

Les transmissions et les supports

Un réseau suppose plusieurs équipements informatiques (ordinateurs fixes ou portables, divers équipements électroniques, téléphones, assistants numériques personnels...) situés à distance les uns des autres. La première chose à mettre en œuvre pour constituer le réseau est la transmission des informations d'un équipement à l'autre : on utilise des supports de transmission dont nous présentons les caractéristiques dans les deux premières sections. À chaque nature de support correspond une forme particulière du signal qui s'y propage. Il faut fabriquer les signaux, grâce à l'équipement appelé modem. Les techniques de transmission et l'interface entre ordinateur et modem sont normalisées pour assurer l'interopérabilité des équipements. Enfin, nous décrivons brièvement le raccordement ADSL.

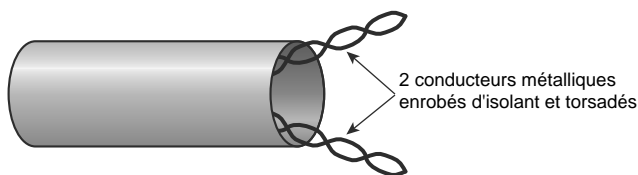
1. Supports de transmission

Les supports de transmission sont nombreux. Parmi ceux-ci, on distingue : les supports métalliques, non métalliques et immatériels. Les supports métalliques, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens et les plus largement utilisés ; ils transportent des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent la lumière, tandis que les supports immatériels des *communications sans fil* propagent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

1.1. Paires torsadées

Une *paire torsadée non blindée* (UTP, *Unshielded Twisted Pair*) se compose de deux conducteurs en cuivre, isolés l'un de l'autre et enroulés de façon hélicoïdale autour de l'axe de symétrie longitudinal (voir figure 1.1).

Figure 1.1
Paire torsadée.



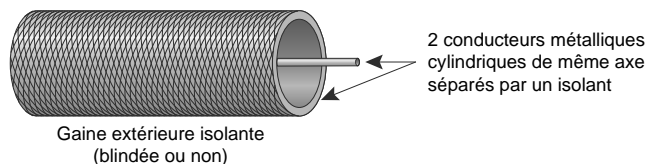
L'enroulement réduit les conséquences des inductions électromagnétiques parasites dues à l'environnement. L'utilisation courante de la paire torsadée est le raccordement des usagers au central téléphonique (la *boucle locale*) ou la desserte des usagers de réseaux privés. Son principal inconvénient est l'affaiblissement des courants, d'autant plus important que le diamètre des conducteurs est faible. Les paires torsadées contiennent, à intervalles réguliers, des *répéteurs* qui régénèrent les signaux. Quand plusieurs paires sont rassemblées dans un même câble, les courants transportés interfèrent les uns avec les autres. Ce phénomène est appelé *diaphonie*.

La paire torsadée suffit pour les réseaux locaux d'entreprise où les distances se limitent à quelques kilomètres. Ses avantages sont nombreux : technique maîtrisée, facilité de connexion et d'ajout de nouveaux équipements, faible coût. Certains constructeurs proposent des *paires torsadées blindées* (STP, *Shielded Twisted Pair*). Enrobées d'un conducteur cylindrique, elles sont mieux protégées des rayonnements électromagnétiques parasites. Une meilleure protection prévoit un blindage par paire.

1.2. Câbles coaxiaux

Pour éviter les perturbations dues aux bruits externes, on utilise deux conducteurs métalliques cylindriques de même axe séparés par un isolant. Le tout forme un *câble coaxial* (voir figure 1.2). Ce câble présente de meilleures performances que la paire torsadée : affaiblissement moindre, transmission de signaux de fréquences plus élevées, etc. La capacité de transmission d'un câble coaxial dépend de sa longueur et des caractéristiques physiques des conducteurs et de l'isolant. Sur 1 km, un débit de plusieurs centaines de Mbit/s peut être atteint. Sur des distances supérieures à 10 km, l'atténuation des signaux réduit considérablement les débits possibles. C'est la raison pour laquelle on utilise désormais les fibres optiques sur les liaisons grandes distances.

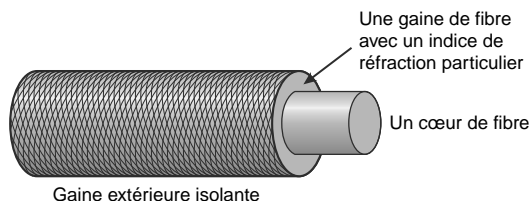
Figure 1.2
Câble coaxial.



1.3. Fibre optique

Une *fibre optique* est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser (voir figure 1.3) et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre.

Figure 1.3
Fibre optique.



Les avantages de la fibre optique sont nombreux : diamètre extérieur de l'ordre de 0,1 mm, poids de quelques grammes au kilomètre. Cette réduction de taille et de poids la rend facile à utiliser. En outre, sa très grande capacité permet la transmission simultanée de nombreux canaux de télévision, de téléphone... Les points de régénération des signaux sont plus éloignés (jusqu'à 200 km), du fait de l'atténuation moindre de la lumière. Enfin, l'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques est un avantage très apprécié, puisqu'une fibre supporte sans difficulté la proximité d'émetteurs radioélectriques. On peut l'utiliser dans des environnements perturbés (avec de puissants champs électromagnétiques, par exemple). Par ailleurs, elle résiste bien aux écarts de température. La fibre optique constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et des réseaux locaux à très haut débit.

Les premières fibres optiques employées dans les télécommunications, apparues sur le marché à partir des années 1970, étaient *multimodes* (à saut d'indice ou à gradient d'indice, selon que l'indice de réfraction de la lumière varie de manière brutale ou progressive entre le cœur et la gaine de la fibre). Ces fibres étaient réservées (et le sont encore) aux débits inférieurs au gigabit par seconde, sur des distances de l'ordre du kilomètre. Plusieurs longueurs d'onde bien choisies se propagent simultanément en de multiples trajets dans le cœur de la fibre. Pour des débits plus élevés et des distances plus longues, la fibre *monomode*, de fabrication plus récente, plus fine, assure la propagation d'une seule longueur d'onde dans son cœur (quelques micromètres de diamètre) et offre donc de meilleures performances.

