

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Traité d'Électricité

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE JACQUES NEIRYNCK

VOLUME XVIII

SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

Pierre-Gérard Fontolliet

Nouvelle édition, revue et augmentée



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

Jusqu'à ce jour, les théories et les applications de l'électricité n'ont jamais fait l'objet d'un exposé systématique et unifié.

Les 22 volumes du Traité d'Electricité comblent cette lacune. Cet ouvrage rassemble de façon cohérente des connaissances jusqu'ici disparates et fragmentaires en fonction de la hiérarchie de modèles de plus en plus généraux, tels que les ingénieurs les ont conçus pour maîtriser des techniques de plus en plus complexes.

PRÉSENTATION DU VOLUME XVIII

SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Télécommunications et information
- Planification
- Milieux et procédés de transmission
- Transmission numérique et analogique
- Modulations numériques et analogiques
- Systèmes numériques et analogiques
- Téléx et transmission de données
- Faisceaux hertziens
- Liaisons par satellites
- Liaisons par fibres optiques
- Réseaux et commutation

Les télécommunications représentent un exemple typique de système technique complexe, impliquant des aspects théoriques et pratiques, techniques et économiques. L'interface avec l'homme y est prépondérant et l'impact social évident.

Ce volume aborde ces différents aspects et représente une synthèse de principes, de théories et de méthodes développés dans d'autres volumes du Traité d'Electricité, en les orientant vers la réalité pratique d'une application particulière. Sa fonction est essentiellement didactique: il doit permettre d'évaluer, de comparer et de dimensionner des procédés, des milieux et des systèmes de transmission.

Après une présentation générale des buts, des services et de l'impact humain des télécommunications, la notion d'information est introduite et quantifiée. Les objectifs et les contraintes de la planification d'un système sont précisés, en spécifiant la qualité de transmission et en abordant les problèmes de coordination internationale, de fiabilité et les aspects économiques.

Les propriétés des lignes, des fibres optiques et des ondes font l'objet d'un chapitre pragmatique, suivi d'un exposé général de quelques procédés de transmission tels que la modulation, l'échantillonnage et le multiplexage.

Deux chapitres fondamentaux sont consacrés l'un à la transmission numérique et

Presses polytechniques
et universitaires romandes
CH-1015 Lausanne

Secr

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

XVIII
SYSTÈMES DE
TÉLÉCOMMUNICATIONS

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE JACQUES NEIRYNCK

VOLUME XVIII

SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

par Pierre-Gérard Fontolliet

Nouvelle édition, revue et augmentée



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Cet ouvrage fait partie d'une série de vingt-deux volumes
dont les titres sont les suivants :

- I INTRODUCTION À L'ÉLECTROTECHNIQUE
- II MATÉRIAUX DE L'ÉLECTROTECHNIQUE
- III ÉLECTROMAGNÉTISME
- IV THÉORIE DES RÉSEAUX DE KIRCHHOFF
- V ANALYSE ET SYNTHÈSE DES SYSTÈMES LOGIQUES
- VI THÉORIE ET TRAITEMENT DES SIGNAUX
- VII DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEUR
- VIII ÉLECTRONIQUE
- IX ÉLECTROMÉCANIQUE
- X MACHINES ÉLECTRIQUES
- XI MACHINES SÉQUENTIELLES
- XII ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
- XIII HYPERFRÉQUENCES
- XIV CALCULATRICES
- XV ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE
- XVI ÉLECTRONIQUE DE RÉGLAGE ET DE COMMANDE
- XVII SYSTÈMES DE MESURE
- XVIII SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
- XIX FILTRES ÉLECTRIQUES
- XX TRAITEMENT NUMÉRIQUE DES SIGNAUX
- XXI ÉLECTROACOUSTIQUE
- XXII HAUTE TENSION



Le Traité d'Electricité est une publication des
Presses polytechniques et universitaires romandes, fondation scientifique
dont le but est principalement la diffusion des travaux de
l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Le catalogue de ces publications peut être obtenu aux
Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

**Vous pouvez consulter notre catalogue général
sur notre serveur Internet <http://sente.epfl.ch/webs/ppur/>**

Nouvelle édition revue et augmentée
ISBN 2-88074-313-3

© 1996 Presses polytechniques et universitaires romandes
CH - 1015 Lausanne
Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit,
interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

INTRODUCTION

« L'ingénieur est un type qui sait ce qu'il peut négliger. »

Prof. E. Juillard, 1886-1982

Pouvoir négliger est, en technique, une nécessité tout aussi impérieuse que savoir calculer. Mais savoir négliger est un art difficile et subtil qui exige à la fois une connaissance approfondie des phénomènes ainsi que des techniques, et un jugement sûr pour évaluer le degré d'approximation nécessaire, encore compatible avec les buts à atteindre. L'ingénieur doit savoir que les modèles simples sont faux, mais que ceux qui ne le sont pas sont inutilisables. Entre un perfectionnisme fatal parce que trop coûteux et un empirisme dangereux par son caractère aléatoire, il doit trouver le juste compromis qui satisfait en même temps les exigences de qualité et les impératifs économiques. Il y a des choses que l'on peut calculer, il y en a d'autres qu'il faut estimer ou sentir. L'ingénieur doit être capable des deux démarches et, plus encore, il doit avoir le discernement nécessaire pour faire la distinction entre les deux.

La réalité est toujours plus complexe que la théorie qui tente de la décrire. En effet, pour appréhender cette réalité, on est bien obligé de la simplifier et de la schématiser. Elle s'en venge quelquefois avec malice ou violence, rappelant l'ingénieur imprudent à sa condition d'homme ... Mais souvent aussi, elle se prête à ce jeu et accepte de donner à l'ingénieur la joie d'avoir participé à une création ...

Intentions

Face à la triple réalité des besoins humains en communication, de l'imperfection des moyens techniques disponibles pour les satisfaire et des contraintes économiques imposées au coût de ces moyens, les télécommunications représentent l'exemple typique d'un système technique complexe, impliquant des aspects théoriques et pratiques, sans cesse confronté à la rude nécessité d'un compromis entre coût et qualité. L'interface avec l'Homme y est prépondérant et l'impact social évident. Le haut degré de qualité et de fiabilité attendu des services de télécommunications pose des exigences sévères quant à la planification, à l'exploitation et à la maintenance des systèmes et des réseaux. L'extension mondiale du réseau de télécommunications nécessite une coordination très stricte sur le plan international.

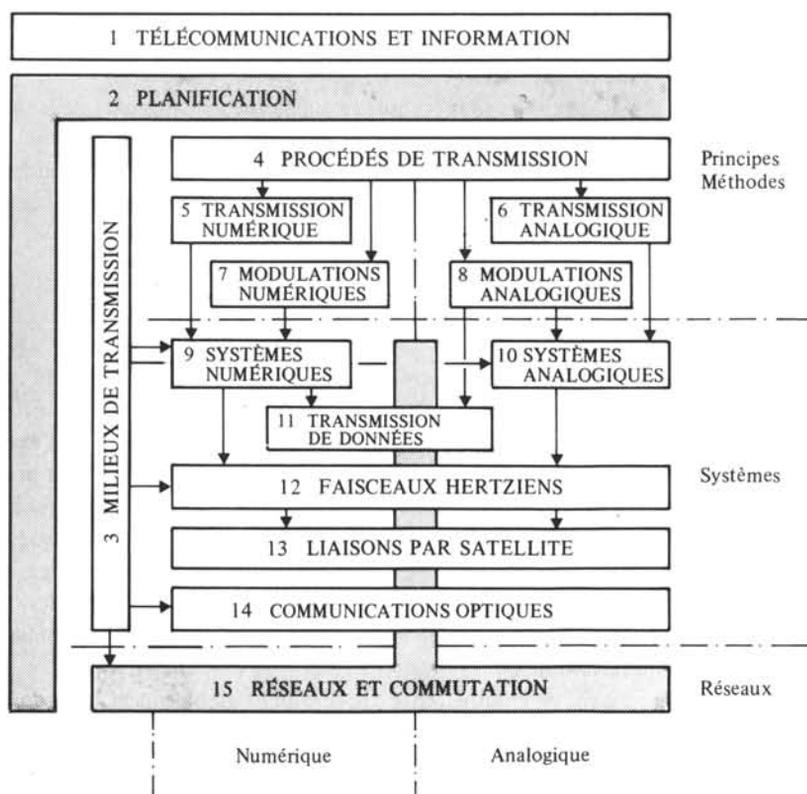
Dans cet esprit, ce volume tente une approche globale et macroscopique [78] des systèmes et des réseaux de télécommunications, en montrant d'emblée la complexité et l'imbrication des problèmes. Il représente une synthèse de principes, de théories et de méthodes développés dans d'autres volumes de ce Traité, en les orientant vers une application particulière.

A ce titre, sa fonction est essentiellement didactique. Il a pour but de donner à de futurs ingénieurs électriciens une idée de la diversité des problèmes que soulève un grand système technique et de la richesse des solutions qui leur ont été proposées.

Présenter en un volume un panorama tant soit peu actuel des télécommunications implique fatalement des choix, des raccourcis et des distorsions. Les principes et les méthodes exposés devraient servir de bases à des développements particuliers, dont seuls quelques exemples sont donnés dans la deuxième partie de l'ouvrage, dès le chapitre 9. Les systèmes sont décomposés en blocs fonctionnels, sans entrer dans le détail de leur réalisation technologique. En revanche, les problèmes de planification et d'exploitation sont évoqués à chaque occasion.

Plan du volume

L'approche de systèmes aussi complexes que ceux de télécommunications ne peut se faire par un enchaînement linéaire de chapitres successifs. Il a fallu adopter une *dé-marche en spirale* dans laquelle le sujet ne s'éclaire que petit à petit, par un effet d'intégration, au cours d'une progression qui a forcément quelque chose d'arbitraire et dans laquelle de fréquents renvois en avant ou en arrière sont nécessaires. La figure ci-dessous explique la structure du volume et suggère des cheminements à travers sa lecture.



Plan du volume.

On remarque que le numérique est systématiquement présenté avant l'analogique. Cet ordre correspond, d'une part, à l'évolution historique des télécommunications au cours de laquelle le télégraphe a précédé le téléphone et, d'autre part, au développement actuel résolument orienté vers des formes numériques de communication. Toutefois, la connaissance et la maîtrise de la communication numérique passe inévitablement par une profonde compréhension des phénomènes analogiques, tant il est vrai qu'il n'existe pas, en fait, de signaux numériques (en dépit d'un abus de langage qui les dénomme ainsi!).

Place du volume XVIII dans le *Traité d'Electricité*

Par son insertion dans une suite coordonnée d'ouvrages, ce volume profite largement de préalables développés et acquis dans d'autres volumes plus fondamentaux et, par là même, plus généraux. Certains chapitres qui, par tradition et souci pédagogique, font partie d'ouvrages classiques sur les télécommunications se trouvent, dans le cas du *Traité d'Electricité*, dans des volumes précédents.

Ainsi, la théorie des ondes et celle des lignes, indispensables à une bonne compréhension des milieux de transmission réels, sont traitées dans le volume III. La théorie du signal et les moyens de le traiter font l'objet du volume VI. D'autre part, les bases et les méthodes de l'électronique se trouvent dans les volumes VII et VIII.

Fort de tous ces préalables théoriques, le volume XVIII peut se concentrer sur les aspects plus globaux des systèmes de télécommunications, c'est-à-dire sur les interactions dynamiques entre les blocs fonctionnels de ces systèmes d'une part, entre le système et son environnement technique, humain et économique d'autre part. A la rationalité scientifique des bases théoriques s'ajoute alors une part d'irrationnel et d'impondérable, liée à la présence de l'Homme dans le système.

Enfin, ce volume trouve son prolongement dans d'autres volumes du *Traité d'Electricité* sous la forme d'un approfondissement dans certaines techniques auxquelles les télécommunications ont recours. Par exemple, le volume XIX développe le sujet des filtres électriques, éléments fondamentaux des systèmes analogiques et numériques; le volume XXI traite de l'électroacoustique sans laquelle une transmission téléphonique ou musicale ne serait pas possible; le domaine des hyperfréquences, présenté dans le volume XIII, est aussi riche en applications liées aux télécommunications.

Objectifs pédagogiques

Lié à un enseignement de deux semestres, ce volume n'en est que le support et le squelette qui demande à être animé par des études de cas et des exercices en forme d'exemples concrets. Avec ce complément indispensable, on peut espérer s'approcher des objectifs suivants :

Etre capable de

- situer qualitativement et quantitativement le problème de la transmission d'information dans un contexte technique et humain;
- évaluer et comparer les procédés de modulation et les milieux réels de transmission pour les choisir en connaissance de cause;
- appliquer avec bon sens les théories générales à des cas particuliers concrets de transmission;

- planifier et dimensionner dans ses grandes lignes un système de télécommunications numérique (par la probabilité d'erreur) ou analogique (par le bilan de bruit);
- évaluer et comparer des systèmes complets en vue d'un choix justifié.

Conventions

Le Traité d'Electricité est composé de volumes (vol.) repérés par un chiffre romain (vol. V). Chaque volume est partagé en chapitres (chap.) repérés par un nombre arabe (chap. 2). Chaque chapitre est divisé en sections (sect.) repérées par deux nombres arabes séparés par un point (sect. 2.3). Chaque section est divisée en paragraphes (§) repérés par trois nombres arabes séparés par deux points (§ 2.3.11). Les références internes stipulent le volume, le chapitre, la section ou le paragraphe du Traité auquel on renvoie. Dans le cas de la référence à une partie du même volume, on omet le numéro de celui-ci.

Les références bibliographiques sont numérotées continûment par volume et repérées par un seul nombre arabe entre crochets.

Les équations hors texte sont numérotées continûment par chapitre et repérées par deux nombres arabes placés entre parenthèses et séparés par un point (3.14); une équation est mise en évidence par son numéro imprimé en caractère gras. Les figures et tableaux sont numérotés continûment par chapitre et repérés par deux nombres arabes précédés de Fig. (Fig. 4.12) ou Tableau (Tableau 4.13).

Un terme apparaît en *italique maigre* la première fois qu'il est défini dans le texte. Un passage important est mis en évidence lorsqu'il est composé en *italique gras*.

La plupart des termes techniques définis ou introduits en français sont donnés simultanément dans leur version anglaise et allemande, identifiées systématiquement dans tout le volume (y compris l'index analytique trilingue) par le caractère typographique "univers". Ces termes, de même que les symboles littéraux et graphiques répertoriés à la fin du volume, s'en tiennent autant que possible aux conventions ou aux usages internationaux.

De nombreux sigles et abréviations, consacrés par un large usage dans la littérature spécialisée, ont été repris de l'anglais, sans chercher à les adapter à tout prix en français. C'est le cas notamment de la désignation abrégée de toutes les modulations. On en trouvera la liste en fin de volume.

Présentation de la nouvelle édition

Depuis la parution, en 1983, de la première édition de ce volume, les télécommunications ont poursuivi leur évolution à un rythme soutenu. Quand bien même les principes qui les fondent, et qui sont l'objet principal de cet ouvrage, n'ont guère changé, il a été nécessaire d'adapter la présentation de leurs applications dans le cadre des systèmes et des réseaux actuels et futurs. Les perspectives annoncées au paragraphe 1.4.3 se sont confirmées et amplifiées. Notamment, l'émergence des communications optiques donne lieu à des possibilités et à des solutions radicalement nouvelles. Par ailleurs, le rôle fédérateur des techniques numériques et de l'informatique met en évidence la notion de réseau, au-delà des domaines classiques de la transmission et de la commutation.

En conséquence, les accents principaux de la nouvelle édition sont:

- la prise en compte de l'importance des **communications optiques** par une rédac-

tion nouvelle et élargie du chapitre 14 et de la section 3.7 consacrée aux fibres optiques;

- une approche nouvelle et plus étoffée des **réseaux** et des principes de **commutation** (chap. 15) tenant compte de l'intégration des services (RNIS), des réseaux à large bande en mode de transfert asynchrone (ATM), des communications mobiles et des réseaux optiques;
- une extension du chapitre 11 sur les **transmissions de données** impliquant aussi un remaniement profond de la section 8.11 qui traite des modulations analogiques discrètes;
- l'insertion d'une section sur la **hiérarchie numérique synchrone** (SDH) dans le chapitre 9 consacré aux systèmes numériques;
- l'élargissement du chapitre 13 aux **satellites non géostationnaires** et à leur utilisation pour des communications mobiles.

De plus, de très nombreuses modifications et adjonctions mineures contribuent à actualiser ce texte, tout en lui conservant son caractère didactique centré sur les principes plutôt que sur les détails.

En revanche, pour limiter l'extension de ce volume et tenir compte de l'obsolescence de certains systèmes (en dépit de leur intérêt historique), les passages relatifs aux systèmes à courants porteurs (chap. 10) et au téléx (chap. 11), par exemple, ont été considérablement raccourcis, voire même supprimés.

La bibliographie, tout en restant limitée à l'essentiel, a fait l'objet d'une mise à jour et d'une restructuration.

TABLE DES MATIÈRES

	INTRODUCTION	v
CHAPITRE 1	TÉLÉCOMMUNICATIONS ET INFORMATION	
	1.1 Objectifs des télécommunications	1
	1.2 Les télécommunications, l'homme et la société	4
	1.3 Notion de système	7
	1.4 Evolution des télécommunications	8
	1.5 Information	11
	1.6 Communication	14
	1.7 Caractéristiques des sources et destinataires d'information et conséquences pour les systèmes de transmission	17
CHAPITRE 2	PLANIFICATION: OBJECTIFS, CONTRAINTES, MÉTHODES	
	2.1 Conception et dimensionnement d'un système de télécommunications	25
	2.2 Standardisation nationale et internationale	30
	2.3 Affaiblissement et niveau	32
	2.4 Qualité de transmission	38
	2.5 Qualité de commutation	51
	2.6 Fiabilité	53
	2.7 Aspects économiques	61
CHAPITRE 3	MILIEUX DE TRANSMISSION	
	3.1 Introduction	67
	3.2 Propriétés générales des lignes dans le domaine fréquentiel	67
	3.3 Propriétés générales des lignes dans le domaine temporel	77
	3.4 Diaphonie	80
	3.5 Lignes et câbles à paires symétriques	85
	3.6 Lignes et câbles à paires coaxiales	93
	3.7 Fibres optiques	97
	3.8 Ondes	109
	3.9 Antennes	113

	3.10	Transmission par ondes	116
	3.11	Comparaison critique des milieux de transmission . . .	119
CHAPITRE 4		PROCÉDÉS DE TRANSMISSION	
	4.1	Limitations dues au canal	121
	4.2	But et principe de la modulation	127
	4.3	Échantillonnage	130
	4.4	Multiplexage.	139
	4.5	Liaisons à "2-fils", liaisons à "4-fils".	143
CHAPITRE 5		TRANSMISSION NUMÉRIQUE	
	5.1	Caractéristiques d'une transmission numérique	151
	5.2	Régénération	155
	5.3	Effets de distorsions: interférences entre moments . .	156
	5.4	Effets de perturbations: erreurs de régénération	164
	5.5	Planification d'une transmission numérique	169
	5.6	Effets combinés d'interférences et de perturbations	176
	5.7	Régénération cumulative.	178
	5.8	Applications de la transmission numérique	181
CHAPITRE 6		TRANSMISSION ANALOGIQUE	
	6.1	Caractéristiques d'une transmission analogique	183
	6.2	Amplification	184
	6.3	Bilan de bruit	190
	6.4	Calcul du rapport signal-sur-bruit	191
	6.5	Applications de la transmission analogique	196
	6.6	Compression-extension	197
CHAPITRE 7		MODULATIONS NUMÉRIQUES	
	7.1	Principe et types	203
	7.2	Quantification	205
	7.3	Quantification uniforme	208
	7.4	Quantification non uniforme	213
	7.5	Modulation par impulsions et codage.	216
	7.6	Mesure du bruit de quantification.	226
	7.7	Effets d'erreurs de transmission en PCM.	228
	7.8	Modulations numériques différentielles	230
	7.9	Modulations numériques adaptatives.	239
	7.10	Comparaison et applications des modulations numériques	241
CHAPITRE 8		MODULATIONS ANALOGIQUES	
	8.1	Modulations à porteuse sinusoïdale	245
	8.2	Modulation d'amplitude AM	246
	8.3	Modulation d'amplitude sans porteuse AM-P.	253

8.4	Modulation à bande latérale unique SSB	256
8.5	Modulation à bande latérale résiduelle VSB	261
8.6	Modulation de fréquence FM	263
8.7	Modulation de phase ΦM	277
8.8	Effet de perturbations	279
8.9	Résumé et comparaison des modulations à porteuse sinusoïdale.	289
8.10	Modulations analogiques d'impulsions	293
8.11	Modulations analogiques discrètes.	307
CHAPITRE 9	SYSTÈMES NUMÉRIQUES	
9.1	Principe et structure.	325
9.2	Structure du multiplex temporel numérique	327
9.3	Systèmes multiplex primaires.	329
9.4	Hierarchie numérique plésiochrone	334
9.5	Hierarchie numérique synchrone	340
9.6	Équipements de transmission.	343
9.7	Problèmes de planification	350
9.8	Systèmes numériques sur paires symétriques.	351
9.9	Systèmes numériques sur paires coaxiales.	355
9.10	Problèmes d'exploitation	357
CHAPITRE 10	SYSTÈMES ANALOGIQUES	
10.1	Systèmes à courants porteurs.	359
10.2	Niveau dans un système multivoie.	364
10.3	Problèmes de planification	367
10.4	Problèmes d'exploitation	370
10.5	Systèmes analogiques de diffusion	371
CHAPITRE 11	TRANSMISSION DE DONNÉES	
11.1	Introduction.	379
11.2	Codes	380
11.3	Transmission de données en bande de base	384
11.4	Protection contre les erreurs de transmission.	393
11.5	Transmission dans un canal analogique en bande transposée.	398
11.6	Transmission de données dans un canal numérique.	400
CHAPITRE 12	FAISCEAUX HERTZIENS	
12.1	Principe et structure.	407
12.2	Conditions de propagation	409
12.3	Faisceaux hertziens numériques	413
12.4	Faisceaux hertziens analogiques	415
12.5	Comparaison entre faisceaux hertziens numériques et analogiques.	422

CHAPITRE 13	LIAISONS PAR SATELLITE	
	13.1 Principe et conditions.	425
	13.2 Planification d'une liaison	430
	13.3 Équipements à bord du satellite	432
	13.4 Stations terriennes.	435
	13.5 Accès multiple	438
	13.6 Communications mobiles par satellite	443
CHAPITRE 14	COMMUNICATIONS OPTIQUES	
	14.1 Principe et structure.	447
	14.2 Transducteurs optiques.	450
	14.3 Composants optiques passifs	455
	14.4 Amplification optique	456
	14.5 Modes de transmission sur fibres optiques	457
	14.6 Planification d'une liaison numérique par fibre optique	460
	14.7 Transmission optique cohérente	465
	14.8 Transmission optique en multiplex	468
	14.9 Systèmes de transmission sur fibres optiques.	470
CHAPITRE 15	RÉSEAUX ET COMMUTATION	
	15.1 Types et fonctions	473
	15.2 Réseau téléphonique actuel	478
	15.3 Échos et stabilité.	484
	15.4 Plan de transmission.	486
	15.5 Principes de commutation.	487
	15.6 Réseaux informatiques	494
	15.7 Réseau avec intégration des services	495
	15.8 Modes de transfert.	498
	15.9 Réseau intégré à large bande	501
	15.10 Tendances et mutations dans les réseaux	504
	15.11 Epilogue	509
CHAPITRE 16	ANNEXES	
	16.1 Convention pour la représentation des spectres	513
	16.2 Fonction de Gauss.	514
	16.3 Niveaux absolus de puissance et de tension.	519
	BIBLIOGRAPHIE	521
	RÉPERTOIRE DES PRINCIPAUX SYMBOLES	
	GRAPHIQUES	525
	RÉPERTOIRE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	529
	INDEX ANALYTIQUE TRILINGUE	533
	GLOSSAIRE	547

TÉLÉCOMMUNICATIONS ET INFORMATION

1.1 OBJECTIFS DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

1.1.1 Définition et commentaires

Les *télécommunications* (communication engineering, Fernmeldewesen) au sens large comprennent l'ensemble des moyens techniques nécessaires à l'acheminement aussi fidèle et fiable que possible d'informations entre deux points a priori quelconques, à une distance quelconque, avec des coûts raisonnables.

Cette définition globale appelle les commentaires suivants :

- Les télécommunications sont une *technique*, donc une oeuvre humaine. Le besoin de communication, inhérent à tout homme, existe sans elles. Elles ne font qu'amplifier et prolonger les possibilités de le satisfaire. Les principaux moyens techniques utilisés sont de nature électromagnétique.
- Contrairement aux services postaux, les télécommunications ne concernent que l'*information* à transmettre et non pas son support matériel (papier, disque, bande magnétique, etc.). Cette information peut prendre des formes très diverses : parole, musique, images fixes ou animées, textes, données, etc.
- L'utilisateur qui confie son information aux systèmes de télécommunications souhaite qu'elle soit restituée sans pertes et sans altérations. Un des principaux problèmes à résoudre est de garantir un degré élevé de *fidélité*, c'est-à-dire de transparence, malgré les inévitables imperfections et perturbations que présentent les moyens disponibles.
- L'utilisateur attend des télécommunications un service permanent, disponible en toute circonstance. Assurer cette *fiabilité* en dépit des pannes partielles, imprévisibles et inévitables, est aussi une préoccupation primordiale.
- La mise en relation, conformément à leurs ordres, de deux usagers quelconques, afin de leur permettre ensuite de se faire parvenir des informations, est un problème de *commutation* (switching, Vermittlung), branche importante des télécommunications.
- Le transport d'informations à une distance quelconque, qui peut être très grande (communications spatiales !), est un problème de *transmission* (transmission, Übertragung), autre branche également importante des télécommunications.
- L'art de l'ingénieur consiste à trouver la solution la plus économique à un problème de communication, dans un éternel compromis entre *coût et qualité*.

Coût doit être pris au sens large : matériel, frais de développement, exploitation, etc. Les télécommunications n'échappent pas aux lois du marché, c'est finalement l'utilisateur qui juge si les coûts sont "raisonnables"...

1.1.2 Types de services

Les services offerts par les télécommunications se distinguent par :

- le type d'informations transmises
- le nombre de partenaires impliqués
- le rôle respectif que jouent ces partenaires (mode de communication, fig. 1.1)

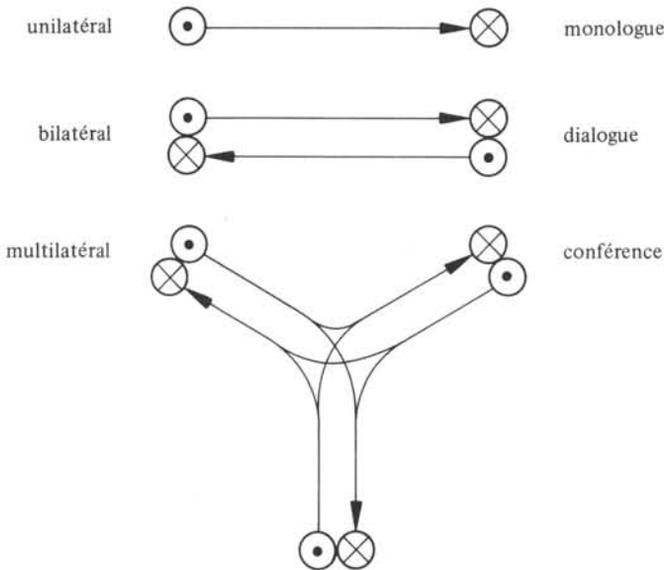


Fig. 1.1 Modes de communication : ● source; ⊗ destinataire.

Lorsqu'un certain nombre d'utilisateurs bénéficient du même service, l'ensemble des liaisons physiques entre eux constitue un *réseau* (network, Netz). Le réseau peut servir à la *diffusion* d'informations transmises unilatéralement d'une source vers plusieurs destinataires ou, inversement, à la *collecte* d'informations en provenance de plusieurs sources vers le même destinataire.

Si les liaisons entre partenaires ne sont pas permanentes, mais établies de cas en cas selon leurs ordres, le réseau est dit *commuté*. Il comprend alors, en plus des moyens de transmission, des dispositifs capables d'interpréter et d'exécuter ces ordres (centraux, commutateurs).

Dans sa forme la plus courante, le réseau commuté est *banalisé*, c'est-à-dire que ses organes de transmission et de commutation sont mis en commun à disposition d'un grand nombre d'utilisateurs qui ont accès à ce réseau par un moyen de transmission individuel (fig. 1.2).

Le tableau 1.3 situe quelques services par rapport aux critères ci-dessus.

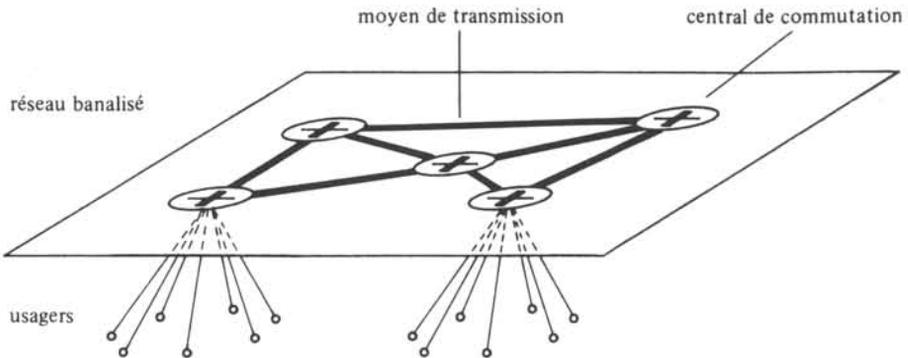


Fig. 1.2 Réseau commuté banalisé.

Tableau 1.3 Exemples de services de télécommunication.

Type d'information	Mode de communication			Réseau					Service
	unilatéral	bilatéral	multilatéral	diffusion	collecte	fixe point-à-point	commuté	banalisé	
Parole	x x	x x	x	x		x	x x x	x	TÉLÉPHONIE – conférence téléphonique – horloge parlante RADIODIFFUSION Interphone
Musique	x x			x x					RADIODIFFUSION Télédiffusion
Textes	x	x (x)	(x)			x	(x) x x	(x) x	TÉLÉGRAPHIE TