Le décodeur doit enfin replacer les bits de chaque porteuse DMT dans le bon ordre sur la base d'un tableau de chargement des bits chargé à cet effet. Il inverse toutefois en premier lieu le codage Reed-Solomon, dont la puissance permet de corriger de nombreux bits erronés.

Un grand nombre de fabricants de semi-conducteurs sont actuellement en mesure d'offrir des jeux de puces et autres composants spécialement destinés aux modems ADSL : Motorola jeu de puces Copper Gold), ST Microelectronics Alcatel (jeu de puces DynaMite), Broadcom, GlobeSpan et Texas (tableau ci dessous). Les modems ADSL constituent aussi un défi pour les réalisateurs dans le domaine analogique. Le signal DMT exige une linéarité très poussée des amplificateurs et des circuits attaquant les lignes. Le facteur de crête (rapport entre la puissance de pointe et la puissance effective) est très élevé, ce qui veut dire que les circuits d'attaque doivent comporter de fortes réserves. C'est la raison pour laquelle des fabricants comme Burr Brown et Analog Devices offrent des C.I. spécialement conçus à cet effet. L'équipement des centraux pose, lui aussi, quelques problèmes, car il faut prévoir jusqu'à 12 W par raccordement ADSL dans le bâti des liaisons d'abonnés. La dissipation de chaleur devient le problème majeur lorsque le matériel est disposé de façon compacte.

III-2. Équipement supplémentaire

Le raccordement téléphonique ADSL se présente côté abonné et côté central comme un ensemble séparateur de signaux constitués de filtres passe-haut à flancs raides, pour le spectre ADSL, et de filtres passe-bas qui se chargent de filtrer le signal analogique usuel du téléphone ou le signal RNIS sur la liaison de raccordement et à partir de celle-ci. Le diviseur de l'abonné qui veut se servir de ADSL doit bien entendu être raccordé à un modem de ce type. Le modem comporte un récepteur (RX) du signal downstream à débit élevé et un émetteur (TX) destiné au signal upstream envoyé par l'abonné. Les données upstream et downstream contiennent les données utiles plus des données de gestion et de commande. Il faut que le central puisse commuter tous les abonnés qui le désirent sur des terminaisons de ligne ADSL. Ces terminaisons constituent le complément du modem ADSL. Un émetteur downstream (TX) transmet le flux de données à débit élevé au raccordement en passant par le diviseur. Le débit des données du récepteur upstream (RX) n'est que moyen. Un multiplexeur DSLM (*Digital Subscriber Line Multiplexer*) permet de répartir les canaux ADSL entre plusieurs abonnés.

STRUCTURE DU SYSTÈME ADSL :



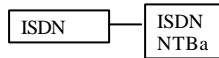


Figure : Schéma de principe de l'équipement de ligne ADSL

La terminaison de ligne ADSL y est connectée dans le central. Elle est raccordée à 155 Mbits/s à la dorsale ATM par un commutateur ATM.

Le côté abonné comporte un modem ADSL équipé d'une interface ATM F25,6 (25,6 Mbits/s) ou plus souvent d'une interface LAN (plus lente) 10BaseT. Le PC doit disposer d'une carte ATM ou réseau idone pour commander parfaitement l'interface du modem ADSL. La figure indique que, dans le cas de RNIS également, il faut intercaler la terminaison NTBa (Network Termination, terminaison du réseau de l'accès de base) à la suite du diviseur.

III –3. ÉTABLISSEMENT DE LA CONNEXION

Les nombreuses possibilités de réglage d'un système de transmission ADSL requièrent, lors de l'établissement de la connexion, l'échange d'un protocole complexe qui permet au central et au modem ADSL de se communiquer leur configuration respective. Les deux modems saisissent les courbes de réponse dans les deux directions de transmission en envoyant des fréquences pures (porteuses) dont le niveau sera enregistré par l'autre modem. Le débit binaire des canaux downstream et upstream ainsi que le procédé à utiliser pour séparer les directions (FDM ou compensation d'écho) est ensuite déterminé au moyen d'une séquence d'apprentissage. C'est à ce point que se décide le débit binaire maximum réalisable des lignes de raccordement individuelles. ADSL peut aussi venir à bout de perturbations variant dans le temps. L'échange de bits (Bit swapping) permettra de modifier en direct l'attribution des bits aux porteuses.

Cette phase de démarrage passablement élaborée de ADSL prend plus de 20 secondes et même parfois plus d'une minute. Mais c'est le prix à payer pour optimiser le débit de chaque porteuse.