1.4. Transmissions sans fil

Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'atmosphère ou dans le vide (le terme d'*éther* désigne parfois ce type de support). L'absence de support matériel apporte une certaine souplesse et convient aux applications comme la téléphonie ou les télécommunications mobiles, sans nécessiter la pose coûteuse de câbles.

Faisceaux hertziens

Les *faisceaux hertziens* reposent sur l'utilisation de fréquences très élevées (de 2 GHz à 15 GHz et jusqu'à 40 GHz) et de faisceaux directifs produits par des antennes directionnelles émettant dans une direction donnée. La propagation des ondes est limitée à l'horizon optique ; la transmission se fait entre des stations placées en hauteur, par exemple au sommet d'une colline, pour éviter les obstacles dus aux constructions. Les faisceaux hertziens s'utilisent pour la transmission par satellite, pour celle des chaînes de télévision ou pour constituer des artères de transmission longues distances dans les réseaux téléphoniques.

Ondes radioélectriques

Les *ondes radioélectriques* correspondent à des fréquences comprises entre 10 kHz et 2 GHz. Un émetteur diffuse ces ondes captées par des récepteurs dispersés géographiquement. Contrairement aux faisceaux hertziens, il n'est pas nécessaire d'avoir une visibilité directe entre émetteur et récepteur, car celui-ci utilise l'ensemble des ondes réfléchies et diffractées. En revanche, la qualité de la transmission est moindre car les interférences sont nombreuses et la puissance d'émission est beaucoup plus faible.

Remarque

L'attribution des bandes de fréquences varie selon les pays et fait l'objet d'accords internationaux. Le tableau 1.1 donne les grandes lignes de la répartition des ondes en France. On constate que le découpage est complexe et qu'il reste peu de place pour de nouvelles applications.

Tableau 1.1 : Affectation des fréquences en France

Gamme de fréquences	Type d'utilisation
10 kHz – 150 kHz	Communications radiotélégraphiques
150 kHz – 300 kHz	Radiodiffusion (grandes ondes)
510 kHz – 1 605 kHz	Radiodiffusion (petites ondes)
6 MHz – 20 MHz	Radiodiffusion (ondes courtes)
29,7 MHz – 41 MHz	Radiotéléphonie
47 MHz – 68 MHz	Télévision
68 MHz – 87,5 MHz	Liaisons radio en modulation de fréquence
87,5 MHz – 108 MHz	Radiodiffusion
108 MHz – 162 MHz	Radiotéléphonie
162 MHz – 216 MHz	Télévision
216 MHz – 470 MHz	Radiotéléphonie
470 MHz – 860 MHz	Télévision et radar
860 MHz – 960 MHz	Radiotéléphonie
Autour de 1 800 MHz	Radiotéléphonie
Entre 6 et 30 GHz	Services satellites en fixe

2. Caractéristiques globales des supports de transmission

Quelle que soit la nature du support, le *signal* désigne le courant, la lumière ou l'onde électromagnétique transmis. Certaines caractéristiques des supports (bande passante, sensibilité aux bruits, limites des débits possibles) en perturbent la transmission. Leur connaissance est nécessaire pour fabriquer de « bons » signaux, c'est-à-dire les mieux adaptés aux supports utilisés.

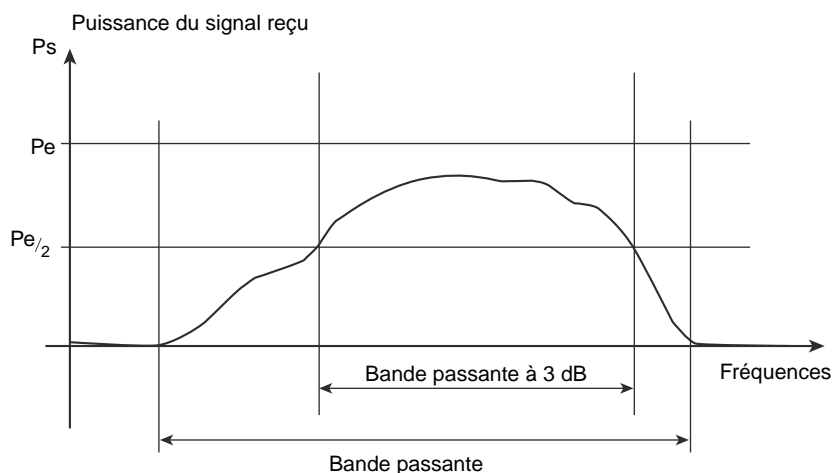
2.1. Bande passante

Les supports ont une *bande passante* limitée. Certains signaux s'y propagent correctement (ils sont affaiblis mais reconnaissables à l'autre extrémité), alors que d'autres ne les traversent pas (ils sont tellement affaiblis ou déformés qu'on ne les reconnaît plus à la sortie). Intuitivement, plus un support a une bande passante large, plus il transporte d'informations par unité de temps.

Définition

La bande passante est la bande de fréquences dans laquelle les signaux appliqués à l'entrée du support de transmission ont une puissance de sortie supérieure à un seuil donné après traversée du support. Le seuil fixé correspond à un rapport déterminé entre la puissance du signal d'entrée et la puissance du signal trouvé à la sortie (voir figure 1.4). En général, on caractérise un support par sa bande passante à 3 dB (décibels), c'est-à-dire par la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la puissance de sortie est, au pire, divisée par deux. Si on note P_s la puissance de sortie et P_e la puissance d'entrée, l'affaiblissement A en décibels est donné par la formule : $A = 10 \times \log_{10} P_s/P_e$; pour $P_s/P_e = 0,5$, on trouve : $10 \times \log_{10} P_s/P_e = 3 \text{ dB}$

Figure 1.4
Notion de bande
passante.

