



Institut MONTEFIORE
Service de Télécommunications et d'Imagerie

Technologies du multimédia, des télécommunications et de l'Internet

Dr. Marc VAN DROOGENBROECK

Juin 2004 (version 7.73)

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Multimédia et hypertexte	1
1.1.1	Structure du document	1
1.1.2	Définitions	2
1.2	Normalisation	4
1.2.1	Définition	4
	Certification	5
1.2.2	Organismes de normalisation	6
	Structure d'un groupe de normalisation	7
	Groupes de normalisation industriels	7
	Phases du développement d'une norme	8
1.2.3	Exemples de normes	8
	Numérotation des comptes bancaires	8
	Norme de compression vidéo : MPEG	9
	Normes de qualité : ISO 9000	9
1.3	Internet	9
1.3.1	Les structures	9
1.3.2	La vision d'Internet	14
2	Les signaux multimédia	19
2.1	Introduction	19
2.2	Les signaux analogiques de base	19
2.2.1	Son	19
	Ton ou hauteur tonale	21
	Intensité	23
	Timbre	23
	Durée	23
	L'analyse en fréquences et la transformée de Fourier	24
	La synthèse musicale.	24
2.2.2	Image et vidéo	25
	Le système visuel humain	25
	La lumière	25
	Les espaces de couleurs	26

	L'espace de couleurs additif RGB.	27
	Vers d'autres systèmes de couleurs : le système XYZ.	27
	L'espace de couleurs soustractifs CMY.	33
	D'autres systèmes de couleurs.	33
	Les systèmes de couleurs en pratique.	33
	Les fausses couleurs.	35
	La couleur des objets	35
	Normalisation des couleurs	37
	Signal vidéo	37
2.3	La numérisation	39
2.3.1	Signaux analogiques ou numériques	39
2.3.2	Le pourquoi	40
2.3.3	Processus de numérisation	42
2.3.4	Échantillonnage	42
	Filtrage et repli de spectre	44
2.3.5	Quantification	45
2.3.6	Passage de l'analogique au numérique et conversion inverse	50
2.3.7	Résumé	51
2.3.8	Faut-il préférer le numérique à l'analogique ?	51
2.4	Éléments de la théorie de l'information	51
2.4.1	Principe de la compression	51
2.4.2	Mesure de l'information	52
2.4.3	Notion d'entropie	52
2.4.4	Codage	55
2.5	La compression	55
2.5.1	Compression sans perte	55
2.5.2	Compression avec pertes	56
2.6	Classification de l'ensemble des techniques de compression	56
2.6.1	Compression de données textuelles	56
	Codage de HUFFMAN	57
2.6.2	Compression audio	58
2.6.3	Le délicat problème de la protection des droits d'auteur	61
2.6.4	Compression image	61
	Norme JPEG2000	65
	Autres formats	65
2.6.5	Compression vidéo	65
	Multiplexage des données	67
	MPEG-2 : les notions de profils et de niveaux	68
	MPEG-2 : "program stream" et "transport stream"	68
	MPEG-4 : une norme pour les faibles débits	68
	MPEG-7 : une norme pour caractériser le contenu vidéo	68
	MPEG-21 : une norme pour interfacer des objets multimédia	69
	Le format QuickTime	69

2.7	Formats et conversion	69
2.7.1	Audio	69
2.7.2	Image	70
	Interface graphique	70
	Applications sur ordinateur	70
	Le format GIF (extension *.gif).	70
	Le format PNG (extension *.png).	71
	Le format SPIFF (extension *.jpg).	71
	Le format TIFF (extension *.tiff).	71
	Le format FlashPix.	71
	Applications génériques	71
	Le format CGM.	71
	Le format EPS (extension *.ps ou *.eps).	72
	Le format PDF.	72
	Comment reconnaître un format ?	72
2.7.3	Vidéo	72
	Codeurs en cascade et transcodage	73
	Marquage et chiffrement	74
2.8	Autres types de signaux	75
2.8.1	Quelques normes concernant le texte	75
2.8.2	Formats des documents électroniques	75
	Langages de balisage	76
	Création de pages dynamiques : javascript, java, PHP	76
2.8.3	La synchronisation	78
2.8.4	Réalité virtuelle	78
	Reconnaissance et synthèse vocales	79
2.9	Quelques exemples de normes	79
2.9.1	La vidéoconférence	79
2.9.2	Applications médicales : la norme DICOM 3.0	80
3	Des réseaux pour communiquer	83
3.1	Aspect logique des transmissions : modèles de référence	86
3.1.1	Modèle de référence OSI	86
3.1.2	Modèle Internet	89
	La gestion nominative des adresses par DNS	90
3.1.3	D'autres modèles	92
3.2	Éléments relatifs à la couche physique	92
3.2.1	Efficacité spectrale	93
3.2.2	Quelle bande de fréquences pour la représentation analogique ?	93
3.2.3	Modulation	94
	Modulation d'amplitude classique	94
	Analyse spectrale	95
	Modulation angulaire	96

	Illustration des techniques de modulation	97
3.2.4	Multiplexage et accès au multiplex	98
	Multiplexage	98
	Accès multiple	98
	Multiplexage par répartition en fréquences	98
	Principe.	98
	Accès au multiplex.	100
	Multiplexage par répartition temporelle	101
	Principe.	101
	Accès au multiplex.	102
	Multiplexage par répartition de codes	103
	Principe.	103
	Combinaison de techniques de multiplexage	103
	Quid des licences GSM et UMTS ?	104
3.3	Réseaux téléphoniques et réseaux de télédistribution	104
3.3.1	Le réseau téléphonique	104
	Le réseau numérique à intégration de services	108
	Transmission ADSL	109
3.3.2	Réseaux de télédistribution	109
3.3.3	Communications sans fil	110
	Les transmissions par satellite	111
	La norme Global System for Mobile Communications (GSM)	114
	La boucle locale radio	120
3.4	Réseaux de transmission de données	120
3.4.1	Le réseau téléphonique pour accéder à Internet	121
	Technologies de transmission à haut débit : ADSL	121
	Variantes de l'ADSL	121
3.4.2	Réseaux locaux ou LANs (Local Area Network)	121
	Ethernet	125
	Token ring	125
	Les réseaux privés sans fil	128
	La technologie Bluetooth.	128
3.4.3	Conclusions	128
	Le futur ?	130
	À propos d'Internet	130
3.5	Services réseau	131
3.5.1	Le Web et le protocole HTTP	131
	Le WAP et l'i-mode : deux variantes pour l'accès à Internet dans des réseaux mobiles	131
3.5.2	Messagerie électronique	133
3.5.3	Transfert de fichiers	135
3.5.4	Téléphonie sur IP	135
3.5.5	Télévision interactive	136

	Historique	136
	Typologie de la télévision interactive	136
	Protocoles de transmission et serveurs	140
3.6	Sécurité et cryptographie	141
3.6.1	Chiffrement	141
	Algorithmes à clef secrète ou publique	141
	De l'usage des algorithmes de chiffrement	142
3.6.2	Fonctions cryptographiques	143
3.6.3	La sécurité dans les réseaux	146
	Modèle de référence	146
	Authentification lors de l'établissement d'une connexion à Internet	148
	Lien entre un réseau d'entreprise et Internet	152
	Fonctions spécifiques aux réseaux	155
4	Matériel informatique	159
4.1	Le matériel	160
4.1.1	Processeur	160
4.1.2	Carte graphique	160
4.1.3	Carte son	161
4.1.4	Micro	164
4.1.5	Haut-parleurs	164
4.1.6	Appareil photo numérique	164
4.1.7	Caméra	164
4.1.8	Technologies de stockage	166
	Procédés de stockage analogiques	166
	Procédés de stockage numériques	167
	Procédés de stockage informatiques	168
4.2	Informatique de réseau	171
	Glossaire	178

Chapitre 1

Introduction

Sans prétendre vouloir détailler complètement la technologie, tâche ardue en soi, ce document présente les concepts qui permettent de cerner le domaine du multimédia. L’objectif de ce document est multiple :

- fournir un aperçu des technologies utilisées dans le monde du multimédia,
- apprendre à mener un raisonnement “multimédia”,
- comprendre l’évolution en cours,
- identifier une série d’éléments importants, comme la numérisation, et
- démystifier le multimédia et bon nombre de ses acronymes.

L’axe étant technologique, ce document ne décrit pas les techniques de création ou de rédaction de scénarios. Enfin, les éléments économiques sont également laissés de côté bien qu’il s’agisse d’un élément essentiel pour la mise en œuvre de tout système multimédia.

1.1 Multimédia et hypertexte

1.1.1 Structure du document

Pour bien comprendre les enjeux du monde multimédia, nous représentons ses principaux acteurs technologiques (ils sont repris à la figure 1.1). Par ailleurs, ce document est articulé autour des acteurs technologiques du multimédia que voici :

Signaux multimédia. La technologie s’est développée principalement dans le but de diversifier la forme de présentation de l’information, d’aller bien au-delà de ce que pouvait offrir un livre. Ce faisant, elle comprend à la fois de l’information textuelle, des images, jusqu’à inclure des animations. L’étude des types d’information fait l’objet du chapitre 2.

Réseaux de télécommunications. Le réseau téléphonique fut le premier réseau grand public de communication. Ayant ses propres contraintes, le multimédia s’accommode plus difficilement de ce réseau ; il lui préfère le réseau de transmission de données qu’est le réseau Internet. On n’imagine plus aujourd’hui de parler multimédia sans aborder l’aspect réseau. Nous analyserons les différents types de réseaux et leurs caractéristiques dans le chapitre 3.

Informatique. Les progrès de l’informatique ont été fulgurants ces dernières années. La convivialité des outils logiciels facilite l’apprentissage de l’usage de l’ordinateur par un nombre croissant d’utilisateurs alors que la puissance des micro-processeurs double chaque année. Nous présentons les composantes informatiques au chapitre 4.

Normalisation. Enfin, un échange d’information n’est possible que s’il existe un “langage” commun, ce qui dans le monde technique s’appelle des normes ou standards¹. Par ailleurs, la figure 1.1 en reprend quelques-unes (SGML, MPEG, ...). Le sujet de la normalisation est traité plus loin.

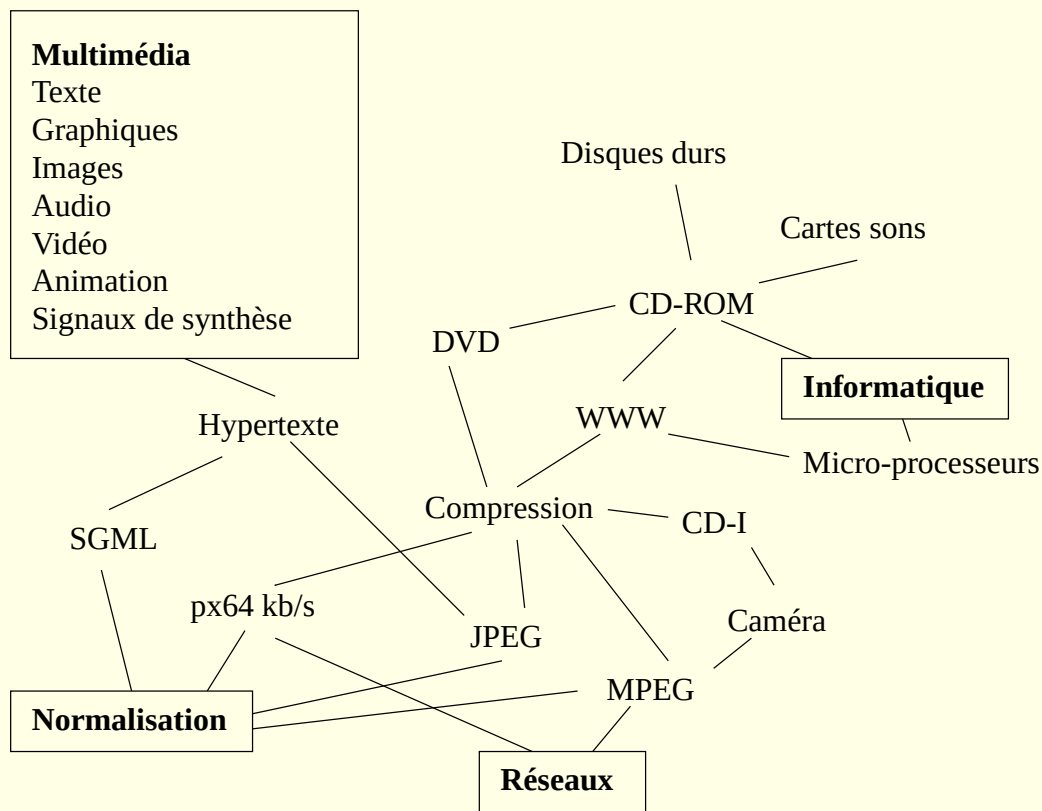


FIG. 1.1 – Les acteurs technologiques du monde multimédia.

1.1.2 Définitions

Le terme **Multimédia** est défini de diverses façons. Pour certains, il est synonyme de jeu sur ordinateur ; pour d’autres, il s’agit de la réunion de médias tels que le son et l’image, tous contrôlés par un ordinateur personnel.

¹Les textes officiels privilégient le mot *norme* au mot *standard*. Certains auteurs font la distinction entre un *standard*, considéré comme un ensemble de règles imposé par un constructeur, et une *norme* résultant d’un accord entre constructeurs. Dans ce document, nous considérons que ces deux mots sont synonymes.

Suivant le sens le plus utilisé, un signal multimédia se caractérise par l'intégration d'au moins deux signaux parmi le texte, les graphiques, les images, le son et les séquences vidéo. Ce sens s'étend lentement pour inclure la notion d'interactivité. Ainsi, un signal de télévision n'est plus considéré comme un signal multimédia pour la simple raison que l'interactivité offerte est inexistante. On pourrait donc définir un document multimédia comme suit.

Définition 1 *Un document multimédia est un document interactif qui comprend au moins deux signaux de type différent.*

Interactivité.

Revenons un instant à la notion d'interactivité car c'est elle qui est véritablement à l'origine de l'explosion du multimédia. Qu'elle soit locale –c'-à-d. qu'aucun signal n'est envoyé en retour sur un réseau– ou de réseau, l'interactivité modifie considérablement l'attitude du lecteur.

Les documents écrits tels que nous les connaissons se présentent sous une forme linéaire ; le lecteur les parcourt dans un ordre unique et pré-établi. L'hypertexte est par essence non-séquentiel car il offre plusieurs moyens de parcourir l'information. Voici une définition possible.

Définition 2 *Un document hypertexte est un document multimédia structuré de manière non séquentielle. On parle aussi d'hypermédia.*

La figure 1.2 illustre le principe de l'hypertexte. Supposons que la page **A** soit la première page du document. À partir de là, la structure hypertexte est telle que le lecteur peut choisir entre les pages **B** ou **F**. La page **B** conduit alors à **F** ou **C**. Par contre, il n'est plus possible de consulter **B** sitôt que **F** a été lue ; le seul point d'accès à **B** est la page de départ **A**.

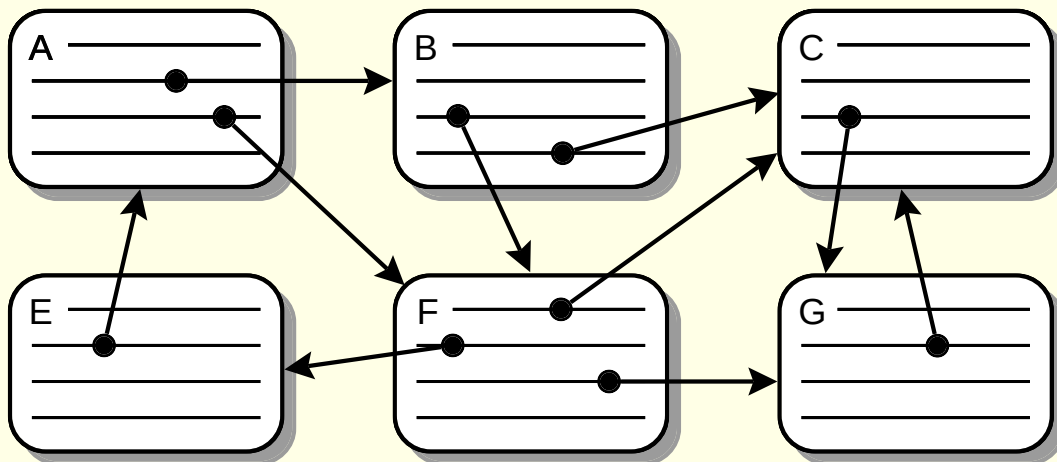


FIG. 1.2 – Exemple de structure hypertexte comprenant 6 nœuds et 10 liens.

L'hypertexte présente donc plusieurs choix au lecteur ; c'est lui qui choisit l'ordre entre les pages, appelées nœuds, en activant des liens.

On imagine sans peine la complexification subséquente à la création d'un document hypertexte par rapport à un simple texte. Il faut veiller à assurer une cohérence entre les pages parcourues sachant qu'il y a plusieurs possibilités de lecture, à permettre un retour en arrière, à définir des moteurs de recherche, etc.

De nos jours, les pages sont plus qu'un simple flot de texte. Elles comprennent des graphiques, des images, des animations audiovisuelles voire des questionnaires ; leur structure et leur contenu sont établis sur base d'un scénario de navigation. Avec le réseau Internet, ces pages sont même dispersées à travers le monde entier. Il faut donc recourir à des outils d'indexation et des moteurs de recherche pour retrouver certaines informations précises.

Il va de soi que pour en arriver là il a fallu fixer des formats, établir des règles de dialogue entre machines et résoudre les questions de communication à travers les réseaux de télécommunications. L'établissement de ces règles est le but de la normalisation qui fait l'objet de la prochaine section.

1.2 Normalisation

1.2.1 Définition

La normalisation, ou standardisation, joue un rôle essentiel dans le développement de produits, car elle s'applique aussi bien au format du papier, qu'au matériel, logiciel, couleur, interface et même à la qualité de la production (cf. famille des normes ISO 9000). Voici sa définition.

Définition 3 *La normalisation est un processus politique, économique et technologique qui consiste à établir un ensemble de règles.*

En pratique, il faut bien constater que le politique se désintéresse progressivement de la question, laissant le champ libre aux industriels.

Le travail de normalisation résulte en normes que l'ISO définit comme suit :

Définition 4 *Les normes sont des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques pour assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à leur emploi.*

On distingue les standards de facto, improprement appelés standards car ils sont imposés par un constructeur unique, des standards officiels qui eux résultent d'un consensus. La [tableau 1.1](#) reprend quelques avantages et inconvénients de ces deux types de standard.

Question 5 *Faut-il préférer un produit répondant à des normes ?*

Réponse

La réponse est oui dans la majorité des cas. L'utilisateur peut ainsi espérer une meilleure intégration du produit dans des solutions tant matérielles que par logiciel. Il y a malheureusement

Standards de facto	Standards officiels
Avantages * Conçus rapidement * Solution optimale * Possibilité de tailler un standard sur mesure en fonction d'une application	Inconvénients * Long temps de développement (de 3 à 5 ans) * Compromis technique * Généricité qui ne peut pas être adaptée à une application précise * Complexité élevée * Conflits entre intervenants
Inconvénients * Possibilité d'erreur plus grande * Manque de clarté * Manque de compétition en raison des droits de propriété * Diversité des solutions pour un même type d'application	Avantages * Développement par un large panel d'experts * Spécifications complètes et non ambiguës * Contrôle du standard confié à un organisme plutôt qu'à une entreprise * Possibilité de certification accrue

TAB. 1.1 – Comparaison entre standards de facto et standards officiels.

des cas où seul un produit non conforme à des normes est disponible ou, pire, où un constructeur dispose d'un monopole de marché. ■

Pour l'utilisateur, le souci de s'affranchir d'un fournisseur unique et d'avoir les garanties d'un produit durable prime. Quant aux industriels, ils cherchent à vendre des produits ou des composants les plus universels possibles, c'est-à-dire susceptibles de faire partie d'un système complexe fourni par un tiers. La décision de participer ou non à une activité de normalisation est un choix stratégique qui nécessite de peser le pour et le contre. On constate néanmoins que, ces dernières années, plusieurs grands groupes industriels ont décidé de participer activement à des activités de normalisation.

Il convient aussi de ne pas associer normalisation à uniformisation ! En effet, une **norme** acceptable est par définition une norme qui permet une différenciation des produits. Un texte normatif est certes contraignant mais les contraintes portent essentiellement sur des notions telles l'interfaçage. Autrement dit, une norme ne s'immisce pas dans le processus de fabrication.

Certification

Au sens strict, la **certification** est l'opération qui consiste à vérifier que des produits, matériaux, services, systèmes ou individus sont conformes aux spécifications d'une norme pertinente. Par exemple, un client peut vouloir vérifier l'aptitude à l'emploi requise du produit qu'il a commandé auprès d'un fournisseur. L'une des procédures les plus efficaces est de s'appuyer sur les spécifications du produit lorsqu'elles sont définies dans une norme internationale ; la plupart des normes actuelles prévoient un chapitre spécifiquement lié à la certification. Ainsi, le fournisseur

comme le client, du fait qu'ils utilisent les mêmes références, sont en mesure de se protéger mutuellement.

Aujourd'hui, nombre de produits nécessitent des essais de conformité à des spécifications ou à des règlements de sécurité avant d'être commercialisés. Même les produits les plus simples peuvent nécessiter une documentation technique comprenant des données d'essais. En pratique, des tiers spécialisés proposent des services d'essais de certification. Il arrive aussi que la législation nationale exige que de tels essais soient effectués par des organismes indépendants, notamment lorsque les produits concernés touchent à la santé et à l'environnement. En fait, l'évaluation de la conformité, élément désormais important du commerce mondial, est le plus souvent effectuée par des organisations spécialisées telles que des organismes de contrôle et de certification et des laboratoires d'essais.

1.2.2 Organismes de normalisation

Des organismes de normalisation ont été créés avec pour mission de définir des standards pour permettre l'intégration d'éléments provenant de fournisseurs distincts, mais aussi d'établir une concurrence plus saine.

D'une manière générale, le secteur de télécommunications a une longue habitude en normalisation. Parmi les organismes importants, citons l'International Telecommunications Union (ITU²), qui est une agence spéciale des Nations-Unies –à ce titre, toute décision engage les gouvernements des pays membres à s'y plier–, et l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI³), un organisme européen, créé en 1989 pour contrebalancer l'influence du groupe de normalisation américain ANSI⁴, à l'initiative du Conseil des ministres. C'est l'ITU qui a développé une série de recommandations, appelée série V, décrivant la connexion d'un modem à un réseau téléphonique. Pour sa part, l'ETSI a développé entre autres l'Euro-RNIS et la norme GSM.

Pour des domaines plus récents et plus complexes comme le multimédia, la situation est plus confuse dans la mesure où les acteurs sont plus nombreux. Jusqu'il y a peu, les standards développés dans le monde informatique par les organismes de normalisation décrivaient soit les éléments internes à un ordinateur, soit les connecteurs. C'est en partie ce type de standard (Ethernet, . . .) qu'a développé l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Le groupe le plus connu pour ses activités dans le domaine informatique est cependant l'International Organisation for Standardisation (ISO⁵). Par exemple, la norme MPEG⁶ sur laquelle nous reviendrons au point 2.6.5, est le fruit de l'ISO.

Les tableaux 1.2 et 1.3 reprennent quelques groupes de normalisation internationaux et régionaux.

²<http://www.itu.int>

³<http://www.etsi.org>

⁴<http://www.ansi.org>

⁵<http://www.iso.ch>

⁶<http://mpeg.telecomitalia.com/>

ISO	International Organisation for Standardisation
IEC	Commission Électronique Internationale
ITU	Union Internationale des Télécommunications
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
IAU	International Astronomical Union
IFIP	International Federation for Information Processing
IPA	International Prepress association

TAB. 1.2 – Quelques groupes de normalisation internationaux.

CEN	European Committee for Standardisation
CENELEC	European Committee for Electrical Standardisation
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

TAB. 1.3 – Quelques groupes de normalisation régionaux.

Structure d'un groupe de normalisation

Les groupes de normalisation ont tous une structure différente. Cette structure comprend généralement un secrétariat et une série de domaines techniques dans lesquels œuvrent une série de sous-groupes organisés hiérarchiquement. Ainsi, l'ISO est organisé en **Technical Committees**, puis en **Sub-Committees** et finalement en **Working Groups**. Voici, en guise d'illustration, la structure organisationnelle de quelques groupes de l'ISO :

- JTC1/SC29 (Picture and audio coding)/WG10 (**JPEG**), WG11 (**MPEG**)
- JTC1/SC24 (Computers and Imaginery)/WG6 Computer Graphics Metafile

Groupes de normalisation industriels

Si les groupes de normalisation sont jugés indispensables, les industriels leur reprochent en général leur lenteur procédurale. Différentes initiatives privées ont ainsi vu le jour. Citons l'ATM Forum, le Digital Audio-VIsual Council (**DIGITAL AUDIO VISUAL COUNCIL**⁷), l'Object Management Group (OMG) et le Wireless Access Protocol Forum (**WAP FORUM**⁸) dont les objectifs respectifs sont la finition des normes **ATM**, la définition d'infrastructure complète de service multimédia interactif, la normalisation des environnements de programmation orientées objet sur réseau et les protocoles Internet dans les réseaux mobiles.

⁷<http://www.davic.org>

⁸<http://www.wapforum.org>

À cela il convient encore d'ajouter les standards du marché, qui n'ont fait l'objet d'aucun processus de normalisation mais dont l'usage est devenu incontournable.

Le multimédia est à l'origine de nouvelles tendances en matière de normalisation. Jusqu'il y a peu, on normalisait uniquement un composant d'un système. Pour un système de vidéoconférence, cela signifie qu'une norme est définie pour le son, une autre pour la vidéo, une autre encore pour les signaux de synchronisation, etc. Dans ces conditions, il aurait été difficile de s'assurer de la compatibilité d'équipements si l'ITU n'avait pas défini les normes H.32x qui chapeautent les différents composants d'un système de vidéoconférence (cf. 2.9.1 pour plus de détails sur ces normes). C'est également la motivation de la création du groupe **DAVIC** : définir un ensemble cohérent de normes permettant de fournir un service de télévision interactif, quitte à choisir si plusieurs normes couvrent le même composant.

Phases du développement d'une norme

Une norme ne se développe pas en une phase unique. La phase ultime est le statut de standard international. Avant d'en arriver là, une norme en cours de développement de l'ISO passe successivement par les étapes suivantes :

- Working Draft (WD)
- Committee Draft (CD)
- Draft International Standard (DIS)
- International Standard (IS)

Chaque document intermédiaire est analysé et corrigé. Le DIS est soumis pour vote aux instances nationales. En Belgique, c'est l'Institut Belge de Normalisation (IBN⁹) qui fournit un avis définitif. Une norme au statut de standard international n'est plus modifiable. Néanmoins, il n'est pas rare qu'on y apporte quelques amendements ou corrections, appelées *corrigendum*.

Signalons que chaque standard a un numéro unique ; c'est l'identifiant de la norme.

1.2.3 Exemples de normes

Voici quelques exemples de normes :

- la format A4 papier est une norme ISO
- la série V de l'ITU définit les modes connexion d'un modem au réseau téléphonique (**V90**, ...)
- les familles H32x définissent des normes de vidéoconférence
- les langages **HTML**, **XML**
- les numéros **ISBN**, ...

Numérotation des comptes bancaires

Pour faciliter les paiements transfrontaliers, l'**ISO** a défini la norme ISO-13616 "International Bank Account Number" (**IBAN**) pour l'uniformisation des numéros de compte bancaire.

⁹<http://www.ibn.be>

L'IBAN se compose se compose de 3 parties :

1. du code ISO du pays où le compte est tenu (2 lettres)
2. d'un chiffre de contrôle (2 chiffres) et
3. de l'actuel numéro de compte national.

Un exemple de conversion des numéros de compte bancaires est illustré par le tableau 1.4.

Pays	Numéro de compte	IBAN
Belgique	001-1234567-89	BE62 0011 2345 6789
France	20041 01005 0500013M026 06	FR14 2004 1010 0505 0001 3M02 606
Pays-Bas	041 71 64 300	NL91 ABNA 0417 1643 00

TAB. 1.4 – Exemple de conversion de numéros de compte nationaux en numéros IBAN.

Norme de compression vidéo : MPEG

Contrairement à la plupart des normes, les normes MPEG sont constituées de plusieurs volets. Ainsi, le tableau 1.5 reprend quelques normes issues du groupe MPEG de l'ISO¹⁰ ; ce tableau montre plus spécifiquement les volets des normes MPEG-1 et MPEG-2.

Il apparaît que la norme MPEG-1 est composée d'une partie système, vidéo, audio, conformité et simulation par logiciel. La partie 3 de cette norme est utilisée également en dehors du contexte de la vidéo ; c'est ce volet qui porte le nom plus connu de MP3. Il faut veiller à ne pas confondre MP3 avec le projet MPEG-3 qui s'adressait à la télévision haute définition et qui a été fusionné avec MPEG-2 lors du développement de la norme MPEG-2.

Normes de qualité : ISO 9000

Les normes de qualité ISO 9000 constituent une référence incontestable en matière de qualité. Le tableau 1.6 résume le contenu des différentes parties de la norme 9000.

La norme est ensuite déclinée suivant le secteur d'activités. Les normes applicables aux différents secteurs sont reprises dans le tableau 1.7.

1.3 Internet

1.3.1 Les structures

Le cas du développement du réseau mondial Internet est assez particulier. À la fois parce qu'il a été fulgurant et parce qu'il n'y a pas d'autorité unique qui gère la totalité du réseau.

La complexité des structures était telle que, pour faciliter la coordination des groupes, on a créé l'Internet Society (ISOC¹¹) en 1992. L'ISOC est une association sans but lucratif qui

¹⁰ Les nombres sont les identifi euridenti antss des normes dont le nom générique est de type MPEG-X.

¹¹ <http://info.isoc.org>

11172	Coding of moving pictures and associated audio at up to about 1.5 [Mb/s]
MPEG-1	Part 1 Systems
	Part 2 Video
	Part 3 Audio
	Part 4 Conformance testing
	Part 5 Software simulation
13818	Generic coding of moving pictures and associated audio
MPEG-2	Part 1 Systems
	Part 2 Video
	Part 3 Audio
	Part 4 Conformance testing
	Part 5 Software simulation
	Part 6 System extensions - DSM-CC
	Part 7 Audio extension - NBC mode
	Part 8 VOID - (withdrawn)
	Part 9 System extension RTI
	Part 10 Conformance extension - DSM-CC
14496	Coding of audio-visual objects (MPEG-4)
15938	Multimedia Content Description Interface (MPEG-7)

TAB. 1.5 – Normes MPEG.

Normes et lignes directrices	Objets
ISO 9000-1, Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité - Partie 1 : Lignes directrices pour leur sélection et utilisation	Point de départ pour comprendre et sélectionner les normes répondant à vos besoins.
ISO 9000-2, Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité - Partie 2 : Lignes directrices génériques pour l'application de l'ISO 9001, l'ISO 9002 et l'ISO 9003	Aide à l'interprétation et à l'application de ISO 9001, ISO 9002 et ISO 9003. ISO 9000-3.
Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité - Partie 3 : Lignes directrices pour l'application de l'ISO 9001 :1994 au développement, à la mise à disposition, à l'installation et à la maintenance de logiciel	Pour l'interprétation spécifique des exigences de la norme - ISO 9001 relatives aux applications de développement de logiciels.
ISO 9000-4, Normes pour la gestion de la qualité et l'assurance de la qualité - Partie 4 : Guide de gestion du programme de sûreté de fonctionnement	Des conseils en matière de planification, d'organisation et de maîtrise des ressources pour fabriquer des produits fiables et maintenables.

TAB. 1.6 – Les parties de la norme 9000.

regroupe les professionnels de tous les horizons d'Internet. La Belgique possède ses sections locales.

Les structures d'Internet sont de deux types : (1) celles qui ont la charge de la distribution des adresses et de l'information (figure 1.3, partie gauche), et (2) celles qui définissent la technologie (figure 1.3, partie droite).

Les adresses et les noms.

INTERNIC¹² (Internet Network Information Center) et la société Network Solutions étaient chargées du contrôle des adresses au niveau mondial, déléguant leur pouvoir à l'organisme Réseaux IP Européens (RIPE¹³) pour l'Europe. RIPE déléguait ensuite partiellement son pouvoir à des sociétés commerciales qui exploitent directement le réseau Internet. Des modifications sont intervenues afin de garantir une plus grande équité dans l'attribution des adresses et des noms ; on pensait initialement que l'ITU pouvait être investie de cette mission mais cette idée a été abandonnée au profit de l'ICANN¹⁴ (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) qui officie comme le régulateur des organismes autorisés à octroyer des noms de domaine. En Belgique, c'est la société DNS.BE¹⁵ qui gère l'attribution des noms de domaine se terminant par “.be” depuis la fin 2000.

En matière de domaines principaux (top-level domain ou TLD), les noms génériques sont

¹²<http://www.internic.net>

¹³<http://www.ripe.net>

¹⁴<http://www.icann.org>

¹⁵<http://www.dns.be>

Normes et lignes directrices	Objets
ISO 9001, Systèmes qualité - Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées	Norme sur les exigences à utiliser pour démontrer votre aptitude en matière de conception/développement de votre produit ou service, ainsi que de production, d'installation et de prestations associées.
ISO 9002, Systèmes qualité - Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées	Norme sur les exigences à utiliser, lorsque vous n'êtes pas responsable en matière de conception/développement de votre produit ou service, mais souhaiteriez démontrer votre aptitude en production, installation et prestations associées (comme dans ISO 9001, excepté pour l'exigence de la maîtrise de la conception).
ISO 9003, Systèmes qualité - Modèle pour l'assurance de la qualité en contrôle et essais finaux	Norme sur les exigences à utiliser pour démontrer uniquement votre aptitude à maîtriser votre produit ou service en contrôle et essais finaux.
ISO 9004-1, Management de la qualité et éléments de système qualité - Partie 1 : Lignes directrices	Cette norme ne porte pas sur des exigences ; elle fournit des conseils pour l'application d'un système qualité permettant de répondre aux besoins de vos clients et de votre propre organisation.
ISO 9004-2, Gestion de la qualité et éléments de système qualité - Partie 2 : Lignes directrices pour les services	Les lignes directrices de cette norme, conçue d'une manière analogue à ISO 9004-1, s'appliquent spécifiquement aux conditions propres au secteur des services.
ISO 9004-3, Management de la qualité et éléments de système qualité - Partie 3 : Lignes directrices pour les produits issus de processus à caractère continu	Cette norme donne des lignes directrices pour l'application du management de la qualité dans le cas où vous fabriquez des produits issus de processus à caractère continu, qui sont le plus souvent livrés en vrac.
ISO 9004-4, Management de la qualité et éléments de système qualité - Partie 4 : Lignes directrices pour l'amélioration de la qualité	Cette norme fournit des lignes directrices pour améliorer en continu la qualité dans votre organisation au moyen d'outils et de techniques fondés sur la collecte et l'analyse de données.

TAB. 1.7 – Les autres normes de la famille 9000.

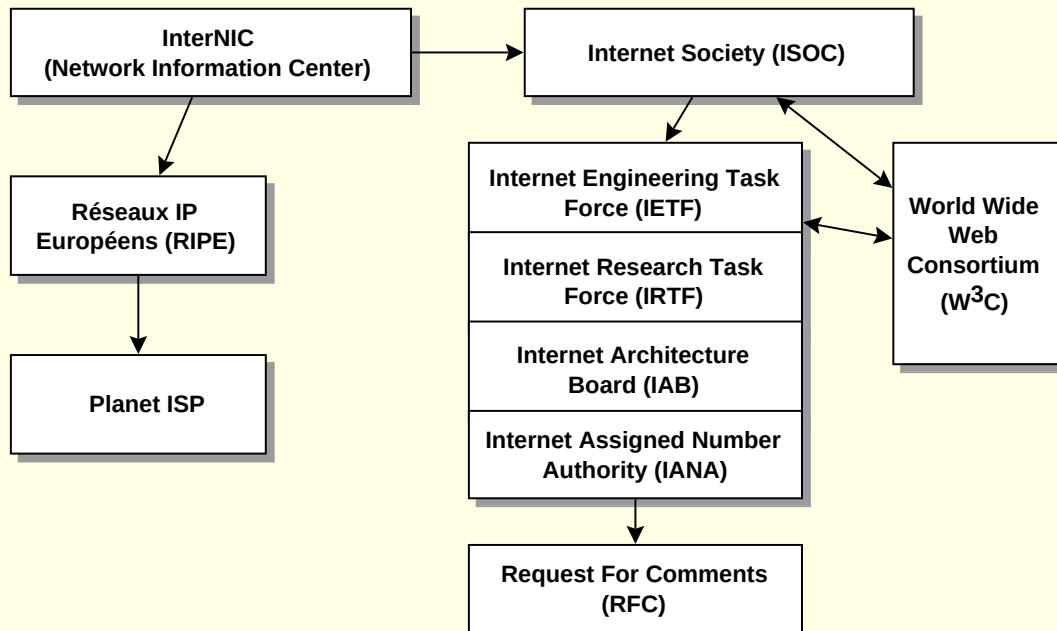


FIG. 1.3 – Les structures qui gèrent Internet.

limités à sept : .com (commerce), .mil (militaire), .int (international), .gov (gouvernement), .org (organisation), .net (réseau) et .edu (éducation aux États-Unis). Tous datent de la fin des années 1980. Depuis, seuls les suffixes désignant les pays (.be par exemple pour la Belgique) sont venus, au milieu des années 1990, enrichir la nomenclature.

En novembre 2000, l'ICANN¹⁶ a proposé l'ajout de nouveaux suffixes : .aero, .biz, .coop, .info, .museum, .name et .pro.

La technologie.

La définition des standards en vigueur sur Internet s'effectue par des organismes spécifiques. Le centre nerveux est l'Internet Engineering Task Force (IETF¹⁷) qui canalise les développements. Les résultats des travaux sont publiés sous la forme de Request For Comments (RFC). Ces documents, disponibles gratuitement sur Internet, font l'objet de discussion et certains deviennent des standards après une procédure que contrôle l'Internet Architecture Board (IAB¹⁸). Les travaux de recherche sont effectués au sein de l'Internet Research Task Force (IRTF¹⁹).

Enfin, l'Internet Assigned Number Authority (IANA²⁰) définit toutes les grandeurs arbitraires (par exemple l'équivalent des préfixes téléphoniques pour Internet). Cette société héberge aussi la base de données des Country Code Top Level Domains. On y trouve par exemple des informations sur la gestion des noms de domaines nationaux comme .be.

¹⁶<http://www.icann.org>

¹⁷<http://www.ietf.org>

¹⁸<http://www.iab.org>

¹⁹<http://www.irtf.org>

²⁰<http://www.iana.org>

Ces groupes ne sont pas les seuls. Ainsi le World Wide Web Consortium (W3C²¹) effectue tout le travail relatif au Web. Dans certains cas, les résultats obtenus sont ensuite présentés à l'IETF pour adoption. Ainsi, les normes HTML 4.0, XML ou HTTP/1.1 ont d'abord été définies par le W3C, avant d'être soumises à l'IETF pour approbation.

Request For Comments. Le RFC (Request for Comments) est le document de base en matière de normalisation pour Internet. L'ensemble des documents RFC est disponible gratuitement sur Internet. Initialement, ces documents étaient soumis pour commentaire. Avec le développement d'Internet, les structures ont été revues et, si le nom demeure, les textes des RFCs sont des documents qui ont fait l'objet de débats préalables. À titre d'illustration, la figure 1.5 reprend une partie de l'index des RFCs.

```
...
2959 Real-Time Transport Protocol Management Information Base. M.
    Baugher, B. Strahm, I. Suconick. October 2000. (Format: TXT=62063
    bytes) (Status: PROPOSED STANDARD)

2962 An SNMP Application Level Gateway for Payload Address
    Translation. D. Raz, J. Schoenwaelder, B. Sugla. October 2000.
    (Format: TXT=46803 bytes) (Status: INFORMATIONAL)

2963 A Rate Adaptive Shaper for Differentiated Services. O.
    Bonaventure, S. De Cnodder. October 2000. (Format: TXT=39895 bytes)
    (Status: INFORMATIONAL)

2964 Use of HTTP State Management. K. Moore, N. Freed. October 2000.
    (Format: TXT=18899 bytes) (Also BCP0044) (Status: BEST CURRENT
    PRACTICE)
...
```

FIG. 1.4 – Une partie de l'index des RFCs.

On remarquera que tous les RFCs ne sont pas des standards ; certains sont des propositions de standard, d'autres des règles de bonne pratique, d'autres encore sont à caractère informel, ... Le statut d'un RFC est spécifié dans l'en-tête de chaque document. La figure 1.5 montre le début de deux RFCs.

1.3.2 La vision d'Internet

Développer un standard international pour un produit complexe est un travail lourd et de longue haleine. Pour éviter l'écueil de la lenteur, les inventeurs d'Internet ont décidé de découper le travail en douze domaines distincts pour lesquels il était possible de développer rapidement une

²¹<http://www.w3.org>

Network Working Group
Request for Comments: 1918
Obsoletes: 1627, 1597
BCP: 5
Category: Best Current Practice

Y. Rekhter
Cisco Systems
B. Moskowitz
Chrysler Corp.
D. Karrenberg
February 1996

Address Allocation for Private Internets

...

Network Working Group
Request for Comments: 2060
Obsoletes: 1730
Category: Standards Track

M. Crispin
University of Washington
December 1996

INTERNET MESSAGE ACCESS PROTOCOL - VERSION 4rev1

...

FIG. 1.5 – En-têtes de deux RFCs.

solution. On a donc vu apparaître très tôt des produits conformes aux premières spécifications. Par la suite, ces spécifications ont été étendues et intégrées.

À la différence des organismes de normalisation, Internet a ainsi préféré encourager la réalisation de produits, rudimentaires au départ, et canaliser les développements en procédant par étapes successives plutôt que fournir des standards qui, une fois définis, devraient encore être implémentés. La figure 1.6 schématise l'approche traditionnelle et l'approche d'Internet en matière de normalisation. L'approche traditionnelle est plus lente car elle nécessite un long temps de gestation avant l'implémentation de la norme. L'approche utilisée dans le cadre d'Internet est plus rapide mais elle crée une série de normes intermédiaires qui entraîne parfois une certaine confusion sur les marchés.

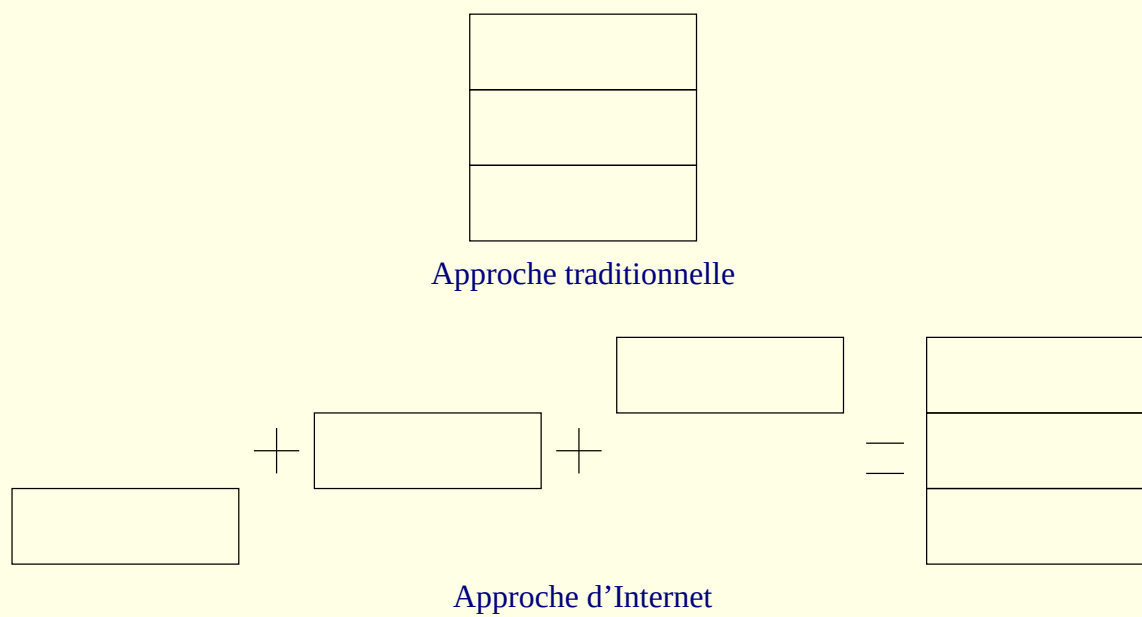


FIG. 1.6 – Approche traditionnelle et approche d'Internet en matière de normalisation.

Bibliographie

[1] P. Boursier et P.-A. Taufour. La technologie multimédia. Hermès, 1994.

Chapitre 2

Les signaux multimédia

Qui dit multimédia dit échange d'information, principalement de nature visuelle ou auditive, ainsi qu'une série d'actions. Autrement dit, l'interactivité multimédia se traduit par un échange de signaux entre les différentes composantes des équipements.

Dans un premier temps, nous allons détailler les principales caractéristiques de ces signaux multimédia car ce sont elles qui définissent les limitations et les contraintes des systèmes.

2.1 Introduction

Les signaux tels que nous les percevons sont analogiques, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de déceler une discontinuité. De la même manière que l'aiguille d'un compteur kilométrique évolue d'une position vers une autre, les sons arrivent à notre oreille en continu.

Les applications multimédia mettent en jeu plusieurs types de signaux ainsi qu'une série de processus de mise en forme de ces signaux. La figure 2.1 fournit une liste partielle des signaux et des traitements qui leur sont appliqués.

Mais pour comprendre la technologie multimédia, il nous faut retourner à la physique des signaux sons et images.

2.2 Les signaux analogiques de base

2.2.1 Son

Le son est une onde qui se propage dans l'air et qui est perceptible grâce au détecteur de pression qu'est le tympan, logé dans l'oreille. Ces vibrations sont ensuite converties en signaux transmis au cerveau par le nerf auditif.

Pour mieux saisir la notion de son, utilisons l'analogie avec la surface de l'eau. Jeter une pierre dans l'eau crée des ondulations de surface en forme de cercles concentriques. Ces ondes se propagent et, se heurtant aux berges, elles repartent en sens inverse. Le mécanisme de propagation du son est identique à ce phénomène où l'eau est remplacée par l'air et la pierre par une source sonore. Le son est le résultat d'une onde de pression qui voyage dans l'air, agite les

Type de données	Exemples de traitement
Texte	Traitement de texte Recherche
Graphique	Modification d'aspect Dessin
Audio	Filtrage Numérisation Amélioration Codage
Image	Numérisation Amélioration Codage
Vidéo	Numérisation Amélioration Codage
Signaux de synthèse	Déformation temporelle et spatiale

FIG. 2.1 – Édition multimédia.

molécules d'air et se réfléchit sur les obstacles qu'elle rencontre. Le tympan capte ces ondes qui sont *in fine* traduites en signaux électriques, comme le fait la membrane d'un micro.

La figure 2.2 montre le relevé d'un son à l'**oscilloscope**. L'axe vertical représente l'écart d'une membrane (ou une mesure physique équivalente comme une tension électrique) par rapport à une position centrale en fonction du temps (axe horizontal).

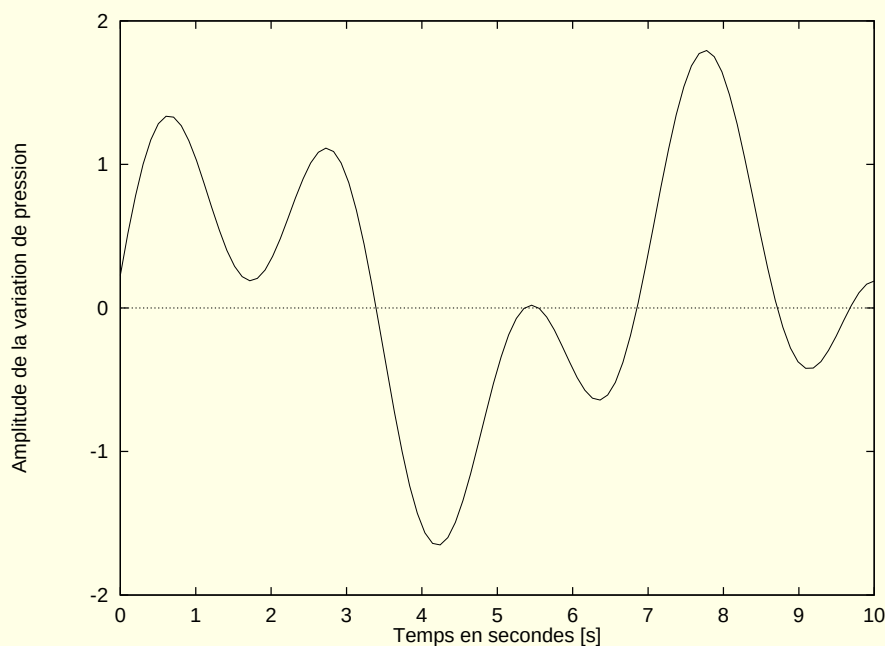


FIG. 2.2 – Représentation d'un son.

Le son est une notion tellement complexe qu'il faut plusieurs paramètres pour le décrire. Le phénomène physique du son peut être étudié de manière quantitative et les propriétés de l'onde acoustique peuvent être exprimées sous la forme de grandeurs objectives. Nous allons en analyser quatre : hauteur tonale, intensité, timbre et durée. Ces quatre paramètres suffisent à décrire globalement un son. Pour permettre une description plus fine comme par exemple l'attaque d'un instrument, la norme audio **MIDI** définit près d'une quarantaine de paramètres supplémentaires.

Ton ou hauteur tonale

La notion de ton est intimement liée à celle de fréquence.

Définition 6 *Le nombre d'oscillations d'un son dans un temps donné est sa fréquence. C'est la hauteur tonale ou ton du son perçu.*

Le temps au bout duquel une fréquence se répète est une **période**. Une onde est dite périodique quand elle est composée de telles répétitions. La valeur de la fréquence est évaluée en fonction du nombre de ses périodes dans un temps donné.

Définition 7 L'unité de base correspond au nombre de période par seconde ; c'est le Hertz (Hz).

Une fréquence de 1000 [Hz] est donc une fréquence dont le cycle se reproduit 1000 fois par seconde. La figure 2.3 illustre ces notions.

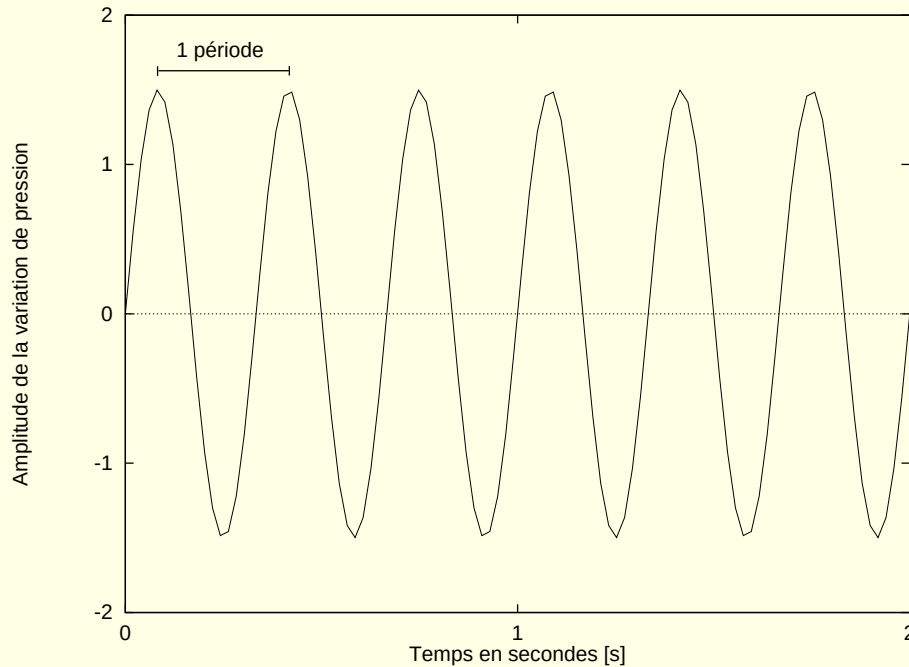


FIG. 2.3 – Le Hertz : unité de mesure des fréquences. Cette unité est définie comme le nombre de périodes par seconde. La fréquence du signal représenté ici est de 3 [Hz] .

La période est ainsi inversement proportionnelle à la fréquence (c'est-à-dire égale à $1/f$) : si la fréquence est de 3 [Hz] , la période est de $1/3$ seconde.

En principe, il n'y a pas de limitation dans la gamme des fréquences des sons possibles. Cependant notre oreille perçoit théoriquement des vibrations acoustiques allant de 20 [Hz] (son grave) à 20.000 [Hz] (son aigu). C'est la bande de fréquence qu'il faut restituer convenablement dans les systèmes haute fidélité, comme la radio FM, le canal son de la télévision ou le CD-audio. En radio AM cependant, on ne reproduit les fréquences que jusqu'à 4500 [Hz] et cela procure une qualité relativement bonne, même pour la musique. En téléphonie, où l'objectif est limité à l'intelligibilité du message, la bande de fréquence normalisée est $300 - 3400 \text{ [Hz]}$. Cette bande de fréquences est garantie de bout en bout du réseau. Un modem devra donc utiliser cette même gamme de fréquences pour permettre l'information numérique sous peine de perte d'information.

La limitation de la perception est importante pour tous les traitements liés au son ; on part du principe qu'il est inutile d'enregistrer ou de stocker un son imperceptible. Nous reviendrons plus loin sur cette limitation et analyserons l'impact sur la phase de numérisation.

Les fréquences ont permis de définir les notes. Ainsi le do moyen qui se trouve au milieu du clavier d'un piano a une fréquence de 264 [Hz] . Un diapason produit le son la (pur) à 440 [Hz] .

Intensité

L'amplitude des variations de pression donne la seconde composante du son : l'intensité avec laquelle notre oreille percevra une note. L'intensité correspond au volume d'énergie d'une onde. L'amplitude du son est la mesure du changement de pression par rapport à une valeur moyenne. Cette mesure est l'intensité acoustique I qui est la puissance transportée par unité de surface du front d'onde et s'exprime, par exemple, en $[W/cm^2]$. De telles grandeurs sont certes fort utiles, mais lorsqu'il s'agit de déterminer les conditions de bonne transmission de signaux sonores, il apparaît nécessaire de tenir compte des propriétés perceptives très particulières de l'ouïe. On fait alors appel à des grandeurs subjectives qui expriment ce que ressent l'être humain.

Timbre

Un ensemble de fréquences et leurs variations d'intensité permettent d'avoir une sorte de carte d'identité du son, une forme d'onde générale, le timbre ou spectre. Il montre la proportion dans laquelle la fréquence fondamentale du son est mélangée à d'autres fréquences multiples de la fréquence fondamentale et appelées sons harmoniques. Un son qui n'est accompagné d'aucune harmonique est appelé son pur. Le timbre permet donc d'identifier la source sonore car chaque instrument produit un spectre de fréquences qui lui est propre.

Durée

Enfin, la répétition d'une onde sonore donne à son tour la durée du son. Elle s'exprime en secondes et correspond au temps pendant lequel l'énergie du son est perceptible. Sur le diagramme 2.3, la durée du son est de 2 secondes.

Avec ces quatre paramètres, on dispose d'une description suffisante pour, par exemple, générer des sons. Produire de la musique de synthèse implique que l'on passe de la simple notation des sons à leur transcription dans la tonalité d'un instrument. Il faut pour cela prendre en compte le timbre, toutes les harmoniques qui accompagnent la production d'un son pur. L'analyse en fréquences et la transformée de FOURIER sont le pivot de ces calculs et de tous les traitements effectués sur les signaux sonores.

Le principe de l'analyse de FOURIER est celui du prisme : un rayon de lumière solaire pénétrant dans un prisme de cristal en ressort décomposé en plusieurs rayons. De même, le "prisme mathématique de FOURIER" décompose le son d'un instrument en ses harmoniques.

Prenons le cas d'un son continu produit par un instrument. Il est défini par une forme d'onde périodique, une fréquence qui se répète identiquement. Or notre oreille perçoit cette onde comme un assemblage de sons purs et non comme un son unitaire.

L'analyse spectrale classique consiste à déterminer mathématiquement de quelles harmoniques se compose une onde périodique. Par exemple, la vibration d'une corde de piano produit un signal complexe dans un diagramme de l'amplitude en fonction du temps. Analysée par la transformée de FOURIER, elle se décomposera en notes séparées.

L'analyse en fréquences et la transformée de Fourier

Le principe est le suivant : tout signal périodique (ce qui est le cas du son) peut se décomposer en une série d'oscillations sinusoïdales¹. Soit $x(t)$ un signal sonore continu dans le temps t , la transformée de FOURIER de ce signal est définie comme suit :

Définition 8 [Transformée de FOURIER]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi jft} dt \quad (2.1)$$

Il s'agit d'une fonction dont la variable est la fréquence f . Un signal périodique est ainsi représenté par des raies, dont l'emplacement est fixé par la fréquence des oscillations observées dans le signal $x(t)$, et l'amplitude par la valeur des coefficients définis par FOURIER.

Dans le sens inverse, connaissant le spectre $X(f)$ d'un signal, c'est-à-dire l'énergie de chacune des fréquences présentes dans le signal, on peut reconstituer sa forme initiale $x(t)$ par la transformée de FOURIER inverse :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{2\pi jft} df \quad (2.2)$$

Comme le signal $X(f)$ permet de reconstituer $x(t)$, il y a équivalence entre les deux représentations, tout juste l'une est-elle une représentation temporelle et l'autre une représentation dans l'espace des fréquences. C'est toutefois la représentation fréquentielle qui est la plus utilisée. Ainsi, l'analyse de FOURIER sert de base pour l'analyse des sons et pour la création de signaux de synthèse.

La synthèse musicale. Il existe trois grands modes de synthèse : la synthèse additive, la synthèse soustractive et la synthèse globale. La synthèse additive consiste à partir d'une fréquence et à compléter l'effet sonore par l'ajout de sons à d'autres fréquences. Contrairement à la synthèse additive, la synthèse soustractive débute par un signal riche et en soustrait les composantes. Son principe théorique revient à filtrer un signal pour ne garder que les composantes désirées.

La synthèse globale est une méthode qui repose sur des relations mathématiques abstraites. Une technique importante est la **modulation** de fréquences, par ailleurs utilisée par les ondes radio **FM**.

Comme nous l'avons signalé, tous les sons ne sont pas perceptibles. De plus, en raison de limitations physiques, certains équipements s'avèrent incapables de traiter certaines fréquences. On parle alors de bande passante.

Définition 9 [Bande passante] L'intervalle de fréquences que peut traiter un système est appelé **bande passante**.

Ainsi, la bande passante de l'oreille est l'intervalle de fréquences $[15 \text{ Hz}, 20 \text{ kHz}]$. Pour les signaux de parole, on estime que l'énergie est concentrée dans les fréquences inférieures à 4 kHz .

¹Un son pur est une oscillation sinusoïdale.

Le téléphone en tire profit puisque sa bande passante est $[300\text{ Hz}, 3400\text{ Hz}]$. En fait, tout système physique a une bande passante finie.

2.2.2 Image et vidéo

Le système visuel humain

L'œil est un système complexe (cf. figure 2.5). La lumière incidente est réfractée par la cornée et dirigée vers la pupille ; la pupille est l'ouverture de l'iris par laquelle la lumière pénètre dans l'œil. La lumière est ensuite réfractée une seconde fois en direction du fond du globe oculaire où elle illumine la rétine. Cette dernière est composée d'une série de récepteurs, appelés photorécepteurs, reliés à des cellules qui transmettent des signaux au nerf optique.

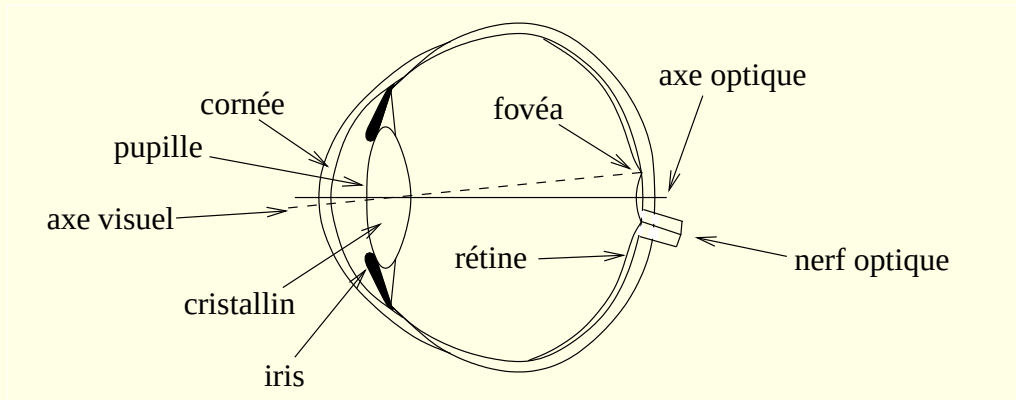


FIG. 2.4 – Coupe latérale simplifiée de l'œil.

La lumière

La perception du signal visuel présente des similitudes avec celle du signal audio. De fait, le fond de l'œil est tapissé de récepteurs qui envoient des influx électriques au cerveau via le nerf optique. De plus, certaines couleurs ne sont pas perceptibles à cause d'un effet de limitation de la "bande passante" de l'œil.

La lumière couvre une partie du spectre d'énergie électromagnétique. Un rayonnement électromagnétique est en général constitué d'un certain nombre de longueurs d'onde (ou fréquences) que les dispositifs dispersifs de séparer en un spectre. Le spectre est soit discret, soit continu.

Il est d'usage de définir les couleurs par leur longueur d'onde ; on passe aisément de la longueur d'onde à la fréquence par le biais de l'expression

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

où $c = 3 \times 10^8\text{ [m/s]}$ est la vitesse de la lumière. Les longueurs d'onde du spectre visible s'étendent approximativement de 380 à 720 [nm]. Une source est caractérisée par (i) son rayonnement, mesurable dans un système de grandeur correspondant à l'action proprement visuelle,

(ii) par le mélange des longueurs d'onde de cette énergie, mélange qui produit une sensation de couleur. La lumière est donc une distribution d'énergie émise à certaines fréquences ayant une certaine intensité.

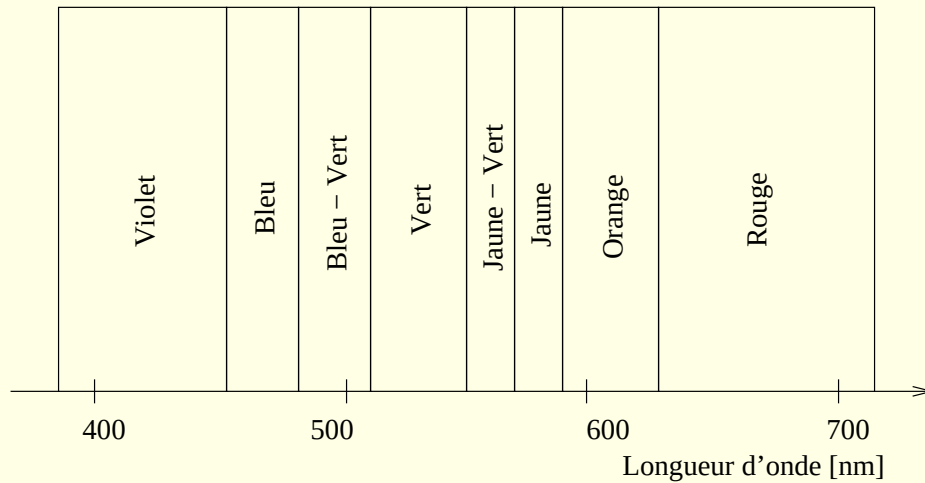


FIG. 2.5 – Les longueurs d'onde associées aux couleurs.

Pour caractériser une couleur **monochromatique**, il suffit de connaître sa longueur d'onde λ et la **luminance** L , expression qualitative de la brillance énergétique. Dans ces conditions, l'œil se comporte donc comme un récepteur bivariant, la connaissance de λ et de celle de L étant nécessaires et suffisantes pour caractériser l'impression visuelle créée.

Supposons maintenant une source constituée d'un certain nombre de radiations simples formant un spectre de raies ou un spectre continu avec une répartition énergétique donnée. La question qui se pose est le problème de la résultante, pour le récepteur visuel, de l'addition de l'ensemble de ces radiations.

Les espaces de couleurs

Une possibilité de représentation des couleurs consiste à utiliser un espace de couleurs à k dimensions. Des expériences psychovisuelles d'égalisation (voir KUNT et al. [5]) ont montré qu'en combinant trois stimuli de longueur d'ondes particulières, il est possible de synthétiser presque toutes les couleurs existantes. Cette expérience peut s'effectuer à l'aide d'un système de reproduction de couleurs de type additif ou de type soustractif.

Choisissons trois radiations monochromatiques que nous qualifierons de **primaires**. Le problème sera de déterminer dans quelle mesure il est possible, à partir de ces trois couleurs, de reproduire une radiation colorée quelconque et selon quelles règles quantitatives. Dans le cas d'un mélange additif, l'expérience d'égalisation des couleurs se déroule par exemple de la manière suivante : trois couleurs primaires A , B et C sont, après pondération de leur intensité respectivement par a , b et c , projetées sur écran noir avec un certain recouvrement comme l'illustre la figure 2.6. En jouant sur les paramètres a , b et c , l'observateur essaie d'égaliser la couleur à

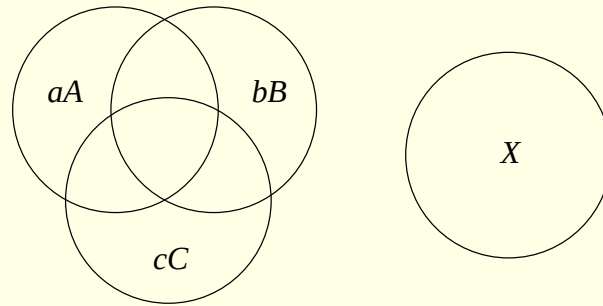


FIG. 2.6 – Expérience d’égalisation d’une couleur X au moyen de trois couleurs primaires A , B et C .

définir X avec le mélange additif $aA + bB + cC$. Au cas où l’égalisation est impossible, une ou plusieurs des couleurs primaires sont additionnées non pas au mélange mais à la couleur à définir X . On obtient alors, pour cette couleur, un ou plusieurs facteurs négatifs $-a$, $-b$ ou $-c$.

L’espace de couleurs additif RGB. Pour des raisons de standardisation, la commission internationale de l’éclairage (CIE) a réalisé en 1931 l’expérience d’égalisation de couleur par mélange additif. Un système qui s’imposa presque naturellement était fondé sur les trois couleurs monochromatiques, rouge R (700 [nm]), vert V (546,1 [nm]) et bleu B (435,8 [nm]), ces deux dernières étant émises par l’arc au mercure (d’où leur choix). Ce fut le système RGB. On a ainsi déterminé pour ce système :

- les coordonnées trichromatiques désignées dans le cas d’espèce r , g et b ;
- les unités lumineuses respectives des trois primaires en imposant qu’une certaine source blanche tombe au centre du diagramme ;
- à partir de ci-dessus, les coefficients de distribution pour une couleur quelconque.

La figure 2.7 montre les courbes des coefficients de distribution des couleurs primaires.

La figure 2.8 représente le diagramme chromatique-type dans le système RGB : chaque couleur primaire est placée au sommet d’un triangle isocèle rectangle ; l’ensemble des couleurs monochromatiques s’aligne sur le contour du diagramme, dit lieu spectral, tandis qu’une radiation complexe se situe à l’intérieur du contour.

Vers d’autres systèmes de couleurs : le système XYZ. À l’usage, il s’est avéré que ce système RGB présentait un certain nombre d’inconvénients (cf. [1]) du fait, en particulier que : (i) en raison du choix des primaires, l’une des coordonnées trichromatiques était toujours négative pour les radiations monochromatiques, (ii) on risquait d’attribuer aux couleurs primaires une signification physiologique qu’elles n’ont pas (puisque leur choix est arbitraire).

Afin de parer à ces inconvénients, la CIE a introduit, également en 1931, un autre espace de couleurs appelé XYZ. Les composantes X , Y et Z qui décrivent un stimulus sont liées aux

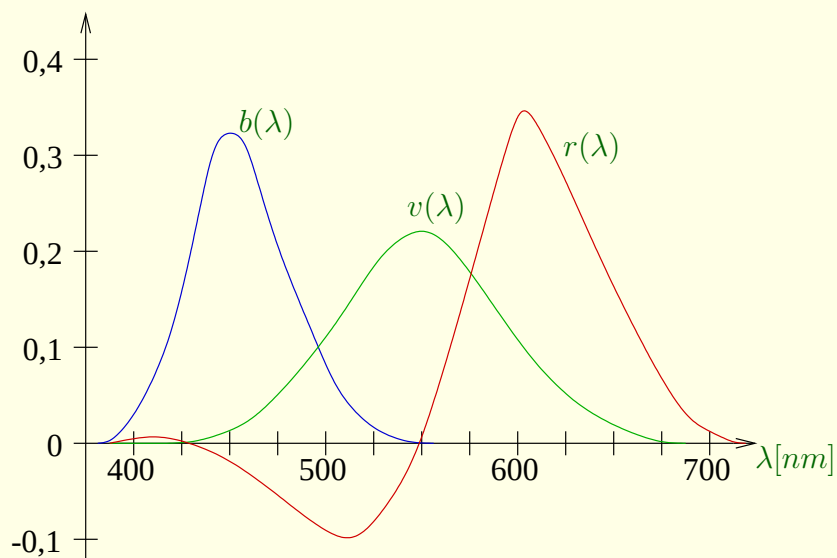


FIG. 2.7 – Courbes d'égalisation spectrale obtenues par égalisation des couleurs au moyen d'un mélange additif (d'après [4]).

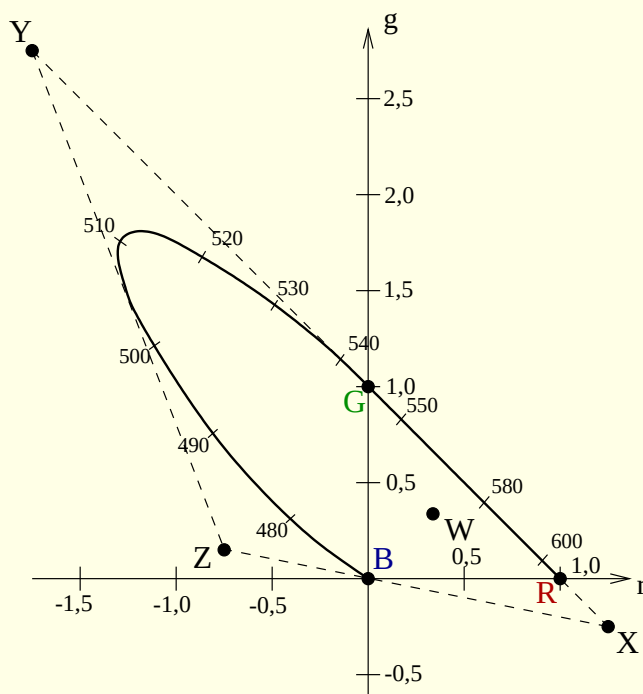


FIG. 2.8 – Diagramme chromatique RGB de la CIE.

composantes RGB par la relation matricielle suivante [5]

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,769 & 1,7518 & 1,13 \\ 1 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0 & 0,0565 & 5,5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

En normalisant le tri-stimulus XYZ par rapport à $X + Y + Z$, on obtient le système xyz . Une particularité intéressante de ce nouveau référentiel est que seules deux variables, par exemple x et y , sont indépendantes. Ces deux composantes sont appelées les composantes chromatiques du stimulus. On a donc les relations

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.5)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.6)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.7)$$

$$x + y + z = 1 \quad (2.8)$$

Après transformation du stimulus original en deux composantes normalisées indépendantes x et y , il est possible de décrire l'ensemble des couleurs par les deux variables de chrominance x et y . Il en résulte un diagramme tel que celui représenté à la figure 2.9.

Les couleurs monochromatiques sont représentées sur la partie non rectiligne du contour (comme un U retourné). Les couleurs qui résultent d'un mélange d'un mélange additif de certaines couleurs de base sont représentées à l'intérieur de la forme en U. Il existe aussi certains point particuliers, comme le point d'égalité d'énergie qui correspond à une contribution égale des trois composantes de base X , Y et Z , ce qui correspond à $x = y = 1/3$. L'expérience d'égalisation des couleurs a montré qu'il suffisait de trois couleurs de base pour synthétiser la quasi-totalité des stimuli colorés. Comme le diagramme chromatique xy ne reprend que deux variables indépendantes, ce diagramme est une version réduite de l'espace à trois dimensions tel défini par le cube de la figure 2.10.

C'est dans ce genre d'espace que nous avons représenté les couleurs du diagramme chromatique approché à la figure 2.9; le diagramme tridimensionnel correspondant est illustré à la figure 2.11.

La dimension non représentée sur ce diagramme est celle de la luminance qui permet d'éclaircir ou d'assombrir une couleur en modulant son degré de noir. Par exemple, en modulant du minimum au maximum la luminance du point d'égalité d'énergie, on passe du noir au blanc en passant par toutes les teintes de gris. Chaque couleur possède une luminance maximale dont la représentation graphique est fournie à la figure 2.12.

Le diagramme chromatique xy est donc le lieu des couleurs de chrominance (x, y) de luminosité maximale. En effet, un changement des proportions entre x et y conduirait automatiquement à la perception d'une autre couleur. Les deux variables de chrominance x et y peuvent se transformer en variables possédant une interprétation physique plus intuitive à savoir la teinte et la saturation. La notion de teinte (hue en anglais) est associée à la longueur d'onde, c'est-à-dire à

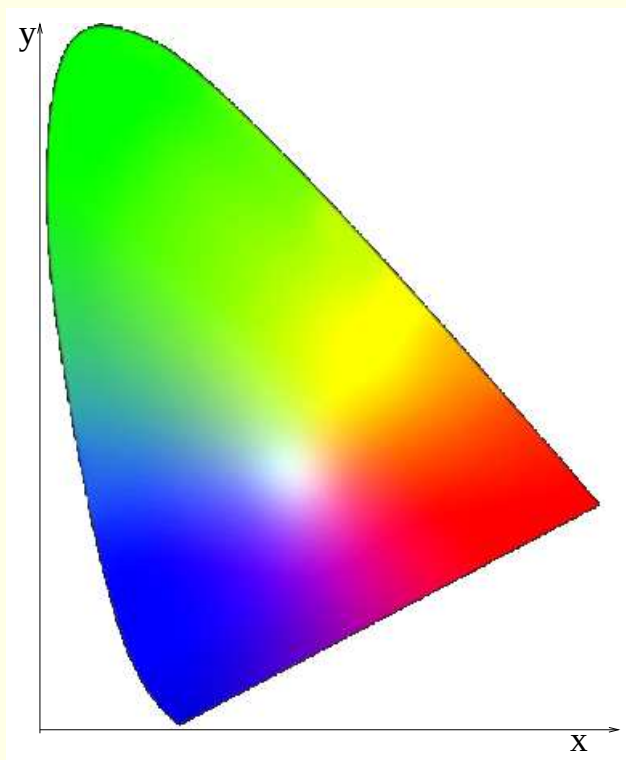


FIG. 2.9 – Diagramme chromatique (approché !) défini par les deux variables de chrominance x et y .

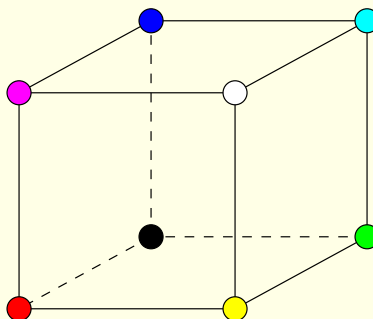


FIG. 2.10 – Espace tridimensionnel des stimuli produits par les composantes RGB .

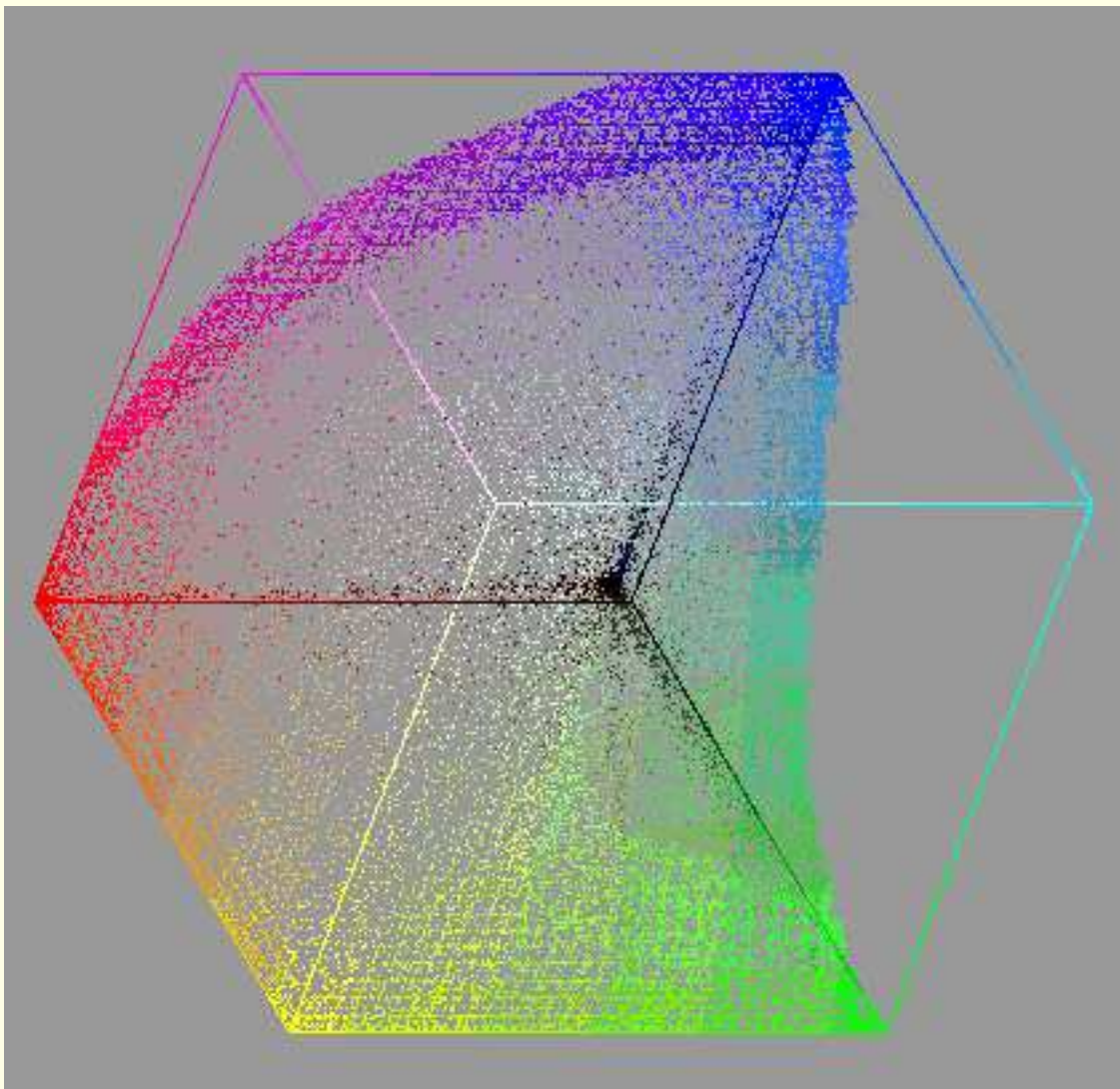


FIG. 2.11 – Espace tridimensionnel des couleurs du diagramme de chrominance approché.

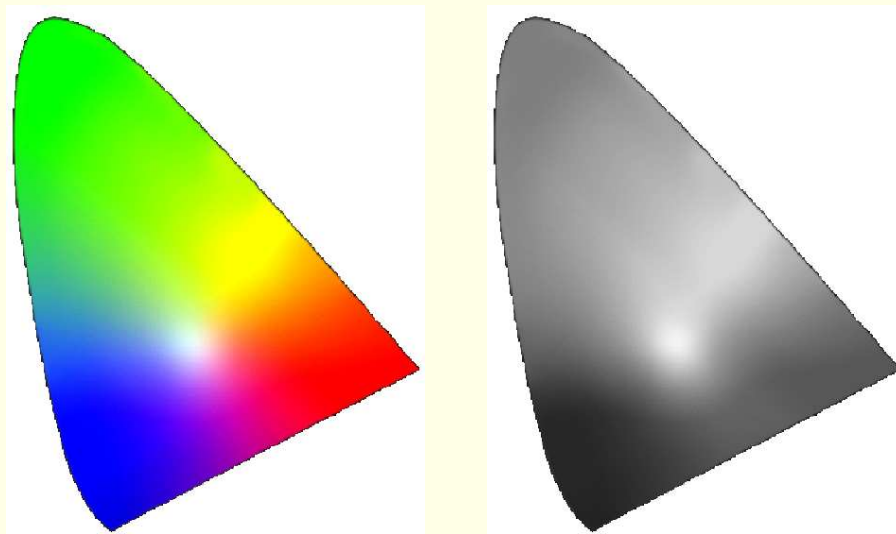


FIG. 2.12 – Diagramme chromatique xy et luminance maximale en chaque point.

la position le long du U retourné. La saturation exprime quant à elle le degré de blanc ; elle est définie comme la distance entre le point d'égale énergie et la couleur à définir.

La figure 2.13 illustre la décomposition d'une image dans les trois canaux RGB et HSI.

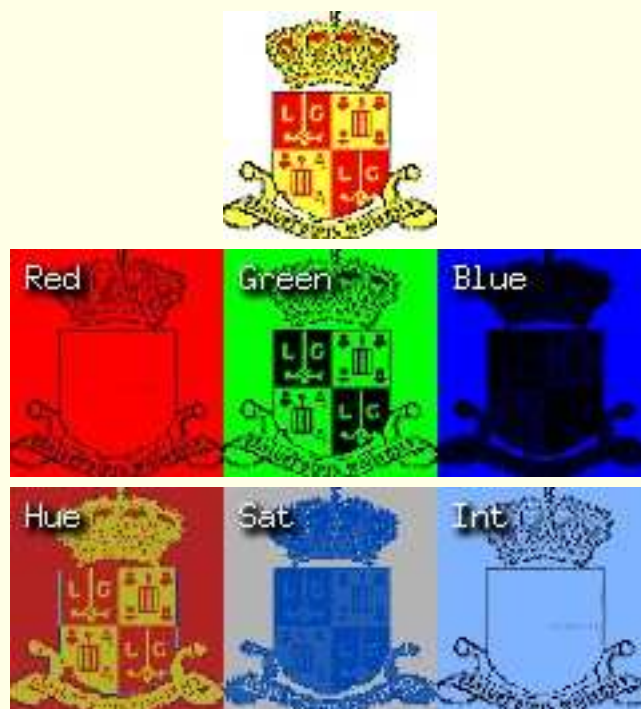
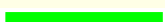


FIG. 2.13 – Décomposition d'une image en couleurs.

L'espace de couleurs soustractifs CMY. La détermination des composantes **RGB** d'une onde s'opère par addition sur fond noir. L'arrière-plan est donc supposé absorbant pour toutes les couleurs. Un tel système n'est pas adéquat pour traiter l'impression sur feuille blanche car cette dernière réfléchit l'ensemble des couleurs. Pour l'impression, on a donc défini d'autres systèmes de couleurs, complémentaires au système **RGB**. Il s'agit par exemple du système Cyan, Magenta et Yellow (**CMY**), complémentaire du système **RGB** et dont la somme produit le noir². La figure 2.14 montre une image trouvée dans un catalogue et présentant un défaut d'alignement des couleurs.

D'autres systèmes de couleurs. À côté du système **RGB**, couramment utilisé en infographie, il existe d'autres systèmes de couleurs tels les systèmes **YIQ**, **YUV** ou **YC_bC_r**. Ces systèmes de couleurs peuvent être calculés par transformation matricielle des composantes RGB auxquelles on a préalablement appliqué une correction **gamma**³.

Les systèmes de couleurs en pratique. Les standards de télévision analogiques (**PAL**, **NTSC**) définissent chacun les positions de couleurs RGB dans le diagramme chromatique. À cet égard, il est intéressant de remarquer que, contrairement aux apparences, ces positions ne se situent pas sur le pourtour. Autrement dit, les couleurs de base ne sont pas monochromatiques ! Comme les positions de ces systèmes ne coïncident pas, la totalité des couleurs d'un système n'est pas représentable dans un autre système. D'autre part, un téléviseur n'est pas réellement calibré à la fabrication et son usage produit une usure. Cela nous amène à considérer avec beaucoup de prudence la signification physique réelle d'une couleur affichée par un téléviseur. On peut exprimer des réserves similaires pour le cas des moniteurs utilisés dans le monde informatique. Pour désigner une couleur en infographie, on utilise généralement une quantification sur 8 bits par composante de couleurs. Les couleurs sont alors représentées par un triplet de valeurs exprimées en hexadécimal, en décimal (cf. table 2.1) ou en binaire.

Hexadécimal		R G B
00 00 00		0 0 0
00 00 FF		0 0 255
00 FF 00		0 255 0
00 FF FF		0 255 255
FF 00 00		255 0 0
FF 00 FF		255 0 255
FF FF 00		255 255 0
FF FF FF		255 255 255

TAB. 2.1 – Table de correspondance de couleurs définies sur 8 bits.

²Pour l'impression et comme la majorité des documents contiennent des traits noirs, on préfère parfois ajouter d'emblée le noir aux composantes CMY, ce qui aboutit au système quadrichromatique **CMYK**.

³La correction **gamma** consiste à appliquer une fonction inverse de celle qui traduit, à l'intérieur du téléviseur, le signal électrique en une intensité des canons à électrons destinés à éclairer l'écran.



FIG. 2.14 – Défaut d'alignement des couleurs d'impression permettant de voir les 3 composantes de couleur CMY et la composante noire K.

Les fausses couleurs. La représentation des valeurs d’une image nécessite 8 bits dans le cas d’une image monochrome et $3 \times 8 = 24$ dans le cas d’une image *RGB*. Pour réduire le nombre de bits dans le cas d’une image en couleurs, on réduit la taille de l’espace des couleurs en sous-échantillonnant l’espace *RGB*. Il est également possible de considérer les 256 valeurs d’une image comme les 256 indices d’un vecteur tridimensionnel reprenant les composantes *RGB* de couleurs. On parle alors de **palette** de couleurs ou de Color Look Up Table (**CLUT**). La figure 2.15 montre la palette de couleurs utilisées par le logiciel de navigation Netscape Navigator ainsi que la décomposition des couleurs dans les composantes *RGB*.

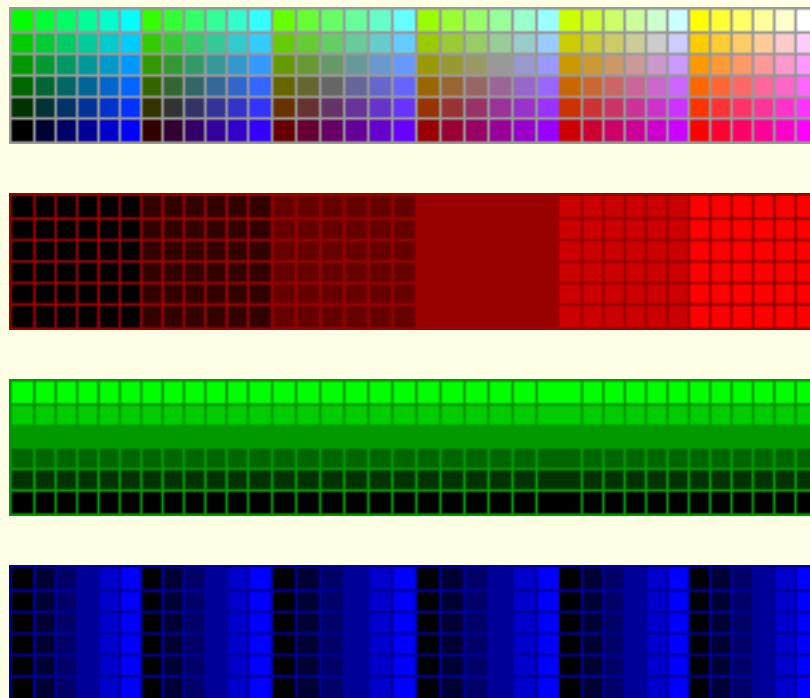


FIG. 2.15 – Palette de couleurs utilisée par les logiciels de navigation ainsi que la décomposition en R, G et B.

La couleur des objets

La couleur d’un objet est significative de la réflectance de l’objet ainsi que de l’éclairage. Dès lors, à supposer qu’une onde lumineuse isochromatique (c’est-à-d. blanche) soit envoyée en direction de l’objet, sa surface absorbera certaines longueurs d’onde et en réfléchira d’autres. On ne pourra donc jamais définir la couleur que comme la couleur liée à la longueur d’onde dominante.

De plus, la réflexion peut être spéculaire (effet de miroir) ou être diffuse. L’infographie utilise abondamment ces techniques pour créer des effets d’ambiance. Un exemple, produit avec le logiciel **BLENDER**, est fourni à la figure 2.16.

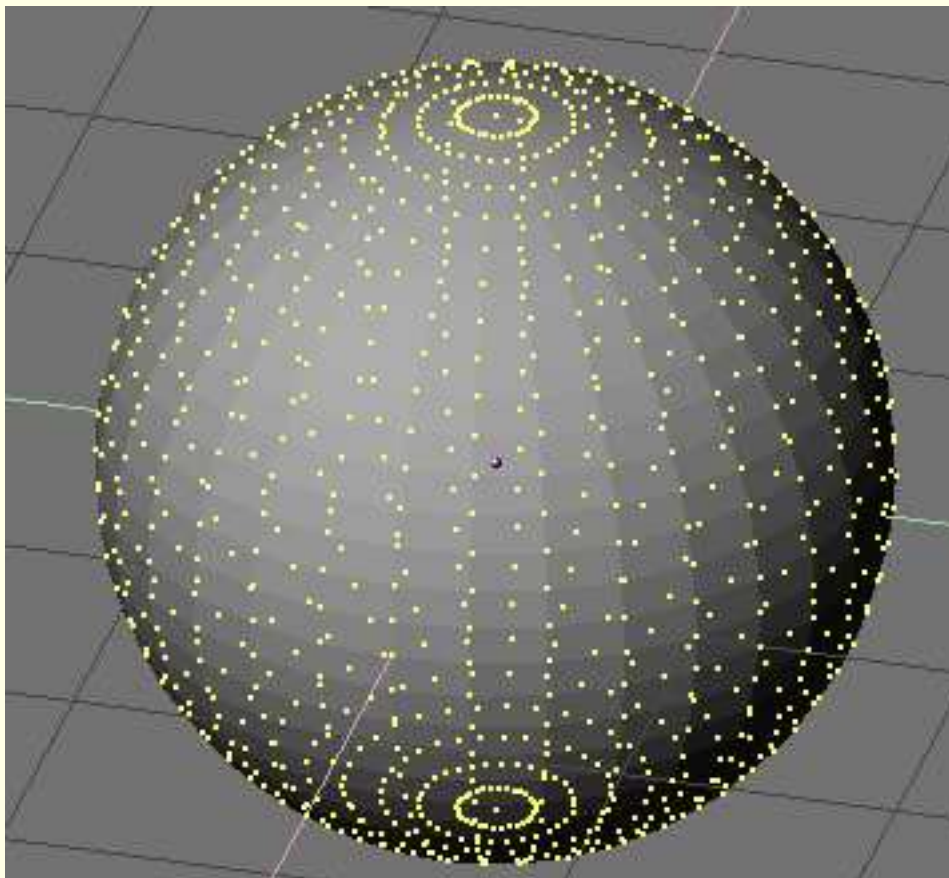


FIG. 2.16 – Une image de synthèse 3D.

Normalisation des couleurs

Question 10 Pourquoi normaliser les couleurs ?

Réponse

La définition subjective des couleurs est trop vague pour servir dans différentes applications. Prenons par exemple le cas d'une personne qui commande un vêtement de couleur rouge après avoir consulté un catalogue mis sur Internet. Il apparaît ensuite que le bien commandé est de couleur brune ... Qui a tort dans ce cas ? ■

Si les espaces de couleur suffisent à définir une image, il faut plus pour reproduire une image sur un écran. Un premier facteur important est le rapport d'aspect ; il s'agit du rapport entre la taille horizontale et verticale. Ce rapport vaut 4/3 pour des téléviseurs classiques mais il est de 16/9 pour le format de télévision à haute définition (**HDTV**).

Signal vidéo

Jusqu'à présent, nous avons supposé que l'image ne changeait pas dans le temps. Or les signaux de télévision changent en fonction du temps, d'où le besoin d'une composante temporelle dans la description d'une image. Il convient donc d'ajouter une autre définition : le temps. On parle alors de signal **vidéo** plutôt que de signal **image**.

Le procédé mis en œuvre pour reproduire un signal vidéo sur un écran de télévision consiste à afficher une nouvelle image à une fréquence élevée, à la manière d'un film. Cette fréquence est supérieure à 25 [Hz], fréquence en dessous de laquelle on percevrait une discontinuité. Aujourd'hui, la technologie permet d'atteindre une telle vitesse de rafraîchissement d'écran. On parle de format de télévision **progressif**. Il n'en était pas ainsi au début de la télévision analogique. Pour parvenir à éviter un effet de scintillement alors qu'on ne parvenait pas à atteindre des vitesses de rafraîchissement, on a inventé l'**entrelacement** et le format entrelacé. Dans sa version européenne, le format consiste à constituer deux demi-images en prenant soit toutes les lignes paires, soit toutes les lignes impaires d'une image, comme indiqué à la figure 2.17.

Au lieu de 25 images par secondes, on obtient ainsi 50 demi-images, soit une vitesse supérieure au seuil de sensibilité.

Trois standards de vidéo pour télévision analogique sont utilisés à travers le monde :

Format	Description	Pays
NTSC	National Television Systems Committee	États-Unis.
PAL	Phase Alternation Line	Europe sauf France.
SECAM	Système Électronique Couleur Avec Mémoire	France et Russie.

L'univers de l'image fait intervenir plusieurs facteurs : la mémoire, les exigences de vitesse, la dépendance par rapport au matériel, l'organisation des données, la compression et la représentation des données. Il suffit de consulter la figure 2.18 qui énumère des applications typiques pour s'en convaincre.

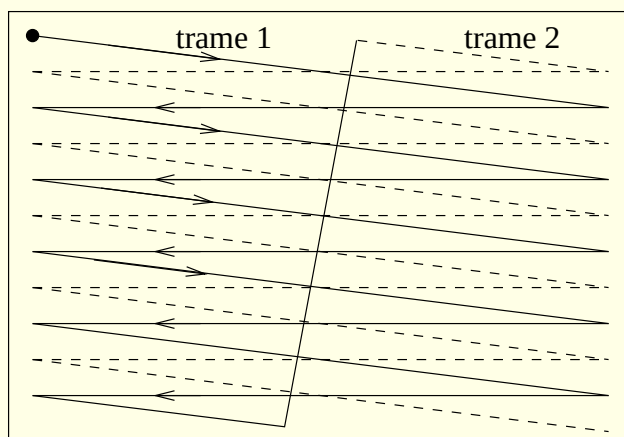


FIG. 2.17 – Description du format entrelacé.

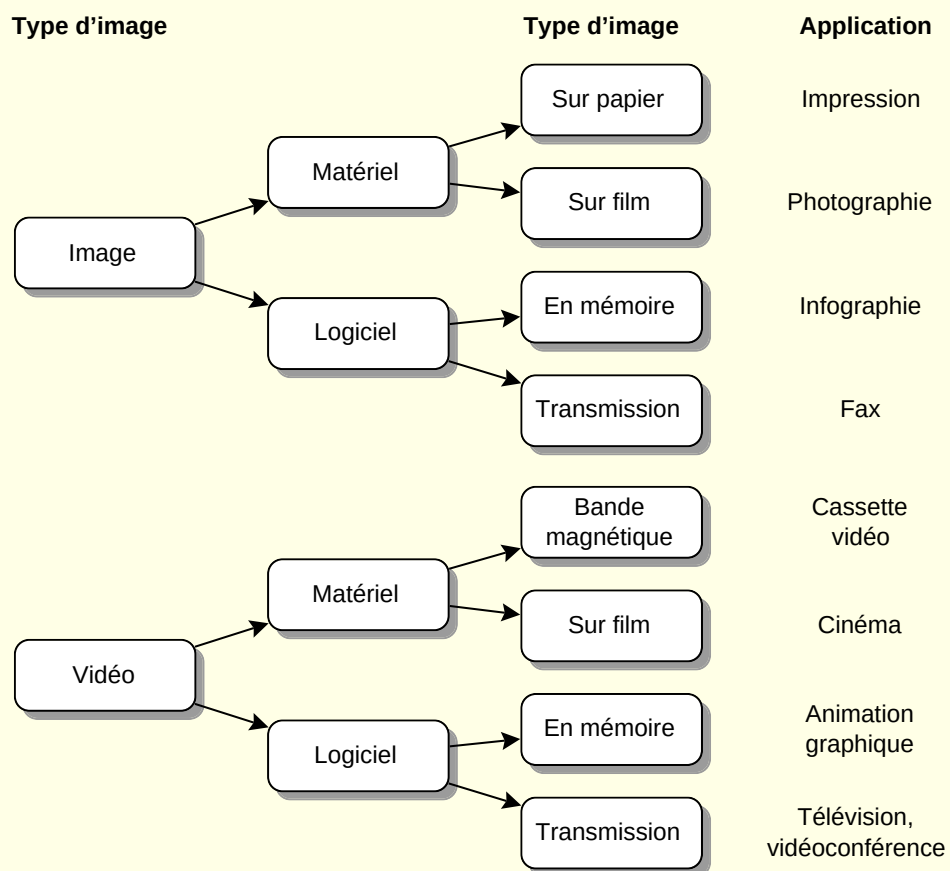


FIG. 2.18 – Aspects matériel et logiciel des images.

Le signal vidéo est nettement plus complexe qu'un son. Il comporte des informations visuelles, exprimées pour une image généralement sous la forme de trois couleurs fondamentales pour tout point de l'espace, et une information temporelle née du mouvement des objets. De plus, le signal de télévision est un mélange du signal vidéo et de la partie audio ; il s'agit d'un signal composite. Le signal composite occupe une bande de fréquences d'approximativement 5 [MHz]. En pratique, on considère une bande de 8 [MHz] par signal vidéo en Europe. La figure 2.19 donne l'occupation fréquentielle d'un signal vidéo PAL.

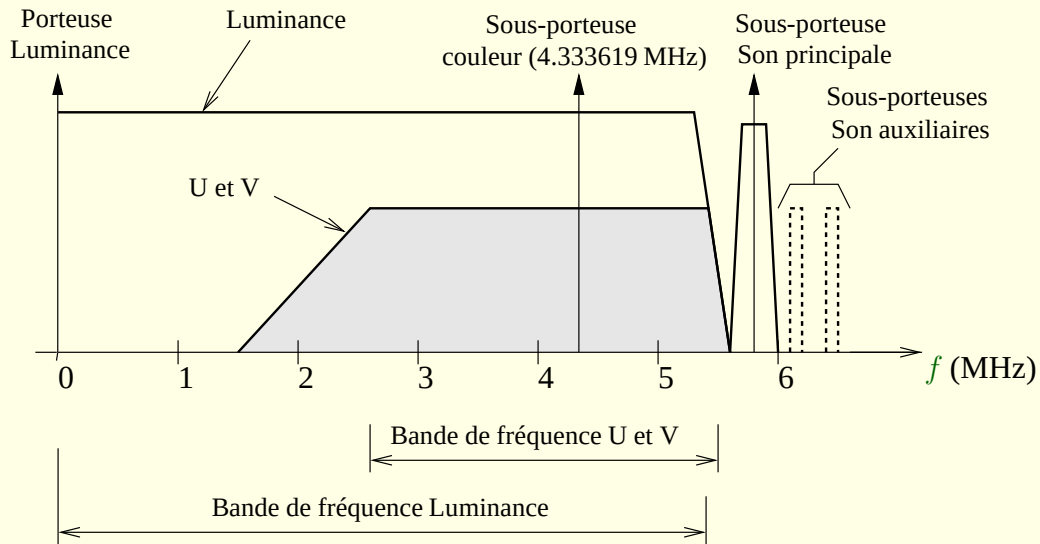


FIG. 2.19 – Spectre d'un signal vidéo PAL.

2.3 La numérisation

Un ordinateur n'est pas, par nature, apte à manier des sons ou des images. En effet, ceux-ci sont constitués par des variations de pression ou par de l'énergie lumineuse respectivement alors que l'ordinateur ne sait traiter l'information que sous la forme de 0 et de 1, c'est-à-dire discrète et non pas analogique. D'où le besoin de convertir les signaux.

Définition 11 [Numérisation] La numérisation est le nom du procédé qui réalise la conversion de l'analogique vers le numérique.

2.3.1 Signaux analogiques ou numériques

Un signal $x(t)$ analogique est une fonction continue pour tout temps t . Un signal numérique est un signal temporel discontinu ; on le notera $x[n]$ où n est l'indice d'un élément pris dans l'ensemble d'instant $\{t_0, t_1, \dots\}$. On parle encore de signaux à temps discret.

La nature de l'information, analogique ou numérique, est intrinsèquement distincte de sa représentation dans un canal de transmission. Ainsi, un signal numérique peut très bien être représenté par une onde continue en vue de la transmission. La figure 2.20 aide à clarifier la distinction entre signal d'information et représentation.

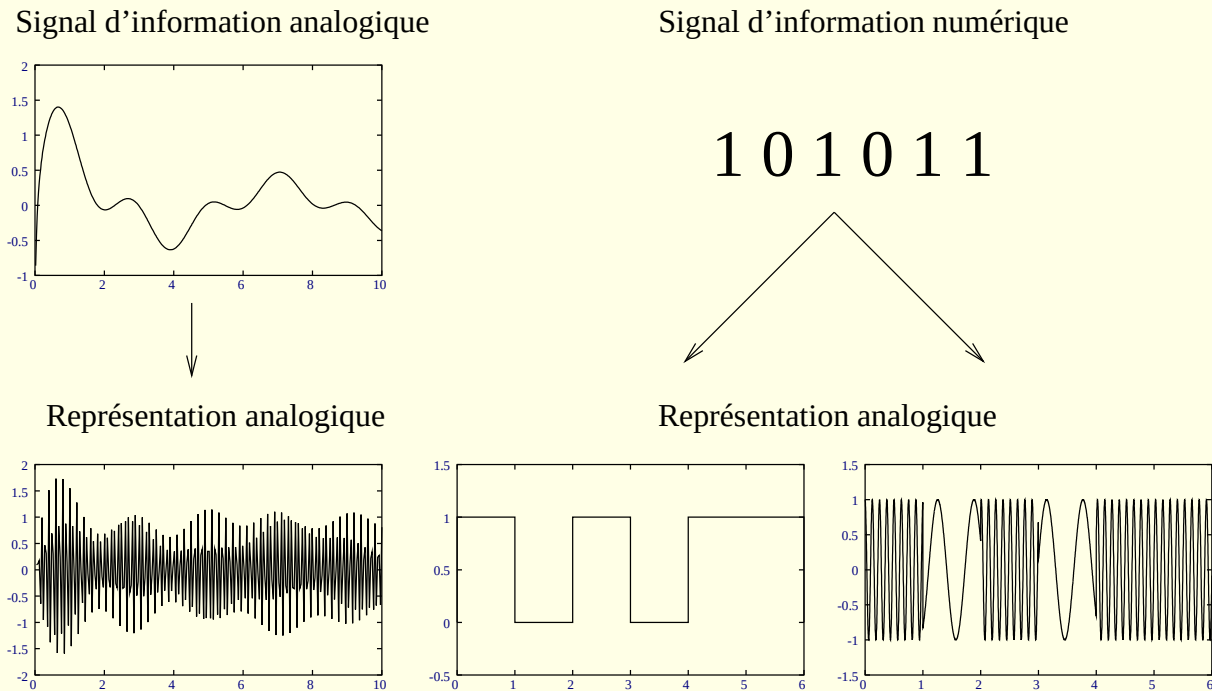


FIG. 2.20 – Représentation d'un signal analogique ou numérique.

2.3.2 Le pourquoi

La numérisation des signaux s'explique pour plusieurs raisons. De fait, un ordinateur travaille exclusivement avec des données numériques. En outre, on traitera plus facilement des signaux numériques. Grâce aux processeurs de traitement de signal modernes, traiter un signal numérique est aussi plus facile. Enfin, pour le stockage et la reproduction, les signaux numériques offrent une meilleure résistance au **bruit**, ce qui se traduit pas une augmentation du rapport signal à bruit. Ainsi, il est plus facile de régénérer un signal numérique d'un signal analogique comme l'illustre la figure 2.21.

Prenons le cas du son. Le signal est le son que l'on veut produire en sortie. Le bruit est un son parasite qui peut être produit par les vibrations des composants électroniques ou les bruits de quantification (cf. section 2.3.5). La qualité sonore est proportionnelle au rapport signal (en volts) à bruit (en volts également), exprimé en **décibel** (dB). Un rapport supérieur à 70 [dB] indique une bonne qualité sonore, égal à 50 [dB] une qualité moyenne, et à 30 [dB] ou moins, un son de mauvaise qualité.

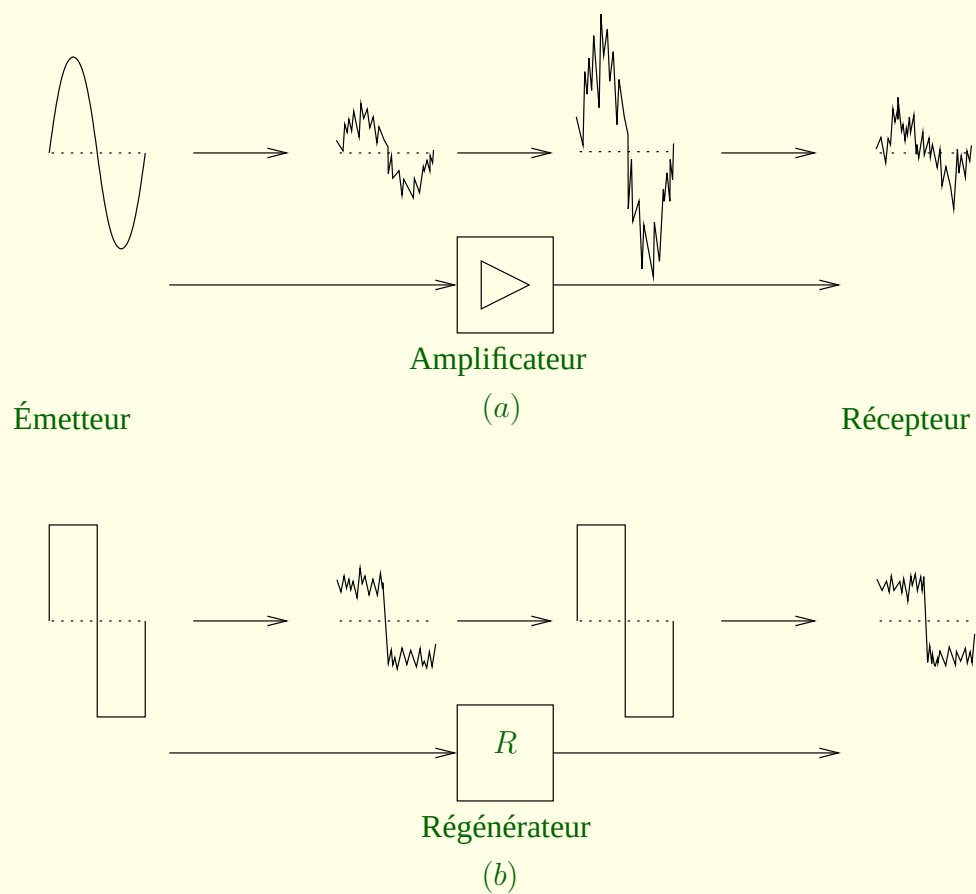


FIG. 2.21 – Amplification d'un signal analogique et régénération d'un signal numérique.

2.3.3 Processus de numérisation

La figure 2.22 reprend toutes les étapes du passage d'un signal analogique à un signal numérique et celles de la conversion inverse. La figure 2.23 reprend ces mêmes traitements avec une autre présentation. Nous allons à présent décrire ces étapes.

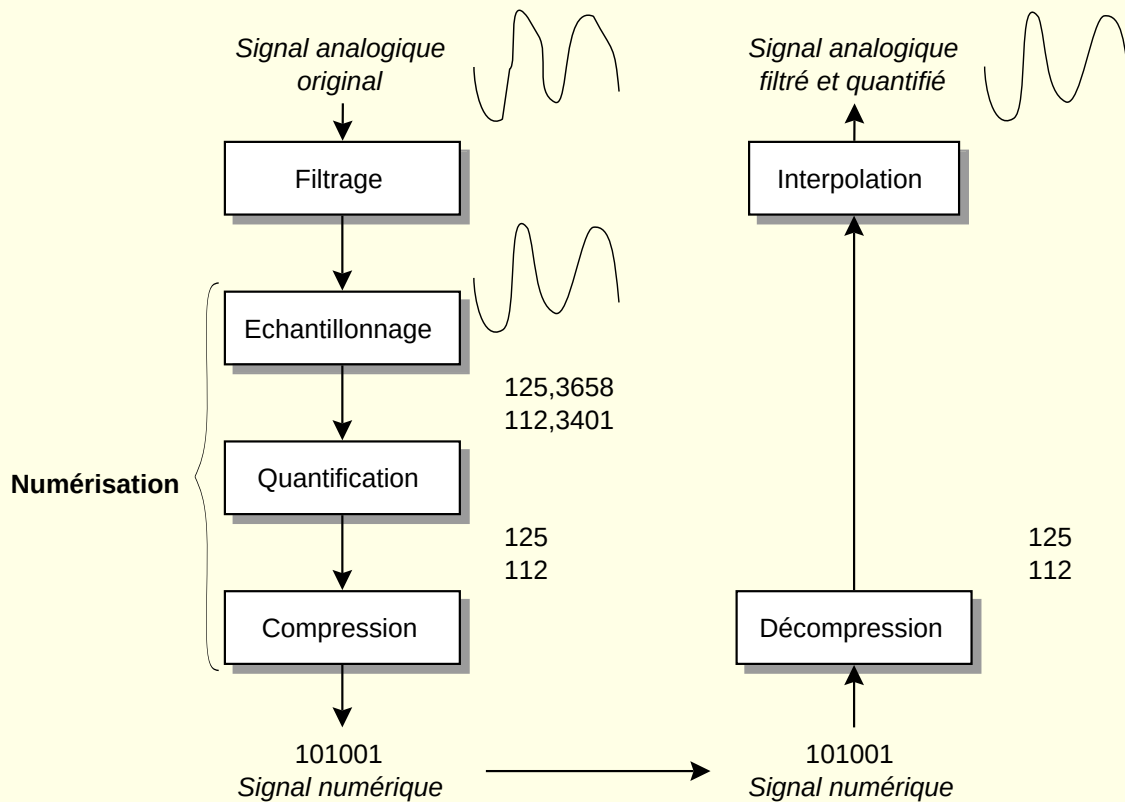


FIG. 2.22 – Passage de l'analogique au numérique et conversion inverse.

2.3.4 Échantillonnage

L'échantillonnage peut se comparer à l'effet d'un stroboscope ou d'une technique cinématographique. Dans un film, l'illusion du mouvement est produite par la projection rapide de photographies fixes défilant rapidement. On joue sur le fait que l'œil intègre ce qu'il perçoit si la vitesse de défilement est suffisamment rapide.

L'échantillonnage consiste aussi à enregistrer un nombre de représentations instantanées du son, puis à les faire redéfiler à un taux variant entre 5.000 et 100.000 échantillons par seconde, pour recréer le son. Comme pour le film, la fidélité de reproduction dépend du taux d'échantillonnage.

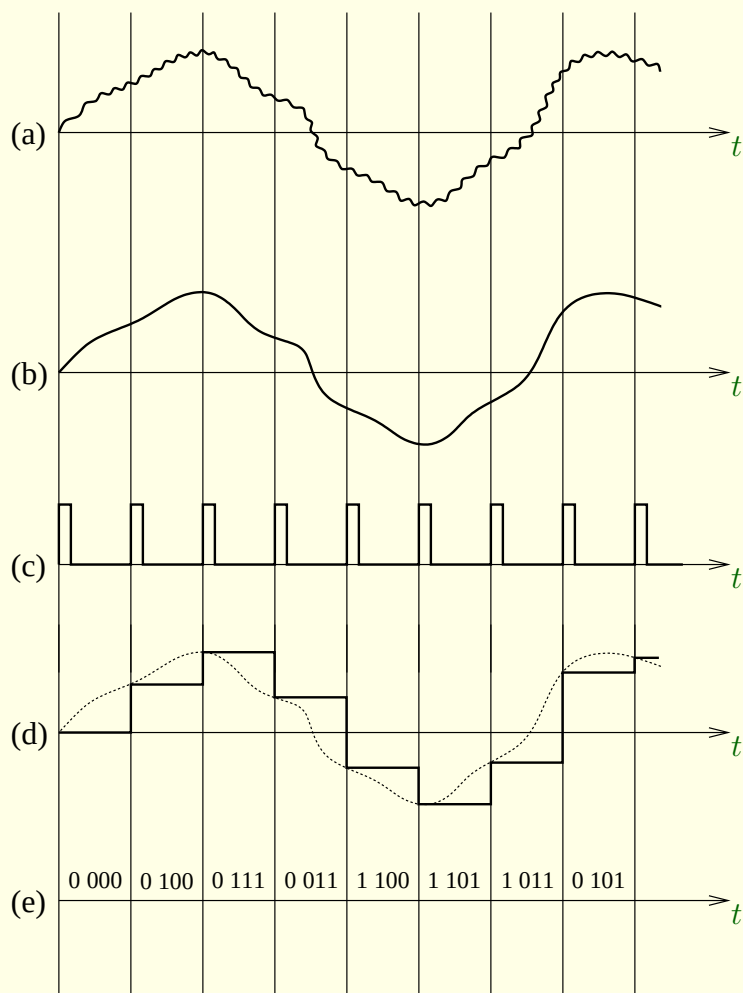


FIG. 2.23 – Étapes intervenant lors de la numérisation d'un signal.

Un signal numérique s'obtient en découpant le signal d'onde analogique en petits éléments qui sont ensuite stockés sous forme d'échantillons numériques, d'où le nom d'échantillonnage donné à ce processus. Dans le cas d'une image, les échantillons sont appelés pels ou pixels (**pixel** pour "picture element"); il s'agit de points auxquels on associe une valeur dans une représentation de couleurs.

Le nombre d'échantillons pris par seconde définit le taux ou fréquence d'échantillonnage.

Définition 12 [Fréquence d'échantillonnage] Nombre de mesures effectuées dans un temps donné pendant la conversion d'un signal analogique en données numériques.

Une fréquence d'échantillonnage de 22 [kHz] signifie que 22.000 mesures sont effectuées par seconde.

D'après SHANNON, la fréquence d'échantillonnage doit être égale au double de la fréquence la plus élevée contenue dans le signal. Voici le théorème de l'échantillonnage :

Théorème 13 [SHANNON] Une fonction $g(t)$ à énergie finie et à spectre limité, c'est-à-dire dont la transformée de FOURIER $\mathcal{G}(f)$ est nulle pour $|f| > W$, est entièrement déterminée par ses échantillons $g[nT_s]$, $n \in \{-\infty, +\infty\}$ pour autant que la fréquence d'échantillonnage f_s soit strictement supérieure au double de la borne supérieure du spectre

$$f_s > 2W \quad (2.9)$$

Soit, sous une forme simplifiée,

Théorème 14 [SHANNON] Pour pouvoir reconstituer un son correctement, le nombre d'échantillons pendant une seconde doit être le double de la largeur de bande de l'onde.

Autrement dit, pour un son dont la largeur de bande passante est de l'ordre⁴ de 4000 [Hz] (téléphonie), il faut au moins 8000 échantillons par seconde. Pour le la du diapason, son pur de 440 [Hz] , il en faut plus de 880 par seconde. Enfin, pour un disque compact (CD-audio), sachant qu'un son audible atteint 20 [kHz] , les signaux sont échantillonnés avec une marge de 10% à $44,1\text{ [kHz]}$.

Filtrage et repli de spectre

Nous n'avons pas encore évoqué jusqu'ici un facteur aussi important que troublant, producteur de distorsions très désagréables s'il n'est pas maîtrisé correctement : le repli de spectre ou **aliasing**.

Lorsqu'on tente de synthétiser des fréquences plus hautes que la moitié du taux d'échantillonnage original, ces fréquences ne sont pas effacées comme elles le sont par un appareil audio réel. Au contraire, elles réapparaissent en des endroits aléatoires sous forme de fréquences entièrement différentes donnant naissance au phénomène de repli de spectre. Le phénomène de repli

⁴Stricto sensu, le signal va jusqu'à 3400 [Hz] . Mais pour faciliter l'implémentation de l'échantillonnage, on considère une bande allant jusqu'à 4000 [Hz] .

de spectre est illustré par la figure 2.24 : les échantillons obtenus à la fréquence d'échantillonnage légèrement inférieure à 6 [Hz] ne permettent plus de représenter les fluctuations rapides de la fonction à 6 [Hz] , d'où erreur dans l'interprétation du signal.

La règle à respecter est que la plus haute fréquence prise en compte doit être inférieure à la moitié du taux d'échantillonnage. Il faut donc filtrer, c'est-à-dire supprimer toute une série de fréquences, avant d'échantillonner.

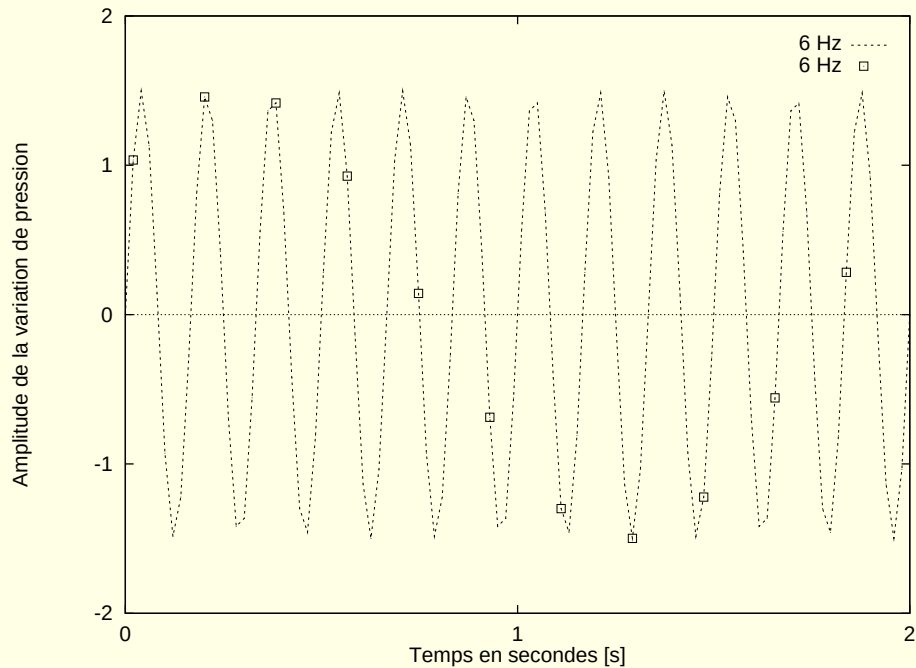


FIG. 2.24 – Repli de spectre ou aliasing.

Un phénomène similaire se produit au cinéma avec un roue qui tourne trop vite par rapport au nombre d'images échantillonnées (cf. figure 2.25) ; la roue se met à tourner dans le sens inverse.

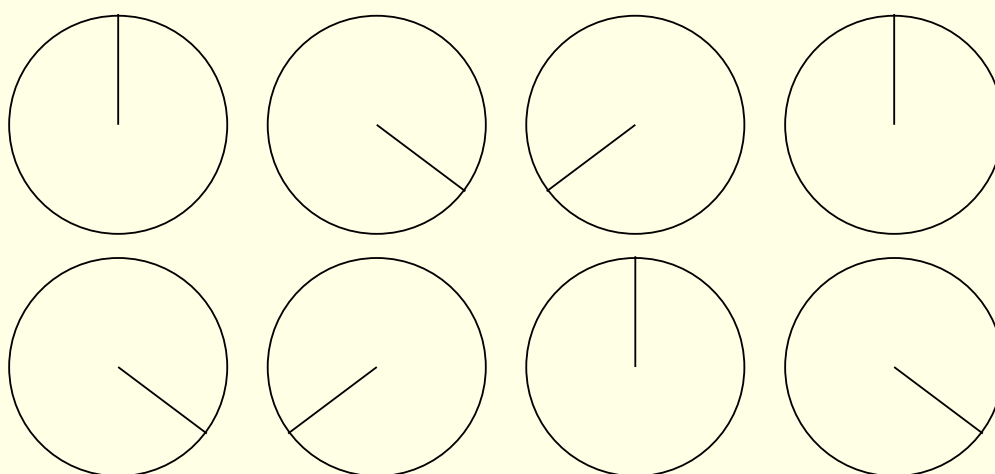
En toute rigueur, il faudrait prévenir l'apparition de fréquences artificielles –par exemple, toutes celles qui montrent la roue tournant à l'envers– par un filtrage préalable à l'échantillonnage. Il en résultera alors l'image d'une roue immobile.

L'échantillonnage fournit une série de valeurs réelles. Mais comme la résolution de chaque échantillon ne peut être continue pour des raisons de place de stockage et d'efficacité, on recourt à la quantification.

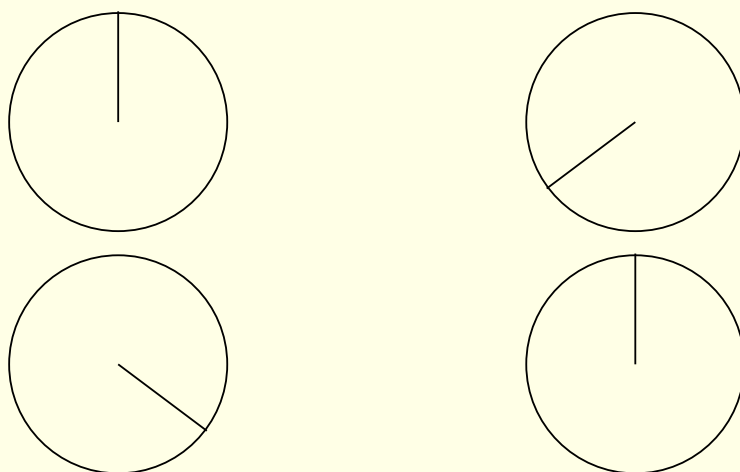
2.3.5 Quantification

La reproduction électronique des signaux utilise les éléments de comptage informatiques les plus simples, les bits, pour représenter les nombres issus de l'échantillonnage.

Définition 15 Le *bit* est l'information élémentaire en informatique. Il ne peut prendre que



Fréquence d'échantillonnage correcte



Repli de spectre dû à une vitesse de rotation trop élevée

FIG. 2.25 – Repli de spectre ; exemple de la roue qui tourne à l'envers au cinéma.

deux valeurs, 0 ou 1. En électronique, il est facilement représenté par des tensions différentes. Un *octet*, ou *byte* en anglais, est un ensemble de 8 bits.

La représentation précise de l'amplitude d'un signal analogique nécessite un nombre infini de bits puisque cette amplitude est par définition de nature continue. En pratique, il faudra approximer l'amplitude par un ensemble de valeurs discrètes. On parle alors de **quantification**. Par exemple, la courbe originale de la figure 2.26 est approximée par une fonction en escalier dont chaque marche s'est vue attribuer une valeur multiple de 0,5 comprise entre -3 et 3 . En prenant un pas entier pour incrément le long de l'axe des abscisses, l'approximation est la suite de valeurs discrètes suivantes : 0.5, 0, 1, 0.5, -1.5, ...

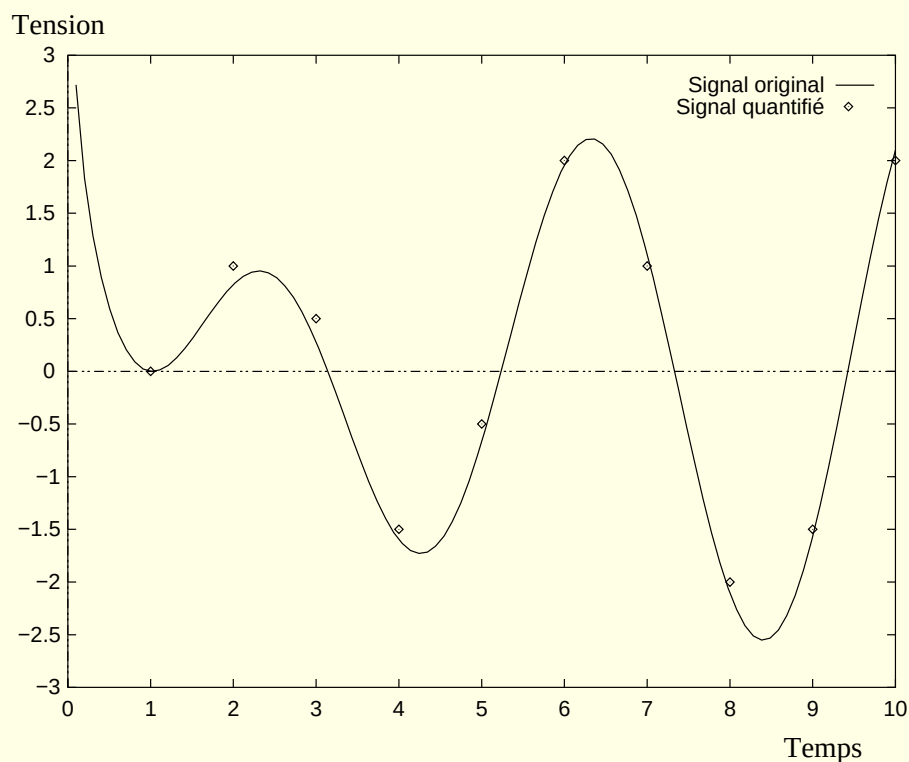


FIG. 2.26 – Quantification.

Un exemple complet d'échantillonnage est illustré à la figure 2.27. Les échantillons sont quantifiés avant d'être convertis en une suite de valeurs binaires 0 ou 1. Cette dernière porte le nom de codage **PCM** (Pulse Code Modulation⁵).

Dans le même ordre d'idée, on peut coder non pas les valeurs telles quelles mais la différence d'une valeur par rapport à la précédente. Cette technique porte le nom de **DPCM** (Differential Pulse Code Modulation); elle est illustrée par la dernière ligne de la figure 2.28.

⁵Le terme **modulation** est malheureux et impropre mais largement répandu. Il s'agit en fait d'un **codage** et non d'une modulation, qui elle consiste à altérer une sinusoïde de référence au moyen d'un signal modulant.

