

Introduction aux technologies multimédia

Dr. M. Van Droogenbroeck

Mai 2001 (version 7.5)

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 | 6 |
| | Groupes de normalisation industriels | 7 |
| | Phases du développement d'une norme | 8 |
| 1.2.3 | Exemples de normes | 8 |
| | Normes de qualité: ISO 9000 | 8 |
| | MPEG | 8 |
| 1.3 | Internet | 9 |
| 1.3.1 | Les structures | 9 |
| 1.3.2 | La vision d'Internet | 13 |
| 2 | Les signaux multimédia | 15 |
| 2.1 | Introduction | 15 |
| 2.2 | Les signaux analogiques de base | 15 |
| 2.2.1 | Son | 15 |
| | Hauteur tonale. | 16 |
| | Intensité | 17 |
| | Timbre | 18 |
| | Durée | 18 |
| | L'analyse en fréquences et la transformée de Fourier | 19 |
| | La synthèse musicale. | 19 |
| 2.2.2 | Image et vidéo | 21 |
| | Le système visuel humain | 21 |
| | La lumière | 21 |
| | Les espaces de couleurs | 23 |
| | L'espace de couleurs additif RGB. | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| | Vers d'autres systèmes de couleurs: le système XYZ. | 24 |
| | L'espace de couleurs soustractifs CMY. | 28 |
| | D'autres systèmes de couleurs. | 28 |
| | Les systèmes de couleurs en pratique. | 29 |
| | Les fausses couleurs. | 29 |
| | La couleur des objets | 30 |
| | Normalisation des couleurs | 31 |
| | Signal vidéo | 32 |
| 2.3 | La numérisation | 33 |
| 2.3.1 | Signaux analogiques ou numériques | 34 |
| 2.3.2 | Le pourquoi | 34 |
| 2.3.3 | Échantillonnage | 35 |
| | Filtrage et repli de spectre | 36 |
| 2.3.4 | Quantification | 37 |
| 2.3.5 | Passage de l'analogique au numérique et conversion inverse | 41 |
| 2.3.6 | Résumé | 41 |
| 2.4 | La compression | 41 |
| 2.4.1 | Principe théorique de la compression | 41 |
| 2.4.2 | La compression en pratique | 43 |
| | Compression sans perte. | 44 |
| | Compression avec pertes. | 44 |
| 2.5 | Classification de l'ensemble des techniques de compression | 44 |
| 2.5.1 | Compression de données textuelles | 44 |
| 2.5.2 | Compression audio | 45 |
| 2.5.3 | Compression image | 47 |
| | Norme JPEG2000 | 49 |
| | Autres formats | 49 |
| 2.5.4 | Compression vidéo | 49 |
| | MPEG-2 : les notions de profils et de niveaux. | 50 |
| | MPEG-2 : "program" et "transport streams". | 51 |
| | MPEG-4 : une norme pour les faibles débits. | 51 |
| | MPEG-7 : une norme pour caractériser le contenu vidéo. | 51 |
| | MPEG-21 : une norme pour interfacier des objets multimédia. | 51 |
| 2.6 | Formats et conversion | 51 |
| 2.6.1 | Audio | 52 |
| 2.6.2 | Image | 52 |
| | Interface graphique | 52 |
| | Applications sur ordinateur | 53 |
| | Le format GIF. | 53 |
| | Le format PNG. | 53 |
| | Le format SPIFF. | 53 |
| | Le format TIFF. | 53 |
| | Le format FlashPix. | 53 |

| | |
|---|-----------|
| Applications génériques | 54 |
| Le format CGM. | 54 |
| Le format EPS. | 54 |
| Le format PDF. | 54 |
| 2.6.3 Vidéo | 54 |
| Codeurs en cascade et transcodage | 55 |
| 2.7 Autres types de signaux | 56 |
| 2.7.1 Quelques normes concernant le texte | 56 |
| 2.7.2 Formats de mise en page | 56 |
| 2.7.3 La synchronisation | 58 |
| 2.7.4 Réalité virtuelle | 58 |
| 2.8 Quelques exemples de normes | 58 |
| 2.8.1 La vidéoconférence | 58 |
| 2.8.2 Applications médicales : la norme DICOM 3.0 | 59 |
| 3 Des réseaux pour communiquer | 61 |
| 3.1 Aspect logique des transmissions | 61 |
| 3.1.1 Notion de couches : modèle de référence OSI | 61 |
| 3.1.2 Le réseau Internet | 64 |
| DNS | 64 |
| 3.2 Les réseaux | 64 |
| 3.2.1 La téléphonie | 67 |
| 3.2.2 RNIS | 67 |
| 3.2.3 ADSL | 67 |
| 3.2.4 Réseaux de télédistribution | 67 |
| 3.2.5 LAN (Local Area Network) | 68 |
| 3.2.6 Communications sans fil | 68 |
| Le futur ? | 69 |
| À propos d'Internet | 69 |
| 3.3 Services réseau | 69 |
| 3.3.1 Le Web et le protocole HTTP | 70 |
| 3.3.2 Messagerie électronique | 70 |
| 3.3.3 Téléphonie sur IP | 73 |
| 3.3.4 Télévision interactive | 74 |
| Historique | 74 |
| Typologie de la télévision interactive | 74 |
| 3.4 Sécurité et cryptographie | 75 |
| 3.4.1 Chiffrement | 75 |
| 3.4.2 Algorithmes à clef secrète ou publique | 76 |
| 3.4.3 De l'usage des algorithmes de chiffrement | 77 |
| 3.4.4 La sécurité dans les réseaux | 78 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Matériel informatique | 81 |
| 4.1 | Le matériel | 82 |
| 4.1.1 | Processeur | 82 |
| 4.1.2 | Carte graphique | 82 |
| 4.1.3 | Carte son | 83 |
| 4.1.4 | Micro | 86 |
| 4.1.5 | Haut-parleurs | 86 |
| 4.1.6 | Appareil photo numérique | 86 |
| 4.1.7 | Caméra | 86 |
| 4.1.8 | Technologies de stockage | 86 |
| | Procédés de stockage analogiques | 88 |
| | Procédés de stockage numériques | 89 |
| | Procédés de stockage informatiques | 90 |
| 4.2 | Informatique de réseau | 93 |
| | Glossaire | 97 |

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.

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**.

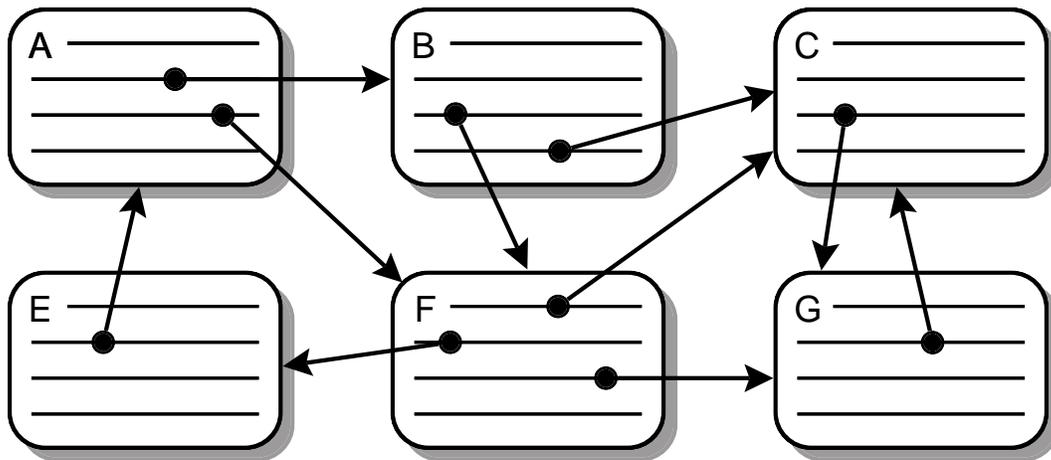


FIG. 1.2 – Exemple de structure hypertexte comprenant 6 nœuds et 10 liens.

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 hyper-texte 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 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* dont nous allons parler dans 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 des cas où seul un produit non conforme à des normes est disponible ou, pire, où un constructeur dispose d'un monopole de marché. ■

| 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.

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'imisce 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 Organization for Standardisation* (ISO⁵). Par exemple, la norme MPEG⁶ sur laquelle nous reviendrons au point 2.5.4, est le fruit de l'ISO.

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

²<http://www.itu.int>

³<http://www.etsi.org>

⁴<http://www.ansi.org>

⁵<http://www.iso.ch>

⁶<http://www.cselt.it/mpeg/>

| | |
|------|---|
| 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.

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 COUNCIL⁷), 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.

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

⁷<http://www.davic.org>

⁸<http://www.wapforum.org>

les différents composants d'un système de vidéoconférence (cf. 2.8.1 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, ...

Normes de qualité : ISO 9000

Les normes de qualité *ISO 9000* constituent une référence incontestable en matière de qualité. Le tableau 1.4 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 1.5.

MPEG

Contrairement à la plupart des normes, les normes MPEG sont constituées de plusieurs volets. Ainsi, le tableau 1.6 reprend quelques normes issues du groupe MPEG de l'*ISO*¹⁰ ; ce tableau

⁹<http://www.ibn.be>

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

| 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. 1.4 – Les parties de la norme 9000.

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.

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 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).

¹¹<http://info.isoc.org>

| 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. 1.5 – Les autres normes de la famille 9000.

| | |
|---------------|--|
| 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. 1.6 – Normes MPEG.

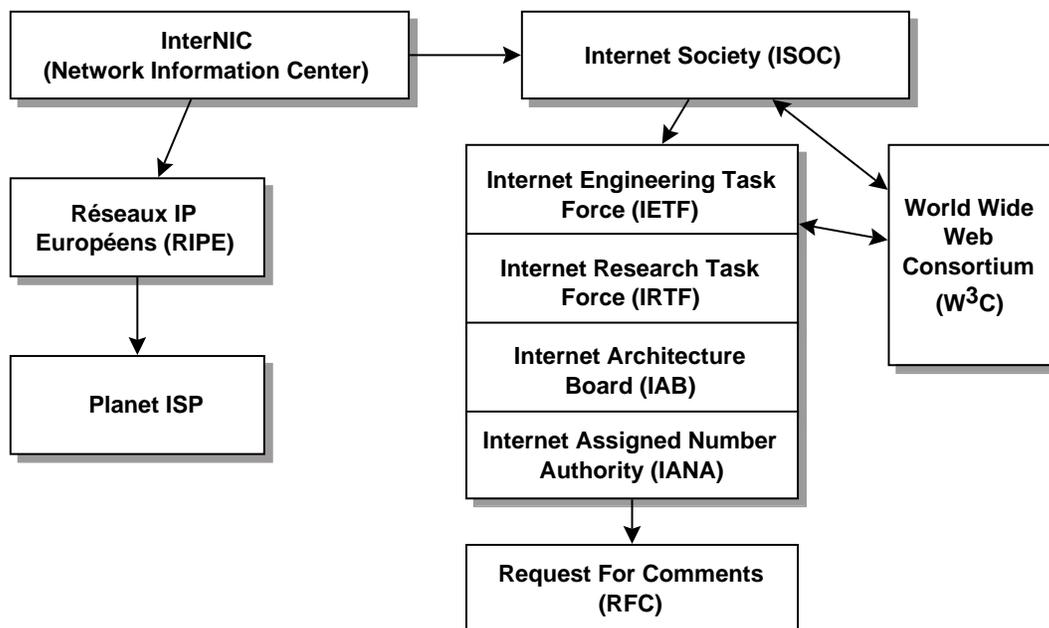


FIG. 1.3 – Les structures qui gèrent Internet.

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 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.

Ces groupes ne sont pas les seuls. Ainsi le *World Wide Web Consortium* (W3C²¹) effectue tout le travail relatif au Web. 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.

¹²<http://www.internic.net>

¹³<http://www.ripe.net>

¹⁴<http://www.icann.org>

¹⁵<http://www.dns.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>

²¹<http://www.w3.org>

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 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

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.

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.

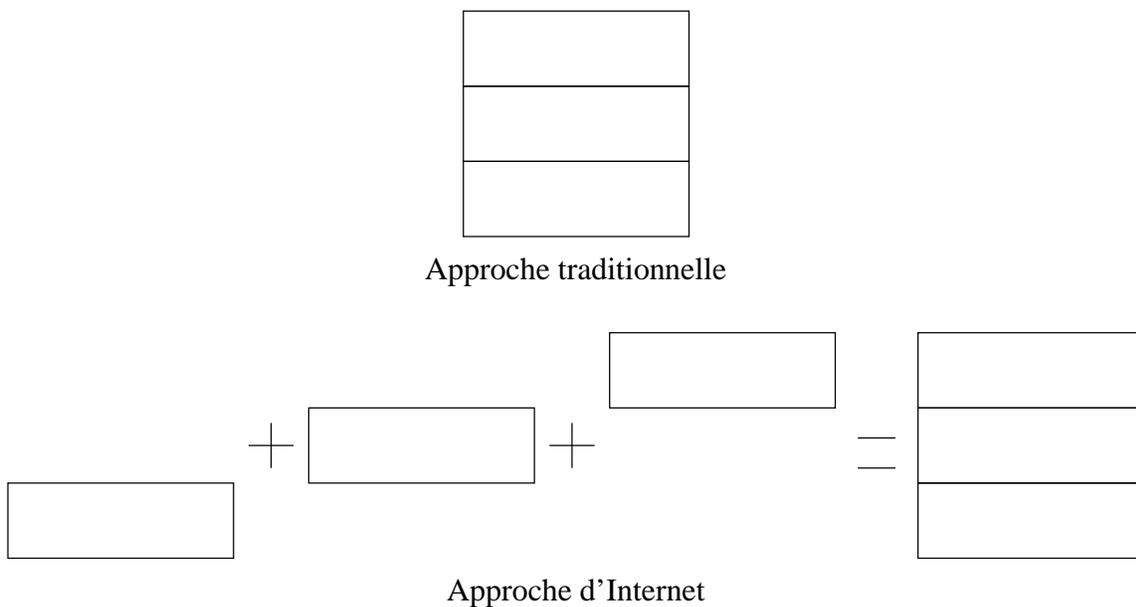


FIG. 1.6 – Approche traditionnelle et approche d'Internet en matière de normalisation.

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).

Le son est une notion tellement complexe qu'il faut plusieurs paramètres pour le décrire. 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 (cf. page 52) définit près d'une quarantaine de paramètres supplémentaires.

Hauteur tonale.

La notion de ton est 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 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.

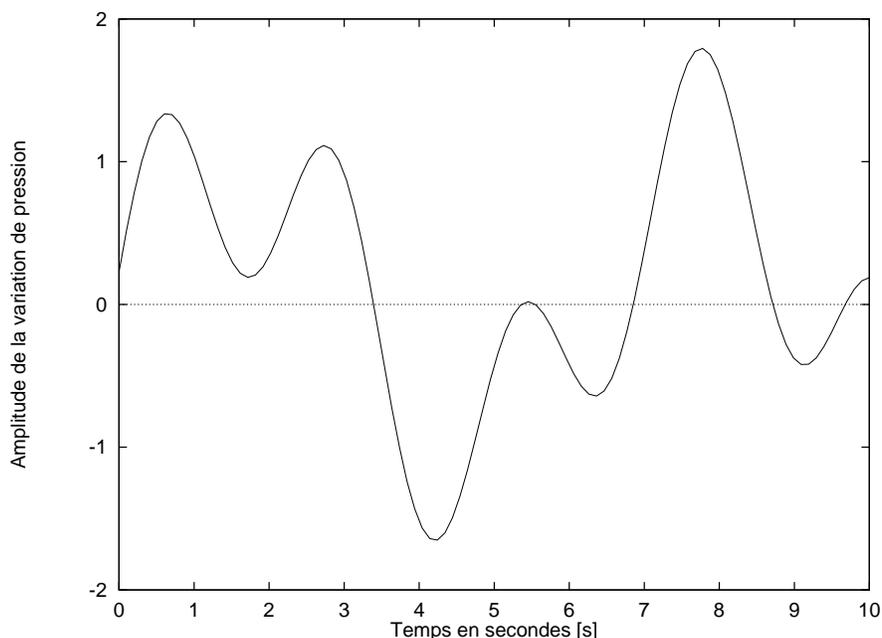


FIG. 2.2 – Représentation d’un son.

La valeur de la fréquence est évaluée en fonction du nombre de ses périodes dans un temps donné. 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.

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). 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* 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.

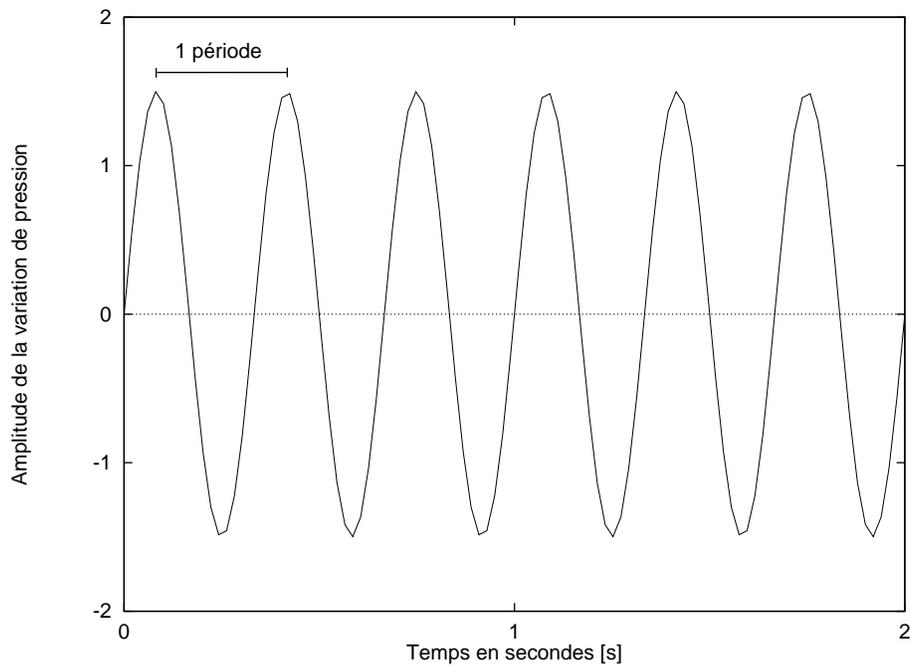


FIG. 2.3 – Le Hertz : unité de mesure des fréquences. Cette unité est définie comme le nombre de périodes par seconde. La fréquence du signal représenté ici est de 3 Hz.

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 sinusoïdales.¹ Soit $x(t)$ un signal sonore continu dans le temps t , la transformée de FOURIER de ce signal est définie comme suit :

Définition 7 [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.

¹Un son pur est une oscillation sinusoïdale.

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. Le principe de la modulation consiste à envoyer une fréquence constante très élevée, la porteuse. À cette fréquence, se superpose le signal porteur de l'information que l'on veut transmettre : la modulante, à basse fréquence. En voyageant sur la porteuse, la modulante fait varier continuellement la fréquence, en proportion de sa propre amplitude. Si la modulante fait varier l'amplitude et non la fréquence de la porteuse, on parle de modulation d'amplitude ou modulation AM.

Prenons un exemple de modulation d'amplitude. La figure 2.4 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).

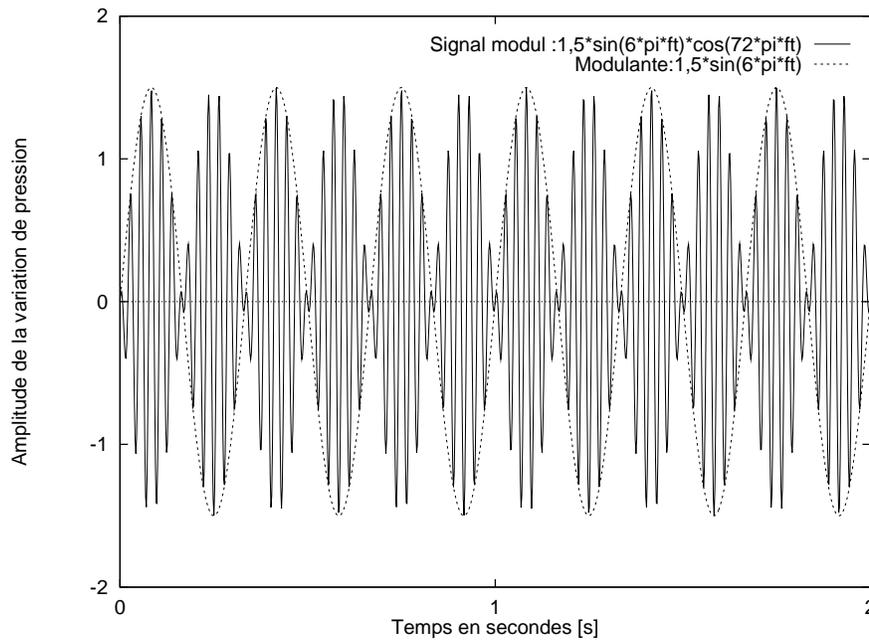


FIG. 2.4 – Représentation d'un signal basse fréquence modulé par un signal haute fréquence.

En vertu de la relation mathématique suivante

$$1,5 \sin(6\pi ft) \cos(72\pi ft) = 0,75[\sin(78\pi ft) - \sin(66\pi ft)] \quad (2.3)$$

il ressort que la multiplication d'une fréquence par une autre est équivalente à une somme de signaux de fréquences proches de la fréquence la plus élevée. D'autres relations, plus complexes encore, aboutissent à la création d'autres fréquences sonores ; c'est tout l'intérêt de l'analyse de FOURIER de permettre une interprétation naturelle des résultats.

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 8 [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 [15 Hz, 20 kHz]. Pour les signaux de parole, on estime que l'énergie est concentrée dans les fréquences inférieures à 4 kHz. Le téléphone en tire profit puisque sa bande passante est [300 Hz, 3400 Hz].

2.2.2 Image et vidéo

Le système visuel humain

L'œil est un système complexe (cf. figure 2.6). 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.

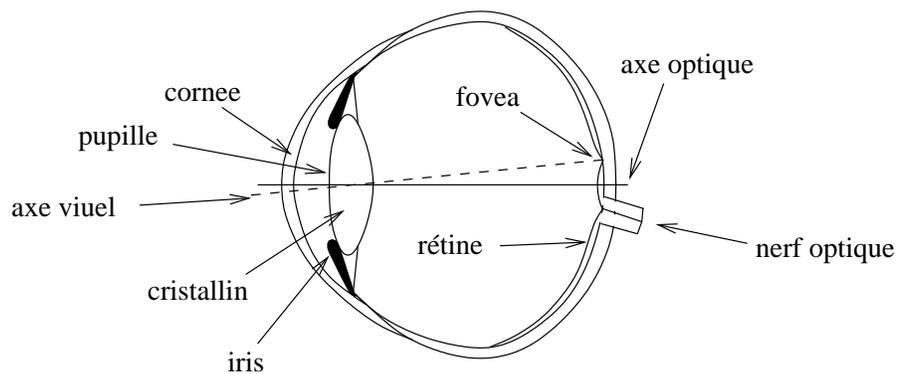


FIG. 2.5 – Coupe latérale simplifiée de l'œil.

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.

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*.

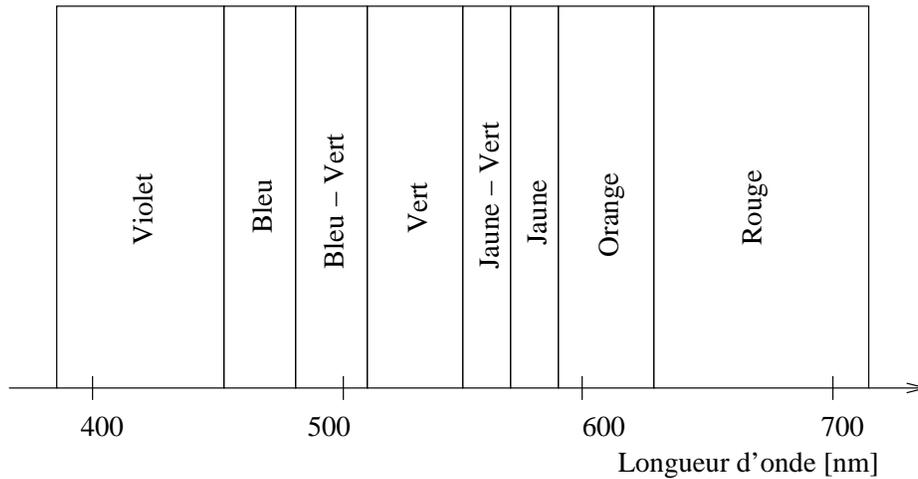


FIG. 2.6 – Les longueurs d'onde associées aux couleurs.

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 bivarient, 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. Des études psychovisuelles ont révélé les lois suivantes (cf. le livre de BUSER et d'IMBERT [2] pour les détails) :

- lorsqu'on additionne des radiations monochromatiques, l'œil ne sait pas distinguer les composantes de la couleur résultante, contrairement à l'oreille qui demeure capable de discerner les composantes fréquentielles d'une onde acoustique.
- avec des combinaisons adéquates de longueurs d'ondes et de brillance complètement différentes, il est possible de réaliser l'égalisation de deux demi-écrans, en luminance et en couleurs.
- l'addition de certains couples de couleurs peut produire une impression de *lumière blanche*. Les deux couleurs sont alors dites *complémentaires*. Pour toute radiation extérieure à l'intervalle 490–570 [nm], il existe une couleur complémentaire. En revanche, toute radiation inférieure à cet intervalle n'a pas de couleur complémentaire dans le spectre visible.
- lorsque les luminances L_1 et L_2 , de deux couleurs complémentaires, sont convenablement ajustées, on obtient du blanc.
- si les luminances L_1 et L_2 des couleurs λ_1 et λ_2 ne sont pas dans un rapport adéquat, on obtient une couleur “délavée” –on dira non *saturée*– au lieu du blanc.

- en généralisant, on peut démontrer que l'addition de deux couleurs quelconques non complémentaires produira une couleur nouvelle λ_r non saturée

$$L_1 + L_2 = L_b + L_r \quad (2.4)$$

où L_r correspond à la longueur d'onde λ_r .

- l'équation précédente se généralise du fait des lois de GRASSMANN qui énoncent l'additivité, la multiplicativité, l'associativité et la transitivité dans le mélange des couleurs. Finalement, on aboutit à ce qu'un nombre quelconque N de couleurs $\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_N$ équivaut à l'addition d'un flux L_b de blanc et d'un flux L_r d'une couleur λ_r résultante, ce qui revient à la détermination de 3 variables L_b, L_r et λ_r

$$\sum_{i=1}^N L_i = L_b + L_r \quad (2.5)$$

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.* [11]) 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 2.7. En jouant sur les paramètres a, b et c , l'observateur essaie d'égaliser la couleur à

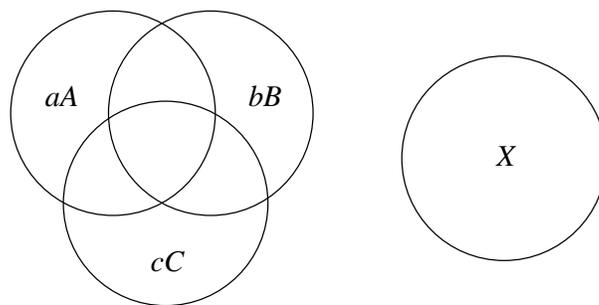


FIG. 2.7 – Expérience d'égalisation d'une couleur X au moyen de trois couleurs primaires A, B et C .

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 2.8 montre les courbes des coefficients de distribution des couleurs primaires.

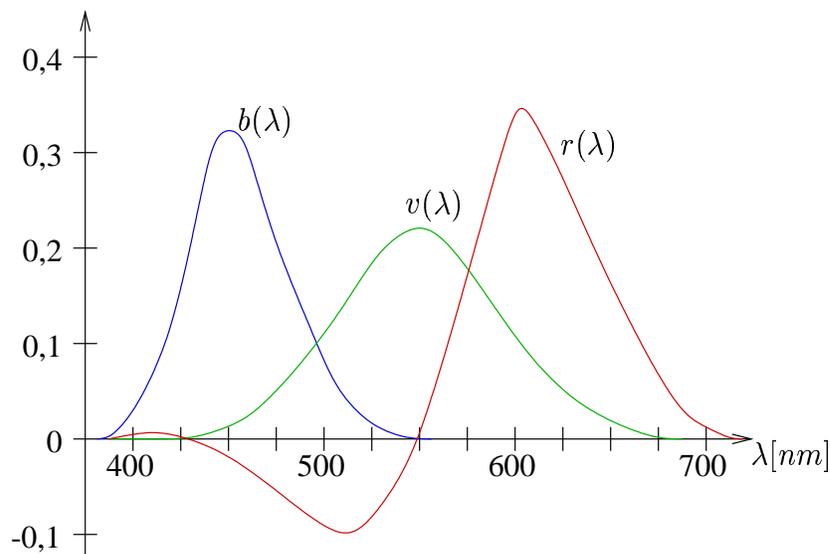


FIG. 2.8 – Courbes d'égalisation spectrale obtenues par égalisation des couleurs au moyen d'un mélange additif (d'après [10]).

La figure 2.9 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. [2]) du fait, en particulier que : (i) en raison du choix des primaires, l'une des coordonnées trichromatiques était toujours négative

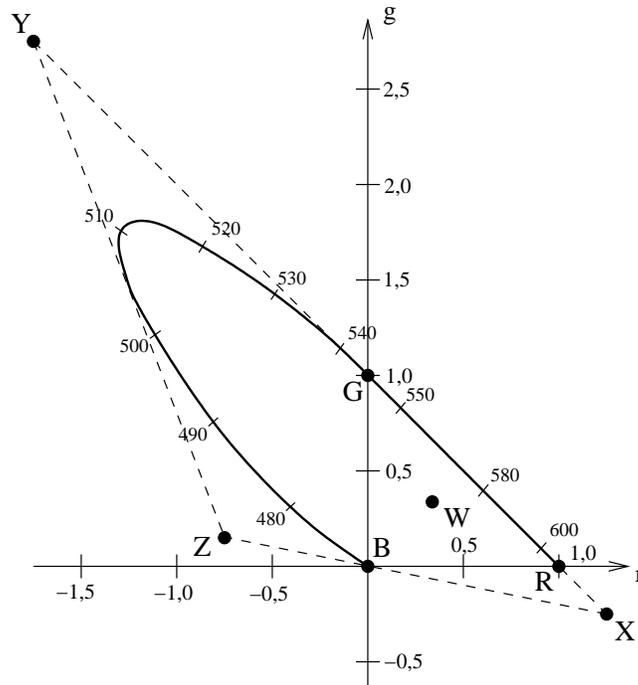


FIG. 2.9 – Diagramme chromatique RGB de la CIE.

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 composantes RGB par la relation matricielle suivante [11]

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,769 & 1,7518 & 1,13 \\ 1 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0 & 0,0565 & 5,5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

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

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

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.9)$$

$$x + y + z = 1 \quad (2.10)$$

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 2.10.

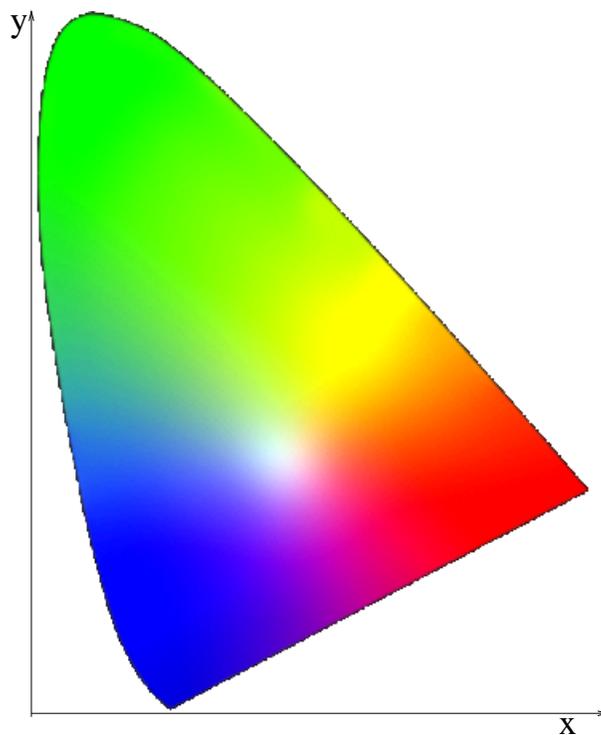


FIG. 2.10 – Diagramme chromatique (approché !) défini par les deux variables de chrominance x et y .

Les couleurs monochromatiques sont représentées sur la partie non rectiligne du contour (comme un U retourné). Les couleurs qui résultent d'un mélange additif de certaines couleurs de base sont représentées à l'intérieur de la forme en U. Il existe aussi certains points particuliers, comme le *point d'égalité 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 2.11.

C'est dans ce genre d'espace que nous avons représenté les couleurs du diagramme chromatique approché à la figure 2.10 ; le diagramme tridimensionnel correspondant est illustré à la figure 2.12.

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 énergie, on passe du noir au blanc en

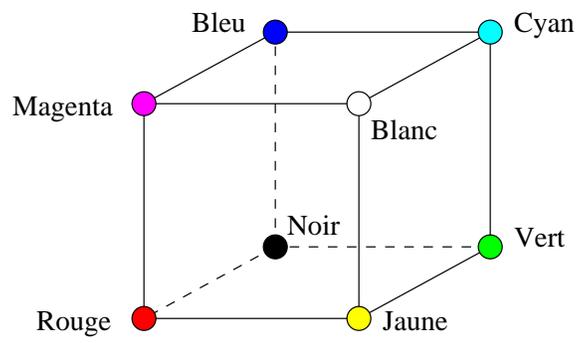


FIG. 2.11 – Espace tridimensionnel des stimuli produits par les composantes *RGB*.

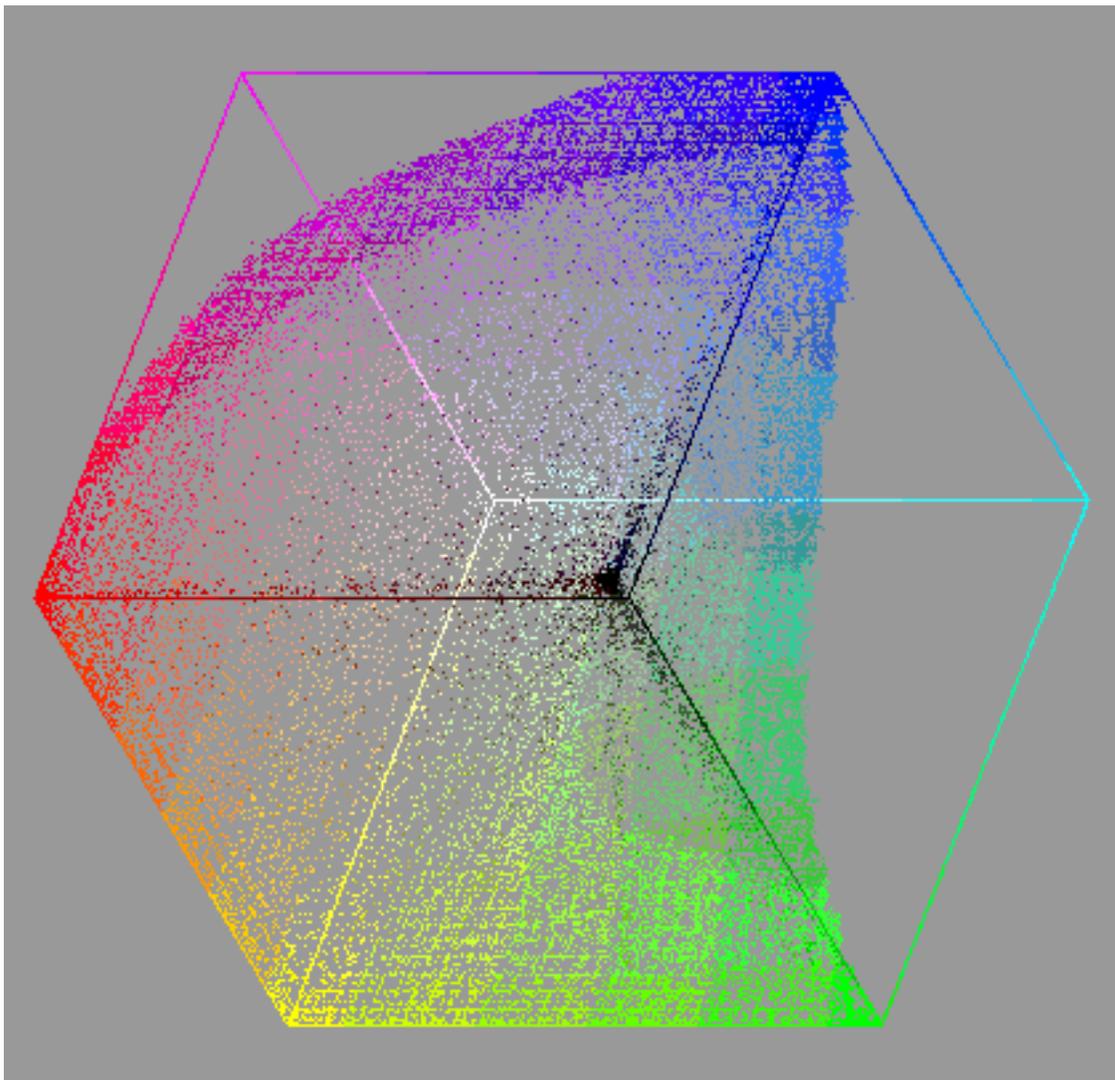


FIG. 2.12 – Espace tridimensionnel des couleurs du diagramme de chrominance approché.

passant par toutes les teintes de gris. Chaque couleur possède une luminance maximale dont la représentation graphique est fournie à la figure 2.13.

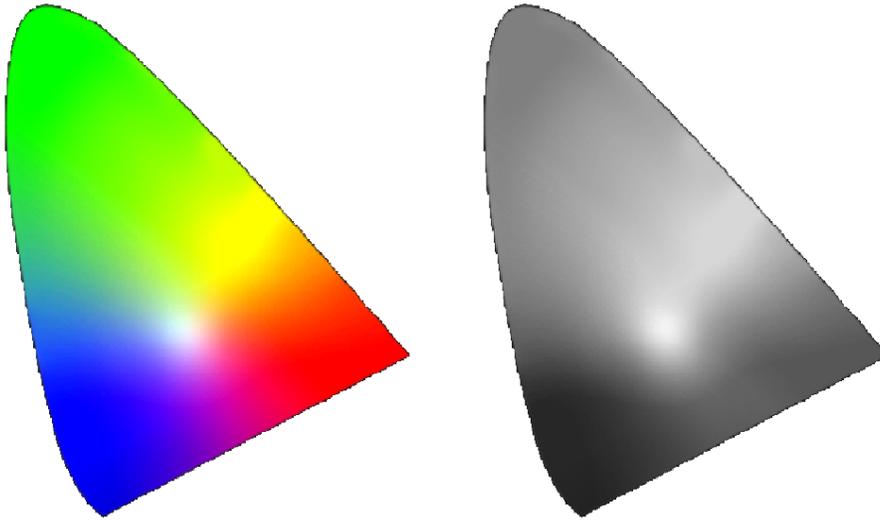


FIG. 2.13 – Diagramme chromatique xy et luminance maximale en chaque point.

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 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 2.14 illustre la décomposition d'une image dans les trois canaux RGB et HSI.

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.

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

²On préfère parfois ajouter d'emblée le noir au composante CMY, ce qui aboutit au système quadrichromatique CMYK.

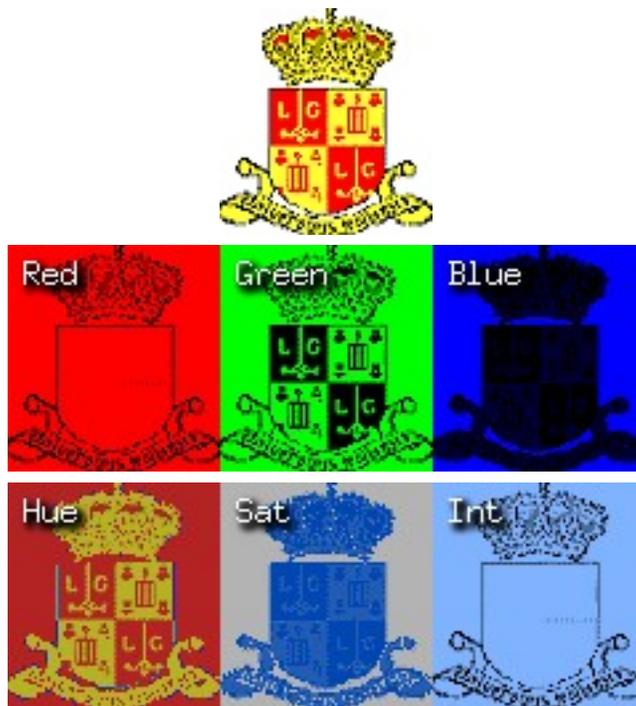


FIG. 2.14 – Décomposition d’une image en couleurs.

on a préalablement appliqué une correction γ 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.

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

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.

| 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.

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 R, G et B.

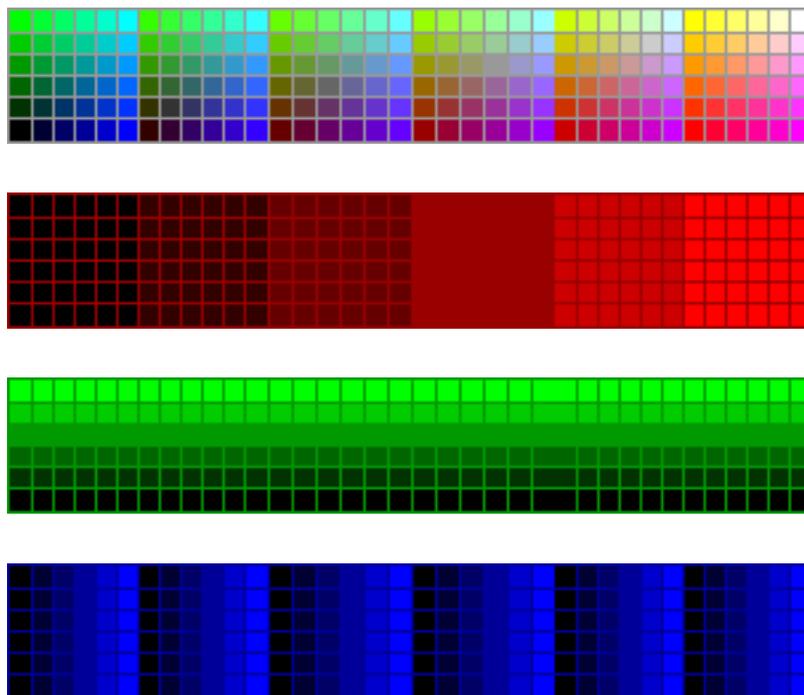


FIG. 2.15 – Palette de couleurs utilisée par les logiciels de navigation ainsi que la décomposition en R, G et B.

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'un onde lumineuse isochromatique (c' 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.

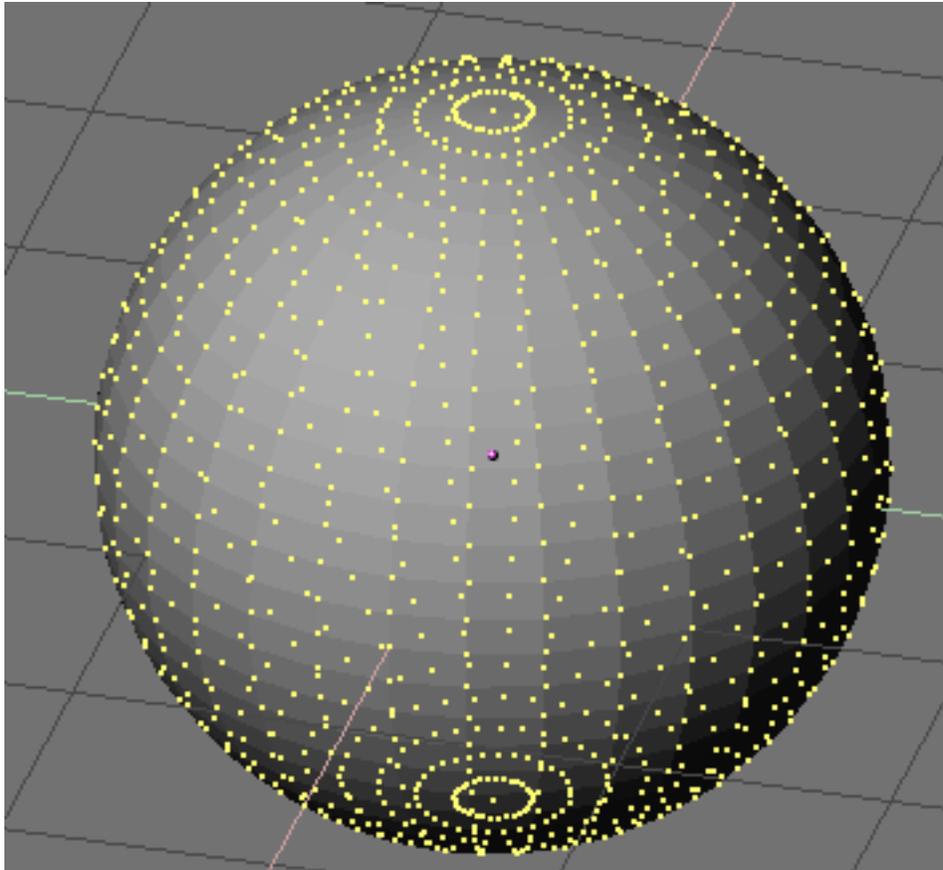


FIG. 2.16 – Une image de synthèse 3D.

La description d'une image n'est pas une affaire simple car elle dépend bien sûr des conditions d'observation (luminosité ambiante, ...) et de la distance à laquelle l'image est observée. On a donc besoin d'un modèle de couleurs qui assigne une valeur unique à chaque couleur perceptible par un humain. Il existe de nombreux modèles mais les trois suivants sont les plus fréquemment rencontrés pour reproduire physiquement une couleur :

Normalisation des couleurs

Question 9 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

Il convient encore d'ajouter une autre définition : le temps. 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. 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 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.

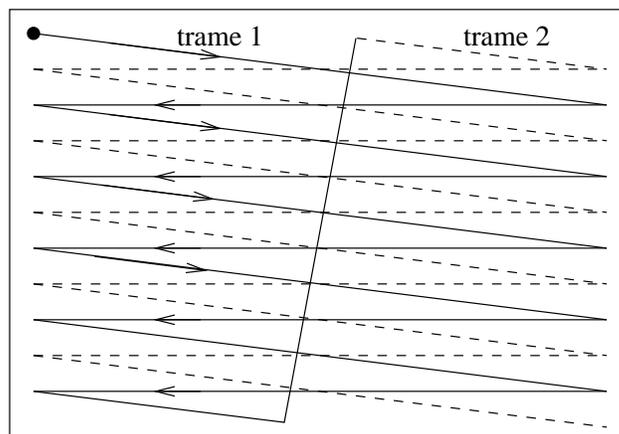


FIG. 2.17 – Description du format entrelacé.

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.

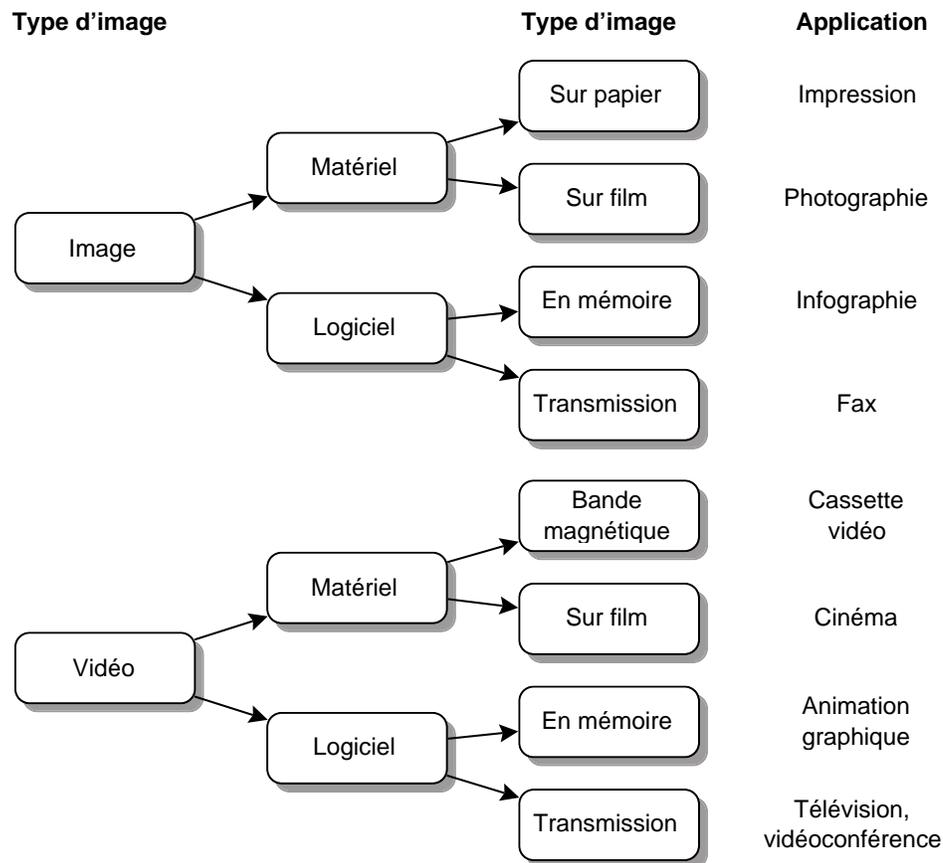


FIG. 2.18 – Aspects matériel et logiciel des images.

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 10 [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 2.19 aide à clarifier la distinction entre signal d'information et représentation.

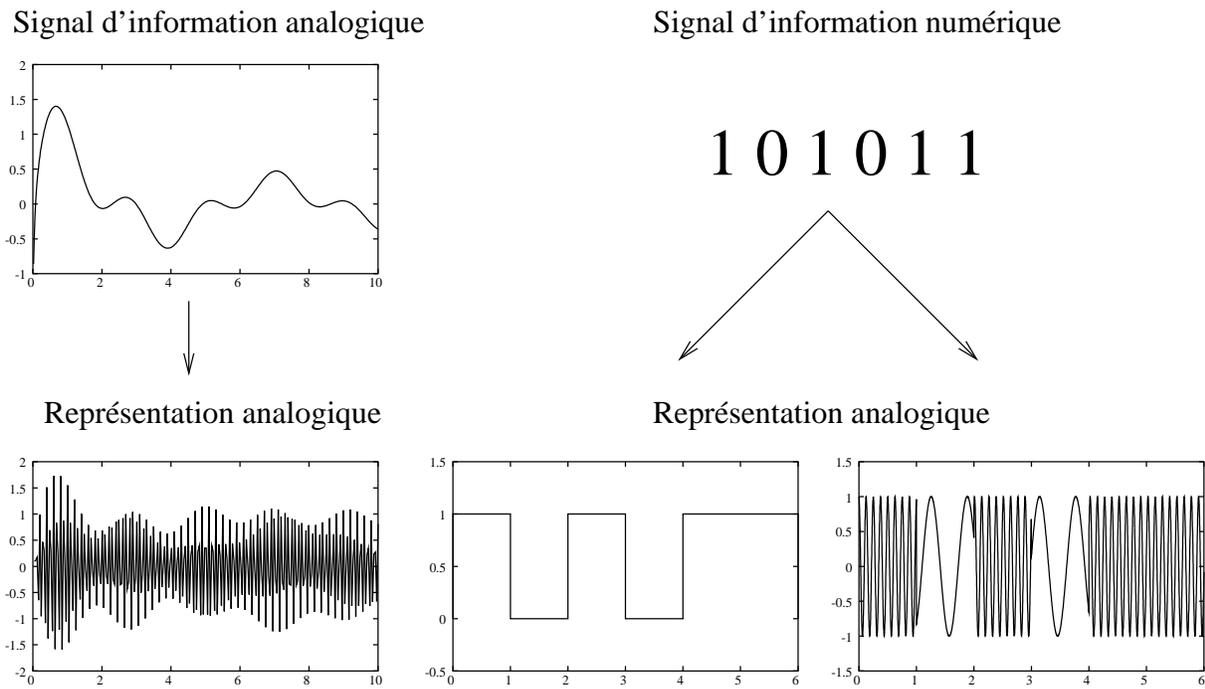


FIG. 2.19 – Représentation d'un signal analogique ou numérique.

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.

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 2.3.4). La qualité sonore est proportionnelle au *rapport signal* (en volts) à *bruit* (en volts également), exprimé en décibels (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.

La figure 2.20 reprend toutes les étapes du passage d'un signal analogique à un signal numérique et celles de la conversion inverse. Nous allons à présent décrire ces étapes.

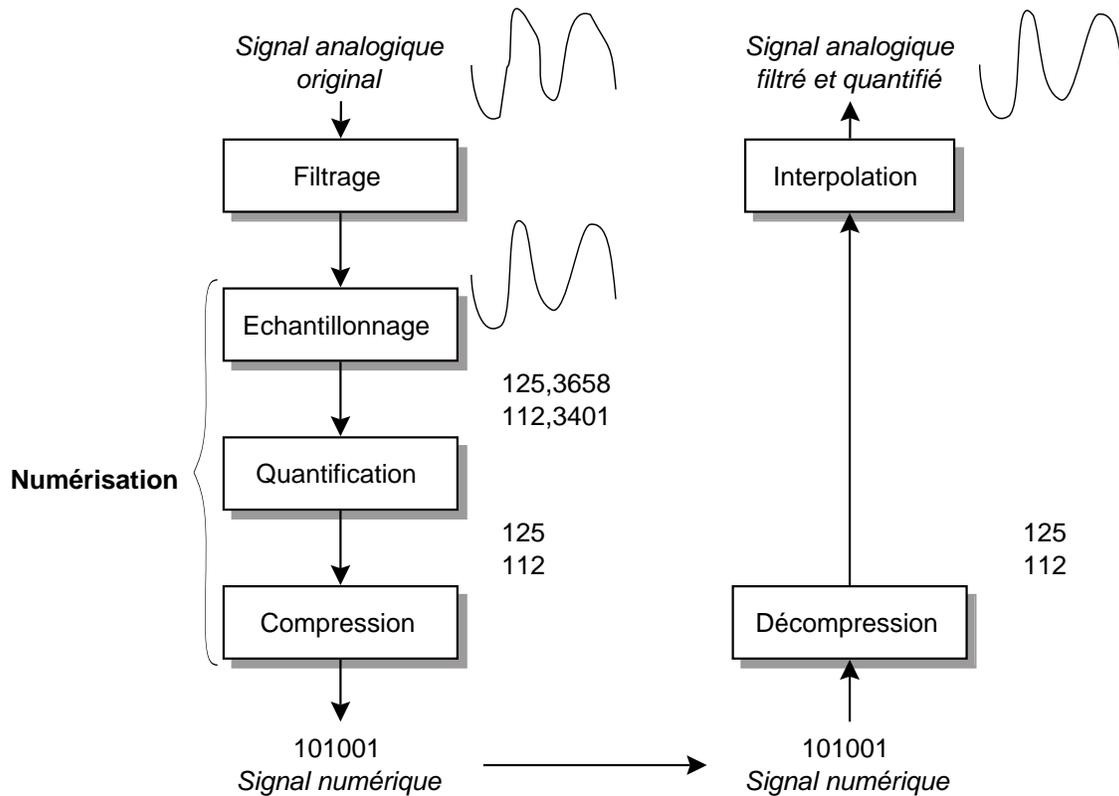


FIG. 2.20 – Passage de l'analogique au numérique et conversion inverse.

2.3.3 Échantillonnage

L'échantillonnage peut se comparer à la 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.

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* (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 11 [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 12 [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'ordre 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 880 par seconde. Enfin, pour un disque compact (CD-audio), sachant qu'un son audible atteint 22 kHz, les signaux sont échantillonnés à 44,1 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 de spectre est illustré par la figure 2.21 : 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.

Un phénomène similaire se produit au cinéma avec un roue qui tourne trop vite par rapport au nombre d'images échantillonnées (cf. figure 2.22) ; 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.

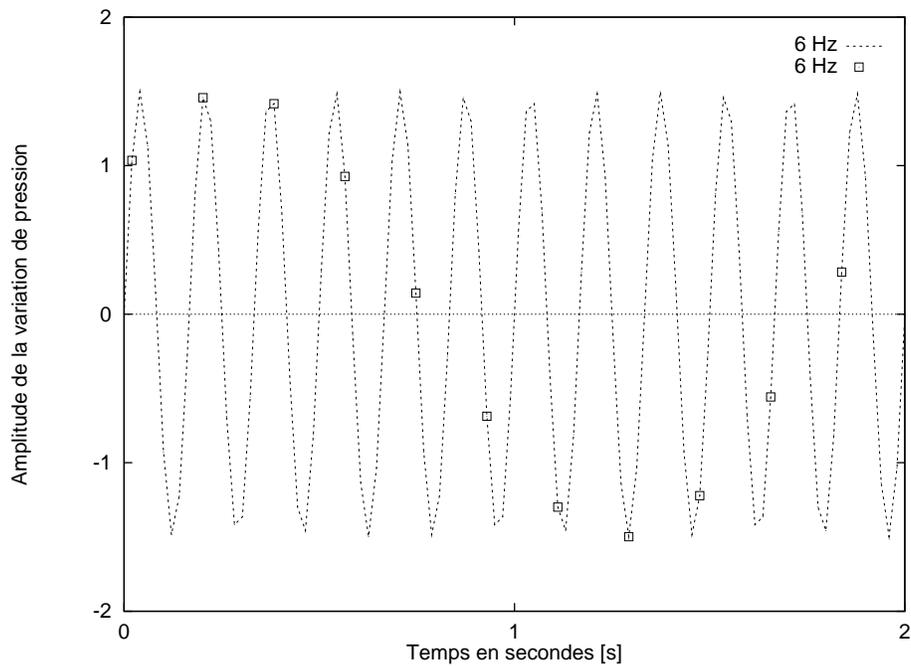


FIG. 2.21 – Repli de spectre ou aliasing.

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.

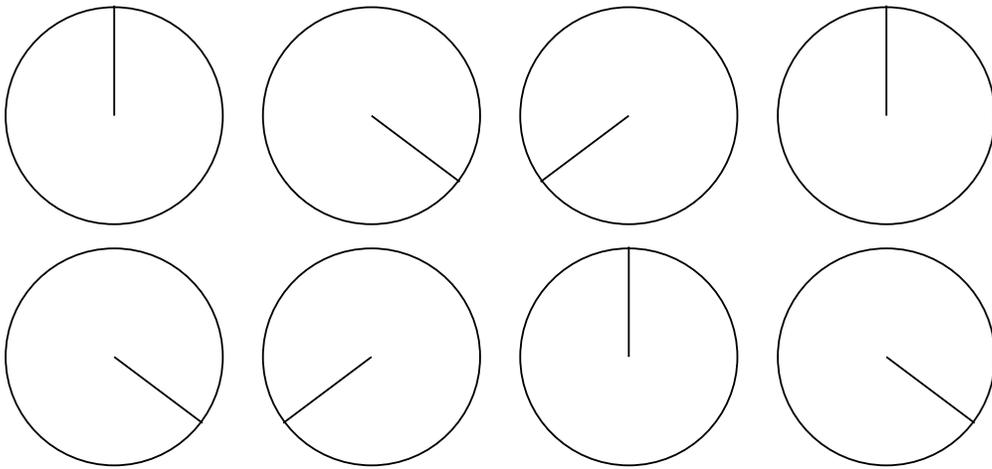
2.3.4 Quantification

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

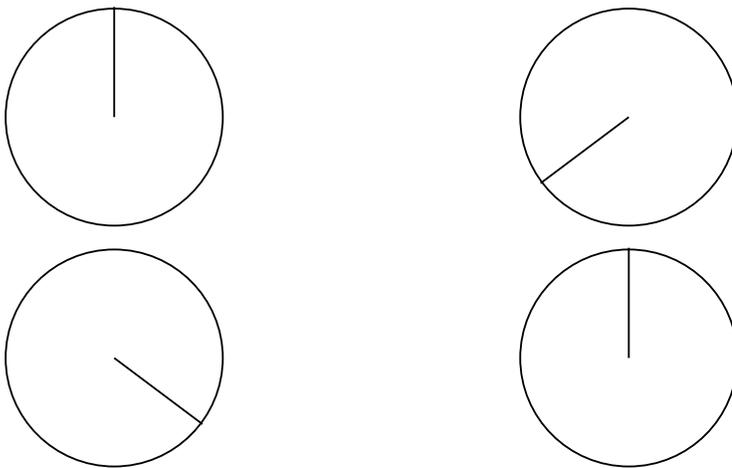
Définition 13 *Le bit est l'information élémentaire en informatique. Il ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou 1. En électronique, il est facilement représenté par des tensions différentes. Un octet, ou byte en anglais, est un ensemble de 8 bits.*

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 2.23 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, ...

Un exemple complet d'échantillonnage est illustré à la figure 2.24. Les échantillons sont quantifiés avant d'être convertis en une suite de valeurs binaires 0 ou 1. Cette dernière porte le nom de code PCM (*Pulse Code Modulation*).



Fréquence d'échantillonnage correcte



Repli de spectre dû à une vitesse de rotation trop élevée

FIG. 2.22 – Repli de spectre ; exemple de la roue qui tourne à l'envers au cinéma.

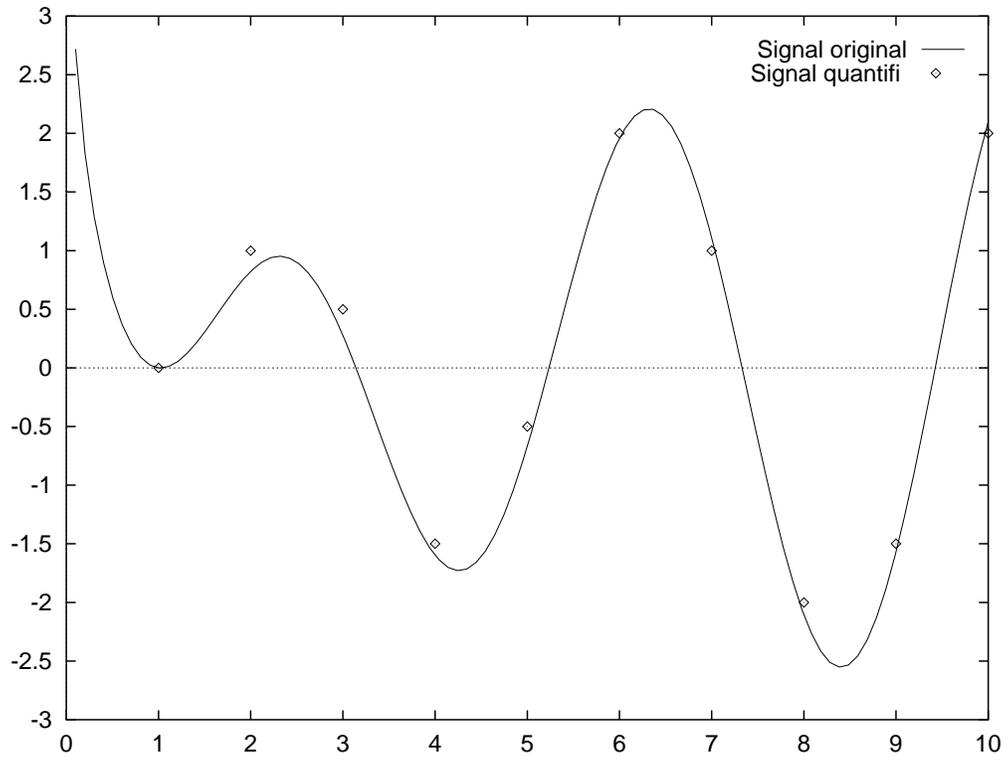


FIG. 2.23 – Quantification.

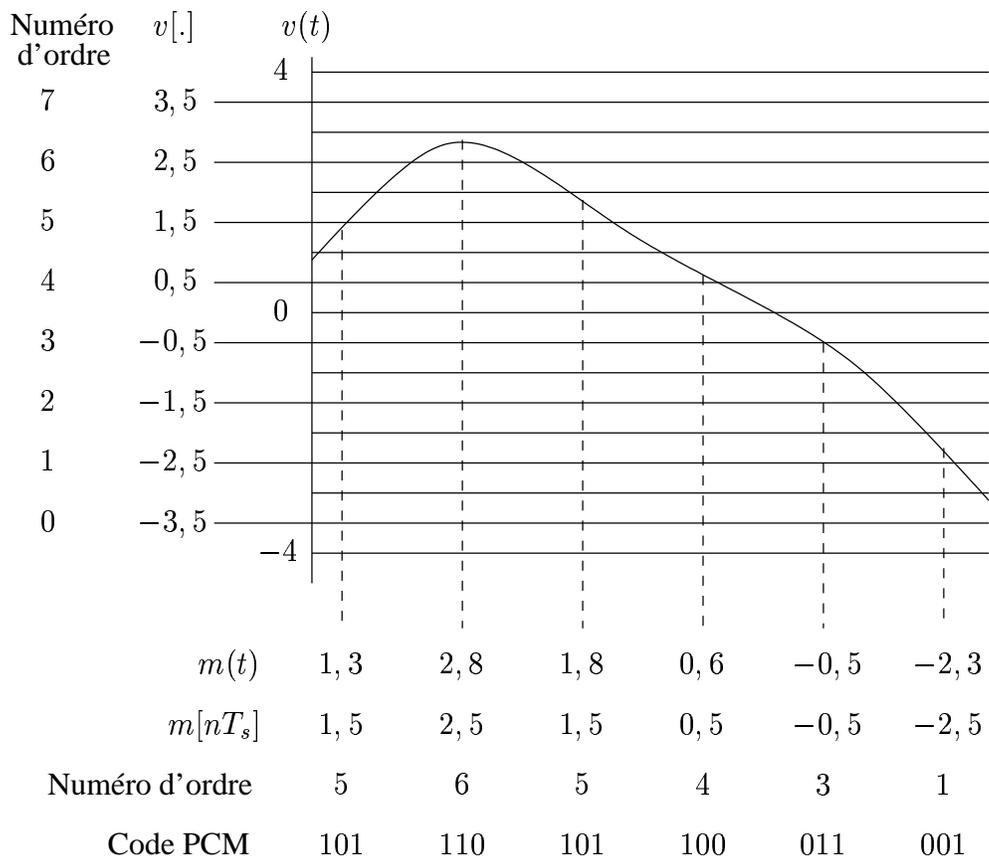


FIG. 2.24 – Échantillons instantanés, quantifiés et codes PCM.

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. 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.

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, 44100 Hz.

Définition 14 [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).

2.3.5 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 de 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.

2.3.6 Résumé

Le tableau 2.2 résume les principales notions utilisées pour la description des signaux analogiques et numériques. Le section suivant aborde la question de la compression.

2.4 La compression

2.4.1 Principe théorique 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 cer-

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

TAB. 2.2 – Principales grandeurs utilisées pour la description des signaux analogiques et numériques.

taine redondance.

Prenons le cas de la phrase de la figure 2.25 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. 2.25 – 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 15 [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.*

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

Définition 16 [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 bit. 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.

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 17 *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.

2.4.2 La compression en pratique

L'entropie détermine la limite inférieure pour représenter un échantillon. Si l'entropie vaut 3 bits par lettre, il ne sera pas possible de coder⁴ 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 18

$$\text{Taux de compression} = \frac{\text{Nombre de bits avant compression}}{\text{Nombre de bits après compression}} \quad (2.12)$$

⁴Les 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.

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.

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 perte*. 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.

2.5 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.

2.5.1 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.

2.5.2 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 la 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.

Le diagramme de la figure 2.26 reprend les représentations des signaux sonores.

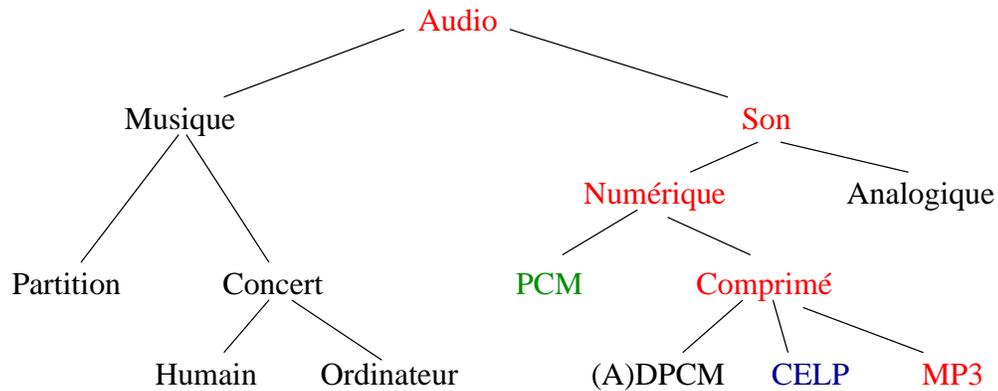


FIG. 2.26 – L'ensemble des techniques de représentation d'un signal audio.

Ces représentations sont abondamment utilisées dans des standards. 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'ITU 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.

Récemment enfin, 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 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.

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 2.27 montre le schéma simplifié du codeur MPEG-1.

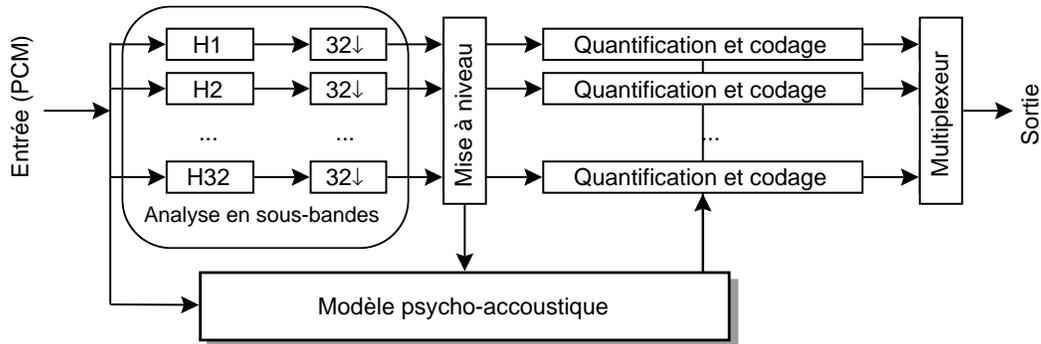


FIG. 2.27 – Schéma simplifié d'un encodeur audio MPEG-1.

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 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.

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.

2.5.3 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

par des algorithmes de type RLC (cf. page 44). 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 2.28 illustre le mécanisme de compression et de décompression sous forme graphique) :

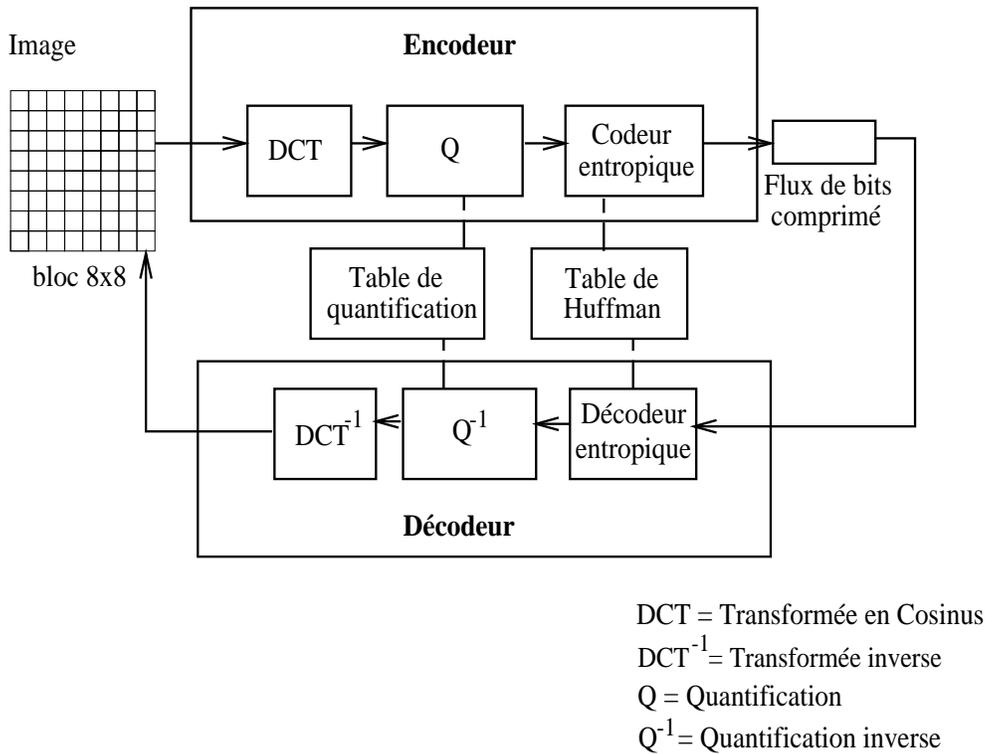


FIG. 2.28 – Codec (codeur-décodeur) JPEG.

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 8x8 pixels.
3. On applique une analyse fréquentielle appelée DCT (*Discrete Cosine Transform*), 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.

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.

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.

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 2.6.2.

2.5.4 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 : la redondance entre blocs voisins d'une même image et la redondance entre images successives. Elles donnent respectivement naissance aux techniques de codage *intra* et *inter*.

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 2.29 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 bidirectionnelle 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.

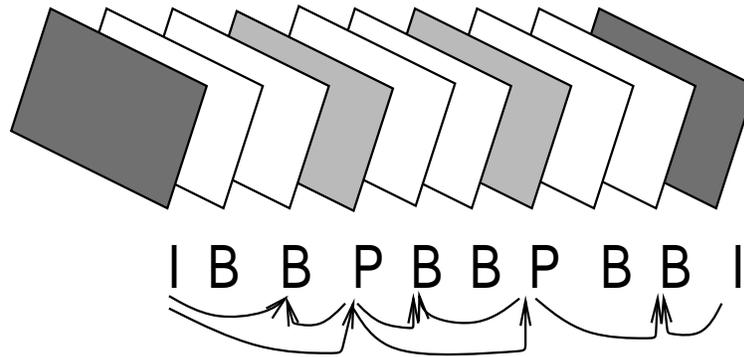


FIG. 2.29 – Schéma de codage temporel dans MPEG.

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 :

| | 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 | +/- 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 |

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 “ML@MP” pour “main level@main profile”

MPEG-2 : “program” et “transport streams”.

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. 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 développe actuellement la norme MPEG-4. L’objectif de cette norme est ambitieux ; MPEG-4 devrait couvrir toute la plage des débits inférieurs à 1 Mb/s, permettre également le codage de signaux de synthèse et offrir des fonctionnalités de manipulation du contenu vidéo.

MPEG-7 : une norme pour caractériser le contenu vidéo.

Les travaux relatifs à MPEG-4 ne sont pas encore terminés que démarrent 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 scène, la représentation de ces caractéristiques par MPEG-7 et enfin la possibilité d’effectuer des recherches avec des outils spécifiques.

MPEG-21 : une norme pour interfacier des objets multimédia.

Cette norme vise à permettre l’interfaçage d’objets multimédia au sens large.

2.6 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.

2.6.1 Audio

Outre les formats audio associés directement aux standards vus à la section 2.5.2, on distingue les formats issus d'applications de synthèse sonores. Le plus célèbre d'entre eux est le format *MIDI* (Music Instrument Digital Interface) 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 2.30).

| Fichiers d'ondes sonores | Fichiers <i>MIDI</i> |
|--|---|
| 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. 2.30 – 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.

2.6.2 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. Il s'agit d'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.

Le format PNG. Depuis qu'UNISYS a décidé de tirer profit de son brevet définissant l'algorithme de compression LZW auquel *GIF* fait appel, 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. 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 quelques mois, la norme a été complétée d'un format appelé *SPIFF* pour "*Still Picture Interchange File Format*".

Le format 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 part du même principe que le format Photo CD (cf. page 91 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 proposent 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.

Le format EPS. Défini par la société ADOBE, il s'agit du format associé à un langage de description de page 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.

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 2.31 montre une situation typique de conversion entre formats image.

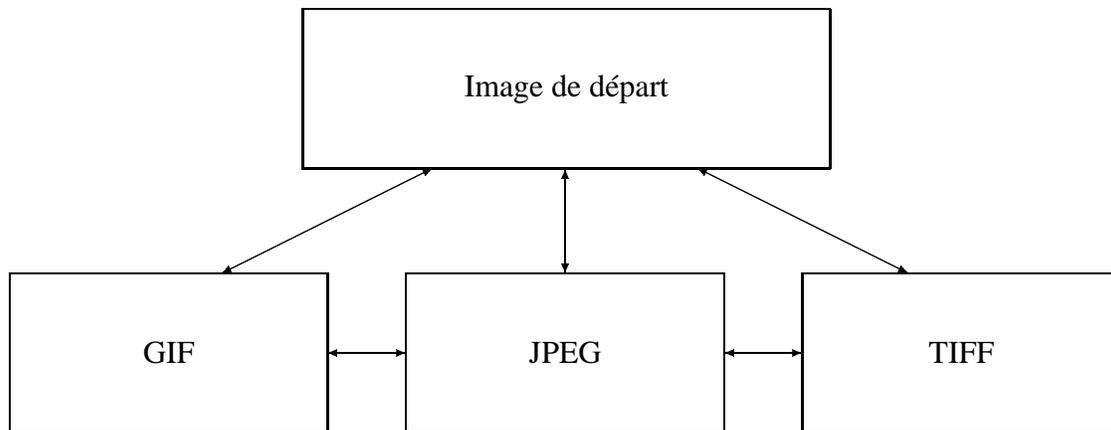


FIG. 2.31 – Conversion entre formats image.

2.6.3 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 2.32.

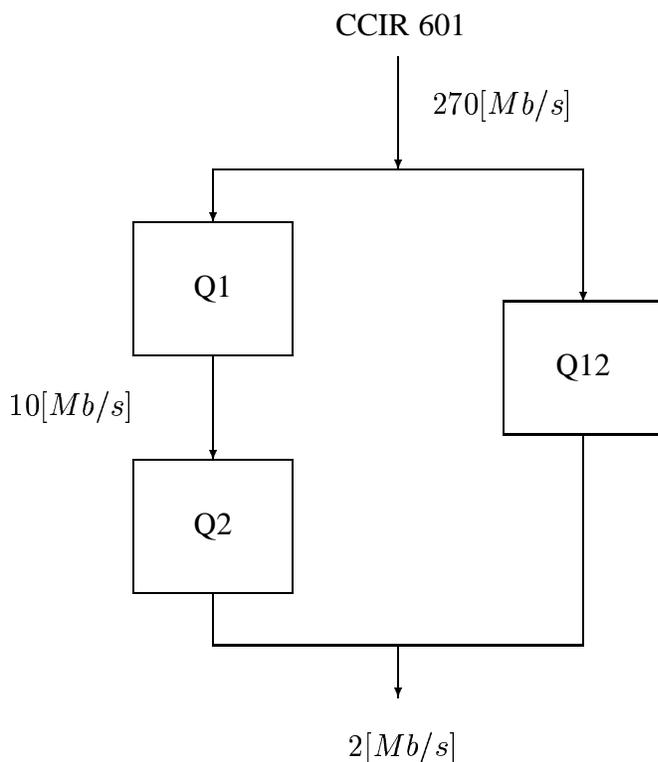


FIG. 2.32 – Transcodage (branche de gauche).

Le transcodage 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.

- 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.

2.7 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.

2.7.1 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 2.33 montre un jeu de 256 caractères correspond à la norme ISO8859 (version latin 1).

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | AA | AB | AC | AD | AE | AF |
| | ı | ϕ | £ | ¤ | ¥ | ı | š | ˆ | © | ≡ | « | ¬ | - | ® | - |
| B0 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | BA | BB | BC | BD | BE | BF |
| ° | ± | ² | ³ | - | µ | ¶ | · | , | 1 | ó | » | 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. 2.33 – Jeu de caractères tel que défini par la norme ISO8859-1.

2.7.2 Formats de mise en page

À un niveau supérieur, 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 des pages envoyées sur Internet et le standard *SGML* de l'ISO dont est dérivé le langage HTML.



```

<html>
<head>
<title>Page d'accueil programmes multimedia</title>
<meta name="GENERATOR" content="Microsoft FrontPage 4.0">
<meta name="Microsoft Theme" content="mm 000, default"><meta name="Microsoft Border" content="none"></head>
<body bgcolor="#FFFFFF" text="#000000" link="#0000FF" vlink="#993300" alink="#FF0000">
<!--mstheme--><font face="arial, arial, helvetica">
<p>&nbsp;</p>
<h1 align="center"></h1>
<!--mstheme--></font><table border="0" width="100%">
  <td width="50%" align="center" valign="top"><!--mstheme-->
    <font face="arial, arial, helvetica">&nbsp;<p>
      <a href="http://www.emmaba.net">European
Master in Multimedia and Audiovisual Business Administration (E.M.M.A.B.A.)</a></p>
    <p>en journée<!--mstheme--></font></td>
  ...
</html>

```

FIG. 2.34 – La visualisation d’une page écrite en HTML et le code correspondant.

Le langage XML a été développé après la norme HTML-4.0 pour permettre l'inclusion aisée de documents structurés. Il est souvent utilisé pour la mise en page de documents produits à partir d'une base de données.

2.7.3 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.

2.7.4 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) devrait redonner du souffle aux applications utilisant des modèles 3D. Les signaux 3D devraient faire partie des documents multimédia.

2.8 Quelques exemples de normes

2.8.1 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 (multipoint), 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 |

2.8.2 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)*. 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.

Chapitre 3

Des réseaux pour communiquer

L'interactivité ne nécessite nullement l'usage d'un réseau puisque'une machine dotée de l'interface adéquat 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 aujourd'hui 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, garantir 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*—c'est l'objet de la section suivante—, et un angle *matériel* (cf. section 3.2).

3.1 Aspect logique des transmissions

L'aspect logique des transmissions par réseaux repose sur les notions de *couches* et de *protocoles*.

3.1.1 Notion de couches : modèle de référence OSI

Afin de faciliter l'intégration de composantes d'un système de télécommunications, l'ISO a adopté une structure en couches ; il s'agit du modèle de référence *OSI* (Open Systems Interconnection). Dans ce modèle, l'ensemble d'un système de télécommunications est divisé en un nombre de couches qui réalisent chacune un certain nombre de fonctions.

La réalisation des fonctions d'une couche s'opère suivant des règles strictes définies par un *protocole*. Une couche transmet des messages contenant les données de l'utilisateur ainsi que des informations de contrôle à la couche équivalente d'un système tiers.

Le système de référence comprend 7 couches de protocoles (cf. figure 3.1). Les trois couches inférieures sont liées au réseau ; elles concernent les mécanismes de communications entre ordi-

nateurs. 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.

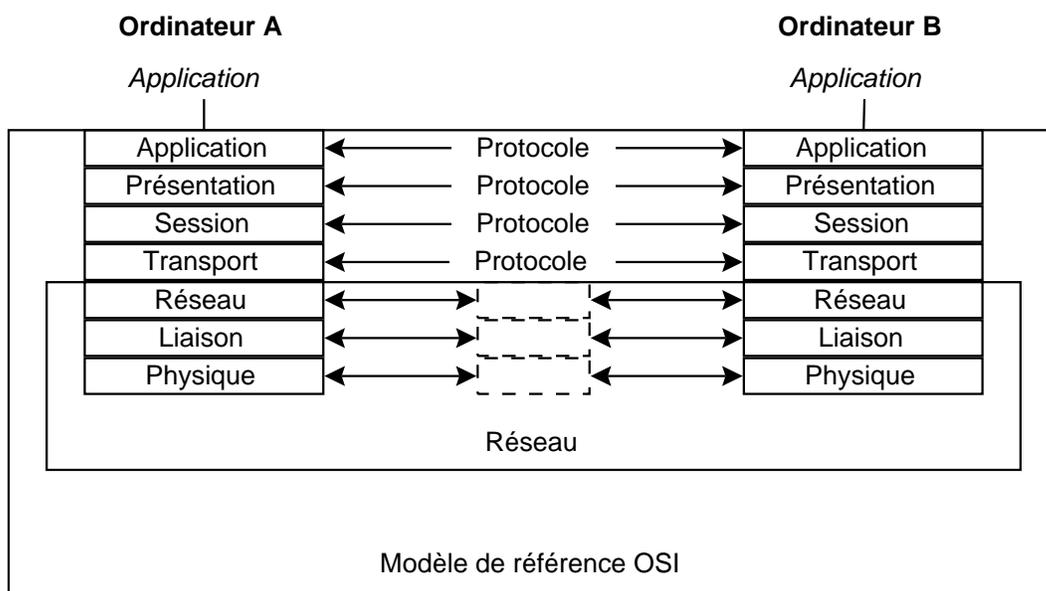


FIG. 3.1 – Structure générale du modèle OSI.

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 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 3.2 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.
2. Avec connexion permanente ("Connection oriented" en anglais). Il s'agit d'une connexion qui garantit la transmission de l'information sans erreur.

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

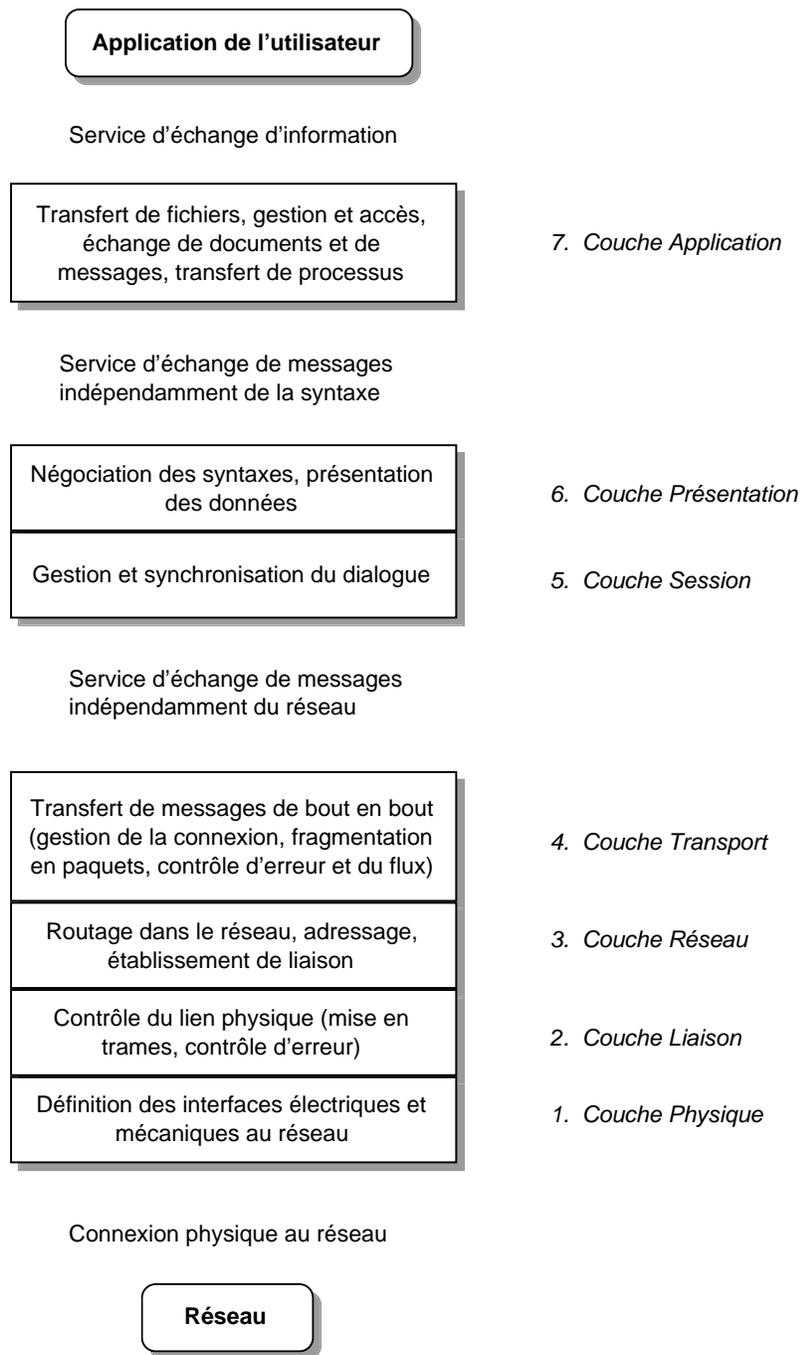


FIG. 3.2 – Résumé des fonctions du modèle OSI.

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 Le réseau Internet

Préalablement aux activités de l'ISO, le département de défense américain avait financé des activités de recherche destinées à interconnecter des réseaux à travers les États-Unis. Le réseau interconnecté, appelé initialement "Arpanet", s'est ensuite étendu pour donner naissance à l'Internet.

En raison de son existence antérieure, le réseau Internet utilise une série de protocoles appelée **TCP/IP** (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Si cette série a inspiré les concepteurs du modèle OSI, il n'y a pas eu de volonté d'unification si bien qu'aujourd'hui il existe deux implémentations de systèmes de communications : les implémentations basées sur TCP/IP ou sur le modèle OSI. La figure 3.3 montre le contenu d'un paquet IP. On y voit les différents en-têtes, ainsi que les champs constituant le message de l'application.

Quant à la figure 3.4, elle détaille le chemin emprunté pour joindre le serveur `www.apple.com`. On compte généralement un vingtaine de routeurs intermédiaires pour arriver d'un point de la planète à un autre.

DNS

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.

3.2 Les réseaux

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.

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Info |
|-----|----------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------------------|
| 1 | 0.000000 | www.internet.com | 213-193-176-46.adsl.e | TCP | http > 1600 [FIN, ACK] Seq=95365606 |
| 2 | 0.030342 | 213-193-176-46.adsl.e | www.internet.com | TCP | 1600 > http [ACK] Seq=2396590024 Ac |
| 3 | 1.266043 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | HTTP | GET /TERM/m/multimedia.html HTTP/1. |
| 4 | 1.266422 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | TCP | 1594 > http [FIN, ACK] Seq=23300450 |
| 5 | 1.266713 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | TCP | 1602 > http [SYN] Seq=2407014069 Ac |
| 6 | 1.392583 | webopedia.internet.co | 213-193-176-46.adsl.e | TCP | http > 1594 [RST] Seq=1057290455 Ac |
| 7 | 1.411572 | webopedia.internet.co | 213-193-176-46.adsl.e | TCP | http > 1602 [SYN, ACK] Seq=21066126 |
| 8 | 1.411688 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | TCP | 1602 > http [ACK] Seq=2407014070 Ac |
| 9 | 1.412138 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | HTTP | GET /TERM/m/multimedia.html HTTP/1. |
| 10 | 1.543621 | webopedia.internet.co | 213-193-176-46.adsl.e | TCP | http > 1602 [ACK] Seq=2106612611 Ac |
| 11 | 1.587961 | webopedia.internet.co | 213-193-176-46.adsl.e | HTTP | HTTP/1.1 200 OK |
| 12 | 1.588069 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | TCP | 1602 > http [ACK] Seq=2407014460 Ac |
| 13 | 1.602497 | webopedia.internet.co | 213-193-176-46.adsl.e | HTTP | Continuation |
| 14 | 1.602611 | 213-193-176-46.adsl.e | webopedia.internet.co | TCP | 1602 > http [ACK] Seq=2407014460 Ac |
| 15 | 1.617617 | 213-193-176-46.adsl.e | www.internet.com | HTTP | GET /_housebanners/asp/aspnews.com/ |
| 16 | 1.618224 | 213-193-176-46.adsl.e | www.internet.com | TCP | 1600 > http [FIN, ACK] Seq=23965900 |

Frame 9 (442 on wire, 442 captured)
 Raw packet data
 Internet Protocol
 Transmission Control Protocol, Src Port: 1602 (1602), Dst Port: http (80), Seq: 2407014070, Ack: 2106612611
 Hypertext Transfer Protocol

```

GET /TERM/m/multimedia.html HTTP/1.0\r\n
Referer: http://webopedia.internet.com/TERM/M/MIDI.html\r\n
Connection: Keep-Alive\r\n
User-Agent: Mozilla/4.76 [en] (X11; U; Linux 2.4.1-0.1.9 i686)\r\n
Pragma: no-cache\r\n
Host: webopedia.internet.com\r\n
Accept: image/gif, image/x-xbitmap, image/jpeg, image/pjpeg, image/png, */*\r\n
Accept-Encoding: gzip\r\n
Accept-Language: en\r\n

```


| | | |
|------|---|-------------------|
| 0030 | 3a 30 39 2c 47 45 54 20 2f 54 45 52 4d 2f 6d 2f | :09 GET /TERM/m/ |
| 0040 | 5d 75 6c 74 69 6d 65 64 69 61 2e 68 74 6d 6c 20 | multimedia.html |
| 0050 | 48 54 54 50 2f 31 2e 30 0d 0a 52 65 66 65 72 65 | HTTP/1.0 ..Refere |
| 0060 | 72 3a 20 68 74 74 70 3a 2f 2f 77 65 62 6f 70 65 | r: http://webope |
| 0070 | 64 69 61 2e 69 6e 74 65 72 6e 65 74 2e 63 6f 6d | dia.internet.com |

Filter: / Reset File: <capture> Drops: 0

FIG. 3.3 – Analyse du contenu d'un paquet IP.

Hostname 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. 3.4 – Analyse du chemin dans le réseau IP au moyen de l'utilitaire *traceroute*.

3.2.1 La téléphonie

Le réseau téléphonique 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 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 4 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.

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.

3.2.2 RNIS

Le Réseau Numérique à Intégration de Services 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.

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.

3.2.3 ADSL

Une technologie récente, 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.

3.2.4 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 télédistributeurs, 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.

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.

Un réseau bidirectionnel sur câble coaxial est le réseau qui se trouve dans la plupart des bureaux d'entreprise : les réseaux locaux d'ordinateurs ou LAN.

3.2.5 LAN (Local Area Network)

En marge des développements réalisés dans le domaine de la téléphonie sont apparus les réseaux locaux d'ordinateurs, réseaux adaptés aux communications entre ordinateurs. 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 à 3 Mb/s.

3.2.6 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. En voici quelques-unes :

- Les transmissions par satellite. 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.
- Les réseaux locaux sans fil. Ces réseaux offrent le même type de fonctionnalité que les LAN classiques.
- Le GSM. 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. Il y a fort à parier que l'usage d'un appareil mobile semblable au GSM se généralise pour l'implémentation de transmission de données, et partant dans les applications multimédia.

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.

Dans le tableau suivant, 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 M/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 |

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.

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 19 *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. ■

3.3 Services réseau

La figure 3.5 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 concep-

tuellement un protocole par couche.

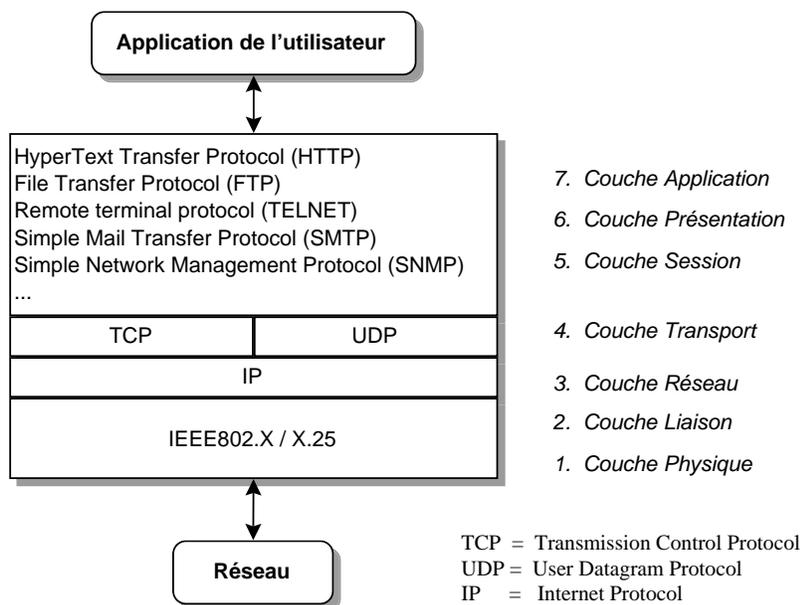


FIG. 3.5 – Suite de protocoles TCP/IP.

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 3.1 pour un résumé des principaux protocoles Internet).

3.3.1 Le Web et le protocole HTTP

Le protocole HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) est celui utilisé pour l'échange de document HTML. La figure 3.6 montre comment envoyer une requête HTTP en dehors d'un environnement graphique.

3.3.2 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 3.7. 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.

Quand au protocole *FTP* (*File Transfer Protocol*), il sert à transmettre des fichiers. Contrairement à HTTP, FTP garantit l'intégrité des fichiers transmis, ce qui est particulièrement important pour la transmission de programmes informatiques.

| | | |
|-----------------------|--|------|
| 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. 3.1 – Classification des principaux protocoles Internet.

```

Terminal
File Edit Settings Help
[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. 3.6 – Une requête HTTP envoyée à partir d'un terminal.

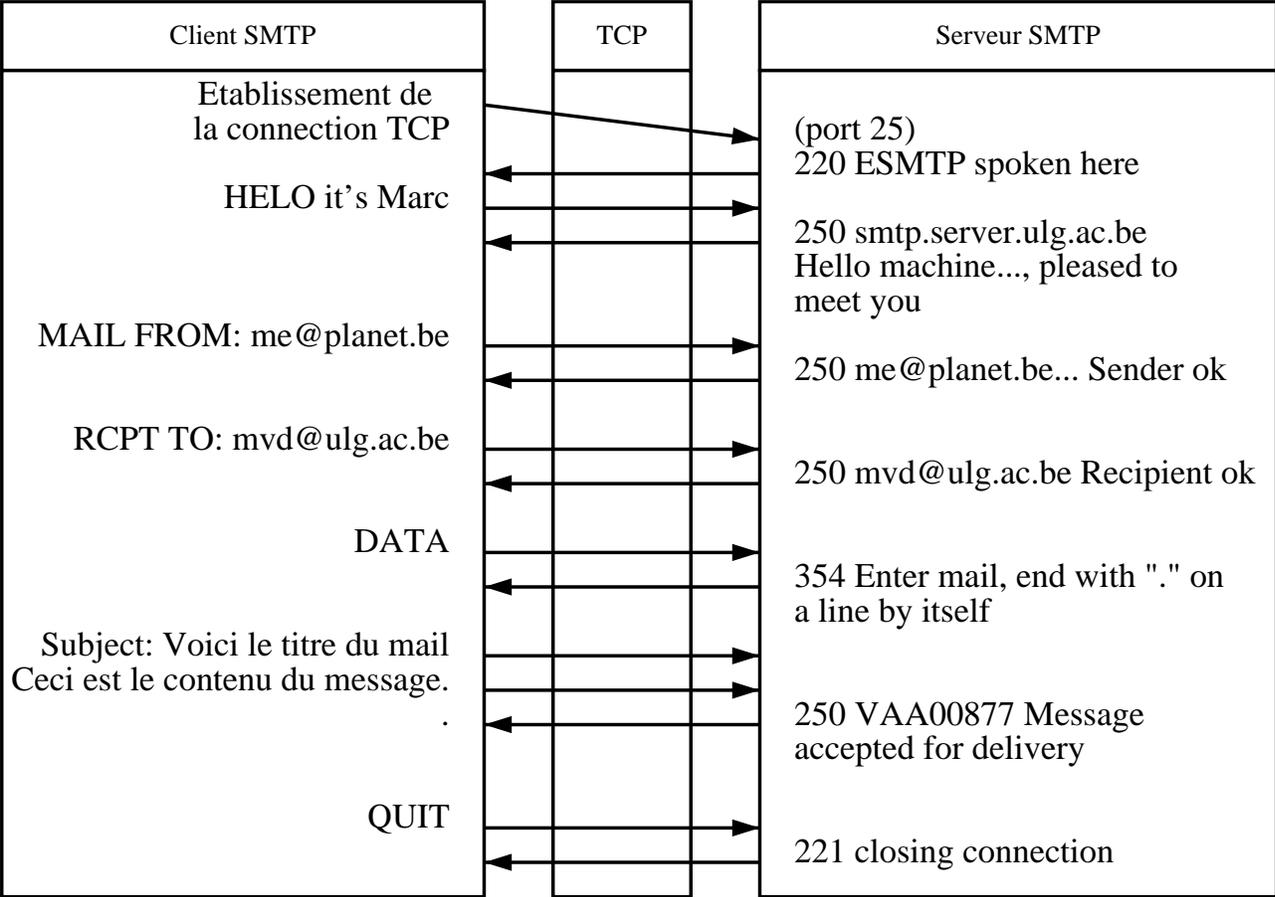


FIG. 3.7 – Messages échangés entre un client et un serveur de mails (suivant le protocole SMTP).

3.3.3 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 3.8 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.

```
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. 3.8 – Résultats d'un sondage de performances.

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.

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.

3.3.4 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 télédistributeurs 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 qualités 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.

Type de service. Le premier critère de différenciation de service est la *qualité du signal* de télévision. Le tableau 3.2 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. 3.2 – 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 possibles¹ : (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.
- 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.

3.4 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 de garder les messages secrets, permet néanmoins de conserver un haut degré de confidentialité. Nous introduisons ses principes ci-après.

3.4.1 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

¹Notons qu'il est difficile de faire la distinction entre ces deux solutions technologiques lorsque l'intégration est de bonne qualité.

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 3.9.



FIG. 3.9 – 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 ; des trois phrases de la figure 2.25 c'est bien la dernière qui devient la moins facile à comprendre. 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 souvent plus long que le message original.

3.4.2 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 :

$$C = \mathcal{E}_{k_1}(M) \quad (3.1)$$

Si la sécurité de l'algorithme se base sur le fait que celui-ci est tenu secret, l'algorithme ne présente que peu d'intérêt 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 3.1. 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 :

$$M = \mathcal{D}_{k_1}(C) \quad (3.2)$$

et donc, par substitution de C de l'égalité 3.1,

$$M = \mathcal{D}_{k_1}(\mathcal{E}_{k_1}(M)) \quad (3.3)$$

Il existe des cas où la clef de déchiffrement, notée k_2 , est différente de la clef de chiffrement (cf. figure 3.10). Dans ce cas, les relations deviennent :

$$C = \mathcal{E}_{k_1}(M) \quad (3.4)$$

$$M = \mathcal{D}_{k_2}(C) \quad (3.5)$$

$$M = \mathcal{D}_{k_2}(\mathcal{E}_{k_1}(M)) \quad (3.6)$$



FIG. 3.10 – 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.

3.4.3 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 trois algorithmes cryptographiques suivants :

DES Data Encryption Standard. C’est actuellement l’algorithme de chiffrement le plus populaire. C’est un algorithme à clef secrète ; la même clef sert au chiffrement et au déchiffre-

ment.

RSA d'après le nom de ses concepteurs : RIVEST, SHAMIR et ADLEMAN. C'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 publique utilisé dans le programme de signature numérique PGP (Pretty Good Privacy).

AES Advanced Encryption Standard. Ce standard 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.

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.

3.4.4 La sécurité dans les réseaux

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 3.11.

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.

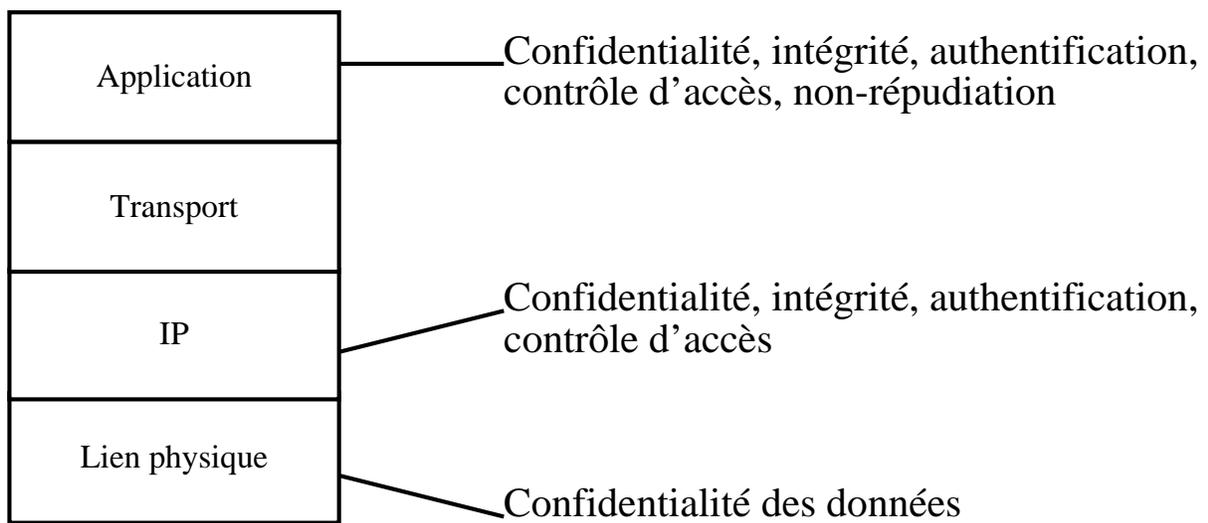


FIG. 3.11 – Modèle de sécurité.

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.

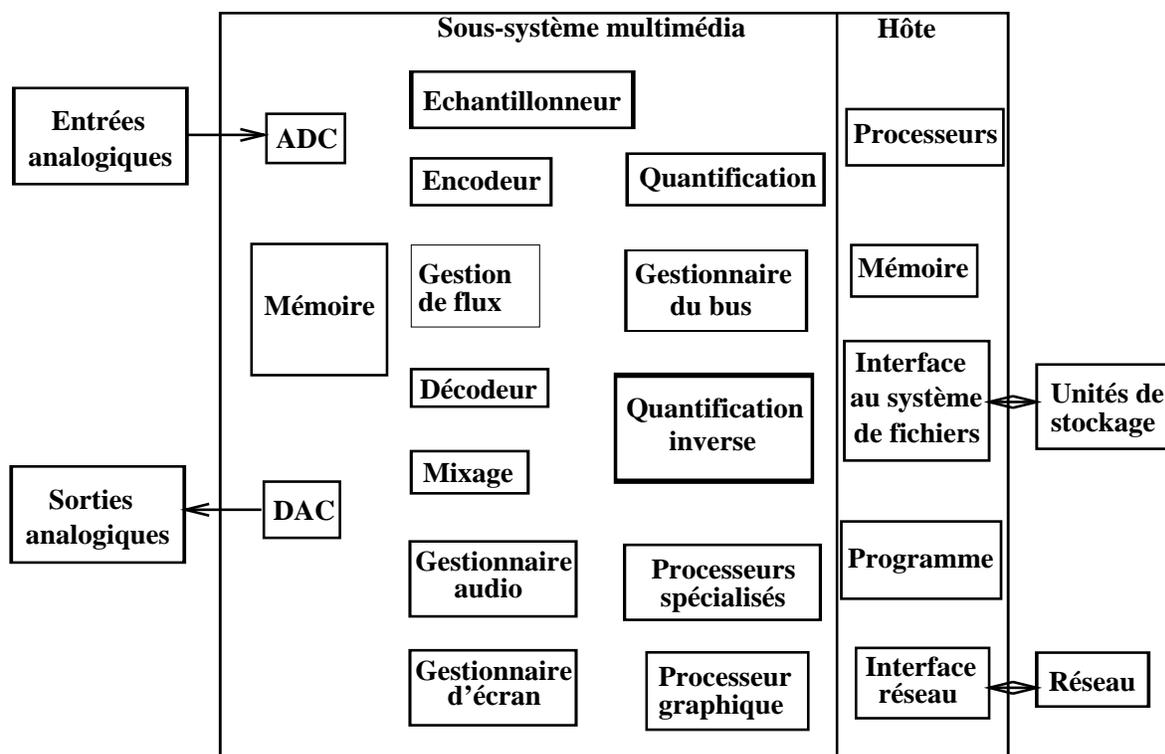


FIG. 4.1 – Composantes logiques d'un système multimédia.

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 20 *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 1024×768×3 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

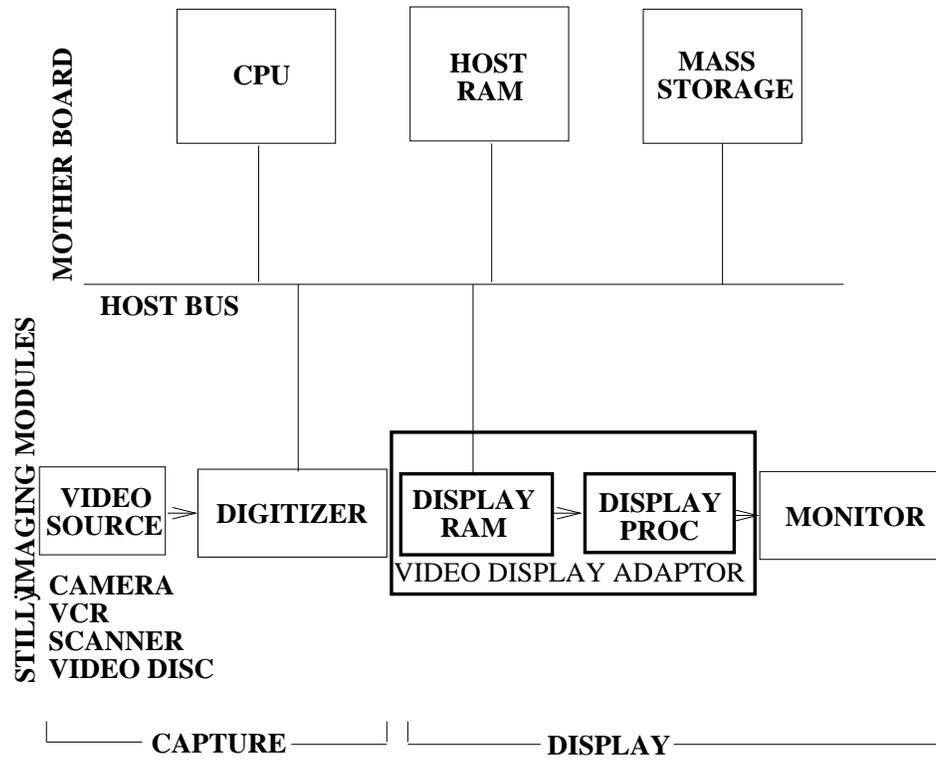


FIG. 4.3 – Capture (acquisition) d’image.

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.

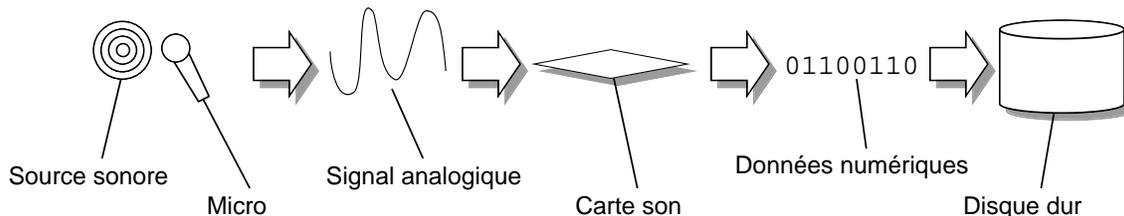


FIG. 4.4 – Acquisition d'un son.

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 21 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

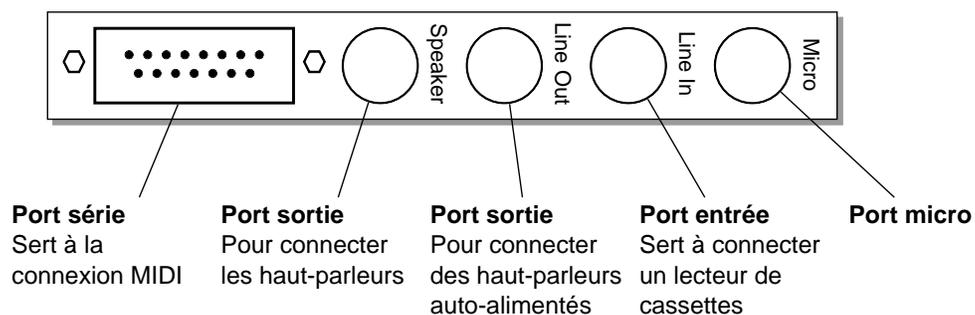


FIG. 4.5 – Exemple d'un jeu de connecteurs de carte son.

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 MP-EG1A 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.

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



FIG. 4.6 – La première caméra MPEG.

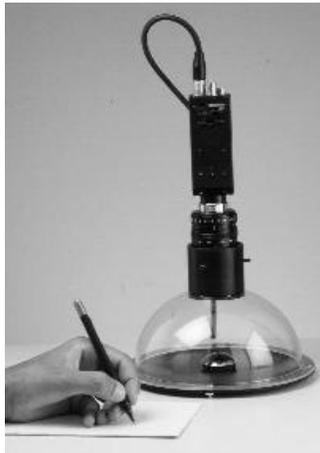


FIG. 4.7 – Une caméra avec un angle de vue de 360 degrés.

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

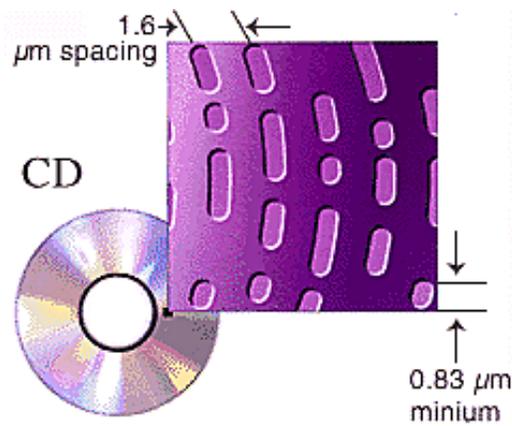


FIG. 4.8 – Le disque compact (CD).

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.

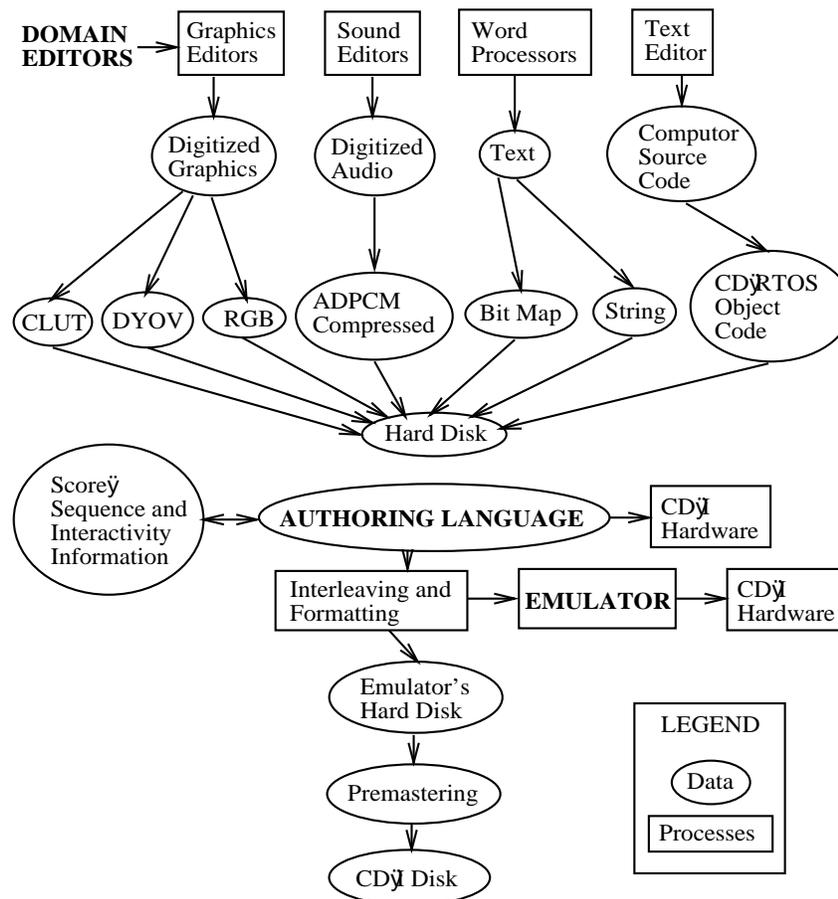


FIG. 4.9 – Étapes dans la production d'un CD-I.

DVD-ROM. Le DVD-ROM est la variante du DVD pour le stockage de données informatiques. Le DVD est commenté abondamment à la page 90.

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.

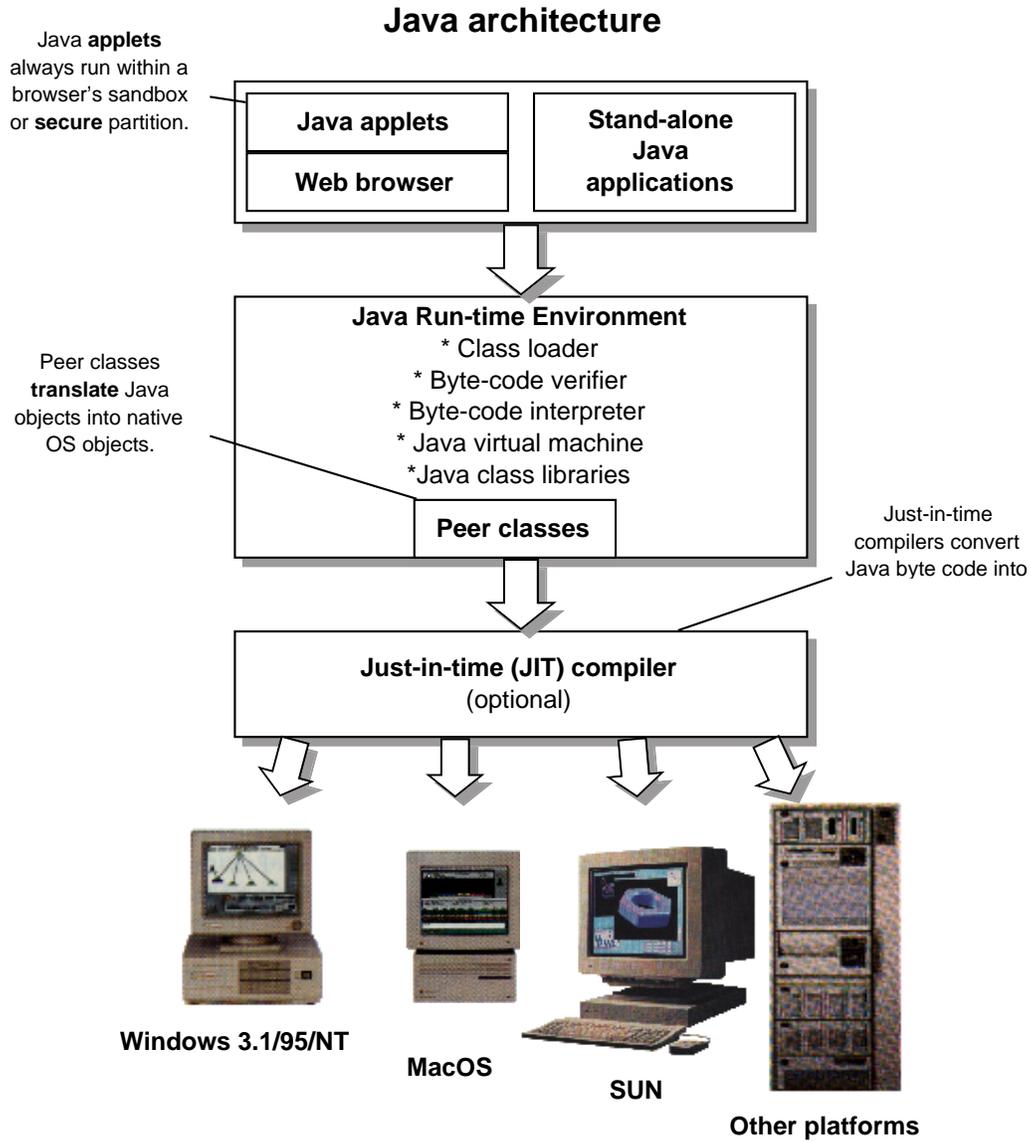


FIG. 4.10 – Éléments de l'architecture Java.

Index

- échantillonnage, 35
- AC-3, 47
- ADSL, 67
- AES, 78
- aliasing, 36
- authentification, 77
- bande passante, 21
- Betacam, 88
- BMP, 53
- broadcast, 75
- bruit, 34
- CCIR-601, 90
- CD, 88
- CD Audio, 89
- CD-I, 91
- CD-ROM, 90
- CD-ROM XA, 91
- certification, 5
- CGM, 54
- chiffrement, 75
- CMY, 28
- compression, 41
- couche, 61
- couleur, 22
- cryptographie, 75
- débit, 41
- décibel, 35
- DAVIC, 7
- DCC, 89
- DES, 77
- DICOM, 59
- distribution, 75
- document multimédia, 3
- DVD, 90
- DVD-ROM, 92
- DVI, 55
- entropie, 42
- EPS, 54
- Ethernet, 63, 68
- ETSI, 6
- FlashPix, 53
- FTP, 70
- G.72x, 46
- gamma, 29
- GIF, 53
- H.26x, 49
- Hertz, 17
- HTML, 56
- hue, 28
- Huffman, 44
- hypermédia, 3
- hypertexte, 3
- IDEA, 78
- IEEE, 6
- intégrité, 77
- intensité, 22
- interactivité, 74
- Internet, 9
- InterNIC, 12
- interpolation, 41
- IP, 64
- ISO, 6
- ITU, 6
- Java, 93

JPEG, 48

LAN, 68
level, 50
lien, 3
luminance, 22, 26
LZW, 45

MHEG, 58
micro, 86
MIDI, 52
MPEG-1, 47
MPEG-2, 47
MPEG-21, 51
MPEG-4, 51
MPEG-7, 51
MPEG-x, 49
multicast, 75

Network Computer (NC), 61, 93
normalisation, 4
norme, 2
numérisation, 34
nœud, 3

octet, 37
OSI, 61

Pentium, 82
PGP, 78
Photo CD, 91
PICT, 53
pixel, 36, 82
PostScript, 54
probabilité, 42
profile, 50
protocole, 61

qualité
 vidéo, 74
quantification, 37

rapport signal à bruit, 35
RLC, 44
RNIS, 67

RSA, 78

saturation, 28
SGML, 56
Shannon, 36
SMTP, 70
SPIFF, 53
standard, 2
standardisation, 4
SVGA, 82

taux de compression, 43
TCP/IP, 64
teinte, 28
TIFF, 53
transcodage, 55

unicast, 75

VHS, 88
vidéoconférence, 58
VRML, 58

W3C, 12
WAP, 7
WebTV, 75

YCbCr, 28
YIQ, 28
YUV, 28

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. 67
- 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
- bit** Unité fondamentale de mesure de l'information (numérique). Un bit vaut 0 ou 1. . . 37
- BMP** *Bitmap*. Format d'image qui est à l'origine le format image Windows (Microsoft) et pour lequel les pixels sont décrits sous leur forme naturelle, séquentiellement RVBRVB... . . . 53
- byte** Le byte, ou octet, est une mesure de l'information binaire. 1 byte vaut 8 bits. . . . 37
- CCIR601** Norme de télévision numérique, ayant été développée dans le but d'uniformiser les supports d'images numériques destinée à la télévision. 50
- CIE** *Commission internationale de l'éclairage*. Organisme qui a, entre autres, défini un système de représentation à partir de trois couleurs primaires. 24
- CLUT** *Color Look Up Table*. Liste de couleurs, ainsi que leur numéros d'index associés, utilisée dans le rendu d'images 8 bits. 30
- 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). 28
- 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. 48, 49
- DNS** *Domain Name Service*. Service disponible sur Internet, permettant la conversion d'un nom en une adresse IP valide. 64
- 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. 29
- 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. 49
- 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. 73

| | | |
|----------|--|------------|
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> . Standard de téléphonie mobile adopté en Europe, en Asie et en Australie. | 6, 68 |
| 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. | 74 |
| HDTV | <i>High Definition Television</i> . Format d'images résultant de l'extrapolation du format CCIR. Peut être de deux types (5/4) ou (16/9). | 74 |
| HTML | <i>Hypertext Markup Language</i> . Dérivé du standard SGML, s'est imposé comme document web. | 8, 12, 56 |
| HTTP | <i>Hypertext Transfer Protocol</i> . Protocole définissant comment les pages web sont transférées entre un serveur et un navigateur internet. | 70 |
| Hz | <i>Hertz</i> . Unité de mesures de la fréquence. 5 Hz signifie une fréquence de 5 cycles par seconde. | 17 |
| ISBN | <i>International Standard Book Number</i> . Identifiant des publications littéraires (souvent apposé au dos de chaque livre). | 8 |
| Java | Langage de programmation orienté objet développé par la firme Sun Microsystems. Ses plus contributions au monde de l'internet sont les applets java. | 93 |
| JPEG2000 | <i>Joint Photographic Experts Group 2000</i> . Format d'images, faisant suite à la norme JPEG, qui sera basée sur les ondelettes. Sa parution est prévue pour 2001. | 49 |
| MIDI | <i>Musical Instrument Digital Interface</i> . Standard adopté par l'industrie du disque pour contrôler des équipements qui émettent de la musique (synthétiseurs, cartes son). | 16 |
| MP3 | <i>MPEG-1 audio layer 3</i> . 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. | 9, 47 |
| MPEG | <i>Moving Picture Experts Group</i> . 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, 8 |
| NTSC | <i>National Television Systems Committee</i> . Comité qui a normalisé le système de couleur utilisé pour la télévision analogique aux États-Unis. Il a donné son nom au dit format. | 29, 33 |
| PAL | <i>Phase Alternate Line</i> . Format de télévision analogique utilisé dans la majorité des pays européens (hormis la France). | 29, 33, 74 |
| palette | Table indexant les couleurs des pixels d'une image. Ce principe est utilisé pour le format GIF. | 30 |

| | | |
|-------|---|--------|
| PCM | <i>Pulse Code Modulation</i> . 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[<i>kb/s</i>]. | 37, 45 |
| PDF | <i>Portable Document Format</i> . Format de fichiers développé par Adobe Systems. Très utile pour la diffusion car portable. | 54 |
| PNG | <i>Portable Network Format</i> . 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. | 53 |
| RFC | <i>Request For Comments</i> 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 | <i>Red Green Blue</i> . 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 <i>CIE</i> en 1931. Enfin, les composantes RGB des systèmes PAL et NTSC ne sont monochromatiques. | 24, 28 |
| RTP | <i>Real-Time Transport Protocol</i> . Protocole de transport fournissant un support pour les applications en temps-réel. Le protocole RTP ordonnance les paquets et leur adjoint des références temporelles. | 73 |
| RTT | <i>Round-Trip Time</i> . Intervalle de temps entre l'émission d'un paquet et la réception de l'acquis. | 73 |
| SECAM | <i>Système Électronique Couleur Avec Mémoire</i> . Format de télévision analogique utilisé en France. La majorité des pays européens utilisent plutôt le système PAL. | 33 |
| SGML | <i>Standard Generalized Markup Language</i> . 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 |
| TCP | <i>Transmission Control Protocol</i> . Protocole de transport utilisé pour communiquer sur Internet. TCP se charge de numéroter les paquets et gère les acquis (ou accusés de réception). | 70 |
| TIFF | <i>Tagged Image File Format</i> . Format d'images présentant un grand nombre de modes de compression et de codage. | 53 |
| UDP | <i>User Datagram Protocol</i> . 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 destination. | 70 |

| | | |
|------|--|----|
| VGA | <i>Video Graphic Adapter</i> . Type d'image informatique dont le format est 640 colonnes et 480 lignes. | 82 |
| VHS | <i>Virtual Host Storage</i> . Format de stockage pour signaux de télévision analogique. Ce format, développé par la firme JVC, est utilisé en Europe pour l'enregistrement sur cassette. | 74 |
| VoIP | <i>Voice over IP</i> . Nom générique pour les transmissions de signaux sonores par le biais des protocoles Internet (plus spécifiquement IP et RTP). | 73 |
| XML | <i>Extensible Markup Language</i> . Basé sur SGML, XML est un langage permettant de créer des documents contenant de l'information structurée. Devrait succéder à HTML. 8, 12, 58 | |

Bibliographie

- [1] P. Boursier et P.-A. Taufour. *La technologie multimédia*. Hermès, 1994.
- [2] P. Buser et M. Imbert. *Neurophysiologie fonctionnelle IV*. Hermann, 1987.
- [3] S. Collin. *Le multimédia sur PC*. Dunod, Paris, 1994.
- [4] Elmer. *Le son sur micro-ordinateur*. Dunod, Paris, 1994.
- [5] J. Foley, A. van Dam, S. Feiner, and J. Hughes. *Computer graphics : principles and practice*. Addison-Wesley, second edition, 1990.
- [6] S. Gibbs and D. Tsichritzis. *Multimedia programming : objects, environments and frameworks*. Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [7] F. Halsall. *Data communications, computer networks and open systems*. Addison-Wesley, fourth edition, 1996.
- [8] F. Halsall. *Multimedia communications : applications, networks, protocols and standards*. Addison-Wesley, 2001.
- [9] E. Holsinger. *How multimedia works*. Ziff-David Press, Emeryville, California, 1994.
- [10] R. Hunt. *The reproduction of colour*. Fountain Press, fifth edition, 1995.
- [11] M. Kunt, G. Grunland, et M. Kocher. *Traitement de l'information : traitement numérique des images*, Volume 2. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993.
- [12] 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.
- [13] J. Levine and C. Baroudi. *Internet : les fondamentaux*. International Thomson Publishing, Paris, 1996.
- [14] K. Mullet and D. Sano. *Designing visual interfaces ; communication oriented techniques*. Sunsoft Press, Prentice Hall, 1995.
- [15] M. Nelson. *La compression de données*. Dunod, Paris, 1993.
- [16] J. Nielsen. *Multimedia and hypertext : the Internet and beyond*. AP Professional, 1995.
- [17] B. Schneier. *Cryptographie appliquée : protocoles, algorithmes et codes sources en C*. International Thomson Publishing, Paris, 1995.