Lorsqu'une connexion ADSL est déjà établie, il peut arriver qu'un changement brusque des paramètres de la liaison dérègle à tel point les paramètres soigneusement mis au point de l'égaliseur que la capacité de transfert s'effondre brusquement. Il faut naturellement éviter que la correction de l'égaliseur permettant de rétablir complètement la liaison ne dure de nouveau 20 à 60 secondes. Il est donc possible d'avoir recours à une procédure de réglage abrégée qui détermine rapidement les nouveaux paramètres de l'égaliseur en se basant sur les paramètres de la liaison déterminés lors de l'établissement de la connexion. La liaison ADSL est en général rétablie au bout de 1 à 2 secondes. Cela exige toutefois que le modem ADSL surveille continuellement la qualité de transmission de chaque porteuse.

III-4. Trame ADSL

Les données sont transmises sous la forme de super-trames contenant 68 trames ADSL. Chaque super-trame contient une trame supplémentaire avec signaux de synchronisation. Chaque trame ADSL contient deux parties : le tampon rapide (fast buffer) et le tampon entrelacé (interleaved buffer). Le tampon rapide commence avec 'l'octet rapide' qui contient dans les trames 1, 34 et 35 des bits à vocation administrative., il est clôturé par un CRC et des bits de corrections d'erreurs (Forward Error Correction). Le tampon entrelacé ne contient que des données.

En plus des codes treillis au niveau de la modulation, le code de correction d'erreur est du type Reed-Solomon. La longueur du code varie en fonction des bits assignés dans les deux tampons de la trame.

IV- Variantes

IV-1. ADSL ET RNIS

Le signal RNIS de 2 x 64 kbits/s (128 kbits/s s'étend normalement jusqu'à 80 kHz. En Allemagne, sa bande de fréquences s'étend même jusqu'à 120 kHz. Pour pouvoir aussi offrir ADSL comme extension à vitesse élevée avec des raccordements RNIS, il a fallu combiner les signaux ADSL et RNIS. Il aurait été possible d'utiliser alternativement RNIS et ADSL selon les besoins. Mais ceci aurait eu pour conséquence de lier RNIS et ADSL et d'empêcher leur utilisation simultanée. On a décidé de s'écarter de la norme en ne faisant commencer le signal DMT qu'à partir de 140 kHz. Si la distance entre porteuses et la largeur de bande de la modulation restent inchangées (4,3125 kHz), il ne reste que 224 porteuses. Cette solution a été justifiée et recommandée a posteriori dans l'annexe B de la norme ADSL.

Le problème que cette méthode pose avec le RNIS est que les porteuses les plus basses sont réservées, selon la norme ADSL, au test de la liaison lors de la connexion par des séquences d'apprentissage et à la détermination du débit binaire de chaque porteuse DMT. Comme elles sont inaccessibles dans le cas de la solution RNIS, force est de recourir à d'autres porteuses du domaine upstream pour l'établissement de la connexion, en contradiction avec la norme ADSL.

L'annexe B de la norme contient la description de ce procédé. La raison pour laquelle on fait appel aux porteuses les plus basses lors de l'établissement de la connexion est qu'elles sont celles qui, à ce moment-là, peuvent être transmises le plus loin dans la ligne de l'abonné, de sorte que l'établissement initial de la connexion avec le modem ADSL d'un abonné, même éloigné (3 à 4 km), reste toujours possible.

Tableau 1. Adresses sur Internet des fabricants de circuits intégrés ADSL

Fabricant	Page d'accueil Internet		
Motorola	www.mot-sps.com	Broadcom	www.broadcom.com
ST Microelectronics	www.st.com	Alcatel	www.usa.alcatel.com
GlobeSpan	www.globespan.net	Texas Instruments	www.ti.com/sc

IV-2. - ADSL ALLÉGÉ ("LITE")

Une fois la norme ADSL définie, un groupe de fabricants (parmi lesquels Microsoft, Intel et Compaq) ont fondé le groupe de travail UAWG (*Universal ADSL Working Group*). Leur but était de se débarrasser du diviseur côté abonné, considéré jusque là comme indispensable. L'équipement d'un canal ADSL côté central se limiterait ainsi à la terminaison de ligne (SLIC = *Subscriber Line Interface*) et du côté abonné à un modem ADSL et une carte réseau ATM/Ethernet. Le diviseur côté abonné, qui n'est pas précisément bon marché, serait éliminé (figure 6). Ce procédé dénommé aussi 'G.Lite' ou 'Universal ADSL' a été normalisé par l'UIT en tant que *ITU-Standard G992.2*

IV-3- Splitterless ADSL.

Non content de « soustraire » le diviseur de G.Lite, on a encore divisé par 2 le nombre de porteuses (128 au lieu de 256). Le nombre de bits par seconde et de hertz passe donc de 15 à 8 et les configurations QAM sont simplifiées d'autant. Le taux downstream est réduit à environ 1,5 Mbits/s, tandis qu'il est encore possible de faire parvenir 500 kbits upstream. Il est en outre possible de réduire à tel point le niveau de sortie que la puissance absorbée et les impératifs de linéarité des étages d'attaque analogiques s'en trouvent fortement réduits. Cela garantit aussi un fonctionnement sans diviseur dépourvu d'interférences du téléphone analogique (POTS). Enfin, ADSL Lite s'efforce d'atteindre le niveau d'exploitation Category 2 dans lequel upstream et downstream se partagent la gamme inférieure de fréquence ADSL grâce à la compensation d'écho. Cela assure de bonnes conditions de transmission pour toutes les porteuses.

La simplification que cette forme d'ADSL représente pour le client en constitue la motivation. Outre les coûts du diviseur, on peut aussi tirer un trait sur l'alimentation par la prise de l'abonné (embase femelle). Les coûts de montage à domicile du diviseur ADSL et de sa mise en service dispa-

raissent. Les spécialistes font toutefois remarquer que ADSL Lite ne fonctionnera du premier coup que dans la moitié des foyers. Il faudra tout d'abord corriger le câblage domestique de l'autre moitié.

Alors qu'une forte tendance en direction de ADSL Lite se dessine aux Etats-Unis, l'Europe serait plutôt sceptique. La majorité des systèmes ADSL installés ici le seront avec un diviseur côté abonné.

Si l'on suppose qu'une longueur de connexion d'environ 3 km marque la limite d'utilisation de ADSL, il est possible de fournir à 85 % des abonnés ces services de données rapides. Ne pourront être raccordés par ADSL tous les abonnés qui ne disposent pas de leur propre liaison dans le central mais dont les lignes de raccordement sont déjà réunies auparavant par multiplexeurs (systèmes PCM2, PCM4 et AslMx). Il s'agit d'environ 10 % des raccordements téléphoniques en Allemagne.

V- CONCLUSION

ADSL est une nouvelle technologie qui permet de mieux tirer parti des liaisons téléphoniques actuelles. Même si les raccordements ADSL privés ne fournissent tout d'abord que 1,5 Mbits/s downstream, cela signifie quand même un accroissement de la vitesse de 27 par rapport aux modems 56K usuels. Il sera possible de faire son entrée dans la technique ADSL par ce que l'on nomme des modems hybrides capables de traiter aussi bien la norme analogique V90 qu'ADSL. L'adaptation à tout changement des normes restera toujours possible par téléchargement de modules de micrologiciels.

Et quel sera le successeur d'ADSL ? Le VDSL, Very high bit-rate Digital Subscriber Line. Les laboratoires de recherche industrielle travaillent à l'extension du domaine de fréquence vers le haut, donc à l'accroissement du nombre de porteuses. Avec 2000 porteuses, il est possible d'atteindre un débit de 52 Mbits/s downstream et un accroissement de 3,2 Mbits/s de capacité upstream. VDSL nécessiterait des lignes de raccordement encore plus courtes que ADSL, maximum 1,5 km. La solution sera naturellement de passer aux fibres optiques pour couvrir la distance du central aux armoires de distribution qui bordent les voies publiques : expériences commerciales en cours (Palo Alto, USA).

Abréviations

<i>ADC</i>	<i>Analog to Digital Converter: convertisseur A/N</i>
<i>ADSL</i>	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
<i>ATM</i>	<i>Asynchronous Transfer Mode: mode de transfert asynchrone</i>
<i>DAC</i>	<i>Digital to Analog Converter: convertisseur N/A</i>
<i>DSL</i>	<i>Digital Subscriber Line</i>
<i>DSLM</i>	<i>Digital Subscriber Line Multiplexer</i>
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transformation, transformation de Fourier rapide</i>
<i>IFFT</i>	<i>Inverse Fast Fourier Transformation, transformation de Fourier rapide inverse</i>
<i>ISDN</i>	<i>Integrated Services Digital Network</i>
<i>NTBa</i>	<i>Network Termination Base connection</i>
<i>PC</i>	<i>Personal Computer</i>
<i>POTS</i>	<i>Plain Old Telephone Service: Services de téléphone analogique (« bon vieux services téléphoniques »).</i>
<i>QAM</i>	<i>Quadrature Amplitude Modulation: Modulation d'amplitude en quadrature</i>
<i>RX</i>	<i>Receiver: récepteur</i>
<i>TX</i>	<i>Transmitter: émetteur</i>

Références

ANSI-Standard T1 .413
ITU-Standard G992.1 (Annexe B: RNIS +ADSL)
ITU-Standard G992.2 - Splitterless ADSL

Infos sur le Web :

www.dtag.de

www.adsl.com

www.uawg.org

<http://home.flash.net/~gkawano/cs572/>