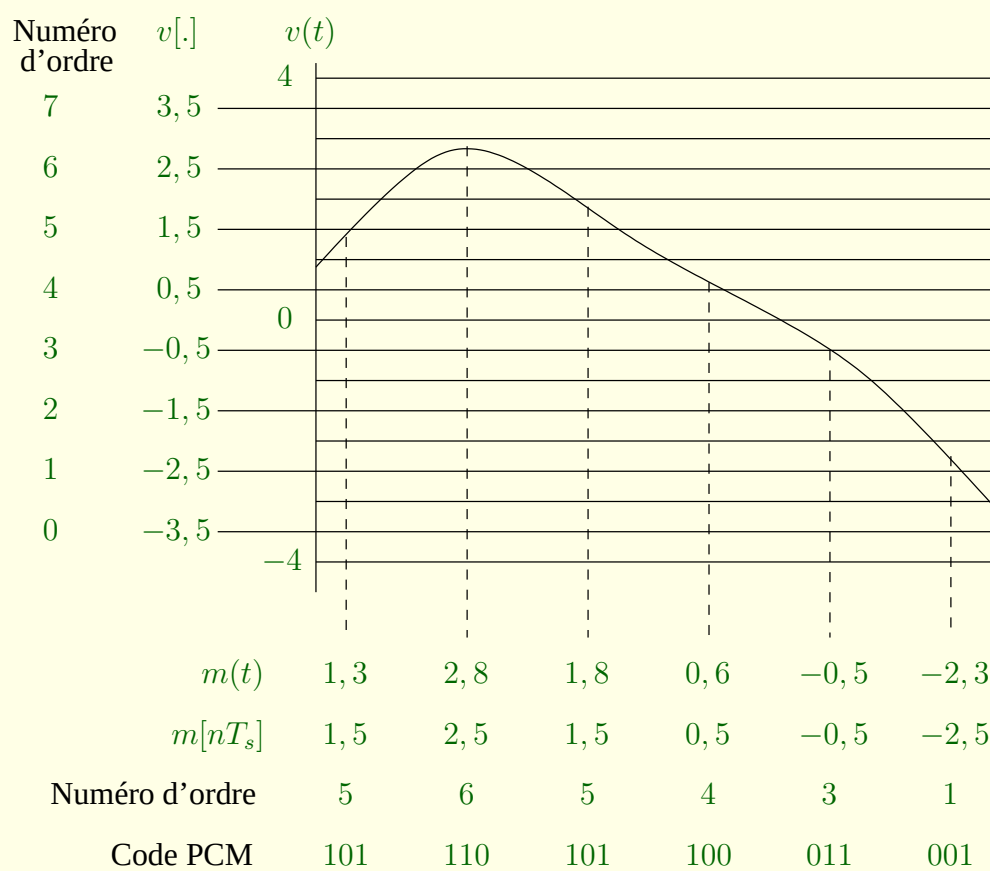


FIG. 2.27 – Échantillons instantanés, quantifiés et codes PCM.

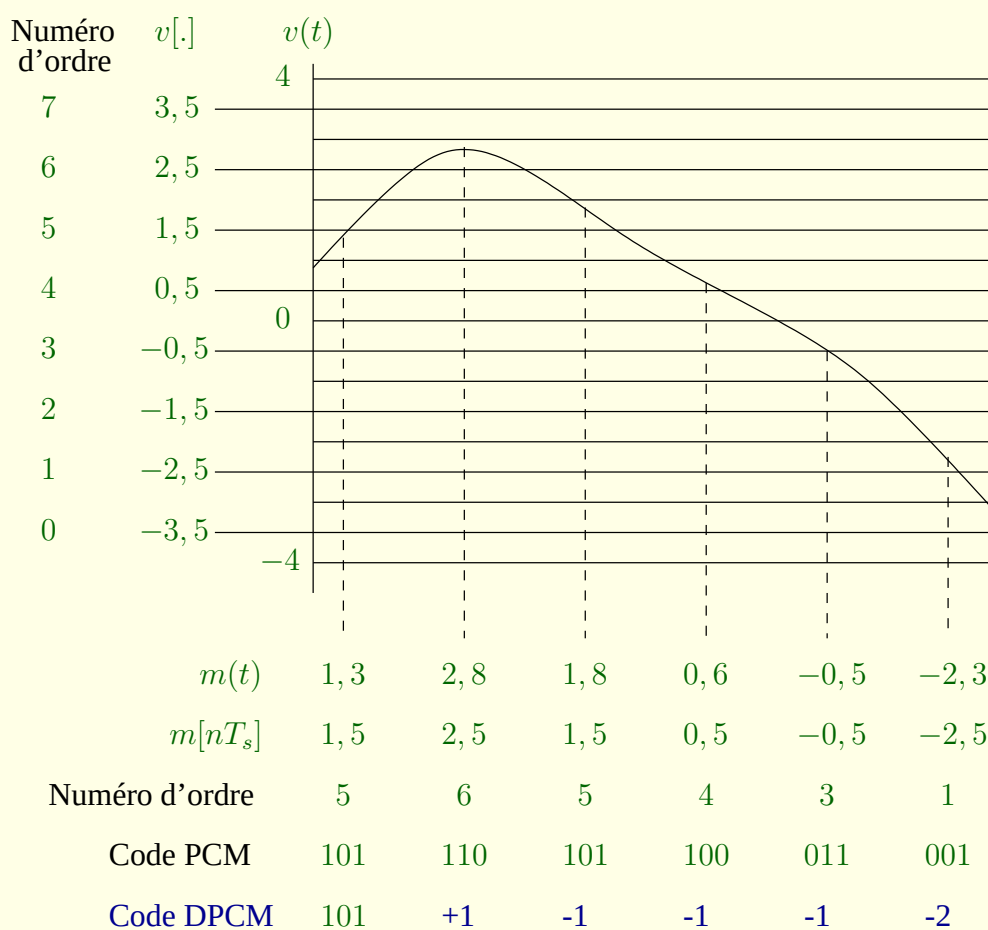


FIG. 2.28 – Échantillons instantanés, quantifiés, codes PCM et valeurs DPCM.

Lorsque l'analyse est faite par un système fonctionnant sur 8 bits, la valeur maximale représentable est 256 ($2^8 = 256$) et toutes les valeurs devront être comprises entre 1 et 256 –cet intervalle est éventuellement décalé vers $[0, 255]$. Un échantillonnage du son en 12 bits autorisera 4096 valeurs, en 16 bits 65.536 valeurs. Le tableau 2.2 détaille ces calculs. Dès lors, chaque fois que l'on ajoute un bit de quantification, la fidélité progresse ainsi d'une puissance de 2 puisque, les amplitudes restant fixes, l'erreur sur l'approximation diminue. La théorie précise que chaque bit additionnel améliore le rapport signal à bruit d'environ 6 décibels.

Nombre de bits	Nombre de niveaux	Valeurs possibles
1	$2^1 = 2$	$\{0, 1\}$
2	$2^2 = 4$	$\{0, 1, 2, 3\}$
3	$2^3 = 8$	$\{0, 1, \dots, 7\}$
8	$2^8 = 256$	$\{0, 1, \dots, 255\}$
12	$2^{12} = 1024$	$\{0, 1, \dots, 1023\}$

TAB. 2.2 – Correspondance entre le nombre de bits et le nombre de valeurs possibles.

En pratique, un signal numérique est donc décrit par la fréquence d'échantillonnage et par le pas de quantification. Voici deux exemples :

- Son de qualité parole : quantification à 8 bits, 8000 [Hz].
- Son de qualité CD : quantification à 16 bits, 44.100 [Hz].

Définition 16 [Débit] En multipliant le nombre de bits nécessaires à coder l'amplitude par la fréquence d'échantillonnage, on obtient le **débit** associé à un signal. Il s'exprime en bits par seconde [b/s].

Aux deux sons mentionnés ci-avant correspondent dès lors respectivement des débits de 64 et 706 kilobits par seconde ([kb/s]).

2.3.6 Passage de l'analogique au numérique et conversion inverse

La numérisation part du signal analogique pour en produire une série de bits ; le processus inverse est appelé **interpolation**. Il est indispensable pour rejouer des signaux sur des systèmes analogiques. Pour produire n'importe quelle fréquence, le balayage de l'écran d'un téléviseur par exemple, doit accepter des valeurs non entières. La technique utilisée est l'interpolation entre des valeurs. L'interpolation consiste à déduire une valeur à partir des ses deux voisins. La technique la plus utilisée est l'interpolation linéaire. Des procédés plus complexes utilisent des interpolations quadratiques ou polynomiales. L'interpolation la plus évoluée utilise la fonction sinus hyperbolique $\sin(x)/x$. En fait, hormis la fonction de sinus hyperbolique, toutes les techniques d'interpolation introduisent un bruit dans le son synthétisé car elles ne font qu'approximer les valeurs d'un échantillon véritable. Ce bruit s'ajoute au bruit du à la quantification.

2.3.7 Résumé

Le tableau 2.3 résume les principales notions utilisées pour la description des signaux analogiques et numériques. La section suivante aborde la question de la **compression**.

Analogique	Numérique
● Fréquence ● (Résolution) ● Bande passante	● Bit, byte (octet) ● Fréquence d'échantillonnage ● Quantification ● Débit ● Taux de compression

TAB. 2.3 – Principales grandeurs utilisées pour la description des signaux analogiques et numériques.

2.3.8 Faut-il préférer le numérique à l'analogique ?

Pour comparer les signaux analogiques et les signaux numériques, on distingue :

- la **fidélité**. Elle traduit la conformité au signal original.
- la **qualité**. Un signal de haute qualité est exempt de bruit.

Un signal numérique pourra tout au plus valoir, en terme de fidélité, un signal analogique. Bien évidemment, on fait en sorte qu'il n'y a aucune différence perceptible entre un signal analogique et ce signal analogique préalablement numérisé et interpolé. En ce qui concerne la qualité, un signal numérique peut s'avérer nettement supérieur à son équivalent analogique. Cela s'explique par les traitements que l'on peut effectuer sur un signal numérique.

2.4 Éléments de la théorie de l'information

2.4.1 Principe de la compression

Une fois les données numériques obtenues, le travail n'est pas achevé. En effet, les signaux numérisés représentent des quantités d'information (des débits) considérables contenant une certaine redondance.

Prenons le cas de la phrase de la figure 2.29 pour expliquer le principe de la suppression de redondance, qui n'est autre que la raison de la **compression**. Malgré la suppression des quelques lettres, la troisième version de la phrase est toujours compréhensible alors que le nombre de lettres a diminué de 20%. La réduction de taille a donc été possible en raison de l'existence d'une certaine redondance dans le message de départ.

La phrase contient des lettres redondantes.	37 lettres
L phrse contient des letres redodantes.	33 lettres
L phrse cotient des letre redodant.	29 lettres

FIG. 2.29 – Suppression de lettres redondantes.

D'une manière plus formelle, chaque lettre se caractérise par une certaine probabilité d'occurrence dans un contexte donné. Par exemple, dans la langue française, un "e" est plus probable qu'un "z". Nous fournissons ci-dessous une définition expérimentale de la probabilité d'une lettre.

Définition 17 [Probabilité] *La probabilité d'une lettre est le rapport du nombre d'occurrences de celle-ci par rapport à l'ensemble des occurrences des lettres, pour un grand nombre de textes. Cette probabilité est donc un nombre toujours compris entre 0 et 1.*

2.4.2 Mesure de l'information

La théorie de l'information cherche à établir l'information inhérente à un processus probabiliste ; elle part d'un principe qu'un événement certain n'apporte aucune information, au contraire d'un événement rare lorsque celui-ci survient. Considérons un événement aléatoire E qui se produit avec une probabilité $p(E)$.

Définition 18 *L'information propre de l'événement E , notée $i(E)$ est le logarithme en base 2 de l'inverse de sa probabilité*

$$i(E) = \log_2 \frac{1}{p(E)} = -\log_2 p(E) \quad (2.10)$$

Elle s'exprime en bit.

Si $p(E) = 1$, c'est-à-dire que l'événement E est certain, $i(E) = 0$ et l'information associée à E est donc nulle. Par contre, si $p(E) = 0,9$, le fait que E se réalise apporte une certaine quantité d'information. Dès lors, plus un événement est incertain, plus on lui attribue de l'information. À la limite, un événement de probabilité nulle a une information propre infinie. Cependant, un événement qui ne se produit jamais n'est pas très intéressant.

2.4.3 Notion d'entropie

La théorie mesure la redondance en comparant la taille initiale à l'entropie du message. Voici la définition de cette dernière.

Définition 19 [Entropie] *Soit un alphabet X de N lettres, l'entropie de cet alphabet, noté $H(X)$, est l'opposé de la somme du produit des probabilités multipliées par leur logarithme en*

base 2

$$H(X) = - \sum_{n=1}^N p(x) \log_2 p(x) \quad (2.11)$$

L'entropie est exprimée en bits, ce qui signifie que l'entropie est calculée par le logarithme en base binaire. Pour un alphabet de deux lettres de même probabilité, le calcul de $H(X)$ fournit un bit⁶, parfois appelé **Shannon**. L'entropie est donc telle qu'il faut un bit pour discerner entre les deux lettres.

Le tableau suivant compare l'entropie de deux alphabets dont les lettres ont des probabilités différentes.

A	:	0.25	A	:	0.7
B	:	0.25	B	:	0.1
C	:	0.25	C	:	0.1
D	:	0.25	D	:	0.1
H(X)	=	2 bits	H(Y)	=	1,4 bits

L'entropie mesure l'incertitude quant à une valeur. Dans la partie gauche du tableau, les quatre lettres sont équiprobables ; on ne peut donc prévoir quelle lettre sera vraisemblablement choisie lors d'un prochain tirage au sort. De la sorte, il n'y a pas moyen de distinguer entre les quatre lettres et par conséquent l'entropie vaut 2 bits. Dans la partie droite, le déséquilibre entre les probabilités est net : la lettre A est plus probable que les autres lettres, ce qui entraîne une diminution de l'entropie.

On montre que l'entropie est maximale et vaut $\log_2 n$ lorsque tous ses symboles d'une source sont équiprobables. En effet, prenons le cas d'une source binaire comprenant les deux symboles x_1 et x_2 , telle que

$$\begin{cases} p(x_1) = k \\ p(x_2) = 1 - k \end{cases}$$

où $k \in [0, 1]$. L'entropie de cette source vaut, par définition,

$$H(S) = -k \log_2 k - (1 - k) \log_2 (1 - k) \quad (2.12)$$

L'entropie est une fonction de la probabilité k . Notons, par soucis de clarté, la valeur de l'entropie de source comme une fonction de son argument $H(k)$. Cette fonction est représentée à la figure 2.30.

On peut tout d'abord remarquer que l'entropie est nulle pour $k = 1$ (le symbole x_1 est émis avec certitude) et pour $k = 0$ (le symbole x_2 est émis avec certitude), ce qui correspond au cas où il n'y a aucune incertitude sur le symbole émis par la source. De plus, l'entropie atteint son maximum pour $k = 0,5$ -la source a alors une entropie d'information de 1 [b/symbole]-, ce qui correspond au fait que les deux symboles sont équiprobables. En d'autres mots, il est tout aussi probable que la source émette le symbole x_1 que le symbole x_2 .

⁶On devrait, en principe, parler de bit d'information pour le distinguer de l'unité de mesure du débit.

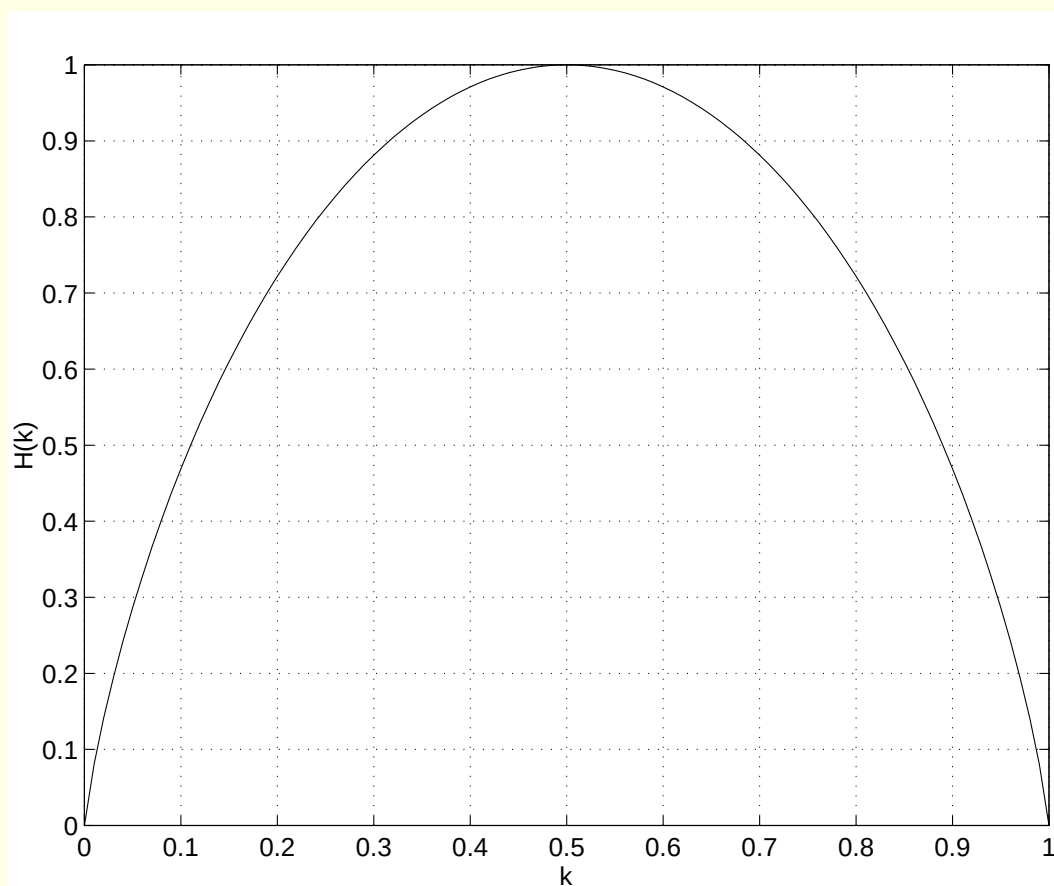


FIG. 2.30 – Entropie d’une source binaire en fonction de la probabilité de ses symboles.

2.4.4 Codage

Un codage se réalisera en remplaçant des lettres ou des mots par d'autres plus courts. D'un point de vue théorique, le codage le plus efficace est celui qui se rapprochera le plus de l'entropie du message initial.

La notion d'entropie joue un rôle essentiel dans la caractérisation du contenu d'information intrinsèque d'un message ; ce rôle est explicité par le théorème suivant :

Théorème 20 *Le nombre de bits minimum pour coder un symbole est toujours supérieur à l'entropie de source.*

Autrement dit, l'entropie d'une source fixe le nombre de bits minimum moyen nécessaire à coder un symbole de la source. Il n'est pas possible de descendre en-dessous de cette valeur minimale.

2.5 La compression

Un signal échantillonné et quantifié représente généralement un flux binaire, ou débit, trop important pour les applications courantes. Pour réduire le débit, il faut recourir à la compression.

Définition 21 *[Compression] Le procédé de réduction du flux binaire est appelé **compression**.*

L'entropie détermine la limite inférieure pour représenter un échantillon. Si l'entropie vaut 3 bits par lettre, il ne sera pas possible de coder⁷ les échantillons avec moins de 3 bits, quelle que soit la technique mise en œuvre.

Le taux de compression est une mesure de l'efficacité de représentation de deux alphabets. Il est défini comme suit :

Définition 22

$$\text{Taux de compression} = \frac{\text{Nombre de bits avant compression}}{\text{Nombre de bits après compression}} \quad (2.13)$$

2.5.1 Compression sans perte

Il convient de faire une remarque importante. Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué que le cas de la compression qui permet de reconstituer parfaitement le message original au départ du message comprimé. Il s'agit donc d'un codage **sans perte**. Pour une image médicale, le taux d'une compression sans perte est compris entre 1 et 3. Un tel taux de compression, typique pour des images naturelles, ne peut satisfaire les exigences d'applications multimédia.

⁷Les termes codage et compression sont parfois utilisés improprement. Par codage il faut entendre "changement de représentation". Compression signifie qu'il y a diminution du nombre de bits associés au signal traité. Une compression modifie inévitablement la représentation et, partant, elle effectue un codage, d'où la confusion.

2.5.2 Compression avec pertes

Il se fait qu'une partie de l'information présente théoriquement n'est pas perceptible. Ainsi, l'œil humain n'est pas capable de voir les atomes sans microscope. Aussi serait-il inutile de décrire les objets au niveau atomique. Les techniques qui suppriment cette information superflue font partie des techniques perceptives de compression. Dans le cas du son et de l'image, le principe revient à supprimer, par filtrage, toutes les fréquences que l'oreille ne peut entendre ou que l'œil ne peut percevoir, en tenant compte du contexte.

Suite à la suppression d'information, il n'est plus possible de reconstituer le signal original avec exactitude. On parle alors de compression avec pertes. De telles techniques de compression conduisent à des taux de l'ordre de 10 pour des images naturelles, soit environ 5 fois de plus qu'une technique sans perte, sans dégradation perceptible. Nous reviendrons sur le thème du codage avec ou sans perte en parcourant les algorithmes de compression pour les différents types de données.

2.6 Classification de l'ensemble des techniques de compression

Dans cette section, nous allons tracer les grandes lignes des algorithmes de compression des sources multimédia et mentionner les standards les plus répandus. Il ne s'agit néanmoins pas d'une liste exhaustive.

2.6.1 Compression de données textuelles

La transmission d'un texte s'accommode mal d'erreurs et, pour ce type de signal, il n'est donc question que de codage sans perte.

Les techniques rencontrées dans les applications sont des variantes des trois techniques de codage suivantes :

Codage RLC (Run Length Coding). Le principe employé pour ce codage est très simple : toute suite d'octets de même valeur est remplacée par la valeur, à laquelle on associe le nombre d'occurrences suivantes.

Codage de HUFFMAN. Il s'agit d'une méthode de codage purement statistique consistant à coder les lettres suivant leur probabilité d'apparition. À la lettre la plus fréquente est associé le mot de code le plus court ; le mot de code le plus long s'utilise pour la lettre la moins probable.

Codage LEMPEL, ZIV, WELCH (LZW). Cette méthode consiste à remplacer les chaînes de caractères rencontrés précédemment par leur adresse dans une table au fur et à mesure du codage. Le récepteur procède de façon symétrique et reconstitue le dictionnaire par le même algorithme.

Cette méthode est utilisée par les logiciels de compression les plus courants tels que ARC ou PKzip.

Ces trois techniques ne sont pas réservées aux seules données textuelles. La transmission d'un fax par exemple utilise la technique de codage RLC car les lignes contiennent de longues séries de pixels blancs.

Codage de HUFFMAN

Examinons le fonctionnement du codage de HUFFMAN.

La première étape de la méthode consiste à réorganiser les symboles par ordre de probabilité décroissante. Chaque symbole est alors associé à une feuille d'un arbre en construction. On relie ensuite les feuilles en créant un nœud auquel on associe la somme des probabilités des deux symboles correspondants. À chaque étape, on fusionne les 2 nœuds (ou feuilles) ayant les probabilités les plus faibles. On répète ce processus jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un seul nœud dont la probabilité associée vaut 1.

Exemple. Considérons une source à 4 symboles A_1, A_2, A_3, A_4 respectivement de probabilité $p(A_1) = 0,5$, $p(A_2) = 0,25$, $p(A_3) = 0,125$, $p(A_4) = 0,125$. Dans cet exemple, les symboles ont déjà été réorganisés par ordre décroissant de leur probabilité respective. L'arbre est construit comme indiqué à la figure 2.31.

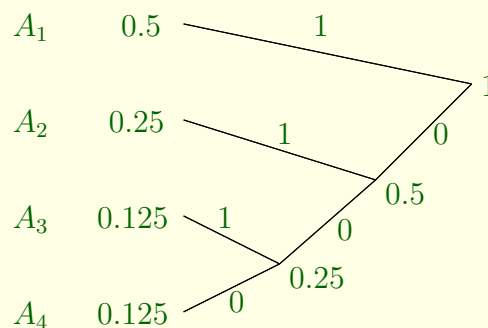


FIG. 2.31 – Illustration de la méthode de HUFFMAN.

Une fois l'arbre construit, on associe à chaque branche de l'arbre un symbole 0 ou 1. Il suffit de redescendre l'arbre jusqu'aux symboles pour déterminer le code correspondant

$A_1 \rightarrow 1$
 $A_2 \rightarrow 01$
 $A_3 \rightarrow 001$
 $A_4 \rightarrow 000$

Appelons $l(A_i)$ le nombre de bits associé au symbole A_i . Dès lors, nous avons

$$\begin{aligned} l(A_1) &= 1 \\ l(A_2) &= 2 \\ l(A_3) &= 3 \\ l(A_4) &= 3 \end{aligned}$$

Le nombre moyen de bits utilisés par symbole, M , est donné par

$$M = \sum_{i=1}^4 p(A_i)l(A_i) = 1,75 \quad (2.14)$$

Or, l'entropie de la source est donnée par

$$H(X) = - \sum_{i=1}^4 p(A_i) \log_2 p(A_i) = 1,75 \quad (2.15)$$

Il vient donc que le code obtenu par la méthode de HUFFMAN est optimal. Il faut remarquer que l'association triviale ($A_1 = 00$, $A_2 = 01$, $A_3 = 10$, $A_4 = 11$) aurait fourni un code de 2 bits par symboles. L'exemple précédent pourrait faire croire que le code de HUFFMAN conduit toujours à $M = H(X)$. Ce n'est certes pas le cas et, de plus, la solution n'est pas nécessaire unique. Ainsi, dans l'exemple précédent, on peut permuter les mots de code de A_3 et A_4 sans affecter la valeur de M .

2.6.2 Compression audio

La représentation numérique de base est le **PCM** (Pulse Code Modulation). Elle n'est rien de plus que le signal échantillonné quantifié. Selon le niveau qualitatif souhaité, la fréquence d'échantillonnage sera choisie entre 7 et 78 [kHz]. La résolution sera comprise entre 8 et 16 bits.

D'autres techniques sont :

DPCM Par cette technique, la compression s'obtient en codant la différence entre deux valeurs échantillonnées successives plutôt que les valeurs elles-mêmes, ce qui nécessite un plus petit nombre de bits.

ADPCM Adaptive Differential Pulse Code Modulation. Il s'agit d'une technique de transformation d'un son analogique en valeurs numériques, avec compactage final de l'ordre de 2 à 4, selon l'algorithme utilisé. La méthode consiste à coder la différence entre un échantillon et la valeur prévisible de l'échantillon suivant. Elle est utilisée par plusieurs cartes son mais aussi dans les standards de l'**ITU** pour des transmissions téléphoniques numériques. Il existe trois variantes (A, B et C) de l'algorithme.

Codage adaptatif. Dans le cas particulier des signaux audio, on peut utiliser les caractéristiques psycho-acoustiques de l'oreille humaine pour définir des algorithmes plus efficaces encore. En effet, il se produit dans la perception auditive un effet de masquage par lequel les sons contenant des niveaux faibles ne sont pas perçus. En conséquence, avant la compression, on analyse le signal par bandes de fréquences dont on mesure le niveau. Les bandes contenant des signaux de faible amplitude sont supprimés. Plusieurs algorithmes de compression sont basés sur ce principe. Par exemple, le procédé MUSICAM a été choisi pour les compression des signaux audio dans le format **MPEG-1**.

CELP Code Excited Linear Predictor. Le principe de cette méthode est similaire à celui de l'ADPCM : on cherche à prévoir les échantillons suivants de manière à ne devoir coder que la différence. Plus la prédiction concorde avec la valeur échantillonnée et plus la différence sera faible. Utilisé pour des signaux de parole, le CELP comprend un algorithme de synthèse vocale en guise de prédiction. Ce type d'algorithme sert à obtenir des hauts taux de compression, pouvant conduire à des débits inférieurs à 20 [kb/s].

Voici quelques standards de compression numériques audio :

TS GSM 06.10 Cette norme a été définie par l'ETSI pour le codage de parole pour **GSM**. Elle est conçue pour offrir un débit de 13 [kb/s] et se prête à des transmissions de mauvaise qualité.

Famille G.72x Cette famille de standards résulte de travaux de l'ITU⁸ pour permettre des communications à bande étroite sur réseau téléphonique. Les standards peuvent être utilisés dans diverses applications allant de la voix par modem à la vidéoconférence où ils s'utiliseront en conjonction avec la norme H.261 de compression vidéo.

La norme G.721 fut la première norme pour coder la parole à 32 [kb/s] sur des canaux téléphoniques (de 300 à 3400 [Hz]). Elle fut remplacée en 1990 par la norme G.726 qui permet d'obtenir des débits de 16, 24, 32 et 40 [kb/s]. Ces deux normes utilisent la représentation ADPCM.

L'ITU développa ensuite la norme G.722 pour des canaux téléphoniques de 8 [kHz] de largeur de bande. Il s'agit d'une norme hybride qui découpe la bande de fréquences en deux parties : une bande de fréquences de 0 à 4 [kHz] et une autre de 4 [kHz] à 8 [kHz], toutes deux échantillonnées à 16 [kHz]. Ces deux bandes sont respectivement comprimées à 48 et 16 [kb/s] pour ne former qu'un flux unique à 64 [kb/s] en sortie de l'encodeur.

Pour des débits plus faibles, il existe la norme G.728 qui fournit des résultats au moins aussi bon que la norme G.721 mais à un débit de 16 [kb/s]. Cette performance est obtenue en remplaçant le codeur ADPCM par un codeur CELP.

L'ITU a défini la norme H.324 de vidéoconférence pour des débits inférieurs à 64 [kb/s]. Elle inclut la norme G.723, qui dans son mode à 6,3 [kb/s] fournit des résultats similaires au mode 32 [kb/s] de la norme G.726.

Un consortium de fabricants a décidé de recourir à la norme G.723 pour permettre des communications par Internet dans le cadre de la norme **H.323** qui n'est autre que le pendant

⁸<http://www.itu.int>

de la norme H.324 pour des réseaux à qualité de service inférieure. Une version améliorée a encore été développée ; il s'agit de la norme G723.1.

Le tableau 2.4 reprend les techniques de compression pour la voix.

Standard	Technique de compression	Débit [kb/s]	Qualité	Applications typiques
G.711	PCM + quantification non-linéaire	64	bonne	Téléphonie PSTN/ISDN
G.721	PCM différentiel adaptif (ADPCM)	32 16	bonne correcte	Téléphonie à débit réduit
G.722	ADPCM avec codage en sous-bandes	64 56/48	excellente bonne	Audio-conférence
G.726	ADPCM avec codage en sous-bandes	40/32 24/16	bonne correcte	Téléphonie à débit réduit
LPC-10	Codage prédictif linéaire (LPC)	2,4/1,2	pauvre	Téléphonie dans les réseaux militaires
G.728	Codage à excitation LPC (CELP)	16	bonne	Téléphonie faible délai / faible débit
G.729	CELP	8	bonne	Téléphonie dans les réseaux radio
G.729(A)	CELP	8	bonne	Téléphonie et données (Fax) simultanées
G.723.1	CELP	6,3 5,3	bonne correcte	Vidéo et Internet Téléphonie

TAB. 2.4 – Résumé des standards de compression de la voix et leurs applications (d'après [3, page 233]).

MPEG-1 audio. La norme de codage audio comprise dans **MPEG-1** part d'un découpage en une série de 32 canaux fréquentiels de bande étroite, appelés sous-bandes. La figure 2.32 montre le schéma simplifié du codeur MPEG-1.

Dans un tel schéma, chaque sous-bande est traitée indépendamment. Les signaux PCM à l'entrée ont été échantillonnés à 32, 44.1 ou 48 $[kHz]$ sur 16 ou 20 bits. La première étape consiste à découper le signal en 32 sous-bandes, chacune étant par la suite sous-échantillonnée par un facteur 32 (notation 32 ↓ sur le dessin). Suit alors une mise à niveau des 32 signaux de sortie, qui sont ensuite quantifiés et codés. Le modèle psycho-acoustique MUSICAM (cf. supra) est la partie qui utilise les effets de masquage pour augmenter l'efficacité de codage sans altérer la perception des sons. Il agit sur la quantification et le codage de chacune des sous-bandes.

La partie audio (partie 3) de la norme MPEG-1 sert au codage de son au format MP3.

Le standard de compression audio de MPEG-2 est une extension de la norme MPEG-1. On y a ajouté la possibilité de représenter jusqu'à 5 signaux haute fidélité, un support pour

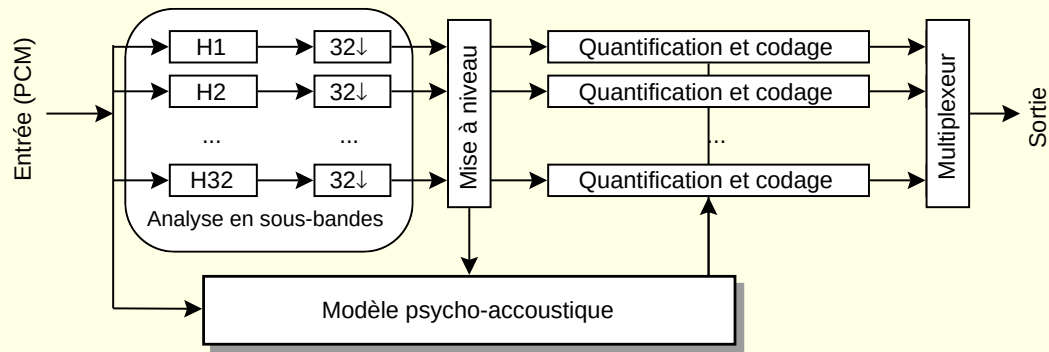


FIG. 2.32 – Schéma simplifié d'un encodeur audio MPEG-1.

plusieurs langues, des modes de compression à bas débit (pouvant aller jusqu'à 8 [kb/s]) et des fréquences d'échantillonnages supplémentaires. Ces extensions ne remettent pas en cause la compatibilité ascendante du standard car un décodeur MPEG-2 est capable, dans ce mode étendu, de décoder les signaux MPEG-1. Toutefois, un nouveau mode, non compatible, fait également partie de la norme.

Le format MP3, bien que largement répandu, n'en reste pas moins soumis à des contraintes. C'est la raison pour laquelle certains ont développé des formats basés sur des technologies libres de tout droit. Ainsi, la technologie **Vorbis** sert de base au format **OGG VORBIS**⁹ destiné à remplacer le format MP3.

AC-3. Le système AC-3 développé par DOLBY est du même type que MPEG-1 : découpage en sous-bandes et modèle psycho-acoustique. Il a été inclus dans les spécifications **DAVIC** qui définissent les services de distribution de télévision numérique.

La figure 2.33 montre une logiciel applicatif audio typique. La fenêtre principale de ce logiciel mentionne le débit et la fréquence d'échantillonnage.

2.6.3 Le délicat problème de la protection des droits d'auteur

Le diagramme de la figure 2.34 reprend une série de représentations de signaux sonores.

L'abondance de formats distincts pose problème car il est techniquement difficile de protéger un signal sous toutes ses formes.

2.6.4 Compression image

Différentes méthodes sont utilisées pour la compression d'images fixes, les plus simples se contentant de réduire le nombre de bits servant à coder les couleurs de base (**RGB**).

L'**ISO** et l'**ITU** ont été à l'origine de plusieurs initiatives pour définir une norme pour la compression des images. Les images ne contenant que deux couleurs (noir et blanc) sont traitées

⁹<http://www.vorbis.com>



FIG. 2.33 – Exemple de panneau d'application audio.

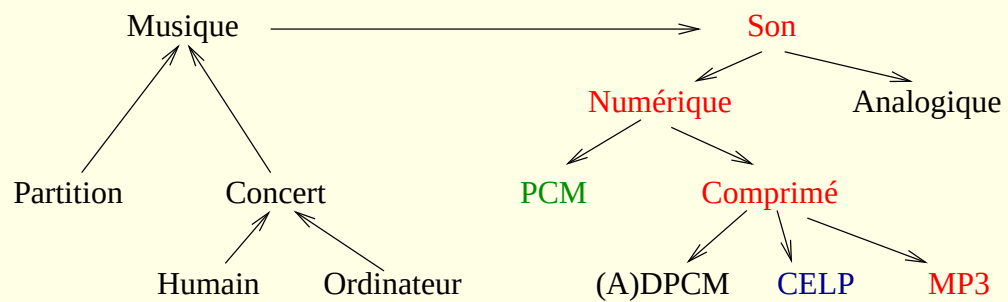


FIG. 2.34 – L'ensemble des techniques de représentation d'un signal audio.

par des algorithmes de type RLC (cf. page 56). C'est le cas des algorithmes utilisés pour la transmission de fax (fax groupe 3 et 4).

La tâche est nettement plus ardue lorsqu'il s'agit de coder des images naturelles en couleur. Le groupe **JPEG** de l'ISO a relevé ce défi. Le principe de la norme de codage JPEG est le suivant (le schéma de la figure 2.35 illustre le mécanisme de compression et de décompression sous forme graphique) :

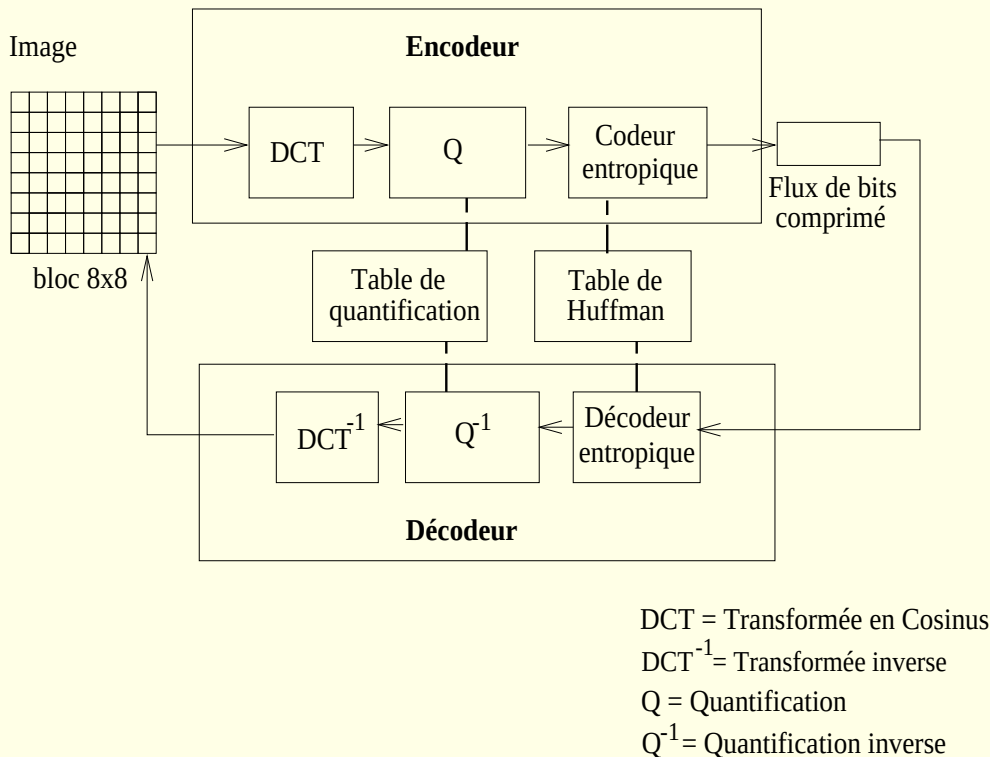


FIG. 2.35 – Codec (codeur-décodeur) JPEG.

1. L'image est tout d'abord convertie au format YC_bC_r pour des raisons d'efficacité de codage.
2. Le signal de luminance (Y) et les signaux de chrominance sont ensuite divisés en blocs de 8×8 pixels.
3. On applique une analyse fréquentielle, appelée Transformée en Cosinus Discrète ou Discrete Cosine Transform (**DCT**), dont le principe est similaire à celui de l'analyse de FOURIER, à chaque bloc de 64 pixels. On passe ainsi d'une représentation spatiale de 64 pixels à une représentation fréquentielle avec une composante continue donnant le niveau moyen du bloc.
4. Les coefficients de la représentation fréquentielle sont quantifiés avec une précision plus faible pour les hautes fréquences étant donné que l'œil ne les perçoit pas.

5. Un codage entropique de HUFFMAN (codage sans perte) est finalement appliqué aux coefficients.

Avec JPEG, des taux de compression de l'ordre de 10 sont possibles sans altération visible de l'image. La figure 2.36 montre différentes images et les taux de compression respectifs.



FIG. 2.36 – (a) image originale, (b-c-d) images comprimées avec des taux de compression respectifs de 14, 23 et 41.

JPEG peut fonctionner suivant différents modes, séquentiel, progressif ou hiérarchique.

- Le mode séquentiel est le mode de fonctionnement habituel et le plus performant du point

de vue de l'efficacité de codage. Il consiste à coder bloc après bloc en partant du coin supérieur gauche.

- Dans le mode **progressif**, l'encodeur parcourt plusieurs fois l'image et ajoute des détails au fil des parcours. Par exemple, lors du premier parcours, seule la valeur de la composante continue de chaque bloc est rendue à l'écran. Viennent ensuite les signaux à basse fréquence puis finalement les petits détails.
- Quant au mode **hiérarchique**, il revient à traiter l'image comme une série d'images à plusieurs niveaux de résolution dont la recombinaison reproduit l'image originale.

Le mode **séquentiel** est préférable au mode **progressif** du point de vue de l'efficacité de compression alors que la visualisation d'une image au format **progressif** offre plus de confort. Le mode **hiérarchique** sert principalement à assurer la compatibilité entre terminaux capables de projeter des images de taille différente. Ainsi, un écran de téléviseur **PAL** traitera seulement une partie du flux binaire d'un signal de télévision à haute définition, à l'inverse d'un téléviseur à haute définition qui traitera l'ensemble du même flux binaire.

Norme JPEG2000

Le comité de normalisation JPEG a entrepris des travaux pour définir une nouvelle norme de compression image. Cette norme, appelée **JPEG2000**, est basée sur le principe de codage en ondelettes. La norme permet également de compresser prioritairement une zone spécifique de l'image appelée **région d'intérêt** (Region of Interest, **ROI**). Cette notion est illustrée à la figure 2.37.

Autres formats

Pour coder des graphiques et des images simples, on a vu apparaître le format **GIF** (Graphics Interchange Format), abondamment utilisé sur le réseau Internet. Le mode de compression du format **GIF** est basé sur l'algorithme LZW. Il ne s'agit néanmoins pas d'un standard. Ces formats sont décrits à la section 2.7.2.

2.6.5 Compression vidéo

Vu la quantité d'information que représente une séquence vidéo, la complexité d'un codeur-décodeur (codec) vidéo est d'un autre ordre de grandeur que celui pour image fixe. Il existe plusieurs normes de compression vidéo dont les plus connues et les plus utilisées appartiennent aux familles **H.26x** et **MPEG-x**.

Toutes ces techniques exploitent deux types de redondance :

1. la redondance entre les valeurs des pixels de blocs voisins d'une même image et
2. la redondance entre images successives.

Elles donnent respectivement naissance aux techniques de codage **intra** et **inter**.

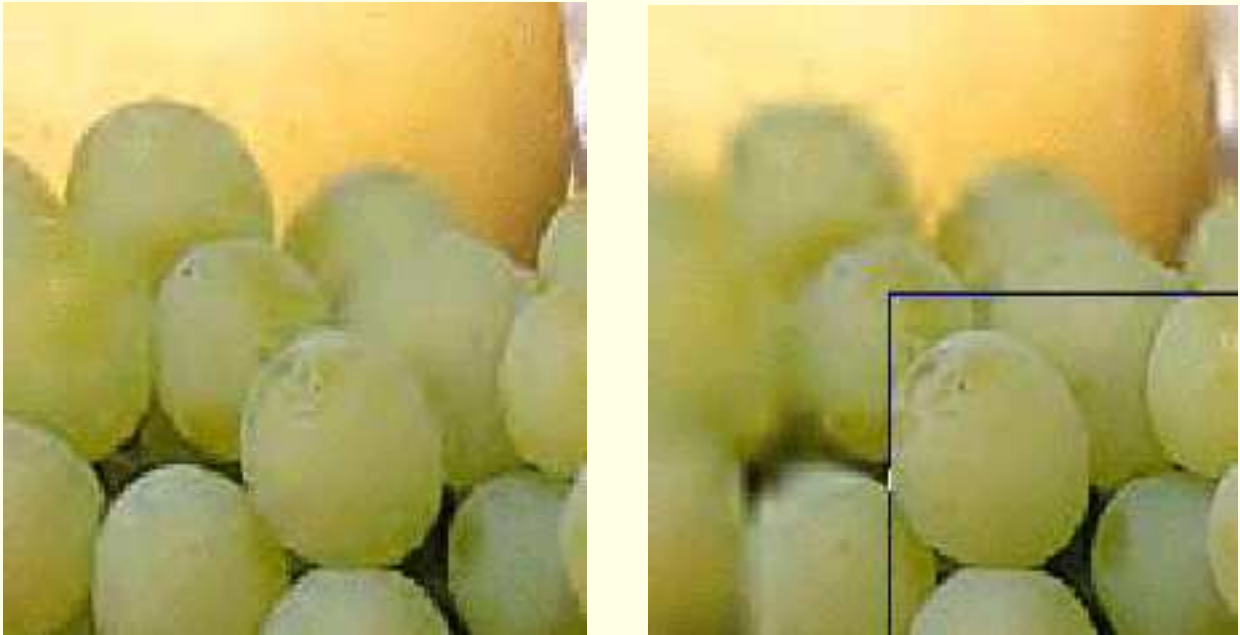


FIG. 2.37 – Deux images comprimées avec un même taux de compression ; la seconde concentre l'effort de compression dans une région d'intérêt.

Pour le codage intra, le problème s'apparente à celui de **JPEG** puisqu'il n'y a qu'une image à considérer. De fait, on supprime la redondance en exploitant les caractéristiques d'une transformée en cosinus discrète (**DCT**), tout comme pour JPEG. La mise au point d'une méthode capable d'exploitation de la redondance entre images successives fut plus laborieuse. L'idée imaginée pour la première fois dans le codeur H.261 consiste à prédire les images suivantes, appelées trames dans le jargon du codage d'image, à partir de l'image traitée. Il y a donc une distinction entre l'image codée en intra (trame **I**) et l'image prédite (trame **P**). Dans **MPEG**, on fait mieux encore puisqu'on définit des trames **B** qui se situent entre des trames I et P. Les trames B sont prédites à la fois à partir d'une image précédente mais aussi d'une image suivante.

Le dessin de la figure 2.38 permet de comprendre le mécanisme. Au départ, on code une image I. Cette image ne fait aucune référence à une autre image. À partir de cette image, l'algorithme de l'encodeur calcule une prédiction et code la différence entre la prédiction et l'image ; c'est une image P. Cette image P sert elle même à prédire une autre image P, jusqu'à ce qu'il soit décidé de coder à nouveau une image I. Entre les images I et P, on utilise la prédiction bi-directionnelle cette fois sur base des images P ou I les plus proches. C'est ainsi qu'on parvient à glisser deux images B entre des images I et P sans dégradation perceptible de la séquence. L'ensemble constitué d'une image I et des images prédites est appelé Group of Pictures (**GOP**).

Plutôt que de décrire les normes en détail, ce qui nous mènerait trop loin, nous avons résumé les principales caractéristiques des normes H.261 et **MPEG-1** dans le tableau suivant :

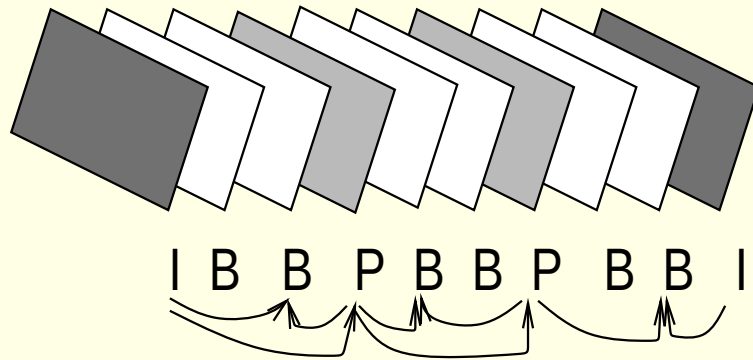


FIG. 2.38 – Schéma de codage temporel dans MPEG.

	MPEG-1	H.261
Application	édition	transmission en temps réel
Taille de l'image	$\leq 4095 \times 4095$	352×288 (CIF) ou 176×144 (QCIF)
Débit	$\pm 1.5 [Mb/s]$	multiple de $64 [kb/s]$
Types d'images	I, P, B	I, P
Modèle de couleur	YC_bC_r	YC_bC_r
Complexité	élevée	moyenne
Mémoire	jusqu'à plusieurs images	une image

Multiplexage des données

Il ne suffit de pas créer un flot de bits, appelé flux ou bitstream, comprimé par signal composant la séquence audio-visuelle pour arriver à un flux complet. Il faut également entrelacer les données ; ce problème est illustré à la figure 2.39. La manière de constituer le flux binaire est spécifié par toute norme de compression.

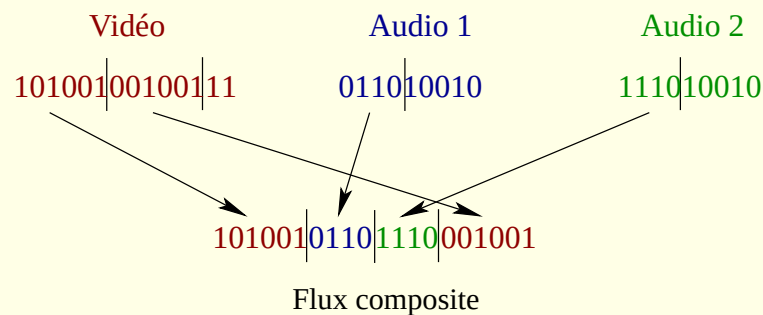


FIG. 2.39 – Multiplexage : création d'un flux composite.

MPEG-2 : les notions de profils et de niveaux

La norme **MPEG-2** est le résultat de la seconde phase de travaux menés par le groupe MPEG de l'**ISO**. À l'origine, il s'agissait de définir une norme permettant le codage de signaux à haute définition et de qualité studio, ce qui n'était pas possible avec **MPEG-1**. Au fil des travaux, il fut décidé de normaliser une série d'outils fonctionnant au choix suivant des profils (profiles en anglais) et des niveaux (levels en anglais). Un profil spécifie une syntaxe de flux de bits (bitstream) ainsi qu'un jeu de contraintes propres à une application. Les niveaux représentent eux la résolution de l'image. Ainsi, le **main level** est défini pour des images au format **CCIR601** –la norme CCIR601 spécifie le format des images numériques de qualité studio. Le décodeur le plus usuel est dénommé **MP@ML** pour **main level@main profile**.

La norme **DVB**, qui couvre tous les aspects (transmission, sécurité, compression, etc) de la **diffusion** de signaux de télévision numérique terrestre ou par satellite, englobe la majorité des éléments de la norme MPEG-2.

MPEG-2 : “program stream” et “transport stream”

MPEG-2 a aussi apporté une autre nouveauté à savoir la distinction entre “program stream” et “transport stream”. Le **program stream** est un flux tel qu'il se présente habituellement. Le **transport stream** est un flux adapté à des conditions de transmission particulièrement sévères ; par exemple, ce flux est divisé en paquets d'une taille fixe de 288 bytes. Dans des services distribués par satellite, on doit obligatoirement utiliser un **transport stream** sous peine d'avoir un service de qualité inacceptable. Dans le même état d'esprit, l'ITU a produit la norme H.263 pouvant travailler à des débits inférieurs à 64 [kb/s], objectif que cherche à atteindre l'ISO, dans un cadre plus générique, à travers la définition de la norme **MPEG-4** actuellement en cours de développement.

MPEG-4 : une norme pour les faibles débits

Pour des applications professionnelles de télévision, MPEG-2 est la solution la plus utilisée. Il n'est cependant pas possible de produire des signaux à quelques [kb/s] avec cette norme. Pour les faibles débits, on a développé la norme **MPEG-4**. L'objectif de cette norme était ambitieux ; MPEG-4 couvre toute la plage des débits inférieurs à 1 [Mb/s], pour permettre également le codage de signaux de synthèse et offrir des fonctionnalités de manipulation du contenu vidéo.

La technologie **divX** (cf. le site **DivX**¹⁰) définit un format de compression de séquences audio-visuelles largement inspiré de MPEG-4.

MPEG-7 : une norme pour caractériser le contenu vidéo

Les travaux relatifs à MPEG-4 étaient à peine terminés que démarraient déjà ceux de MPEG-7. **MPEG-7** vise à normaliser des descriptions du contenu audio-visuel. Dans une chaîne typique de traitement où interviendrait MPEG-7, on aurait alors une extraction des caractéristiques d'une

¹⁰<http://www.divx.com>

scène, la représentation de ces caractéristiques par MPEG-7 et enfin la possibilité d'effectuer des recherches avec des outils spécifiques. La norme finale s'avère intéressante pour des applications interactives de configuration statique. La gestion dynamique de la configuration est malaisée car il faut redéfinir et valider des schémas de description de contenu.

MPEG-21 : une norme pour interfacier des objets multimédia

Cette norme vise à permettre l'interfaçage d'objets multimédia au sens large. On peut la voir comme une extension de la norme MPEG-7.

Le format QuickTime

Parmi les technologies de compression, il faut citer le format **QuickTime** développé principalement par la société APPLE. Cette technologie a joui d'une certaine notoriété par le passé mais elle cède actuellement le pas aux normes MPEG.

2.7 Formats et conversion

La figure 2.18 mentionnait déjà différentes applications du monde de l'image aux objectifs distincts. Pour des raisons commerciales et historiques, la normalisation tarda à définir des formats suffisamment génériques pour couvrir une large panoplie d'applications. Il en résulte qu'aujourd'hui le nombre de formats son ou image est impressionnant. Heureusement, cette tendance a été freinée dans le monde de la vidéo par l'apparition du standard MPEG-2 dont la généricité s'est avérée suffisante.

2.7.1 Audio

Outre les formats audio associés directement aux standards vus à la section 2.6.2, on distingue les formats issus d'applications de synthèse sonores. Le plus célèbre d'entre eux est le format **MIDI** (Music Instrument Digital Interface), défini par le groupement industriel **MIDI MANUFACTURERS ASSOCIATION**¹¹, qui en plus d'être un format, décrit l'interface entre des instruments de musique et des ordinateurs. Ainsi, ce format précise des données relatives à l'instrument connecté, il a ses propres messages (entre périphérique MIDI) et intègre des événements temporels. Née en 1981, cette norme pour les instruments de musique permet de travailler simultanément sur des appareils très nombreux et très différents ; ils peuvent communiquer les uns avec les autres, et échanger des sons et des commandes. Matériellement, la norme MIDI repose sur la définition de certaines notions (canaux, messages, instrument maître, ...) et une définition précise des connecteurs, du codage, des vitesses de transmission des données. Sur le plan logiciel par contre, le protocole MIDI se caractérise par une grande facilité d'extension, mais aussi par la non-obligation pour les constructeurs de l'implémenter en totalité.

On distingue deux catégories de fichiers son (cf. figure 2.40).

¹¹<http://www.midi.org/>

Fichiers d'ondes sonores	Fichiers MIDI
Ces fichiers contiennent des signaux échantillonnés.	Ces fichiers contiennent des instructions pour produire des sons.
Ils peuvent contenir tout type de son (parole, musique, ...)	Ils représentent exclusivement de la musique.
Extensions des fichiers : wav, au Volumineux.	Extensions des fichiers : MIDI Compact.
Ils produisent toujours le même type de son.	Ils peuvent être joués sur tout type d'instrument. Le rendu n'est pas unique.

FIG. 2.40 – Description de types de fichier son.

La conversion de formats est possible à l'intérieur d'une même catégorie de signaux ; elle a peu de sens entre catégories.

2.7.2 Image

De nombreux formats d'images ou de graphiques ont été créés pour le stockage et le traitement d'images fixes. La liste suivante, non exhaustive, reprend certains d'entre eux suivant des catégories liées à une fonctionnalité.

Interface graphique

Il y a différentes façons d'interagir avec un ordinateur. L'une d'elles est l'utilisation d'une interface graphique GUI (Graphical User Interface). Chaque interface sous-tend ses propres formats de données d'échange entre ordinateurs.

Ainsi, **BMP** ou BitMaP est le format d'images bitmap défini par MICROSOFT pour les besoins de son interface graphique WINDOWS, ce qui le rend quasiment incontournable. Il permet de modéliser pratiquement tous les types d'images matricielles, qu'elles soient ou non compressées.

Le format PICT est le format répandu dans l'univers Macintosh mais il est spécifique à cet environnement et n'est pas pris en compte pour les autres plateformes.

Applications sur ordinateur

Les formats "raster" se caractérisent par le fait qu'ils représentent un certain nombre de pixels par centimètre carré. Ces formats trouvent leur origine dans les applications pour ordinateur.

Le format GIF (extension *.gif). Le format **GIF** est l'un des formats les plus répandus, développés par le serveur américain COMPUSERVE, pour faciliter l'échange de fichiers graphiques. Avec ce format, l'image est analysée ligne par ligne. Le codage est effectué sur 8 bits (256 couleurs), mais il offre aussi la possibilité de stocker conjointement trois plans images, ce qui permet

de simuler un codage sur 24 bits. L'utilisation du format GIF a posé problème lorsque que la société UNISYS a décidé de faire valoir son brevet définissant l'algorithme de compression LZW auquel GIF fait appel. Néanmoins, le brevet est tombé dans le domaine public en juin 2003¹².

Le format PNG (extension *.png). En réponse aux difficultés rencontrées pour l'utilisation du format GIF, Internet propose un autre format pour les transmissions d'images fixes : le format PNG. Ce format permet aussi bien de coder les images avec un algorithme de type JPEG que GIF, c'est-à-dire qu'il est capable de représenter des images naturelles ainsi que des graphiques.

Le format SPIFF (extension *.jpg). À l'origine, le groupe JPEG ne prévoyait pas de définir un format de fichier spécifique. C'est ainsi qu'au fil des années apparurent plusieurs formats de fichiers, tous conformes au contenu de la norme JPEG mais incompatibles entre eux. Depuis, la norme a été complétée d'un format appelé SPIFF pour "Still Picture Interchange File Format". Ce format est néanmoins peu rencontré. C'est le format proposé par un constructeur

Le format TIFF (extension *.tiff). Le format TIFF a été créé pour fournir des images scannées. Il est un des plus puissants pour coder tous les types d'images, mais en même temps, un des plus difficiles à utiliser.

Le format FlashPix. Le développement du format FlashPix s'appuyaient sur le même principe que le format Photo CD (cf. page 169 pour une description du format Photo CD) : stocker une image suivant plusieurs niveaux de résolution. En créant FlashPix, MICROSOFT, KODAK, HEWLETT-PACKARD et LIVE PICTURE ont proposé un format indépendant de l'environnement logiciel et qui, en plus de l'image multi-résolution codée en JPEG, contient de l'information relative au type de jeu de couleurs utilisé et aux paramètres de visualisation (contraste, angle de rotation, ...).

Applications génériques

Des applications génériques intègrent aussi bien des graphiques que des images. De plus, il faut pouvoir manipuler les objets qui composent la scène. Divers formats de ce genre sont apparus. Ils sont bien souvent intimement liés au matériel en raison des opérations de manipulation particulières qu'ils permettent.

Le format CGM. (Computer Graphics Metafile). Il s'agit d'un format développé par l'ANSI (American National Standard Institute) permettant de traiter indifféremment des graphiques de nature complexe et des images définies pixel par pixel.

¹²Dans la majorité des pays dont les États-Unis. Il faut remarquer que dans certains pays, comme l'Australie, le format a toujours été libre de tout droit puisqu'aucune demande de brevet n'avait été déposée.

Le format EPS (extension *.ps ou *.eps). Défini par la société ADOBE, il s'agit du format associé à un langage de description de pages appelé **PostScript**, complet mais relativement complexe. ADOBE propose maintenant une extension de PostScript, **Acrobat**, destinée à servir de format de stockage et d'échange de documents multimédia.

Le format PDF. Le format **PDF** est une extension du PostScript. Ce format s'est popularisé grâce à la mise à disposition d'outils de visualisation gratuit. Pour contrer l'influence d'ADOBE et promouvoir l'émergence du livre électronique, un consortium formé d'industriels, nommé **OPEN EBOOK FORUM**, a développé la spécification **Open eBook Publication Structure Specification (OEBPS)** permettant, sur base d'éléments **XML**, définir à la fois du contenu, une structure et une présentation. Cette spécification, dont la version 1.2 a été publiée en 2002, se veut ouverte et évolutive.

Il serait laborieux d'analyser toutes les conversions entre formats. Signalons seulement que les conversions sont souvent possibles mais qu'il est rare qu'un format converti contienne la même information. Il en résulte parfois une perte en qualité et il se peut même que certains traitements ne puissent plus être appliqués après conversion. La figure 2.41 montre une situation typique de conversion entre formats image.

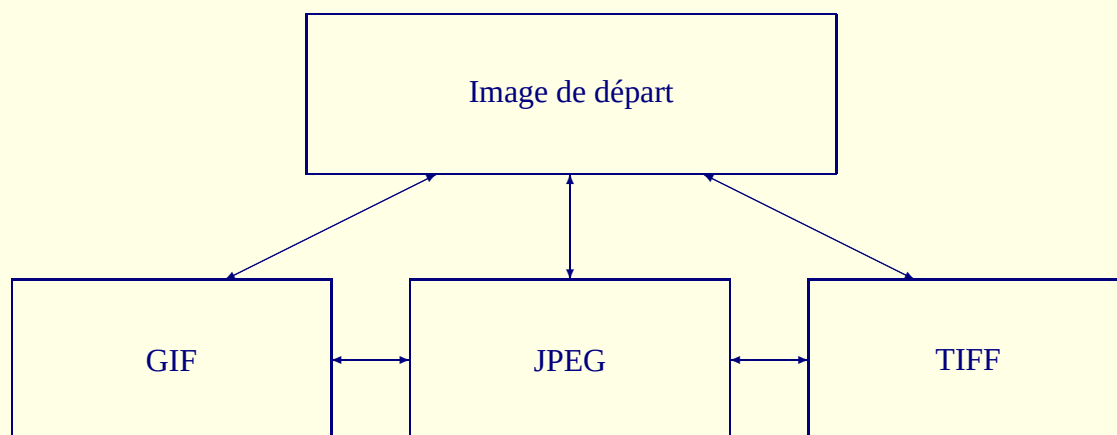


FIG. 2.41 – Conversion entre formats image.

Comment reconnaître un format ?

Il existe deux moyens de reconnaître le format d'un fichier de type image : par l'extension du nom du fichier ou par le contenu des premiers bytes du fichier. Ainsi, un fichier au format GIF se termine généralement par l'extension gif. De même, il débute par : **GIf89a . . .**

2.7.3 Vidéo

Les normes MPEG-x et H.26x définissent une syntaxe du flux de bits mais pas la manière d'enregistrer les informations. Nous repoussons au chapitre suivant la description des formats

analogiques et numériques d'enregistrement.

Malgré son succès, MPEG-x n'est pourtant pas le premier procédé de compression numérique à avoir été implémenté. Appelé DVI (Digital Video Interactive), Indeo est un procédé de compression vidéo similaire à MPEG développé il y a plusieurs années par INTEL pour le marché des PCs. Le format n'a jamais été adopté par la communauté parce qu'il exigeait un matériel très particulier et parce qu'INTEL se chargeait de la compression.

Codeurs en cascade et transcodage

La conversion entre formats vidéo est un thème délicat. En effet, il est rare que le producteur connaisse le type de réseau utilisé pour la transmission du signal audio-visuel. Or, les débits en jeu sont énormes ; il faut à la fois pouvoir stocker les documents et les transmettre. Une première solution consiste à archiver en comprimant sans perte. Cette solution est malheureusement inutilisable dans la majorité des cas. L'alternative consiste à coder à un débit élevé (avec perte) mais largement au-delà du débit nécessaire à la transmission, le signal à transmettre étant obtenu à partir de la version codée intermédiaire. Cette opération porte le nom de **transcodage**. Elle est illustrée à la figure 2.42.

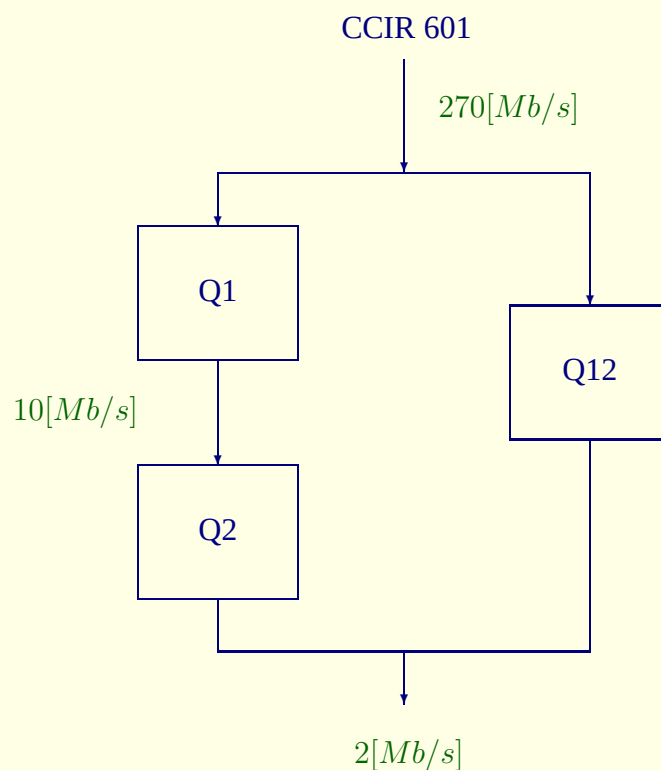


FIG. 2.42 – Transcodage (branche de gauche).

Le transcoding est problématique pour deux raisons :

1. le second codeur code les défauts de la séquence produite par le premier codeur, ce qui introduit une perte de qualité par rapport à un codage direct vers le débit final.

2. un encodeur est optimisé pour coder une séquence originale ayant certaines propriétés statistiques. Une modification des propriétés statistiques de ce codeur introduit une perte de qualité tout à fait générale.

Aussi, dans la mesure du possible, est-il conseillé d'opter pour une compression en une étape unique.

Marquage et chiffrement

Différentes techniques ont été proposées pour protéger une œuvre. De nombreux constructeurs misent sur l'ajout de filigranes dans le contenu. Cette opération porte le nom d'aquamarquage ou **watermarking**. Le principe de la technique est illustré à la figure 2.43. Un filigrane est inséré dans le contenu audio-visuel à l'émetteur. Ce filigrane, invisible et inaudible, accompagne le signal utile jusqu'au récepteur.

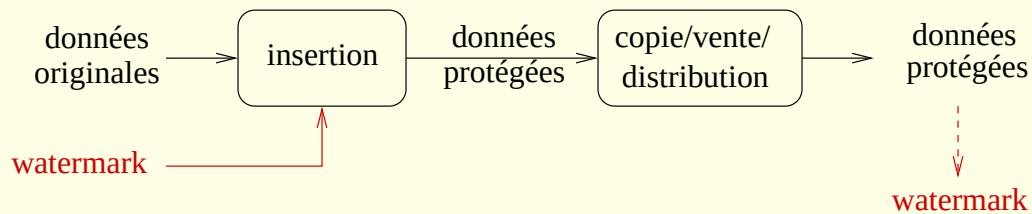


FIG. 2.43 – Schéma d'un processus de protection par watermarking.

La protection peut aussi s'effectuer par chiffrement. Le chiffrement peut être total ou partiel tel que représenté à la figure 2.44.



FIG. 2.44 – Une image originale et une image partiellement chiffrée.

2.8 Autres types de signaux

Nous avons analysé les principaux types de signaux multimédia : son, image et vidéo. Ils représentent le gros du contenu d'une application mais ils n'en constituent pas le cadre. Le cadre comprend encore les signaux échangés pendant le déroulement de l'animation, le texte, les signaux de synchronisation, etc.

2.8.1 Quelques normes concernant le texte

Afin de permettre un échange de texte à travers des environnements hétérogènes, dans une application de messagerie électronique par exemple, le jeu de caractères utilisé suit le code **ASCII**. Ce code associe un nombre à chacun des 128 caractères considérés, de sorte à pouvoir retrouver la lettre indépendamment du système d'exploitation. **Unicode** est une extension de ce code contenant tous les accents et caractères répertoriés dans le monde.

La figure 2.45 montre un jeu de 256 caractères correspond à la norme ISO8859 (version latin 1). Attention, le code ISO8859 est incompatible avec l'unicode car ce dernier standard représente certains caractères au moyen de 2 octets, contrairement à la norme ISO8859.

A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	AA	AB	AC	AD	AE	AF
	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í	í
B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	BA	BB	BC	BD	BE	BF
°	±	²	³	´	µ	¶	·	¸	¹	º	»	¼	½	¾	¿
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	CA	CB	CC	CD	CE	CF
À	Á	Â	Ã	Ä	Å	Æ	Ç	È	É	Ê	Ë	Ì	Í	Î	Ï
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	DA	DB	DC	DD	DE	DF
Ð	Ñ	Ò	Ó	Ô	Õ	Ö	×	Ø	Ù	Ú	Û	Ü	Ý	Þ	ß
E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	EA	EB	EC	ED	EE	EF
à	á	â	ã	ä	å	æ	ç	è	é	ê	ë	ì	í	î	ï
F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	FA	FB	FC	FD	FE	FF
ð	ñ	ò	ó	ô	õ	ö	÷	ø	ù	ú	û	ü	ý	þ	ÿ

FIG. 2.45 – Jeu de caractères tel que défini par la norme ISO8859-1.

2.8.2 Formats des documents électroniques

Comme le montre la figure 2.46, un document multimédia interactif se compose de quatre parties :

1. le contenu
2. la structure (organisation des paragraphes, place des éléments constitutifs, ...)
3. les éléments de présentation ; il s'agit de définir, par exemple, les polices de caractère, le format de la page

4. les éléments comportementaux. Ces derniers se sont présents que s'il s'agit d'un document interactif.

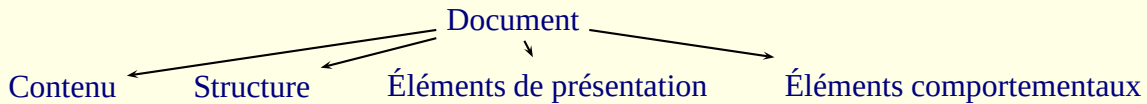


FIG. 2.46 – Composantes d'un document multimédia interactif.

Décrire un document multimédia sous la forme de 4 éléments constitutifs met en lumière la complexité intrinsèque de ce type de document. La technicité de la production de ces 4 éléments requiert plusieurs types de maîtrise. Par ailleurs, les solutions technologiques diffèrent également. Ainsi, les éléments comportementaux sont généralement mis en œuvre par le biais d'un langage de programmation, comme le **javascript** ou le **Java**.

Langages de balisage

À un autre niveau, on retrouve les normes qui définissent la mise en page des documents. Parmi celles-ci citons l'**HTML** (HyperText Markup Language) qui fixe la présentation (sommaire) des pages envoyées sur Internet et le standard **SGML** de l'ISO dont est dérivé le langage HTML. Pour améliorer le contrôle de la présentation (fontes, couleurs, emplacement, ...), il est possible de joindre des feuilles de style aux pages HTML. Ces feuilles de style sont appelées Cascading Style Sheets (**CSS**).

La norme ISO 10744 définit le langage Hytime. Ce langage étend les fonctions applicables aux documents SGML et il fournit des notions de synchronisation spatiale et temporelle.

Le langage **XML** a été développé après la norme HTML-4.0 pour permettre l'inclusion aisée de documents structurés ; c'est un langage de balisage qui présente l'information et intègre des balises définissant sa structure. Il est souvent utilisé pour la mise en page de documents produits à partir d'une base de données.

On peut également citer le cas du compact HTML (**CHTML**) qui constitue un sous-ensemble de l'HTML ; il a été développé pour satisfaire aux contraintes des communications Internet mobiles par l'**i-mode**.

Création de pages dynamiques : javascript, java, PHP

Pour la production de pages dynamiques, on évoque parfois le **DHTML**, l'HTML dynamique, qui est une combinaison d'un langage de script, comme **javascript**, de feuilles de style (cf. **CSS**) et d'un modèle d'objets, appelés Document Object Model **DOM**, permettant la gestion des éléments d'une page ainsi que leur positionnement.

En fait, on doit distinguer deux manières de créer des pages dynamiques :

1. l'effet dynamique est obtenu par exécution d'un programme sur la machine sur laquelle tourne le logiciel de navigation. C'est le mode de fonctionnement principal du langage

FIG. 2.47 – La visualisation d’une page écrite en HTML et le code correspondant.

javascript dont les commandes sont insérées dans des balises HTML d'une page rapatriée.

2. les pages sont créées par le serveur Web qui envoie le résultat de requêtes générées localement. Ainsi, contrairement au langage **javascript**, les instructions du langage **PHP** (Hypertext Preprocessor) sont exécutées sur le serveur Web dont provient la page téléchargée ; seul un lien suffisamment explicite est contenu dans la page HTML. C'est l'activation de ce lien qui fournit le contenu dynamique. PHP est utilisé par de nombreux serveurs dont sa version 3 ; on parle de **PHP3** (PHP version 3). Il existe également le langage **iHTML** (inline HTML) dont le fonctionnement est similaire à celui du langage PHP.

La plupart des langages de création de pages dynamiques s'écartent des spécifications définies par le Common Gateway Interface (**CGI**). Le CGI offre une syntaxe standardisée, largement adoptée au milieu des années 90, pour envoyer des informations au serveur et requérir l'exécution d'un programme, par exemple :

<http://monServeur.com/cgi-bin/program?parametresTransmis>.

2.8.3 La synchronisation

La présentation des informations sur écran occulte un problème complexe : celui de la synchronisation. Ce n'est pas tout de décoder des flux d'informations et de les produire à l'écran. Encore faut-il être capable de les synchroniser. Pour y parvenir, on ajoute dans le flux multimédia un signal d'horloge, qui servira de référence temporelle *absolue*, et des signaux de référence temporelle *relative*. Les informations de référence relative sont destinées à permettre une meilleure interprétation des divers flux qui composent un signal multimédia.

Du côté de l'encodeur, on prévoit des signaux de synchronisation quand il s'agit de présenter des flux concourants. Par exemple, la norme MPEG-1 inclut ce type de signaux tout au long de l'encodage pour faciliter la tâche du décodeur. Les difficultés du décodeur sont souvent dues à la nécessité de partager les ressources entre différentes activités (accès au disque, gestion de l'écran, décodage du son ou de la vidéo, ...). C'est la raison qui a poussé le groupe **MHEG**, un autre groupe de l'ISO, à définir plusieurs normes pour le codage de signaux multimédia complexes. On espère ainsi maîtriser la complexité dès l'encodage et inclure les signaux simplifiant la tâche de décodage.

2.8.4 Réalité virtuelle

La tâche de la réalité virtuelle consiste à reconstituer un environnement à trois dimensions (3D) au moyen d'images de synthèse ou d'images naturelles. Alors qu'au départ elle servait aux animations tridimensionnelles pour jeux, la *réalité virtuelle* commence à être employée dans des applications toutes plus spectaculaires les unes que les autres. Si ce développement a semblé enrayé par manque de standardisation, la définition de la norme **VRML 2.0** (Virtual Reality Markup Language) n'est pas parvenue à redonner du souffle aux applications utilisant des modèles 3D. Une alternative consiste à mélanger des images naturelles et des images de synthèse ; on parle alors de *réalité augmentée*.

Reconnaissance et synthèse vocales

De nombreux produits de reconnaissance vocale sont présents sur le marché. Ces produits se caractérisent par les paramètres suivants :

- dépendance ou indépendance vis-à-vis du locuteur. Il s'agit de savoir si, sans entraînement spécifique, l'organe de reconnaissance fonctionne pour tout locuteur.
- taille du dictionnaire de mots reconnaissables. On considère généralement qu'il est possible d'identifier une centaine de mots bien distincts tout en ayant l'indépendance vis-à-vis du locuteur. Ce dictionnaire croît pour des systèmes à entraînement préalable.

La synthèse vocale est appelée text-to-speech (**TTS**) en anglais. Les systèmes de synthèse vocale traduisent automatiquement un texte en parole à partir de règles de prononciation ou à partir de mots pré-enregistrés.

2.9 Quelques exemples de normes

2.9.1 La vidéoconférence

En 1990, l'ITU définissait pour la première fois de son existence une famille de normes. La norme H.320 regroupa ainsi une série de normes pour la vidéoconférence sur le réseau téléphonique numérique. Plus tard fut développée la norme équivalente pour le réseau téléphonique analogique, la norme H.324. Il restait à faire le travail pour des réseaux informatiques. C'est ainsi que la norme H.323 fut finalisée en juin 1996.

L'existence de ces normes est importante car elle signifie qu'un terminal de vidéoconférence raccordé à un réseau téléphonique est capable de dialoguer avec un terminal branché sur un réseau informatique ; il est désormais possible d'échanger des signaux de vidéoconférence à travers Internet dans un cadre normatif strict.

Ces familles de norme comprennent des normes pour la vidéo, l'audio, le **multiplexage** des données, les messages de contrôle, la gestion de plusieurs correspondants simultanés (multi-point), les données et les éléments de transport du réseau.

Les normes H.320, H.323 et H.324 sont comparées dans le tableau suivant :

	H.320	H.323	H.324
Réseau	Numérique à intégration de services (RNIS)	Informatique	Téléphonique analogique
Vidéo	H.261 H.263	H.261 H.263	H.261 H.263
Audio	G.711 G.722 G.728	G.711 G.722 G.728 G.723 G.729	G.723
Multiplexage	H.221	H.225.0	H.223
Contrôle	H.230 H.242	H.245	H.245
Multipoint	H.231	H.323	
Données	T.120	T.120	T.120
Transport	1.400	TCP/IP	V.34

2.9.2 Applications médicales : la norme DICOM 3.0

Il existe une norme équivalente pour l'échange de données médicales numériques (images et textes) entre appareils médicaux. Il s'agit de la norme **DICOM** 3.0 (Digital Imaging and Communications in Medicine) proposée par le National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Les utilisateurs de produits conformes à la norme DICOM 3.0 auront la certitude d'un fonctionnement correct en cas de raccordement des appareils. L'enjeu est de taille quand on connaît le prix des équipements médicaux.

Bibliographie

- [1] P. Buser et M. Imbert. Neurophysiologie fonctionnelle IV. Hermann, 1987. 27
- [2] Elmer. Le son sur micro-ordinateur. Dunod, Paris, 1994.
- [3] F. Halsall. Multimedia communications : applications, networks, protocols and standards. Addison-Wesley, 2001. 60, 106, 123, 126, 127, 129
- [4] R. Hunt. The reproduction of colour. Fountain Press, fifth edition, 1995. 28
- [5] M. Kunt, G. Grunland, et M. Kocher. Traitement de l'information : traitement numérique des images, Volume 2. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993. 26, 29
- [6] D. Lecomte, D. Cohen, P. de Bellefonds, and J. Barda. Les normes et les standards du multimédia : XML, MPEG-4 et 7, MP3, HTML, Web3D. . . et les autres. Dunod, 1999.
- [7] K. Mullet and D. Sano. Designing visual interfaces ; communication oriented techniques. Sunsoft Press, Prentice Hall, 1995.
- [8] M. Nelson. La compression de données. Dunod, Paris, 1993.
- [9] J. Nielsen. Multimedia and hypertext : the Internet and beyond. AP Professional, 1995.
- [10] D. Taubman and M. Marcelin. JPEG 2000 : image compression, fundamentals, standards and practice. Kluwer Academic Publishers, 2002.

Chapitre 3

Des réseaux pour communiquer

L'interactivité ne nécessite nullement l'usage d'un réseau puisqu'une machine dotée de l'interface adéquate suffit. Il en va tout autrement lorsque plusieurs acteurs interviennent, auquel cas l'usage d'un réseau s'impose tout naturellement.

Avec le concours du réseau mondial Internet, les applications multimédia subissent une véritable mutation et, de nos jours, il n'est plus rare d'utiliser une application sans savoir exactement où se trouvent ses composantes. On parle ainsi de **Network Computer (NC)**, c'est-à-dire d'ordinateurs qui vont chercher les applications dans le réseau auquel ils sont connectés.

Pourtant, les problèmes d'une communication sur un réseau sont multiples : il faut garantir que l'information parvienne bien à destination, assurer l'intégrité des données transmises, offrir un niveau de qualité de service, etc. Au vu de cette complexité, les organismes de normalisation ont travaillé à définir une communication sous deux angles : un angle logique et un angle matériel.

La structure conventionnelle d'une chaîne de télécommunications comprend différents éléments repris à la figure 3.1. On part d'un message, d'une information, transmis sous une forme matérielle déterminée. Le système de transmission étant de nature électromagnétique, il convient de convertir le signal physique en un signal électrique par le biais du **transducteur d'émission**. La chaîne se termine de même par un **transducteur de réception**, dont le but est de transformer le signal électrique en une grandeur physique adaptée au correspondant destinataire.

Le problème de la transduction est essentiellement un problème de fidélité ; ce problème technologique peut être résolu de façon plus ou moins satisfaisante selon le compromis qualité-coût que l'on accepte.

Le signal électromagnétique délivré par le transducteur d'émission doit être adapté au canal de transmission. À cet effet, on lui fait subir certaines transformations auxquelles on peut donner le nom générique de **codage**. Ces opérations comprennent aussi bien les opérations de filtrage que des mises à niveau électrique ou des convertisseurs d'analogique en numérique. Au terme du codage, que l'on qualifie le plus souvent de **codage de source**, le signal est injecté à l'entrée d'un système qui effectue le **codage de canal** ou **modulation**.

Bien entendu, on opère à l'extrémité réceptrice des opérations de décodage inverses des transformations effectuées à l'extrémité émettrice.

Si la structure de la figure 3.1 correspond assez bien à une chaîne de télécommunications

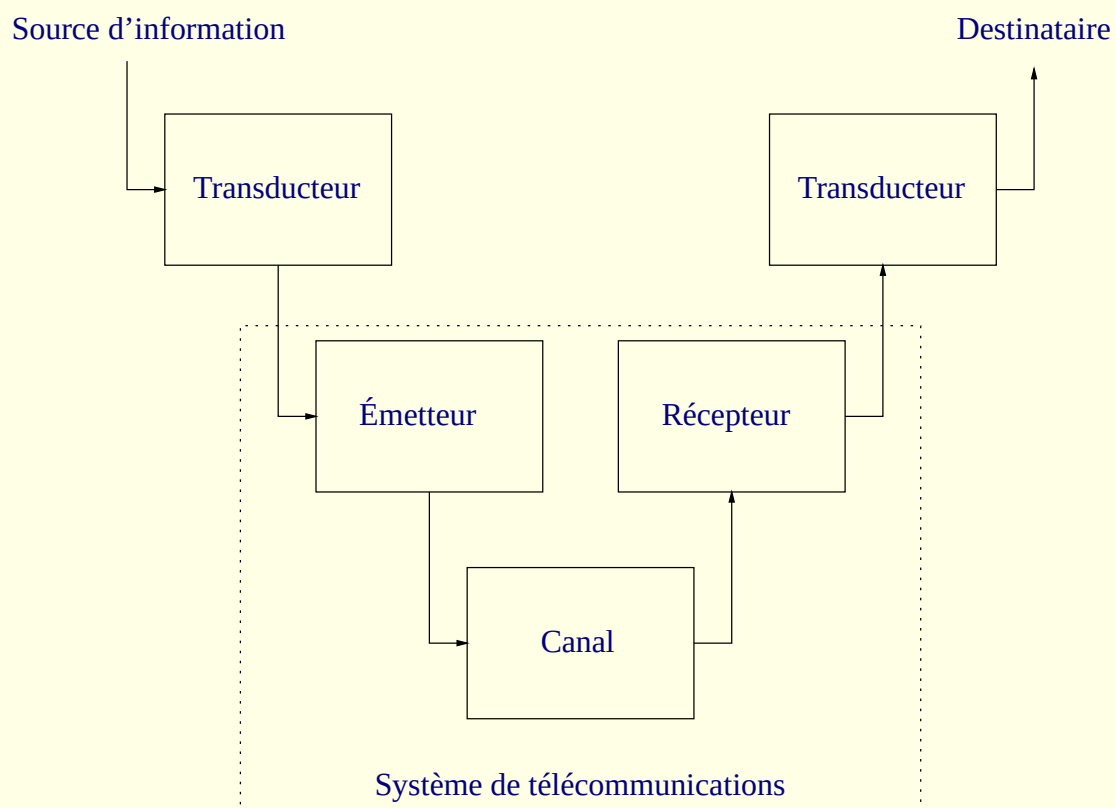


FIG. 3.1 – Structure d'une chaîne de télécommunications.

analogiques, de nombreux éléments supplémentaires viennent s'ajouter dans le cas d'une communication numérique. Le schéma de la figure 3.2 en dresse un portrait plus typique. On y voit que la transmission est précédée de toute une série d'opérations de traitement sur le signal de départ.

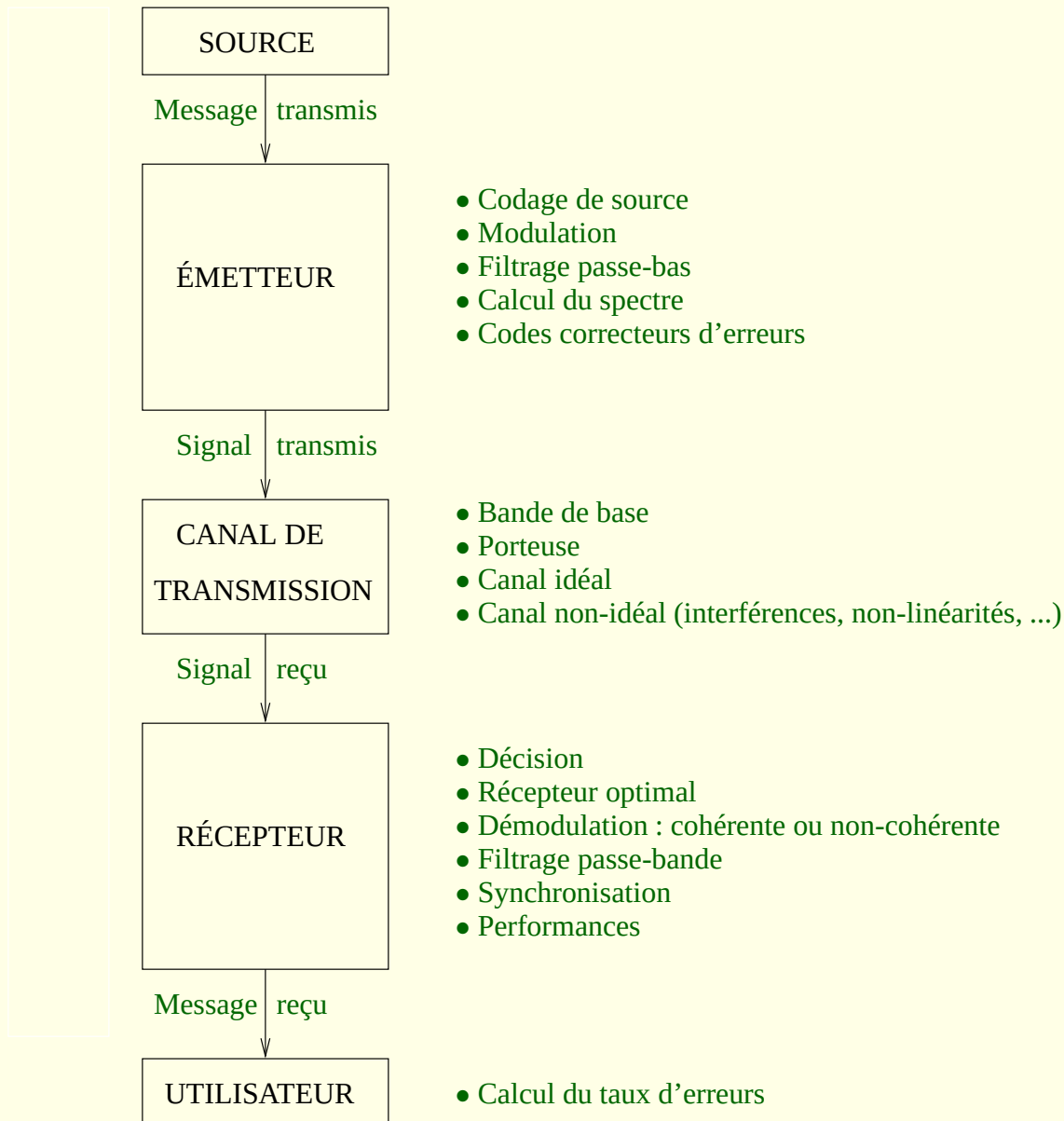


FIG. 3.2 – Structure d'une chaîne de télécommunications numérique [3].

On peut encore ajouter que le schéma général d'une chaîne de télécommunications donné ne représente pas toutes les possibilités. Il présuppose que l'on crée, au profit des correspondants, une voie de communication, appelé **circuit**, mise à leur disposition exclusive pour la durée de la communication. Et même si l'exclusivité ne signifie pas que le canal de transmission ne puisse

pas être partagé avec d'autres utilisateurs grâce à une opération de multiplexage, il n'empêche que le circuit est affecté à la communication pour toute sa durée. On ne retrouve pas toujours ce concept en transmission de données où certains protocoles prévoient l'envoi de paquets d'information, sans établissement préalable d'un circuit. C'est le cas notamment du protocole réseau utilisé pour l'Internet : le protocole **IP**.

3.1 Aspect logique des transmissions : modèles de référence

La communication passe obligatoirement par la mise en réseau des terminaux. Cette dernière nécessite alors l'établissement de conventions claires et non ambiguës, d'autant plus qu'on assiste à un accroissement de l'interopérabilité des réseaux informatiques et des réseaux de télécommunications.

En transmission de données, il existe plusieurs architectures dont les principales sont l'architecture provenant de la normalisation de l'**ISO** que l'on appelle Open System Interconnection (**OSI**) et l'architecture utilisée sur Internet baptisée TCP/IP, du nom des deux principaux protocoles qui la constituent.

3.1.1 Modèle de référence OSI

Le principe adopté dans la conception des réseaux est d'être le plus indépendant possible des supports physiques et de regrouper les fonctions de communication en catégories. Le modèle de référence développé par l'**ISO**¹ comporte 7 couches ; la figure 3.3 montre la communication entre deux ordinateurs à travers un réseau suivant le modèle **OSI**.

Les trois couches inférieures sont liées au réseau ; elles concernent les mécanismes de communications entre ordinateurs. Les trois couches supérieures gèrent les aspects propres aux applications. Au centre, la couche transport sert de tampon entre les deux autres séries de couches.

Les concepts architecturaux utilisés pour décrire le modèle de référence sont décrits dans la norme 7498-1. Le concept d'architecture en couches demande la définition de trois objets pour chaque niveau N :

- le **service**. Il correspond aux événements et aux primitives associées, à mettre en place pour rendre un service au niveau supérieur, c'est-à-dire au niveau $N + 1$;
- le **protocole**. Le protocole de niveau N définit un ensemble de règles nécessaires pour que le service de niveau N soit réalisé. Ces règles définissent les mécanismes qui vont permettre de transporter les informations d'un niveau N au niveau N d'une autre machine. En particulier, le protocole N va proposer les règles pour contrôler l'envoi des données ;
- les points d'accès au service N (**Service Access Point** ou **SAP** en anglais). Les points d'accès au service N sont situés à la frontière entre les couches $N + 1$ et N . Les services N sont fournis par une entité N à une entité $N + 1$ à ces points d'accès aux services N .

Ainsi, chaque couche fournit une série de services à la couche supérieure et utilise les services fournis par la couche qui lui est inférieure. Par exemple, la couche transport permet la transmission de messages indépendants du réseau au niveau de la couche session et s'appuie sur la couche

¹<http://www.iso.ch>

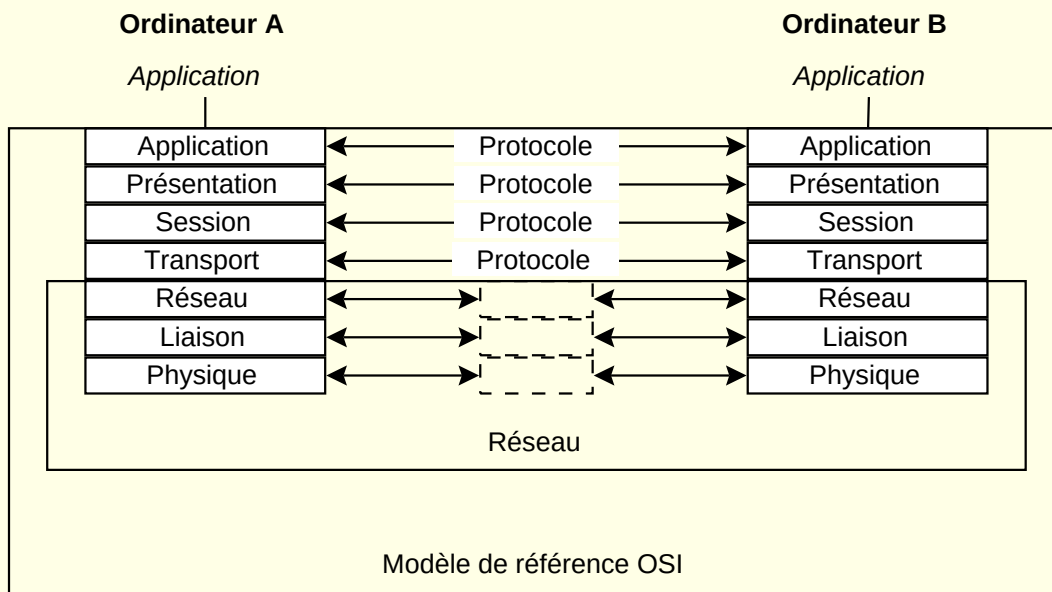


FIG. 3.3 – Structure générale du modèle OSI.

réseau pour transmettre ses messages à la couche transport d'un autre ordinateur. Concrètement donc, la couche masque l'implémentation des couches inférieures de sorte que l'application soit indépendante du réseau. La figure 3.4 reprend respectivement les fonctionnalités principales et services de l'ensemble des couches.

Les couches liées au réseau sont importantes et méritent quelques explications supplémentaires ; par ailleurs, leur mode de fonctionnement dépend du réseau physique auquel est raccordé l'ordinateur. D'une manière générale, la couche réseau est responsable de l'établissement et de la libération d'une connexion. Elle comprend des fonctionnalités comme le **routage**, aussi appelé **adressage**, et parfois le contrôle du débit. Comme le dit sa dénomination, la couche liaison veille sur l'état de la connexion. Elle se charge de la détection d'erreur et de la retransmission de messages si nécessaire. Elle offre deux types de service :

1. Sans connexion permanente, **connectionless** en anglais. Ce type de connexion traite chaque trame d'information comme une unité autonome transmise sans garantie d'arriver à destination. De plus, une trame incorrecte à l'arrivée est simplement ignorée. Le réseau Internet fonctionne suivant ce mode au niveau de la couche 3 (couche réseau). On peut y remédier par les couches des niveaux supérieurs ; ainsi, le protocole **TCP** implémente un mécanisme de transmission avec accusé de réception.
2. Avec connexion permanente, **connection oriented** en anglais. Il s'agit d'un mode de connexion, aussi appelé **mode circuit**, qui garantit une permanence dans le trajet utilisé pour la transmission de l'information.

Quant à la couche physique, elle concerne les interfaces entre l'équipement et le réseau. La norme **Ethernet** qui décrit principalement l'interface avec un réseau local correspond à la

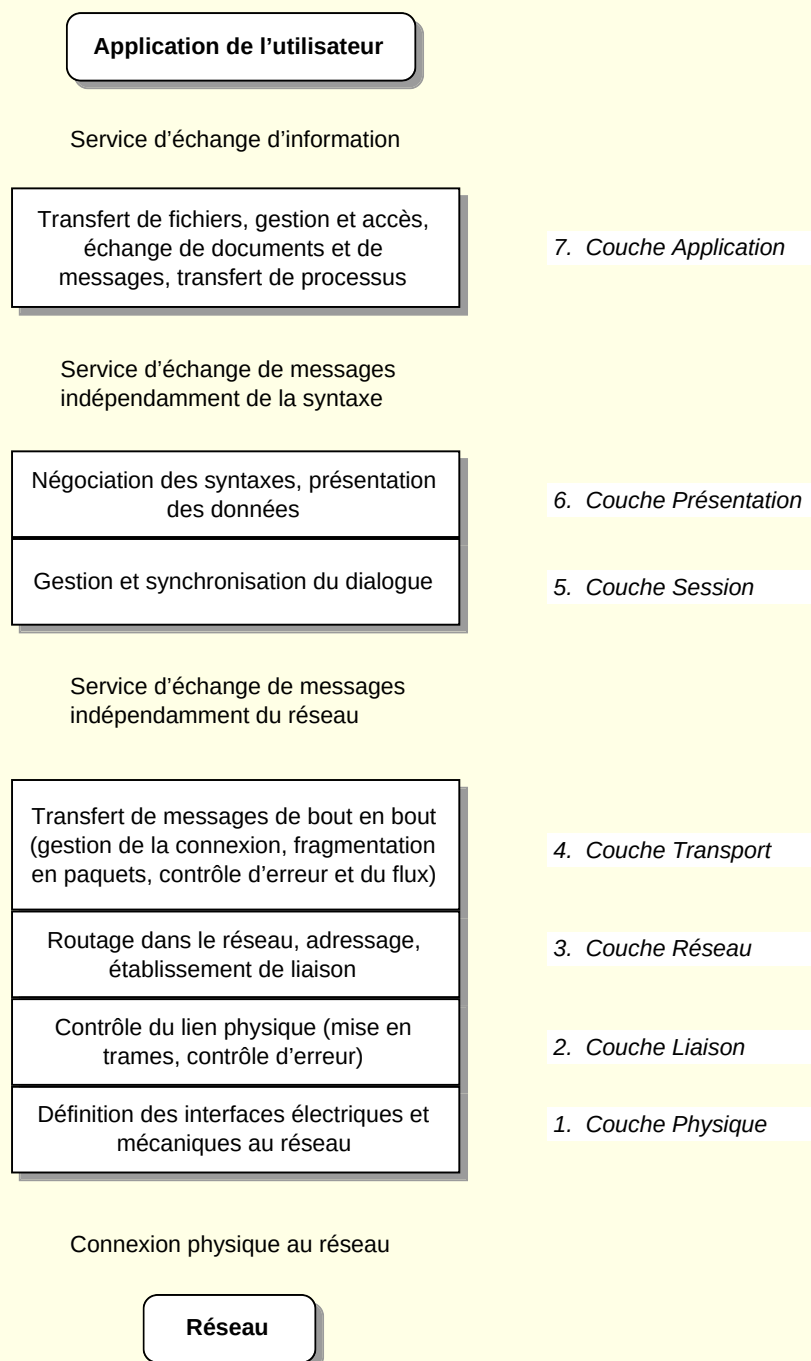


FIG. 3.4 – Résumé des principales fonctions du modèle OSI.

couche physique.

Le modèle OSI a été développé pour servir de cadre aux activités de normalisation relatives à la communication entre ordinateurs. Il n'a jamais eu pour but d'associer un standard unique à chacune des couches du modèle. D'ailleurs, la pratique a conduit à des familles de standards par niveau.

3.1.2 Modèle Internet

Devant le foisonnement de machines utilisant des protocoles de communication différents et incompatibles, la défense américaine a décidé de définir sa propre architecture. Cette architecture est à la base du réseau mondial Internet.

L'architecture Internet, qui se présente sous la forme d'une pile de protocoles, est basée sur le protocole **IP** (Internet Protocol) qui correspond au niveau 3 de l'architecture du modèle de référence OSI ; quelques protocoles sont repris à la figure 3.5.

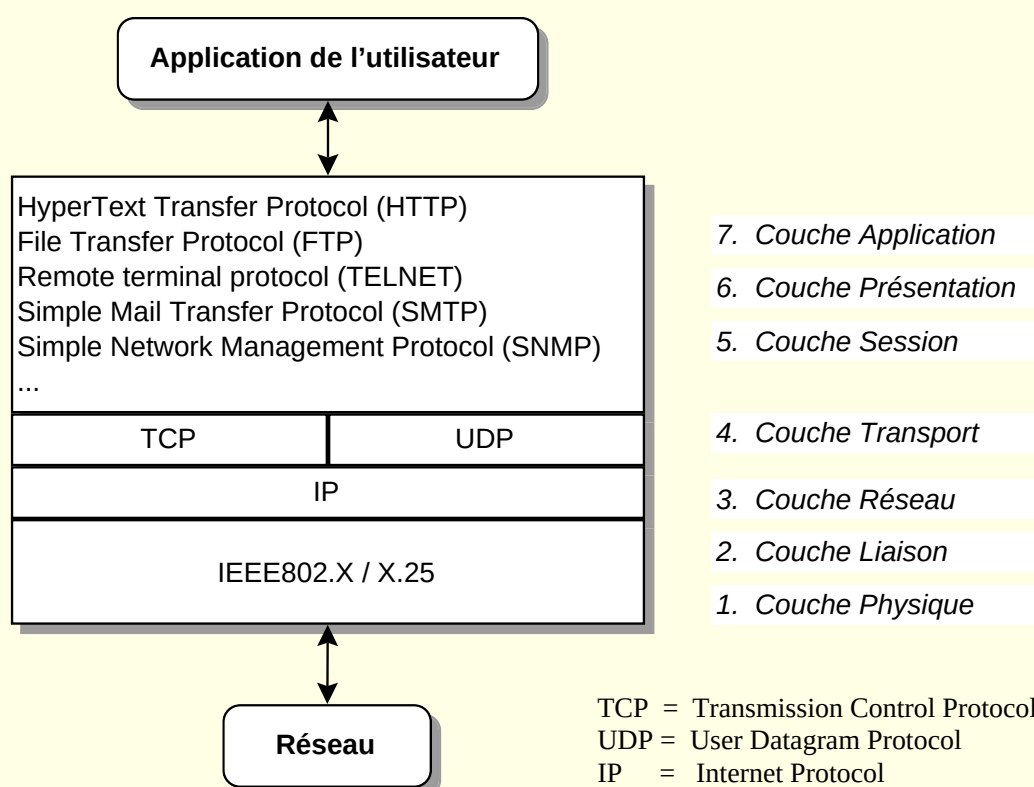


FIG. 3.5 – Éléments de l'architecture TCP/IP.

Le protocole IP a pour but de transporter les paquets, appelés **datagrammes**, d'une extrémité à l'autre du réseau. Les paquets sont indépendants les uns des autres et sont routés individuellement dans le réseau par chaque commutateur. La sécurisation apportée par ce protocole est très faible :

pas de détection de paquets perdus ou de possibilité de reprise sur erreur. L'en-tête d'un paquet IP est illustré à la figure 3.6.

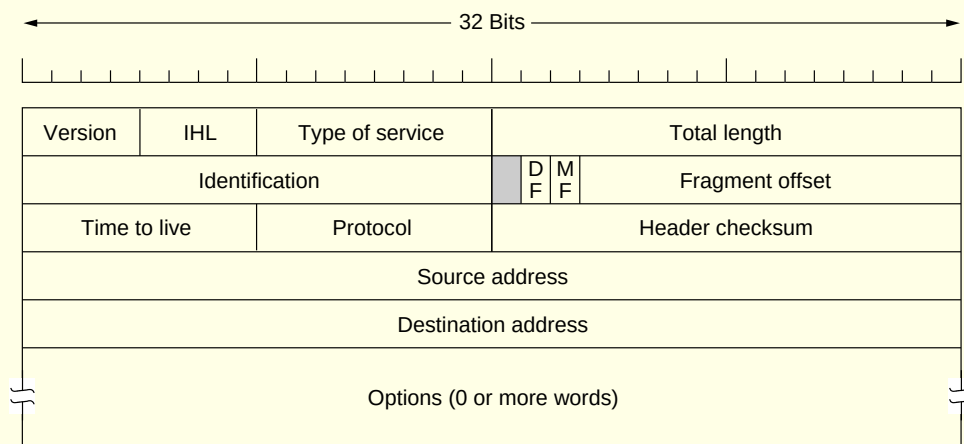


FIG. 3.6 – En-tête d'un paquet tel que défini par le protocole IP.

Le protocole **TCP** (Transport Control Protocol) regroupe les fonctionnalités de niveau 4 du modèle de référence. C'est un protocole assez complexe qui possède de nombreuses options permettant de résoudre tous les problèmes de perte de niveau inférieur. En particulier, les pertes pourront être récupérées par retransmission sur le flot d'octets. Le protocole TCP est en mode connecté, contrairement au deuxième protocole disponible dans cette architecture qui s'appelle **UDP** (User Datagram Protocol). Ce protocole se positionne aussi au niveau transport mais dans un mode sans connexion et avec pratiquement aucune fonctionnalité.

En guise d'illustration, la figure 3.7 analyse le contenu d'un paquet TCP/IP généré lors d'une connexion de transfert de fichiers par le protocole **FTP** (File Transfer Protocol).

Toute la puissance de l'architecture TCP/IP provient de la souplesse de mise en place au-dessus des réseaux existants. Par ailleurs, l'architecture inclut également, sans qu'elle ne soit définie, une interface d'accès au réseau. En effet, de nombreux sous-réseaux peuvent être pris en compte dans l'architecture TCP/IP, aussi bien de type réseaux locaux que réseaux longue distance. Cette généralité peut parfois être un défaut en ce sens que l'optimisation globale du réseau est effectuée par sous-réseau. En revanche, le coût de l'infrastructure est extrêmement bas. Le service rendu par ce réseau est du type "best effort", ce qui signifie que le réseau fait ce qu'il peut pour écouler le trafic.

La gestion nominative des adresses par DNS

Toute machine constituant un réseau de technologie Internet est identifiée par une adresse longue de 32 bits. Pour faciliter l'identification des adresses, on a défini un mécanisme permettant de nommer une machine, étant entendu que, puisque le protocole IP nécessite l'utilisation d'adresses IP, il doit être possible à tout moment de retrouver l'adresse correspondante.

No.	Source	Destination	Protocol	Info
53	circpc8.montefiore.ul	stoch01.montefiore.ul	TCP	6000 > 42487 [PSH, ACK] Seq=603390095 Ack=3
54	stoch01.montefiore.ul	circpc8.montefiore.ul	TCP	42487 > 6000 [ACK] Seq=3487107646 Ack=60339
55	ring.aist.go.jp	circpc12.montefiore.u	TCP	ftp-data > 1174 [ACK] Seq=1209320986 Ack=39
56	ring.aist.go.jp	circpc12.montefiore.u	FTP	Response: 200 PORT command successful.
57	161.253:2	0.255:2	DDP	AnnieTalk Name Binding Protocol packet

[-] Frame (84 on wire, 84 captured)
[-] Ethernet II
Destination: 00:00:00:00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
Source: 00:60:83:7c:04:eb (Cisco_7c:04:eb)
Type: IP (0x0800)
[+] Internet Protocol
Version: 4
Header length: 20 bytes
Type of service: 0x10 (Minimize delay)
Total Length: 70
Identification: 0x4d87
Flags: 0x4
Fragment offset: 0
Time to live: 231
Protocol: TCP
Header checksum: 0x0a9c
Source: ring.aist.go.jp (150.29.9.6)
Destination: circpc12.montefiore.ulg.ac.be (139.165.16.182)
[-] Transmission Control Protocol
Source port: ftp (21)
Destination port: 1165 (1165)
Sequence number: 1178723011
Acknowledgement number: 3911994
Header length: 20 bytes
Flags: 0x18
Window size: 8760
Checksum: 0xb5f3
[-] File Transfer Protocol
Response: 200
Response Arg: PORT command successful.

0000	00 00 00 00 00 00 00 00 60 83 7c 04 eb 08 00 45 10	'E.
0010	00 46 4d 87 40 00 e7 06 0a 9c 96 1d 09 06 8b a5	.FM.@...
0020	10 b6 00 15 04 8d 46 41 e2 c3 00 3b b1 3a 50 18	FA:P.
0030	22 38 b5 f3 00 00 32 30 30 20 50 4f 52 54 20 63	"8....20 0.PORT.c
0040	6f 6d 6d 61 6e 64 20 73 75 63 63 65 73 73 66 75	ommand.s uccessfu
0050	6c 2e 0d 0a	l...

FIG. 3.7 – Analyse du contenu d'un paquet IP.

Le Domain Name System (**DNS**) est constitué d'une hiérarchie de serveurs capables de traduire un nom de domaine en une adresse Internet. Considérons par exemple, le serveur nommé **www.yahoo.fr**. Il lui correspond l'adresse IP suivante : 194.237.109.72. C'est précisément pour éviter que l'utilisateur ait à manipuler des adresses IP que le mécanisme de DNS a été mis en place.

La dénomination du DNS est basée sur les codes nationaux définis par l'ITU (.fr, .be, etc) gérés par des instances nationales et sur une série d'ajouts (.com, .edu, .org, etc). Pour toute destination exprimée sous la forme d'un nom de domaine, l'ordinateur émet d'abord une requête à un DNS, puis il utilise la véritable adresse IP pour contacter le correspondant. Pour éviter des appels répétés au DNS, l'ordinateur conserve en mémoire l'adresse IP des correspondants contactés précédemment.

3.1.3 D'autres modèles

Le modèle de référence OSI a inspiré d'autres modèles. Ainsi, l'ITU-T a développé un modèle de référence en 1993 pour la transmission de données par commutation de cellules, mode appelé Asynchronous Transfer Mode (**ATM**). La raison en est simple : il faut que les nouveaux réseaux puissent prendre en compte les applications multimédia.

Cette architecture ITU-T peut être dite compatible au modèle de référence de l'ISO. Cependant, les fonctionnalités ne sont pas regroupées aux mêmes niveaux que ceux de l'ISO.

En fait, il existe quantité de modèles de communication, éventuellement partiels, basés sur le modèle de référence. Cela va du réseau de signalisation **n⁰⁷**, au Réseau téléphonique Numérique à Intégration de Services (**RNIS**) en passant par le **GSM** ou le réseau à très haut débit **SDH** (Synchronous Data Hierarchy).

3.2 Éléments relatifs à la couche physique

Au niveau de la couche physique, on se trouve devant le problème de transmettre une information représentée par un signal $m(t)$, qui sera appelé signal modulant. Il peut s'agir d'un signal analogique ou numérique, avec au départ un contenu physique de type parole, texte ou vidéo. Mais nous apprendrons bien vite que les techniques de **modulation** ou de **multiplexage** permettent de construire des signaux qui mélangent plusieurs types d'information –ces signaux sont appelés signaux composites–, ou plusieurs signaux d'un même type (multiplexage). Le signal modulant peut dès lors être lui-même un signal composite, ce qui signifie qu'en amont on a déjà procédé, pour le construire, à des opérations de modulation ou de multiplexage.

Le signal modulant $m(t)$ est souvent représenté par une tension dont l'ensemble des valeurs possibles est soit pris dans un intervalle continu, soit qu'il se compose d'une série de valeurs discrètes, deux dans le cas binaire. Ce signal modulant $m(t)$ est à spectre limité, c'est-à-dire qu'il existe une fréquence telle que la transformée de FOURIER du signal modulant, supposée existante, satisfasse à la condition

$$\mathcal{M}(f) = 0 \quad \text{si} \quad |f| > W \quad (3.1)$$

On ne peut jamais imposer strictement cette condition puisqu'elle revient à exiger que le signal soit à durée infinie. C'est néanmoins une hypothèse raisonnable car les signaux réels ont des composantes spectrales négligeables au-delà d'une certaine fréquence. Du reste, sous peine d'effets indésirables d'intermodulation ou de saturation, on est presque toujours amené à traiter les signaux modulateurs par un filtrage passe-bas limitant leur spectre en entrée.

Définition 23 *Dès lors que l'intervalle de fréquences est borné par la fréquence W , on appelle bande de base l'intervalle de fréquences $[0, W]$.*

3.2.1 Efficacité spectrale

La notion d'efficacité spectrale est importante en transmission numérique. Elle compare la bande passante de la représentation analogique du signal d'information numérique au débit véhiculé dans ce canal.

Définition 24 *L'efficacité spectrale est définie comme le flux binaire par Hz . Soit le débit divisé par la bande passante du canal de transmission.*

La valeur de l'efficacité spectrale pour des systèmes de transmission mobiles avoisine $1 [b/s/Hz]$. Pour des liaisons point à point ou des connexions câblées, elle peut atteindre $6 [b/s/Hz]$. Concrètement, cela signifie qu'il est possible de transmettre $48 [Mb/s]$ dans un canal large de $8 [MHz]$, soit l'équivalent de presque 10 signaux de télévision numérique de qualité PAL dans un canal de transmission qui ne transporte qu'un unique signal PAL analogique. C'est bien là que se trouve le principal intérêt d'un passage au numérique : transmettre plus de signaux pour une même largeur de canal.

3.2.2 Quelle bande de fréquences pour la représentation analogique ?

Des signaux qui occupent une même bande de fréquences interfèrent. Dès lors, dans un système partagé, il convient de définir des règles d'occupation des bandes de fréquence. Cette remarque est particulièrement importante pour l'émission des signaux électromagnétiques dans l'air.

Sur un câble, il en va autrement. En effet, un utilisateur peut être seul à profiter d'un support qui lui serait dédié ; c'est notamment le cas dans la boucle locale du réseau téléphonique, qui alloue une paire de cuivre par abonné. Dans pareil cas, la transmission se fera aux fréquences les plus favorables.

Deux techniques sont combinées pour partager des ressources :

1. la modulation, qui a pour effet de déplacer le signal de départ le long de l'axe des fréquences et
2. le multiplexage (cf. section 3.2.4) qui définit comment s'effectue le partage des ressources fréquentielles ou temporelles.

3.2.3 Modulation

Historiquement, le problème de la modulation s’est posé dès les débuts de l’ère de la radio ; on doit à MARCONI la réalisation de premières transmission radio. La “haute” fréquence était un signal à quelques kHz auquel on voulait imprimer des variations définies par un signal modulant. Cette sinusoïde de référence² est appelée **porteuse** et notée $c(t)$

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (3.2)$$

Pour superposer l’information, on peut agir sur différents paramètres de la porteuse : l’amplitude A_c , la fréquence f_c ou la phase ϕ_c . D’une manière générale, la modulation consiste à remplacer une de ces caractéristiques par une fonction linéaire de $m(t)$. Le signal résultant est appelé **signal modulé** (cf. figure 3.8). Si le signal modulant $m(t)$ est continu, on parle de **modulation d’onde continue**. On pourrait attribuer des valeurs constantes à $m(t)$ pendant un certain intervalle de temps, ce qui reviendrait alors à effectuer une modulation numérique.

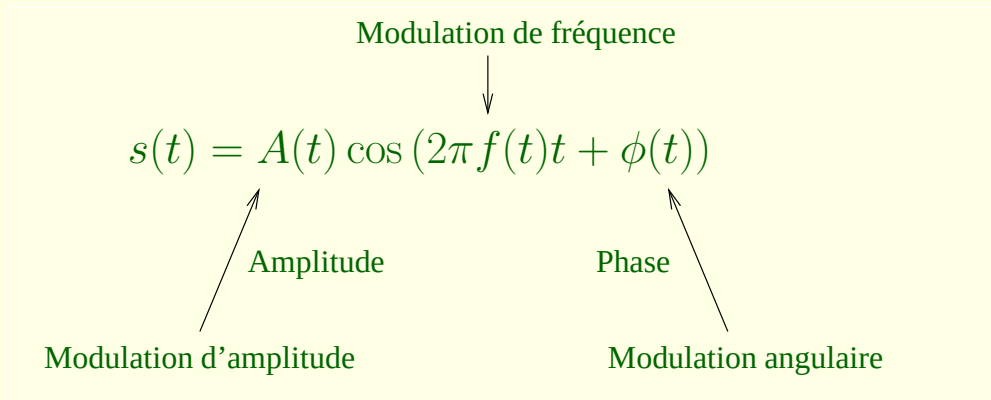


FIG. 3.8 – Paramètres d’un signal modulé.

Les modulations de porteuses sinusoïdales sont de loin les plus utilisées. Cela est dû à l’importance des systèmes linéaires. En effet, un système linéaire n’introduit pas de fréquences en dehors de la bande de fréquences originale. Remarquons toutefois que modifier, même linéairement, la fréquence ou la phase de la porteuse ne signifie pas pour autant que l’étage de modulation soit linéaire. Par ailleurs, la majorité des circuits de modulation ou de démodulation incluent des opérations non linéaires.

Modulation d’amplitude classique

Considérons la porteuse sinusoïdale $c(t)$ définie par

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (3.3)$$

²Par abus de langage, on parle de sinusoïde de référence alors qu’il s’agit d’une cosinusoïde.

pour laquelle nous avons pris le choix d'une phase de référence arbitrairement nulle ($\phi_c = 0$). Soit $m(t)$ le signal en bande de base représentant le message, c'est-à-dire l'information que l'on désire transmettre. On suppose, a priori, que le système générant la porteuse $c(t)$ est totalement indépendant du message $m(t)$.

Définition 25 La modulation d'amplitude, dite modulation **AM** pour *Amplitude Modulation*, est le processus par lequel l'amplitude de la porteuse $c(t)$ varie linéairement avec le signal modulant $m(t)$.

Après modulation, le signal modulé $s(t)$ est décrit par la fonction

$$s(t) = A_c k_a m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (3.4)$$

L'amplitude instantanée est donc rendue proportionnelle au signal modulant, et vaut

$$A(t) = A_c k_a m(t) \quad (3.5)$$

La figure 3.9 montre un signal basse fréquence $1,5 \sin(6\pi ft)$ (signal à 3 [Hz]) qui module l'amplitude d'un signal haute fréquence $\cos(72\pi ft)$ (signal à 36 [Hz]).

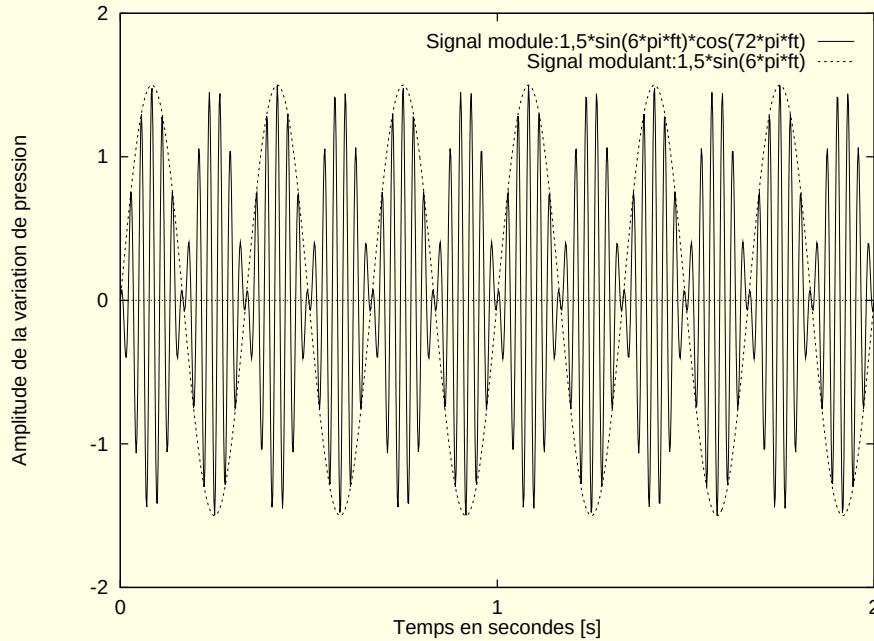


FIG. 3.9 – Représentation d'un signal modulé par le signal modulant $1,5 \sin(6\pi ft)$.

Analyse spectrale

Soient $m(t)$ un signal en bande de base et $\mathcal{M}(f)$ le spectre du signal, autre dénomination pour sa transformée de FOURIER. Selon les propriétés de la transformée de FOURIER, le spectre

du signal modulé vaut

$$\mathcal{S}(f) = \frac{k_a A_c}{2} [\mathcal{M}(f - f_c) + \mathcal{M}(f + f_c)] \quad (3.6)$$

Le spectre du signal modulé comprend deux bandes latérales obtenues par translation du spectre du signal modulant. Soit W la bande de base du spectre du signal modulant $m(t)$. La figure 3.10 représente à la fois le spectre de $m(t)$ et le spectre du signal modulé en amplitude correspondant, où l'on a supposé que $f_c \gg W$. On remarque que la moitié du spectre du signal modulant $m(t)$ correspondant aux fréquences négatives (de $-W$ à 0), apparaît telle quelle dans le spectre du signal modulé $s(t)$. La bande passante requise pour le signal modulé est donc égale à deux fois la bande de base.

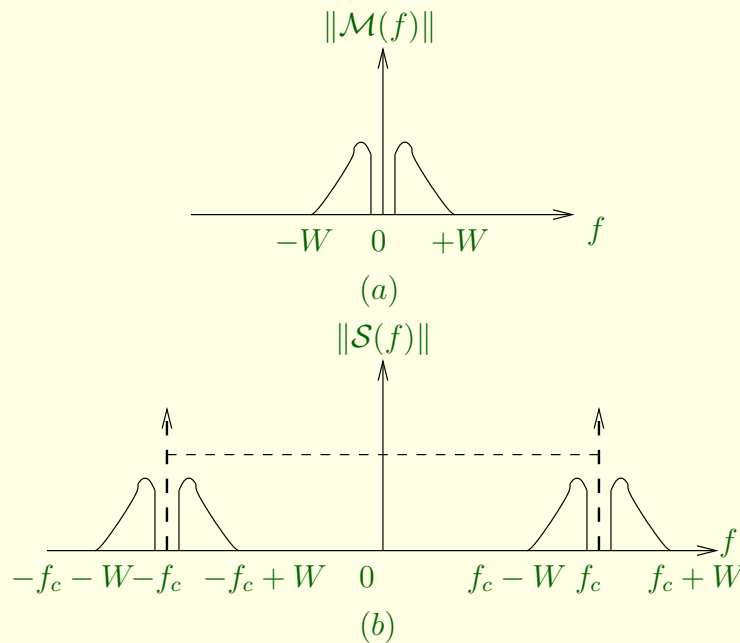


FIG. 3.10 – Spectres de fréquence : (a) signal en bande de base, (b) signal modulé.

La radiodiffusion en grandes ondes ($150\text{--}285\text{ [kHz]}$), en ondes moyennes ($525\text{--}1605\text{ [kHz]}$) et en ondes courtes (jusqu'à 30 [MHz]) utilise la modulation d'amplitude A3. La bande de base est limitée à $4,5\text{ [kHz]}$ et la largeur d'un canal radio est donc de 9 [kHz] .

L'effet le plus important de la modulation est le déplacement en fréquences du signal modulant : après modulation, le signal se situe autour de la fréquence de la porteuse. Il s'agit d'un principe général à toutes les techniques de modulation.

Modulation angulaire

Dans la modulation d'amplitude, partant d'une porteuse $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_c)$, on a rendu l'amplitude A_c fonction linéaire du signal modulant $m(t)$. Dans le cas de la modulation angulaire, on introduit une telle dépendance pour l'argument de la fonction cosinus. Cela est

moins évident qu'il n'y paraît à première vue. Quel paramètre doit devenir une fonction linéaire du signal modulant ? On peut en effet choisir de prendre l'argument de la fonction cosinus ou seulement la fréquence de la porteuse. Dans le premier cas, il s'agit de modulation de phase (**PM**), tandis que dans le second cas on parlerait plutôt de modulation de fréquence (**FM**).

Dans les deux cas, l'argument de la fonction cosinus n'est plus une fonction linéaire du temps. Mais dans la mesure où l'on définirait la phase comme l'argument de la fonction cosinus, une modulation de fréquence s'accompagnera nécessairement d'une modulation de phase. Comme on le devine, les concepts de modulation de phase et de fréquence sont strictement indissociables. C'est pourquoi on utilisera le terme général de modulation angulaire.

Illustration des techniques de modulation

En conséquence de la modulation de la phase, les passages par 0 de la fonction ne sont plus équidistants ; par contre, l'enveloppe reste constante. La figure 3.11 montre un signal modulant original et les signaux modulés respectivement en amplitude, en phase et en fréquence.

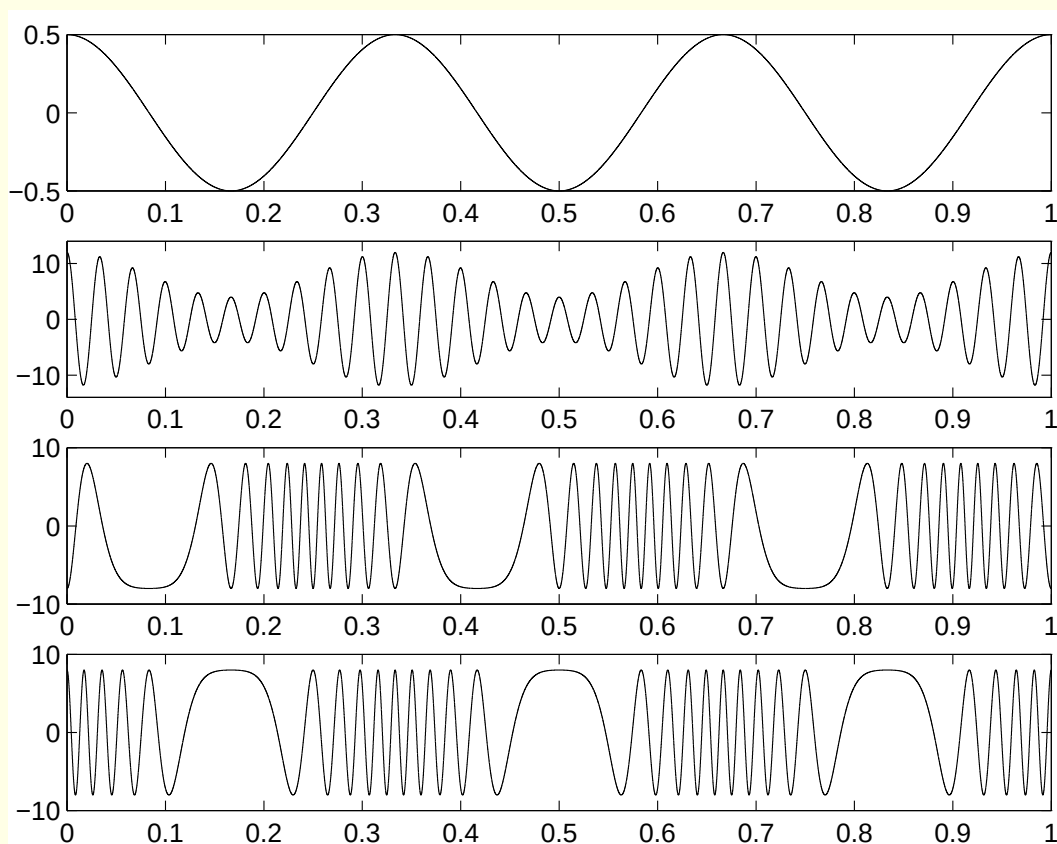


FIG. 3.11 – Signal modulant et signaux modulés respectivement en AM, PM et FM.

3.2.4 Multiplexage et accès au multiplex

La paire torsadée qui relie un abonné au central téléphonique est habituellement dédiée à un utilisateur unique³. Cet utilisateur peut dès lors, à sa guise et à toute heure, utiliser la totalité du spectre fréquentiel ; par ailleurs, la technologie **ADSL** en tire profit. Cette souplesse a un prix car, la ligne restant inactive pendant une très longue période, l'utilisation moyenne de quelques dizaines de minutes par jour doit suffire à rentabiliser l'investissement consenti par l'opérateur.

Multiplexage

Dans l'air ou sur un réseau de télédistribution, le partage du spectre et le partage temporel des ressources font partie intégrante du dimensionnement du réseau. Ces partages résultent de procédés de **multiplexage** qui consistent à combiner plusieurs signaux pour les transmettre sur un même support.

Historiquement, on en distingue principalement deux :

- le multiplexage en fréquences (Frequency Division Multiplexing - **FDM**). Cette technique de multiplexage alloue une bande de fréquences spécifique à chaque signal.
- le multiplexage temporel (Time Division Multiplexing - **TDM**). Il consiste à réguler les moments d'occupation du canal pour chaque signal.

La technique plus récente du **multiplexage par étalement de spectre** a ouvert de nouvelles voies pour le partage de ressources. Cette technique réalise à la fois un partage fréquentiel et temporel.

Pour être complet, signalons qu'il existe des techniques de multiplexage propres à certains supports. Ainsi, dans le domaine de la transmission par fibre optique, on a développé des techniques de multiplexage par longueurs d'onde (Wave Division Multiplexing - **WDM**) avec quelques variantes particulièrement adaptées à la transmission à très haut débit (Dense Wave Division Multiplexing - **DWDM**) .

Accès multiple

Dès lors qu'il y a multiplexage et donc partage des ressources, il convient de définir

- des moyens techniques pour accéder à ces ressources individuelles. On parle de méthodes d'accès telles que le **FDMA** (la lettre **A** désignant **Access**), **TDMA**, **CDMA**, ...
- des stratégies pour disposer du canal. C'est par le biais de stratégies qu'on espère atteindre au haut de performance (haut débit, faible délai, faible taux de congestion, ...).

Multiplexage par répartition en fréquences

Principe. L'utilisation de certains supports de transmission exige un partage adéquat des ressources fréquentielles. Il faut savoir que des signaux qui occupent des bandes fréquentielles distinctes n'interfèrent pas !

La technique de multiplexage par répartition en fréquences consiste à former un signal composite par translation fréquentielle de certains signaux. La figure 3.12 en illustre le principe. On

³Dans de très rares cas, il existe des **concentrateurs** de lignes qui combinent des signaux entre les abonnés et le central téléphonique.

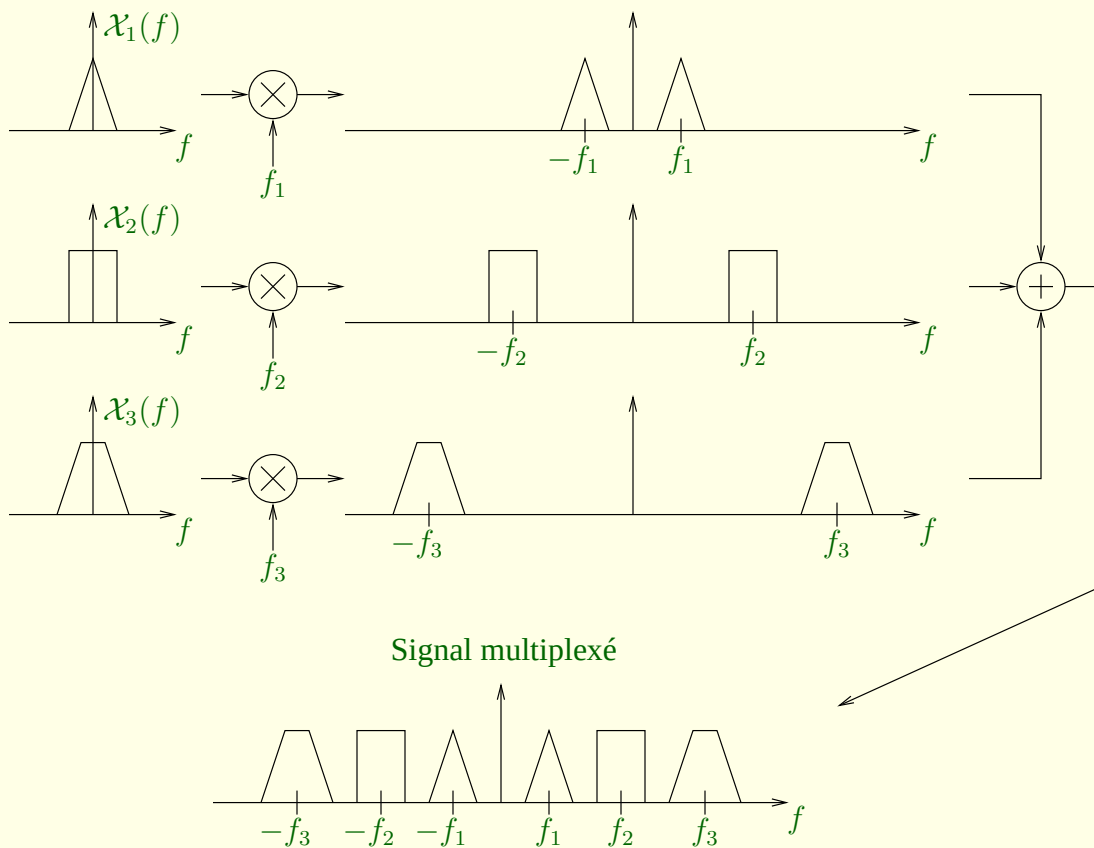


FIG. 3.12 – Principe du multiplexage en fréquence.

dispose d'une série de signaux $\mathcal{X}_i(f)$ en bande de base à transmettre simultanément. Au moyen de mélangeurs accordés à des fréquences spécifiques, le spectre de chaque signal est déplacé le long de l'axe des fréquences et ajouté au signal multiplex de manière à couvrir une certaine plage fréquentielle, tout en évitant un chevauchement en ménageant des bandes de garde entre les signaux.

Le signal multiplexé est transmis au récepteur qui doit extraire un à un tous les signaux au moyen de mélangeurs accordés aux mêmes fréquences qu'à l'émission (voir figure 3.13).

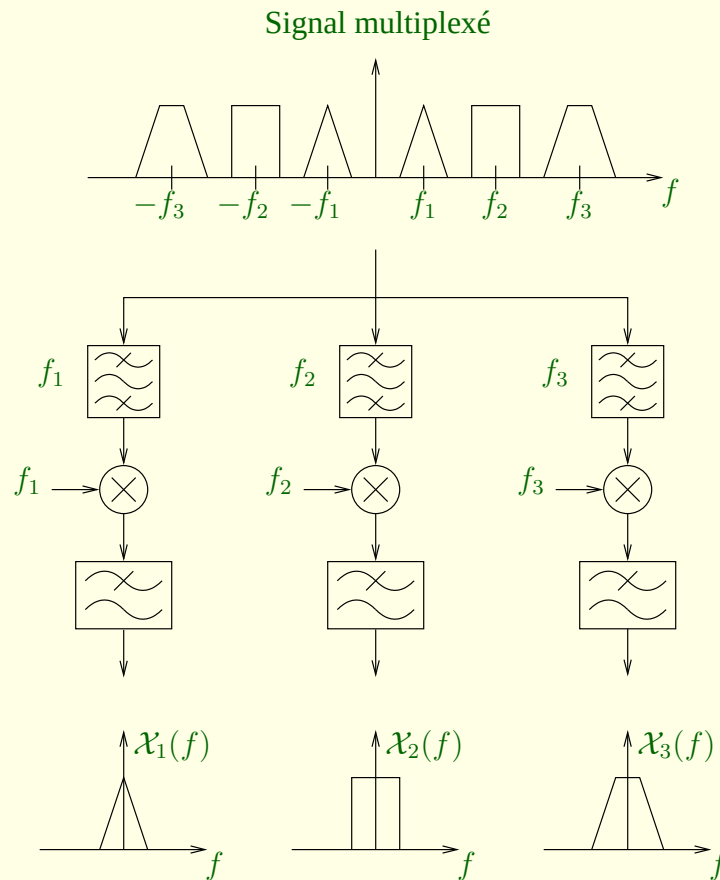


FIG. 3.13 – Principe du démultiplexage en fréquence.

Accès au multiplex. La question de l'accès (FDMA) est relativement simple car c'est la fréquence porteuse du signal dans le multiplex qui permet de sélectionner un signal. Cette allocation est généralement statique dans les réseaux fixes et dynamique dans les réseaux mobiles. Le partage fréquentiel des ressources est illustré à la figure 3.14.

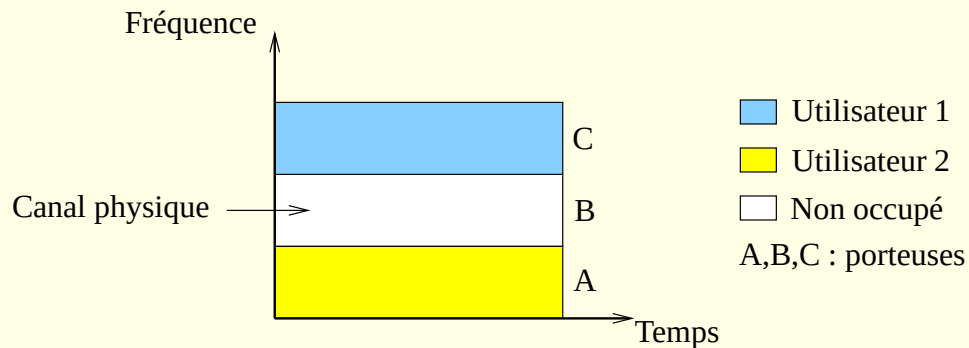


FIG. 3.14 – Partage des ressources par multiplexage en fréquence : le FDMA (Frequency Division Multiple Access).

Multiplexage par répartition temporelle

Principe. Le multiplexage par répartition temporelle (**TDM**, Time Division Multiplexing) est une technique de traitement de données par mélange temporel ayant pour but de permettre l'acheminement sur un même canal (appelé **voie haute vitesse**, HV), un ensemble d'informations provenant de différents canaux à faibles débits (appelés **voies basses vitesses**, BV) lorsque celles-ci doivent communiquer simultanément d'un même point de départ à un même point d'arrivée. Le principe est illustré à la figure 3.15.

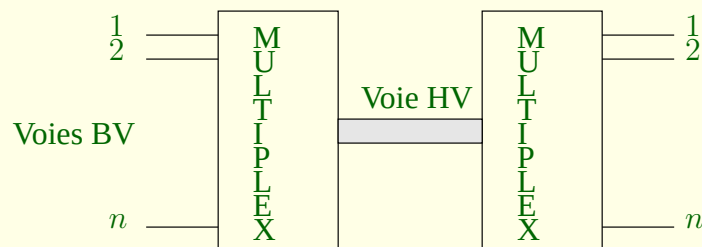


FIG. 3.15 – Schéma de multiplexage temporel.

À l'autre bout de l'acheminement, un démultiplexeur opère à l'inverse. Ce multiplexage est dit **temporel** dans la mesure où les données correspondant à chaque voie sont intercalés dans le temps. Ainsi circulent séquentiellement et cycliquement sur la voie HV des informations appartenant à différentes sources (cf. figure 3.16). Le multiplexage peut être effectué soit après l'opération d'échantillonnage de chaque voie et avant le codage, soit après celui-ci.

Lors du démultiplexage des voies, c'est-à-dire de la ré-affectation des données en fonction de leur source d'origine, il faut que l'on puisse distinguer les différents échantillons. Pour cela, on intercale dans la succession de données un mot de repère, dont l'occurrence est égale à la période d'échantillonnage (figure 3.17).

L'ensemble constitué du mot de repère et de l'information de même rang pour toutes les voies

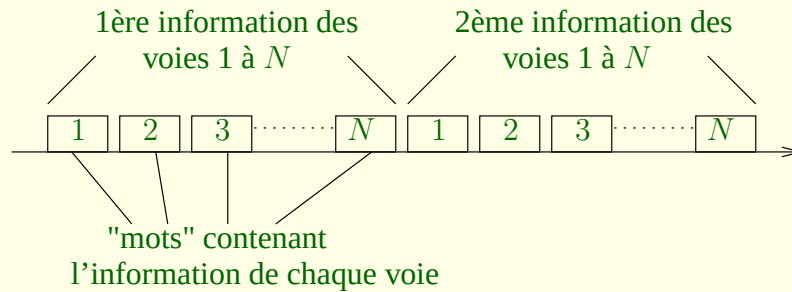


FIG. 3.16 – Structure temporelle de multiplexage par répartition temporelle des ressources.

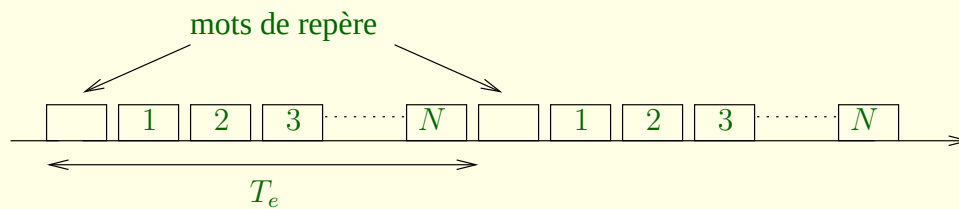


FIG. 3.17 – Mot de repère.

est appelé **trame**. Sa durée est égale à T_e .

Accès au multiplex. Tout comme pour le FDM, l'accès est généralement statique. Néanmoins, le TDM offre un moyen aisé de transmettre des informations individuelles à des débits différents ; il suffit par exemple d'allouer plusieurs canaux à un utilisateur comme dans le cas du **GPRS**. Le schéma d'accès doit alors être convenu entre l'extrémité émettrice et l'extrémité réceptrice. Le schéma de partage par répartition temporelle est illustré à la figure 3.18.

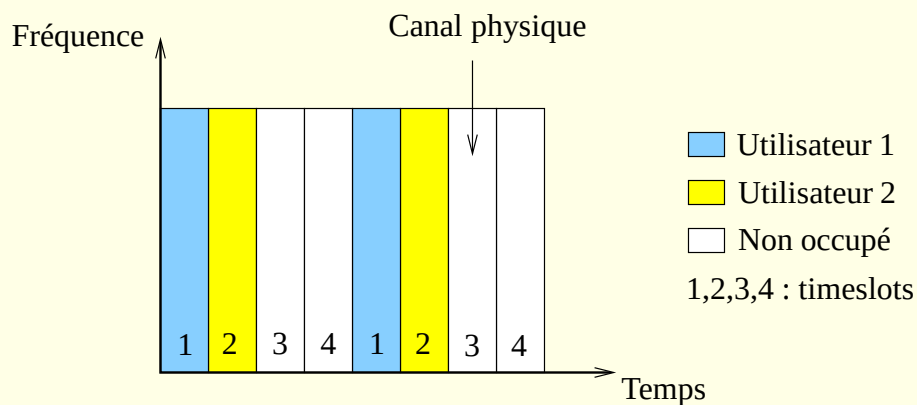


FIG. 3.18 – Partage des ressources par multiplexage en temps : le TDMA (Time Division Multiple Access).

Multiplexage par répartition de codes

Principe. Le principe de base est celui de l'étalement de spectre. Le multiplexage par répartition de codes (Code Division Multiplexing **CDM**) ne nécessite ni une allocation fixe des fréquences comme en FDM, ni un séquençement strict comme en TDM, comme le montre la figure 3.19.

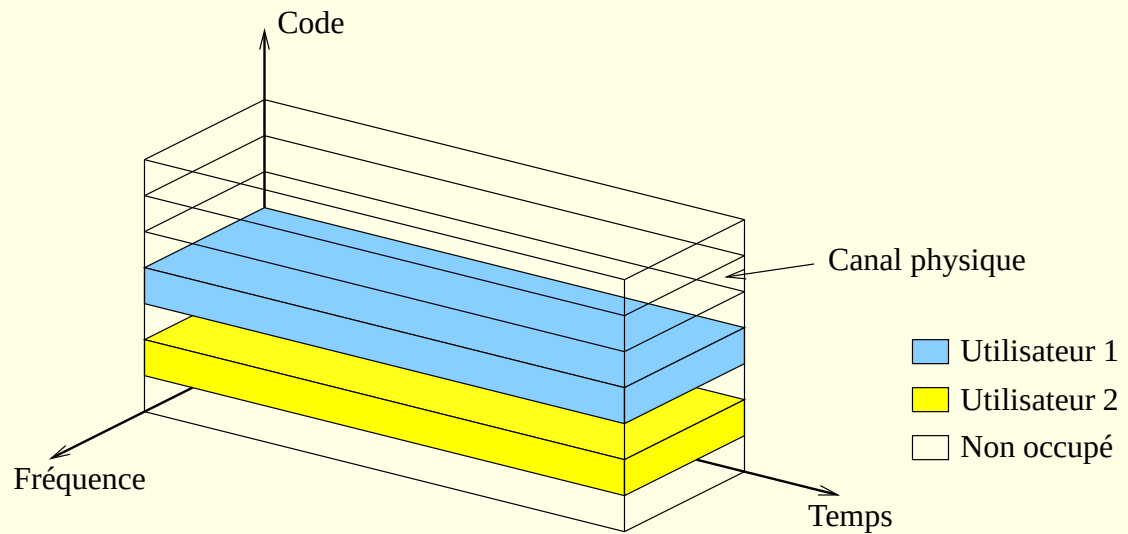


FIG. 3.19 – Multiplexage de ressources par répartition de code (Code Division Multiple Access).

Pour comprendre le mécanisme de multiplexage par répartition de code prenons l'analogie suivante : imaginons qu'un homme et une femme parlent en même temps. Ils occupent à peu près la même bande de fréquences et la même fenêtre temporelle. Néanmoins, il est possible d'identifier les 2 voix –car, malgré l'entremêlement des spectre, elles ont des caractéristiques différentes– et donc de séparer les 2 signaux vocaux. La difficulté consiste à trouver des méthodes qui génèrent des signaux aisément différenciables. Techniquement, cela se fait au moyen de codes. Le facteur limitatif le plus important est celui des intercorrélations entre utilisateurs dès lors que les utilisateurs recourent à des codes distincts.

Combinaison de techniques de multiplexage

Les techniques de multiplexage ne sont pas nécessairement utilisées isolément. En effet, dans le cas pratique du **GSM**, l'opérateur alloue une série de canaux fréquentiels. Ces canaux sont ensuite partagés entre utilisateurs par multiplexage à répartition temporelle. On parle de technique FD/TDMA. Un tel schéma est illustré à la figure 3.20. De plus, il y a séparation des bandes de fréquence suivant que le signal va de la station de base vers l'utilisateur ou l'inverse. Cette technique est parfois appelée FDD/TDD (le second D signifiant **Duplex**).

Dans le cas du standard américain IS-95, le multiplexage temporel est remplacé par un multiplexage par spectre étalé ; il s'agit alors de FD/CDMA.

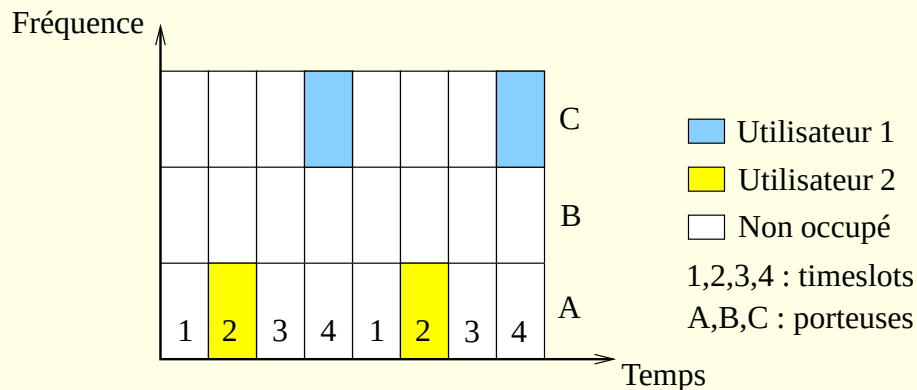


FIG. 3.20 – Partage de ressources par multiplexage en temps et en fréquence, combinaison du TDMA et du FDMA.

Quid des licences GSM et UMTS ? En Belgique, l'émission d'ondes électromagnétiques dans l'air est régulée par l'Institut Belge des services Postaux et des Télécommunications (IBPT⁴) qui suit les recommandations de l'ITU⁵. La régulation se fait par bande de fréquences : chaque bande de fréquences est associée à certains types de services. Ainsi, la bande de fréquences utilisées par la technologie de transmission sans fil **Bluetooth** est entièrement libre. Ce n'est pas le cas des bandes utilisées par la transmission par **GSM** ou **UMTS**. Il faut donc que les opérateurs obtiennent le droit d'émettre dans ces bandes en suivant les lois nationales en vigueur.

3.3 Réseaux téléphoniques et réseaux de télédistribution

Voyons à présent les caractéristiques essentielles des réseaux (c'est-à-dire jusqu'à la troisième couche du modèle OSI).

Les premiers réseaux étaient de type analogique ; ils ne véhiculaient pas de signaux numériques. Le réseau analogique le plus utilisé est le réseau téléphonique. Pour être précis : le réseau téléphonique fixe ne véhicule des informations analogiques que dans la boucle locale, c'est-à-dire entre un abonné et le central téléphonique auquel il est raccordé. Le reste du réseau est entièrement numérique, ce qui signifie que, pour toute communication téléphonique, il y a conversion de l'analogique vers le numérique et conversion inverse.

3.3.1 Le réseau téléphonique

Le réseau téléphonique, aussi appelé Réseau Téléphonique Commuté (RTC) ou Public Switched Telephone Network (**PSTN**) a connu un développement extraordinaire à travers le monde. Du côté de l'abonné, le réseau se termine par une paire de fils de cuivre reliés à une centrale. Le

⁴<http://www.ibpt.be>

⁵<http://www.itu.int>

téléphone qui s'y raccorde se charge de transformer le signal de parole en signal électrique. Le signal parvient ensuite à la centrale qui le dirige vers un autre abonné en passant éventuellement par d'autres centrales. Comme il a pour mission primaire de transporter des signaux vocaux, les caractéristiques du réseau téléphonique leur sont adaptées. Ainsi, la bande passante du signal transmis est limitée à l'intervalle $300 - 3400 [kHz]$ car l'énergie du signal de parole s'y trouve principalement. D'autre part, les délais de transmission sont très courts pour permettre un dialogue normal. Enfin, la transmission n'est jamais interrompue pendant la communication.

Le réseau téléphonique historique est constitué d'une série de paires de cuivre reliant chaque abonné au central. Notons qu'une paire est toujours dédiée à chaque utilisateur. La transmission s'effectue en général de manière analogique jusqu'au central téléphonique (cf. figure 3.21).

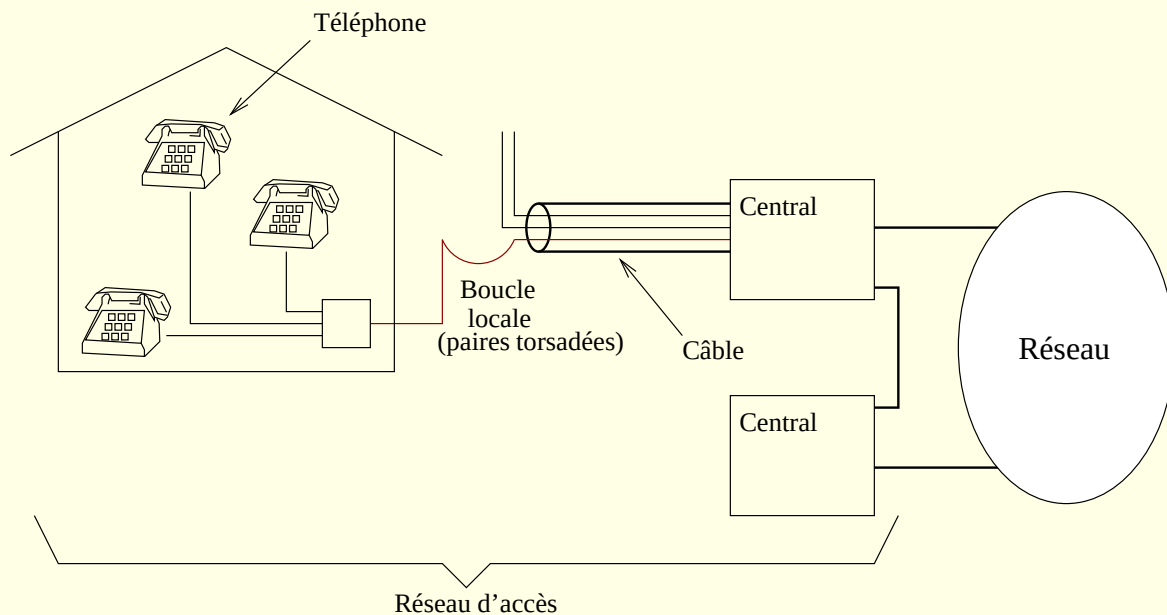


FIG. 3.21 – Structure d'un réseau à paires de cuivre.

À l'entrée du central, le signal analogique est converti sous forme numérique et acheminé tel quel jusqu'au dernier central téléphonique. Le signal numérique est ensuite interpolé et transmis sur la paire de l'abonné destinataire. Ce schéma est illustré à la figure 3.22. Une représentation plus détaillée est fournie à la figure 3.23 : on y voit les composants physiques.

Une seule paire de fils suffit théoriquement pour communiquer dans les deux directions. Il faut néanmoins mettre en place un mécanisme pour y parvenir. Dans le cas du téléphone analogique, on recourt à un transformateur hybride tel celui représenté à la figure 3.24. Ce transformateur effectue l'interfaçage entre un système à 2 fils et un système à 4 fils.

A chaque passage dans un central, le signal numérique est commuté, c'est-à-dire qu'il passe systématiquement d'une entrée spécifique à une sortie spécifique. La commutation est rapide car le chemin de passage est établi au début de l'appel, pour toute la durée de l'appel. On parle de

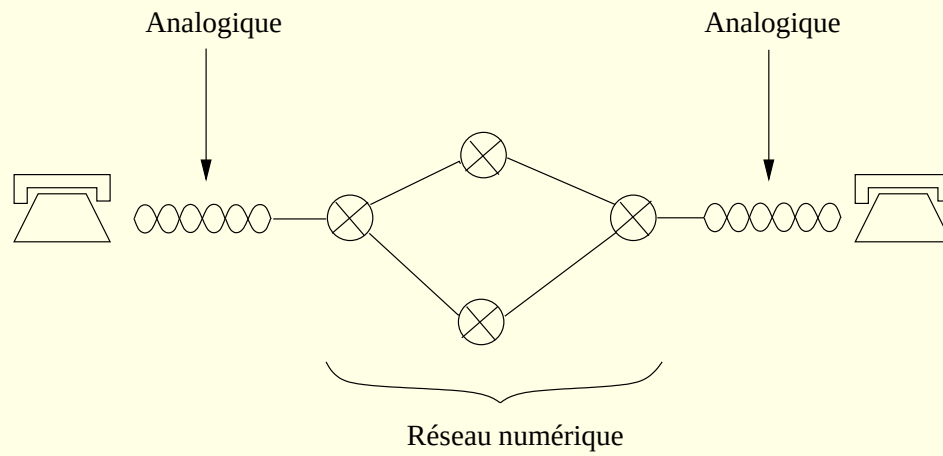


FIG. 3.22 – Ligne analogique.

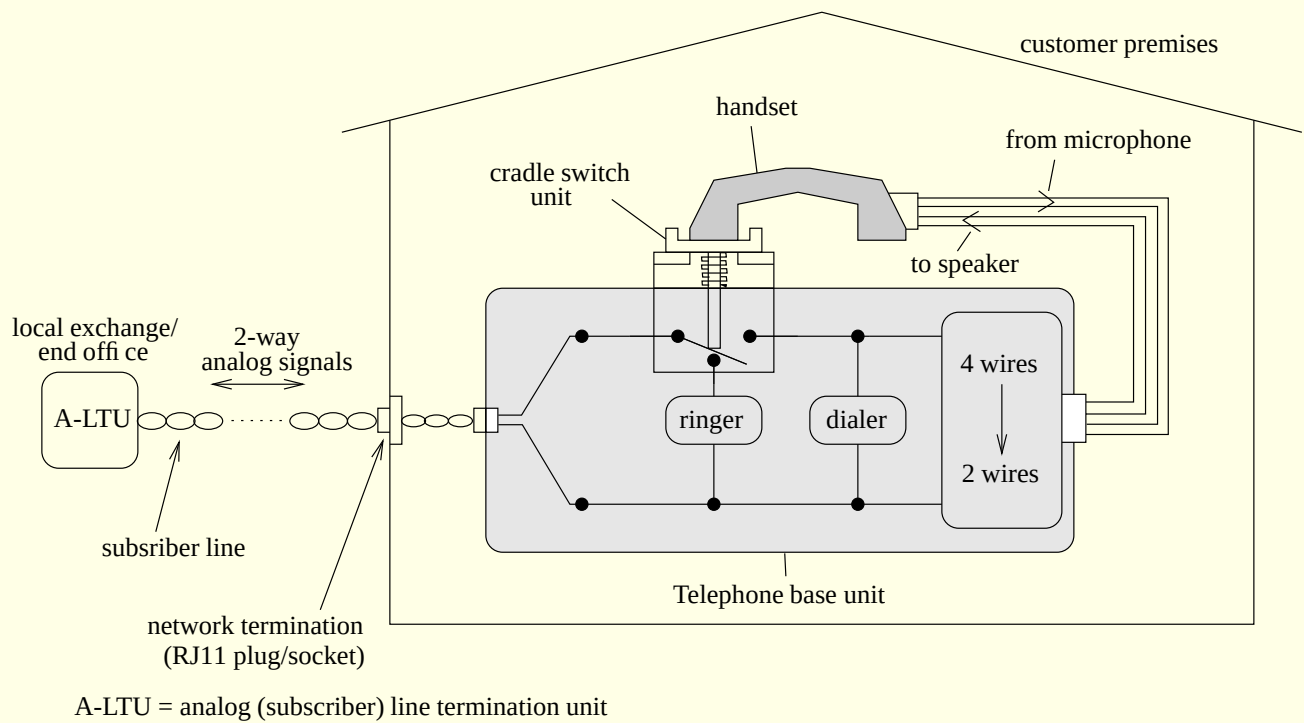


FIG. 3.23 – Terminaison d'une paire de fils téléphoniques (d'après [5]).

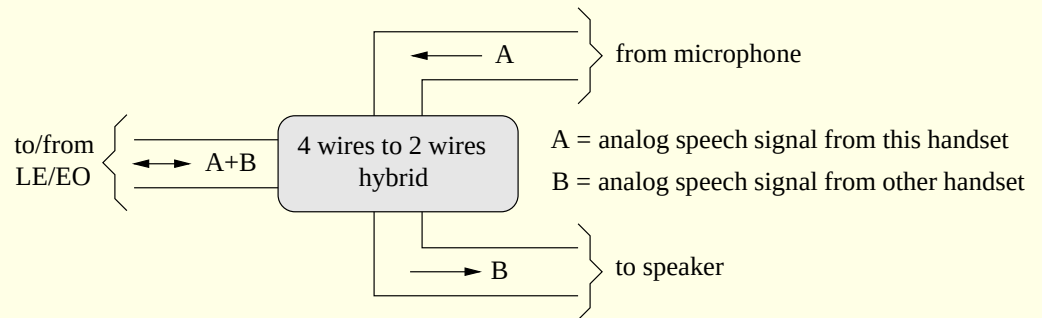


FIG. 3.24 – Passage d'un système de 2 fils à un système à 4 fils par passage dans un transformateur hybride.

circuit ou de mode connecté⁶. Le circuit est établi grâce à des protocoles de **signalisation**. Entre l'abonné et le central téléphonique, la signalisation s'effectue par l'envoi d'une combinaison de deux fréquences ; ce mécanisme porte le nom de **Dual Tone MultiFrequency, DTMF**. Les fréquences associées aux touches du clavier sont représentées à la figure 3.25.

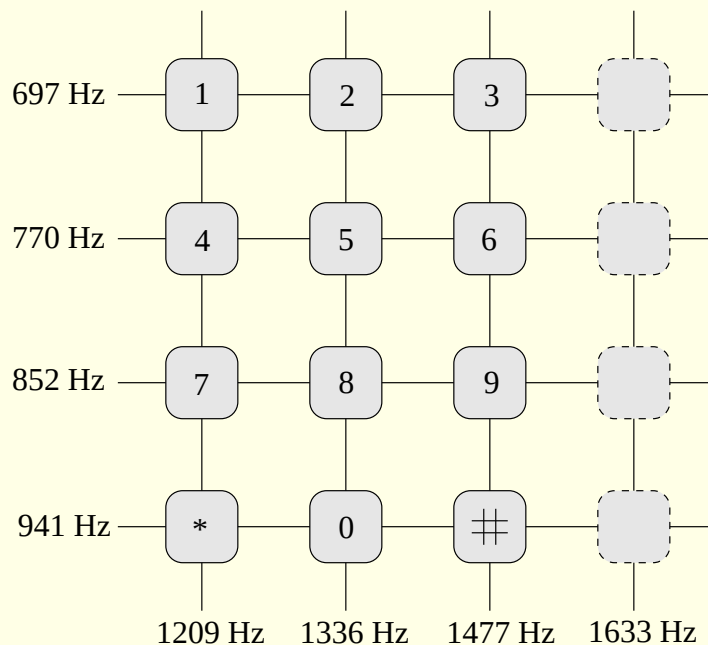


FIG. 3.25 – Clavier générant les sons à double fréquence.

En ce qui concerne la bande passante, l'opérateur garantit la délivrance d'un canal transparent pour les fréquences comprises dans l'intervalle $[300\text{ Hz}, 3400\text{ Hz}]$; on parle de la **bande vocale**.

⁶À l'inverse, la commutation d'informations suivant le protocole IP se fait par **paquets** ; Il n'y a pas de chemin préétabli pour toute la durée de l'échange.

C'est donc dans cette bande qu'a lieu le transfert du signal vocal ainsi que les informations numériques transmises au moyen d'un **modem**. Parmi les nombreuses normes de modems, citons la norme **V90**, qui permet la transmission de données pouvant atteindre 56 [kb/s] , et la norme **V92**, qui ajoute une série de fonctions à la norme V90.

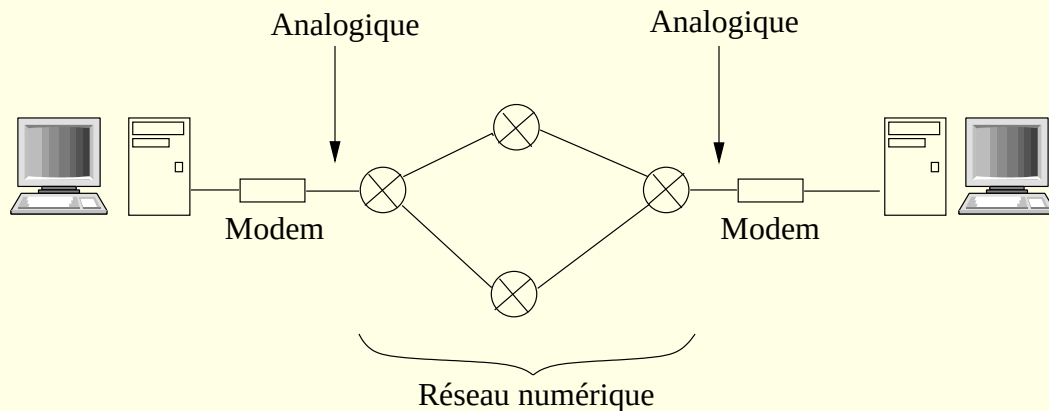


FIG. 3.26 – Transmission par modem dans la bande $[300\text{ Hz}, 3400\text{ Hz}]$.

A priori, le réseau téléphonique n'est pas adéquat pour la transmission de signaux d'ordinateurs car ces signaux sont numériques à l'origine. Et pourquoi faudrait-il maintenir la connexion entre ordinateurs après qu'un message ait été envoyé ? Le recours à des modems offre une première solution mais il y a mieux : le RNIS.

Le réseau numérique à intégration de services

Le Réseau Numérique à Intégration de Services (**RNIS**), ou Integrated Services Digital Network (**ISDN**) en anglais, est l'équivalent numérique du réseau téléphonique analogique. Il utilise la même infrastructure physique mais tous les signaux véhiculés restent sous une forme numérique, ce qui le rend plus commode pour des applications non vocales. Il s'agit donc d'un prolongement de l'accès numérique jusqu'à l'abonné.

Le débit d'un canal RNIS est de 64 [kb/s] ; il est assuré entre deux utilisateurs raccordés au RNIS. Le principe du RNIS n'est pas lié au type de câble employé et l'on pourrait très bien imaginer de faire du RNIS sur le câble coaxial des télédistributeurs.

Comme représenté à la figure 3.27, l'accès au RNIS se présente sous la forme d'un bus offrant plusieurs canaux en parallèle. Pour un accès de base, l'abonné dispose de 2 canaux à 64 [kb/s] . Ces canaux sont compatibles avec les canaux 64 [kb/s] utilisés entre centraux. Dès lors, il est tout à fait possible d'avoir une communication numérique à l'origine et une terminaison analogique.

L'usage d'une bande de fréquences limitée à la bande $[300\text{ Hz}, 3400\text{ Hz}]$ n'a de sens que s'il s'agit d'établir une communication entre deux points distants. Bien entendu, rien n'interdit d'utiliser une bande plus large entre un abonné et le central téléphonique car le support est spécifique à un abonné. Le RNIS utilise cette astuce pour transmettre des signaux numériques dans une bande de fréquences, excédant la bande vocale, entre l'abonné et le central.

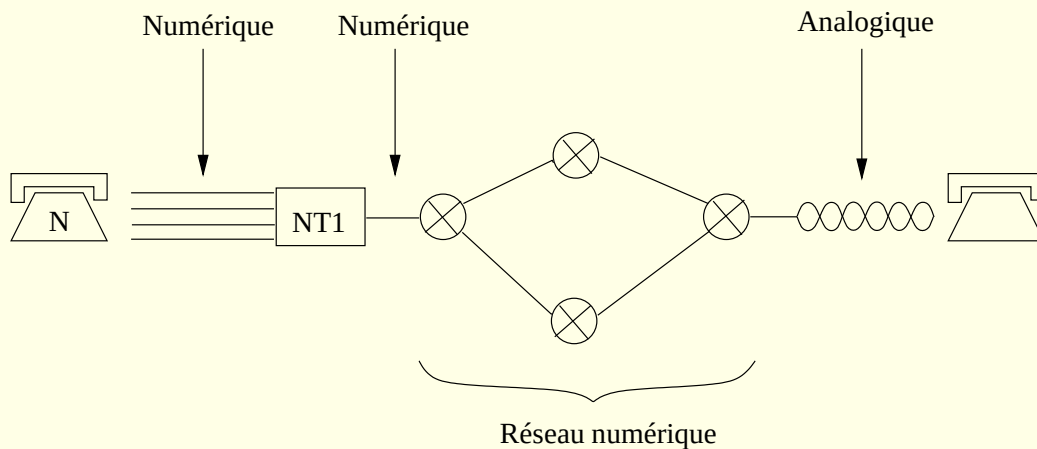


FIG. 3.27 – Schéma du réseau RNIS.

Transmission ADSL

La transmission numérique à haut débit dans le réseau téléphonique par **ADSL** pousse le principe plus loin : la transmission de l'information numérique se fait hors bande vocale de manière à garantir la coexistence avec le signal vocal analogique usuel. Cette coexistence n'est effective que sur la paire dédiée car au franchissement du central téléphonique, les signaux sont séparés par filtrage et injectés dans des réseaux de transmission spécifiques. Cette séparation est illustrée à la figure 3.28.

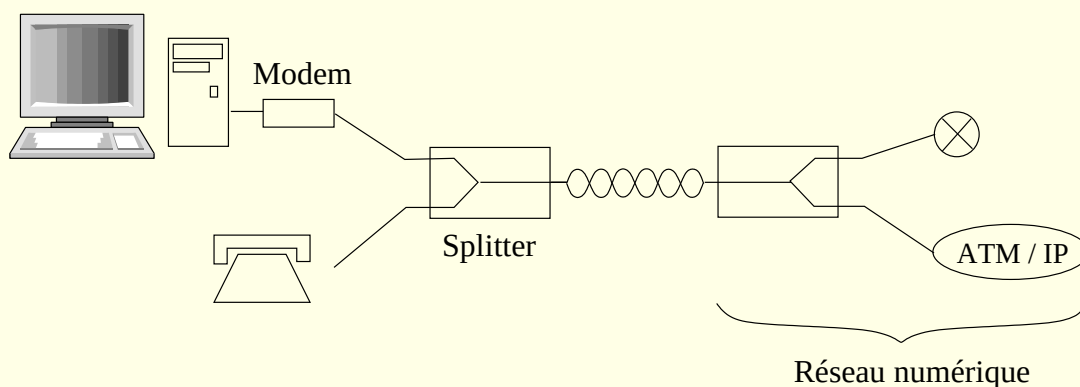


FIG. 3.28 – Configuration d'une connexion ADSL.

3.3.2 Réseaux de télédistribution

Transmettre des signaux de télévision analogiques sur grandes distances n'aurait jamais pu se faire sans câble coaxial. L'architecture physique du réseau des télédistIBUTEURS, qui assurent la

distribution de signaux vidéo analogiques, se compose d'un câble coaxial auquel sont raccordés tous les utilisateurs. Si le réseau comporte des ramifications, on parle d'architecture en arbre (cf. figure 3.29).

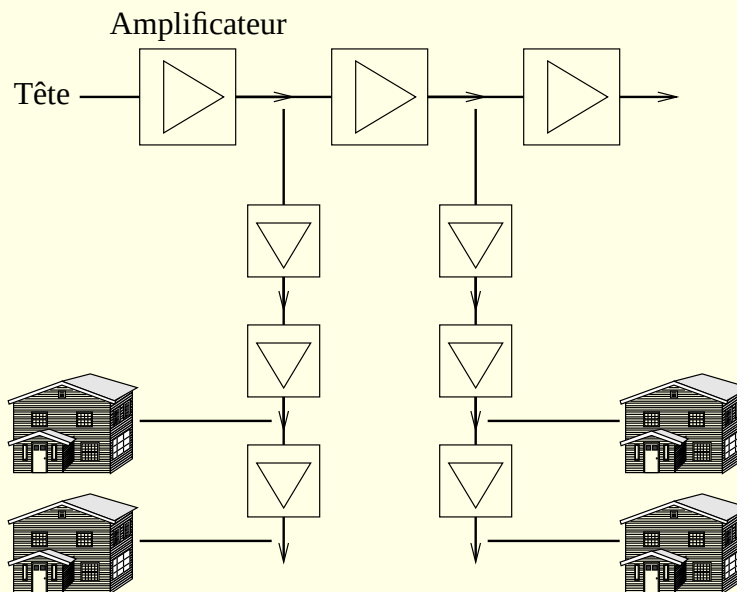


FIG. 3.29 – Structure d'un réseau de télédistribution.

Un réseau de distribution se caractérise par le fait que, d'une part, un même segment de câble est partagé par plusieurs utilisateurs et que, d'autre part, les signaux sont transmis d'un point central vers les utilisateurs, pas dans l'autre sens. Tel quel le réseau ne se prête pas aux communications bidirectionnelles, à moins de le combiner à un réseau de type téléphonie pour les signaux remontants de l'abonné vers le serveur.

L'évolution subie par les réseaux de télédistribution durant les années 1990 a d'abord consisté en un découpage en sous-réseaux. On a ensuite introduit des amplificateurs bidirectionnels de manière à permettre l'acheminement d'un signal en retour. Les figures 3.30 et 3.31 illustrent ces deux phases.

Il est important de souligner que le signal qui remonte des abonnés à la tête de réseau occupe une autre bande de fréquences que les signaux descendants. De cette manière, on évite toute interférence.

3.3.3 Communications sans fil

Malgré l'usage généralisé d'un câble pour la transmission de données, il n'est pas indispensable d'avoir un câble pour transmettre des données. De nombreuses solutions de communications sans fil existent de nos jours. Nous allons en examiner quelques-unes.

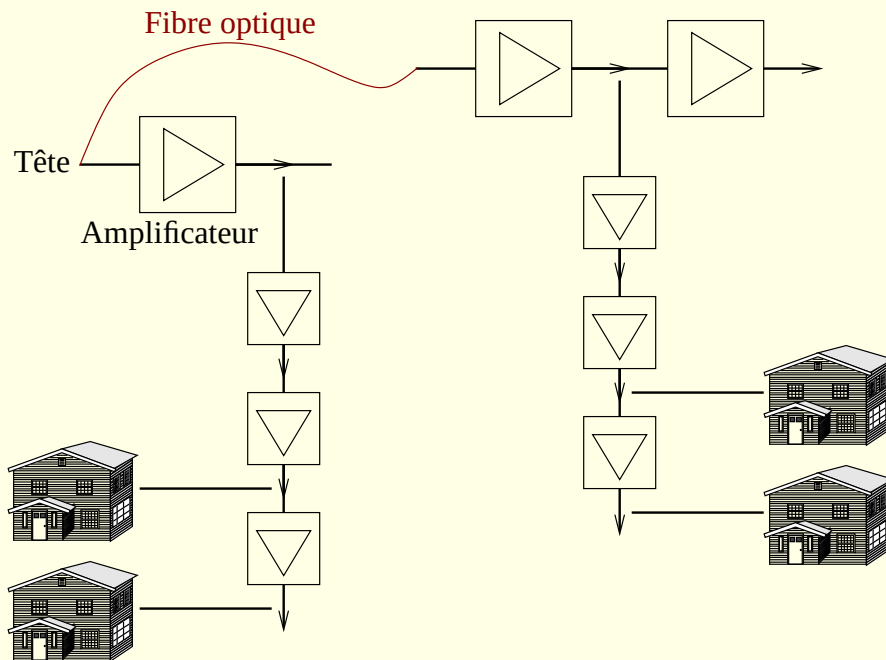


FIG. 3.30 – Structure d'un réseau de télédistribution. Phase 1 : découpage en sous-réseaux.

Les transmissions par satellite

Le schéma de principe de la diffusion par satellite est illustré à la figure 3.32. En raison de la couverture géographique importante que permettent les transmissions par satellite, l'usage de satellite se justifie principalement pour pallier le manque d'infrastructure ou pour distribuer les signaux, ce qui en fait une solution peu commode pour des applications multimédia interactives.

Dans la majorité des cas, un satellite agit comme un relais : il amplifie le signal et le transpose d'une bande de fréquences à une autre avant de le ré-émettre. Pour qu'un satellite reste immobile par rapport à la terre, il faut qu'il occupe l'orbite géostationnaire (située à 36.000 [km] de la terre). Il existe néanmoins des applications qui recourent à des satellites à orbite basse –on parle de **LEOS** Low Earth Orbital Satellites. Ces satellites défilent par rapport à une position fixe de la terre. Ils ont toutefois l'avantage d'être plus proches et donc de nécessiter moins de puissance. La figure 3.33 montre les distances typiques entre des satellites et la terre. Les zones de couverture sont également fonction de la distance à la terre. Ainsi, comme illustré à la figure 3.34, un satellite à orbite géostationnaire offre la plus grande zone de couverture.

Signalons qu'il existe un service de localisation articulé sur une constellation de satellites : le **GPS**. Ce système permet, par triangulation, de déterminer la position d'un terminal à quelques dizaines de mètres près. Il faut pour cela que le terminal soit en visibilité directe avec plusieurs satellites, ce qui exclut de l'utiliser à l'intérieur des bâtiments.

Certains réseaux sont composés partiellement de satellites. C'est principalement le cas des réseaux de télédiffusion. Pour de tels réseaux, comme définis par la norme **DVB** (cf. figure 3.35), les distances importantes sont couvertes par satellite ; la diffusion de proximité est réalisée par

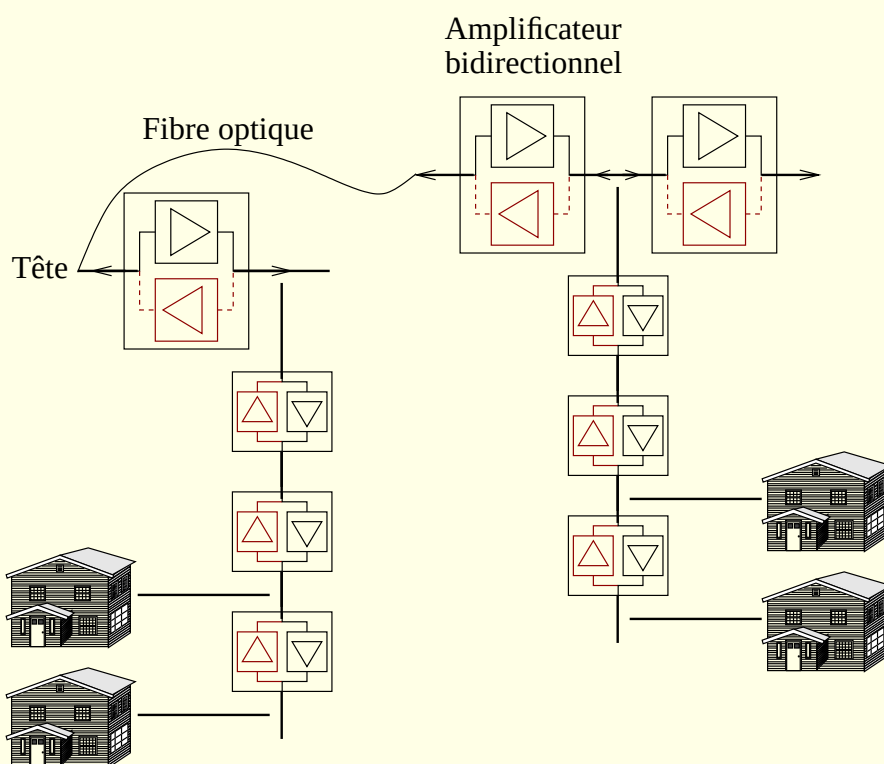


FIG. 3.31 – Structure d'un réseau de télédistribution. Phase 2 : introduction d'amplificateurs bidirectionnels.

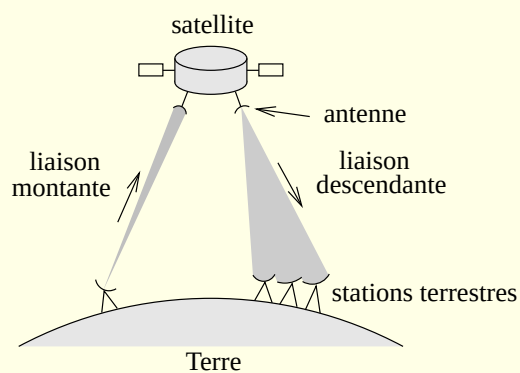
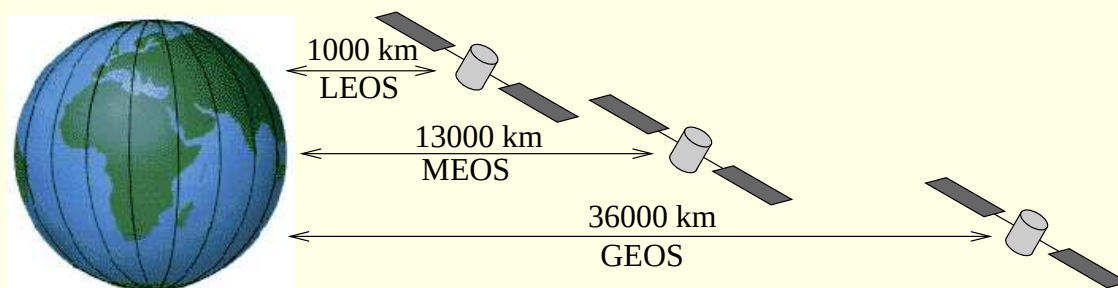
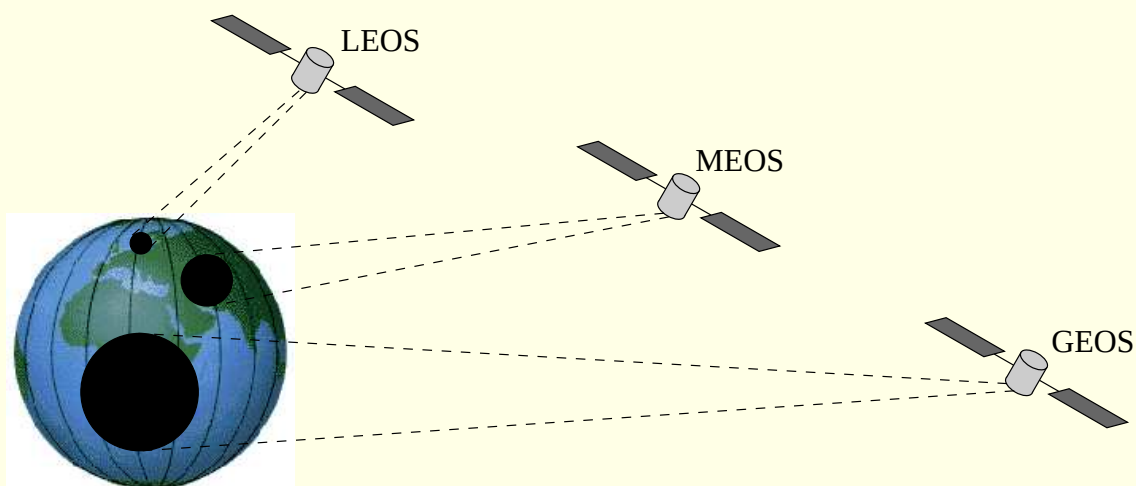


FIG. 3.32 – La diffusion par satellite.



GEOS : Geostationary Earth Orbital Satellite
 MEOS : Medium Earth Orbital Satellite
 LEOS : Low Earth Orbital Satellite

FIG. 3.33 – Les distances à la terre des différents systèmes satellitaires.



GEOS : Geostationary Earth Orbital Satellite
 MEOS : Medium Earth Orbital Satellite
 LEOS : Low Earth Orbital Satellite

FIG. 3.34 – Les différents types de couverture des constellations de satellites.

diffusion terrestre.

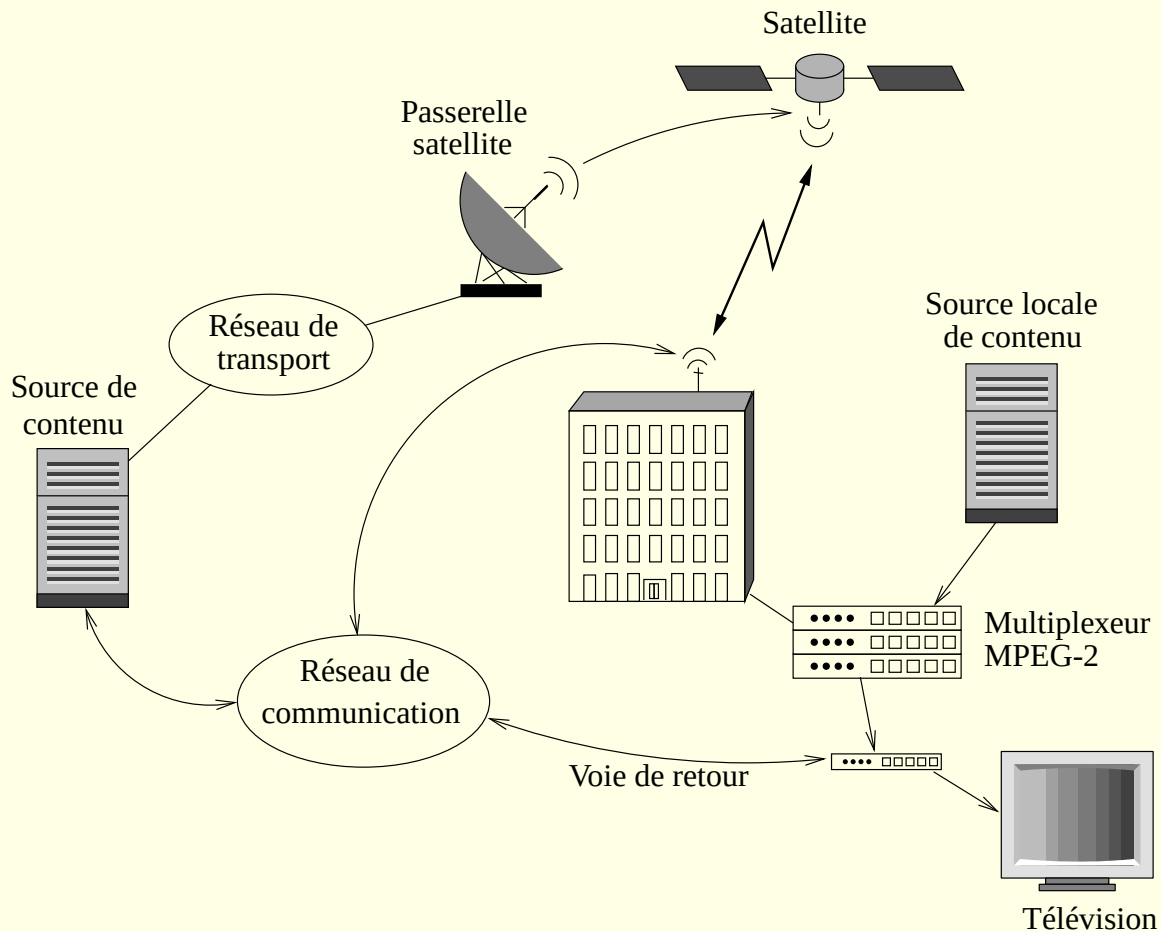


FIG. 3.35 – Architecture d'un système DVB mixte satellite et câble.

La norme Global System for Mobile Communications (GSM)

La norme **GSM** définit un système de transmission cellulaire dont l'architecture générale est dessinée à la figure .3.40. Le réseau est découpé en cellules contiguës au centre desquelles se trouve le système de transmission radio. Chaque cellule dessert un certain nombre d'utilisateurs à l'intérieur de la zone géographique déterminée par la puissance et l'orientation de l'antenne d'émission. Les cellules sont reliées entre elles par le réseau fixe ou par des connexions radio point à point.

La partie la plus délicate dans un réseau mobile est la gestion de la mobilité. Ainsi, lorsqu'un utilisateur quitte une cellule, il faut qu'une cellule voisine prenne le relais de manière transparente pour l'utilisateur. Pour y parvenir, on regroupe quelques cellules au sein d'une zone. Cette zone est dotée d'un registre local, appelé **Visitor Location Register (VLR)**, contenant l'identité des utilisateurs présents dans la zone. Les registres locaux dialoguent avec un registre central, appelé

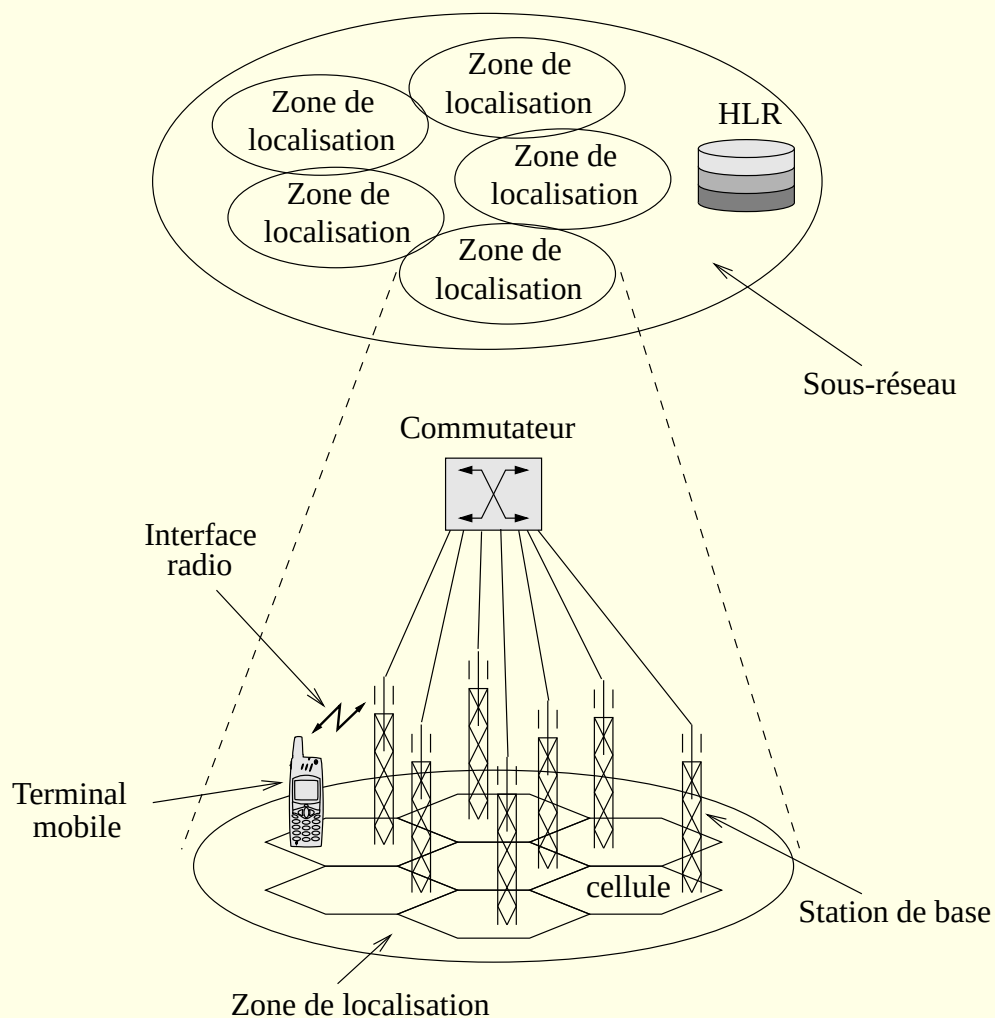
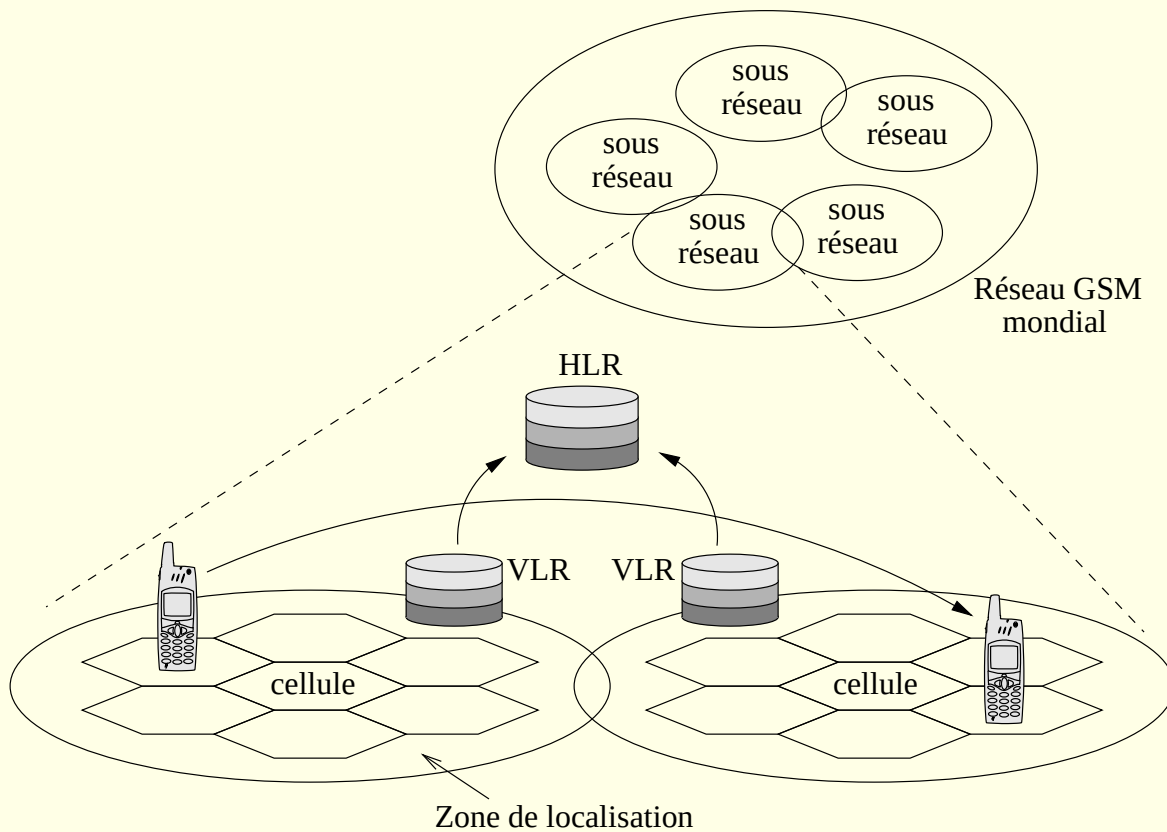


FIG. 3.36 – Architecture d'un réseau cellulaire.

Home Location Register (**HLR**), qui contient les données relatives aux abonnés (cf. figure 3.37). Les données concernent aussi bien le profil d'un abonné que le numéro de la zone dans laquelle il se trouve pour l'instant. Ainsi, un appel destiné à cet abonné sera dirigé vers la bonne zone après consultation du registre central.



HLR (Home Location Register) : registre global
VLR (Visitor Local Register) : registre local

FIG. 3.37 – Base de données gérant la mobilité dans un réseau GSM.

Pour réaliser le transfert inter-cellulaire (appelé **handover**), on prévoit des zones de recouvrement entre les cellules. Ce principe est illustré à la figure 3.38. Dans un premier temps, le GSM détecte une baisse du niveau de puissance lorsqu'il s'éloigne du centre de la cellule. Il cherche alors une cellule dont la puissance d'émission serait supérieure au niveau reçu de l'antenne avec laquelle il communique.

Lorsque le GSM décide de s'accrocher à une autre cellule, les cellules effectuent le transfert entre elles en échangeant des messages de signalisation. Le contenu de ces messages dépend du type de transfert à effectuer : il peut en effet s'agir d'un transfert dans une même zone, d'un transfert entre zones, voire d'un transfert entre réseaux. Sans entrer dans le détail, la figure 3.39 montre quelques transferts possibles.

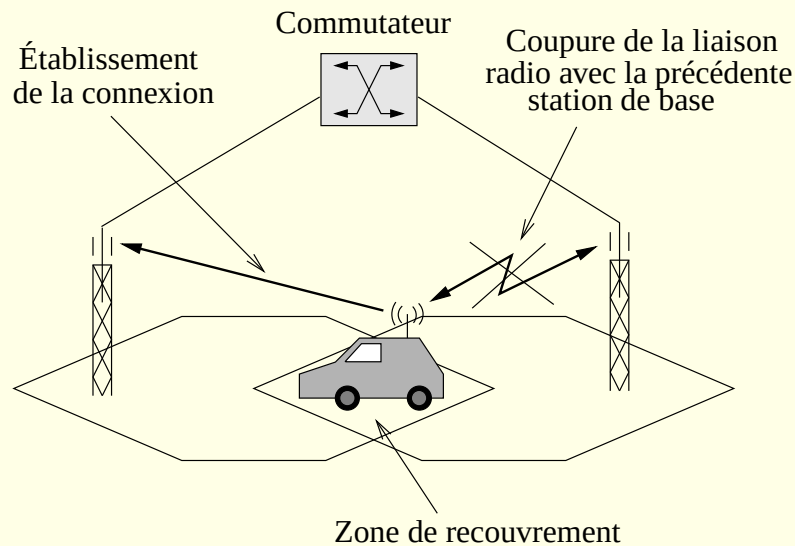


FIG. 3.38 – Le transfert intercellulaire.

Si le débit d'un réseau GSM (de l'ordre de 13 [kb/s]) est nettement plus faible que celui d'un réseau local sans fil, le GSM permet des connexions sur de grandes zones géographiques. À terme, l'usage d'un appareil mobile semblable au GSM pourrait se généraliser pour l'implémentation de transmission de données, et partant dans les applications multimédia. Ainsi, il est déjà possible d'envoyer des courts messages, appelés **SMS** pour **Short Message Service**. Malheureusement la taille des messages est limitée à 140 bytes ⁷ par SMS. Cette limitation est levée par l'utilisation de messages au format **Multimedia Messaging Service (MMS)**. Ce dernier permet l'envoi de messages combinant textes, images, sons et vidéo.

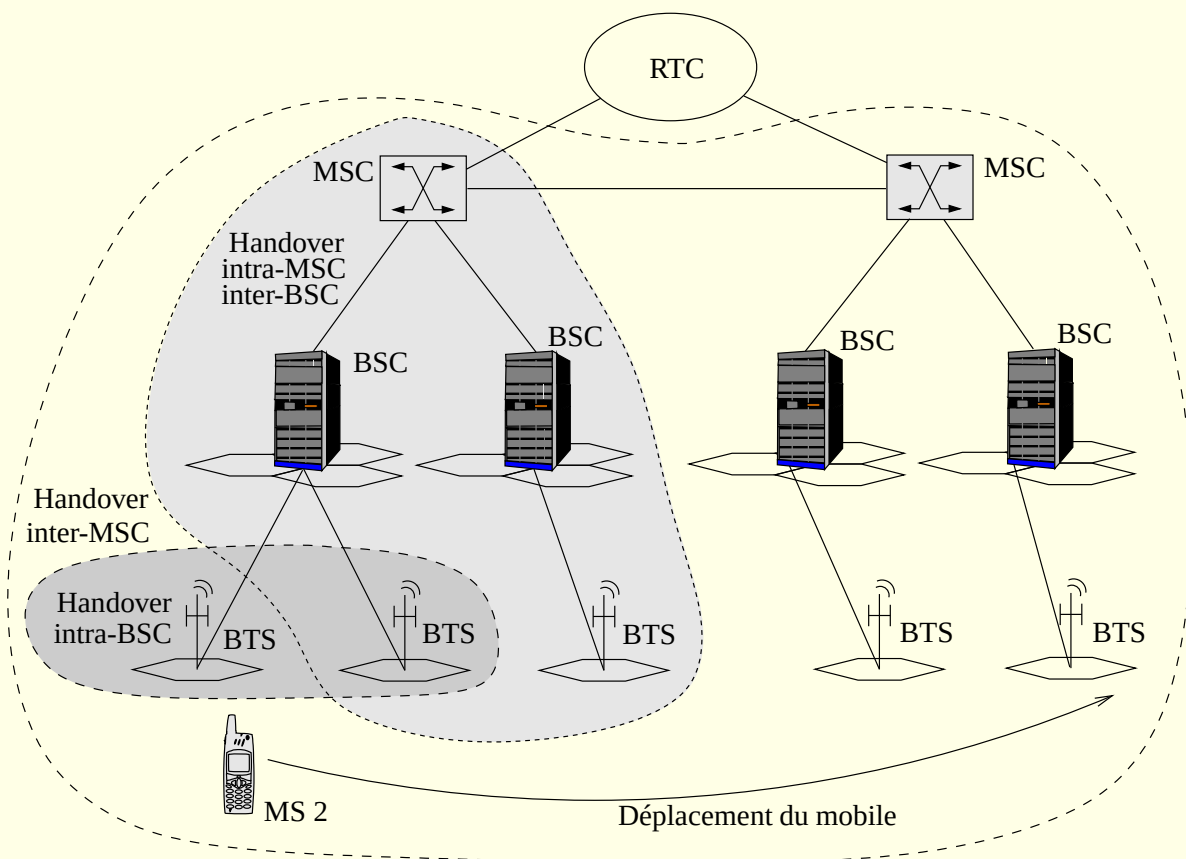
Les opérateurs ont également développé une extension aux réseaux GSM pour faciliter la transmission de données. La technologie choisie est généralement le **GPRS** (General Packet Radio Service), qui permet des transmissions jusqu'à 115 [kb/s] .

Il existe malheureusement plusieurs normes de mobilophonie. Le tableau 3.1 compare les principaux standards de communications pour mobiles.

Les opérateurs belges Proximus et Mobistar ont déployé un réseau dans la bande des 900 [MHz] . KPN a opté pour la seconde bande de fréquences, à savoir la bande des 1800 [MHz] . Proximus et Mobistar lui ont emboîté le pas. Ces réseaux portent également le nom de **réseaux cellulaires** en raison du mécanisme de ré-utilisation des fréquences mis en œuvre. Comme l'illustre la figure simplifiée 3.40, le plan est découpé en zones de même forme. Pour chacune des zones, l'opérateur alloue une série de fréquences inutilisables dans les zones voisines afin d'éviter toute interférence. Toutefois, rien n'empêche d'utiliser à nouveau les fréquences dans des cellules plus éloignées.

La norme UMTS. L'**Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)** est la norme de télé-

⁷Pour être très précis, les 140 bytes correspondent à autant de caractères pour l'envoi d'un SMS habituel. Dans le cas d'un SMS contenant un logo par exemple, la taille du logo est également limitée à 140 bytes mais l'encodage de ce type de SMS diffère sensiblement d'un SMS composé de caractères.



BSC : Base Station Controller
 BTS : Base Transceiver Station
 MS : Mobile Station
 MSC : Mobile Switching Center
 RTC : Réseau téléphonique commuté

FIG. 3.39 – Différents niveaux de handovers.

Système	GSM	DCS-1800	IS-54	IS-95 (DS)
Mode d'accès	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	CDMA/FDMA
Bande de fréquence				
Montée (Mhz)	935-960	1710-1785	869-894	869-894
Descente (Mhz)	890-915	1805-1880	824-849	824-849
	(Europe)	(Europe)	(USA)	(USA)
Espacement des canaux				
Descente (kHz)	200	200	30	1250
Montée (kHz)	200	200	30	1250
Modulation	GMSK	GMSK	$\pi/4$ DQPSK	BPSK/QPSK
Puissance du mobile				
Max./Moyenne	1W/125mW	1W/125mW	600mW/200mW	600mW
Codage de voix	RPE-LTP	RPE-LTP	VSELP	QCELP
Débit voix (kb/s)	13	13	7,95	8 (var.)
Débit binaire canal				
Montée (kb/s)	270,833	270,833	48,6	
Descente (kb/s)	270,833	270,833	48,6	
Trame (ms)	4,615	4,615	40	20

TAB. 3.1 – Comparaison de standards de communication pour mobiles.

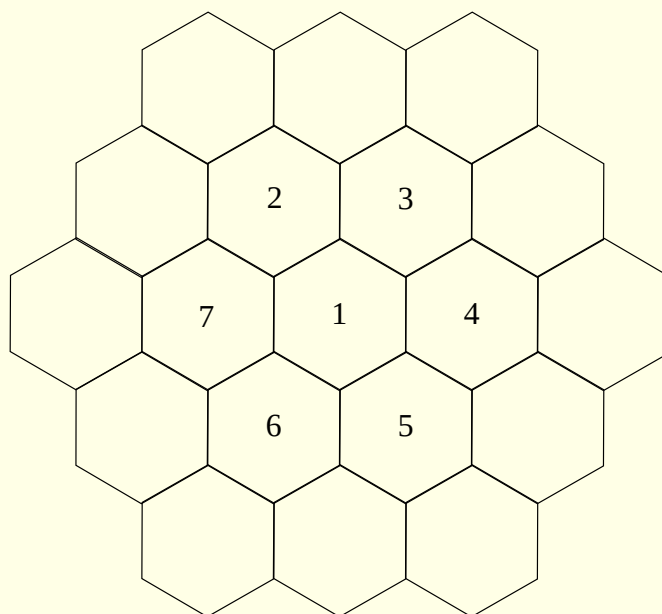


FIG. 3.40 – Principe d'un réseau cellulaire.

phonie mobile de troisième génération sélectionnée pour l'Europe. Contrairement aux normes de mobilophonie de deuxième génération (GSM, DCS1800), taillées sur mesure pour les transmissions vocales, l'UMTS intègre communications vocales et transmissions de données. Il permet le transfert de données jusqu'à 2 [Mb/s] et devrait offrir une couverture mondiale. Malheureusement, il ne présente aucune compatibilité avec les systèmes de deuxième génération.

La boucle locale radio

La boucle locale radio précise un service de transmission entre des utilisateurs de la boucle locale et un opérateur par le biais d'une interface radio. Les boucles locales radio, **Wireless Local Loop (WLL)**, sont des techniques d'accès sans fil qui permettent d'établir des connexions entre les utilisateurs et un opérateur par voie hertzienne. Un tel système est illustré à la figure 3.41.

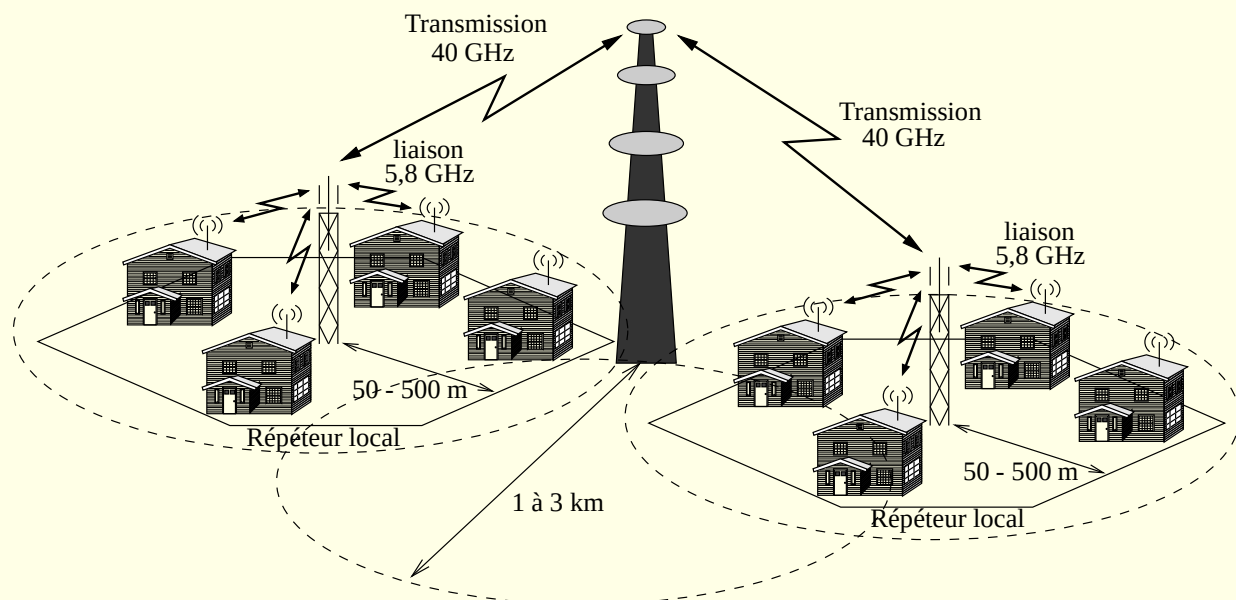


FIG. 3.41 – Système de boucle locale radio (d'après [1]).

Les systèmes WLL disponibles sur le marché sont encore rares, mais il existe quelques prototypes parmi lesquels le **Local Multipoint Distribution Service LMDS**, normalisé pour la transmission de données, et un système normalisé pour la télévision analogique.

3.4 Réseaux de transmission de données

Dans un premier temps, les applications multimédia tournaient localement sur un ordinateur. De nos jours, les sources de données sont le plus souvent distribuées, ce qui signifie que les informations ne sont disponibles qu'au moyen d'un réseau. Or un signal multimédia représente une énorme quantité d'information et il faut donc adapter le contenu au type de réseau utilisé.

La lecture du tableau 3.2 permet de s'en convaincre ; il donne les temps de téléchargement de plusieurs fichiers à différents débits.

Format	Débit	Taille d'un fichier de 5 minutes	Temps de réponse à 14,4 [kb/s]
Vidéo MPEG	1,5 [Mb/s]	56,4 [MByte]	8 [h]
Fichier son Sun.au	64 [kb/s]	2,4 [MByte]	22 [min]
Fichier son GSM	13 [kb/s]	412,5 [kByte]	4 [min]

TAB. 3.2 – Temps de téléchargement d'une application basée sur HTTP à la demande pour des fichiers de 5 minutes.

3.4.1 Le réseau téléphonique pour accéder à Internet

Le réseau téléphonique peut servir à accéder au réseau Internet, tout comme il convient pour la transmission de données entre deux modems fonctionnant dans la bande vocale. Dans le cas d'un accès Internet, la transmission par modem s'achève sur un Point de Présence ou Point of Presence (POP). L'équipement de terminaison est un serveur d'accès ou Network Access Server. Il s'agit d'une batterie de modems mis en cascade par le fournisseur d'accès à Internet. Cette architecture est illustrée à la figure 3.42.

Technologies de transmission à haut débit : ADSL

Une technologie développée vers le milieu des années 1990, appelée Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), permet d'augmenter le débit sur une ligne téléphonique. Avec cette technologie, il est possible d'obtenir un débit de l'ordre de 2 [Mb/s] du central téléphonique jusqu'à l'abonné. Le débit allant de l'abonné vers le réseau est limité à quelques dizaines ou centaines de [kb/s].

Les deux modes de connexion possibles sont illustrés à la figure 3.43.

Variantes de l'ADSL

Les développements de l'ADSL ont amené toute une série de variantes ; celles-ci sont reprises dans le tableau 3.3. On parle parfois de la famille des normes xDSL.

3.4.2 Réseaux locaux ou LANs (Local Area Network)

Les réseaux locaux, qu'on appelle généralement LAN (Local Area Networks), sont des réseaux privés dont la taille ne dépasse pas quelques kilomètres. On les utilise principalement pour relier des ordinateurs personnels ou des stations de travail aux serveurs de l'entreprise avec lesquels ils échangent des informations. L'IEEE⁸ a produit plusieurs normes pour les réseaux

⁸<http://www.ieee.org>

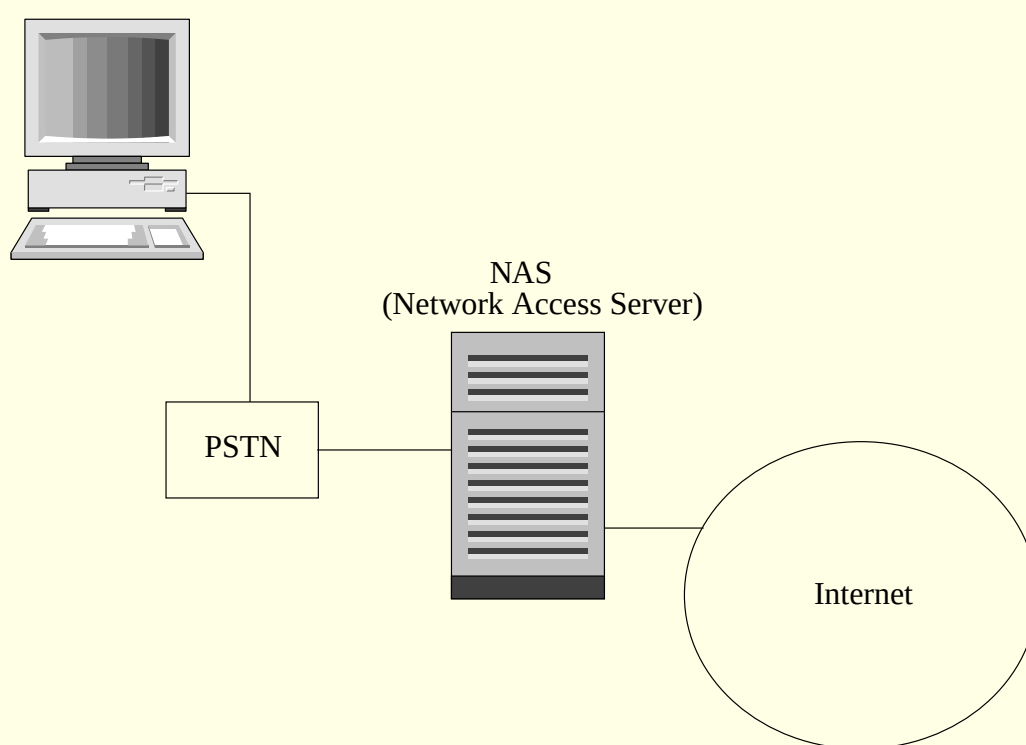


FIG. 3.42 – Architecture Internet.

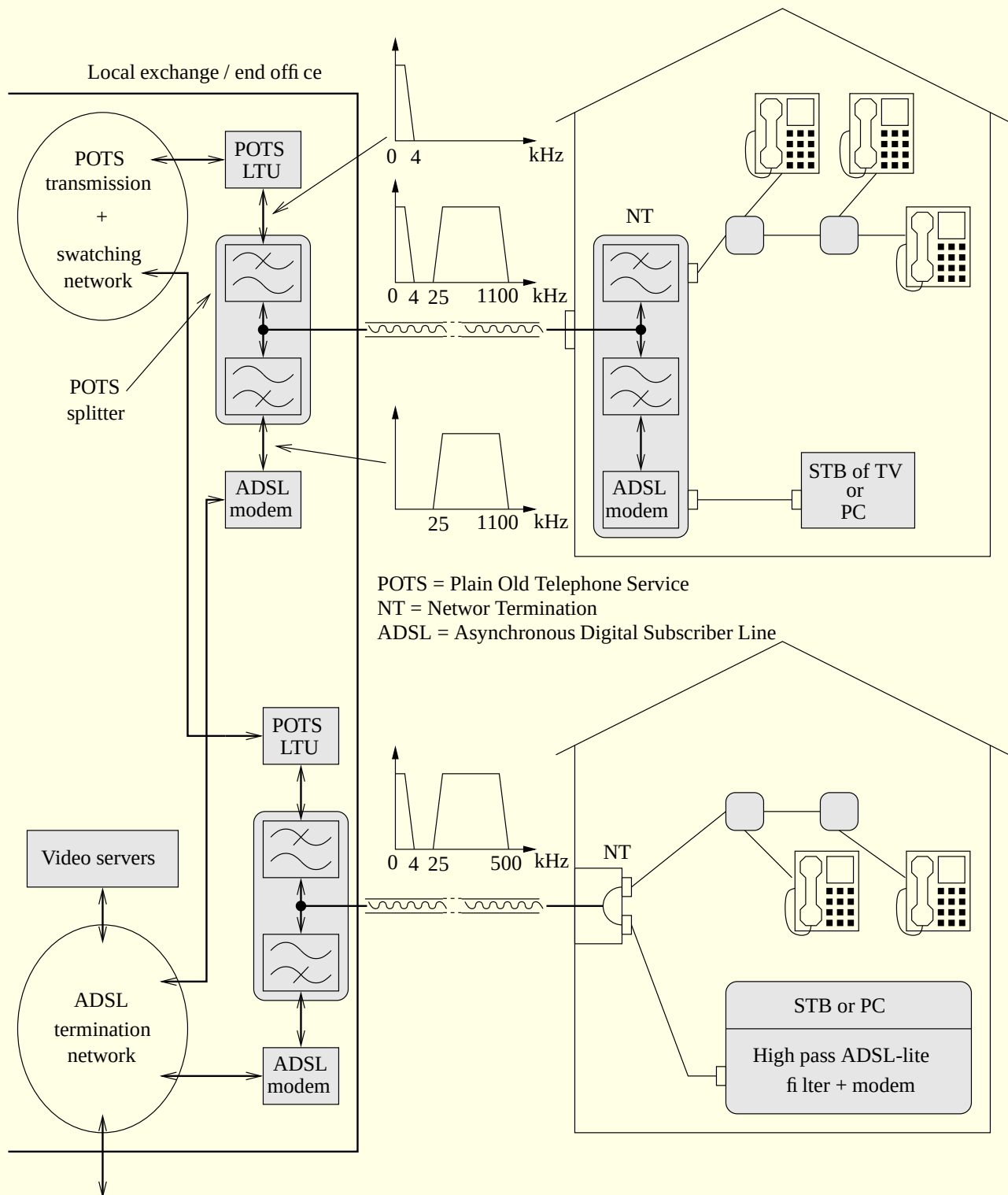


FIG. 3.43 – Deux modes de connexion sont possibles du côté de l'abonné (d'après [5, page 759]).

Nom	Signification	Débit	Mode de fonctionnement	Applications
HDSL	High Data Rate Digital subscriber Line	2 [Mb/s]	Duplex sur 2 paires	Service E1 : liaisons intercentraux, accès WAN/LAN, accès serveur, etc.
SDSL	Symetric Digital Subscriber Line	128 [kb/s] à 2 [Mb/s]	Duplex	Extension HDSL pour une seule paire torsadée
ADSL	Asymetric Digital Subscriber Line	1,5 à 9 [Mb/s] vers l'abonné, 16 à 640 [kb/s] vers le central	Lien asymétrique	Accès Internet, vidéo à la demande, accès LAN à distance, multimédia interactif, etc.
VDSL (ou BDSL)	Very High Data Rate Digital Subscriber Line (ou Broad-band)	13 à 52 [Mb/s] vers l'abonné, 1,5 à 2,3 [Mb/s] vers le central	Lien asymétrique	cf. ADSL plus télévision haute définition

TAB. 3.3 – Variantes de techniques de modulation pour paires de cuivre.

LANs. Ces normes, bien connues sous l'appellation IEEE 802, incluent les spécifications des protocoles CSMA/CD (détection de collisions), Token bus (bus à jeton) et Token Ring (anneau à jeton). Les réseaux locaux se distinguent par trois caractéristiques : leur taille, leur technologie et leur topologie.

On peut avoir diverses topologies. La figure 3.44 en illustre deux. Sur un réseau de type bus, il n'y a, à chaque instant, qu'une seule machine autorisée à émettre. Il est donc nécessaire de prévoir un mécanisme d'arbitrage qui résolve les conflits entre deux machines qui désirent émettre simultanément.

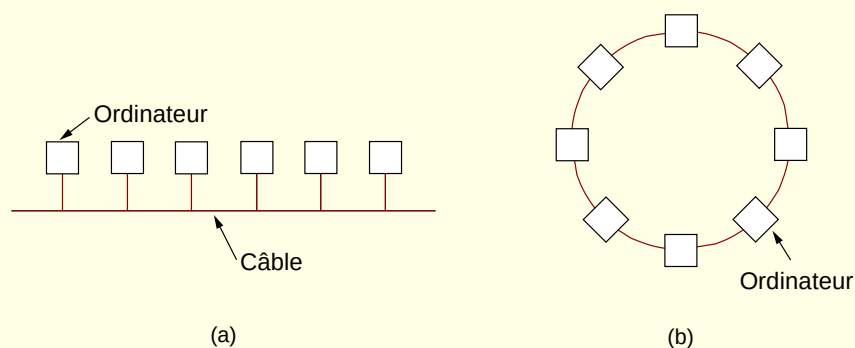


FIG. 3.44 – Deux topologies : (a) topologie en bus, (b) topologie en anneau.

Ethernet

Un LAN, comme par exemple le standard Ethernet, interconnecte des ordinateurs à la manière d'un réseau de télédistribution : les applications tournant sur les ordinateurs partagent le même câble physique à la différence près que le réseau est complètement bidirectionnel. Le débit théorique maximum d'un réseau Ethernet conventionnel est de $10 [Mb/s]$ mais le débit effectif est plutôt de l'ordre de $2 \text{ à } 3 [Mb/s]$. Quand une station décide de transmettre, elle vérifie l'état du câble. Si le câble est déjà utilisé, elle attend qu'il devienne disponible. En revanche, si le câble n'est pas utilisé, elle transmet immédiatement. Si plusieurs stations émettent simultanément sur le câble, qui semblait inutilisé, il y a collision. Dans un réseau Ethernet, les collisions sont détectées par un mécanisme illustré à la figure 3.45.

La croissance importante des réseaux d'entreprise a conduit à des architectures de réseau de plus en plus complexes. Ces architectures incluent des éléments qui agissent à des niveaux différents du modèle OSI. Un commutateur (switch) et un pont (bridge) trient les messages sur base des informations véhiculées au niveau de la couche liaison. Un routeur fait de même mais sur base d'informations propres à la couche réseau. Un exemple de réseau est fourni à la figure 3.46.

Token ring

Dans un réseau à jeton (Token ring), les stations sont organisées selon un anneau logique, chacune d'elles connaissant l'adresse de ses voisines. Un jeton circule sur l'anneau avec pour

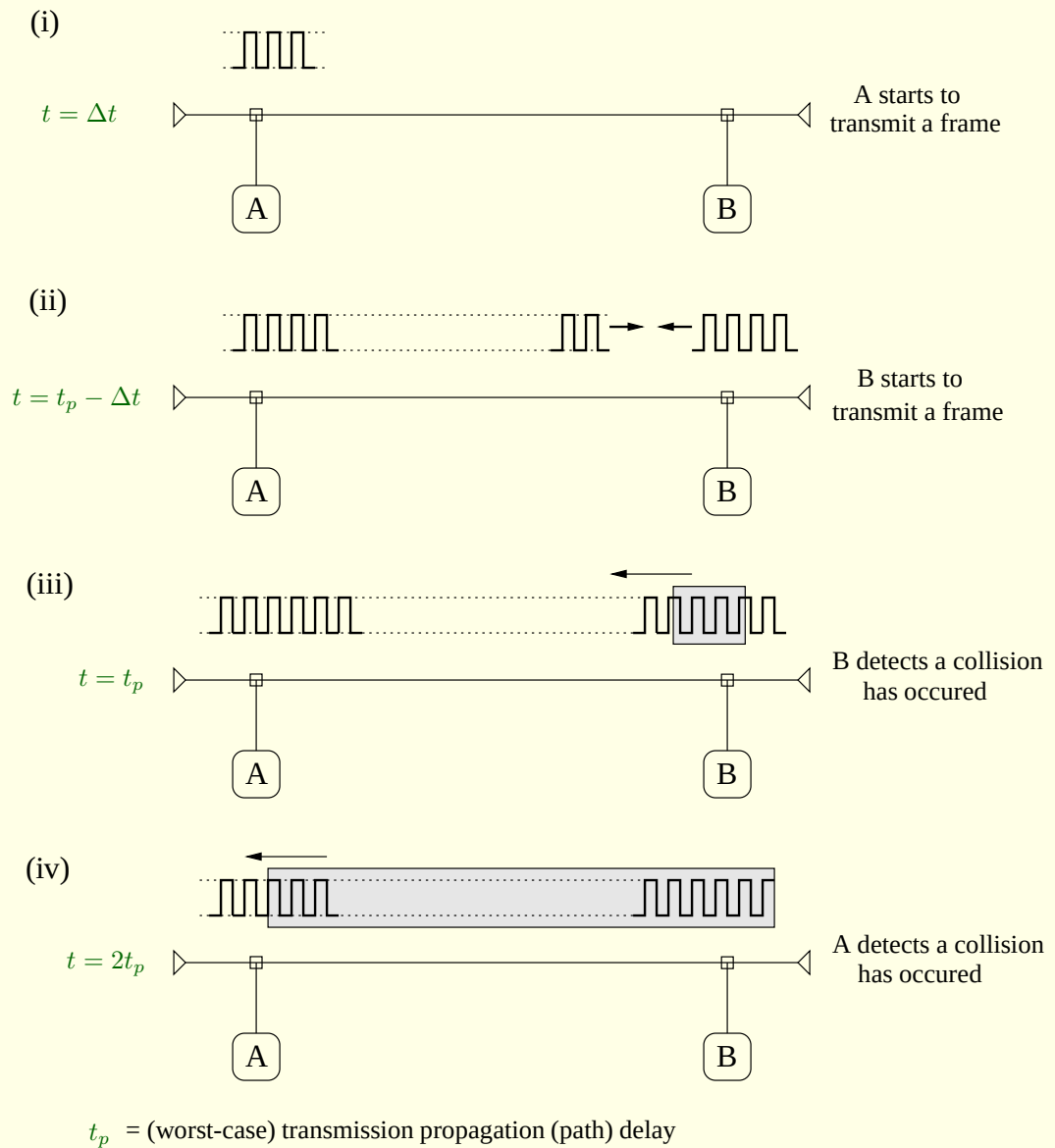


FIG. 3.45 – Détection de collision dans un système de topologie bus (d'après [5, page 456]).

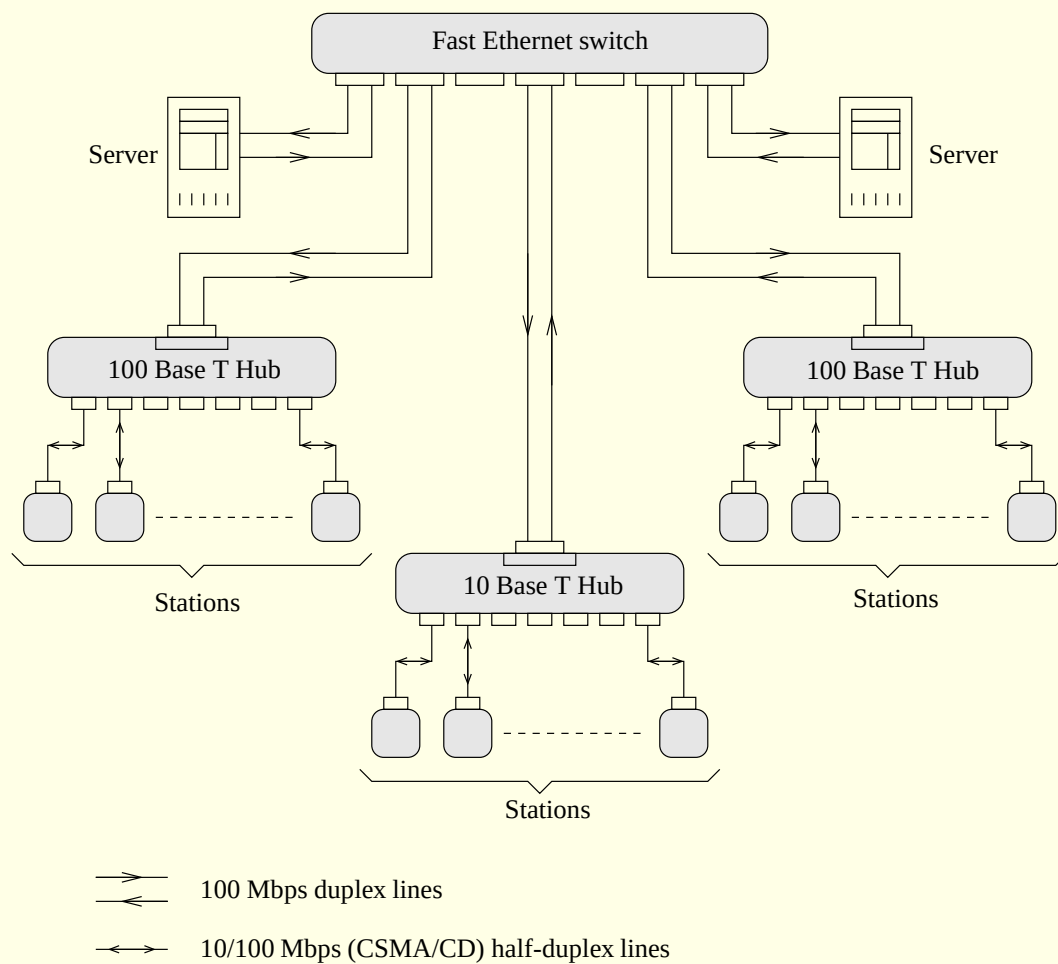


FIG. 3.46 – Exemple de configuration réseau comprenant des commutateurs et des hubs (d'après [5, page 519]).

règle fondamentale que celle la station propriétaire du jeton a le droit d'émettre un message. Comme à chaque instant, une seule station est propriétaire du jeton, il ne peut y avoir de collisions entre messages du réseau.

Les réseaux privés sans fil

Les réseaux locaux sans fil connaissent actuellement d'importants développements du fait de la flexibilité qu'ils offrent. Aux États-Unis, deux groupe de travail de l'IEEE s'occupent de la normalisation : l'IEEE 802.11 et l'IEEE 802.15. En Europe, c'est le groupe HiperLAN (High Performance Local Area Network) qui s'en charge.

La technologie Bluetooth. C'est le Bluetooth Special Interest Group, un groupe composé de nombreux industriels, qui a défini les spécifications **Bluetooth**. Il s'agit d'une technologie de transmission sans fil peu onéreuse. Les fréquences utilisées sont comprises entre 2400 et 2483,5 [MHz], bande dont l'utilisation ne requiert pas de licence.

Plusieurs schémas de connexion ont été définis. Le premier d'entre eux correspond à un réseau unique, appelé piconet, qui peut prendre en charge jusqu'à 8 terminaux, avec un maître et 8 terminaux au statut d'esclave. C'est le terminal maître qui gère les communications. Un autre schéma de connexion consiste à interconnecter des piconets pour former un réseau plus important. La figure 3.48 montre trois piconets interconnectés.

3.4.3 Conclusions

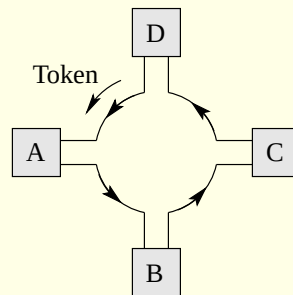
Dans le tableau 3.4, nous classifions les réseaux.

Type de réseau	Transmission	Bande passante ou débit	Bidirectionnel
Réseau de téléphonie	Analogique	4 [kHz]	Oui
Réseau de télédistribution	Analogique	300 [MHz]	Non
RNIS	Numérique	64 [kb/s]	Oui
ADSL	Numérique	2 [Mb/s] vers l'abonné 100 [kb/s] depuis l'abonné	Oui
LAN (Ethernet)	Numérique	2 – 3 [Mb/s]	Oui
GSM	Numérique	13 [kb/s]	Oui

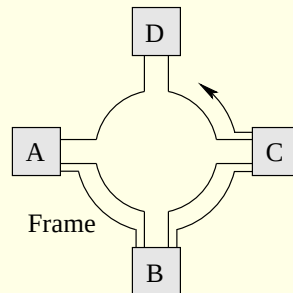
TAB. 3.4 – Comparatif succinct des réseaux.

À la lecture de ce tableau, il n'est que plus évident que les réseaux à forte capacité sont moins interactifs ou plus localisés. Quant aux réseaux complètement bidirectionnels, ils sont le plus souvent limités par leur débit. Voilà pour l'essentiel.

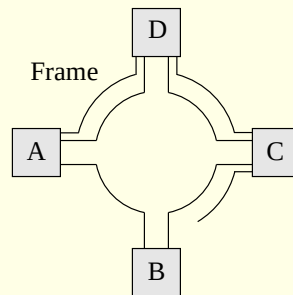
Assume station A wishes to send a frame to station C



Station A waits for receipt of control token from its upstream neighbor

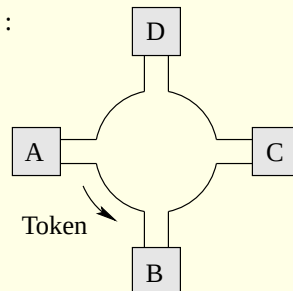


Station A transmits frame onto ring ; station C copies frame addressed to it ; frame continues around ring



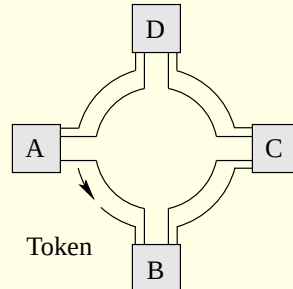
Station A awaits receipt of start of frame but does not repeat the frame thereby removing it

Either :



When last bit of frame has been received station A generates and passes on the token ; it then precesses the response bits at the tail of the frame

Or :



When last bit of frame has been transmitted by A it passes on the token - early release

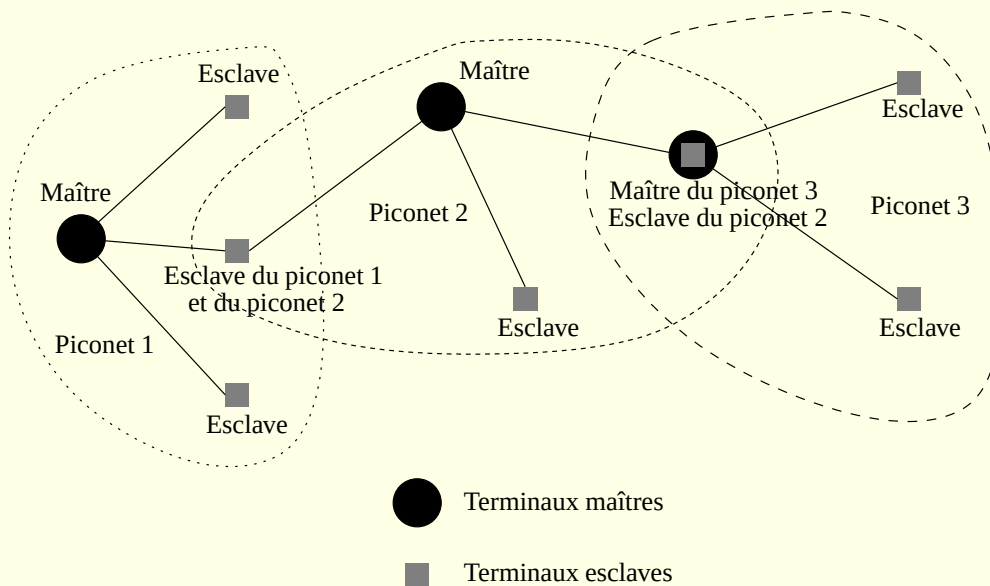


FIG. 3.48 – Schéma de connexion de terminaux Bluetooth (d'après [1]).

Le futur ?

Une analyse plus fine des signaux multimédia montre que les contraintes associées aux signaux dépendent fortement de leur nature. Ainsi, un signal de parole doit parvenir rapidement au destinataire mais il peut être légèrement déformé. À l'inverse, il est nécessaire de garantir l'intégrité d'un message textuel ; le délai a moins d'importance. Le nouveau protocole **ATM** (Asynchronous Transfer Mode) a été imaginé pour garantir une qualité de service dépendant du signal transmis.

À propos d'Internet

Le réseau Internet n'est pas à proprement parler un réseau : il s'agit plutôt d'un ensemble de réseaux interconnectés. Cette hétérogénéité d'infrastructure se traduit par une qualité de service médiocre. De fait, étant impossible de savoir à l'avance comment la connexion vers un autre utilisateur se fera, le tronçon le plus lent fixera la limitation du débit de bout en bout. De plus, comme les ressources sont partagées dans Internet, un tronçon fortement sollicité n'offrira qu'un faible débit à ses utilisateurs.

Question 26 Est-il vrai qu'un utilisateur ayant un accès à Internet à 2 [Mb/s] peut toujours de rapatrier l'information plus vite qu'avec un accès 64 [kb/s] ?

Réponse

Non. Le message est clair : avant de se raccorder à Internet par l'un ou l'autre type de réseau, il faut d'abord savoir quel débit amont pourra être atteint. Ce n'est qu'en connaissant les performances en amont qu'on pourra choisir le type d'accès. ■

3.5 Services réseau

La figure 3.49 indique une partie des protocoles associés à la suite TCP/IP. Bien que les fonctionnalités du modèle OSI soient quasi toutes couvertes par la suite TCP/IP, il n'y a pas conceptuellement un protocole par couche.

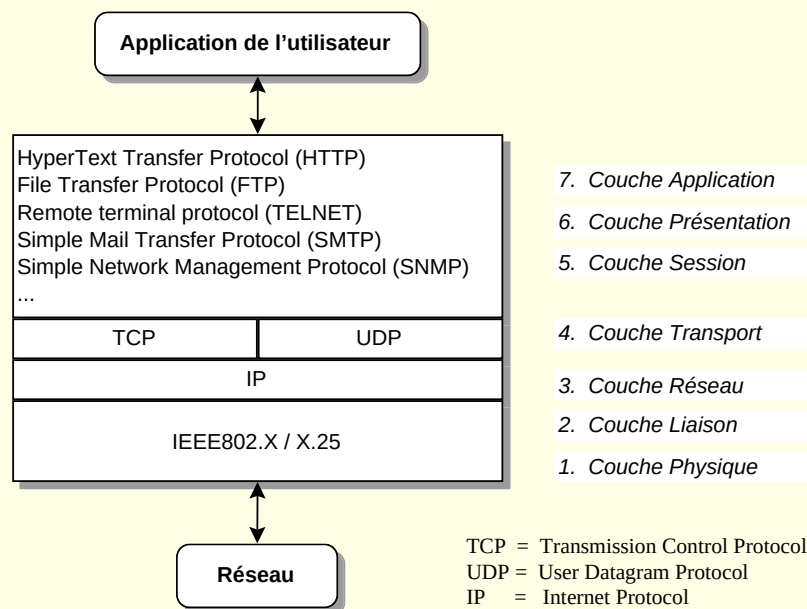


FIG. 3.49 – Suite de protocoles TCP/IP.

Il existe une différence fondamentale entre les protocoles **TCP** (Transmission Control Protocol) et **UDP** (User Datagram Protocol) ; le protocole TCP requiert un accusé de réception pour tout paquet envoyé, contrairement à UDP. Dès lors, TCP ne conviendra pas pour des communications en temps réel (voir tableau 3.5 pour un résumé des principaux protocoles Internet).

3.5.1 Le Web et le protocole HTTP

Le protocole **HTTP** (HyperText Transfer Protocol) est celui utilisé pour l'échange de document **HTML**. La figure 3.50 montre comment envoyer une requête HTTP en dehors d'un environnement graphique.

Le WAP et l'i-mode : deux variantes pour l'accès à Internet dans des réseaux mobiles

Tels quels le protocole **HTTP** et le langage **HTML** sont inadéquats pour les réseaux de transmission à faible débit car ils ne permettent pas de tenir compte de la taille de la fenêtre du récep-

A screenshot of a terminal window titled "Terminal" with a menu bar (File, Edit, Settings, Help). The terminal shows a telnet session to www.ulg.ac.be on port 80. The user [mvd@com010 telecom] enters the command. The terminal displays the connection attempt, the IP address 139.165.32.13, and the connection to aix1.segi.ulg.ac.be. It then shows the escape character '^]' and the start of an HTTP GET request. The response is an HTML document with various meta tags and links, including keywords, description, rating, and a robots directive.

```
[mvd@com010 telecom]$ telnet www.ulg.ac.be 80
Trying 139.165.32.13...
Connected to aix1.segi.ulg.ac.be.
Escape character is '^]'.
GET /
<DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.0 Frameset//EN"
"http://www.w3.org/TR/REC-html40/frameset.dtd">
<HTML>
<HEAD>

<LINK REV=made href="mailto:cellule.internet@ulg.ac.be">
<META NAME="keywords" CONTENT="universit&eacute;, li&egrave;ge, enseignement, re
cherche, &eacute;tudiants, ulg, ULg">
<META NAME="description" CONTENT="Le site Web de l'Universit&eacute; de Li&egrav
e;ge propose toutes les informations souhaitables concernant l'Institution.">
<META NAME="rating" CONTENT="General">
<META NAME="VW96.objecttype" CONTENT="Homepage">
<LINK REL=SCHEMA,VW96 HREF="http://vancouver-webpages.com/VWbot/VW96-schema.html
">
<META NAME="ROBOTS" CONTENT="ALL">
<META NAME="DC.title" CONTENT="Universit&eacute; de Li&egrave;ge">
<META NAME="DC.creator" CONTENT="Cellule Graphisme ULg">
<META NAME="DC.description" CONTENT="Le site Web de l'Universit&eacute; de Li&eg
rave;ge propose toutes les informations souhaitables concernant l'Institution."> /
```

FIG. 3.50 – Une requête HTTP envoyée à partir d'un terminal.

Messagerie	
SMTP	/TCP
POP3 - IMAP4	/TCP
Transfert de fichiers	
FTP	/TCP
HTTP	/TCP
Gestion	
SNMP	/TCP
Contrôle à distance	
Telnet	/TCP
Temps réel	
RTP	/UDP

TAB. 3.5 – Classification des principaux protocoles Internet.

teur ni la compression des données pour économiser les ressources. Des industriels regroupés au sein du **WAP FORUM**⁹ ont défini une pile de protocoles adaptés à la transmission par **GSM**. Cette pile de protocoles forme le **WAP** (Wireless Application Protocol). Le WAP définit également un langage de balisage spécifique appelé **WML** (Wireless Markup Language).

À côté du WAP, il faut également parler de l'**i-mode**, système d'accès à Internet mobile, défini par NTT DoCoMo. L'i-mode fonctionne sous le mode d'une transmission par paquet et non pas sous la forme d'un circuit. Il s'appuie sur le langage de balisage **CHTML**, qui est un sous-ensemble du langage **HTML** enrichi d'une série de caractères supplémentaires.

3.5.2 Messagerie électronique

Nous n'entrerons pas dans le détail de tous les protocoles, ce qui nous mènerait trop loin. Tout juste le principe de l'un d'entre eux, le protocole **SMTP** qui permet d'envoyer du courrier électronique, est-il illustré à la figure 3.51. Nous y avons reproduit les messages échangés entre un client SMTP et le serveur. Le premier échange établit la connexion TCP/IP. L'échange suivant identifie les deux acteurs. Vient ensuite la partie du dialogue propre à l'envoi du mail.

L'**ESMTP** (Extended Simple Mail Transfer Protocol) est une version étendue du protocole SMTP. Quant au téléchargement des mails, il s'effectue au moyen des protocoles **POP3** (Post Office Protocol) ou **IMAP4** (Internet Message Access Protocol). Ces protocoles permettent de consulter les courriers, tout en maintenant une copie sur le serveur si souhaité.

Le formatage du contenu des courriers est effectué au moyen des spécifications **MIME** (Multi-

⁹<http://www.wapforum.org>

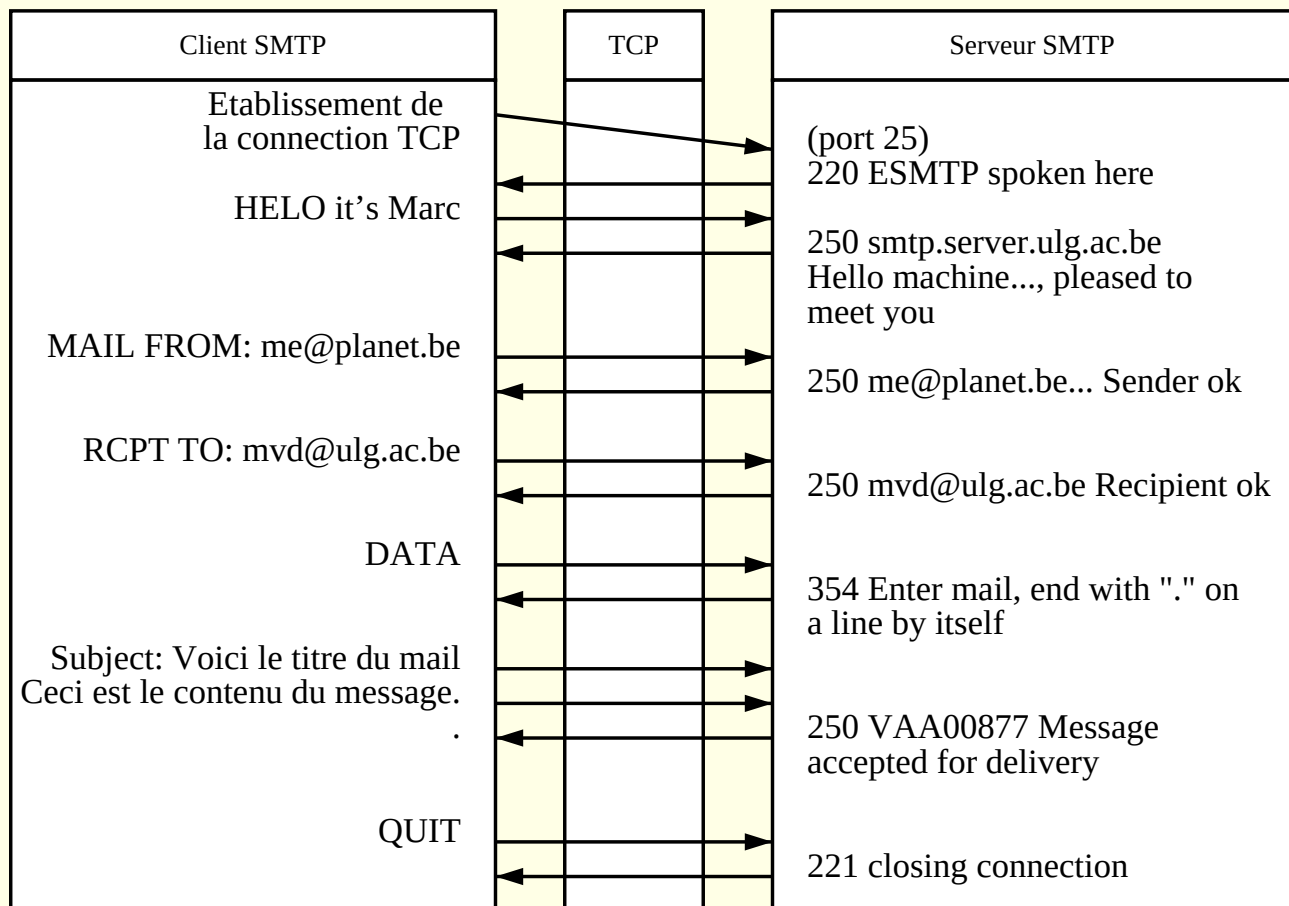


FIG. 3.51 – Messages échangés entre un client et un serveur de mails (suivant le protocole SMTP).

purpose Internet Mail Extensions). Au départ, seuls les messages ou fichiers définis en **ASCII** à 7 bits étaient correctement interprétés à la réception, excluant de ce fait l'interprétation correcte de certains caractères accentués ou de toutes les informations contenues dans une image. Pour y remédier, on a introduit la spécification MIME qui définit des types de formatage applicables aux données. Bon nombre de types sont pré-définis comme les formats d'images **GIF** ou **JPEG**, ou de documents tels le **PDF**. L'utilisation des types MIME n'est pas limitée au seul courrier électronique puisqu'on y fait appel pour l'envoi de pages Web suivant le protocole **HTTP**.

3.5.3 Transfert de fichiers

Quand au protocole **FTP** (File Transfer Protocol), il sert à transmettre des fichiers. Dans une implémentation par défaut et contrairement à **HTTP**, FTP garantit l'intégrité des fichiers transmis, ce qui est particulièrement important pour la transmission de programmes informatiques. En toute rigueur, la version **1.1** du protocole HTTP permet à un serveur de fournir un résumé **MD5** (au moyen de l'en-tête **Content - MD5**) à des fins de vérification d'intégrité. Encore faut-il que le serveur HTTP fournisse ce champ dont l'envoi est optionnel.

3.5.4 Téléphonie sur IP

Pour la téléphonie sur IP (**VoIP** – Voice over IP), il faut distinguer deux types d'information : les informations de service et les messages vocaux. Les informations de service sont envoyées par TCP, puisqu'il est important qu'elles arrivent bien à destination. Pour les messages vocaux, une retransmission est exclue en raison du temps prohibitif d'une retransmission. On utilise plutôt le protocole **RTP** (Real-Time Transport Protocol) qui repose sur **UDP**.

La transmission en temps réel est fortement influencée par les performances que l'on peut atteindre. Les mesures de performance utilisées sont les suivantes :

- **Débit utile** : débit associé au message de l'utilisateur. On parle de **goodput** pour caractériser le débit net.
- **Délai** : c'est le temps qu'il faut pour que l'information parvienne au destinataire. Le délai est la somme de 3 temps :
 - délai = temps de préparation du paquet + temps de transmission + temps d'analyse au récepteur
- **Taux d'erreur sur une ligne**. Plus ce taux est élevé et plus il y a de paquets incorrects, de retransmission, etc.

La figure **3.52** fournit les résultats d'une analyse de performance sommaire effectuée au moyen de l'utilitaire ping. Les temps mentionnés correspondent au **RTT** (Round-Trip Time) ; il s'agit du temps nécessaire pour effectuer un aller et retour.

Deux remarques s'imposent :

- le temps de transmission fluctue fortement. C'est un facteur défavorable à la transmission car la fluctuation entraîne une gestion plus délicate des mémoires-tampons.
- le temps de transmission moyen est largement supérieur à **50 [ms]**, c'est-à-dire au temps de transmission maximum autorisé pour la téléphonie analogique classique.

```
PING www.next.com (17.254.3.217)
64 bytes from 17.254.3.217: ttl=234 time=189.6 ms
64 bytes from 17.254.3.217: ttl=234 time=197.6 ms
64 bytes from 17.254.3.217: ttl=234 time=270.3 ms

--- www.next.com ping statistics ---
3 packets transmitted,
3 packets received,
0% packet loss
round-trip min/avg/max = 189.6/219.1/270.3 ms
```

FIG. 3.52 – Résultats d'un sondage de performances.

Malgré ces inconvénients, la téléphonie sur Internet reste possible. En fait, on peut l'utiliser sur un réseau intranet, réseau qui est plus simple, d'où un temps de transmission fortement réduit, et qui est sous contrôle. Sur Internet, il faudra attendre la généralisation de l'implémentation de qualité de service. On peut s'en convaincre à partir de la figure 3.53 qui montre la série de routeurs de passage pour une connexion à un serveur situé en Californie.

3.5.5 Télévision interactive

Historique

La télévision a démarré sous la forme d'un signal monochrome transmis par ondes radio. Ce signal occupe typiquement une bande passante de 5 à 8 [MHz]. Le mode de diffusion s'est ensuite diversifié puisque les télédiffuseurs ont installé une structure câblée et on a vu apparaître des satellites de diffusion. La notion d'interactivité est absente de ce mode de diffusion.

Au début des années 1980, la télévision amorce un virage vers le numérique puisqu'on voit apparaître une première norme de compression vidéo –la norme H261– pour la vidéoconférence. Vient ensuite la norme MPEG-1 qui est destinée à permettre le stockage d'une séquence vidéo sur un CD-ROM avec une vitesse de transfert limitée à 1,5 [Mb/s]. Les initiatives suivantes en termes de compression visent d'une part à offrir des qualité de télévision supérieures et à permettre le transfert d'images par des réseaux à faible capacité ; elles conduiront aux normes MPEG-2 et MPEG-4 respectivement. Étant donné l'état de l'art actuel, on peut considérer aujourd'hui que la compression est un problème réglé.

Typologie de la télévision interactive

Pour différencier les différentes offres de télévision interactive, nous proposons des critères appartenant aux deux familles suivantes :

- le type de service,
- la mise en œuvre.

Hostname	www.apple.com						1.00	➔	Pause	Restart	Quit
Hostname	Loss	Rcv	Snt	Best	Avg	Worst					
213-193-176-1.adsl.easynet.be	0%	6	6	19	25	32					
mar-goplus.adsl0.access.be.easynet.net	0%	6	6	20	40	108					
fa0-1-0.core1.router.be.easynet.net	0%	6	6	20	27	43					
fa0-0-0.bbcore0.bru.router.easynet.net	0%	6	6	18	23	28					
bbcore1.tclon.router.easynet.net	0%	5	5	27	34	44					
bbtransit0.60hud.router.easynet.net	0%	5	5	92	101	110					
if-10-0-0.bb6.NewYork.Teleglobe.net	0%	5	5	96	100	102					
if-1-0.bb8.NewYork.Teleglobe.net	0%	5	5	97	101	104					
ix-8-0-1.bb8.NewYork.Teleglobe.net	0%	5	5	99	107	120					
0.at-6-1-0.XL1.NYC9.ALTER.NET	20%	4	5	96	106	113					
0.so-7-0-0.XR1.NYC9.ALTER.NET	0%	5	5	98	116	150					
0.so-4-0-0.TR1.NYC9.ALTER.NET	0%	5	5	100	106	123					
125.at-5-1-0.TR3.SCL1.ALTER.NET	0%	5	5	185	202	220					
399.ATM7-0.XR1.SFO4.ALTER.NET	0%	5	5	192	202	210					
191.ATM7-0.GW8.SJC2.ALTER.NET	0%	5	5	190	208	227					
???	100%	0	5	0	0	0					
???	100%	0	5	0	0	0					
???	100%	0	5	0	0	0					
www.apple.com	0%	5	5	186	206	220					

FIG. 3.53 – Sondage des routeurs situés sur le passage d’une communication Internet (résultats obtenus avec l’utilitaire traceroute).

Type de service. Le premier critère de différenciation de service est la qualité du signal de télévision. Le tableau 3.6 reprend les ordres de grandeur typiques pour les débits des signaux numériques équivalents à des signaux analogiques.

Qualité du signal analogique	Débit associé au signal numérique
HDTV	50 [Mb/s]
PAL	5 [Mb/s]
VHS	1, 5 [Mb/s]
Vidéotéléphonie	40 à 384 [kb/s]

TAB. 3.6 – Qualité des signaux et débit du signal numérique correspondant.

D’une manière générale, les faibles débits sont alloués à des communications totalement bidirectionnelles et qui s’effectuent en temps réel.

Le second critère de différenciation de service est la nature de l’interactivité. L’interactivité peut être locale ou de réseau. L’interactivité locale est une interactivité qui reste proche de l’utilisateur. Lorsqu’il y a interactivité de réseau, un signal est renvoyé vers l’expéditeur par le réseau qui achemine le signal de télévision ou par un autre réseau servant de canal interactif. L’interactivité peut aussi s’obtenir en temps réel ou en temps différé. Par exemple, pour obtenir l’impression de temps réel lors d’une communication vocale, il faut impérativement que le délai n’excède pas 50 [ms].

Mise en œuvre. La notion d’interactivité implique la présence d’un canal de retour. Les signaux d’interaction ne nécessitent pas de débits importants et le canal qui véhicule est généralement d’un très faible débit par rapport à celui qui transmet le signal de télévision numérique. Hormis le cas de la vidéotéléphonie, la télévision interactive est un service fondamentalement asymétrique.

Comme la voie descendante, c’est-à-dire celle qui va vers le spectateur, véhicule un haut débit, c’est principalement les réseaux à haut débit qui servent pour la télévision. La diffusion s’effectue classiquement par les réseaux de télédistribution, par satellite ou par ondes radio. La question de la transmission par Internet est plus délicate car les éléments du réseau Internet s’accommodent généralement mal des hauts débits, à fournir en temps réel. La transmission par ADSL est une solution possible, encore faut-il que la source soit située à proximité de l’abonné. Une alternative consiste à utiliser l’infrastructure de télédistribution pour intégrer signaux de télévision et transmission de données Internet ; on parle de WebTV. Deux solutions technologiques sont possibles¹⁰ : (1) les fenêtres de navigation sont affichées en sur-impression sur l’écran de télévision, (2) le signal de télévision est lui-même “joué” à l’intérieur d’une fenêtre de navigation (c’est un exemple de streaming video).

Enfin, concernant les modes de diffusion, on distingue :

- la distribution (ou **broadcast**). Le signal est envoyé vers tout le monde.

¹⁰Notons qu’il est difficile de faire la distinction entre ces deux solutions technologiques lorsque l’intégration est de bonne qualité.

- la distribution limitée (ou **multicast**). Seuls les membres d'une communauté reçoivent le signal.
- la distribution à la demande (ou **unicast**). Le signal parvient à un seul utilisateur, à la demande de celui-ci.

La figure 3.54 reprend l'ensemble de la terminologie de diffusion.

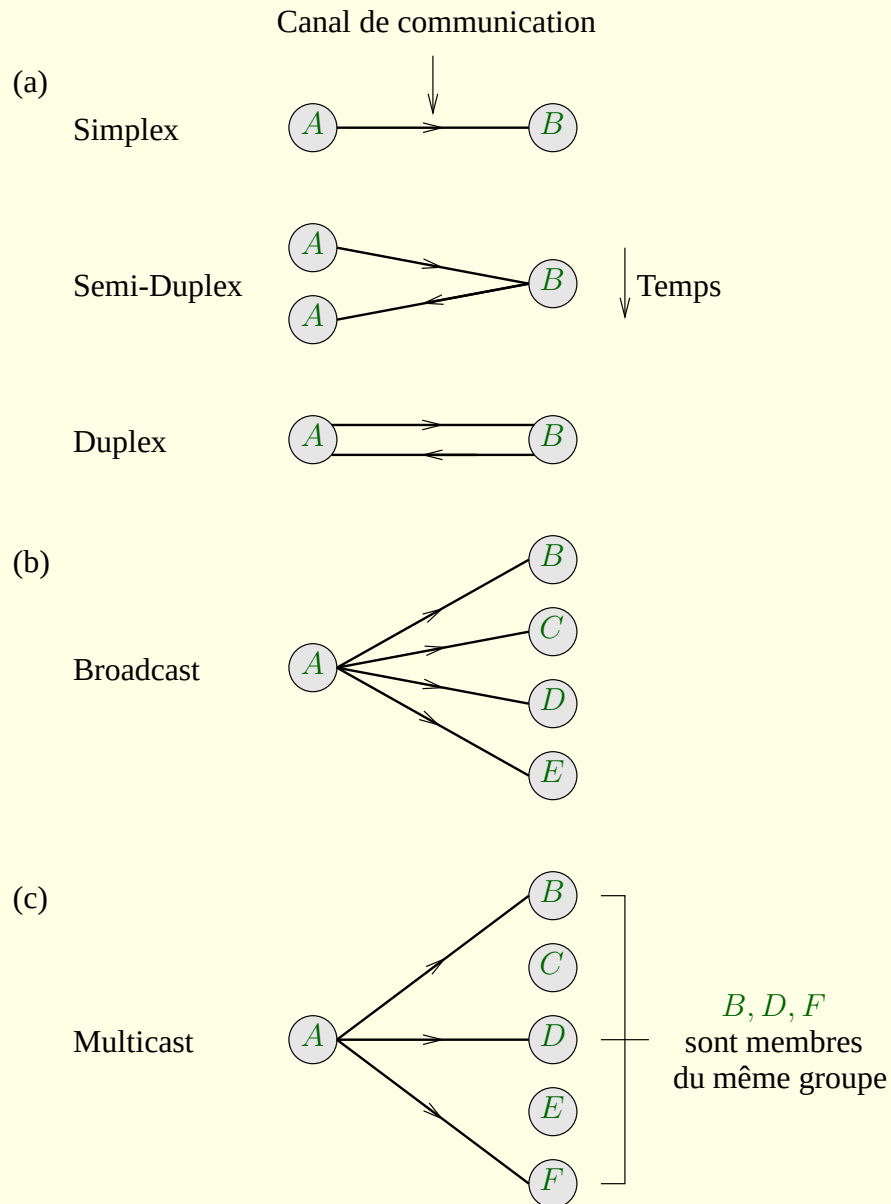


FIG. 3.54 – Les différents modes de communication.

Protocoles de transmission et serveurs

Le dialogue client-serveur tel qu'on le retrouve dans la majorité des applications Internet (cf. figure 3.55) ne convient guère pour les transmissions en temps réel. Soit à utiliser le proto-

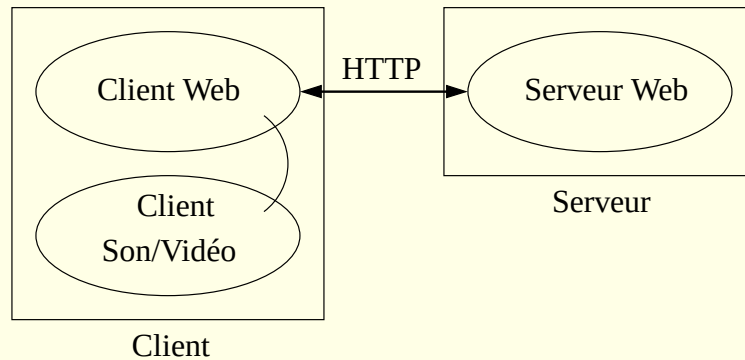


FIG. 3.55 – Dialogue Client-Serveur.

cole HTTP, toute information transmise générerait un accusé de réception. Ce surplus de trafic est indésirable d'autant plus que ce mode de fonctionnement amène des délais de transmission inacceptables.

Le procédé utilisé pour la transmission de signaux interactifs en temps réel est celui de la figure 3.56. Une première liaison, plus ou moins fiable, gère la session et les conditions du transfert. Une seconde connexion fournit le flot de bits avec un délai aussi faible que possible. Un message perdu lors de la transmission de ce flot n'est jamais réémis.

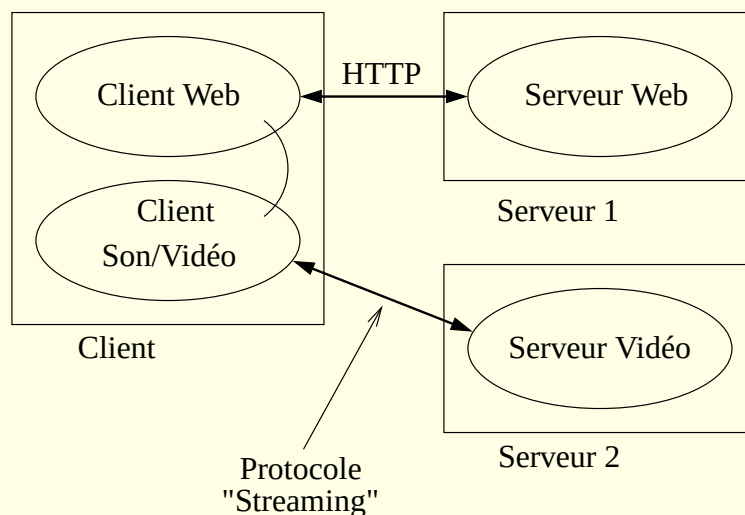


FIG. 3.56 – Protocole de type streaming.

3.6 Sécurité et cryptographie

La mise en réseau d'information offre moins de garantie de confidentialité, tout simplement parce que plus de personnes y ont accès. La cryptographie, la science qui consiste à assurer la confidentialité des messages, permet néanmoins de conserver un haut degré de sécurité.

En toute généralité, la mise en œuvre d'un système sécurisé comporte trois aspects :

- le chiffrement,
- des fonctions de sécurité et
- une implémentation des fonctions de sécurité dans un réseau.

Pour chacun de ces aspects, il existe plusieurs solutions. Si bien que lors de la comparaison de produits, il importe de bien analyser ces trois aspects en détail. Nous allons à présent traiter ces trois aspects.

3.6.1 Chiffrement

Nous comprenons les messages que nous lisons parce qu'ils nous sont présentés sous une forme compréhensible. Dans le cas de transactions financières ou d'échanges d'informations militaires, il importe qu'un message intercepté ne soit pas lisible. Le processus par lequel un message est rendu incompréhensible est appelé **chiffrement**. Le processus de reconstruction du texte original à partir du message chiffré est appelé **déchiffrement**. On parle aussi respectivement de **cryptage** et de **décryptage**. Les étapes d'un processus de chiffrement sont illustrées par la figure 3.57.

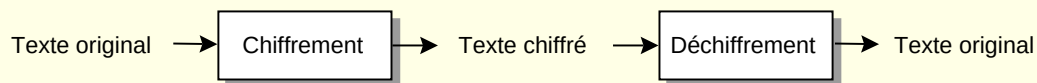


FIG. 3.57 – Chiffrement et déchiffrement.

Ce schéma met en lumière une déconcertante analogie avec la compression. De fait, le chiffrement, tout comme la compression, tente de supprimer la redondance présente dans le message. Il est probable qu'à l'avenir apparaissent des techniques qui mêlent compression et chiffrement. Les algorithmes d'aujourd'hui n'incluent pas encore la notion de compression car un texte chiffré est bien de longueur égale à celle du message original.

Algorithmes à clef secrète ou publique

Le texte de départ, noté M ci-après, peut être une suite de bits, un fichier texte, un signal audio, une image, etc ; la fonction de chiffrement $\mathcal{E}$ transforme ce message en un message chiffré C :

$$C = \mathcal{E}_{k_1}(M) \quad (3.7)$$

Si la sécurité du processus de chiffrement repose sur la confidentialité de l'algorithme, on considère que le certain est peu sûr car, tôt ou tard, un utilisateur découvrira le secret et le système de chiffrement s'effondrera. Pour une vraie sécurité, tous les algorithmes modernes de

chiffrement utilisent une clef, notée k_1 ; c'est la raison de la présence de l'indice k_1 dans l'équation 3.7. Cette clef peut prendre une des valeurs parmi un grand nombre de valeurs possibles. Pour le déchiffrement $\mathcal{D}$ on procède de même, et si la clef de déchiffrement est identique à celle de chiffrement, on a :

$$M = \mathcal{D}_{k_1}(C) \quad (3.8)$$

et donc, par substitution de C de l'égalité 3.7,

$$M = \mathcal{D}_{k_1}(\mathcal{E}_{k_1}(M)) \quad (3.9)$$

Il existe des cas où la clef de déchiffrement, notée k_2 , est différente de la clef de chiffrement (cf. figure 3.58). Dans ce cas, les relations deviennent :

$$C = \mathcal{E}_{k_1}(M) \quad (3.10)$$

$$M = \mathcal{D}_{k_2}(C) \quad (3.11)$$

$$M = \mathcal{D}_{k_2}(\mathcal{E}_{k_1}(M)) \quad (3.12)$$

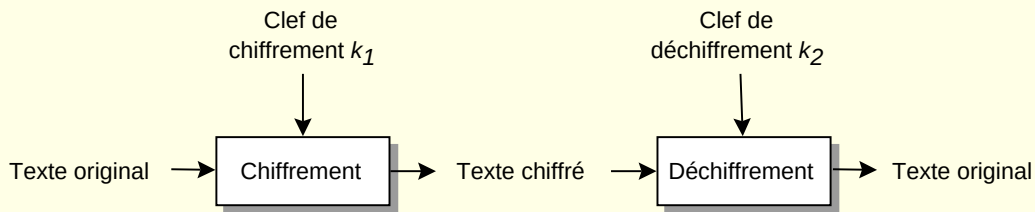


FIG. 3.58 – Chiffrement et déchiffrement avec deux clefs distinctes.

Il y a deux types principaux d'algorithmes à base de clefs : à clef secrète ou à clef publique. Les algorithmes à clef secrète sont des algorithmes où la clef de chiffrement peut être calculée à partir de la clef de déchiffrement et vice-versa. Les algorithmes à clef publique sont différents. Ils sont conçus de sorte que les deux clés soient différentes et qu'il ne soit pas possible de calculer une clef à partir de l'autre dans un temps raisonnable. Le nom d'algorithme à clef publique vient de ce que la clef de chiffrement peut être rendue publique. N'importe qui a le droit de l'utiliser pour chiffrer un message mais seul le détenteur de la clef de déchiffrement peut reconstituer le message non chiffré. Dans de tels systèmes, les clefs de chiffrement et déchiffrement sont respectivement appelées clef publique et clef privée.

De l'usage des algorithmes de chiffrement

Les algorithmes de chiffrement tels que décrits ont d'innombrables utilisations autres que le simple fait de vouloir cacher le contenu d'un message ; ils sont alors intégrés dans des protocoles complexes. Par exemple, une personne qui se connecte à un ordinateur doit fournir son identité. Mais comment l'ordinateur peut-il être sûr de l'identité de la personne ? Classiquement, ce problème d'authentification se résout par l'octroi d'un mot de passe. Un algorithme de chiffrement

transforme alors ce mot de passe et l'ordinateur compare le résultat avec une table de mots de passe chiffrés. Comme cette table ne contient jamais que les mots de passe chiffrés, il n'est pas à craindre qu'un utilisateur indélicat ne prenne connaissance d'un mot de passe en allant parcourir les fichiers de l'ordinateur.

Un autre problème fréquent est celui de la **signature numérique** : comment savoir qu'un texte provient bien d'une personne ? L'algorithme de chiffrement à clef publique fournit entre autres un moyen commode de signature numérique. Il suffit d'imaginer que l'expéditeur utilise sa clef privée pour chiffrer une empreinte propre à son message. Le destinataire, qui possède la clef publique de l'utilisateur, vérifie si l'empreinte déchiffrée correspond au message fourni par l'expéditeur. Vu que l'expéditeur est le seul à connaître la clef privée liée à la clef publique, si l'empreinte correspond, il a toutes les raisons de penser que l'expéditeur a bien signé le message.

Il reste ensuite à savoir si le message n'a pas été modifié en cours de route, c'est le problème de l'**intégrité des messages**. Des solutions existent également pour ce type de problème mais nous n'entrerons pas dans leurs détails. Il nous paraît cependant utile de citer les quatre algorithmes cryptographiques suivants (voir [10] pour plus de détails) :

DES Data Encryption Standard. C'est actuellement l'algorithme de chiffrement le plus populaire. Le **DES** est un algorithme à clef secrète ; la même clef sert au chiffrement et au déchiffrement.

RSA d'après le nom de ses concepteurs : RIVEST, SHAMIR et ADLEMAN. **RSA** est l'algorithme à clef publique le plus populaire. Il peut aussi bien être utilisé pour le chiffrement que pour la signature numérique.

IDEA International Data Encryption Algorithm. Il s'agit d'un algorithme de chiffrement à clef secrète utilisé dans le programme de signature numérique **PGP** (Pretty Good Privacy). **IDEA** est un algorithme de chiffrement par blocs ; il manipule des blocs de texte en clair de 64 bits. La clef est longue de 128 bits. Le même algorithme est utilisé pour le chiffrement et le déchiffrement.

AES Advanced Encryption Standard. **AES** utilise l'algorithme RIJNDAEL inventé par deux belges (V. RIJMEN et J. DAEMEN). À l'instar du DES, cet algorithme sert au chiffrement mais il permet de travailler avec des blocs de 128 bits et il supporte des clefs de 128, 192 ou 256 bits, contrairement au DES qui travaille avec des blocs de 64 bits et une clef longue de 56 bits.

3.6.2 Fonctions cryptographiques

Un système sécurisé offre une série de fonctions de sécurité, appelées fonctions cryptographiques, parmi lesquelles on distingue :

- **Authentification**. La fonction d'authentification permet d'identifier une personne ; elle est notamment utilisée lors de l'accès à une machine, tel qu'illustré par la figure 3.59.
- **Confidentialité**.
- **Intégrité des messages**. Un message est dit intègre s'il y a correspondance exacte, bit à bit, entre le message émis par l'expéditeur et le message reçu par le destinataire.

- **Non-répudiation.** La non-répudiation est en quelque sorte l'équivalent de la possession d'un accusé de réception qui permettrait de garantir qu'un message a bien été reçu ou émis.
- **Anonymat.** Cette fonction est ignorée par la grande majorité des ouvrages traitant de cryptographie. Or, dans le cas du vote électronique, il est capital de garantir l'impossibilité de trouver le nom de l'individu qui a voté. De plus, outre cette forme d'anonymat, il faut pouvoir prouver que le vote n'a pas été altéré ; il s'agit donc de certifier l'intégrité du message.

```
[marc@sifnos ~]$ telnet machine.montefiore.ulg.ac.be
Trying 138.164.35.3...
Connected to machine.montefiore.ulg.ac.be (138.164.35.3).
Escape character is '^]'.
```

```
UNIX(r) System V Release 4.0 (machine)
```

```
login: marc
Password:
Last login: Wed Oct 18 15:36:40 from 195.67.167.98
MODE : STATIC
OPERATING SYSTEM : SOLARIS2 on Sun
machine:~>
```

FIG. 3.59 – Exemple de fonction cryptographique : fonction d'authentification.

Le cas de la **signature numérique** est quelque peu singulier. La signature numérique fournit une information légale fiable au destinataire du document électronique ; elle équivaut à une signature scripturale. Sous cette forme, on peut la voir comme un moyen d'assurer la fonction d'authentification. Mais il est également possible de l'utiliser pour garantir l'intégrité du message envoyé.

Les algorithmes de chiffrement peuvent être utilisés pour assurer des fonctions cryptographiques. Prenons par exemple un algorithme à clef publique. Deux usages sont possibles :

- l'émetteur chiffre un message avec la **clef publique**. Il en résulte que seul le destinataire possédant la **clef privée** peut déchiffrer le message. On a donc assuré la fonction de **confidentialité**.
- l'émetteur chiffre un message avec la **clef privée**. Dès lors, le destinataire sait que seul l'émetteur possédant la **clef privée** pouvait chiffrer le message, ce qui équivaut à l'identification de l'expéditeur et donc à la fonction d'authentification.

Un système de sécurité se décrit toujours par les **fonctions** qu'il implémente ! Le tableau 3.7 montre ainsi différentes implémentations de fonctions de sécurité. Il convient de remarquer que ce tableau ne mentionne pas à quel niveau du modèle **OSI** sont implémentées les fonctions. Ainsi,

on peut très bien avoir différentes fonctions d'authentification assurées par des implémentations agissant chacune au niveau de couches différentes du modèle OSI.

Système	Description	Algorithmes	Fonctions
PGP	Application pour le chiffrement du mail	IDEA, RSA, MD5	Confidentialité, authentification, intégrité, non-répudiation
SSL	Protocole pour le chiffrement des transmissions TCP/IP	RSA, RCZ, RC4, MD5 et autres	Confidentialité, authentification, intégrité, non-répudiation
IPsec	Protocole de chiffrement pour la couche IP	DIFFIE-HELMAN et autres	Confidentialité (optionnel), authentification, intégrité
SSH	Chiffrement d'un mode de communication par terminal	RSA, DIFFIE-HELMAN, DES, Triple-DES, Blowfish et autres	Confidentialité, authentification
SET	Protocole pour le paiement sécurisé par Internet	RSA, MD5, RC2	Confidentialité du numéro de carte, intégrité, authentification, non-répudiation

TAB. 3.7 – Quelques implémentations de fonctions de sécurité.

Un mot sur PGP. **PGP** (Pretty Good Privacy) est un programme de chiffrement. PGP utilise IDEA pour le chiffrement, RSA (avec une clef de 512, 1024 ou 1280 bits) pour la gestion des clefs et MD5 comme fonction de hachage à sens unique. PGP comprime les fichiers avec le chiffrement. L'aspect le plus intéressant de PGP est son approche à la gestion de clefs distribuée. Il n'y a pas d'autorité de certification ; tous les utilisateurs engendrent et distribuent leur propre clef publique.

Carte à puce. Alors que le problème de la sécurisation de l'information se pose en des termes plus aigus encore aujourd'hui qu'hier en raison de la diffusion par réseaux interconnectés, il existe des solutions satisfaisantes puisque certaines entreprises effectuent des transactions financières par réseau. Pour de telles opérations, il y a de bonnes raisons de penser que la carte à puce va jouer un rôle important. En effet, une telle carte contient une clef secrète interne. De plus, les versions les plus récentes des cartes à puce implémentent aussi des parties de protocoles qui autrefois se réalisaient en dehors de la carte. À moins d'ouvrir la carte, il n'y a donc pas moyen de connaître la clef ou d'analyser le fonctionnement, mais en cas d'ouverture la carte est inutilisable.

Pour terminer cette discussion, précisons qu'en matière de sécurité il n'y a pas de solution inconditionnellement sûre ; il faut donc compter d'emblée avec un taux de fraude qui dépendra de la solution choisie.

3.6.3 La sécurité dans les réseaux

Modèle de référence

Le modèle de sécurité dans les réseaux le plus complet consiste à sécuriser l'ensemble des couches. Un sous-ensemble des fonctionnalités à implémenter est repris à la figure 3.60.

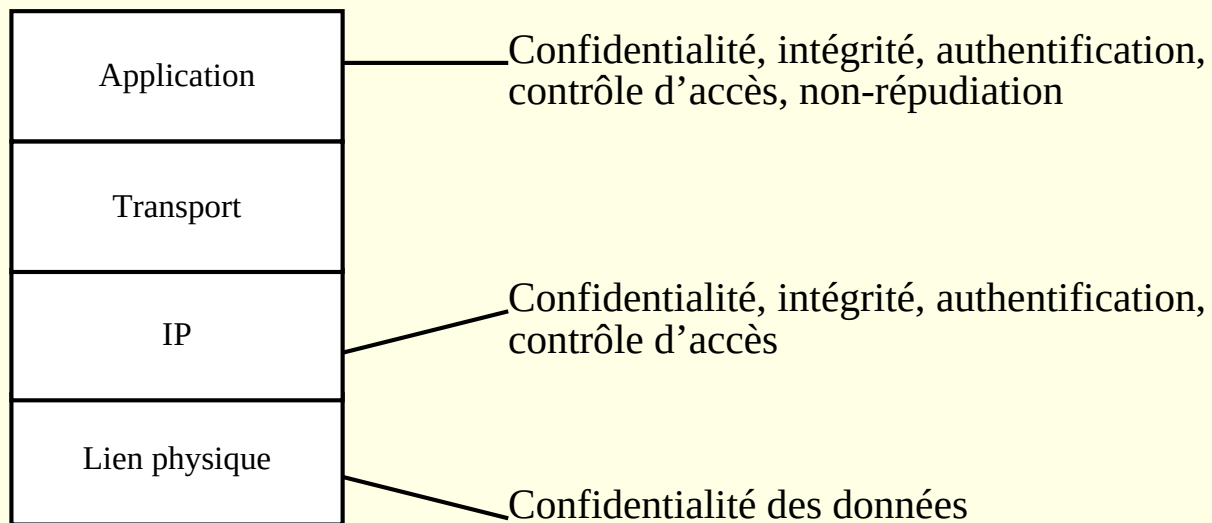


FIG. 3.60 – Modèle de sécurité.

La réalité s'écarte fortement de ce modèle. Non seulement, la majorité des messages circulent en clair sur la ligne mais, en plus, il sera toujours difficile de sécuriser une communication dont les paquets peuvent éventuellement emprunter des chemins différents.

Le protocole **SSL** (Secure Socket Layer) offre une première solution (la pile de protocoles associés est illustrée à la figure 3.61). Il permet le chiffrement de l'information issue de la couche applicative. C'est donc une solution disponible au niveau de l'utilisateur.

Les mécanismes de sécurisation utilisables dans le réseau sont représentés à la figure 3.62. On peut distinguer :

- le **proxy**. Un serveur proxy intercepte la requête d'un utilisateur et modifie le paquet de manière à émettre tout message en son nom propre. Ainsi, le monde extérieur ne voit qu'une machine. Comme le montre la figure 3.63, un proxy est toujours lié à un protocole ; il faut donc autant de proxies que de services. Lorsqu'une série de proxies sont intégrés dans une passerelle destinée à la sécurisation, on parle d'Application Level Gateway (**ALG**).
- le filtrage de paquets. La majorité des attaques sont effectuées par envoi massif de messages et saturation des serveurs. Pour contrer les attaques, un routeur peut ne laisser passer que des messages d'un certain type et détecter les rafales de messages. Ces dernières sont souvent le signe d'une tentative d'attaque.
- la traduction d'adresses ou Network Address Translation (**NAT**). Bien qu'au départ le mécanisme visait à réduire la nombre d'adresses publiques utilisées pour éviter l'épuisement

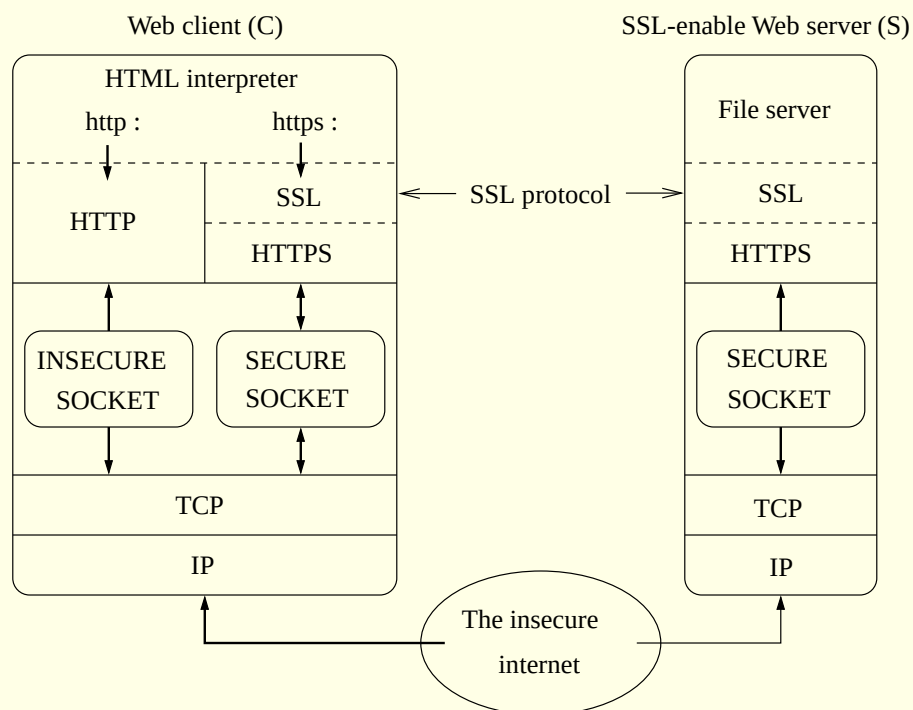


FIG. 3.61 – La pile de protocoles associés au protocole SSL.

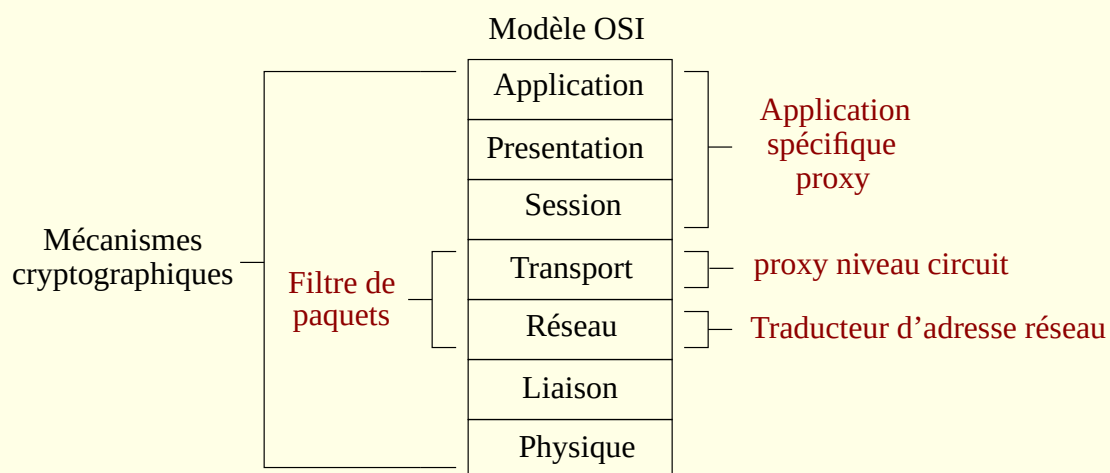


FIG. 3.62 – Techniques de sécurisation d'un réseau.

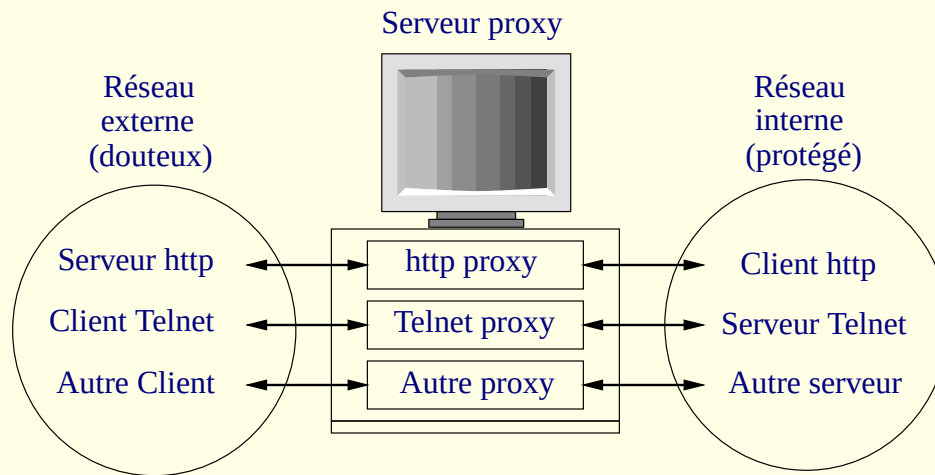


FIG. 3.63 – Chaque protocole applicatif nécessite un proxy spécifique.

du jeu d'adresses, il est utilisé aujourd'hui pour permettre d'occulter les adresses utilisées dans un réseau interne.

- la définition d'un **tunnel**. Il s'agit d'un chemin reliant deux entités spécifiques, par exemple deux bâtiments d'une même société. Le tunnel s'appuie sur le mécanisme de l'encapsulation, c'est-à-dire que tous les paquets IP sont chiffrés et encapsulés à l'entrée du tunnel. À la sortie, les paquets sont décapsulés et déchiffrés. De la sorte, on garantit la confidentialité de bout en bout. L'inconvénient majeur est la nécessité d'établir le tunnel, ce qui en fait une solution généralement peu flexible.

Bien entendu, rien n'empêche de combiner certaines solutions. Ainsi, on peut intégrer un firewall et un NAT transversal (**FNT**); cette solution permet même la coexistence avec une passerelle applicative (**ALG**).

Authentification lors de l'établissement d'une connexion à Internet

Lors de l'établissement d'une connexion au réseau Internet par modem sur le réseau téléphonique, le fournisseur vérifie l'identité de l'appelant. Dans un premier temps et après l'établissement de la couche physique, l'ordinateur entame un dialogue avec le serveur d'accès (**NAS**). Ce dialogue est représenté à la figure 3.64.

En général, le serveur d'accès n'a pas un accès local à la base de données contenant les utilisateurs autorisés à se connecter. Comme le montre la figure 3.65, le serveur d'accès établit à son tour un dialogue avec la base de données du fournisseur d'accès à Internet.

Ce n'est qu'après validation des noms d'utilisateurs et des mots de passe correspondant que l'accès à toute adresse IP du réseau Internet est possible (cf. figure 3.66).

Il faut bien comprendre que le fournisseur d'accès à Internet voit passer la totalité du trafic généré. Il lui est donc possible d'intercepter et d'analyser le contenu de toute communication qui n'aurait pas été chiffrée. Or, la majorité des applications Internet ne chiffrent aucune information. On imagine dès lors sans peine les problèmes tant au niveau de la sécurité que des atteintes

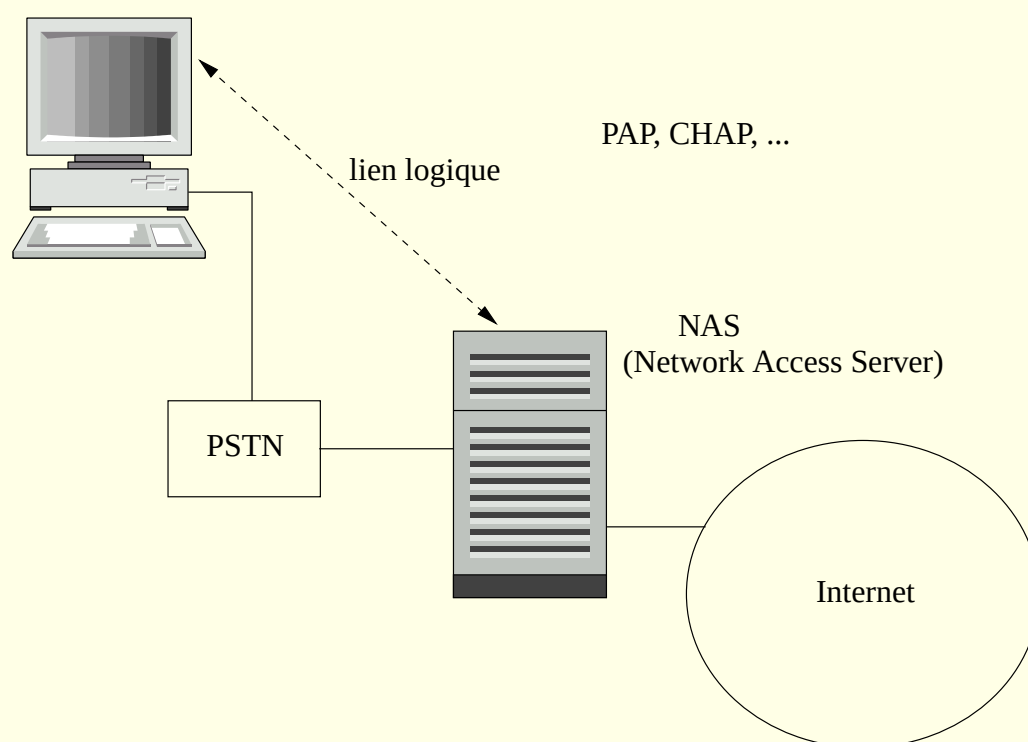


FIG. 3.64 – Dialogue entre un ordinateur et un serveur d'accès.

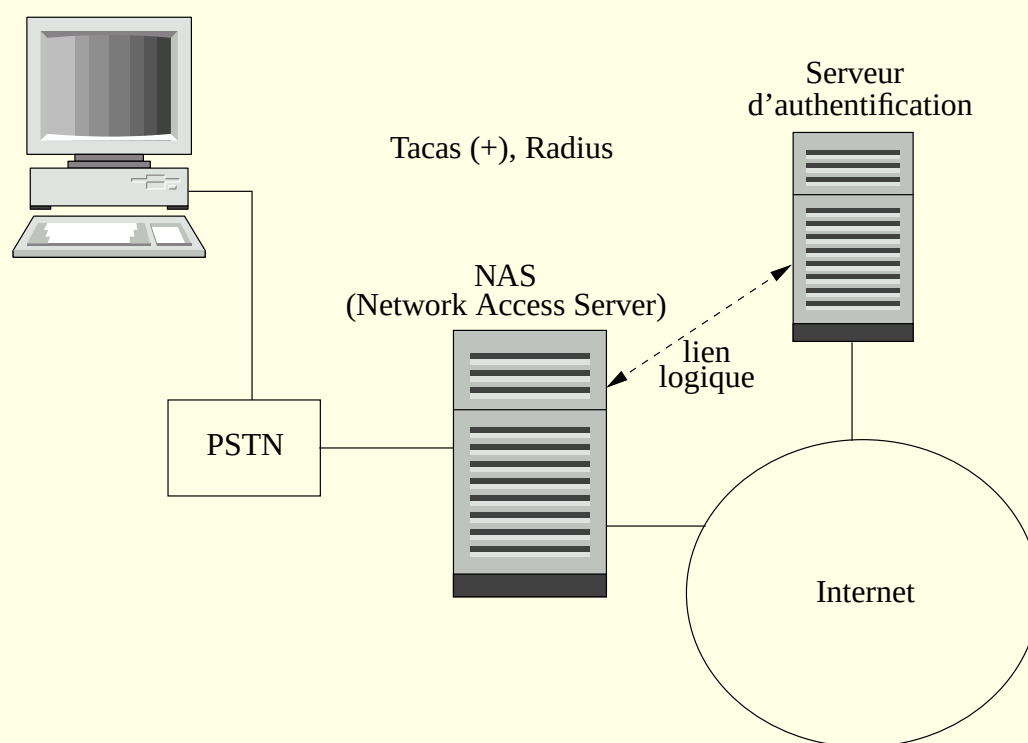


FIG. 3.65 – Authentification de l'utilisateur.

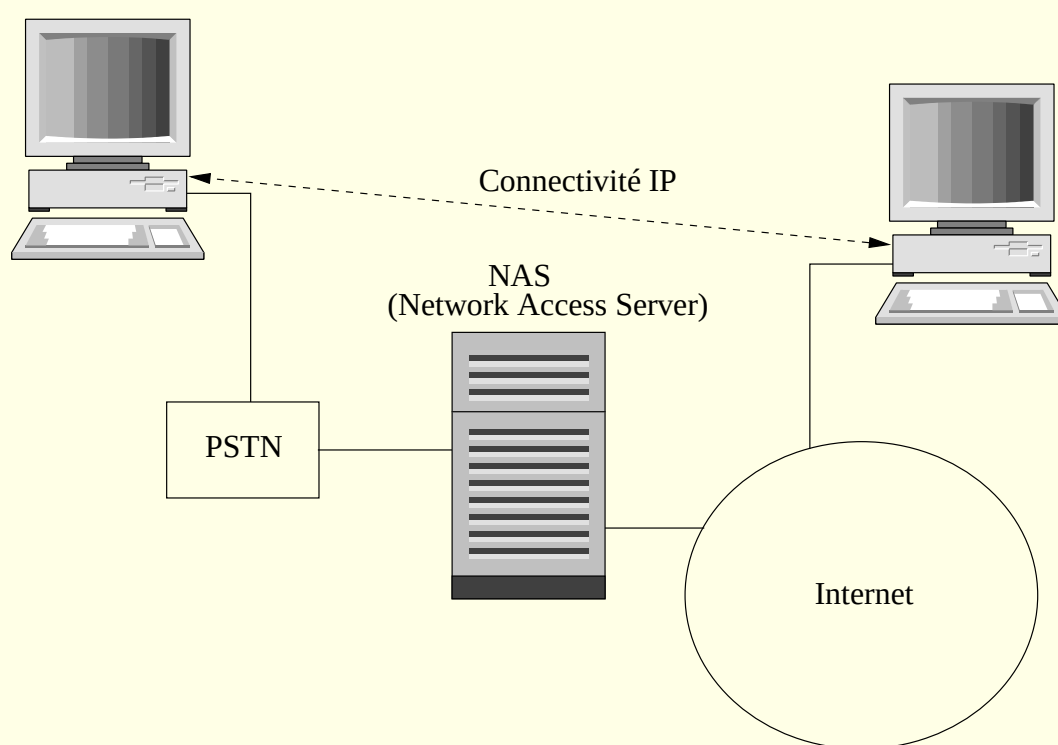


FIG. 3.66 – Connectivité IP.

possibles à la vie privée.

Lien entre un réseau d'entreprise et Internet

La figure 3.67 traduit une préoccupation récurrente pour les gestionnaires de réseau d'entreprises : comment peut-on relier un réseau d'entreprises (intranet) au réseau Internet sans compromettre la sécurité ?

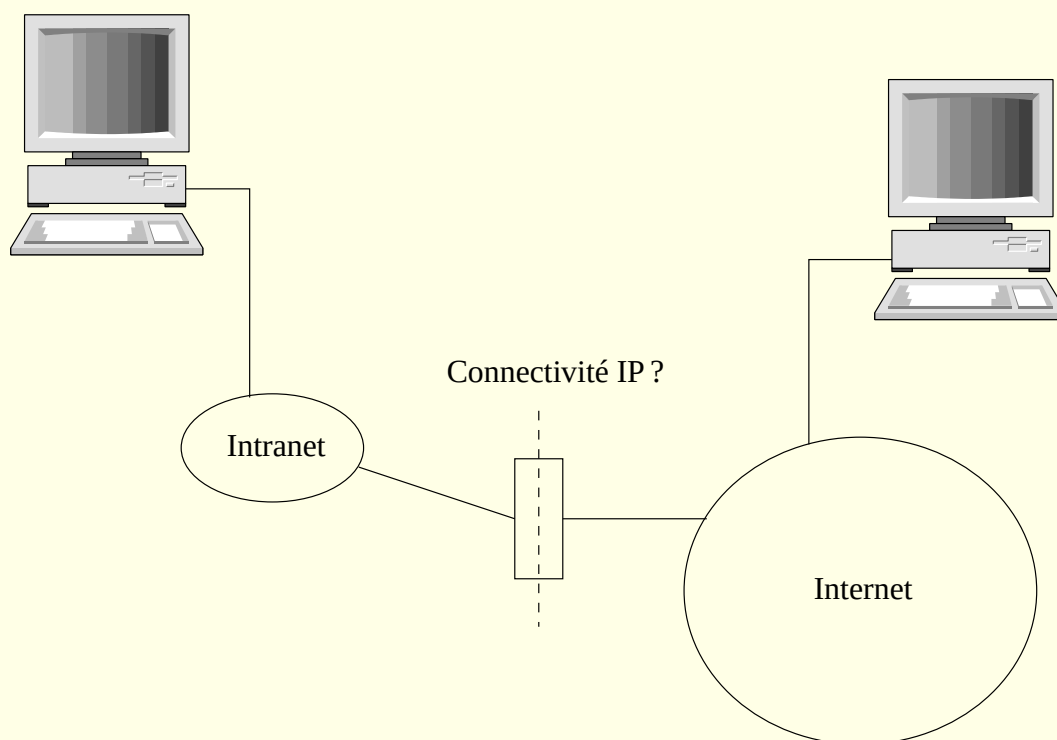


FIG. 3.67 – Comment relier un intranet à Internet ?

Une premier élément de réponse consiste à adopter les adresses privées, telles que définies dans le RFC1918, dans le réseau d'entreprises. Ces adresses ont la particularité de ne pas être considérées dans les routeurs reliés à Internet. Plus généralement, il est conseillé de masquer les adresses internes vis-à-vis du monde extérieur, que ce soit par traduction des adresses IP, Network Address Translation (NAT), ou par interprétation des informations liées à l'ensemble des couches. Le principe du NAT est illustré à la figure 3.68.

Ces opérations ont lieu lors du passage inter-réseau au sein d'un **firewall**. En pratique, on dédouble parfois les firewalls pour augmenter la difficulté d'intrusion. Ce cas est illustré à la figure 3.69.

À partir du moment où un firewall est mis place, il faut éviter qu'un utilisateur ne se connecte à Internet par un autre biais, par exemple par modem, tout en étant connecté à Internet. Dans ce cas, il existerait une sorte de court-circuiter qui annihilerait l'effet du firewall.

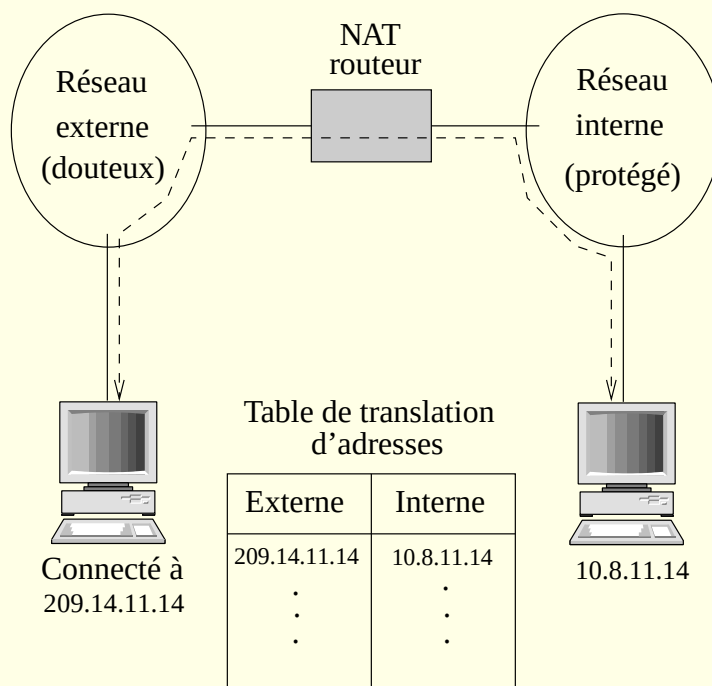


FIG. 3.68 – Illustration du NAT.

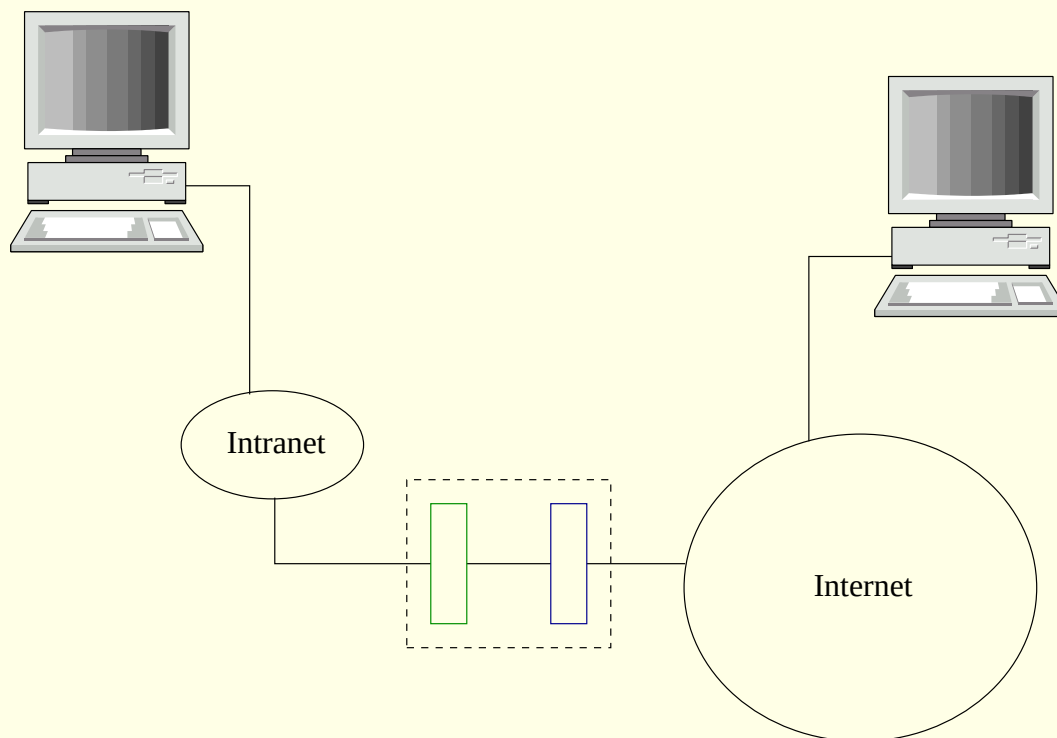


FIG. 3.69 – Présence d'un double firewall.

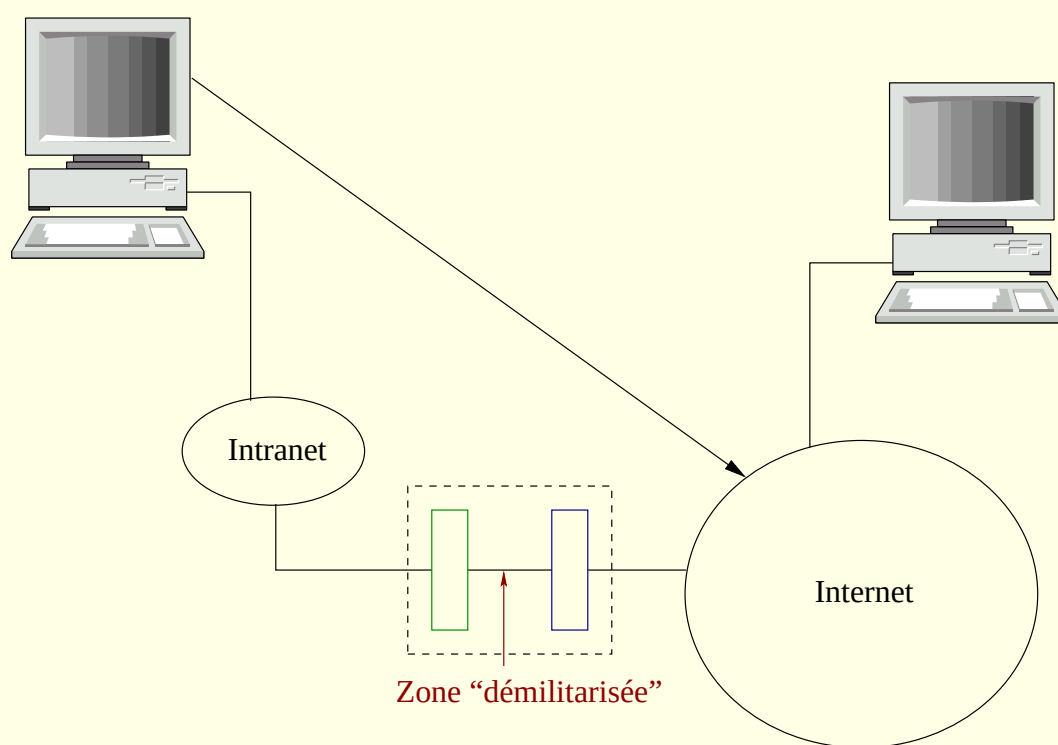


FIG. 3.70 – Danger de court-circuit.

Fonctions spécifiques aux réseaux

Certaines fonctions de sécurité sont spécifiques aux réseaux. Ainsi, dans le cas d'un réseau sans fil, la disponibilité joue un rôle fondamental. Cette fonction assure qu'un réseau continue à fonctionner même s'il subit des attaques, par exemple des attaques de type "refus de service" (denial of service) qui sont courantes et aisément implémentables. On voit toute la difficulté que cela représente pour un réseau mobile où tout terminal malicieux présent dans une zone peut interférer avec le réseau attaqué.

La sécurisation des accès aux services est également un enjeu majeur dans les réseaux. Il s'agit en fait de définir des règles d'accès sélectives, fonctions du profil d'un utilisateur.

Bibliographie

- [1] A. Agha, G. Pujolle, et G. Vivier. Réseaux de mobiles et réseaux sans fil. Eyrolles, 2001. 120, 130
- [2] D. Battu. Télécommunications : principes, infrastructures et services. Dunod, deuxième édition, 2001.
- [3] J. Bic, D. Duponteuil, et J. Imbeaux. Elements of digital communications. John Wiley & Sons, 1991. 85
- [4] F. Halsall. Data communications, computer networks and open systems. Addison-Wesley, fourth edition, 1996.
- [5] F. Halsall. Multimedia communications : applications, networks, protocols and standards. Addison-Wesley, 2001. 60, 106, 123, 126, 127, 129
- [6] D. Hardy, G. Malléus, et J.-N. Méreur. Réseaux : Internet, téléphonie, multimédia. De Boeck Université, 2002.
- [7] J. Levine and C. Baroudi. Internet : les fondamentaux. International Thomson Publishing, Paris, 1996.
- [8] H. Mel et D. Baker. La cryptographie décryptée. CampusPress, 2001.
- [9] F. Piper and S. Murphy. Cryptography : a very short introduction. Oxford University Press, 2002.
- [10] B. Schneier. Cryptographie appliquée : protocoles, algorithmes et codes sources en C. International Thomson Publishing, Paris, 1995. 143
- [11] A. Tanenbaum. Réseaux : cours et exercices. Dunod, 1996.

Chapitre 4

Matériel informatique

Quoi de plus pratique qu'un ordinateur pour aborder le monde multimédia ? Aujourd'hui, de nombreux PC (Personal Computer) sont équipés des accessoires nécessaires : carte son, haut-parleur, lecteur CD-ROM, carte graphique, ...

Les composantes logiques d'un système multimédia sont illustrés par la figure 4.1. Dans le chapitre 2, nous avons décrit les fonctions que réalisent les composantes du sous-système multimédia. Nous allons à présent nous intéresser aux éléments d'un ordinateur.

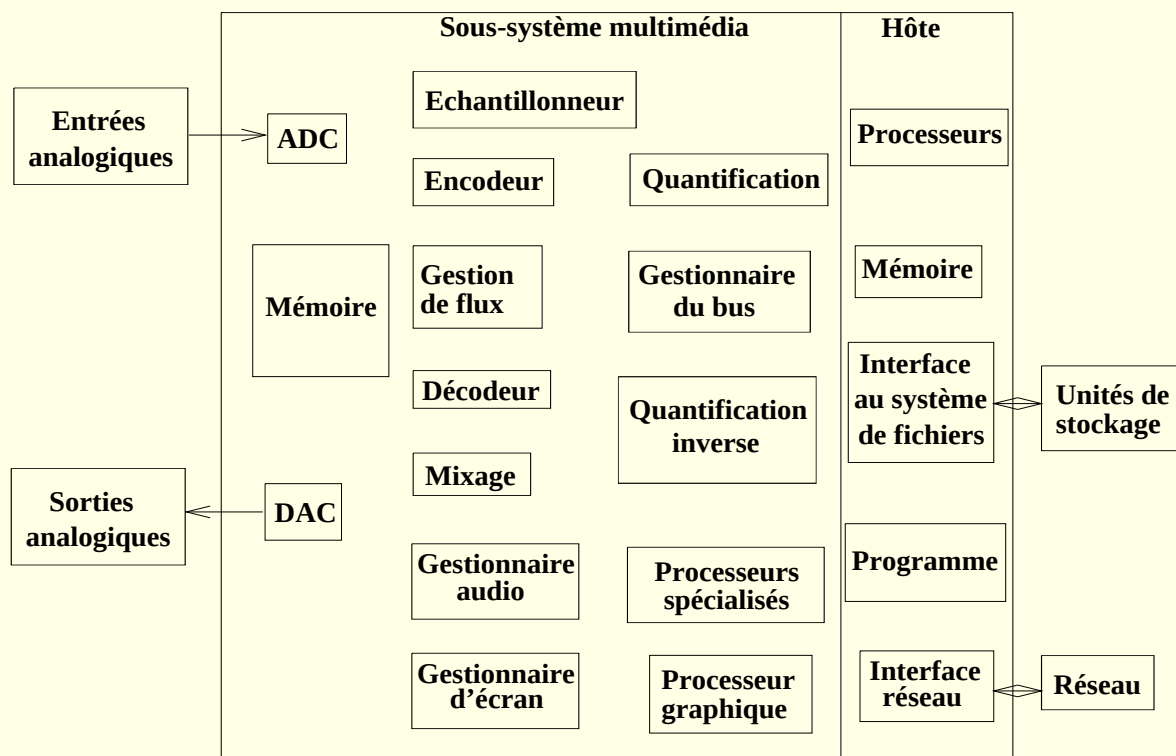


FIG. 4.1 – Composantes logiques d'un système multimédia.

4.1 Le matériel

Le matériel et le logiciel, appelés respectivement **hardware** et **software**, sont les deux éléments fondamentaux d'un ordinateur. Le matériel est l'ensemble des parties physiques d'un ordinateur, c'est-à-dire tout ce qui est visible, capable de réagir à un jeu d'instructions. C'est le logiciel qui se charge d'envoyer les instructions adéquates au matériel. Sans le logiciel, il n'y aurait pas moyen d'utiliser le matériel de manière simple.

Dans ce qui suit, nous allons parcourir les différents éléments du matériel. Le logiciel ne sera pas traité ici ; tout juste l'impact du choix matériel sera-t-il traduit en ses conséquences au niveau du logiciel.

4.1.1 Processeur

Au cœur de tout ordinateur, il y a une unité centrale appelée **processeur** (ou **micro-processeur**) capable d'interpréter et d'exécuter une série d'instructions envoyées par le logiciel. Le plus connu de ces micro-processeurs est actuellement le **Pentium** développé par la société INTEL. D'autres exemples de micro-processeurs sont le 68040, le 80486, etc.

Le micro-processeur remplit les fonctions de transfert d'un périphérique vers un autre, de calcul pour un tableur ou de gestion de la mémoire de l'écran. Il en résulte parfois une surcharge de l'unité centrale qui est contrecarrée en équipant certaines cartes d'un autre micro-processeur spécialisé pour certaines tâches. Par exemple, la décompression de séquences vidéo MPEG s'effectuera directement sur la carte graphique.

4.1.2 Carte graphique

Le moniteur et la carte graphique composent l'interface visuel d'un ordinateur. Sur base des signaux que lui envoie la carte, le moniteur affiche des images en couleur au moyen de combinaisons de trois couleurs primaires. L'écran est divisé en série d'éléments, appelés **pixels**, composés chacun de trois pastilles phosphorescentes de couleur rouge, verte et bleue qui s'illuminent lorsqu'elles sont frappées d'électrons.

La résolution de l'écran dépend du nombre de pixels ; elle est d'autant plus élevée qu'il y a de pixels à l'écran. Le standard **Video Graphics Array (VGA)** a une résolution de 640 pixels en horizontal sur 480 pixels en vertical. Ce standard est supplanté par le **Super VGA (SVGA)** qui affiche soit 800×600, soit 1024×768 pixels.

La carte graphique (ou vidéo) stocke et met à jour les images affichées à l'écran. Elle reçoit des signaux en provenance d'autres parties de l'ordinateur, les traite et reconstruit une image. Les valeurs de chaque pixel sont stockées dans des puces de mémoire spéciales de la carte vidéo. Pour chaque pixel, l'information revêt la forme d'un nombre. Si ce nombre est stocké sur un octet, une couleur parmi 256 peut être affectée au pixel. En 24 bits, le choix porte sur 16,77 millions de couleurs. Un tableau plus complet est fourni dans la figure 4.2. Quelle que soit la résolution, seul un certain nombre de couleurs sont représentables. Une couleur réelle est donc approximée, lors de l'affichage, par la couleur la plus proche. Dans certains cas, il arrive que le

fichier d'image contienne un jeu de couleurs prédéfinies et que chaque pixel prenne une de ces valeurs. On parle alors de palette de couleurs associée à l'image.

Bits par pixel	Nombre de couleurs	Mémoire d'écran
4	16	154 kB
8	256	307 kB
16	65,536	614 kB
24	16,7 millions	922 kB

FIG. 4.2 – Comparaison du nombre de couleurs avec le besoin en mémoire s'agissant d'une image VGA (640×480 pixels).

Question 27 *Est-il toujours possible d'obtenir la résolution maximale et le plus grand nombre de couleurs simultanément ?*

Réponse

La possibilité d'afficher des milliers voire des millions de couleurs différentes se heurte à un problème pratique. Une image 800×600 représente $480\,000$ pixels. Pour afficher 256 couleurs, ce qui demande d'allouer un octet par pixel, la carte vidéo doit disposer d'une mémoire de 480 kB. Pour une image de 1024×768 pixels en 24 couleurs, le total monte à $1024 \times 768 \times 3$ octets, soit 2,4 MB. Pour une seule image ! D'où la nécessité de trouver un compromis entre la résolution et le nombre de couleurs disponibles.

De plus, pour profiter de la résolution maximale d'un moniteur, la carte vidéo doit pouvoir traiter cette résolution. Si l'on veut utiliser la résolution maximale d'un moniteur SVGA, il faut donc disposer d'une carte vidéo supportant le mode SVGA. ■

La figure 4.3 positionne la carte graphique à l'intérieur d'un ordinateur dans le cas d'acquisition d'image. La carte graphique contient une mémoire conséquente et un processeur de traitement rendus nécessaires par la complexité des opérations graphiques possibles aujourd'hui. Dans le cas d'un codage par MPEG, en raison de l'algorithme de prédiction temporelle des images successives, la taille mémoire atteint plusieurs méga octets. Si cette mémoire n'est pas disponible sur la carte, l'ordinateur n'a guère le choix que de refuser la décompression ou d'introduire un délai. C'est donc une question de compromis : une taille de mémoire plus grande pour la prédiction de MPEG augmente les performances mais elle alourdit le processus de décompression. Il faut donc veiller à considérer l'ensemble de la chaîne lors du déploiement d'une solution multimédia faisant intervenir des signaux vidéo.

4.1.3 Carte son

Les cartes son ont d'abord été conçues pour les jeux. Elles font maintenant partie de l'équipement de base des machines multimédia, afin d'ajouter des commentaires sonores ou vocaux aux applications. C'est ainsi que certains constructeurs proposent des ordinateurs, intégrant des cartes

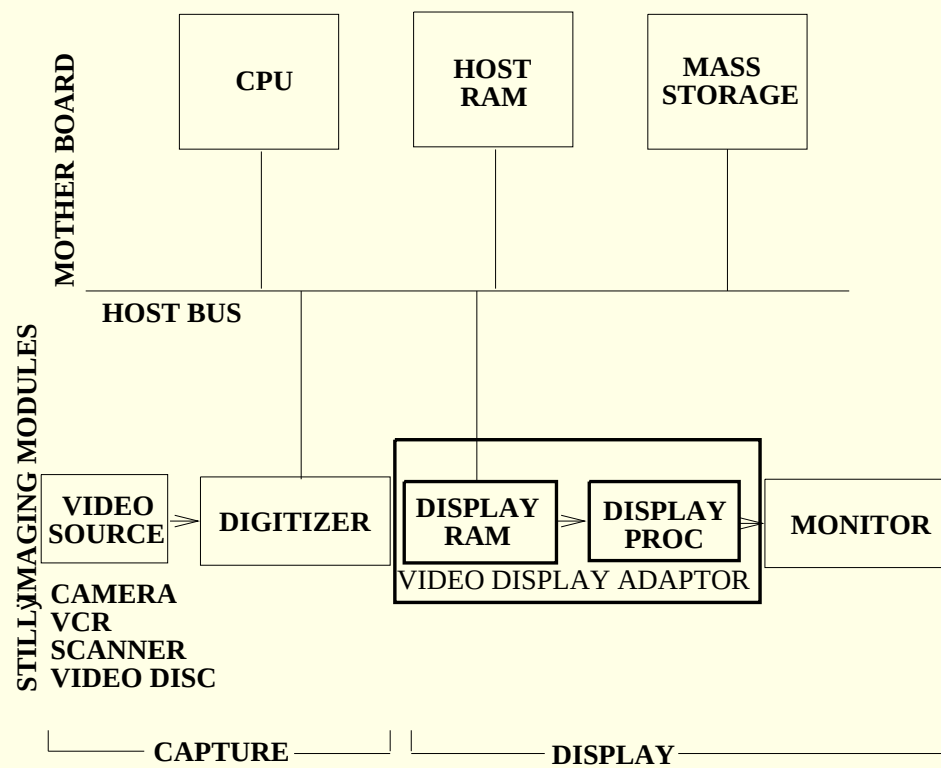


FIG. 4.3 – Capture (acquisition) d'image.

son qui peuvent servir de répondeur et, le jour n'est pas loin où il sera possible de communiquer avec une autre personne via l'ordinateur.

Une carte son joue deux rôles. Elle sert tout d'abord à saisir des signaux sonores et à les convertir en un fichier de valeurs numériques enregistrables sur un disque dur (voir figure 4.4). Elle peut aussi rejouer ces fichiers dans des haut-parleurs, des écouteurs ou des instruments de musique. Une carte son fonctionne en stéréo et fournit un son de grande qualité, généralement aussi bon que celui d'une chaîne haute-fidélité.

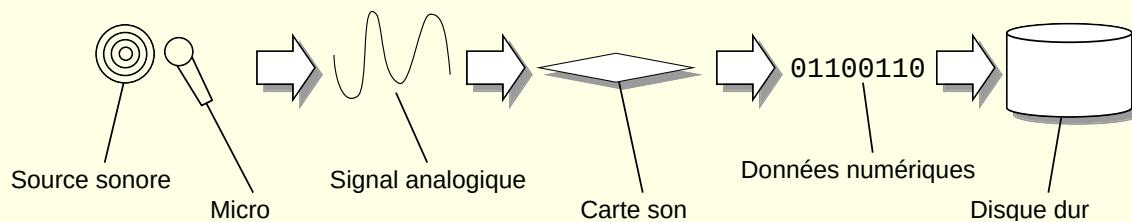


FIG. 4.4 – Acquisition d'un son.

On distingue généralement les cartes en fonction de leur capacité à quantifier sur 8 ou sur 16 bits. Cette capacité est étroitement liée à la fréquence d'échantillonnage qui est habituellement de 11, 22 ou 44 kHz.

Question 28 Une carte son 16 bits est-elle forcément supérieure à une carte 8 bits ?

Réponse

Oui. Avec 8 bits, il existe 256 (2^8) combinaisons possibles. Avec 16 bits, il existe 65536 (2^{16}) combinaisons. 16 bits permettent donc d'échantillonner et de stocker une valeur entre 0 et 65535, ce qui est plus précis et donc préférable. ■

Les périphériques audio comprennent d'une part les micros pour l'acquisition, d'autre part les haut-parleurs pour la restitution du son. Ces périphériques sont reliés au panneau de la carte son, dont un exemple est fourni par la figure 4.5

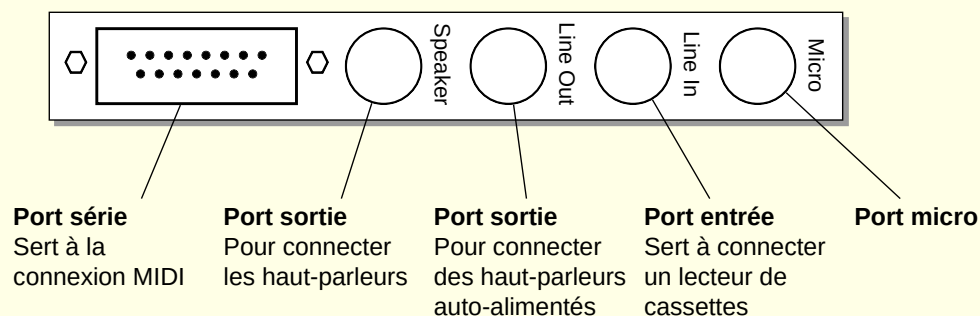


FIG. 4.5 – Exemple d'un jeu de connecteurs de carte son.

Les cartes son actuelles fonctionnent en mode **duplex**, c'est-à-dire qu'elles sont en mesure de jouer et d'enregistrer un signal simultanément.

4.1.4 Micro

Pour enregistrer de la musique ou de la parole sous la forme d'un signal numérique, il faut disposer d'un micro. Le micro réalise l'acquisition du signal analogique en enregistrant les changements de pression sur une membrane. Ces variations sont alors traduites en signaux électriques qui, à leur tour, sont confiés à une carte son.

Il existe deux types de micro : unidirectionnel ou omnidirectionnel. Comme son nom l'indique, le micro unidirectionnel recueille les sons lui parvenant dans l'axe ; il convient donc parfaitement pour enregistrer un signal de parole dans un environnement bruyant. À l'inverse, comme le micro omnidirectionnel ne privilégie aucune direction, il est préférable de l'utiliser pour des sons ou musique d'ambiance.

Certains micros sont directement intégrés dans le clavier, le boîtier, voire l'écran mais il ne faut pas en attendre des performances exceptionnelles.

4.1.5 Haut-parleurs

Bien qu'un haut-parleur soit parfois inclus dans l'ordinateur, les kits multimédia comprennent souvent deux haut-parleurs extérieurs avec ou sans amplificateur. L'amplificateur extérieur est préférable pour obtenir un signal de forte puissance. Dans ce cas, il vaut mieux raccorder directement le connecteur d'où sort le signal non amplifié car une cascade d'amplificateur introduit un bruit inutile.

4.1.6 Appareil photo numérique

De nombreux appareils photo numériques sont apparus sur le marché. Ils se distinguent par la taille des images capturées, leurs fonctionnalités et leur capacité de stockage. Quant au support de stockage, il n'y a pas encore de choix communs entre les modèles et les constructeurs.

4.1.7 Caméra

Jusqu'il y a peu les caméras capturaient tous les signaux sous forme analogique. Si nécessaire, ces signaux étaient ensuite convertis en numérique. La caméra MPEG1A développé par HITACHI (voir figure 4.6) marque un tournant important ; en effet, il s'agit de la première caméra capable d'acquérir les séquences vidéo directement sous la forme de signaux numériques MPEG-1, les signaux étant stockés sur un disque dur PCMCIA amovible.

Outre la percée du numérique, on assiste à la naissance de caméra avec un angle de vue de 360 degrés, comme celle illustrée à la figure 4.7.



FIG. 4.6 – La première caméra MPEG.

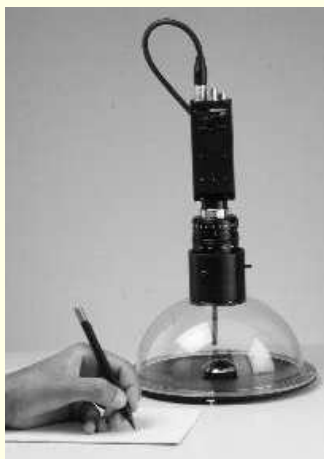


FIG. 4.7 – Une caméra avec un angle de vue de 360 degrés.

4.1.8 Technologies de stockage

Il existe un grand nombre de moyen de stocker l'information multimédia. Une image peut ainsi être rendue sur une feuille de papier, apparaître sur un écran de télévision ou encore être lue comme une série de caractères comme tout fichier informatique. Les modes de représentation sont intimement liés à la façon dont l'information est stockée. Nous classons les moyens de stockage en trois catégories (ce découpage correspond à une distinction couramment acceptée) :

Analogique. Si le numérique prend de l'ampleur, l'analogique a bien été la seule forme de stockage pendant de nombreuses années. Les enregistreurs tels que nous les connaissons sont d'ailleurs encore analogiques.

Numérique. Ce sont les systèmes numériques audiovisuels qui enregistrent ou diffusent des informations audiovisuelles sous forme de signaux numériques vidéo ou audio. Ces systèmes n'enregistrent pas leurs signaux sous forme de fichiers directement exploitables par l'ordinateur. L'apparition du Compact Disc (CD) a constitué le lancement du numérique dans le grand public.

Informatique. Les moyens de stockage informatiques sont aussi numériques mais par cette notion nous nous référons à des procédés de stockage qui permettent une manipulation ultérieure simple de l'information. Tous les supports informatiques habituels (disquettes, disques durs, ...) ne seront pas décrits car ils ne présentent pas de spécificités particulières par rapport au multimédia.

Nous allons à présent passer en revue différents moyens de stockage suivant cette distinction.

Procédés de stockage analogiques

Magnétoscopes. Le fonctionnement du magnétoscope est basé sur un principe d'enregistrement magnétique, appliqué dans de nombreux appareils, tels que magnétophone, magnétoscope, disque dur ou badge magnétique. Divers paramètres interviennent dans la construction : la vitesse d'enregistrement, la largeur de la bande ou de la piste et les performances du support magnétique. Lorsqu'un constructeur conçoit un magnétoscope, il choisit toute une série de paramètres qui caractérisent le format d'enregistrement vidéo. C'est ainsi qu'en 1977, JVC lançait le format VHS (Video Home System) qui allait s'imposer sur le marché des enregistreurs domestiques. Fort de ce succès et grâce aux progrès réalisés dans la fabrication des supports magnétiques, le format VHS a évolué vers le S-VHS, basé sur le même principe d'enregistrement. La différence entre ces deux formats porte essentiellement sur un accroissement de l'excursion fréquence de la porteuse enregistrant le signal de luminance. Les résultats de définition ont ainsi été améliorés.

La naissance du format Betacam au début des années 1980, créé à l'initiative de SONY, vient du besoin exprimé par les équipes de reportage de disposer d'équipements plus légers. Pour garder aux images la meilleure définition et éviter les défauts inhérents aux codages composite PAL ou SECAM, l'enregistrement du signal vidéo est exécuté en composantes séparées sur deux pistes vidéo distinctes. L'une est réservée à l'enregistrement du signal de luminance tandis que l'autre sert pour l'enregistrement des deux signaux de

chrominance par multiplexage. Ainsi, au cours de l'enregistrement, les trois éléments composant un signal vidéo couleur restent totalement séparés et la qualité de l'enregistrement s'en retrouve améliorée. Avec les évolutions des supports d'enregistrement et la généralisation du format Betacam à d'autres activités de production vidéo, SONY a fait évoluer le format vers le Betacam SP.

D'autres procédés analogiques existent mais leur diffusion reste restreinte.

Procédés de stockage numériques

À la différence des procédés informatiques, les paramètres de numérisation sont d'abord choisis en fonction de la reproduction des données audio-visuelles. En dépit des similitudes entre les supports d'enregistrement (basés sur le CD), leur intégration dans un système multimédia passe par une transition analogique ; les données ne peuvent être traitées directement par un ordinateur. De plus, ces supports sont d'abord destinés pour la diffusion grand public avec du matériel qui ne comprend pas d'ordinateur.

CD Audio. Le fonctionnement du Compact Disc Audio (ou CD Audio) est basé sur le principe de la lecture optique par faisceau laser. Le CD Audio est un disque réalisé en matière plastique métallisée afin de réfléchir le faisceau envoyé par la tête laser de lecture. Au cours du pressage, des microcuvettes sont gravées à la surface et agencées le long d'une spirale (cf. figure 4.8). Chaque transition entre le début et la fin d'une microcuvette correspond au chiffre binaire 1. La densité des informations gravées à la surface du disque permet de stocker le signal audio sous forme numérique. Sur un CD Audio, le son est enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et une résolution de 14 ou 16 bits. La

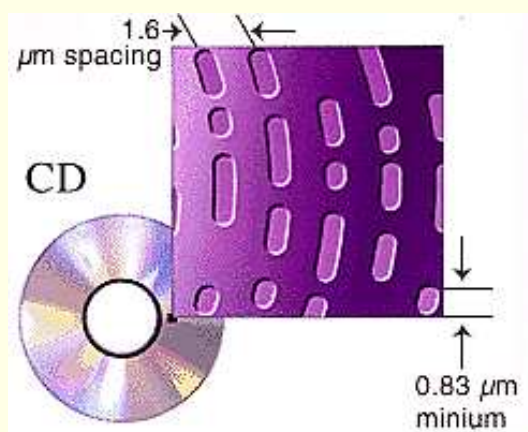


FIG. 4.8 – Le disque compact (CD).

structure relativement simple des données a permis d'intégrer la lecture des CD Audio sur toutes les machines ayant un système de lecture optique par laser. Il est ainsi possible de lire un CD Audio sur les lecteurs de CD-I, Photo CD et une majorité de lecteurs de CD-ROM.

DCC (Digital Compact Cassette). Pour la réalisation de magnétophones à cassettes numériques, PHILIPS a joué la carte de la compatibilité avec la cassette audio standard en définissant le format DCC. L'enregistrement des cassettes DCC est de type numérique, avec une tête magnétique enregistrant 9 pistes en parallèle. Les signaux numériques peuvent avoir une fréquence de 32, 44,1 ou 48 kHz. La quantification est de 16 bits.

Le DCC est loin d'être un succès commercial mais il démontre que l'état de la technologie de l'enregistrement magnétique a atteint un haut degré de perfection.

Magnétoscopes professionnels. Depuis une dizaine d'années, le domaine du son professionnel subit un transfert progressif de l'analogique vers le tout numérique. Le même mouvement s'est amorcé pour les signaux vidéo. C'est ainsi qu'on voit apparaître des équipements professionnels pour une chaîne numérique complète de production et de distribution.

En raison de leur complexité et de leur coût, les magnétoscopes numériques restent réservés aux professionnels. Le tout premier format, mis au point par SONY, est le format D-1 sur bande magnétique, qui enregistre les signaux en composantes numériques avec un débit de 270 Mb/s conformément à la norme de studio numérique CCIR-601. D'autres formats ont fait suite (D-2, D-3 et D-5), alors que, dans le même temps, SONY proposait un Betacam numérique.

DVD. Initialement appelé Digital Video Disc, ce disque existe en plusieurs versions : une version couche unique avec une capacité de 4,7 giga octets (GB), une version double couche d'une capacité de 8,5 GB, enfin une version double face double couche d'une capacité de 17 GB. Avec une telle capacité, le DVD est censé devenir le nouveau support mondial pour la diffusion de programmes. Comme pour mieux étayer cette conviction, on a abandonné le dénomination vidéo pour Versatile. Ainsi, il y aurait des DVD audio, des DVD vidéo ou des DVD-ROM. En théorie, le DVD devrait contenir l'équivalent de sept à quatorze CD actuels, une capacité capable de promouvoir aisément le DVD. Toutefois, les enjeux économiques sont tels qu'il n'est pas sûr que les diffuseurs de vidéo désirent conserver une approche aussi ouverte. En cause, la facilité de copiage d'une information numérique et la volonté des diffuseurs de segmenter le marché, ce qui devient difficile avec une norme unique. Du côté des constructeurs, on est persuadé que le DVD-ROM aura un succès certain.

Procédés de stockage informatiques

Tous les supports de stockage informatiques sont basés sur la technologie du disque optique compact, connu sous le nom de **CD-ROM** (Read Only Memory). Il constitue le produit phare du multimédia et il reste indissociable de son émergence.

L'une des raisons du succès du CD-ROM tient à son importante capacité de stockage. D'autre part, la facilité de pressage et le coût peu élevé du support l'ont désigné pour être l'un des vecteurs du multimédia, si gourmand en volume de données.

CD-ROM Sur un CD Audio, le signal est enregistré sous forme binaire. Or c'est sous cette forme que le monde informatique stocke ses données, d'où l'idée de reprendre le support.

Pour préserver les investissements consentis par les usines de pressage, les caractéristiques géométriques du **CD-ROM** sont identiques à celles du CD Audio mais l'organisation des données diffère.

Sur un CD-ROM, les données sont organisées en fichiers comme sur une disquette ou sur un disque dur. La norme ISO 9660, qui a fait suite au livre jaune (**Yellow Book**) définissant le CD-ROM au départ, a défini une organisation des fichiers indépendante du système d'exploitation de l'ordinateur.

Compte tenu du volume de données et donc du nombre de fichiers, les techniques habituelles de recherche et de navigation se sont rapidement avérées inefficaces. Aussi, dès le chargement d'un CD-ROM dans son lecteur, la totalité d'une table des matières du disque est chargée en mémoire vive. La recherche s'effectue alors dans cette mémoire car l'accès y est plus rapide.

La norme ISO 9660 étant muette à ce sujet, l'organisation interne des fichiers d'un CD-ROM reste liée au logiciel exploitant les données du CD-ROM. Cela nuit à l'universalité de la mise en œuvre et contredit donc le principe d'un standard. C'est la raison qui a poussé les constructeurs à définir des normes de CD-ROM enrichies.

CD-ROM XA XA pour eXtended Architecture. Ce format a été proposé par PHILIPS, MICROSOFT et SONY ; il complète la norme ISO 9660 de plusieurs manières. D'une part, il permet l'entrelacement des données pour des fichiers de diverses natures. D'autre part, les fichiers sont stockés sous forme compressée. Pour le son par exemple, le format prévoit de recourir à l'ADPCM.

Le format CD-ROM XA a subi diverses améliorations destinées à le rendre plus multimédia encore, pour aboutir au format CD-ROM XA2. Le format CD-ROM XA2 est compatible avec le Photo CD.

Photo CD Le Photo CD est issu de la rencontre entre les techniques photographiques et le CD-ROM. Dans ce but, KODAK a défini différents formats de numérisation et de stockage des photos sur ce support.

La lecture des Photo CD a d'abord été conçue pour la visualisation d'images sur un écran de télévision. Le format de référence des images enregistrées sur Photo CD est de 768x512 pixels, ce qui correspond à la définition maximale sur un écran de télévision, soit 768x576 pixels, ramené au rapport homothétique des images 24x36. À partir de ce format, quatre formats sont définis :

Nom	Qualité	Résolution	Bits par pixel	Taille	Base/16
Prévisualisation	192x128	24	72 kB	Base/4	Basse vidéo
384x256	24	288 kB	Base	Vidéo	768x512
24	1,1 MB	4Base	HDTV	1536x1024	4
0,5-1,1 MB	16Base	Film	3072x2048	4	2-4 MB

Chaque image enregistrée sur le Photo CD est stockée sous les cinq formats. Le format de base et les formats réduits sont enregistrés sans compression, pour conserver une vitesse d'affichage suffisamment rapide. Les formats supérieurs sont enregistrés par différence avec le format

tout juste inférieur, par un codage sans perte. Pour chaque image, la taille totale atteint environ 6 MB, soit une capacité d'environ 100 photos par CD.

CD-I Le lancement du CD-I marque une nouvelle étape de l'intégration du CD-ROM dans l'univers du multimédia. En effet, c'est à la fois un support de stockage avec une standardisation très poussée pour les données graphiques, visuelles et sonores, ainsi qu'un système d'exploitation avec un processeur spécifique et ses circuits de gestion annexes, le tout intégré avec un lecteur de CD-ROM.

L'image qui est montrée à l'écran résulte de la superposition de quatre plans. Le premier plan est celui du curseur : sa taille est limitée. Viennent ensuite deux plans dont l'information est de type graphique. Il s'agit soit de texte, de graphiques ou d'images. Ces deux plans se caractérisent par une valeur de transparence. Si cette valeur n'est pas nulle, les pixels transparents laissent apparaître les valeurs d'un arrière-fond qui constitue le quatrième plan. Ces plans d'affichage sont prévus de manière à exploiter des effets de superposition, d'incrustation ou de titrage entre des images de formats différents.

Les phases de création d'un CDI sont reprises à la figure 4.9.

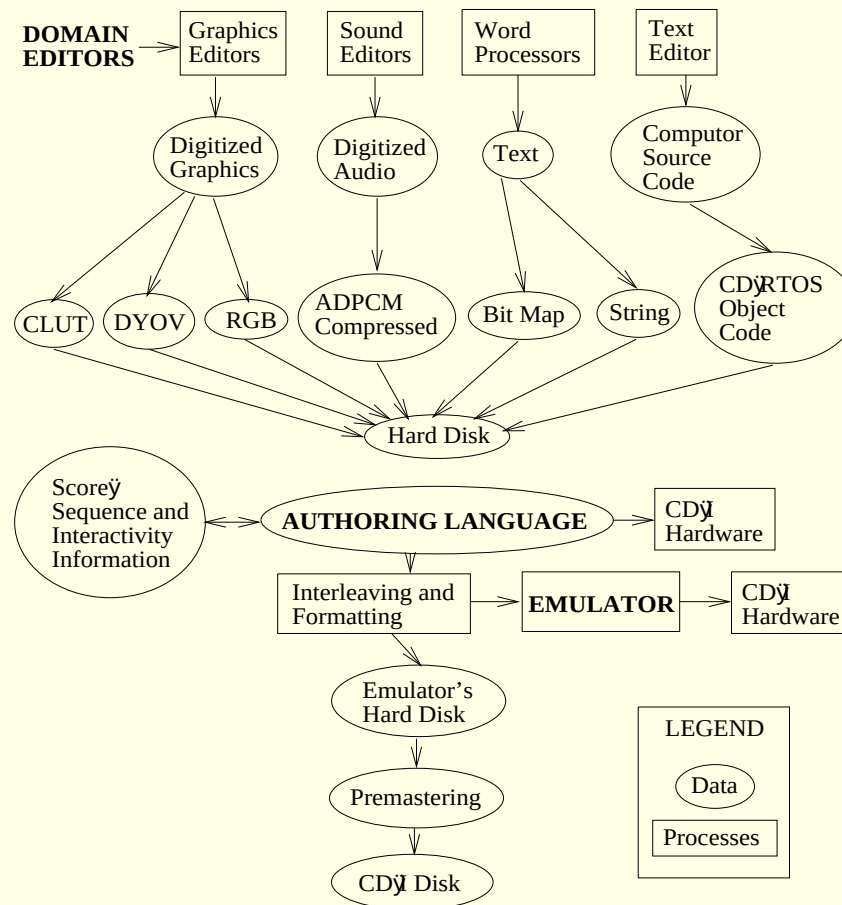


FIG. 4.9 – Étapes dans la production d'un CD-I.

DVD-ROM. Le DVD-ROM est la variante du **DVD** pour le stockage de données informatiques. Le DVD est commenté abondamment à la page 168.

4.2 Informatique de réseau

Dans le monde professionnel, le multimédia ne se conjugue plus sur un ordinateur isolé ; la machine est reliée à un réseau de manière à permettre des échanges de données. On voit même apparaître des logiciels qui donnent la possibilité à plusieurs personnes de travailler simultanément sur un document unique.

La majorité des systèmes ouverts (c'est-à-dire non propriétaires) sont articulés sur le principe du client-serveur. Dans ce type d'architecture, le client émet des requêtes sur le réseau en les adressant à une machine spécifique. La machine en question, appelée serveur, se charge de répondre au client. Prenons l'exemple d'un programme qui accède à des données se trouvant ailleurs, sur le réseau. Dans ce cas, le gestionnaire des fichiers accessibles sur le réseau agit comme un serveur qui ne répond qu'aux requêtes que lui envoient les clients, concernant les fichiers. C'est toujours le client qui initie un échange d'information. Un autre exemple, bien connu des "surfeurs" d'Internet, est le logiciel de navigation. Ce logiciel est un client qui envoie des requêtes vers un serveur.

Les protocoles de réseau dont nous avons parlé précédemment fonctionnent généralement de cette manière ; jusqu'au paroxysme, avec la nouvelle mode du Network Computer (NC), encore appelé WebPC ou NetPC, qui disposent de faibles ressources locales mais utilisent abondamment une interface réseau pour aller y chercher toutes les applications. Pour épauler le développement de NC, la firme SUN a même développé un langage de programmation et environnement original, appelé **Java**. Avec ce langage, écrire une application qui permet d'envoyer un message électronique est affaire d'une trentaine de lignes de code. Les versions 1.x de l'environnement de développement (Java Development Kit) intègrent toute une série de bibliothèques afin de faciliter le développement d'applications en réseau.

Le dessin de la figure 4.10 reprend les éléments de l'architecture Java. Il permet de comprendre les objectifs du langage.

En fait, le langage a été conçu pour permettre de distribuer des applications dans un réseau. Pour cela, il a tout d'abord fallu garantir l'indépendance vis à vis du matériel ; c'est la fonction de la machine virtuelle. Mais plus encore, un programme ne peut pas avoir un comportement inapproprié, comme lire des données sur le disque dur. En d'autres termes, l'action du logiciel doit être limitée à des zones de mémoire. Le langage Java est tel qu'il offre un niveau élevé de sécurité ; ce n'est guère le cas du langage ActiveX développé par MICROSOFT. Java est donc une bonne solution pour le développement d'applications en réseau.

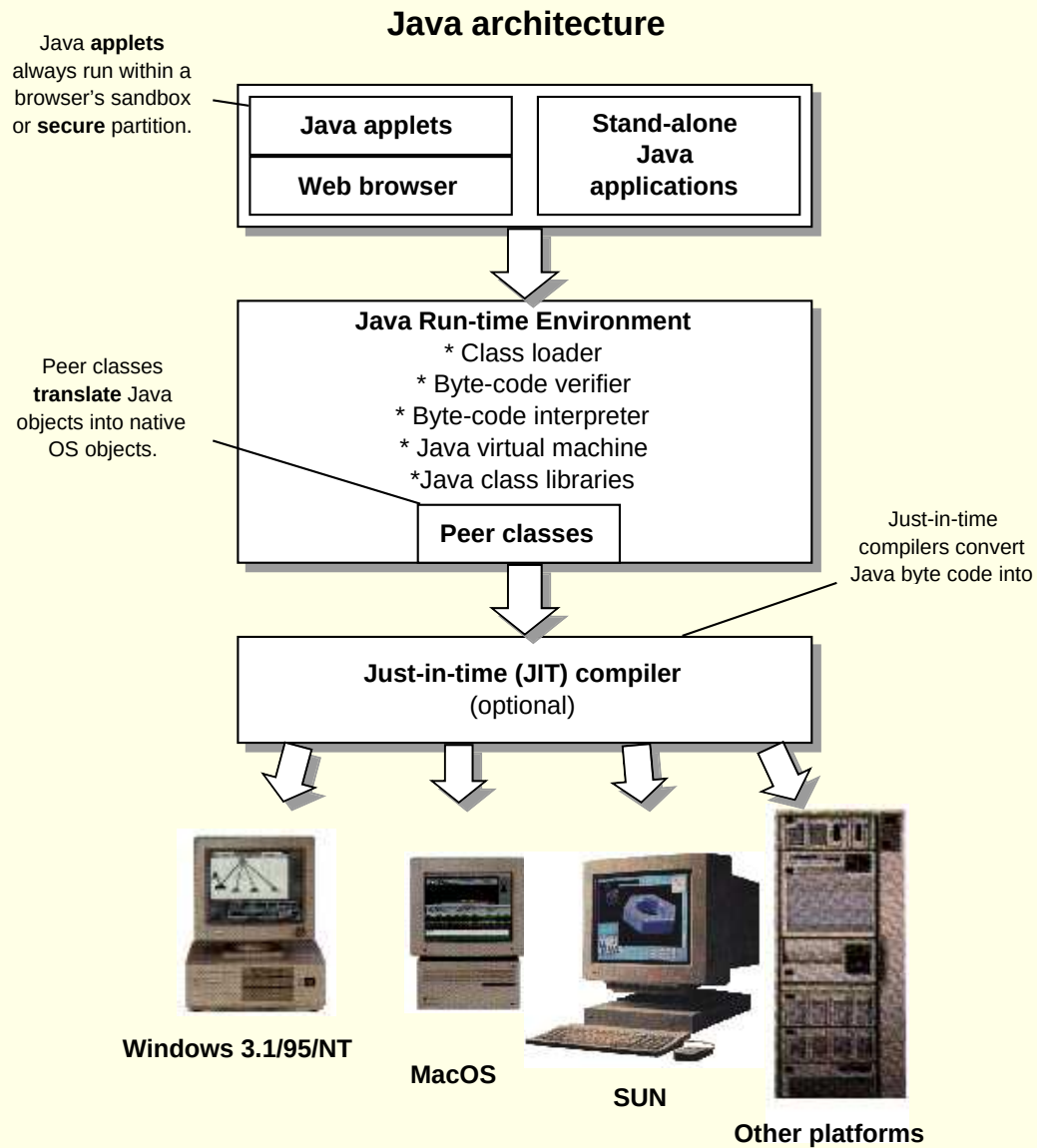


FIG. 4.10 – Éléments de l'architecture Java.

Bibliographie

- [1] S. Collin. Le multimédia sur PC. Dunod, Paris, 1994.
- [2] E. Holsinger. How multimedia works. Ziff-David Press, Emeryville, California, 1994.

Index

A

AC-3, 61
ADSL, 121, 138
AM, 95
anonymat, 144
ASCII, 135
authentification, 142, 143

B

bande
 de base, 93
bande passante, 24
bande vocale, 107
Betacam, 166
bit
 d'information, 53
bitstream, 67
BMP, 70
bridge, 125
bruit, 40

C

CCIR-601, 168
CD, 166
CD Audio, 167
CD-I, 170
CD-ROM, 168
CD-ROM XA, 169
CDMA, 98
certification, 5
CGM, 71
CIE, 27
circuit, 107
CLUT, 35
CMY, 33
CMYK, 33

commutateur, 125
confidentialité, 143
connection oriented, 87
connectionless, 87
couche, 86
couleur, 26
cryptage, 141
cryptographie, 141
Cyan, 33

D

débit, 50
décibel, 40
décryptage, 141
datagramme, 89
DAVIC, 7
DCC, 168
denial of service, 155
disponibilité, 155
distribution, 138
document multimédia, 3
DPCM, 47
DVD, 168
DVD-ROM, 171
DVI, 73
DWDM, 98

E

échantillonnage, 42
efficacité spectrale, 93
EPS, 72
ESMTP, 133
Ethernet, 125, 128
ETSI, 6

F

FD/CDMA, 103

FD/TDMA, 103
FDD, 103
FDD/TDD, 103
FDM, 98
FDMA, 98
fidélité, 51
FlashPix, 71
flux, 67
Fourier, 24
FTP, 90, 133, 135

G

G.72x, 59
GIF, 70, 135
GPRS, 117
GSM, 114, 128

H

H.26x, 65
H323, 59
handover, 116
HDTV, 37
Hertz, 22
HLR, 116
HTTP, 131, 133
hue, 29
Huffman, 56
hypermédia, 3
hypertexte, 3
Hytime, 76

I

IEEE, 6
IMAP4, 133
information, 51, 52
intégrité, 143
intensité, 26
interactivité, 3, 138
Internet, 9, 89
InterNIC, 11
interpolation, 50
ISO, 6
ITU, 6

J

Java, 171

L

LAN, 121, 128
level, 68
lien, 3
luminance, 26, 29
LZW, 56

M

Magenta, 33
micro, 164
MIME, 133
modulation, 94
 AM, 95
 angulaire, 96
MPEG-1, 60
MPEG-2, 60
 level, 68
 profile, 68
MPEG-21, 69
MPEG-7, 68
MPEG-x, 65
multicast, 139
multiplexage
 en fréquences, 98
 par répartition de codes, 103
 temporel, 98, 101

N

NAS, 121
NAT, 152
Network Computer (NC), 83, 171
niveau, 68
non-répudiation, 144
normalisation, 4
norme, 2
numérisation, 39
nœud, 3

P

période, 21
PAL, 39

paquet, 107
PDF, 135
Pentium, 160
Photo CD, 169
PICT, 70
pixel, 160
pont, 125
POP, 121
POP3, 133
porteuse, 94
PostScript, 72
probabilité, 52
procotole, 86
profil, 68
profile, 68

Q

qualité, 51
 vidéo, 138
quantification, 45

R

réalité
 augmentée, 78
 virtuelle, 78
rapport signal à bruit, 40
reconnaissance vocale, 79
repli de spectre, 44
RGB, 27
RLC, 56
RNIS, 128
ROI, 65
routage, 87
RTP, 133

S

SAP, 86
saturation, 29
service, 86
Shannon, 44
signature numérique, 144
SMS, 117
SMTP, 133
SNMP, 133

SPIFF, 71
standard, 2
standardisation, 4
SVGA, 160
switch, 125
synthèse vocale, 79

T

taux de compression, 55
TCP, 131
TDD, 103
TDM, 98
TDMA, 98
teinte, 29
ton, 21
trame, 102
transcodage, 73

U

unicast, 139

V

VHS, 166
vidéo, 37
vidéoconférence, 79
VLR, 114

W

W3C, 14
WAP, 7
WDM, 98
WebTV, 138

Y

YCbCr, 33
YIQ, 33
YUV, 33

Glossaire

- ADSL** Asymmetric Digital Subscriber Line. Technologie permettant la transmission de signaux numériques à haut débit (jusqu'à plusieurs Mégabits par seconde) sur une paire torsadée. Le débit est asymétrique ; il est plus important du central vers l'abonné qu'en retour. Le système ADSL est compatible avec le signal téléphonique. 69, 74, 80, 83
- AES** Advanced Encryption Standard. Standard de chiffrement qui utilise l'algorithme Rijndael inventé par deux belges (V. Rijmen et J. Daemen). À l'instar du DES, cet algorithme sert au chiffrement mais il permet de travailler avec des blocs de 128 bits et il supporte des clés de 128, 192 ou 256 bits, contrairement au DES qui travaille avec des blocs de 64 bits et une clé longue de 56 bits. 91
- ALG** Application Level Gateway. Filtre de sécurisation pour réseaux à technologie IP, capable de vérifier les paramètres au niveau des différentes couches (y compris au niveau applicatif). 94
- aliasing** Terme anglais désignant le repli de spectre. L'effet d'aliasing se manifeste par l'apparition de fausses fréquences lors de l'échantillonnage d'un signal lorsque la fréquence d'échantillonnage est inférieure au double de la plus haute fréquence contenue dans le signal échantillonné. 31
- AM** Amplitude Modulation Technique de modulation qui consiste à modifier l'amplitude d'une porteuse sinusoïdale en fonction de l'évolution temporelle du signal à transmettre (appelé signal modulant). 19, 67
- ASCII** American Standard Code for Information Interchange. Code sur 7 ou 8 bits, utilisé en informatique pour représenter un caractère alphanumérique (128 ou 256 combinaisons possibles). 53, 85
- ATM** Asynchronous Transfer Mode. Une technologie de transmission de données à haut débit, qui repose sur la commutation de cellules longues de 53 bytes. Cette technologie a un rôle similaire à celui du protocole IP. 7, 64, 83
- bande passante** Plage de fréquences qui peuvent être transmises correctement à travers un canal de transmission. Elle s'exprime en Hertz (Hz). Par exemple, la bande passante d'un signal téléphonique analogique va de 300 à 3400 Hz. 21
- bit** Terme résultant de la contraction de **binary digit** (chiffre binaire). Unité fondamentale de mesure de l'information (numérique). En informatique, un bit vaut 0 ou 1. 32
- Bluetooth** Ensemble de spécifications "ouvertes" de connexion sans fil entre équipements personnels et à courte distance. 72, 82
- BMP** Bitmap. Format d'image qui est à l'origine le format d'image utilisé dans le système d'exploitation Windows (de Microsoft) ; ce format encode les valeurs des pixels sous leur forme naturelle, séquentiellement RGBRGB... 49
- broadcast** Mode de transmission dans lequel un émetteur transmet vers plusieurs destinataires généralement inconnus. En français, on parle de diffusion. 88
- bruit** Perturbation d'une transmission susceptible de dégrader le signal utile transmis. Le bruit peut par exemple s'ajouter au signal utile (bruit additif) ou perturber la phase d'un signal modulé (bruit de phase). 29

-
- byte** Le byte, ou octet, est une mesure de l'information binaire. 1 byte vaut 8 bits. 32
- CCIR601** Norme de télévision numérique, ayant été développée dans le but d'uniformiser les supports d'images numériques destinées à la télévision. 47
- CD-ROM** Compact Disk Read Only Memory (disque compact à mémoire morte) Il s'agit d'un support de stockage au format normalisé. Les CD-ROM sont assez populaires dans le domaine de la production multimédia interactive, qui fait simultanément appel à l'audio, à l'image et au texte. 108, 109
- CDM** Code Division Multiplexing. Technique de partage des ressources de transmission par répartition de code. Chaque utilisateur se voit attribuer un code par lequel le signal est étalé avant transmission. Le recours à un code différent par utilisateur permet de limiter les interférences entre signaux. 71
- CDMA** Code Division Multiple Access. Technologie de transmission numérique permettant la transmission de plusieurs flux simultanés par répartition de code. Cette technologie permet une utilisation permanente de la totalité de la bande de fréquences allouée à l'ensemble des utilisateurs. La technologie prévoit un mécanisme d'accès aux ressources. 69
- CGI** Common Gateway Interface. Ensemble de spécifications permettant d'interfacer des applications à un serveur Web. 55
- chiffrement** Terme qui désigne l'action de chiffrer un texte, des informations ou des données. Le chiffrement consiste à transformer un texte de sorte qu'il faille une clé pour comprendre le message. 89
- CHTML** compact HTML Sous-ensemble du langage HTML développé dans le cadre du système d'accès à Internet mobile i-mode. Le langage définit aussi une série de balises propres ainsi que des images spécifiques. 54, 85
- CIE** Commission internationale de l'éclairage. Organisme qui a, entre autres, défini un système de représentation à partir de trois couleurs primaires. 22
- CIF** Common Intermediate Format. Format d'image utilisé dans les systèmes de visiophonie et dont la taille est de 352X288 en 32000 couleurs. 46
- circuit** Voie de transmission physique entre deux points ou plus. Un circuit est établi pour la totalité de la durée de transmission. L'établissement et le relâchement du circuit s'effectuent par signalisation. 60, 61
- CLUT** Color Look Up Table. Liste de couleurs, ainsi que leur numéros d'index associés, utilisée dans le rendu d'images 8 bits. 27
- CMYK** Cyan-Magenta-Yellow-Black. Système de quatre couleurs de base utilisé par les imprimantes. Non approprié pour concevoir des pages web graphiques. (RGB est le système de couleurs utilisé pour les pages web graphiques). 26
- codage** Technique de numérisation consistant à affecter une valeur numérique aux échantillons obtenus après échantillonnage du signal analogique. Le codage peut également désigner un changement de représentation de l'information numérique. 32, 59
- compression** Procédé permettant de réduire le volume (en bits) ou le débit (en bits par seconde) des données numérisées (parole, image, texte, etc). Un signal numérique non com-

- primé représente généralement un volume trop important pour les applications courantes. 34, 35, 37
- CSS** Cascading Style Sheets. Addition au langage HTML permettant de contrôler la présentation d'un document incluant des couleurs, de la typographie, nécessitant l'alignement d'images et de textes, ... 54, 55
- débit** Nombre de bits par seconde d'un signal numérique. Cette grandeur est utilisée notamment lorsqu'il s'agit de transmettre un signal numérique. 33
- déchiffrement** Action consistant à retrouver l'information en clair à partir de données chiffrées. Le déchiffrement est une action légitime du destinataire du message chiffré, contrairement au décryptage. 89
- décibel** Unité, notée dB, servant à mesurer la puissance. 30
- décryptage** Action consistant à retrouver l'information en clair à partir de données chiffrées sans aucune légitimité, contrairement au déchiffrement. Un bon système doit permettre le déchiffrement mais rendre le décryptage difficile. 89
- DAVIC** Digital Audio Visual Council. Association cherchant à promouvoir les nouveaux services et applications audiovisuels, en éditant des spécifications d'interfaces et de protocoles, qui permettrait d'améliorer l'interopérabilité entre pays et applications. 7, 43
- DCT** Discrete Cosine Transform. La transformée en cosinus discrète est une opération d'analyse fréquentielle proche de la transformée de FOURIER. On l'utilise principalement pour le codage d'images. 44, 46
- DES** Data Encryption Standard. Le DES est un système de chiffrement par blocs ; il chiffre les données par blocs de 64 bits. Le chiffrement et le déchiffrement utilisent tous deux le même algorithme avec un clé (secrète) d'une longueur de 56 bits. 91
- DHTML** Dynamic HTML. Intégration de langages de script (principalement de javascript), de feuilles de style (CSS) et d'un modèle de description d'objets (DOM) servant notamment à faciliter leur positionnement. Avec DHTML, le contenu peut bouger au travers de l'écran et répondre aux demandes de l'utilisateur. 54
- DICOM** Digital Imaging and Communications in Medicine. Format de fichier standard utilisé dans le monde médical. 57
- diffusion** Mode de transmission dans lequel un émetteur transmet vers plusieurs destinataires généralement inconnus. En anglais, on parle de broadcast. 47
- divX** Format de compression de séquences audio-visuelles largement inspiré de la norme de compression MPEG-4. 48
- DNS** Domain Name Service. Service disponible sur Internet, permettant la conversion d'un nom en une adresse IP. 64
- DOM** Document Object Model. Standard proposé par le W3C destiné à fournir un ensemble d'objets capables de représenter les composantes HTML ou XML d'un document, un modèle permettant la combinaison de ces objets et une interface d'accès à ces objets. 55
- DPCM** Differential Pulse Code Modulation. Nom américain pour désigner la modulation par impulsions codées différentielle. Cette technique, utilisée principalement en téléphonie, convertit un signal analogique en un signal de téléphonie numérique à 32 [kb/s]. Cette technique code un symbole par différence par rapport au symbole précédent. 33

-
- DTMF** Dual Tone MultiFrequency. Système de signalisation utilisé pour la numérotation sur les réseaux téléphonique analogiques. 73
- Duplex** Terme utilisé en télécommunications pour désigner une communication bidirectionnelle. 71
- DVB** Digital Video Broadcast. Standard de diffusion de télévision numérique. Il existe en deux versions : une version pour la diffusion terrestre et une version pour la diffusion par satellite. Le standard incorpore, en grande partie, la norme de compression MPEG-2. 47, 76
- DVD** Digital Versatil Disk. Support très répandu pour la diffusion d'applications multimédia, pouvant contenir de 4,38 à 17 GBytes de données. 108, 111
- entrelacement** Processus qui consiste à combiner deux images ne contenant respectivement que les lignes paires ou impaires pour donner l'illusion du contenu. Ce processus est utilisé à l'intérieur des formats de télévision analogique PAL, NTSC et Sécam. 28
- entropie** Notion utilisée en théorie de l'information qualifiant l'état de désordre d'une source d'information. Plus l'entropie d'une source est élevée, plus il est difficile de prévoir l'information générée par cette source. 36
- ESMTP** Extended Simple Mail Transfer Protocol. Version étendue du protocole SMTP de transfert de courriers électroniques. Bon nombre de serveurs de mails implémentent plutôt l'ESMTP aujourd'hui. 85
- Ethernet** Protocole de réseau local (LAN) qui utilise une topologie de bus ou d'étoile et permet des transferts de données à 10 [Mb/s]. Il existe des versions plus rapides : Fast Ethernet (100 [Mb/s]) et Gigabit Ethernet (1000 [Mb/s]). 62, 81, 83
- ETSI** European Telecommunications Standards Institute. Groupe de normalisation européen créé à l'initiative du Conseil des ministres. Ce groupe est spécialisé en télécommunications. On lui doit les normes liés au GSM. 41
- FDM** Frequency Division Multiplexing. Mécanisme de répartition de ressources par multiplexage fréquentiel. 69
- FDMA** Frequency Division Multiple Access. Technique de répartition de ressources par multiplexage fréquentiel. Cette technique prévoit un mécanisme d'accès aux ressources. . . . 69
- firewall** Hardware ou software limitant l'accès à un ordinateur au travers d'un réseau. Permet d'éviter que des pirates ne s'introduisent dans des systèmes privés. 96
- FM** Frequency Modulation. Modulation de fréquences. Technique par laquelle on module la fréquence instantanée d'une porteuse au moyen du signal modulant à transmettre. . . 19, 21, 68
- FNT** Firewall and NAT Transversal. Solution de sécurisation d'un réseau à technologie IP basé sur la combinaison d'un firewall et d'un traducteur d'adresses (NAT). Cette solution peut coexister avec des filtres agissant au niveau applicatif. 95
- FTP** File Transfer Protocol. Protocole permettant de transférer des fichiers, via l'internet, d'un ordinateur à un autre. FTP est un système client/serveur. 62, 85
- gamma** Se réfère à la luminosité de l'écran d'un ordinateur. En termes techniques, il s'agit de l'ajustement de la relation non-linéaire entre une tension électrique et l'intensité lumineuse.

- 26
- GIF** Graphic Interchange Format. Format d'images couramment utilisé sur le web, basé sur le schéma de compression LZW. Possibilité de décompression progressive, permettant de voir l'aspect de l'image avant décompression complète. 45, 50, 85
- goodput** Débit reprenant la partie utile du flux associée à une transmission de données. Dans le monde Internet, c'est la taille en bits des paquets reçus moins la taille des en-têtes TCP et IP. 86
- GOP** Group of Pictures. Terme utilisé dans la norme MPEG-2 pour désigner un groupe d'images successives telle que la première est entièrement codée, tandis que les suivantes ne le sont qu'en fonction de la première. Un GOP est typiquement composé de 16 images, ce qui correspond approximativement à une demi-seconde de visualisation. 46
- GPRS** General Packet Radio Service. Technologie de transmission par paquets facilitant l'accès à Internet à haut débit par GSM. Le débit peut varier de 56 jusqu'à 115 $[kb/s]$. Il est également possible d'établir des connexions permanentes. 71, 77
- GPS** Global Position System. Système de positionnement basé sur des messages émis par des satellites. La version grand public actuelle permet un positionnement de l'ordre de la centaine de mètres. 76
- GSM** Global System for Mobile Communications. Standard de téléphonie mobile adopté en Europe, en Asie et en Australie. 5, 41, 64, 71, 72, 76, 83, 84
- H.323** Recommandation de l'ITU-T pour la transmission par paquets de signaux multimédia. La norme rassemble le protocole H225 pour la gestion de la communication, le protocole H245 pour le contrôle des flux et d'autres, comme le H263, pour le codage des signaux. 41
- H261** Norme développée par l'ITU spécifiquement pour la visioconférence. Le débit d'un flux H261 est un multiple $p \times 64[kb/s]$, avec p allant de 1 à 32. 87
- handover** Terme désignant le mécanisme par lequel un mobile peut transférer sa connexion d'une station de base vers une autre ou, sur la même station, d'un canal radio vers un autre. 76
- HDSL** High bit-rate Digital Subscriber Line. Technique de transmission à haut débit sur cuivre (1,544 et 2,048 $[Mb/s]$ sur une portée de 4,6 $[km]$) en full duplex à la différence de l'ADSL. 80
- HDTV** High Definition Television. Format d'images résultant de l'extrapolation du format CCIR. Peut être de deux types (5/4) ou (16/9). 28, 87
- HLR** Home Location Register. Base de données centrale d'un réseau GSM contenant toutes les informations relatives aux abonnés du réseau (profil, position actuelle, ...). 76
- HTML** Hypertext Markup Language. Dérivé du standard SGML, s'est imposé comme document web. 8, 12, 54, 84, 85
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol. Protocole définissant comment les pages web sont transférées entre un serveur et un navigateur internet. 84, 85
- Hz** Hertz. Unité de mesures de la fréquence. 5 Hz signifie une fréquence de 5 cycles par seconde. 18

-
- i-mode** Système de transmission mobile permettant l'accès à Internet. Ce système a été développé par NTT DoCoMo ; il est basé sur le langage de balisage cHTML. 54, 85
- IBAN** International Bank Account Number. Numéro de banque standardisé par l'ISO pour faciliter les paiements transfrontaliers. 8
- IDEA** International Data Encryption Algorithm. Algorithme de chiffrement à clef secrète (utilisé dans le programme de signature PGP). IDEA est un algorithme de chiffrement par blocs ; il manipule des blocs de texte en clair de 64 bits. La clef est longue de 128 bits. Le même algorithme est utilisé tant pour le chiffrement que pour le déchiffrement. 91
- IETF** Internet Engineering Task Force. Groupe de normalisation chargé d'élaborer les standards utilisés pour le réseau Internet. 12
- iHTML** inline HTML. Langage de programmation évolué destiné à la création de pages Web dynamiques. Il se présente comme une extension du langage HTML, capable de fournir les fonctions du javascript et CGI. Les instructions de l'iHTML sont exécutées du côté du serveur Web, à l'instar du PHP. 55
- IMAP4** Internet Message Access Protocol version 4. Protocole Internet, basé sur la suite TCP/IP, destiné au téléchargement des mails électroniques (e-mail). La version 4, IMAP4, est similaire au protocole POP3 mais offre une série de fonctions additionnelles, comme la gestion de mots-clés ou le téléchargement local sélectif de certains mails à partir du serveur. 85
- inter** Terme utilisé en compression vidéo pour désigner un mode de compression entre images successives. 46
- intra** Terme utilisé en compression vidéo pour désigner des éléments de compression utilisés pour encoder une image, sans faire référence aux images antérieures ou ultérieures. 46
- IP** Internet Protocol. Protocole de transmission de données de niveau 3 (couche réseau). Il s'agit du principal protocole (avec TCP) utilisé pour les communications par Internet. 57, 60, 62
- ISBN** International Standard Book Number. Identifiant des publications littéraires (souvent apposé au dos de chaque livre). 8
- ISDN** Integrated Services Digital Network Désigne le réseau téléphonique numérique RNIS. 74
- ISO** International Organization for Standardization. Fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation de quelque 130 pays, à raison d'un organisme par pays. Elle a pour mission de favoriser le développement de la normalisation et des activités connexes dans le monde, en vue de faciliter entre les nations les échanges de biens et de services et de développer la coopération dans les domaines intellectuel, scientifique, technique et économique. Les travaux de l'ISO aboutissent à des accords internationaux qui sont publiés sous la forme de normes internationales. 8, 44, 47, 60
- ITU** International Telecommunications Union. Groupe de normalisation spécifique aux télécommunications, rattaché aux Nations-Unies comme agence spécialisée. C'est la section ITU-R qui alloue les bandes de fréquences. 40, 44
- Java** Langage de programmation orienté objet développé par la firme Sun Microsystems. Ses

-
- plus contributions au monde de l'internet sont les applets java. 54, 111
- javascript** Langage orienté client permettant d'intégrer aux pages web des comportements particuliers et de l'interactivité. Très peu de liens avec Java. 54, 55
- JPEG** Joint Photographic Experts Group. Format d'images présentant de la compression avec perte. Efficace pour les images du type photographique. 6, 44, 46, 85
- JPEG2000** Joint Photographic Experts Group 2000. Norme de compression et format pour la compression d'images, faisant suite à la norme JPEG, qui sera basée sur les ondelettes. Cette norme étend les fonctionnalités habituellement rencontrées en compression d'images ; elle permet, par exemple, le passage d'une compression avec pertes à une compression sans perte ainsi que la compression d'images composées de photos et de texte. Sa parution est prévue pour 2001. 45
- LAN** Local Area Network. Désigne un réseau local, c'est-à-dire un réseau privé ne dépassant pas quelques kilomètres. 81, 83
- LEOS** Low Earth Orbital Systems. Système satellitaire dans lequel les satellites membres tournent sur des orbites basses, entre 700 et 1300 km. 75
- LMDS** Local Multipoint Distribution System. Méthode d'accès hertzienne sur la boucle locale utilisant des fréquences très élevées dans la bande Ka, c'est-à-dire au-dessus de 25 GHz, et permettant de desservir des cellules fixes. Les terminaux ne peuvent sortir de la cellule sans couper la communication. 79
- MD5** Message Digest Acronyme utilisé en cryptographie pour désigner un algorithme de hachage dont la fonction est la production d'un résumé d'un message. Ce résumé peut par exemple être utilisé pour vérifier l'intégrité du message à la réception. 85, 93
- MHEG** Multimedia & Hypermedia Expert Group. Groupe de l'ISO ayant défini un langage permettant la représentation et le codage d'applications et de documents multimedia. . . 55
- MIDI** Musical Instrument Digital Interface. Standard adopté par l'industrie du disque pour contrôler des équipements qui émettent de la musique (synthétiseurs, cartes son). . 18, 48
- MIME** Multipurpose Internet Mail Extensions. Spécification pour le formatage de messages non écrits en ASCII. Elle permet l'identification de différents types de fichiers lors d'envois sur Internet. Il existe de nombreux types MIME pré-définis comme pour les images GIF ou les fichiers PDF. 85
- MMS** Multimedia Messaging Service. Procédé permettant l'envoi et la réception, par téléphone mobile, de textes mis en page, de graphiques, d'images et de séquences audio ou vidéo. 77
- modem** modulateur démodulateur. Appareil transmettant des signaux numériques sur le réseau téléphonique analogique. Offre les fonctions de numérotation, de connexion, et éventuellement de compression et de correction d'erreur. 73
- modulation** Technique consistant à modifier l'amplitude, la phase ou la fréquence d'une onde sinusoïdale, appelée porteuse, au moyen d'un signal à transmettre, appelé signal modulant. Grâce à la modulation, on peut translater le contenu fréquentiel d'un signal modulant ; ce procédé permet de partager le spectre de fréquences entre plusieurs utilisateurs. Pour retrouver le signal modulant original, il faut procéder à une démodulation. 21, 32, 59, 64

-
- MP3** MPEG-1 audio layer 3. Couche 3 (s’occupant de la compression de la bande son associée aux images numériques télévisées) de la partie audio de la norme MPEG-1 qui a été rebaptisée pour plus de simplicité MP3. 8, 43
- MPEG** Moving Picture Experts Group. Sous-groupe de l’ISO/IEC chargé du développement de standards pour la représentation de séquences audiovisuelles codées. De son travail sont issues les normes MPEG-1, MPEG-2 et MPEG-4. 2, 6, 8, 46
- MPEG-1** Moving Picture Experts Group 1. Norme de compression audio-visuelle développée par le groupe MPEG de l’ISO. Cette norme vise à fournir un signal comprimé à 1,5 [Mb/s]. 41, 43, 46, 47
- MPEG-2** Moving Picture Experts Group 2. Norme de compression audio-visuelle développée par le groupe MPEG de l’ISO. Cette norme étend la norme MPEG-1 ; elle vise à fournir un signal comprimé de qualité équivalente au PAL, voire à la HDTV. 47
- MPEG-4** Moving Picture Experts Group 4. Norme pour la compression des données audiovisuelles. Elle couvre principalement les débits inférieurs à 1 [Mb/s] et offre des fonctionnalités supplémentaires par rapport aux normes antérieures. 47
- MPEG-7** Moving Picture Experts Group 7. Future norme de description des documents multimedia. 48
- multiplexage** Terme technique utilisé en télécommunications pour désigner un procédé qui consiste à partager des ressources entre plusieurs utilisateurs. Dans un autre contexte et lorsqu’on parle de signaux, il s’agit d’une manière de combiner plusieurs signaux. 56, 64, 69
- NAS** Network Access Server. Serveur d’accès. Élément mis en place par un fournisseur d’accès à Internet pour terminer une connexion initié par le modem d’un utilisateur. Un serveur d’accès à Internet est constitué d’une cascade de modems. 95
- NAT** Network Address Translation. Nom désignant le mécanisme de remplacement d’une adresse IP en une autre adresse IP à l’intérieur d’un paquet. 94
- norme** Document établi par consensus et approuvé par un organisme de normalisation reconnu (ISO, ETSI, ...). On distingue parfois une norme d’un standard, qui lui fait plutôt référence à une solution propriétaire s’étant imposée sur le marché. 4
- NTSC** National Television Systems Committee. Comité qui a normalisé le système de couleur utilisé pour la télévision analogique aux États-Unis. Il a donné son nom au dit format. 26, 28
- octet** L’octet, ou byte en anglais, est une mesure de l’information binaire. 1 octet vaut 8 bits. 32
- OEBPS** Open eBook Publication Structure. Spécification (de type XML) de contenu, de structure et de présentation de livres électroniques. La version 1.2 de cette spécification a été publiée en 2002. 51
- oscilloscope** Appareil permettant d’observer et d’enregistrer les variations d’un courant électrique variable en fonction du temps. 18
- OSI** Open System Interconnection. Standard de référence d’interconnexion de réseaux développé par l’OSI. Ce système est différent du modèle Internet. 60,

- période** Plus petit intervalle de temps durant lequel se reproduit un signal répétitif dit périodique. La période est l'unité temporelle élémentaire pour les signaux numériques. . . 18
- PAL** Phase Alternate Line. Format de télévision analogique utilisé dans la majorité des pays européens (hormis la France). 26, 28, 45, 87
- palette** Table indexant les couleurs des pixels d'une image. Ce principe est utilisé pour le format GIF. 27
- PCM** Pulse Code Modulation. Nom américain pour désigner la modulation par impulsions codées (MIC). Cette technique, utilisée principalement en téléphonie, convertit un signal analogique en un signal de téléphonie numérique à 64 [kb/s]. En toute rigueur, on ne devrait pas parler de modulation. 32, 40, 43
- PDF** Portable Document Format. Format de fichiers, développé par Adobe Systems, inspiré du format PostScript dédié à l'impression. Ce format est très utile pour la diffusion car il est portable et inclut des notions d'hyperliens Internet. 51, 85
- PGP** Pretty Good Privacy. Programme de chiffrement. PGP utilise IDEA pour le chiffrement, RSA (avec un clef de 512, 1024 ou 1280 bits) pour la gestion des clefs et MD5 comme fonction de hachage à sens unique. PGP comprime les fichiers avec le chiffrement. 91, 93
- PHP** Hypertext Preprocessor. Langage de programmation inséré dans du code HTML, destiné à créer des pages Web dynamiques. L'exécution se fait du côté du serveur. PHP3 est une version retravaillée du langage initial ; PHP est encore en cours d'amélioration. 55
- PHP3** Hypertext Preprocessor version 3. Langage de programmation destiné à créer des pages Web dynamiques. La version 3 est une révision majeure du langage PHP tel qu'il fut créé en 1994. PHP est encore en cours d'amélioration. 55
- pixel** Picture Element. Il s'agit d'un point d'une image échantillonnée. On parle aussi de PEL. 30
- PM** Phase Modulation. Modulation de phase. Technique par laquelle on module la phase instantanée d'une porteuse au moyen du signal modulant à transmettre. 68
- PNG** Portable Network Format. Format d'images supportant des images 8bits (PNG8) et 24bits (PNG24). Permet des niveaux de transparence variables, la correction de couleurs automatique et présente un schéma de compression sans perte. 50
- POP3** Post Office Protocol Version 3. Protocole standard pour les serveurs de courriers électroniques via l'internet. 85
- PostScript** Format de description de pages. Ce format est abondamment utilisé dans le monde de l'impression. 51
- progressif** Format de vidéo indiquant que les images successives sont envoyées en entier et non pas par lignes paires ou impaires comme pour le format entrelacé. Le terme progressif désigne également une technique de compression d'images par résolutions successives permettant un affichage progressif de l'image. 28, 44
- protocole** En télécommunications : ensemble de règles permettant le dialogue entre deux couches équivalentes d'entités différentes. 61
- proxy** Élément placé dans un réseau pour le sécuriser. Il convertit les informations fournies

par l'utilisateur et émet les informations en son nom propre.	94
PSTN Public Switched Telephone Network. Désigne le réseau téléphonique public. Terme équivalent à RTC (Réseau Téléphonique Commuté).	72
QCIF Quarter CIF. Format d'image, également appelé quart de CIF, utilisé dans les systèmes de visiophonie et dont la taille est de 176X144 en 32000 couleurs.	46
QuickTime Format de compression audio et vidéo développé par le constructeur informatique Apple et ses partenaires.	48
RFC Request For Comments Il s'agit principalement de documents décrivant les principaux standards utilisés dans le monde Internet ainsi que des règles de bonne pratique. Les RFCs sont disponibles sur Internet.	12, 13
RGB Red Green Blue. Système de représentation de couleurs au moyen de trois couleurs de base. Les téléviseurs et moniteurs représentent toutes les couleurs au moyen de 3 luminophores correspondants aux couleurs RGB. Il convient de remarquer que la plupart des écrans ne sont pas calibrés et qu'il n'y a pas de réel standard industriel unique pour la définition de ces composantes RGB, hormis celui défini par la CIE en 1931. Enfin, les composantes RGB des systèmes PAL et NTSC ne sont monochromatiques.	22, 24, 44
RNIS Réseau Numérique à Intégration de Services. Désigne le réseau téléphonique numérique. Au niveau du réseau, les signaux numériques utiles sont transmis à des multiples de 64[kb/s].	57, 64, 74, 83
ROI Region Of Interest. Région d'intérêt. Terme utilisé en traitement d'images pour désigner la zone de l'image utile pour des traitements ultérieurs.	45
routage Détermination du chemin emprunté dans un réseau maillé par un message ou un paquet de données. Dans un réseau à routage, les paquets ne suivent pas obligatoirement tous la même route et, de ce fait, peuvent arriver dans le désordre.	61
RSA Algorithme de sécurisation à clef publique, baptisé d'après le nom de ses concepteurs (RIVEST, SHAMIR et ADLEMAN). Il peut être utilisé aussi bien pour le chiffrement que pour la signature numérique.	91
RTP Real-Time Transport Protocol. Protocole de transport fournissant un support pour les applications en temps-réel. Le protocole RTP ordonnance les paquets et leur adjoint des références temporelles.	86
RTT Round-Trip Time. Intervalle de temps entre l'émission d'un paquet et la réception de l'acquis.	86
SDH Synchronous Digital Hierarchy. Hiérarchie normalisée de multiplexage pour signaux optiques. L'équivalent américain est SONET.	64
SDSL Single-line Digital Subscriber Line. Technique de transmission à haut débit sur cuivre similaire à l'HDSL.	80
SECAM Système Électronique Couleur Avec Mémoire. Format de télévision analogique utilisé en France. La majorité des pays européens utilisent plutôt le système PAL.	28
SET Secure Electronic Transaction. Système assurant certaines fonctions de sécurité pour les transactions financières par Internet.	93

-
- SGML** Standard Generalized Markup Language. Langage permettant la représentation logique d'un texte, avec inclusion possibles d'objets graphiques. Ne contient aucune information de style ou de mise en page. HTML est un sous-ensemble de SGML. 2, 54
- Shannon** Nom du fondateur de la théorie de l'information. On utilise également le nom comme unité pour désigner un bit d'information. 36
- signalisation** Ensemble de protocoles permettant l'échange d'informations de service dans un réseau de télécommunications. Le SS7 est un système de signalisation largement utilisé dans les réseaux téléphoniques. 73
- SMS** Short Message Service. Système permettant l'envoi de messages comprenant au plus 160 caractères à un téléphone GSM. 77
- SMTP** Standard Mail Transfer Protocol. Protocole Internet standard pour l'envoi du courrier électronique. 85
- SSH** Secure SHell. Application de communication par Internet en mode terminal. Cette application est dite sécurisée en ce sens qu'elle implémente les fonctions cryptographiques d'authentification et de confidentialité des informations. 93
- SSL** Secure Socket Layer. Protocole ayant un haut niveau de sécurité utilisé afin d'assurer la confidentialité et la sécurité de données transitant via l'Internet. 93, 94
- TCP** Transmission Control Protocol. Protocole de transport utilisé pour communiquer sur Internet. TCP se charge de numéroté les paquets et gère les acquis (ou accusés de réception). 57, 61, 62, 84
- TDM** Time Division Multiplexing. Mécanisme de répartition de ressources par multiplexage temporel. 69, 70
- TDMA** Time Division Multiple Access. Technique de répartition de ressources par multiplexage temporel. Cette technique prévoit un mécanisme d'accès. 69
- TIFF** Tagged Image File Format. Format d'images présentant un grand nombre de modes de compression et de codage. 50
- trame** En traitement d'images, la trame est la grille d'échantillonnage. On considère généralement la trame carrée mais la trame peut aussi être rectangulaire ou hexagonale. Dans le cas du format entrelacé, la trame désigne une image ne contenant que les lignes paires ou impaires de l'image. En télécommunications, trame désigne un ensemble d'informations numériques temporelles constituant un tout. 70
- transcodage** Aussi appelé transrating. Il s'agit d'un procédé de changement du débit d'un signal comprimé. 52
- TTS** Text to Speech. Nom utilisé pour qualifier des systèmes de synthèse vocale à partir d'un texte. 56
- tunnel** Dans un réseau, un tunnel correspond à un transport de paquets entre deux extrémités spécifiques. 95
- UDP** User Datagram Protocol. Protocole de transport utilisé pour la transmission d'informations sur Internet lorsqu'il s'agit de minimiser le délai de transmission. UDP numérote les paquets mais, contrairement à TCP, il ne vérifie pas si les paquets sont bien arrivés à desti-

-
- nation. 62, 84, 86
- UMTS Universal Mobile Telecommunications System. Nom du standard de téléphonie mobile de troisième génération pour l'Europe. 72, 77
- Unicode Codage standard des données sur 16 bits permettant un jeu de 65536 caractères. 53
- V90 Norme pour la transmission par modem dans le réseau téléphonique. Le débit peut atteindre 56 [kb/s]. 8, 73
- V92 Norme, développée par l'ITU, pour la transmission par modem dans le réseau téléphonique. Cette norme offre un haut débit de l'utilisateur vers le réseau (direction dite *upstream*) mais également la possibilité d'interrompre le trafic Internet au profit d'une communication téléphonique et un temps de connexion réduit. 73
- VDSL Very high bit-rate Digital Subscriber Line. Technique de transmission à très haut débit sur cuivre (de 13 à 52 [Mb/s] sur une portée de 300 à 1300 mètres) similaire à l'ADSL. 80
- VGA Video Graphic Adapter. Type d'image informatique dont le format est 640 colonnes et 480 lignes. 100
- VHS Virtual Host Storage. Format de stockage pour signaux de télévision analogique. Ce format, développé par la firme JVC, est utilisé en Europe pour l'enregistrement sur cassette. 87
- VLIR Visitor Location Register. Registre local d'une zone comprenant plusieurs cellules d'un réseau GSM. Ce registre contient l'identité des utilisateurs présents dans la zone. 76
- VoIP Voice over IP. Nom générique pour les transmissions de signaux sonores par le biais des protocoles Internet (plus spécifiquement IP et RTP). 86
- Vorbis Schéma de codage audio utilisé pour la production du format Ogg Vorbis. Il s'agit d'une technologie équivalente à MP3 mais libre de tout droit. 43
- VRML Virtual Reality Modeling Language. Langage de représentation d'objets et de scènes 3D, apparu suite à l'explosion de l'internet. 56
- WAP Wireless Application Protocol. Protocoles applicatifs spécialement conçus pour des communications mobiles. 85
- watermarking Technique de filigrane qui consiste à insérer, à l'intérieur d'une image ou d'un son, un signal invisible ou inaudible. On parle parfois d'aquamarquage. 52
- WDM Wavelength Division Multiplexing. Technique de multiplexage par répartition des longueurs d'onde dans une fibre optique. Ce multiplexage est similaire à un multiplexage en fréquence. 69
- WLL Wireless Local Loop. Technique utilisant la voie hertzienne pour les communications téléphoniques dans la boucle locale du réseau commuté. 79
- WML Wireless Markup Language. Langage de balisage équivalent au langage HTML pour les communications mobiles utilisant le WAP. 85
- xDSL x-Digital Subscriber Line. Nom générique donné à la famille des standards de transmission sur i paires de cuivre torsadées. Regroupe les techniques de transmission ADSL, RADSL, HDSL, SDSL, VDSL, 80

XML Extensible Markup Language. Basé sur SGML, XML est un langage de balisage permettant de créer des documents contenant de l'information structurée. Devrait succéder à HTML. 8, 12, 51, 54