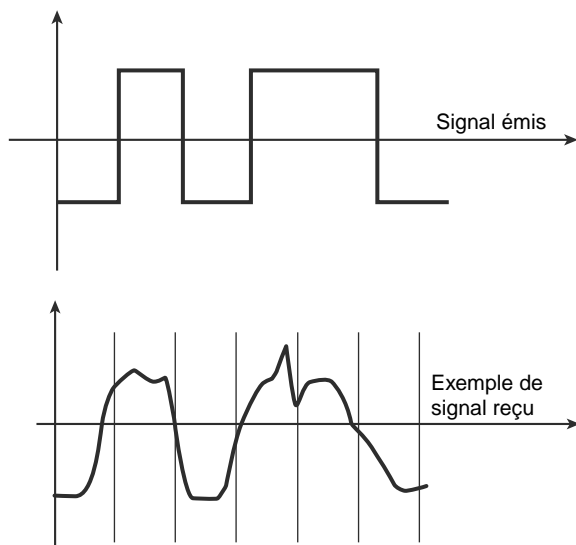


2.2. Bruits et distorsions

Les supports de transmission déforment les signaux qu'ils transportent, même lorsque leurs fréquences sont adaptées, comme l'illustre la figure 1.5. Diverses sources de *bruit* perturbent les signaux : parasites, phénomènes de diaphonie... Certaines perturbations de l'environnement introduisent également des bruits (foudre, orages pour le milieu aérien, champs électromagnétiques dans des ateliers...).

Par ailleurs, les supports affaiblissent et retardent les signaux. La distance est un facteur d'affaiblissement, très important pour les liaisons par satellite. Ces déformations, appelées *distorsions*, sont gênantes pour la bonne reconnaissance des signaux en sortie, d'autant qu'elles varient avec la fréquence et la phase des signaux émis.

Figure 1.5
Signal émis et exemple
de signaux reçus.



Même lorsque les signaux sont adaptés aux supports, on ne peut pas garantir leur réception correcte à 100 %. Le récepteur d'un signal doit prendre une décision dans un laps de temps très court. De ce fait, cette décision peut être mauvaise. Par exemple, un symbole 1 émis donne une décision « symbole 0 reçu », ce qui constitue une *erreur de transmission*. Les fibres optiques sont les meilleurs supports, car le taux d'erreur y est très faible : 10^{-12} (une mauvaise décision pour 10^{12} bits transmis). Les câbles et les supports métalliques présentent des taux d'erreur moyens. Les liaisons sans fil ont un taux d'erreur variable, sensible aux conditions météorologiques.

2.3. Capacité limitée des supports de transmission

La *capacité* d'un support de transmission mesure la quantité d'informations transportée par unité de temps. Les caractéristiques que nous venons de voir font que la capacité d'un support est limitée. Un théorème dû à Shannon¹ exprime, en bits par seconde, la borne maximale de la capacité Cap_{Max} d'un support de transmission :

$$Cap_{Max} = W \times \log_2 (1 + S/B)$$

1. Claude Shannon (1916-2001), mathématicien américain qui a développé la théorie de l'information.

Dans cette formule, W est la largeur de la bande passante du support exprimée en hertz, S/B représente la valeur du rapport entre la puissance du signal (notée S) et la puissance du bruit (notée B) ; la base 2 du logarithme sert à exprimer la quantité d'informations en bits (voir section 4.2).

Exemple

Sur une liaison téléphonique dont la bande passante a une largeur de 3 100 Hz et un rapport S/B correspondant à 32 dB (valeurs courantes), on obtient :

- $10 \log_{10} S/B = 32$, donc $\log_{10} S/B = 3,2$ soit $S/B = 1\,585$;
- $Cap_{Max} = 3\,100 \times \log_2 (1 + 1\,585)$; comme $1\,586 = 2^{10,63}$, $Cap_{Max} = 3\,100 \times 10,63 = 33\,000$ bit/s.

2.4. Qualité des câbles

La qualité d'un câble de paires torsadées est définie par sa *catégorie* : celle-ci correspond à des normes internationales (voir section 6). À titre d'exemple, le câble de catégorie 5 (norme de référence EIA/TIA 568A de 1994) contient quatre paires aux couleurs d'enrobage normalisées (bleu, orange, vert et brun) avec une impédance de 100 Ω d'une longueur de 100 m, supportant une fréquence maximale de 100 MHz, pour un débit inférieur à 1 Gbit/s et des caractéristiques précises de diaphonie (27 dB), de pertes en retour (8 dB) et d'affaiblissement (24 dB par tranche de 90 m).

Un câble de catégorie supérieure, 5e par exemple, supporte jusqu'à 155 MHz avec de meilleures caractéristiques de diaphonie (30 dB) et de pertes en retour (10 dB). Le connecteur de raccordement de ces câbles est la prise *RJ45*. Les normes spécifient aussi le type d'isolation et de blindage utilisé entre les différentes paires du câble.

Les réseaux évoluant vers des débits toujours plus élevés, les instances de normalisation ont travaillé à la définition de standards de câblage plus performants : catégorie 6 (fréquence maximale 250 MHz et débit inférieur à 10 Gbit/s), voire catégorie 7 qui utilise une connectique différente et que l'on réserve aux environnements où les exigences de sécurité et de performances sont très élevées.

Le choix d'un support de transmission dépend de nombreux éléments. Des considérations économiques (le prix de revient, le coût de sa maintenance, etc.) interviennent en plus des facteurs techniques, de même que la nature des signaux propagés, puisque l'équipement de transmission de données contient une partie spécifique au support. Examinons maintenant les techniques de transmission du signal véhiculant les données sur le support.

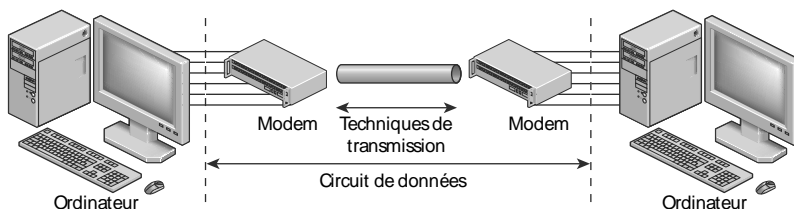
3. Techniques de transmission

Selon les techniques de transmission, un équipement spécifique est placé à chaque extrémité du support : soit un *modem* (modulateur-démodulateur), soit un *codec* (codeur-décodeur). Cet équipement, baptisé *modem* dans la suite, fabrique, avec les données binaires à émettre, un signal dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Inversement, en réception, il extrait la suite des données binaires du signal reçu. Le support et les deux modems placés à ses extrémités constituent le *circuit de données* (voir figure 1.6).

Définition

Le *circuit de données* est une entité capable d'envoyer ou de recevoir une suite de données binaires, à un débit donné, dans un délai donné et avec un taux d'erreur dépendant du support utilisé.

Figure 1.6
Équipements constitutifs d'un circuit de données.



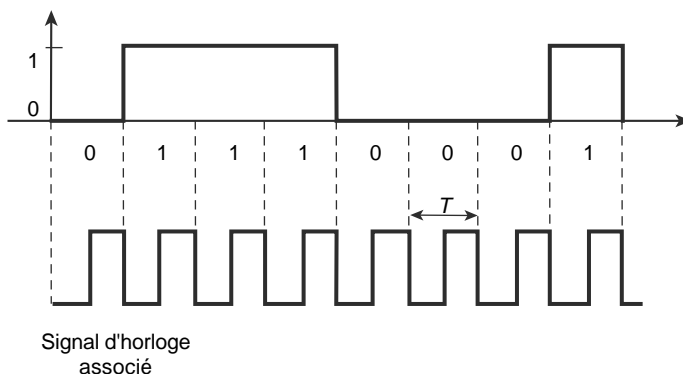
Historiquement, les modems étaient des équipements matériels de taille moyenne puis réduite, mais distincts des ordinateurs terminaux. Aujourd'hui, ils sont souvent intégrés dans une *carte réseau* à l'intérieur de l'ordinateur.

L'équipement émetteur fournit au modem les données à transmettre. Ce dernier les émet sous forme d'un signal à deux valeurs (correspondant à 0 et 1), appelé *message de données synchrone* (voir figure 1.7). En effet, les intervalles de temps alloués à chaque symbole sont égaux et coïncident avec les périodes successives d'une base de temps (ou horloge) indispensable à l'interprétation du message de données par le récepteur.

Remarque

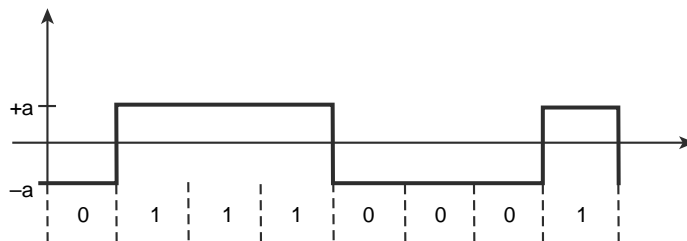
L'utilisation d'un circuit de données dépend de la nature des modems situés aux extrémités du support de transmission. La communication est en mode *duplex intégral* si la transmission simultanée est possible dans les deux sens. Si elle n'est possible que dans un seul sens à un moment donné (transmission à *l'alternat*), le circuit est *semi-duplex*. Enfin, le circuit est *simplex* lorsque la transmission ne se fait que dans un seul sens prédéfini.

Figure 1.7
Message de données synchrone.



Le message de données synchrone utilise une représentation conventionnelle de l'information. La plus habituelle est un signal binaire sans retour à zéro, dit *NRZ (No Return to Zero)*. Comme l'illustre la figure 1.8, on utilise un niveau de tension $+a$ pendant une période complète pour représenter la valeur 1 de 1 bit, et un niveau $-a$ pour sa valeur 0.

Figure 1.8
Représentation d'une
information en NRZ.



Certains supports autorisent une transmission directe des signaux numériques appelée *transmission en bande de base*. Cette technique conduit à des réalisations simples et économiques. Quand les fréquences des signaux ne coïncident pas avec la bande passante du support, des techniques de *modulation* sont indispensables. Nous décrivons succinctement les techniques de transmission en bande de base et par modulation.

3.1. Transmission en bande de base

Dans la transmission en bande de base, l'équipement qui fabrique les signaux est un codec. Il code le message de données synchrone en une suite de signaux compatibles avec les caractéristiques physiques du support (le codec effectue un simple transcodage du signal que lui fournit l'émetteur). Plusieurs facteurs expliquent les difficultés rencontrées dans la *transmission en bande de base* : la limitation de la bande passante – dans les basses comme dans les hautes fréquences – et le fait qu'il faille transférer les données quelle que soit leur valeur. Les longues suites de 0 ou de 1 engendrent des problèmes à la réception.

Remarque

Le codec qui met en œuvre une transmission en bande de base est parfois appelé *modem bande de base* par abus de langage, bien qu'il ne fasse pas de modulation.

Le codec récepteur doit reconstituer le signal d'horloge associé aux données. Pour ce faire, deux techniques de transmission de l'horloge sont envisageables : soit indépendamment du message de données (ce qui consomme une partie de la puissance disponible pour le signal), soit à l'aide des transitions du signal codé (il faut que le signal présente suffisamment de transitions). Dans le cas où les données à transmettre contiennent de longues suites de bits identiques, le signal NRZ reste à la même valeur longtemps, provoquant ainsi une absence de repère temporel pour le codec récepteur, d'où un risque de perte de synchronisation. On ne transmet pas directement le signal en NRZ mais sous une forme voisine, qui tient compte des contraintes précédentes. Le *code biphase* est un exemple très connu de codage pour la transmission en bande de base.

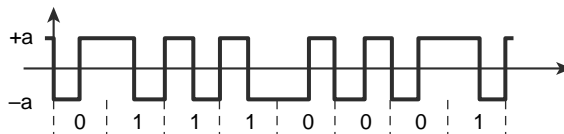
Le code biphase, ou code Manchester (voir figure 1.9), utilise une représentation à deux niveaux : pendant chaque intervalle de temps correspondant à un symbole binaire, deux polarités opposées sont transmises. Selon la donnée à coder, on trouve un front montant (transition vers le haut) ou un front descendant (transition vers le bas) au milieu de l'intervalle de temps significatif. Une transition du signal a lieu à chaque intervalle de temps, ce qui garantit une bonne synchronisation entre les deux codecs et facilite le travail de décision du récepteur.

Remarque

Le code Manchester est le code le plus fréquemment employé dans les transmissions numériques. Il s'utilise en particulier dans les réseaux locaux Ethernet.

Figure 1.9

Code biphase ou Manchester.



3.2. Transmission par modulation

La transmission par modulation consiste à envoyer une onde sinusoïdale appelée *porteuse*. En fonction de la donnée à transmettre, le modem modifie l'un des paramètres de la porteuse (fréquence, phase ou amplitude). Soit $a \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ une porteuse de fréquence f_0 , et $d(t)$ la suite des données binaires à transmettre (le message de données synchrone de la figure 1.7 par exemple). Appelons Δ l'intervalle de temps significatif pendant lequel $d(t)$ vaut 0 ou 1, c'est-à-dire que $d(t)$ est constant sur l'intervalle $[t, t + \Delta[$.

Une modulation *simple* (voir figure 1.10) consiste à modifier la porteuse et à émettre le signal produit pendant l'intervalle Δ (qui dépend du débit binaire utilisé). Sur cet intervalle, la donnée à transmettre peut prendre deux valeurs (0 ou 1), et le signal aura deux valeurs (par exemple, les deux amplitudes $a - k$ et $a + k$).

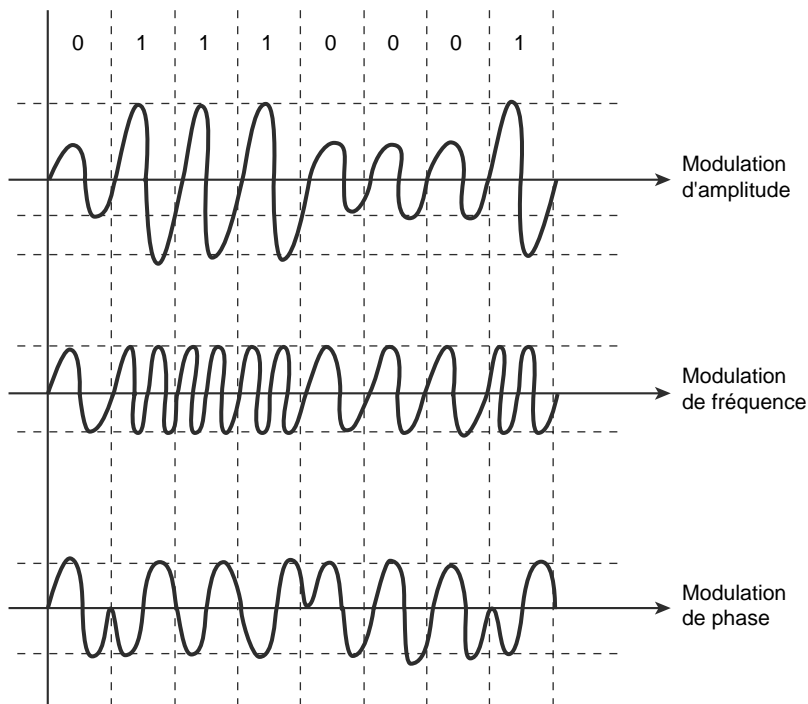
En *modulation d'amplitude simple*, l'amplitude du signal transmis change avec les données. Ainsi, pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le signal transmis vaudra : $m(t) = (a - k) \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ si $d(t) = 0$ et $m(t) = (a + k) \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ si $d(t) = 1$. Dans ces expressions, k est une constante. À la réception, pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le modem mesure l'amplitude du signal reçu et en déduit la valeur de la donnée $d(t)$.

En *modulation de fréquence simple*, la fréquence du signal transmis change avec les données. Ainsi, pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le signal transmis sera : $m(t) = a \cos(2\pi(f_0 - h)t + \phi)$ si $d(t) = 0$ et $m(t) = a \cos(2\pi(f_0 + h)t + \phi)$ si $d(t) = 1$, expressions dans lesquelles h est une constante. Pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le modem mesure la fréquence du signal reçu et en déduit la valeur de $d(t)$.

En *modulation de phase simple*, la phase du signal transmis change avec les données. Ainsi, pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le signal transmis sera : $m(t) = a \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ si $d(t) = 0$ et $m(t) = a \cos(2\pi f_0 t + (\phi + \pi))$ si $d(t) = 1$. Pendant l'intervalle $[t, t + \Delta[$, le modem mesure la phase du signal reçu et en déduit la valeur de $d(t)$.

Pour atteindre des débits élevés, on peut réduire l'intervalle Δ . Si on remplace Δ par $\Delta/3$, l'information $d(t)$ change à chaque intervalle $\Delta/3$, de même que le signal modulé. Le récepteur n'a plus qu'un intervalle $\Delta/3$ pour effectuer ses mesures et prendre sa décision. Cette méthode devient peu fiable si on réduit trop l'intervalle. On préfère découpler l'intervalle de variation des données, désormais noté θ , de l'intervalle de variation du signal modulé, toujours noté Δ ; on parle alors de modulation *complexe*. Par exemple, si θ vaut $\Delta/3$, les données contiennent 3 bits sur un intervalle Δ (soit huit valeurs différentes) : le signal modulé prend, pendant Δ , une valeur parmi les huit possibles. Le nombre de valeurs du signal, noté V , s'appelle la *valence*.

Figure 1.10
Exemples de
modulations
simples.



L'intérêt d'une modulation réside dans le choix de la fréquence f_0 de la porteuse, afin que le signal transmis trouve sa place dans la bande passante du support. Si cette dernière est large, le signal ne l'occupe pas entièrement : il est possible d'y juxtaposer plusieurs autres signaux dont les fréquences de porteuse f_i sont choisies pour éviter les interférences ; cette technique est appelée *multiplexage*. Nous en verrons un premier exemple avec l'ADSL plus loin et nous y reviendrons au chapitre 3. La garantie d'une interopérabilité maximale entre équipements de constructeurs différents repose sur des techniques de transmission *normalisées* à l'échelle internationale (voir section 6).

4. Circuit de données

Nous avons vu que l'introduction d'une distance entre équipements informatiques nécessite un *support de transmission* et que les modems cachent la nature réelle du support à l'utilisateur (pour lequel elle est transparente). Du circuit de données, celui-ci ne connaît que le débit binaire utilisé pour la transmission.

4.1. Qualité du circuit de données

La qualité du circuit de données se mesure selon différents critères techniques :

- Le *taux d'erreurs* est le rapport entre le nombre de bits erronés, sur le nombre total de bits transmis.
- La *disponibilité* évalue la proportion de temps pendant lequel la transmission est possible (absence de panne ou de coupure).

- Le *débit binaire* D représente le nombre de bits transmis par seconde.
- La *rapidité de modulation* R , exprimée en bauds², caractérise le rythme de travail du modem et mesure le nombre d'intervalles significatifs par unité de temps. Si Δ représente la durée en secondes de l'intervalle significatif, alors $R = 1/\Delta$ bauds. La formule $D = R \times \log_2 V$ exprime la relation liant la rapidité de modulation au débit binaire.
- Le *délai de propagation* définit le temps nécessaire au signal pour traverser le support. Par exemple, il faut environ un quart de seconde à un signal se propageant à la vitesse de la lumière pour parcourir une distance de 72 000 km (cas des satellites géostationnaires).

Remarques

1. Pour des modulations simples – des signaux de valence 2 –, chaque intervalle Δ transporte 1 bit. Les valeurs numériques du débit binaire et de la rapidité de modulation sont égales. Dans le langage courant, on ne fait pas la distinction entre ces deux notions : certains expriment même le débit en bauds.
2. Pour un support de transmission, la rapidité de modulation maximale dépend de sa bande passante (critère de Nyquist). La rapidité de modulation maximale R_{max} est égale au double de la fréquence la plus élevée disponible sur le support : $R_{max} = 2F_{max}$.

4.2. Interface ordinateur-modem externe

Depuis bientôt 20 ans, on utilise le port série USB (*Universal Serial Bus*) – dont la version la plus rapide supporte jusqu'à 480 Mbit/s – pour raccorder un modem externe à un ordinateur. Celui-ci permet de brancher ou de débrancher le modem à chaud sans avoir à redémarrer l'ordinateur. Presque tous les appareils (scanners, imprimantes, appareils photo...) sont dotés d'un tel port, ce qui simplifie grandement la connectique. Le port USB contient quatre circuits : un pour l'alimentation, deux pour les données (un par sens de transmission) et une terre de protection. Le dialogue de l'interface se déroule directement sur les circuits de données, par des échanges de messages codés, dans un dialogue totalement contrôlé par l'ordinateur. Cette dernière caractéristique prive le modem d'initiative en cas de réception de données. C'est la raison pour laquelle on préfère désormais relier l'ordinateur au modem externe en considérant que ces deux équipements sont reliés par un réseau filaire ou sans fil. Les réseaux les plus utilisés à cet effet sont Ethernet et Wi-Fi® (que nous détaillons au chapitre 4).

5. ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*)

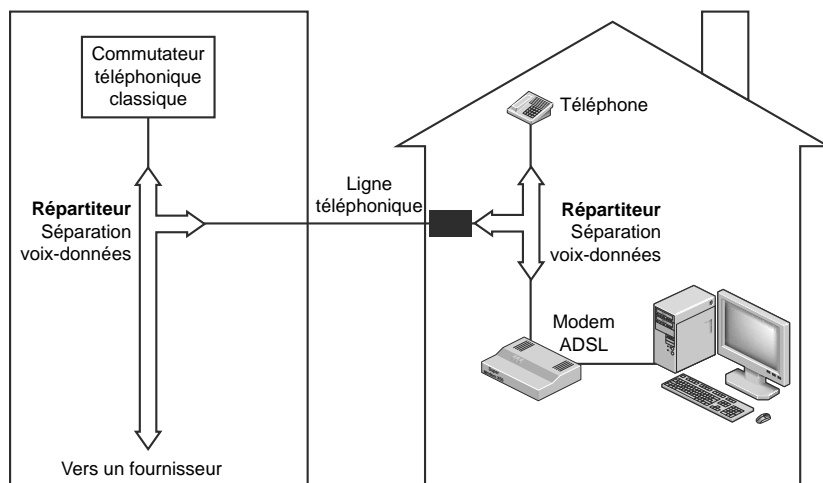
L'ADSL fait partie d'une famille d'accès à haut débit (le nom générique *xDSL* est donné à ces techniques de transmission), qui recourt aux lignes téléphoniques ordinaires comme support de transmission. L'ADSL utilise la *boucle locale* raccordant chaque usager du téléphone au central téléphonique dont il dépend. L'ADSL fait cohabiter, sur la ligne de l'abonné, les données numériques (provenant d'un ordinateur par exemple) et le téléphone vocal. Les deux équipements s'utilisent ainsi simultanément sans interférences.

2. Le mot *baud* vient d'Émile Baudot (1845-1903), ingénieur français.

Une des caractéristiques de l'ADSL tient dans son nom : le débit est différent dans les deux sens de transmission ; le sens le moins rapide possède un débit environ 10 fois inférieur à l'autre sens. Le débit disponible dépend de la longueur et de l'état de la boucle locale. Ces deux facteurs déterminent, à l'initialisation, le débit maximal offert à l'abonné. Au départ, l'ADSL permettait d'émettre jusqu'à 8 Mbit/s dans le sens *descendant* (du fournisseur vers l'utilisateur) et jusqu'à 800 kbit/s dans le sens *montant* (de l'utilisateur vers le fournisseur). Les dernières versions offrent des débits pouvant aller jusqu'à 50 Mbit/s. Les deux débits sont différents car l'ADSL considère que l'utilisateur télécharge beaucoup plus d'informations, en particulier lorsqu'il visite des sites Web, qu'il n'en émet lui-même vers les sites distants.

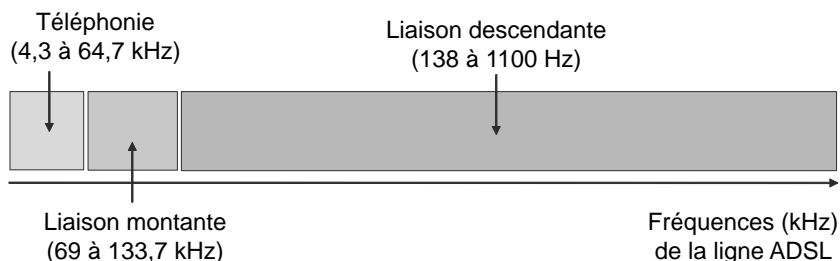
Dans le central téléphonique, les deux types de systèmes coexistent : le réseau de données (le réseau du fournisseur d'accès) vient se greffer sur le réseau téléphonique classique, les deux réseaux utilisant la ligne de l'abonné (voir figure 1.11). Un équipement appelé *répartiteur* (*splitter*) est responsable de l'éclatement et de la recombinaison des deux types de signaux dans le central et chez l'abonné (indispensable chez ce dernier uniquement lorsqu'il se sert d'un téléphone numérique ; il faut séparer les canaux utilisés pour la téléphonie de ceux employés pour la transmission des données). Pour un téléphone analogique, un simple filtre placé devant le téléphone de l'abonné suffit. Il transmet le signal ADSL au modem qui extrait les informations numériques pour l'ordinateur.

Figure 1.11
Raccordement
ADSL.



La transmission des données de l'ADSL utilise une modulation particulière (DMT, *Discrete MultiTone*), spécifiquement adaptée aux caractéristiques physiques des lignes d'abonnés sur une courte distance (généralement moins de 3,5 km) et utilisant des débits différents. Cette modulation combine deux méthodes (modulation d'amplitude et modulation de phase) avec une rapidité de modulation de 4 000 bauds sur chaque porteuse, sachant que la bande passante est subdivisée en 256 canaux sur un accès. Les fréquences les plus basses [4,3 – 64,7 kHz] sont disponibles pour la voie téléphonique classique ; la bande comprise entre 69 et 133,7 kHz sert à la transmission de l'utilisateur vers le réseau (sens montant). Enfin la plus grande partie de la bande [138 – 1 099,7 kHz] est utilisée pour la transmission du réseau vers l'abonné ou sens descendant (voir figure 1.12).

Figure 1.12
Partage de la
bande passante
dans un accès
ADSL.



Chez l'abonné, l'interface entre l'ordinateur et le modem ADSL peut utiliser soit un câble et un port USB, soit un câble et un port Ethernet ou encore une liaison sans fil (Wi-Fi). Si l'utilisateur a contracté un abonnement supportant des communications téléphoniques, des programmes de télévision et des données informatiques (offre *triple play*), le modem est alors intégré dans un boîtier baptisé *box* par les fournisseurs d'accès. Ce boîtier se raccorde au téléphone (prise *RJ11*) et au téléviseur (prise PériTel, par exemple) et possède en plus un port Ethernet ou une liaison sans fil pour les ordinateurs et autres équipements informatiques.

6. Normalisation

Dans des domaines techniques comme les réseaux et les télécommunications, la normalisation répond aussi bien aux attentes des consommateurs qu'aux besoins des fabricants. D'un côté, elle offre aux utilisateurs la garantie que deux produits aux fonctions identiques mais de fabricants différents fonctionneront correctement ensemble. De l'autre, les industriels peuvent espérer toucher un plus grand nombre de clients grâce à la normalisation. En effet, toute solution propriétaire provoque la réticence des utilisateurs et des entreprises à dépendre d'un seul fournisseur pour leur approvisionnement : si certains équipements sont vitaux pour la survie même de l'entreprise, la continuité du service impose de disposer de sources indépendantes d'approvisionnement.

Différents organismes de normalisation édictent des avis qui couvrent tous les aspects d'un équipement : aspects électriques, mécaniques, connectique... Les principaux organismes internationaux de normalisation regroupent des représentants des industriels, des administrations, des utilisateurs : l'ISO³ et l'ITU (International Telecommunications Union)⁴.

On trouve également divers groupements de constructeurs comme : l'ECMA (European Computer Manufacturer), l'EIA (Electronic Industries Association)... Dans Internet, l'IAB (Internet Architecture Board) définit la politique du réseau à long terme alors que l'IETF (Internet Engineering Task Force) s'occupe de l'homogénéité des solutions et publie les RFC (*Request For Comments*).

3. Le nom de l'organisation donnerait lieu à des abréviations différentes selon les langues (IOS pour International Organisation for Standardization, en anglais ; OIN pour Organisation internationale de normalisation, en français...). Il a été décidé d'emblée d'adopter un mot provenant du grec *isos* (égal), pour que la forme abrégée du nom de l'organisation soit toujours ISO.

4. Cette instance a remplacé le CCITT (Comité consultatif international pour le télégraphe et le téléphone) et le CCIR (Comité consultatif international pour les radiocommunications).

Une norme passe par plusieurs étapes : le résultat des compromis entre les différentes parties s'exprime dans un document brouillon (*draft*) ; la forme stable est publiée sous forme de *draft proposal*. Le *Draft International Standard* est la forme quasiment définitive du document. Il constitue une base de travail pour les industriels. Enfin, l'IS (*International Standard*) est la forme définitive. L'organisme considéré publie cette dernière, en utilisant une référence qui dépend de son domaine d'application.

Résumé

Pour relier deux équipements informatiques éloignés l'un de l'autre, on utilise un circuit de données constitué par un support de transmission, des modems et une interface de raccordement quand les modems sont externes.

Les supports de transmission sont très variés (paires métalliques, câbles coaxiaux, fibre optique, sans fil...). La bande passante et le taux d'erreur sont les principales caractéristiques d'un support. À chaque extrémité, des modems (modulateurs-démodulateurs de signaux analogiques) ou des codecs (codeurs-décodeurs de signaux numériques) transmettent des signaux adaptés à la nature du support. Les techniques de transmission de données (en bande de base ou par modulation) adaptent au mieux les signaux aux caractéristiques des supports. Une interface série relie chaque modem à l'équipement informatique qui envoie ou reçoit des données. Les techniques et les interfaces sont normalisées au niveau international.

Le raccordement ADSL des usagers à Internet est un exemple de transmission utilisant la boucle locale téléphonique. Une liaison ADSL met en œuvre une modulation spécifique pour transmettre simultanément voix et données. La connexion avec l'ordinateur utilise soit un port USB, soit un port Ethernet soit une liaison sans fil.

Problèmes et exercices

Exercice 1 : notion de décibel

Dans un environnement urbain, la puissance sonore produite par les nombreuses sources de bruits est évaluée en décibels, en comparant la puissance sonore de la source de bruit à un niveau sonore de référence.

1. Si on évalue la puissance sonore S d'une moto à 87 dB, quelle est, en décibels, la puissance sonore produite par une bande de huit motards roulant sur des motos identiques circulant à la même vitesse ?
2. Déterminez la puissance sonore réellement émise.

Exercice 2 : évaluation d'un rapport signal/bruit (S/B)

Sur un support de transmission, le rapport S/B vaut 400.

1. Quelle est la valeur de ce rapport en décibels ?
2. Même question avec un rapport S/B de 40 000.
3. Quelle est la valeur N en décibels d'un rapport S/B égal à 500 000 ?

Exercice 3 : débit binaire et rapidité de modulation

Soit un signal numérique dont la rapidité de modulation est quatre fois plus faible que le débit binaire.

1. Quelle est la valence du signal ?
2. Si la rapidité de modulation du signal vaut 2 400 bauds, quel est le débit binaire disponible ?

Exercice 4 : signaux transmis en bande de base et par modulation

Soit la suite d'éléments binaires 0 1 1 1 1 1 0.

1. Représentez les signaux transmis lorsqu'on transmet en bande de base avec les codes NRZ et Manchester.
2. Représentez les signaux transmis lorsqu'on transmet les données avec une modulation d'amplitude à deux valeurs, une modulation de phase à deux valeurs, une modulation de fréquence à deux valeurs.
3. Si le débit D est connu, quelle est la rapidité de modulation R ?

Exercice 5 : code Manchester et autres codes

Le code Manchester a l'intérêt de posséder au moins une transition du signal au milieu de l'intervalle pour une bonne synchronisation du récepteur mais il présente trop de transitions, en particulier si la suite de données binaires contient une longue série de 0.

1. Représentez le signal transmis avec le code Manchester pour les données 10000000001.
2. Le code de Miller offre une alternative intéressante. Il consiste, à partir du code Manchester, à supprimer une transition sur deux. Dessinez le signal transmis pour les mêmes données et montrez que le décodage n'est pas ambigu.

Exercice 6 : influence de la phase sur la réception

Dans la pratique, les signaux émis (et *a fortiori* reçus) ne présentent jamais de fronts raides : il y a toujours un temps de montée, un temps pendant lequel le signal est constant ou presque puis un temps de descente. Le récepteur analyse le signal reçu et le compare à une valeur seuil pour décider de la valeur du symbole reçu. Reprenons l'exemple de la figure 1.5. Un symbole 0 est codé par un signal négatif d'amplitude $-a$, un symbole 1 se code par $+a$. La valeur seuil de décision est donc 0.

Supposons qu'à la suite d'un mauvais fonctionnement le codec du récepteur se soit synchronisé avec un retard d'un quart de période d'horloge.

1. Sachant que les données émises sont 010110, quelles sont les données décodées par le récepteur ?
2. Quelles sont les conséquences de ce déphasage pour le récepteur ?

Exercice 7 : formule de Shannon

Sans compression de données, une transmission de voix numérisée nécessite un débit binaire de 64 kbit/s.

1. En supposant que la transmission se fasse par des signaux modulés de valence 32, quelle est la bande passante disponible, sachant que celle-ci est égale à la moitié de la rapidité de modulation utilisée ?
2. Quel doit être le rapport S/B de la ligne de transmission offrant un débit binaire de 64 kbit/s et possédant une largeur de bande trouvée dans la question précédente ? On exprimera cette valeur en vraie grandeur et en décibels.

Exercice 8 : caractéristiques de ligne et téléchargement

Pour vous connecter à Internet, vous avez relié votre ordinateur portable grâce à un modem de type PCMCIA, raccordé à la ligne téléphonique de votre lieu de vacances. On suppose que votre modem a un débit maximal de 56 kbit/s et que la ligne téléphonique possède une bande passante comprise entre 300 et 3 400 Hz. Pendant votre connexion, vous constatez que la vitesse de transfert des données effective est 6 200 octet/s.

1. Si la vitesse constatée ne provient que d'un mauvais rapport S/B de la ligne, quelle est la valeur de ce rapport durant votre connexion ?
2. La vitesse de transmission est maintenant de 24 800 bit/s. Si la rapidité de modulation est de 4 800 bauds, quelle est la valence du signal modulé ?
3. On suppose que la ligne téléphonique répond au critère de Nyquist et que la rapidité de modulation vaut 4 800 bauds. Si on utilise la rapidité de modulation maximale, quelle est la bande passante du support ?
4. Supposons que le débit binaire indiqué reste constant et égal à 49 600 bit/s pendant toute la durée de la connexion. Combien de temps devrez-vous rester connecté pour télécharger un fichier de 2 Mo (on pourra prendre ici 1 Mo = 10^6 octets) sur votre portable ?
5. Vous utilisez désormais une connexion à 10 Mbit/s. Combien de temps resterez-vous connecté pour télécharger le même fichier ?

Exercice 9 : système de radiomessagerie

Un système de radiomessagerie de poche (un *pager*) répondant à la norme ERMES (*European Radio Message System*) présente les caractéristiques techniques suivantes :

- bande de fréquences : 169,425 MHz – 169,800 MHz ;
- modulation de fréquence à quatre états ;
- rapidité de modulation : 3 125 bauds ;
- rapport S/B d'un récepteur : 76 dB.

1. Quel est le débit binaire réellement utilisé dans cette radiomessagerie ?
2. En supposant qu'on transmette 1 octet par caractère, combien de temps faut-il pour transmettre un message de 200 caractères sur un récepteur de radiomessagerie ?
3. Au lieu du débit binaire trouvé à la question 1, quel débit binaire pourrait-on théoriquement obtenir en exploitant au mieux les caractéristiques techniques de la radiomessagerie ?
4. Pourquoi n'est-ce pas utilisé ?

Exercice 10 : principes de fonctionnement de l'ADSL

Dans la modulation DMT, la plage des fréquences disponible sur la boucle locale est divisée en 256 canaux juxtaposés de 4 312,5 Hz chacun. Le canal 0 est utilisé pour le téléphone vocal, et les canaux 1 à 5 ne sont pas exploités pour éviter les interférences entre la voix et les données. Parmi les canaux restants, deux sont réservés au contrôle des flux montant et descendant, le reste est utilisé pour les données.

1. Combien reste-t-il de canaux à utiliser pour le transfert des données dans les deux sens en modulation DMT ?
2. De quoi dépend le nombre de canaux à affecter aux données de chaque sens ? Qui se charge de l'affectation des canaux ?
3. Que faudrait-il faire pour que les flux montant et descendant aient des débits identiques ?
4. L'utilisation la plus courante en ADSL consiste à réserver 32 canaux pour le flux montant et les canaux restants pour le flux descendant. Quel est le débit théorique que l'on peut obtenir pour le flux montant si l'on transmet des signaux binaires sur chaque canal ?
5. Même question pour le flux descendant.
6. Une autre technique de modulation utilise, pour le flux descendant, une rapidité de modulation de 4 000 bauds et émet 15 bits par signal transmis sur 224 canaux. Quel débit binaire peut-on obtenir avec cette technique ?