

Chapitre 1

Éléments de base de la téléinformatique

En composant un numéro sur les touches d'un téléphone ou d'un clavier de terminal, une personne résidant à Montréal peut rejoindre en quelques secondes un correspondant au Japon ou en Nouvelle-Zélande. Celui-ci peut, à son tour, consulter la Bourse de New York ou faire parvenir par télécopie un message (texte, schéma ou autre) à un interlocuteur éloigné, dans un temps tout aussi réduit. La plupart des étrangers de passage dans une ville ou un village retirent sans problème et instantanément de l'argent, grâce au guichet électronique, quel que soit l'emplacement de leur propre banque. Des virements énormes sont effectués en quelques secondes entre des banques situées aux antipodes l'une de l'autre. Un Français peut régler ses factures grâce à une carte à puce qui débite automatiquement son compte du montant requis. Une personne handicapée, pour quelque raison que ce soit, peut être maintenue à domicile grâce à une surveillance électronique efficace, mais invisible. Des groupes d'écoliers peuvent échanger des textes, en direct ou en différé, d'un bord à l'autre de l'Atlantique.

Qu'il s'agisse de recherche d'informations, de communication, de transaction ou de télé-surveillance, ces activités¹ sont rendues possibles grâce à des réseaux de communication d'une très grande complexité, mais dont les éléments de base sont relativement simples : ils reposent essentiellement sur l'utilisation de signaux recourant à l'énergie électromagnétique (courant électrique, onde radio, fibre optique) pour transporter les messages qui constituent les échanges évoqués plus haut.

Avant d'étudier les réseaux et les systèmes complexes qui rendent possible la communication à distance entre ordinateurs ou entre ordinateurs et terminaux (avec leurs équipements périphériques : imprimantes ou autres), et qui permettent les activités mentionnées plus haut, il importe de comprendre les notions simples sur lesquelles tout le reste de l'édifice repose. Ces éléments de base ne sont pas tous propres à la seule téléinformatique, plusieurs supportent le fonctionnement de n'importe quel moyen de communication moderne (radio, télévision, téléphone, etc.). C'est pourquoi, que vous soyez expert en informatique ou non, certaines des notions présentées ici pourront vous paraître familières, sans que vous sachiez peut-être exactement ce qu'elles recouvrent telles les appellations AM ou FM.

L'univers des communications contemporaines est bicéphale : analogique et numérique. Le système téléphonique, qui est encore le principal support de communication à travers le monde, est né analogique. Le télex, apparu à peu près à la même époque et après le système télégraphique, a par contre toujours été numérique. Le développement, beaucoup plus tard, de la téléinformatique s'est heurté à la nécessité de faire travailler ensemble deux modes de communication au départ apparemment incompatibles. Même si, au tournant du XXI^e siècle, le téléphone sera sans doute devenu totalement numérique, la situation de transition que nous vivons actuellement permet de retrouver les deux modes. Ceci appelle des conversions et oblige celui qui veut comprendre ce dont on lui parle,

lorsqu'on parle d'équipement, de réseau ou de logiciel, à se familiariser au moins avec les grandes notions de base qui caractérisent ces deux modes de notation et de transfert des données. C'est pourquoi, tant à propos des données que des signaux ou des transmissions, nous ferons appel à la double face des communications : analogique et numérique².

Par ailleurs, il faut saisir dès le départ, et toute personne intéressée à se doter d'un système le comprendra aisément, en quoi consistent les enjeux de la téléinformatique : il s'agit non seulement de permettre la communication entre ordinateurs, mais encore de la réaliser dans une perspective d'optimisation des ressources de l'informatique et des télécommunications.

Dans ce chapitre, la plupart des notions abordées seront plutôt propres aux télécommunications qu'à l'informatique *stricto sensu*. C'est en effet ce qui constitue l'armature de base de la communication électronique.

Voici les concepts importants abordés dans ce chapitre :

- les données et l'information
- le codage de l'information
- le signal
- la transmission de données
- le système de transmission de données
- la liaison de données
- la transmission en bande de base
- la modulation
- les supports de transmission de données

1.1 DONNÉES, INFORMATION ET CODAGE

1.1.1 Données et information

Éléments de la communication électronique

S'il est nécessaire que nous indiquions, d'entrée de jeu, le sens que nous attribuons à chacun des termes « donnée » et « information » dans le contexte de la téléinformatique, il importe aussi de remarquer que l'emploi de l'un ou de l'autre, dans une situation donnée, n'est pas toujours exclusif. Nous entendrons néanmoins par

- *donnée* : la représentation de faits, concepts ou instructions, effectuée d'une manière formalisée, convenable pour la communication, l'interprétation ou le traitement par des moyens automatiques ou autres;
- *information* : la signification qu'un humain ou un système attribuent à une donnée, à partir des conventions appliquées à celle-ci (codage).

Les données sont les éléments constitutifs des messages, elles représentent aussi bien ce que les correspondants veulent dire (message au sens courant du terme), que ce qu'il faut que le système sache pour pouvoir les transporter (message au sens téléinformatique du terme).

Les données peuvent être aussi élémentaires que les symboles binaires 1 et 0, ou aussi complexes que les caractères d'un clavier de machine à écrire. Dans tous les cas, la fonction des données est de représenter l'information.

De façon à ce qu'il n'y ait pas de malentendu, il importe de préciser le type d'information qui nous retiendra dans ce qui va suivre. En effet, nous n'aborderons jamais une quelconque étude du contenu des échanges entre deux usagers : ce dont ils parlent. C'est pourtant ce que l'on appellerait couramment l'information. Nous nous contenterons ici d'examiner la manière dont ces échanges peuvent être effectués, c'est-à-dire traités et transférés, dans le contexte des moyens de télécommunication recourant à l'informatique. Est-ce à dire que nous chassons l'information de ce manuel? Certes non. Il faut en effet remarquer que, même en ne considérant que les opérations correspondant à la situation de communication, les données véhiculent encore des informations, même si celles-ci sont alors à caractère essentiellement fonctionnel, puisque leur rôle est d'indiquer comment effectuer le traitement et le transfert des données.

Analogique et numérique : la double face des communications

En téléinformatique, on distingue deux types de données :

- les *données analogiques*, dont la forme offre une certaine ressemblance avec ce qu'elle représente; on utilise souvent la représentation acoustique de la voix humaine (lorsqu'elle n'est pas traitée par ordinateur) comme exemple de ce type de données;
- les *données numériques*, qui sont obtenues après un codage formel et mathématique – que l'on appelle aussi logique – de matériaux bruts (textes, images, voix, etc.)³; on peut également les obtenir directement par programmation; l'ordinateur manipule des messages ainsi codés.

Unités fonctionnelles de la communication électronique

Le terme *donnée* est générique, il ne fournit aucune précision sur le type d'unité par rapport au système téléinformatique. Nous envisagerons ici les types d'unités rencontrés dans le cas des données numériques, celles que traitent les ordinateurs.

L'unité de base en informatique est le bit. L'unité fonctionnelle dans les messages codés est le mot. Ce terme désigne un ensemble d'éléments binaires (bits) manipulés comme un tout par l'ordinateur.

Un ensemble de bits ou de mots est pour sa part appelé bloc. Dans un contexte de transmission, le bloc est une quantité d'informations traitée comme un tout par le système de protection contre les erreurs.

Enfin, en téléinformatique, le message est, sur le plan formel, un ensemble de données nécessaires à la mise en œuvre d'un traitement. Un message peut comprendre plusieurs blocs, et sa longueur est essentiellement variable.

1.1.2 Codage de l'information

L'opération de codage consiste à attribuer une valeur à des unités, en fonction d'une convention établie entre les pôles communicants.

Le *codage logique* (codage formel et mathématique) est une opération qui permet de représenter les données par des symboles, en attribuant à ces derniers une valeur signalétique ou conceptuelle. Les données ainsi représentées permettent au destinataire du message, lors du décodage, de déduire l'information de ces symboles, dans la mesure où il connaît le code. L'avantage de tout codage est qu'il permet une communication généralement rapide, efficace et compréhensible, entre tous ceux à qui le message est destiné, et seulement ceux-ci.

Les données analogiques sont caractérisées par l'absence de codage formel par l'émetteur, le receveur ou le transporteur. Cela ne veut pas dire pour autant qu'elles ne font l'objet d'aucun codage. Par exemple, la voix d'une diva indique autre chose à l'auditeur que celle d'un encanteur. Mais le type de codage dont il s'agit ici est d'un tout autre ordre, il a un caractère linguistique, social, culturel ou fonctionnel, généralement moins formel et non traitable directement par l'ordinateur.

Codage binaire

La plupart du temps, les ordinateurs et les terminaux manipulent les informations en tant que signaux binaires⁴. Il est donc nécessaire que le système code ainsi les messages que l'on veut représenter et transmettre.

Le codage binaire n'utilise que deux symboles⁵ : 1 et 0. Le nombre de suites binaires distinctes de n bits que l'on peut former est de 2^n . Il est ainsi possible d'obtenir 256 suites distinctes, c'est-à-dire 2^8 suites, avec un octet⁶.

Ces suites binaires correspondent aux caractères d'un alphabet, qui regroupe généralement :

- les lettres majuscules;
- les lettres minuscules;
- les chiffres;
- des caractères graphiques de ponctuation ou d'opération;
- des caractères spéciaux.

Différents codes

L'opération qui consiste à associer une suite binaire (et une seule), appelée mot de code, à chaque caractère de l'alphabet est appelée *codage*. L'ensemble des mots de code constitue le code. Les codes les plus connus sont :

- le code Baudot;
- le code DCB;
- le code ASCII;
- le code EBCDIC.

Nous ne soulignerons ici que les principes de base et les caractéristiques essentielles de ces codes.

Le code Baudot

Le code Baudot, encore appelé code télégraphique à 5 moments, ou code CCITT⁷ n° 2, est un code à 5 bits qui ne permet que 2^5 combinaisons, c'est-à-dire 32. Il a été conçu pour le réseau télégraphique commuté ou télex, et il est universellement employé à cette fin. Il n'est par contre guère adapté au traitement direct par un ordinateur.

Le code DCB

Le code DCB (décimal codé binaire) est un code à 6 bits, auxquels est ajouté un bit de redondance destiné au contrôle de parité. La figure 1.1 illustre le format d'un caractère de ce code.

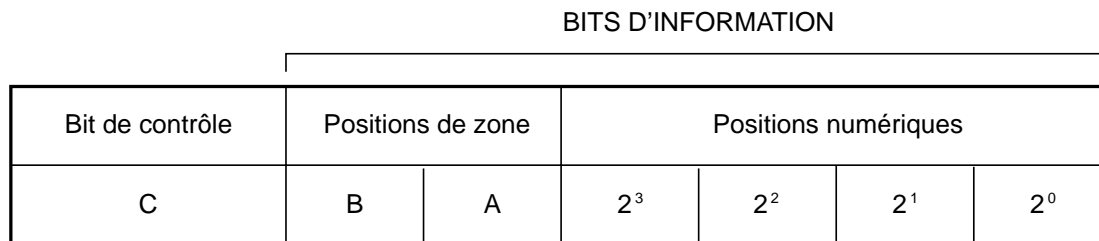


FIGURE 1.1

Format d'un caractère en code DCB.

Dans cette figure, A et B sont des bits d'information de poids respectifs 4 et 5, alors que C est un bit de contrôle, indépendant du code⁸. Le nombre de caractères distincts de ce code est 2^6 , soit 64 caractères.

Le code ASCII

Le code ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), également appelé alphabet international n° 5, code CCITT n° 5, ou encore code ISO⁹, est un code à 7 bits plus un bit de contrôle de parité. Le nombre de caractères potentiels de ce code est donc de 2^7 , soit 128 caractères. Il est très utilisé en téléinformatique.

Le code EBCDIC

Le code EBCDIC (*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*) est un code à 8 bits d'information, sans élément binaire de parité. Il a un potentiel de 2^8 caractères, c'est-à-dire 256 caractères, et il est aussi utilisé en téléinformatique.

1.2 SIGNAL

Les données sont les éléments véhiculés par les systèmes de communication. Le signal est la forme physique sous laquelle les données sont transmises.

La propagation et le traitement des signaux permettent la transmission de données, donc la communication d'informations, objectif de tout système téléinformatique.

Le phénomène physique que représente le signal est de nature électromagnétique. Quel que soit le type de média utilisé, les communications modernes font toutes appel à l'utilisation de signaux inclus dans le spectre électromagnétique (signaux électriques, radio ou lumineux, par exemple).

Nous tenterons de concrétiser la notion de signal en prenant pour exemple la voix (du moins tant qu'elle n'est pas traitée par un synthétiseur), dans le cas d'une communication téléphonique.

Au départ, disons que la voix nous parvient normalement sous la forme d'une onde sonore qui vient frapper l'oreille (signal acoustique), puis circule dans le nerf auditif sous la forme d'une nouvelle onde (signal électrique), jusqu'au cerveau qui la décode en attribuant une signification aux différents sons perçus. Avant de parvenir à son destinataire, l'onde sonore peut déjà avoir été convertie en onde électrique¹⁰, comme on le constate dans le cas de la communication téléphonique traditionnelle ou encore dans celui de la radio ou de la télévision. L'onde électrique est ensuite transmise par l'intermédiaire d'amplificateurs, de fils, etc., puis reconvertie en onde sonore (signal acoustique) à la réception¹¹. La forme de représentation des signaux électriques ou acoustiques la plus connue est offerte par la courbe sinusoïdale¹², en forme de vague.

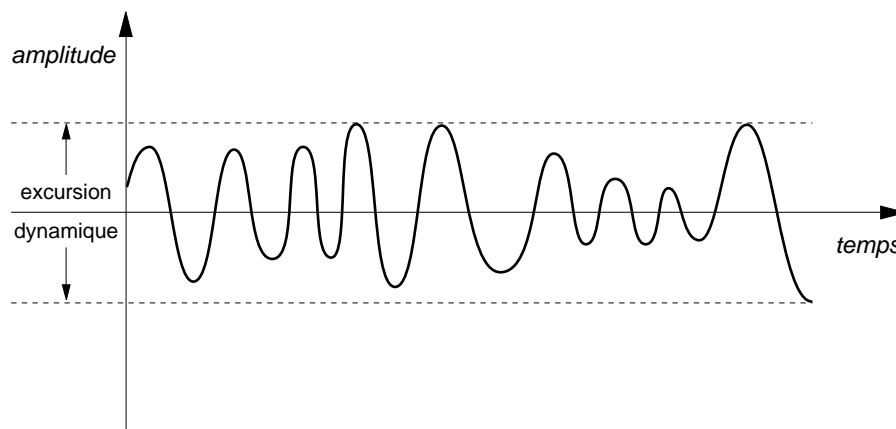


FIGURE 1.2

Représentation du signal vocal (onde physique de type acoustique).

Dans la communication téléphonique, l'onde sonore correspond à des compressions d'air qui provoquent des variations de pression acoustique à la surface du microphone. Celui-ci les change en oscillations électriques sinusoïdales proportionnelles. À la réception, le haut-parleur transforme, pour sa part, ces ondes électriques en vibrations qui amènent à nouveau des compressions d'air (parfois observables au niveau de la membrane dans le cas d'une chaîne de son), c'est-à-dire un signal acoustique perceptible par le tympan. Le schéma de la figure 1.3 illustre ces variations du signal dans le cas de la communication téléphonique.

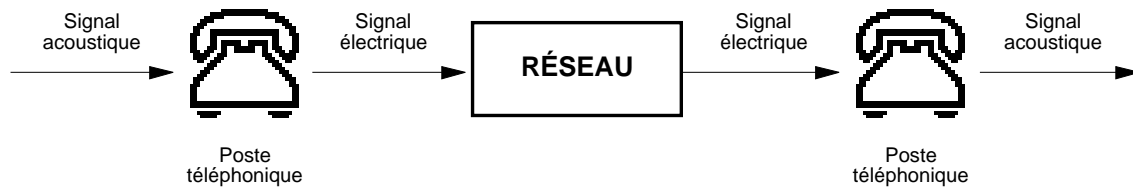
**FIGURE 1.3**

Schéma d'une communication téléphonique.

1.2.1 Signal analogique et signal numérique

Les signaux, comme les données, peuvent être analogiques ou numériques. Le signal analogique est continu et le signal numérique est discontinu.

L'un comme l'autre peuvent véhiculer des données analogiques ou numériques. Cependant, avant que les données analogiques puissent être véhiculées par un signal numérique, elles doivent être brisées en unités discrètes. C'est ce qui se passe pour la communication de messages vocaux naturels par un poste et un système téléphoniques numérisés. De la même façon, si l'on doit utiliser un signal analogique pour transmettre des données numériques, les unités discrètes des données numériques devront être prises en charge par un signal porteur continu. C'est ce qui se passe dans le cas où l'on utilise, grâce à un modem, un réseau téléphonique analogique pour le transfert de données à partir d'un ordinateur.

Le *signal analogique* se caractérise par l'absence de transformation logique sur la forme du signal physique véhiculant le message. On parle de signal analogique quand les données émises par une source d'énergie (sonore, visuelle ou mécanique) nous parviennent sous la forme d'une onde dont les variations :

- sont continues dans le temps,
- reproduisent la forme du signal original émis (ou lui sont analogues).

Plus précisément, on dit encore d'un signal qu'il est analogique lorsque sa représentation temporelle utilise une fonction continue, prenant des valeurs uniques à chaque instant. Un tel signal n'admet ni coupures ni discontinuités. Il correspond à des ondes électromagnétiques variant de façon continue.

Dans le cas du *signal numérique*, par contre, le signal physique est traité et transformé en une suite de symboles, qui est généralement binaire. Les variations du signal numérique sont discontinues dans le temps. On représente souvent le signal numérique sous la forme d'une « onde carrée »¹³, comme l'illustre le schéma de la figure 1.4.

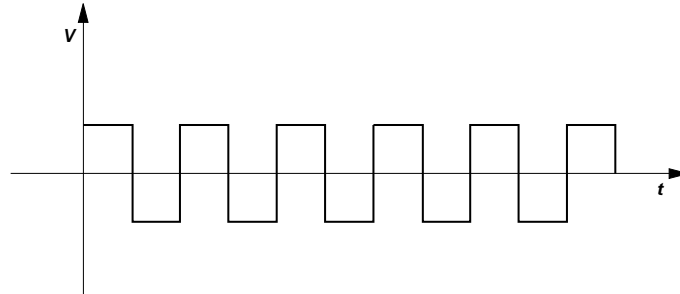


FIGURE 1.4

Exemple d'onde carrée.

Le signal numérique, sous la forme d'une onde carrée, est une modélisation logique à caractère abstrait¹⁴ de l'onde physique. L'onde carrée est due à une suite d'impulsions codées, qui correspond généralement à deux positions du signal physique. On peut procéder, pour la provoquer, par brusques variations de la tension électrique ou voltage. Ces impulsions discontinues sont créées pour signifier, au niveau symbolique, le passage du 0 au 1 (par exemple : +5 volts pour 1, -5 volts pour 0; ou encore : allumé pour 1, éteint pour 0, etc.). La forme de l'onde carrée obéit à des conventions de codage comme celles de ce dernier exemple, ainsi qu'à certaines règles correspondant à l'organisation ordonnée des éléments les uns par rapport aux autres.

Un signal numérique est celui dont l'onde correspondante est représentée mathématiquement par une fonction discrète, prenant ses valeurs par intervalle de temps. Le signal numérique correspond toujours à un nombre fini de valeurs. Dans la figure 1.5, ces valeurs sont des impulsions de voltage, dont la séquence permet la transmission de données numériques qui véhiculent l'information correspondant au codage 1001.

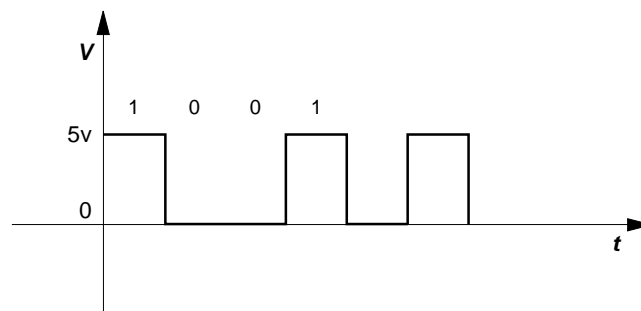


FIGURE 1.5

Signal numérique véhiculant les données numériques 1001.

Les signaux numériques présentent plusieurs avantages par rapport aux signaux analogiques. Ils peuvent être transmis sur un équipement moins coûteux, entre autres parce qu'ils occupent moins de place dans la largeur de bande. Ils sont par ailleurs moins sujets aux erreurs. Dans un signal analogique, des déviations d'amplitude ou de fréquence peuvent facilement survenir et sont, par exemple, fonction de la distance que le signal doit parcourir. De telles déviations, même minimales, ont pour effet de modifier la forme du signal et donc d'influer sur la transmission du message. Dans une transmission numérique, la reconnaissance des unités binaires (1 ou 0) est beaucoup plus difficilement touchée par les bruits possibles. Enfin, les signaux binaires composés d'unités discrètes, variant sur deux valeurs seulement, sont plus aisément contrôlables.

1.2.2 Périodicité des signaux

On peut classer les signaux selon leur périodicité :

- les *signaux périodiques* correspondent à ceux que nous étudierons ici et qui sont utilisés dans le transfert des données : ce sont des signaux fondés sur une unité de temps, et qui entretiennent par rapport à celle-ci certains types de régularité;
- les *signaux apériodiques* ne répondent, par contre, à aucun principe de régularité par rapport à une unité de temps. La figure 1.6 en donne une illustration.

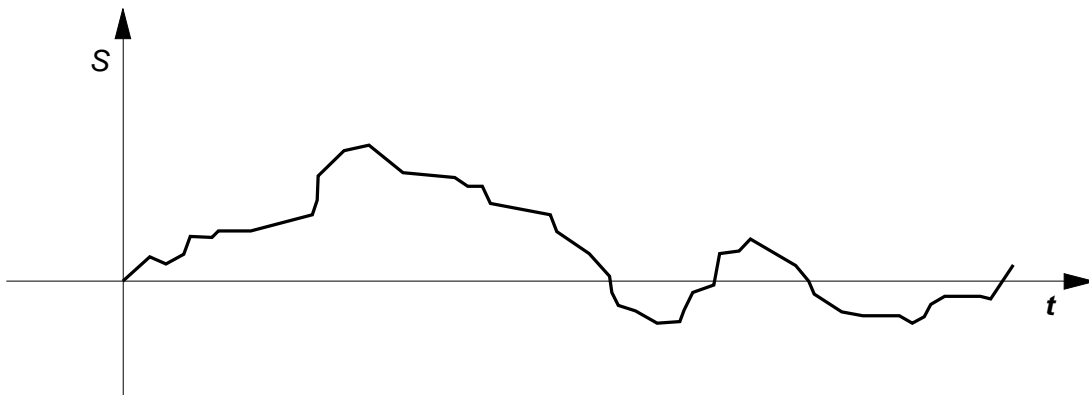


FIGURE 1.6
Signal apériodique

1.2.3 Caractéristiques du signal

Dans le contexte de la téléinformatique, un signal est caractérisé par trois attributs fondamentaux :

- la fréquence
- l'amplitude
- la phase

Fréquence

Les signaux électromagnétiques qui véhiculent les données sont des oscillations de type ondulatoire; ils peuvent être décrits en fonction de la longueur d'onde (distance entre les crêtes de chaque ondulation ou vague) ou en fonction de la fréquence (nombre de vagues par seconde).

On définit la fréquence d'un signal par le nombre de répétitions ou d'apparitions de ce signal dans un intervalle de temps donné¹⁵. La fréquence d'un signal électromagnétique s'exprime en cycles par seconde (cps) ou en hertz (Hz).

Qu'est-ce qu'un cycle?

Les signaux électromagnétiques sont des mouvements (ou oscillations) dont la représentation la plus courante est une sinusoïde (forme ondulatoire). Le cycle correspond à une période, équivalant à 360° , effectuée en une unité de temps, comme on le voit dans la figure 1.7¹⁶.

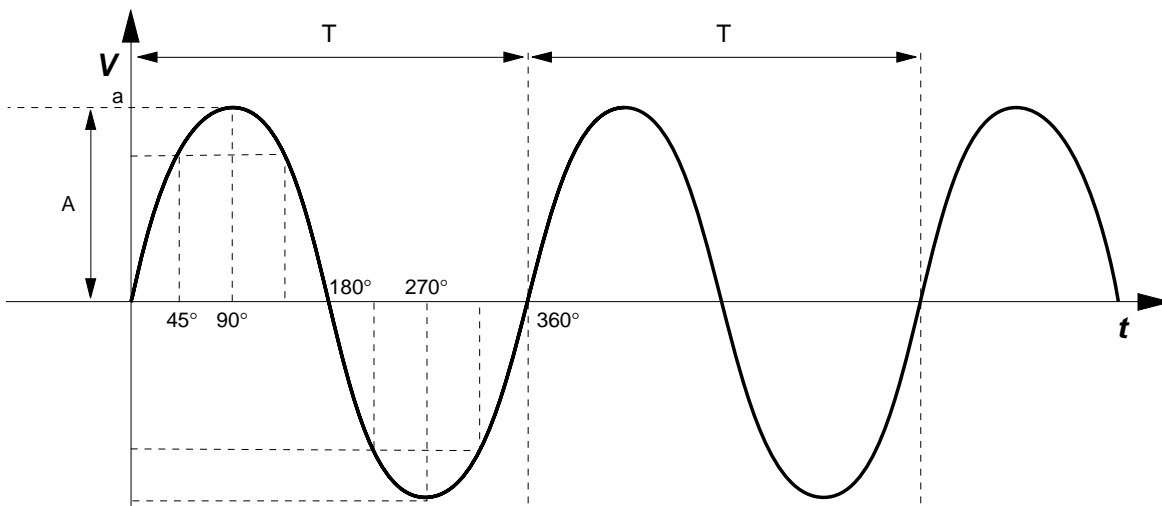
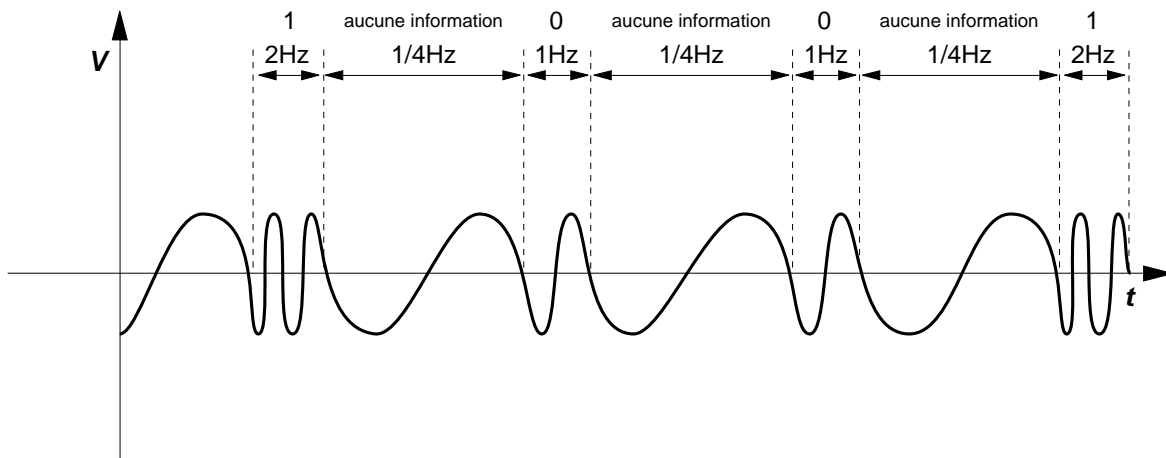


FIGURE 1.7

Représentation d'un cycle.

Jusqu'ici, nous avons surtout illustré la représentation des signaux par celle de données analogiques comme la voix. La représentation graphique de la notion de cycle, telle qu'on la voit à la figure 1.8, montre que des variations de fréquence permettent aussi bien de représenter une information codée sous forme binaire (données numériques) que des données analogiques. Il s'agit ici d'une information dont le code binaire est 1001. Le codage adopté associe au symbole 0 une fréquence de 1 Hz et au symbole 1 une fréquence de 2 Hz

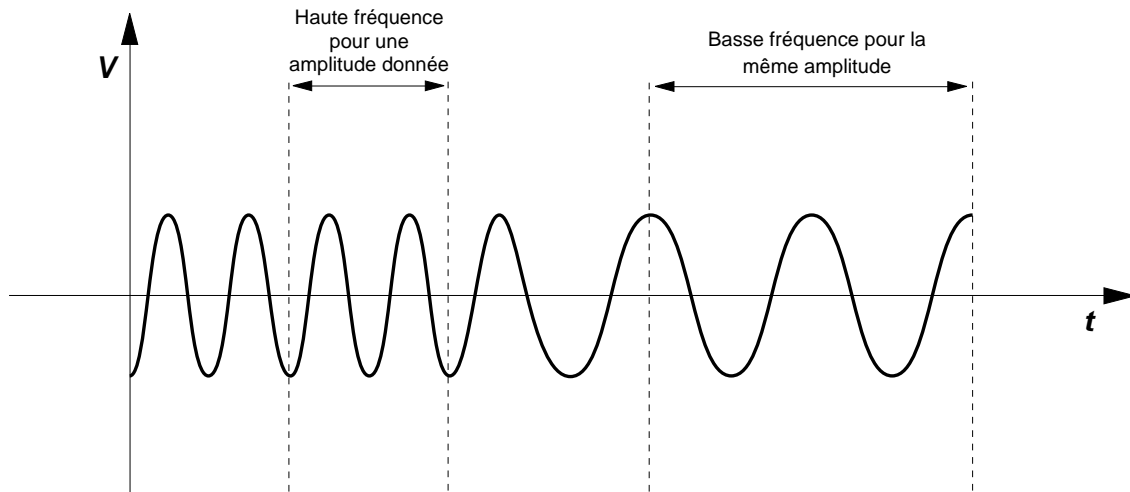
**FIGURE 1.8****Codage par variation de fréquence.**

On peut interpréter de la manière suivante la figure 1.8:

- la première portion du message, c'est-à-dire 1, correspond à une fréquence de 2 Hz (2 cycles par seconde);
- une onde de très basse fréquence ($\frac{1}{4}$ Hz ou 1 cycle par 4 secondes) est ensuite émise, qui ne correspond à aucun des deux éléments de code retenus et qui sera donc décodée par le récepteur comme n'apportant aucune information;
- une fréquence de 1 Hz est émise (1 cycle par seconde), qui sera décodée comme représentant l'information 0;
- à nouveau suit une fréquence de $\frac{1}{4}$ Hz n'apportant aucune information;
- et ainsi de suite jusqu'à ce que soit complétée la transmission de l'ensemble de l'information 1001.

Relation entre la fréquence et la longueur d'onde

La figure 1.9 permet de constater qu'à une fréquence élevée correspond une petite longueur d'onde, et réciproquement.

**FIGURE 1.9**

Variation de fréquence pour une même excursion dynamique.

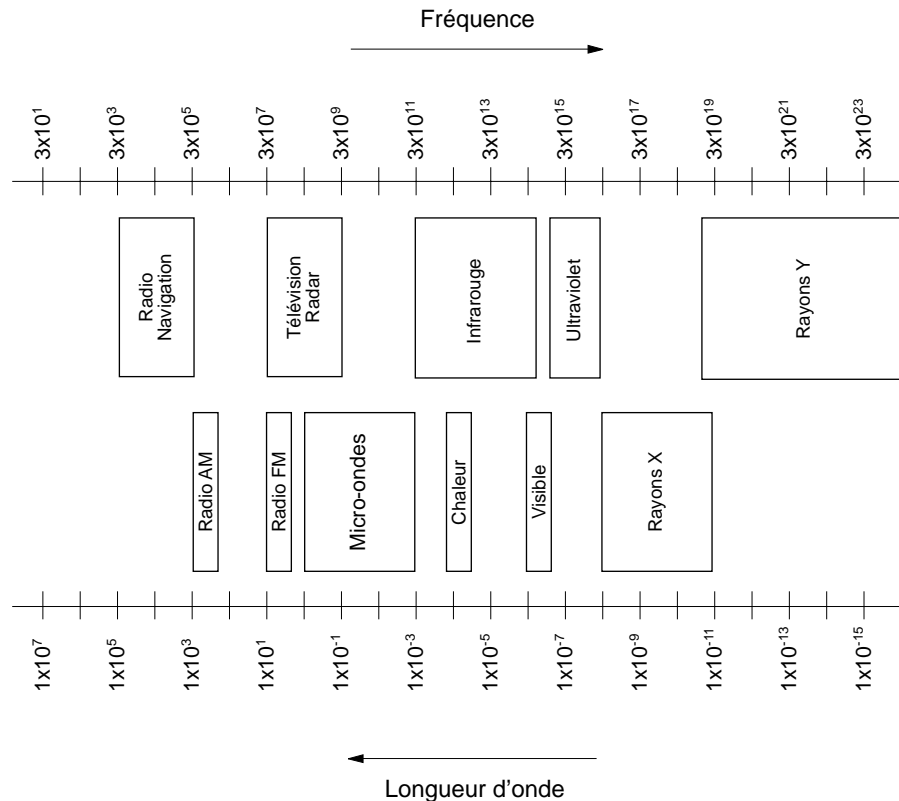
Le spectre des fréquences

On se convaincra mieux encore de ce qui vient d'être énoncé en considérant le tableau du spectre électromagnétique, aussi appelé *spectre des fréquences*, où l'on présente plusieurs des moyens de communication les plus courants. L'étendue du spectre est considérable puisqu'on y retrouve, d'un côté, de très basses fréquences radio de 30 Hz (dont la longueur d'onde se rapproche du diamètre de la Terre) et de l'autre, les rayons gamma et cosmiques de très hautes fréquences dont la longueur d'onde est de l'ordre du noyau de l'atome.

Parmi les moyens de communication connus, si l'on part des plus basses fréquences pour aller vers les plus hautes, on retrouve successivement :

- le téléphone, dont la fréquence du signal est déterminée par la hauteur de la voix (aiguë ou grave)¹⁷; la voix peut générer des fréquences allant de 100 à 10000 Hz; néanmoins, comme l'oreille se contente de capter beaucoup moins de signaux qu'il n'en est émis pour saisir le sens du message vocal, les compagnies de téléphone se contentent d'une largeur de bande (c'est-à-dire d'une gamme de fréquences permettant l'émission et la compréhension du signal) de 4000 Hz, ce qui autorise encore un espace de sécurité évitant les interférences; le système peut, en effet, reproduire la conversation sur des fréquences variant entre 300 et 3400 Hz; en deçà et au-delà de ces fréquences limites, un signal sonore devient difficilement perceptible aux extrémités de la ligne;

TABEAU 1.1
Bandes de fréquence et longueurs d'onde associées.



- la zone radio qui est elle-même divisée, selon des ententes internationales, en plusieurs bandes; dans les plus basses fréquences, on retrouve la radio AM, suivie sur des fréquences plus élevées des ondes courtes où se font normalement, ici, les transmissions maritimes et CB (bande de fréquences publiques); puis le FM et la télévision, qui se partagent, en Amérique du Nord, des bandes pouvant aller de 54 à 806 MHz;
- les relais viennent ensuite : pour le téléphone cellulaire, entre 825 et 890 MHz; puis, pour les stations micro-ondes (transmission de données de tout type entre stations) et les satellites, qui la plupart du temps utilisent cette bande de fréquence micro-ondes, allant plus ou moins de 2 à 40 GHz.

La bande passante

On appelle bande passante d'un signal l'intervalle de fréquences transmises par ce signal. On a vu que dans le cas du réseau téléphonique, la bande passante va de 300 à 3400 Hz.

La notion de largeur de bande (ou spectre des fréquences) est utilisée pour décrire la bande passante. La largeur de bande correspond à une gamme de fréquences équivalant à

la différence, en valeur absolue, entre les deux fréquences extrêmes. Dans le cas du réseau téléphonique, cette largeur de bande est de 3100 Hz.

Le signal est d'autant plus facile à comprendre que la largeur de bande est élevée. Toutefois, le gain de qualité qui résulte de l'augmentation de ce paramètre est, en général, assorti de coûts importants qui entravent en quelque sorte la rentabilité économique du système de communication. C'est pourquoi le choix de la largeur de bande est le résultat d'un compromis entre la qualité de la transmission désirée et les considérations économiques qui y sont associées.

Amplitude

L'amplitude d'un signal est la valeur instantanée de ce signal durant un cycle. Comme le montre la figure 1.10, l'amplitude correspond à la valeur instantanée de la tension ou voltage (axe vertical)¹⁸. L'amplitude peut être assimilée à l'intensité¹⁹. La valeur maximale de l'amplitude (amplitude maximale) correspond à la hauteur maximale de la courbe sinusoïdale et est désignée par A .

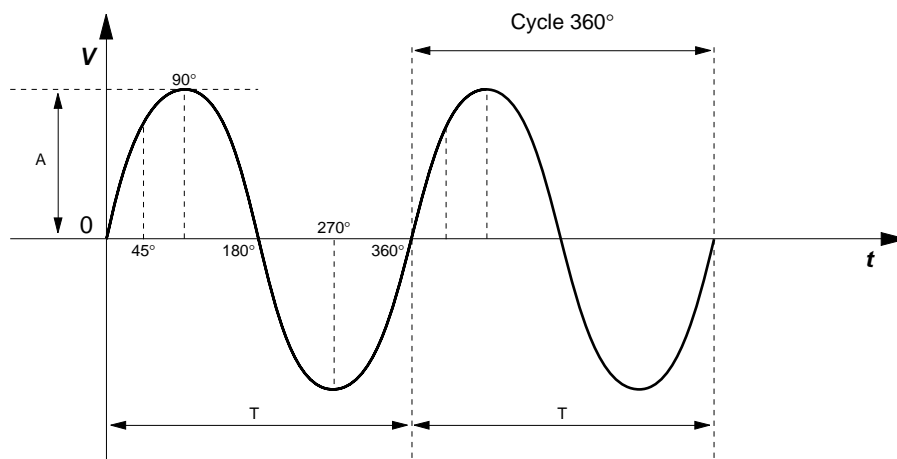


FIGURE 1.10

Onde sinusoïdale d'amplitude A .

Phase

Pour sa part, la phase représente la portion de cycle parcourue par un signal à un instant donné, c'est-à-dire la portion de la courbe sinusoïdale qui est parcourue à cet instant. La phase représente le décalage de l'onde par rapport à l'origine.

Il est peut-être plus facile de saisir à quoi correspond la phase en comparant deux courbes sinusoïdales de même amplitude et de même fréquence entre lesquelles existe une différence de phase, comme l'illustrent les deux schémas de la figure 1.11.

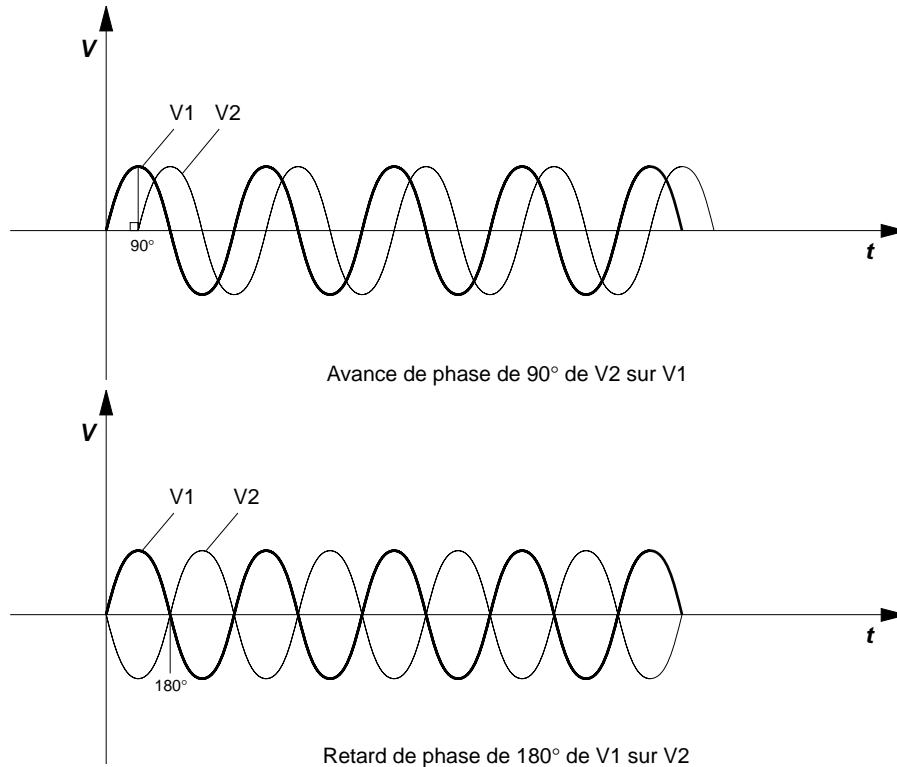


FIGURE 1.11

Avance de phase de 90° de V2 sur V1.

Retard de phase de 180° de V1 sur V2.

Parfaitement réalisable pour la communication de messages binaires, la transmission par différence de phase a tardé à être utilisée, sur une base appréciable, pour les radios de communication THF (très haute fréquence) et UHF (ultra haute fréquence) et pour les modems fonctionnant à haute vitesse par exemple, parce qu'elle est beaucoup plus complexe à réaliser que les deux premiers modes de transmission (par variation de fréquence ou d'amplitude). Elle représente cependant l'avenir des techniques de communication en raison, entre autres, de la qualité de la restitution des données initiales qu'elle permet d'atteindre.

1.2.4 Conversion des signaux

Il existe quatre combinaisons possibles entre les données (analogiques ou numériques) et les signaux (analogiques ou numériques). À ces quatre combinaisons correspondent

quatre dispositifs permettant d'adapter les données aux signaux et aux différents types de liaison de transmission, que nous examinerons plus loin.

- *Données analogiques et signaux analogiques* : le téléphone traditionnel (réseau de voix) transforme des données analogiques (voix) en signaux analogiques (signal électrique); la télévision traditionnelle transmet le son et l'image selon ce même mode.
- *Données numériques et signaux analogiques* : le modem (modulateur-démodulateur) transforme des données numériques (impulsions de voltage binaires), à la sortie du micro-ordinateur ou plus généralement du terminal, en signaux analogiques adaptés au téléphone traditionnel; en effet, le canal analogique est encore actuellement utilisé, dans la plupart des cas, entre le poste de l'utilisateur et le nœud sur le réseau téléphonique.
- *Données analogiques et signaux numériques* : il s'agit ici de tout instrument qui permet la numérisation du signal, comme le codec (codeur-décodeur).
- *Données numériques et signaux numériques* : on trouve ici le transmetteur numérique (*digital*), encore appelé codeur bande de base, qui fait la conversion de données numériques en signaux numériques, mais ne se retrouve guère actuellement que dans les liaisons informatiques internes et locales; cependant, l'évolution vers le réseau numérique à intégration de services (RNIS)²⁰, dont nous parlerons au chapitre 4, devrait à l'avenir généraliser ce type de transformation, en téléinformatique.

Avant d'aborder plus à fond l'étude des transmissions de données, examinez la figure 1.12 qui représente, de façon schématisée, le chemin suivi par l'information (avec les conversions de données et de signaux), à partir du moment où un usager tape la lettre « E », au clavier de son terminal (micro-ordinateur ou autre), jusqu'à ce qu'elle se rende à un ordinateur distant (serveur)²¹.

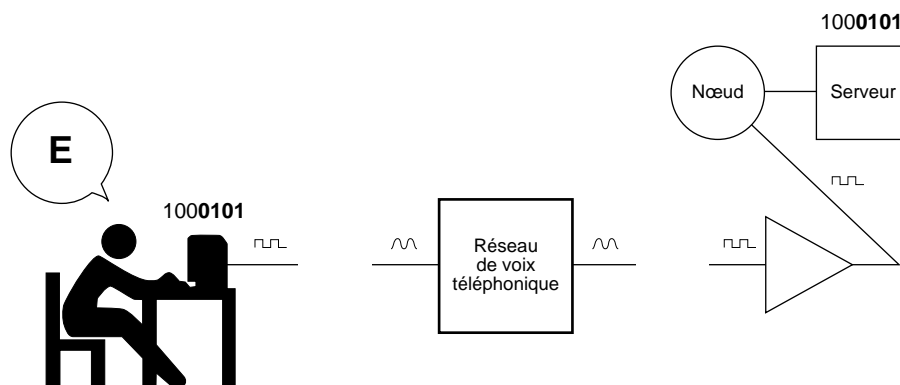


FIGURE 1.12

Chemin suivi par l'information.

1.3 TYPOLOGIE DES TRANSMISSIONS

Il existe deux types de transmission basés sur des façons différentes de représenter l'information sur le support de transmission : *la transmission analogique et la transmission numérique*.

- La transmission est dite analogique lorsque l'information à transmettre est représentée, sur le support, par des variations continues d'un seul et même paramètre physique; ainsi, lorsque le support de transmission est une ligne électrique, la représentation de l'information à transmettre s'obtient par des variations continues de la tension mesurée par rapport à un niveau de référence.
- Par contre, la transmission numérique est caractérisée par la discontinuité des variations du paramètre physique utilisé sur la ligne; l'information à transmettre existe alors en nombre fini et elle se conforme à un certain alphabet. Ainsi, lorsque le support de transmission est une ligne électrique, la représentation de l'information à transmettre s'obtient par des variations discontinues de la tension correspondant à un code.

La différence entre ces deux types de transmission est fondamentale. Dans le cas de la transmission analogique, l'extrémité réceptrice se borne à amplifier le signal reçu pour en corriger éventuellement certains défauts. Par contre, dans le cas de la transmission numérique, cette extrémité génère un nouveau signal, supposé parfait, à partir de celui qu'elle a reçu.

Lorsque le nombre de valeurs différentes du paramètre physique de la transmission numérique est égal à deux, on obtient un cas intéressant, qui est la transmission binaire. Ce type de transmission s'adapte aussi bien au transport de la parole en téléphonie qu'à celui de la transmission de messages informatiques. Il présente l'avantage de rendre disponible le réseau téléphonique (réseau de voix) pour la transmission de données.

1.3.1 Transmission synchrone et transmission asynchrone

Transmission asynchrone

La transmission est dite *asynchrone* lorsqu'elle s'effectue par succession de caractères²² séparés par des intervalles d'une durée quelconque. Elle rend nécessaire l'adjonction, à chaque train de bits, d'éléments de repérage permettant la reconnaissance du début du caractère (grâce à un bit appelé START) et de sa fin (grâce à un bit appelé STOP), comme l'illustre la figure 1.13. Cela explique pourquoi la transmission asynchrone, ou transmission arythmique, est également appelée START-STOP.

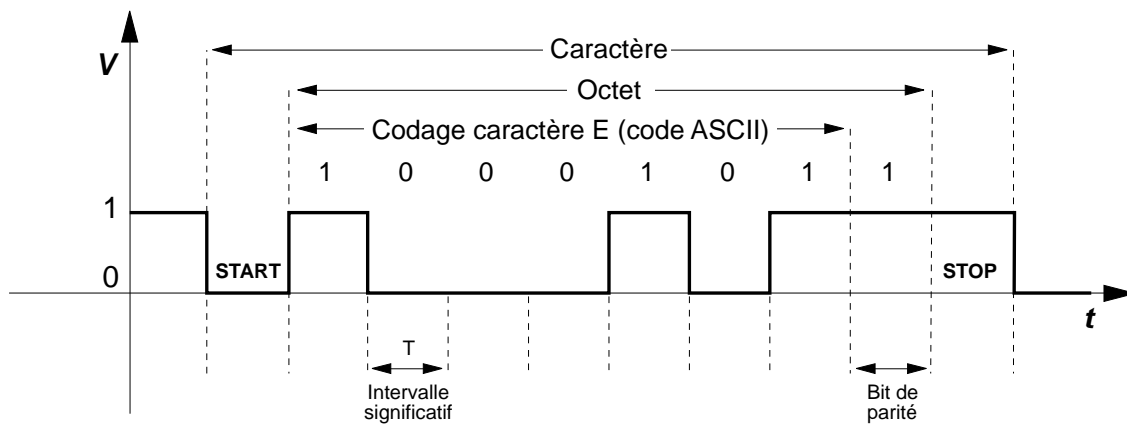


FIGURE 1.13

Codage d'un caractère pour transmission asynchrone.

On remarque sur cette figure, une suite binaire de 7 bits, qui représente la forme codée d'une lettre de l'alphabet, soit l'information faisant partie du message *stricto sensu* de l'usager humain à son correspondant; elle est comme glissée dans une enveloppe constituée d'un bit START (en tête) et d'un bit STOP (en queue), qui sont des caractères de synchronisation. Entre la suite binaire codée et la couverture de l'« enveloppe » (bit STOP) se trouve un huitième bit, qui sert de clé de contrôle pour cette suite et qui accompagne le mot; c'est le bit de parité; c'est grâce à lui que le correspondant saura si le message reçu est conforme à celui qui a été envoyé. Le bit de parité est codé. Les 7 bits du caractère codé de notre figure, accompagnés de leur bit de parité, forment un octet. En transmission asynchrone, les octets sont envoyés l'un après l'autre, avec les deux bits supplémentaires START et STOP. Ce mode de transmission en fait un moyen réservé aux systèmes lents. C'est celui qu'on utilise normalement dans le cas du terminal (micro-ordinateur ou autre) relié à un serveur pour l'interrogation de bases de données ou de services de communication (messagerie ou conférence); c'est aussi le cas des liaisons reliant les terminaux vidéotex aux serveurs, etc.

Transmission synchrone

La transmission est appelée *synchrone* lorsque les données sont acheminées en une succession de symboles binaires, régulière dans le temps, sous forme d'un signal électrique à 2 valeurs. Le mode de transmission est ajusté à un rythme d'émission prédéterminé, qui est celui d'une horloge²³ (ou générateur de rythme). On parle aussi, dans ce cas, de transmission isochrone.

Le signal d'horloge (figure 1.14) résulte d'un découpage du temps en intervalles élémentaires, ce qui explique pourquoi on l'appelle aussi signal base de temps. C'est un signal périodique (régulier), de période T . L'émetteur délivre par seconde un nombre de bits égal à $1/T$, qui n'est autre que la fréquence du signal d'horloge. La suite de données ainsi émise est dite synchrone. Ce mode de transmission permet des cadences de transfert très élevées. On l'utilise, par exemple, pour communiquer entre deux ordinateurs.

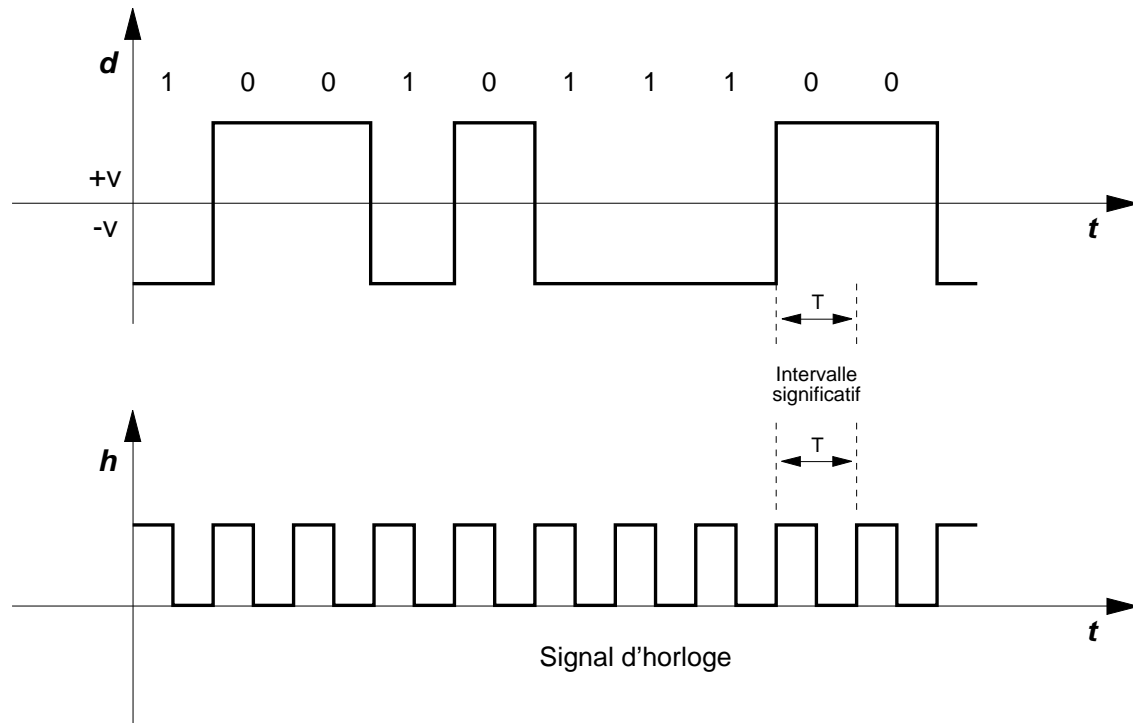


FIGURE 1.14

Principe de la transmission synchrone.

1.3.2 Transmission en série et transmission en parallèle

La transmission du signal peut s'effectuer sur un seul support ou sur un ensemble de supports analogues.

La transmission en série consiste à émettre les bits composant un message, les uns à la suite des autres, sur le même support, par exemple sur un fil. Cela permet de réduire le nombre de fils et de rendre les données moins vulnérables à l'environnement²⁴. Par contre, les vitesses sont très réduites puisque la transmission s'effectue bit par bit, plutôt qu'octet (8 bits) par octet²⁵. En règle générale, ce mode de transmission est utilisé pour travailler à distance, par exemple dans les réseaux de voix (réseau téléphonique) et (ou) de données (DATAPAC, BITNET, etc.).

La transmission en parallèle est, par contre, utilisée quand le critère de la vitesse est primordial et que la distance est réduite (transmissions à l'intérieur du système de traitement ou avec des périphériques rapprochés, comme certaines imprimantes, etc.). Elle consiste à transmettre les n symboles binaires d'un message en utilisant n supports analogues. Dans le cas de l'octet, au lieu de transmettre les 8 bits l'un derrière l'autre, on les envoie tous en même temps, l'un à côté de l'autre, en leur faisant emprunter huit voies différentes (une par bit). On transmet ainsi octet par octet, tous les bits de l'octet à la fois, pour chaque octet. Cette méthode est évidemment plus rapide que la transmission en

série. Elle est cependant plus coûteuse à mettre en œuvre et pose des problèmes de synchronisation. C'est pourquoi on l'utilise généralement sur de courtes distances, par exemple pour regrouper de l'information à acheminer en série sur la ligne de transmission ou comme sortie de données vers une imprimante²⁶.

En fait, lors d'une transmission à partir d'un micro-ordinateur, ou en réception vers celui-ci, diverses conversions série-parallèle ou l'inverse peuvent être effectuées par l'intermédiaire d'un ACIA (*Asynchronous Communication Interface Adapter*) par exemple, de façon à adapter le mode de transmission aux spécificités des appareils, en particulier des périphériques.

1.3.3 Modes d'échange dans la transmission

Le transfert de l'information peut s'opérer de trois manières différentes : en mode simplex, en mode semi-duplex (*half duplex*) ou en mode duplex intégral (*full duplex*). Voyons ces trois modes qu'illustrent les figures 1.15, 1.16 et 1.17.

Liaison en mode simplex

Dans le mode de transmission simplex, les informations ne circulent que dans un sens et les équipements terminaux n'ont qu'un seul rôle à jouer, soit celui d'émetteur, soit celui de récepteur, sans possibilité de changement entre ces rôles. On dit alors que l'exploitation est en mode unidirectionnel ou simplex.

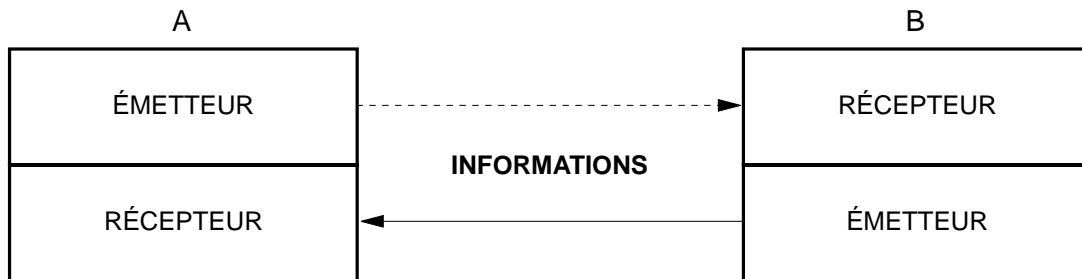


FIGURE 1.15

Exemple de liaison en mode simplex.

Liaison en mode semi-duplex

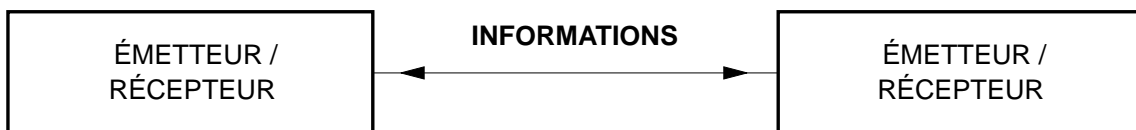
Dans ce type de liaison, les informations circulent alternativement de A vers B, puis de B vers A. L'exploitation est dite alors en mode bidirectionnel à l'alternat ou semi-duplex (*half duplex*).

**FIGURE 1.16**

Exemple de liaison en mode semi-duplex (*half duplex*).

Liaison en mode duplex intégral

Dans ce dernier mode de liaison, les informations circulent simultanément dans les deux sens, soit de A vers B et de B vers A. On dit que l'exploitation est en mode bidirectionnel simultané ou duplex intégral (*full duplex*).

**FIGURE 1.17**

Exemple de liaison en mode duplex intégral (*full duplex*).

1.4 SYSTÈME DE TRANSMISSION DE DONNÉES

Afin d'établir une communication entre un émetteur et un récepteur, il est nécessaire de disposer d'un certain nombre d'éléments jouant le rôle d'interface, dont les principales fonctions sont les suivantes :

- le contrôle de la communication entre l'émetteur et le récepteur;
- l'adaptation des signaux reçus de l'émetteur aux caractéristiques de la ligne de transmission;
- l'adaptation des signaux transmis par la ligne de transmission aux caractéristiques du récepteur;
- l'ajout de mécanismes de détection et de correction des erreurs engendrées par la transmission.

Comme le montre le schéma général d'un système de transmission de données de la figure 1.18, l'information est émise ou reçue par un équipement terminal de traitement de données (ETTD), communément appelé terminal.

L'ETTD comporte deux parties :

- la machine de traitement, qui peut être une source (SD) ou un collecteur (CD) de données;
- le contrôleur de communication (CC), qui regroupe les organes chargés des fonctions de communication (protection contre les erreurs, gestion du dialogue entre les deux terminaux).

L'équipement de terminaison de circuit de données (ETCD) est l'organe chargé :

- d'adapter le signal électrique émis par le terminal sur le support de transmission;
- d'assurer des fonctions d'établissement et de libération du circuit.

Ce matériel est couramment appelé modem (modulateur-démodulateur).

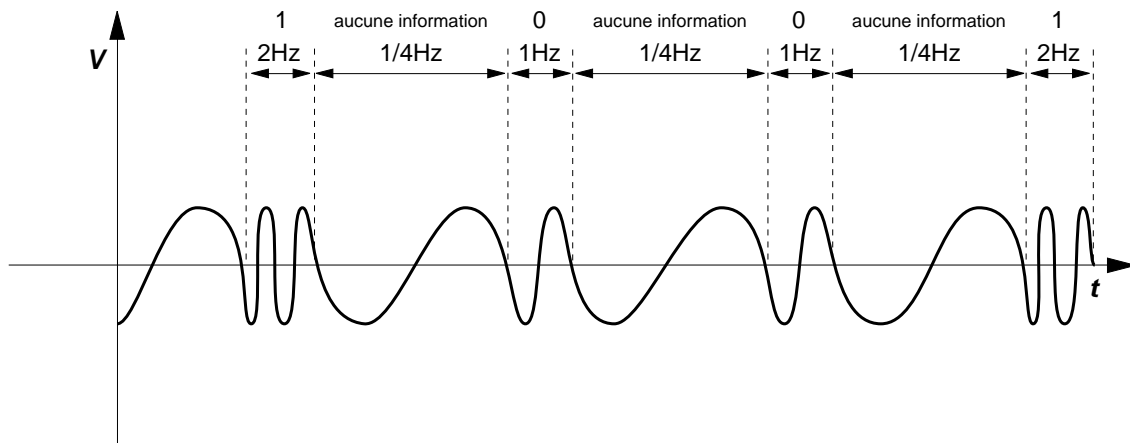


FIGURE 1.18

Système de transmission de données.

Une interface normalisée, appelée jonction, le relie au contrôleur de communication. L'ensemble ETTD – Jonction – ETCD prend le nom de station de données²⁷.

Enfin, le circuit de données est l'ensemble des moyens permettant l'échange de messages de données entre les terminaux A et B. Il est constitué de la ligne de transmission et des deux ETCD associés.

1.5 LIAISON DE DONNÉES (OU CANAL DE TRANSMISSION)

On appelle liaison de données ou canal de transmission l'ensemble formé du circuit de données et des deux contrôleurs de communication situés aux extrémités du circuit²⁸.

1.5.1 Caractéristiques du canal de transmission

Vitesse de signalisation

La notion de vitesse de signalisation est une caractéristique importante du canal de transmission. Nyquist a établi de façon empirique, dans les années 20, qu'elle est proportionnelle à la largeur de bande²⁹. Cette mesure s'exprime en bauds³⁰.

Ainsi, dans le cas d'une ligne téléphonique, moyen encore très utilisé en télématique, une largeur de bande de 3100 Hz, permettrait une vitesse de signalisation tout à fait théorique de 6200 bauds. Mais Shannon, en 1948, a montré, sur la base d'hypothèses plus fines, que l'on doit tenir compte, non seulement de la largeur de bande W , mais aussi du rapport signal/bruit³¹ (S/N). La formule qu'il en déduit définit la capacité théorique maximale du canal de transmission.

Capacité de transmission

En raison des bruits qui viennent perturber la transmission, la bande de fréquence effectivement utilisée pour propager le signal de données demeure limitée. Tout canal de transmission est donc aussi caractérisé par sa capacité à transmettre. Pour mesurer cette capacité en transmission numérique, on utilise la notion de débit binaire, qui fournit le nombre d'informations élémentaires (ou bits) que le canal transporte effectivement par unité de temps, dans une transmission synchrone, c'est-à-dire ininterrompue.

Ce qu'on appelle le débit de transmission en transmission numérique est alors la quantité maximale de bits que le canal peut transporter par unité de temps; le débit de transmission s'exprime en bits par seconde.

Dans le cas de la transmission asynchrone, on ne peut pas parler de débit binaire *stricto sensu*. En effet, le flux de bits transmis (ou débit) n'est pas assuré régulièrement pendant toute la durée de la communication, contrairement à ce qui se passe dans le cas de la transmission en mode synchrone. On parlera plutôt alors de cadence de transfert, c'est-à-dire du nombre moyen de bits, caractères ou blocs transférés par unité de temps³².

Relation entre capacité de transmission et vitesse de signalisation

Dans le cas d'un signal binaire, bivalent, c'est-à-dire qui peut prendre deux états³³ pendant l'intervalle de temps d'échantillonnage utilisé pour la modulation³⁴, la vitesse de signalisation exprimée en bauds est égale au débit de transmission exprimé en bits par seconde (b/s). Par contre, si le modem encode 4 ou même 8 états³⁵ du signal pendant une même impulsion, on multiplie d'autant la capacité de transmission du canal.

1.5.2 Taux d'erreurs

Le taux d'erreurs d'une liaison de données est le rapport du nombre de bits erronés reçus au nombre total de bits transmis. Étant donné que le système de protection n'élimine pas toutes les erreurs qui peuvent survenir, on est amené à considérer le taux d'erreurs résiduelles (TER). Il est égal au rapport du nombre de bits incorrectement reçus, et non détectés ou corrigés par le système de protection contre les erreurs, au nombre total de

bits transmis. La notion de taux d'erreurs résiduelles permet d'apprécier le degré de sécurité d'une liaison de données.

1.6 TRANSMISSION EN BANDE DE BASE ET MODULATION

Le but de la téléinformatique est de transmettre à distance les messages, sous leurs diverses formes, en s'assurant que toute l'information parvienne au destinataire. Dans ces conditions, il est clair que le spectre du signal à transmettre doit être compris à l'intérieur de la bande passante du support. Dans la perspective de cette relation à la bande passante, on retrouve deux types de transmission :

- la *transmission en bande de base* qui consiste à transmettre, directement sur le support, les signaux numériques, une suite de données binaires par exemple;
- la *transmission par modulation d'une onde porteuse*.

1.6.1 Transmission en bande de base

La transmission en bande de base est une transmission numérique de signaux numériques. Mais les signaux numériques de valeur 0 et 1 ne sont pas adaptés tels quels à leur transmission. Leur spectre est proche d'une fréquence nulle, alors que la bande passante de nombreux supports est limitée, soit vers les basses, soit vers les hautes fréquences. Pour rendre les signaux numériques aptes à être transmis, il est donc nécessaire de modifier la forme de leur spectre. Cela s'effectue par codage dans un équipement de terminaison de circuit de données (ETCD), appelé codeur bande de base³⁶ ou transmetteur numérique (*digital*).

Les données transmises en bande de base sont soit des données provenant directement d'une source numérique, soit des données provenant d'une source analogique, mais qui ont subi une numérisation avant d'arriver au codeur; ce dernier ne reçoit donc que des signaux numériques.

Le signal en bande de base ne subissant aucune modification de fréquence, il est nécessaire d'utiliser un support de transmission fiable qui n'introduira aucun décalage : on choisit généralement le câble. L'avantage des systèmes en bande de base est leur simplicité, puisqu'ils n'ont besoin d'aucun autre équipement de traitement du signal après le codage. Cela est particulièrement intéressant pour les débits binaires élevés. Le débit maximal dépend à la fois de la nature du câble, de son diamètre et de sa longueur. Le choix du codage se fait en fonction du support utilisé et du débit binaire souhaité³⁷.

Quelle que soit la qualité du support, le signal en bande de base subit forcément, lors de la transmission, des déformations qui dépendent à la fois de la longueur du support et du débit binaire utilisé. L'ETCD récepteur doit restituer correctement le signal. Pour ce faire, il extrait le signal d'horloge³⁸, qui lui permet de rétablir les séquences de données, et il remet en forme le signal reçu. Il procède à cette dernière opération à l'aide d'un filtre qu'on appelle égaliseur.

1.6.2 Nécessité de la modulation

En dehors de la situation que nous venons d'évoquer, un message doit généralement subir quelques transformations pour pouvoir être transmis, de façon que l'émission et la réception soient facilitées³⁹; ces modifications constituent la modulation du message. Celle-ci permet de contrôler la quantité de messages émis; elle permet aussi d'adapter la transmission aux voies de communication disponibles, ainsi qu'aux capacités de transmission des équipements électroniques⁴⁰.

Essayons d'illustrer la nécessité de la modulation. L'exemple de la voix nous a déjà montré que le message vocal (onde acoustique) peut être transformé en onde électrique; cette traduction du message est effectuée par ce que l'on appelle un transducteur. Le message électrique qui en résulte comprend des fréquences pouvant aller de 20 Hz à 20 kHz, lesquelles correspondent aux fréquences audibles. La transmission de ce message électrique, amplifié au moyen d'une antenne, pose cependant des problèmes majeurs : pour transmettre une fréquence de 100 Hz, la dimension de l'antenne devrait être de 1500 km, elle serait encore de 15 km pour une fréquence de 10 kHz. Cela revient à dire que, si l'on ne fait rien, les possibilités de rayonnement d'un message électrique sur de telles fréquences sont extrêmement réduites. Le problème se complique encore du fait que, dans ce cas de figure, si deux stations émettaient en même temps en fréquences audio, il ne serait pas possible de les discerner dans le récepteur. Cette seconde limitation obligerait donc à ne pas transmettre plus d'un message à la fois.

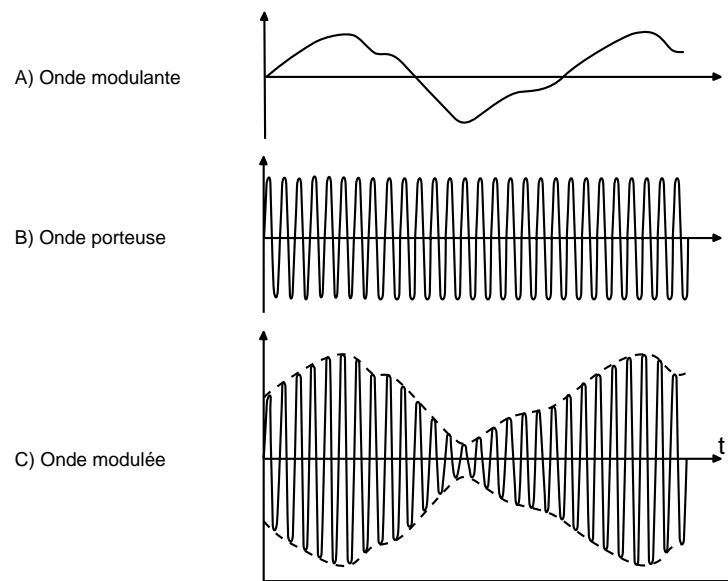
Ces raisons expliquent pourquoi l'on doit recourir à un autre moyen de transmission, lequel consiste à introduire un message électrique de basse fréquence dans un autre message de haute fréquence : cette opération s'appelle la *modulation*.

1.6.3 Principe de la modulation

Le principe de base de la modulation est celui que nous venons d'énoncer, soit l'introduction d'un message électrique de basse fréquence dans un second, de haute fréquence. C'est ce dernier que l'on appelle la porteuse. Il s'agit d'une onde sinusoïdale dont les caractéristiques sont constantes, mais qui peuvent être modifiées par le jeu de variations d'amplitude, de fréquence ou de phase déterminées par l'information à transmettre. Les variations de l'onde porteuse permettent ainsi de transmettre cette information. L'onde porteuse est modifiée par le signal électrique, que l'on appelle onde modulante. Le signal transmis s'appelle l'onde modulée.

Chaque émetteur choisit une fréquence d'onde porteuse. La fréquence de base de la porteuse est, en elle-même, totalement a-signifiante, mais elle est bien sûr toujours haute. C'est pourquoi, lorsqu'on cherche à se connecter à un serveur, on sait que l'on a atteint l'objectif, dès qu'on perçoit le sifflement aigu de la porteuse.

L'onde modulée, nous l'avons dit, est une onde de haute fréquence. C'est pourquoi elle peut facilement être émise puisque, comme nous l'avons vu plus haut, la taille de l'antenne requise diminue au fur et à mesure que s'accroît la fréquence. L'onde ainsi transmise contient cependant tout le message initial : en effet, l'enveloppe de cette onde est proportionnelle à l'onde modulante, comme on peut le voir dans la figure 1.19.

**FIGURE 1.19****Principe de la modulation (amplitude).**

Lorsque le signal sera capté, il devra être démodulé, c'est-à-dire détaché de sa porteuse. La démodulation (ou détection) consistera à isoler l'enveloppe, restituant ainsi le signal modulant.

Cette opération s'effectue à la réception, grâce à un filtre. Il s'agit d'un dispositif électronique, capable de recevoir plusieurs fréquences et qui n'en laisse passer qu'un nombre limité. Le filtre classique est le filtre passe-bande : celui-ci laisse passer une bande de fréquence W et supprime toutes les autres fréquences⁴¹.

1.6.4 Types de modulation

Les différents types de modulation peuvent être classés selon plusieurs critères :

1. *La continuité dans l'émission de l'onde modulée.* Deux situations se présentent :
 - la modulation est continue (ou entretenue); l'onde modulée est émise sans aucune interruption;
 - la modulation est effectuée par impulsions discontinues.
2. *La relation du message modulé avec le message modulant.* Deux situations se présentent :
 - la modulation peut être analogique si l'un des paramètres de l'onde porteuse varie proportionnellement à l'onde modulante; ainsi, dans l'exemple illustré à la figure 1.19, l'amplitude de l'onde porteuse variait proportionnellement au message modulant;
 - ou bien la modulation peut être codée, si le message est traduit selon un certain langage symbolique; la relation du message modulé avec le message modulant n'est alors pas proportionnelle.

En combinant ces critères, on retrouve les types de modulation suivants :

- la modulation analogique continue;
- la modulation analogique par impulsions;
- la modulation par impulsions codées;
- la modulation différentielle.

Cette liste n'est pas exhaustive. Voyons d'abord les types de modulation regroupés dans le classement précédent; puis, nous présenterons d'autres formes de modulation, lesquelles sont utilisées dans diverses applications connues.

Modulation analogique continue

Comme toute onde sinusoïdale, la porteuse est définie par son amplitude, sa fréquence et sa phase, et elle peut être modulée selon ces trois caractéristiques, ce qui correspond à trois types différents de modulation. La figure 1.20 en montre des exemples.

- *Modulation d'amplitude (AM)* : l'amplitude de la porteuse varie proportionnellement au message modulant.
- *Modulation de fréquence (FM)* : la fréquence de la porteuse varie proportionnellement au message modulant, l'amplitude de l'onde modulée restant inchangée.
- *Modulation de phase (PM)*⁴² : la phase de la porteuse varie proportionnellement au message modulant.

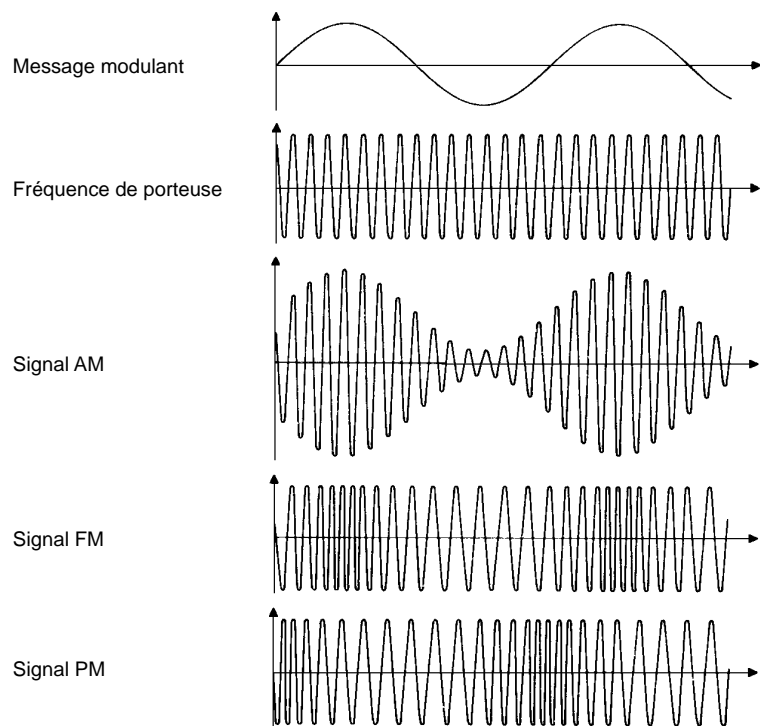


FIGURE 1.20

Types de modulation analogique continue.

L'image temporelle d'un signal PM n'est pas aussi explicite que les images de signaux AM ou FM. Elle rappelle un signal FM, sans toutefois lui être identique. Pour mieux la « visualiser », supposons que nous disposons de plusieurs ondes porteuses légèrement déphasées les unes par rapport aux autres. Nous pourrions, à des temps différents, utiliser l'une ou l'autre des différentes porteuses, la phase de la porteuse choisie dépendant directement du message modulant. Comme le montre la figure 1.21, l'onde modulée serait alors constituée par des tronçons de porteuses de phases différentes. On constate que l'allure de cette onde modulée se rapprocherait sensiblement de celle que nous avons vue précédemment. En fait, il faudrait se représenter un nombre infini de porteuses, et non un nombre limité comme dans cette figure, pour percevoir les changements de l'onde modulée qui se font de façon continue.

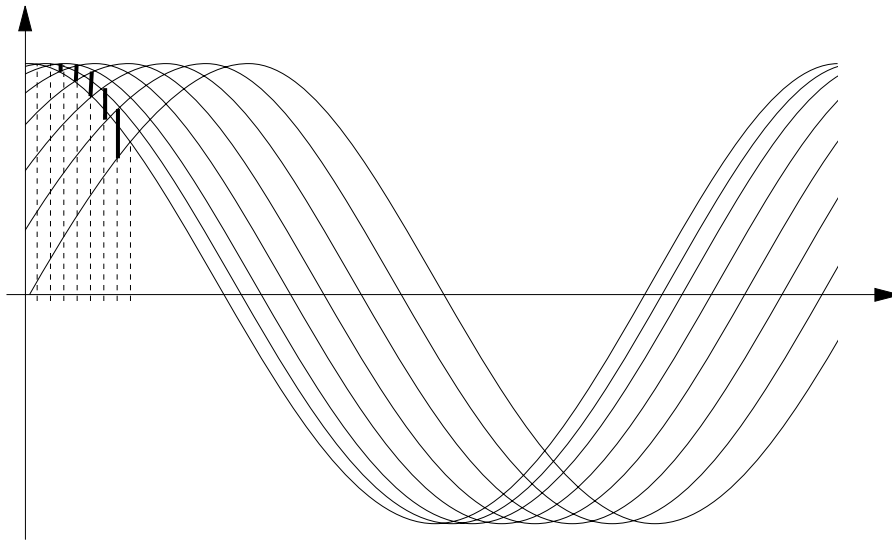


FIGURE 1.21

Modulation par variation de phase (détail).

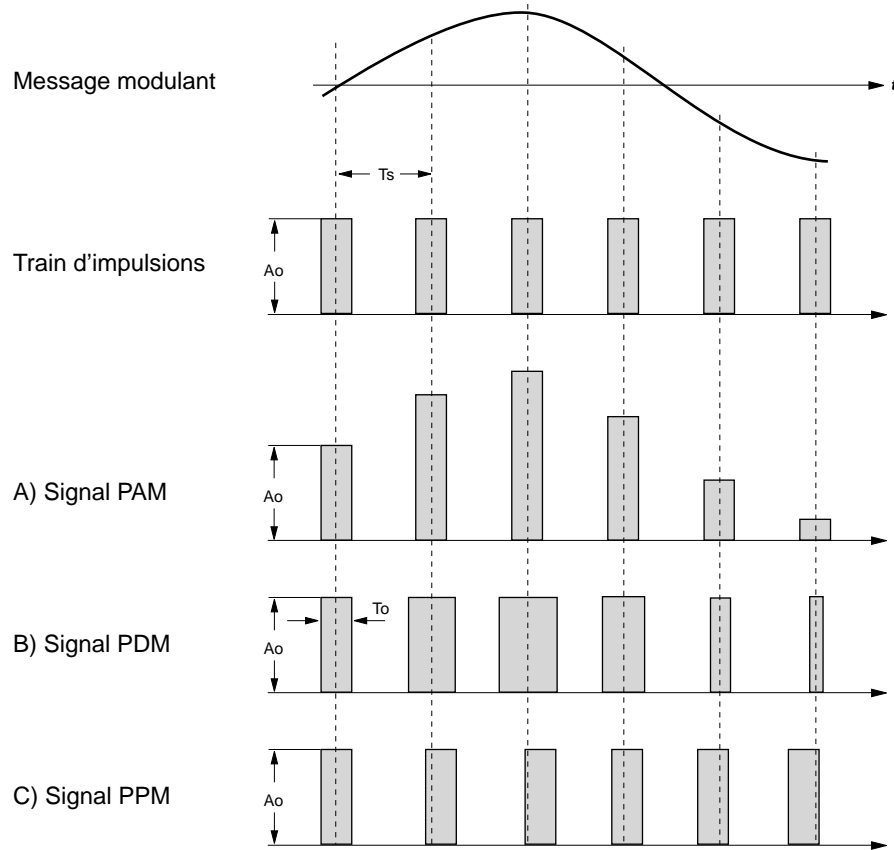
Modulation analogique par impulsions

Nous venons de voir que la porteuse est une onde sinusoïdale pouvant être modulée selon son amplitude, sa fréquence ou sa phase. À cet égard, un train d'impulsions rectangulaires peut être considéré comme un signal de porteuse, puisqu'il est également caractérisé par une amplitude, une fréquence et une phase, dont il est possible de faire varier la valeur de façon analogique au message.

La modulation analogique par impulsions repose sur ce principe⁴³. Il en existe trois types, que la figure 1.22 présente.

- *Modulation analogique par impulsions en amplitude* (PAM pour *Pulse Amplitude Modulation*) : l'amplitude des impulsions varie proportionnellement au message modulant; il existe plusieurs variantes d'ondes PAM.

- *Modulation analogique par impulsions en durée* (PDM pour *Pulse Duration Modulation*) : la durée des impulsions varie proportionnellement au message modulant.
- *Modulation analogique par impulsions en position* (PPM pour *Pulse Position Modulation*) : des impulsions identiques sont émises à des intervalles de temps différents; le rythme de répétition des impulsions varie; ainsi le temps d'avance ou de retard de l'impulsion reste proportionnel au message modulant.

**FIGURE 1.22****Types de modulation analogique par impulsions.**

Il faut remarquer que dans les modes PDM et PPM, les impulsions sont modulées dans le temps. Ces modes sont regroupés sous le sigle PTM (*Pulse Time Modulation*).

Les ondes modulées par impulsions que nous avons décrites peuvent être transmises telles quelles, ou être modulées à leur tour sur des ondes porteuses sinusoïdales dont la fréquence est bien plus élevée que celle de la récurrence des impulsions.

Modulation par impulsions codées⁴⁴ (MIC)

Il s'agit ici d'une modulation non plus analogique mais codée (PCM pour *Pulse Code Modulation*, en français MIC). Voyons le principe de ce type de modulation.

1. Le message modulant est d'abord échantillonné. L'échantillonnage consiste à prélever des points du signal au fur et à mesure qu'il se déroule. Ce prélèvement doit être effectué à un taux suffisamment élevé, de manière que l'on puisse recueillir suffisamment d'échantillons pour pouvoir reconstituer le signal modulant à partir de ces derniers.
2. On effectue ensuite une quantification des échantillons, c'est-à-dire qu'on représente leur amplitude par une valeur numérique, au moyen d'une loi de correspondance. Cette loi doit être telle que l'on puisse représenter le signal de façon significative.
3. Les valeurs quantifiées des échantillons sont alors codées : le code le plus simple est le code binaire qui utilise deux chiffres, « 0 » et « 1 », pour représenter un nombre quelconque. Il est d'ailleurs utilisé dans le système téléphonique nord-américain. Le codage y est fait sur 8 bits, ce qui permet de représenter 256 valeurs distinctes.
4. Les impulsions correspondant à ces codes sont alors émises, ou modulées selon diverses techniques.

Ainsi, dans l'exemple de la figure 1.23, le signal a d'abord été échantillonné, puis des niveaux de quantification définis ont été utilisés pour associer des valeurs discrètes aux échantillons. Ces valeurs ont été codées avant d'être émises sous forme d'impulsions.

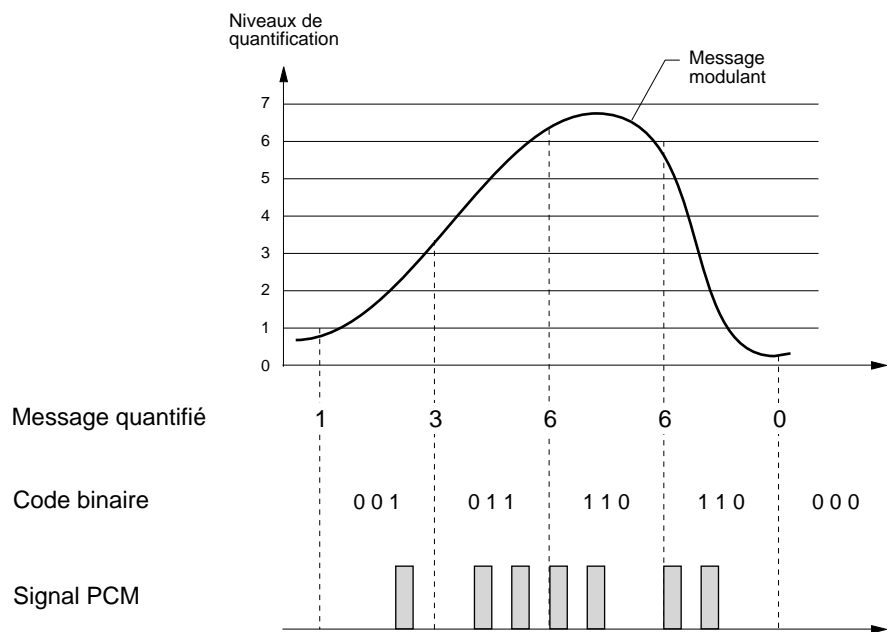


FIGURE 1.23

Exemple de modulation par impulsions codées.

Modulations différentielles

Les modulations différentielles sont des formes particulières de la modulation par impulsions codées. Elles sont utilisées lorsqu'il y a de faibles variations dans l'amplitude du message modulant d'un instant à un autre. Ce type de modulation est particulièrement approprié pour les signaux de voix dont les amplitudes varient peu entre deux échantillons successifs.

Modulation delta

Nous venons de voir que la modulation par impulsions codées permettait de transmettre un signal numérique correspondant aux valeurs des échantillons du message modulant. La modulation delta (DM pour *Delta Modulation*) permet de transmettre la différence entre les valeurs de deux échantillons successifs. Elle utilise ainsi un seul bit pour numériser un message modulant analogique. Pour ce faire, elle émet, à la fréquence d'échantillonnage, une impulsion positive ou négative, selon que l'échantillon courant du message modulant est plus grand ou plus petit que l'échantillon précédent du message modulé.

La figure 1.24 présente un exemple de modulation delta. On peut voir que le message modulé a une forme en escalier. Le signal DM est dérivé à partir des paliers montants et descendants.

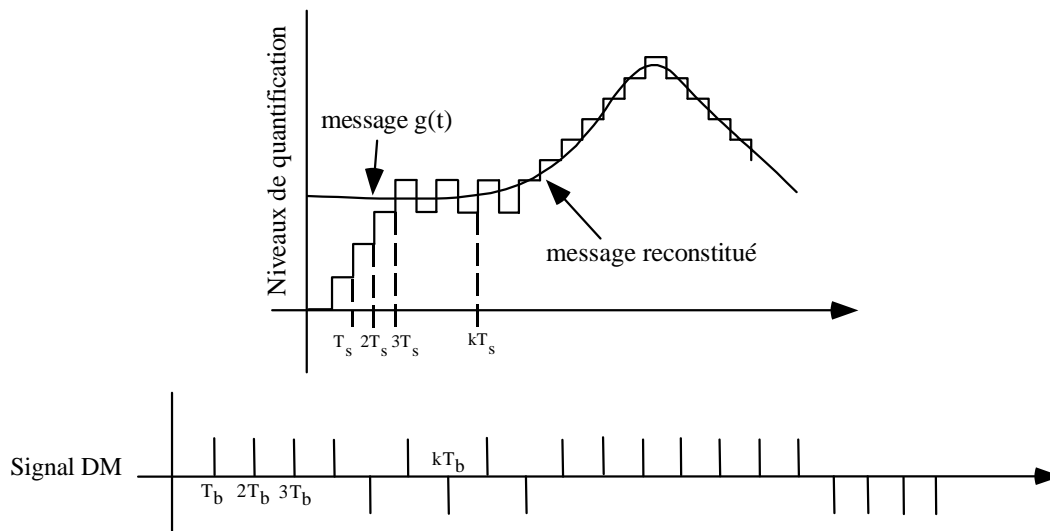


FIGURE 1.24

La modulation delta.

Deux problèmes peuvent survenir avec la modulation delta : le bruit granulaire et la surcharge. Le *bruit granulaire*, également appelé bruit de quantification, survient lorsque le message modulant varie peu, de sorte que le signal modulé a la forme d'un signal rectangulaire. Il en résulte une perturbation du signal à la réception, qui n'était pas présente dans le signal original.

La *surcharge* survient lorsque la variation du message se fait trop rapidement, la variation dans l'amplitude du signal étant plus élevée que l'amplitude de l'impulsion générée par le modulateur. Dans ce cas, le modulateur ne peut pas produire un signal modulé proche du signal modulant. La figure 1.25 illustre une surcharge dans un message delta.

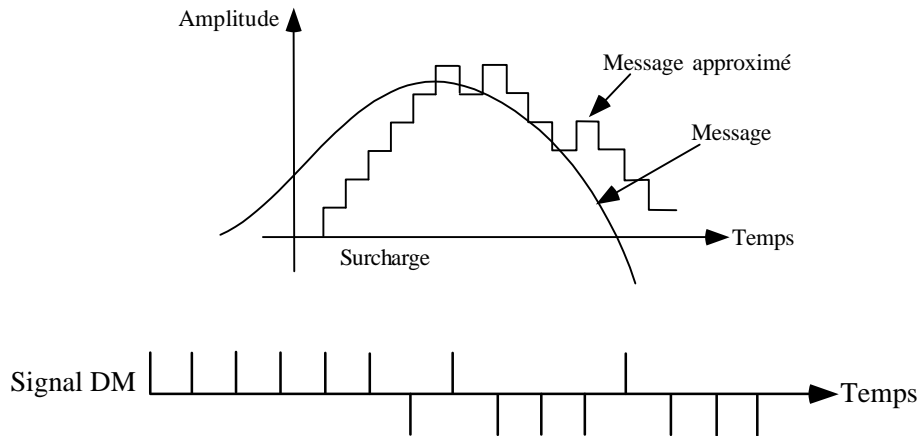


FIGURE 1.25

Surcharge de la modulation delta.

Modulation par impulsions codées différentielle

Tout comme la modulation delta, la modulation par impulsions codées différentielle (DPCM pour *Differential Pulse Code Modulation*) permet de transmettre la différence entre les valeurs de deux échantillons successifs. La différence avec la modulation delta réside dans le fait qu'au lieu d'émettre des impulsions positives ou négatives, on procède au codage binaire de la différence entre deux échantillons, comme dans la modulation par impulsions codées. On émet ensuite des impulsions correspondant à ce code.

Comme la différence entre deux échantillons est significativement plus petite que la valeur d'un échantillon, la modulation différentielle nécessite moins de bits pour effectuer le codage que dans la modulation par impulsions codées. De cette façon, on peut émettre plus fidèlement un message dont l'amplitude varie peu; on réduit ainsi les possibilités de surcharge.

Modulations adaptatives

Les modulations adaptatives consistent à utiliser un pas de quantification variable dans le but de réduire les erreurs de surcharge. Pour cela, on fait l'extrapolation de la valeur suivante en fonction des valeurs précédentes. Cette valeur prédite sera ensuite soustraite de la valeur réelle avant d'être quantifiée, codée, puis émise. Le tableau 1.2 présente un exemple d'algorithme pouvant être utilisé pour calculer le nouveau pas de quantification Δ , dans la modulation delta adaptative (ADM pour *Adaptive Delta Modulation*).

TABLEAU 1.2

Algorithme d'extrapolation pour la modulation delta adaptative

bit (k - 2)	bit (k - 1)	bit k	Δk
0	0	0	-4Δ
0	0	1	Δ
0	1	0	$-\Delta$
0	1	1	2Δ
1	0	0	-2Δ
1	0	1	Δ
1	1	0	$-\Delta$
1	1	1	4Δ

Le même principe peut être appliqué à la modulation par impulsions codées différentielle pour donner l'ADPCM (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*). La modulation ADPCM à quatre bits donne des résultats relativement bons en téléphonie et il existe une norme UIT-T à cet égard.

Autres types de modulation

Il existe de multiples techniques de modulation jouant :

- sur l'*amplitude* : modulation à saut d'amplitude, (ASK pour *Amplitude Shift Keying*),
- sur la *phase* : modulation par déplacement de phase, (PSK pour *Phase Shift Keying*)
modulation par déplacement de phase en quadrature, (QPSK pour *Quadrature Phase Shift Keying*)
modulation par déplacement de phase minimal, (MSK pour *Minimum Shift Keying*)
modulation par déplacement de phase en quadrature à décalage instantané, (OQPSK pour *Offset Quadrature Phase Shift Keying*)
- sur une *combinaison de variations de l'amplitude et de la phase* : modulation d'amplitude en quadrature de phase, (QAM pour *Quadrature Amplitude Modulation*)
- sur la *fréquence* : modulation par déplacement de fréquence, (FSK pour *Frequency Shift Keying*).

Ces divers types de modulation sont utilisés dans le cadre d'applications telles que :

- la télémétrie (PSK),
- la télévision numérique (QPSK),
- les systèmes sans fil et de pagination (FSK),

- les communications mobiles (MSK, pour le standard *Global System for Mobile Communications* ou GSM),
- la radio numérique et la télévision numérique par câble (QAM).

1.7 COMPRESSION

Le but de la compression est de transmettre une information donnée avec un minimum de bits, tout en conservant une qualité acceptable dans le cas d'un signal analogique (audio, vidéo ou autre), voire l'intégrité des signaux binaires de départ, dans le cas d'une transmission de données.

1.7.1 Compression d'un signal audio

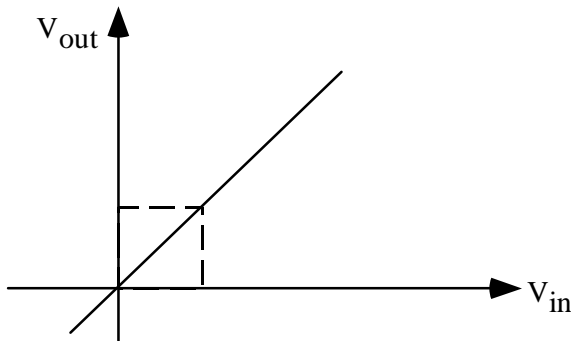
Pour numériser un signal analogique, on a vu qu'il faut passer par l'échantillonnage, la quantification, puis le codage de l'information à transmettre. Étant donné que l'amplitude d'un signal audio varie peu d'un échantillon à un autre, si l'on procède à une quantification linéaire, (pas de quantification constant), les signaux de faible amplitude seront plus fortement perturbés par le bruit granulaire que les signaux d'amplitude plus élevée qui « absorbent » le bruit. Pour remédier à cela, on a recours à une quantification non uniforme, de type logarithmique, en augmentant le nombre de niveaux de quantification pour les basses amplitudes, afin de mieux distinguer les échantillons successifs les uns des autres, et en diminuant le nombre de niveaux pour les plus grandes amplitudes. De cette façon, le bruit sera moindre pour les basses amplitudes qui constituent la majorité des signaux audio.

Le signal subit une compression qu'il faudra éliminer à la réception au moyen d'une expansion, dont l'effet est inverse. La figure 1.26 illustre, à l'aide de trois graphes, ce principe de la tension à la sortie (V_{out}) en fonction de la tension à l'entrée (V_{in}) d'un quantificateur. Le premier graphe correspond à un signal qui n'a subi aucune modification, la quantification étant uniforme.

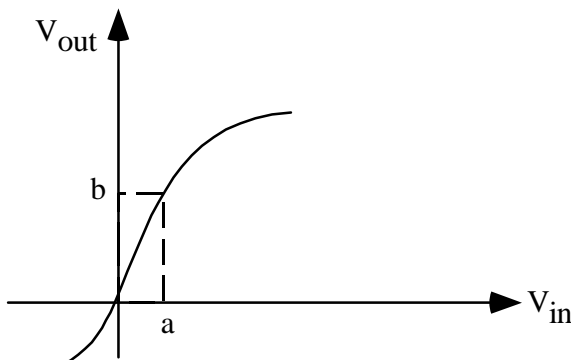
Le second correspond à un signal comprimé; dans ce cas, la tension à la sortie est amplifiée par rapport à la tension à l'entrée. Cette amplification est plus importante pour les faibles tensions que pour les tensions plus élevées; il en résulte donc une distorsion du signal qui doit être éliminée par une expansion.

Comme le montre le troisième graphe, l'expansion du signal produit l'effet contraire à la compression. La tension à la sortie est en effet réduite par rapport à la tension à l'entrée et elle l'est davantage pour les faibles tensions que pour les tensions plus élevées. Dans la pratique, on utilise une loi de correspondance entre les tensions à l'entrée et à la sortie.

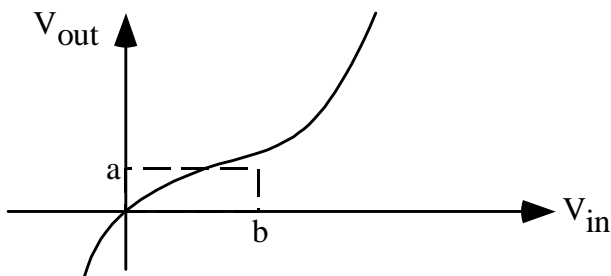
Il faut noter que l'effet des techniques de compression et d'expansion est pratiquement nul étant donné que la plupart des signaux audio ont de faibles amplitudes. Notons également que les modulations différentielles, dont l'ADPCM et la DPCM, sont des formes de compression de signaux analogiques numérisés, parce qu'elles nécessitent moins de bits pour effectuer le codage.



a) Aucune modification (ni compression, ni expansion)



b) Compression du signal



c) Expansion du signal

FIGURE 1.26**Compression et expansion d'un signal.**

SSB ADPCM (*Sub Band ADPCM*) est une méthode de transmission numérique de signaux audio de haute fidélité. La bande passante audio analogique va de 50 Hz à 7 kHz et les vitesses de transmission sont de 64 kb/s ou moins. Le signal audio est filtré en deux sous-bandes : l'une allant de 0,05 à 4 kHz, l'autre allant de 4 à 7 kHz. La première sous-bande est codée en ADPCM au rythme de 48 kb/s, la seconde est codée en ADPCM au rythme de 16 kb/s. Bien que cette méthode ait été conçue principalement pour numériser la parole, elle reproduit la musique de façon acceptable. L'algorithme de codage est défini dans la norme ITU-TSS G.722.

Il existe trois modes.

- En mode 1, le signal audio est transmis à la vitesse de 64 kb/s.
- En mode 2, le signal audio est transmis à la vitesse de 56 kb/s, faisant place à un canal de données auxiliaire de 8 kb/s.
- En mode 3, le signal audio est transmis à la vitesse de 48 kb/s et le canal de données fonctionne à la vitesse de 64 kb/s.

Le codage linéaire prédictif LPC (*Linear Predictive Coding*) fait usage d'un algorithme adaptatif pour numériser les sons de la voix avec un débit binaire très faible; la qualité obtenue est satisfaisante en téléphonie. Le codage linéaire prédictif LPC tient compte de certaines caractéristiques de la voix. Les *cordes vocales* vibrent et leur fréquence de vibration en hauteur est telle que leur extrémité se trouve en position ouverte ou fermée, selon que les pulsations d'air du poumon sont libérées ou non. Le *palais* et la *langue* influent également sur les conditions de résonance des ondes acoustiques libérées par la gorge. Un filtre numérique simule les cordes vocales. Lorsqu'il agit comme un analyseur, le filtre corrèle les sons reçus avec ceux qu'il génère et il extrait de la sorte des paramètres caractéristiques de la voix. Ces derniers paramètres constituent l'information transmise; ce sont les coefficients du filtre, la durée de la hauteur, l'amplitude, ainsi que des informations de synchronisation et de décision voix ou non-voix. Lorsqu'il agit en synthétiseur, les paramètres qui sont reçus du filtre servent à générer les sons désirés.

1.7.2 Compression de signaux vidéo

La plupart des méthodes de compression reposent sur le principe de la redondance des données. Pour illustrer notre propos, présentons la méthode dite *Run Length Coding*, appliquée à un signal vidéo. L'image vidéo est écrite comme dans un livre, ligne par ligne; l'écran phosphorescent est balayé par le rayon cathodique qui l'atteint. Lorsque l'information allant de la première ligne à la dernière ligne est reproduite par l'écran, l'écran « récrit une nouvelle page », c'est-à-dire que l'écran est balayé à nouveau à partir de la première ligne. La phosphorescence de l'écran permet de maintenir l'information lumineuse jusqu'au prochain balayage.

Une ligne d'écran – il y en a 525 dans le standard nord-américain NTSC – peut être décomposée en pixels. Chaque pixel représente un niveau de luminescence donné et il y a un nombre limité de pixels par ligne (646 en Amérique du Nord).

Supposons que nous voulions représenter chaque pixel de façon numérique, c'est-à-dire par 8 bits. Si le niveau de luminescence est maintenu pendant N pixels, il faut en théorie $8N$ bits pour représenter ce segment de luminescence constante. Une image vidéo conserve une certaine redondance de luminance : le mur que l'on voit derrière un personnage peut avoir une couleur uniforme. Si, plutôt que d'attribuer 8 bits par pixel, nous décidons de donner 18 bits par groupe de pixels, dix étant réservés à la représentation du chiffre N et huit pour le niveau de luminescence, il devient alors possible de représenter 2^{10} (soit 1024) pixels par 18 bits plutôt que par $8 * 1024 = 8192$ bits, pour autant que la luminosité de ces pixels soit uniforme.

Cette méthode exige des mémoires tampons de haute capacité, il est vrai, afin d'en gérer le codage et le décodage. Elle n'en demeure pas moins efficace.

1.7.3 Compression pour les télécopieurs

Les spécifications décrites dans les recommandations ITU-TSS définissent la transmission par télécopieur. La recommandation dite T.4 (groupe 3) est dédiée aux modems analogiques pour l'envoi de pages en moins de 30 secondes environ. La T.5 (groupe 4) convient à la transmission RNIS ou ISDN; chaque page est transmise en moins de quatre secondes.

La numérisation d'images (*scanning*) peut atteindre deux millions d'éléments d'images ou pels (*picture element*), en noir et blanc. La résolution d'images horizontale est de 8,05 pels/mm (204 pels/pouce). La résolution d'images verticale est de 3,85 pels/mm (98 pels/pouce) ou encore 7,7 pels/mm (196 pels/pouce).

Des méthodes de compression tenant compte des espaces blancs ou noirs consécutifs permettent de comprimer les données binaires jusqu'à dix fois plus. Le groupe 3 fait usage du code Huffman modifié. Le groupe 4 utilise la méthode MMR (*Modified-Modified Read*) qui est un codage correcteur d'erreurs.

1.7.4 Compression de données

La différence entre la compression de données et la compression de signaux audio ou vidéo, c'est que la reconstitution des bits doit être intégrale, sans quoi des informations pourraient être falsifiées, ce qu'on ne peut accepter pour des données importantes, telles les données bancaires, entre autres.

La *redondance de caractères binaires* permet de comprimer la quantité de bits représentant une information donnée : la compression de texte permet de représenter une information avec 50 % des bits seulement.

Le *codage en longueur de plages* (*run length encoding*) est également utilisé pour la compression de données. En effet, dans de nombreux types de données, il y a couramment des chaînes de symboles répétées (bits, nombres, etc.). On peut alors les remplacer par un marqueur spécial, non autorisé dans les données, suivi du symbole en question, suivi lui-même du nombre de répétitions de ce symbole. Si le marqueur spécial est présent dans les données, on le duplique.

Considérons par exemple la chaîne de chiffres décimaux suivants :

4250000000000000025385111111111111111187349000000000000000000023

Si on décide de prendre A comme marqueur et d'utiliser des nombres à deux chiffres comme facteur de répétition, la chaîne pourra être codée de la manière suivante :

425A01425385A11587349A02023

Dans ce cas, le codage en longueur de plage réduit de moitié la taille des données.

On peut également faire un *codage statistique* qui consiste à utiliser des codes courts pour représenter des symboles courants et des codes longs pour représenter des symboles plus rares. Ce principe est utilisé dans le code Morse qui permet de coder la lettre E avec un point (.) et la lettre Q avec trois tirets et un point (- - . -). C'est également le type de

codage statistique qu'utilisent le codage de Huffman et l'algorithme de Ziv-Lempel dans le programme *Compress* d'Unix.

1.8 SUPPORTS DE TRANSMISSION

Les principaux supports utilisés pour la transmission sont les suivants :

- les câbles électriques à paires torsadées
- les câbles électriques à paires torsadées blindés
- les câbles coaxiaux;
- les faisceaux hertziens;
- les liaisons par satellite;
- les fibres optiques.

1.8.1 Câble électrique à paires torsadées

On appelle paire symétrique une ligne composée de deux conducteurs ayant des caractéristiques physiques analogues. Le regroupement de plusieurs lignes à paires symétriques constitue un câble. Les câbles à paires symétriques sont des supports de transmission classiques.

Le câble électrique à paires torsadées (UTP pour *Unshielded Twisted Pair*), communément appelé paire torsadée, est le support de transmission le plus ancien, mais aussi le plus utilisé, en particulier dans le système téléphonique. Il peut également servir à transmettre des débits allant jusqu'à des dizaines de mégabits par seconde. Les signaux transmis à l'aide de ce support peuvent parcourir plusieurs kilomètres. Au delà de ces distances, il devient nécessaire de régénérer et de d'amplifier les signaux à l'aide de répéteurs placés le long de la ligne.

Une paire torsadée est composée de deux câbles de cuivre d'environ 1 mm de diamètre. Ils sont isolés l'un de l'autre avec du téflon et enroulés l'un sur l'autre de façon hélicoïdale. Cet enroulement autour de l'axe de symétrie est nécessaire pour réduire les interférences électromagnétiques parasites des deux câbles l'un sur l'autre.

La norme EIA/TIA 568 établit, pour la paire torsadée UTP catégorie 2, une vitesse de transmission de 2,5 Mb/s sur une distance de 100 mètres. Les catégories de câbles UTP 3, 4 et 5 sont respectivement destinées aux vitesses de 10, 20 et 100 Mb/s. L'impédance type du câble est de 100 ohms (Ω).

La technique dite HDSL (*High Speed Digital Subscriber Loop*) permet la transmission duplex à 1,5 Mb/s sur deux paires de fils UTP.

1.8.2 Câble électrique à paires torsadées blindé

Le câble électrique à paires torsadées blindé STP (*Shielded Twisted Pair*) présente une meilleure protection contre les interférences externes. Le câble bifilaire est entouré d'une tresse métallique qui est elle-même entourée d'une gaine plastique extérieure. La tresse

métallique est reliée à la masse et protège le câble bifilaire contre les effets d'induction des ondes électromagnétiques qui atteignent le câble.

La paire torsadée STP a généralement une impédance de $150\ \Omega$. De nouvelles techniques de traitement de signal permettent d'augmenter considérablement la bande passante transmise, donc la vitesse de transmission. La technique dite ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Loop*) permet de transmettre un signal téléphonique et un signal vidéo sur une paire de fils UTP.

1.8.3 Baluns

Les « baluns » (*BALanced to UNbalanced Interconnect*) sont des adaptateurs qui permettent de transférer le signal d'un fil téléphonique à un câble coaxial avec une excellente adaptation de l'impédance.

1.8.4 Câbles coaxiaux

On appelle paire coaxiale une ligne composée d'un conducteur central en cuivre entouré d'une enveloppe isolante cylindrique qui, elle-même, est le plus souvent enveloppée d'une tresse conductrice en cuivre. L'ensemble est enveloppé d'une gaine isolante en matière plastique ou en téflon. De par sa constitution, le câble coaxial présente une meilleure isolation électromagnétique que la paire torsadée, ce qui permet d'atteindre des débits plus élevés sur de plus longues distances. La figure 1.27 en fournit une illustration.

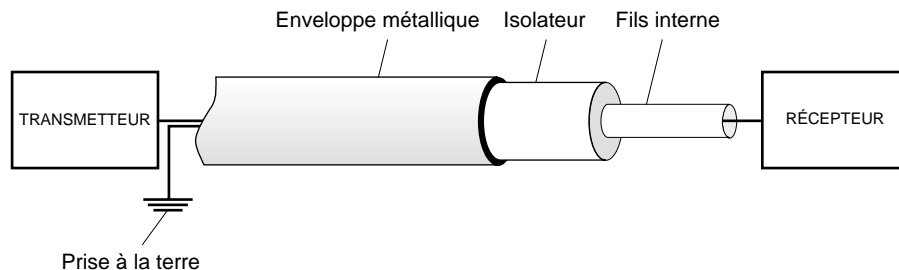


FIGURE 1.27

Exemple de câble coaxial.

Deux types de câbles sont largement utilisés. Le premier est utilisé pour la transmission des signaux numériques; il présente une impédance de $50\ \Omega$ et permet de transmettre de 1 à 2 Gb sur une longueur d'un kilomètre. Le second est utilisé pour la transmission de signaux analogiques; il présente une impédance de $75\ \Omega$ et il est également employé pour transmettre des signaux à large bande, de 300 à 500 mHz, comme le signal vidéo. Cependant, pour avoir une bonne qualité de transmission, il importe de ne pas les utiliser pour des fréquences inférieures à 60 kHz. Le regroupement de plusieurs câbles coaxiaux forme un tube coaxial.

1.8.5 Faisceaux hertziens

Un faisceau hertzien est un faisceau d'ondes radioélectriques dont les fréquences varient de 250 MHz à 30 GHz. La diffusion par ondes hertziennes permet la transmission d'informations en ligne droite⁴⁵, et à l'air libre, entre deux points normalement fixes. La figure 1.28 en donne une illustration.

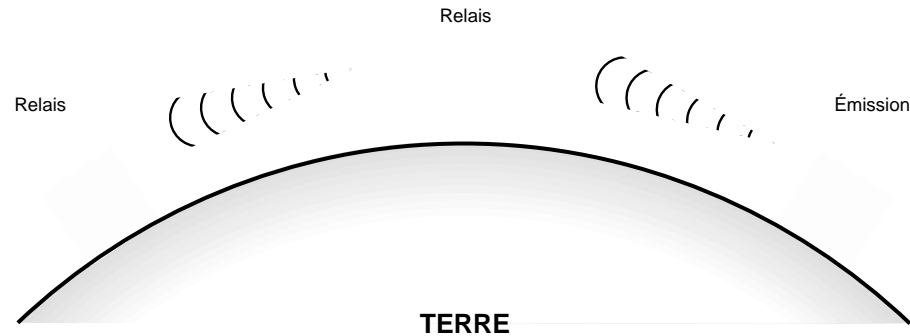


FIGURE 1.28

Principe de transmission des faisceaux hertziens.

Comme les faisceaux hertziens se propagent en ligne droite, les émetteurs et récepteurs doivent être placés en vue directe. Pour cela, ils sont placés au sommet de pylônes appelés tours hertziennes ou bien dans des endroits élevés.

Les faisceaux hertziens numériques permettent une transmission pouvant atteindre un débit binaire de 140 Mb/s. En raison de leurs capacités importantes, les faisceaux hertziens sont principalement utilisés pour les communications téléphoniques cellulaires, la transmission de données et les programmes de télévision, ainsi que pour les liaisons mobiles temporaires. De plus, ils sont très efficaces pour la transmission dans les endroits éloignés et dans les endroits difficiles d'accès. Des pays comme le Canada et la Russie les utilisent pour desservir de telles régions.

Étant donné que les ondes voyagent dans l'air, il suffit d'avoir un dispositif syntonisé à la même fréquence que ces signaux pour les détecter. En ayant une soucoupe d'une dimension déterminée, on peut aisément capter les signaux venant d'une station émettrice, à la condition de connaître la ou les fréquences des ondes émises.

Cette technologie fait concurrence aux câbles coaxiaux. Elle requiert cependant des relais de transmission tous les 80 km avec des tours de 100 m.

1.8.6 Liaisons par satellite

Le mode de propagation des ondes hertziennes peut rendre malaisée leur utilisation dans le contexte des communications à très grande distance. Par ailleurs, les problèmes d'affaiblissement du signal rendent nécessaire l'utilisation de stations relais. Ceci n'est

pas toujours facile, notamment dans le cas des communications intercontinentales où ces stations relais devraient se trouver en pleine mer. D'où l'idée d'utiliser des satellites pour relayer les ondes émises.

Un réseau de télécommunications par satellite se compose d'un satellite et d'un ensemble de stations terrestres, comme l'illustre la figure 1.29.

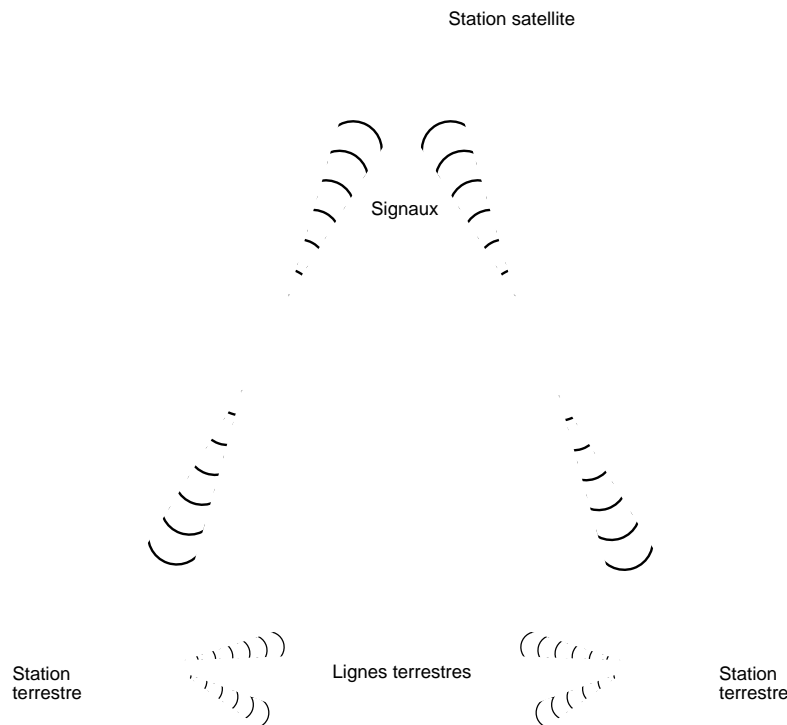


FIGURE 1.29

Exemple de télécommunications par satellite, au-dessus du Canada.

Le satellite est la partie centrale du réseau. Au début des années 60, le satellite n'était qu'un objet purement passif, une grande sphère réfléchissante se déplaçant dans le ciel. Sa seule fonction était de réfléchir l'énergie reçue; les résultats obtenus alors étaient médiocres, la capacité de transmission étant très faible, et l'idée fut abandonnée pendant quelque temps.

Le type de satellite utilisé actuellement est beaucoup plus performant. Bien que toujours de type passif, c'est-à-dire destiné essentiellement à réfléchir des signaux, il se comporte maintenant comme un véritable relais hertzien dans le ciel. Sur le véhicule proprement dit sont installés des équipements de télécommunications et des antennes. Le véhicule dispose en outre d'équipements de servitude assurant les fonctions suivantes :

- l'alimentation en énergie;
- le contrôle d'altitude;
- le contrôle d'orbite;
- le contrôle thermique des équipements;
- la télécommande et la télémessure.

Les équipements de télécommunications, que l'on appelle des répéteurs, assurent les mêmes fonctions qu'un relais hertzien ordinaire : ils reçoivent les émissions provenant de la Terre et les réémettent vers la Terre, après amplification et transposition en fréquence.

Une autre différence importante caractérise les satellites de télécommunications actuels. En effet, les premiers satellites de télécommunications étaient des satellites à défilement, c'est-à-dire qu'ils se déplaçaient sur des orbites basses, caractérisées par une altitude de l'ordre de 700 à 1500 km avec une vitesse de passage relativement grande et une durée de visibilité faible.

À l'opposé, les satellites de télécommunications actuels, sauf de très rares exceptions, décrivent une orbite circulaire dans le plan équatorial, à une altitude de 36 000 km, ce qui se traduit par une période de révolution autour de la Terre de 24 heures. Ils sont ainsi synchrones avec la rotation de la Terre sur elle-même et apparemment immobiles par rapport à un repère sur celle-ci. Cette caractéristique leur permet d'assurer en permanence la couverture d'une zone donnée, tout en simplifiant le travail des stations terrestres qui ne doivent plus poursuivre des satellites défilant à des vitesses angulaires importantes. C'est pourquoi on dit que les satellites actuels sont géostationnaires.

L'intérêt des télécommunications par satellite provient essentiellement de la rapidité et de la facilité avec lesquelles on peut mettre en place un réseau de transmission. En effet, avec un satellite géostationnaire apparaissant fixe par rapport à la surface de la Terre, on peut assurer d'un seul coup la couverture globale d'une zone définie et y placer les stations du réseau dans un ordre quelconque. L'infrastructure terrestre se réduit pratiquement aux stations terrestres et les moyens à mettre en œuvre sont indépendants des distances qui séparent les correspondants. On obtient ainsi un moyen de transmission de haute qualité, permettant d'acheminer simultanément une grande quantité de signaux.

1.8.7 Fibre optique et autres supports

Il existe d'autres supports de transmission de haute capacité, tels les guides d'ondes qui transmettent jusqu'à 230 000 canaux à voix. On peut également citer les fibres optiques et les câbles sous-marins, dont certains sont d'ailleurs eux-mêmes en fibre optique.

Attardons-nous un peu à ce dernier support de transmission qui gagne du terrain, en raison de sa grande capacité de transmission.

La structure physique de la fibre optique est telle qu'elle tend à supprimer la divergence naturelle de la lumière. La fibre emprisonne, pour ainsi dire, la lumière dans un guide étanche. L'affaiblissement de la puissance optique en fonction de la distance est alors très faible. Le diamètre de la fibre doit être petit pour minimiser les effets du type de transmission par réflexion totale, auquel on recourt. Idéalement, la totalité du flux

lumineux traverse la fibre. Cela assure un maximum de rapidité à la transmission et une très grande fidélité de la définition des impulsions lumineuses à leur réception.

Normalement, la puissance lumineuse diminue de moitié en parcourant des distances d'une dizaine de kilomètres. En divisant la puissance optique, on peut atteindre des distances bien supérieures et le recours à la technique des répéteurs permet d'augmenter encore cette distance. La fibre optique peut, par ailleurs, être recourbée; la lumière suit alors la courbure du guide sans perte sensible. On retrouve ainsi des bobines de fibre optique qui assurent le guidage de la lumière presque aussi bien que dans l'espace, en ligne droite, mais avec une bien plus grande efficacité.

Avant la découverte du laser et des émetteurs de lumière à semi-conducteurs comme les diodes électroluminescentes, le problème consistait à faire entrer dans la fibre la lumière produite par une source extérieure ou encore à produire la lumière directement dans la structure de guidage. Ces problèmes de production de lumière et de guidage par des rubans ou par des fibres sont de mieux en mieux résolus.

Quel que soit le type de fibre utilisé (il en existe plusieurs), on retrouve toujours un cœur, puis une gaine homogène, en verre également et présentant un indice de réfraction plus faible que celui du cœur afin de conserver toute la lumière dans le cœur. Enfin, un habillage opaque, protecteur et isolant enveloppe le tout.

La source lumineuse, à l'émission, peut être une diode ou un rayon laser, c'est-à-dire une source de très grande puissance, à fréquence simple et à rayon étroit. Le détecteur, à l'autre bout, est une photodiode ou un photo-transistor. La figure 1.30 illustre le principe de fonctionnement de la fibre optique.

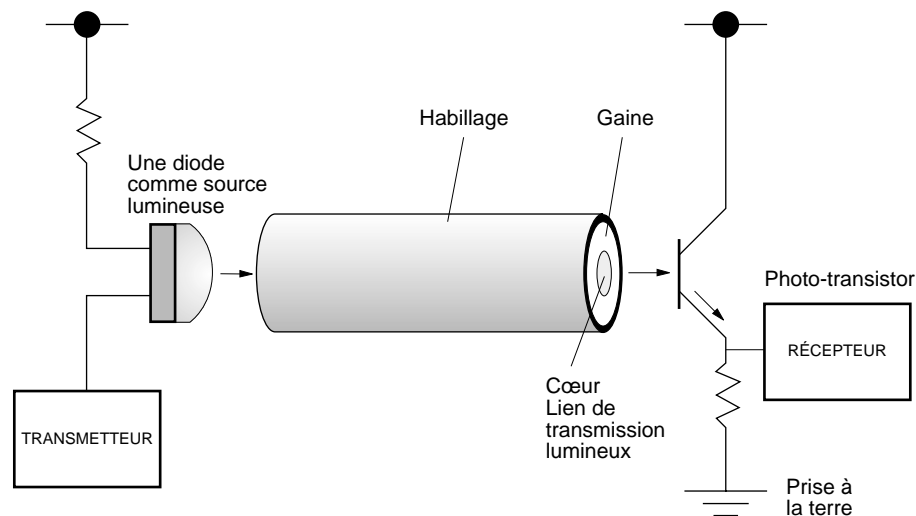
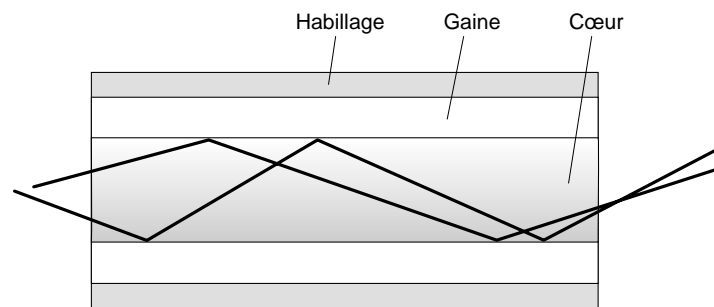


FIGURE 1.30

Principe de fonctionnement de la fibre optique.

On peut faire entrer et transmettre en même temps plusieurs ondes lumineuses dans une même fibre; ces ondes sont modulées indépendamment et différemment les unes des autres. On parle alors de *multiplexage* des lumières (figure 1.31). On peut également distribuer la lumière d'une fibre optique sur plusieurs autres fibres. On parle alors de *commutation* de la lumière entre fibres, et cela peut se faire à très grande vitesse.

Nous étudierons plus loin ces techniques de multiplexage et de commutation qui permettent d'augmenter le potentiel de communication dans les transmissions; retenons simplement ici que la fibre optique est particulièrement performante pour ce faire.



Segment d'une fibre optique

FIGURE 1.31

Parcours d'ondes lumineuses dans la fibre optique (multiplexage).

Les équipements en fibre optique peuvent être fabriqués à des coûts relativement peu élevés et fonctionner à des vitesses très grandes, ce qui les rend particulièrement utiles dans le cas de la mise sur pied de réseaux locaux. Mais la fibre est aussi le matériau employé pour les nouveaux câbles sous-marins transatlantiques T.A.T. (nom du câble) entre les États-Unis, l'Angleterre et la France. Ici, le système utilise comme support un type de fibre appelée monomode⁴⁶, qui est en silice; il recourt à la modulation MIC (ou PCM) par impulsions et codage, avec un seul format pour la voix, la vidéo et les données; il a une capacité brute de 7 680 voies téléphoniques ou leur équivalent, c'est-à-dire un débit de 274 Mb/s; la transmission en format numérique permet d'utiliser des concentrateurs (notion que nous étudierons au chapitre 2) qui portent la capacité réelle à six fois la capacité brute, c'est-à-dire autour de 40 000 voies téléphoniques effectives.

Outre ces réalisations ponctuelles, la fibre est le matériau rêvé pour la mise en œuvre du réseau numérique à intégration de services (RNIS).

En conclusion, on peut dire que le type de support de transmission utilisé dans les systèmes de communication dépend en grande partie des fréquences utilisées et du type d'information transportée. Les choix des fréquences pour un type particulier de transmission sont réglementés sur les plans national et international. Les réglementations définissent la façon dont le spectre peut être utilisé, et dont il doit l'être⁴⁷.

NOTES DE BAS DE PAGE

1. Nous ne prétendons pas ici nous prononcer sur la valeur bénéfique ou non, sur le plan moral ou sociétal de ces activités.
2. Nous empruntons cette formule à un ouvrage édité en 1990 par Time-Life Books : *Communications*.
3. On peut parler, dans ce cas, de numérisation de données provenant d'une source analogique.
4. Certains ordinateurs transforment les données binaires en base 16 (système hexadécimal; symboles de 0 à 9, puis de A à F), pour des raisons de lisibilité. On trouvera ici une table d'équivalence entre les systèmes décimal, binaire et hexadécimal.

Décimal	Binaire	Hexadécimal
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

5. Le code binaire, dans lequel les symboles permettant de représenter les données sont choisis dans un ensemble de deux éléments, est largement utilisé en informatique, en raison de la facilité des opérations mathématiques qu'il rend possibles.

Les deux symboles, 0 et 1, sont aussi appelés bits (de l'anglais *binary digit*). Pour la communication informatique, le bit constitue la plus petite unité séparable, donc l'unité de base.

Dans le code binaire, la représentation peut tenir compte d'une pondération équivalant à des puissances de 2 et correspondant à la position des symboles (1 ou 0) dans le nombre binaire; cette pondération est effectuée par colonne, en procédant par la fin du nombre (écrit en ligne). Le symbole 1, de droite à gauche d'un nombre binaire, obtient ainsi des valeurs passant de 1 (ou 2^0) à 2, 4, 8, etc.; le symbole 0, lui, représente toujours 0. Si l'on veut passer d'un nombre binaire à un nombre décimal, la lecture se fait en reconnaissant le poids respectif de chaque symbole, puis en additionnant le tout. Par exemple, le nombre binaire 1010 se traduit en décimal de la manière suivante :

$$(1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (0 \times 2^0) = 8 + 2 = 10$$

La table de conversion proposée à la note précédente permet de suivre la transcription en binaire des nombres décimaux de 0 à 15 (chiffres arabes de 0 à 9, puis nombres). De la même façon, il existe un code où la lettre E, la cinquième de l'alphabet, sera représentée par le nombre binaire correspondant au chiffre arabe 5, c'est-à-dire 0101 (précédé de préfixes variables, selon qu'il s'agit d'un codage du chiffre, de la lettre – majuscule ou minuscule –, ou encore de commandes; ces préfixes permettront d'opérer la distinction nécessaire au décodage). On vise ainsi une simplification de type logique, dans la représentation de l'information en langage machine. Le code en question est l'alphabet CCITT n° 5, ou code ASCII, que nous présentons dans cette même section.

6. Un octet (*byte*) est un regroupement de 8 bits.
7. Le CCITT est le Comité consultatif international télégraphique et téléphonique.
8. Nous traiterons au chapitre 2 (détection et correction d'erreurs), de ces éléments de contrôle; on retrouvera ce type d'unité dans le code ASCII (présence d'un bit pour le contrôle de parité), mais pas dans le code EBCDIC.
9. L'ISO est un organisme international de normalisation (International Standards Organization); nous en parlerons au chapitre 3.
10. Le moyen permettant cette transformation est appelé transducteur, ou convertisseur d'énergie, plutôt que codeur.
11. Le principe est le même pour la transmission des signaux visuels (formes, couleurs, images, etc.).
12. Cette courbe, également nommée sinusoïde ou onde sinusoïdale, a une forme que l'on pourrait qualifier en langage vulgaire d'« ondulée ».

La vague qui se forme lorsqu'on immerge un corps dans l'eau est un autre exemple d'onde sinusoïdale (onde mécanique, dans ce cas), se déplaçant de façon centrifuge, c'est-à-dire du centre vers les bords; ainsi, lorsqu'on met un bébé dans sa baignoire, on peut voir ses jouets monter ou descendre, en suivant la forme de l'onde déclenchée par la compression de l'eau qu'occasionne l'introduction du corps.

La sinusoïde représente, en fait, les variations de la fonction trigonométrique du sinus d'un angle.

13. On ne peut observer aucun exemple de ce type d'onde dans la nature, étant donné qu'il s'agit d'une représentation abstraite. Son existence n'en est pas moins réelle; ainsi, des sons générés à partir d'une onde carrée peuvent être joués par un synthétiseur musical, tout comme ceux qui sont associés aux ondes sinusoïdales.
14. Le caractère abstrait de l'onde carrée n'enlève rien à son intérêt. Jusqu'à la dernière décennie, les synthétiseurs musicaux s'appuyaient, pour la génération des sons, sur l'utilisation d'ondes carrées, modulées par d'autres ondes carrées ou par des ondes sinusoïdales, et filtrées de façon à respecter les caractéristiques d'enveloppe sonore (attaque, soutien, déclin, relâchement du son) propres aux différents instruments de musique.
15. Dans l'exemple de la baignoire (note 13), on pourrait s'amuser à compter le nombre de crêtes de vagues (équivalent brut du nombre de périodes) par seconde; on calculerait ainsi quelque chose d'équivalent à la fréquence (nombre de répétitions du signal dans un intervalle de temps donné).
16. La représentation d'une sinusoïde est faite d'une succession de portions de courbe que l'on représente alternativement au-dessus et au-dessous d'un axe horizontal, celui du temps. Un cycle est donc représenté par une sorte de « S » couché sur l'axe horizontal. Comme le montre la figure 1.7, un déplacement le long de la sinusoïde s'effectuerait d'abord sur la portion supérieure, pour les angles allant de 0° à 180° , puis sur la portion inférieure, pour les angles allant de 180° à 360° (cycle complet).
17. Dans le cas de la voix humaine, moins il y a compression de signaux dans l'intervalle de temps, c'est-à-dire plus la fréquence est basse, plus le son est grave. Inversement, plus la fréquence est élevée (haute fréquence), plus le son est aigu. Ainsi, si l'on fait tourner à 33 tours par minute l'enregistrement d'un ténor sur un disque calibré pour restituer la voix à 45 tours par minute, la voix du ténor ressemblera à celle d'une basse, alors qu'elle aura l'allure d'une voix de soprano si l'on fait tourner le disque à 78 tours.

La hauteur du son n'est cependant pas la seule à être modifiée par cette variation de fréquence; comme le montre notre exemple, la qualité du signal (son intelligibilité) dépend aussi des fréquences de transmission.

18. L'axe vertical, sur cette figure, représente l'axe de la tension ou voltage (V). Certains systèmes encodent l'information en faisant varier le niveau (ou amplitude) du courant électrique, c'est-à-dire le voltage (ou tension). Le voltage peut être imaginé par analogie à la pression physique; de la même façon que la pression de l'eau pousse celle-ci à circuler dans un tuyau, la pression des électrons, qui sont des composants des atomes, pousse ceux-ci à parcourir un conducteur (fil de cuivre ou autre), une résistance ou quelque autre composant électrique. Le voltage est donc, pour ainsi dire, la pression électrique soutenant le courant.
19. En musique, l'excursion dynamique de la trace de l'onde acoustique d'un fortissimo (son amplitude) serait plus ample que celle correspondant à un pianissimo, par exemple. Dans le cas de la voix humaine, alors que la fréquence correspond à la

qualité grave ou aiguë de la voix, l'amplitude se traduit par la force de la voix, du chuchotement au hurlement.

20. En anglais ISDN (*Integrated System Digital Network*).
21. Le « E » est codé en ASCII : les trois premiers symboles indiquent qu'il s'agit d'une majuscule, les quatre suivants sont le mot de code correspondant à la lettre. Pour simplifier, nous ne tenons pas compte sur cette figure du bit de parité, non plus que des bits de START et de STOP, qui encadreront l'octet formé des 7 bits du « E » et du bit de parité, lors d'une transmission asynchrone (voir section 1.3.1, figure 1.13).
22. Rappelons ici la définition des termes utilisés dans les deux paragraphes.
 - L'expression *train de bits* équivaut à « suite » de bits.
 - Un caractère est une lettre, un chiffre ou un signe quelconque, non obligatoirement alphanumérique. En alphabet CCITT n° 5 (code ASCII), le caractère est codé sur 7 bits.
 - Pour s'assurer de la sécurité des données, on adjoint généralement à cet ensemble de 7 bits, un *bit de contrôle*, que l'on appelle *bit de parité*, et dont la valeur permet de vérifier si le codage est correct, c'est-à-dire si l'on retrouve le bon compte de 0 et 1.
 - Quant à l'*octet*, rappelons-le, c'est un ensemble de 8 bits significatifs. L'ensemble d'un caractère codé sur 7 bits + 1 bit de parité forme un octet de données.
23. On dit parfois que le rythme de transmission est « calé » dans celui de l'horloge.
24. Chaque fil est susceptible de subir l'assaut de bruits (parasites, par exemple). Notons aussi que plus la vitesse de transmission augmente, ce qui est le cas dans la transmission en parallèle, plus la transmission est menacée par les interférences et plus le rapport signal/bruit est difficile à conserver à un niveau acceptable.
25. Même dans le cas de la transmission asynchrone, illustré à la figure 1.13, la transmission en série se fait bit par bit, à l'intérieur de chaque caractère.
26. La norme *Centronics*, qui n'est pas une norme réelle de droit, mais qui fonctionne comme une norme de fait, puisqu'elle est utilisée par la plupart des fabricants d'ordinateurs pour la connexion avec des imprimantes, pratique la transmission en parallèle, mais sur onze voies différentes. Huit voies servent pour la transmission simultanée des 8 bits de l'octet, et trois voies supplémentaires servent à la coordination des informations transmises. La norme IEEE 488 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), qui est utilisée entre autres dans les systèmes Hewlett Packard (HP) et Commodore, est aussi un exemple de port (ou sortie) parallèle.

Par contre, la RS232 (aussi nommée V24 par le CCITT, et sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir), qui a d'abord été conçue pour faciliter l'interconnexion de terminaux et de modems (appareils de transmission explicités ultérieurement), est un port série ou une sortie d'ordinateur qui permet la transmission des données en série. De là, entre autres, l'extrême attention que l'on doit porter à cette question en téléinformatique.
27. Quand des micro-ordinateurs communiquent entre eux ou avec un serveur, au moins partiellement par des réseaux téléphoniques ordinaires (réseau de voix), on peut dire

que leur station de données est composée : d'un terminal intelligent, d'un logiciel de communication (vérification de parité, affichage, etc.), d'une jonction assurée par un équipement d'interconnexion entre l'ordinateur et l'équipement de télécommunications (le modem), comme la RS232 dont nous reparlerons au chapitre 3 (on verra dans ce même chapitre comment s'effectue le dialogue entre les ETTD), et d'un modem.

28. Ensemble incluant le logiciel de communication, la jonction (ex. : prise RS232), le modem, la ligne téléphonique (et le réseau de voix ou de données) et l'équipement correspondant à l'autre bout de la liaison. C'est, finalement, tout ce qui est nécessaire pour sortir d'une station de travail en local.
 29. Si W est la largeur de bande et R la vitesse de signalisation : $R = 2W$.
 30. Le baud est l'unité de vitesse de modulation valant une impulsion par seconde.
 31. Le signal est l'élément signifiant dans le cadre d'un message, alors que le bruit est l'élément perturbateur. Le rapport signal/bruit doit donc être le plus grand possible, si l'on veut pouvoir disposer du maximum d'informations nécessaires à la compréhension du message.
 32. Néanmoins, par abus de langage et quoique à tort, la plupart des gens continuent à parler de débit, même dans le cas de transmission asynchrone.
 33. Ces états (valeurs différentes que peut prendre le signal pendant un intervalle de temps) sont 1 et 0, dans ce cas.
 34. On verra plus loin en quoi consiste la modulation (à partir de la section 1.6.2).
 35. Dans le cas de signaux quadrivalents, ces états peuvent être 00, 01, 10, 11. Cela signifie que pour transmettre les mêmes données, soit par exemple 10110001, un signal bivalent demandera 8 unités de temps (une par symbole) et un signal quadrivalent, 4 seulement (pour transmettre : 10, 11, 00, 01).
- Les techniques de codage sont variées, mais visent toutes à transmettre le maximum de données dans le minimum de temps, avec une utilisation optimale des supports.
36. Certains persistent à appeler à tort « modem » ce « codeur bande de base », alors qu'il n'y a ici aucune trace possible de modulation ou de démodulation. Le modem étant un matériel plus courant, on a ainsi tendance à qualifier de modem tout ETCD.
 37. Nous n'entrerons pas dans le détail des codages utilisés; mentionnons simplement qu'ils utilisent des codes à deux niveaux (+a, -a) ou à trois niveaux (+a, 0, -a) et que le codage NRZ (à deux niveaux) est, à la fois, le plus ancien et le plus simple.
 38. Voir les paragraphes consacrés à la transmission en mode synchrone (section 1.3.1).
 39. Il suffit de penser à la communication orale, où l'émission aussi bien que la réception deviennent difficiles dès que la distance dépasse une dizaine de mètres, rendant nécessaire; au fur et à mesure qu'elle s'accroît, le recours à des équipements de communication tels que le porte-voix, l'amplificateur ou le téléphone, par exemple.
 40. Le texte qui suit est largement inspiré de l'ouvrage de D. Bensoussan, *La modulation* (Dunod, 1980, Modules Teccart).

41. Dans la pratique cependant, certaines fréquences, à la limite de la bande, traversent le filtre. Il faut donc veiller, particulièrement en radio, non seulement à avoir des filtres de haute qualité, mais aussi à conserver une certaine marge de sécurité entre les bandes de fréquence allouées aux différents émetteurs, de façon qu'il n'y ait pas d'empiétement d'une bande sur l'autre.

42. Les modulations FM et PM sont appelées modulations angulaires ou exponentielles.

43. On remarquera que nous avons différencié, au début de ce chapitre, les signaux analogiques des signaux numériques, en disant que les signaux analogiques varient de façon continue en fonction du temps, alors que les signaux numériques varient de façon discontinue, le signal ne prenant qu'un nombre fini de valeurs. Il peut donc sembler paradoxal d'utiliser le terme analogique dans ce cas, la modulation s'effectuant ici par impulsions, et non de façon continue.

Il faut comprendre, dans le cas de la modulation analogique par impulsions, que si les signaux ne sont pas continus, leur modulation reste analogique puisqu'elle s'effectue proportionnellement aux caractéristiques (amplitude, durée, ou position) du message modulant.

On voit donc que le terme analogique prend un sens légèrement différent selon qu'il s'applique au signal (signal continu plutôt que discontinu) ou à la modulation (modulation proportionnelle au message modulant plutôt que codée). Dans les deux cas cependant, la notion d'analogie demeure centrale : analogie avec les caractéristiques du référent physique (la voix, par exemple) dans le premier cas, analogie avec les paramètres de l'onde modulante dans le second.

44. La modulation par impulsions codées est notamment utilisée afin d'échantillonner la voix et les sons d'instruments réels. Elle permet d'obtenir une grande qualité de reproduction de ces instruments (à la condition d'avoir un nombre suffisant de niveaux de quantification, ainsi qu'un taux d'échantillonnage suffisamment élevé). La modulation par impulsions codées est aussi utilisée pour la numérisation d'images de télévision couleur.

45. À la limite, il est presque faux de dire que les faisceaux hertziens ne transmettent qu'en ligne droite. On utilise un modèle en ligne droite pour les analyses de propagation, car on introduit un facteur K qui tient justement compte du rayon de courbure de la Terre.

46. On distingue trois grands types de fibre : la fibre à « saut d'indice » (de réfraction), dans laquelle il y a une franche discontinuité entre le « cœur » au centre du cylindre et la gaine extérieure (fibre multimode); la fibre à « gradient d'indice », où il y a une variation progressive de l'indice entre le centre du cœur et la gaine; la fibre « monomode » qui est une fibre à saut d'indice, possédant un cœur assez petit pour qu'il n'y ait qu'un seul mode de propagation guidé.

La fibre est fabriquée avec des matériaux optiquement transparents comme les verres. Actuellement, le plus performant est encore la silice, mais on cherche à réaliser de bonnes fibres à cœur de plastique et gainées de plastique.

47. Pour visualiser ces utilisations par rapport aux bandes de fréquence, reportez-vous au tableau du spectre électromagnétique (tableau 1.1, section 1.2.2).

RÉFÉRENCES

- BENSOUSSAN, D., Les principes technologiques de la téléinformatique, cours INF 6555, *Communications télématiques*, Télé-université, 1999.
- BUCHANAN, W., *Advanced Data Communications and Networks*, Chapman & Hall, 1997.
- Digital Modulation in Communication System - An Introduction*, Lightwave/Optical Communication Test Solutions, Hewlett Packard, 1998.
- GLAVIEUX, A. et JOINDOT, M., *Communications numériques, Introduction*, Paris, Masson, 1996.
- PUJOLLE, G., *Les réseaux*, Paris, Eyrolles, 1996.
- TANENBAUM, A., *Réseaux*, InterÉdition Paris, Prentice Hall, 1997, 3^e édition.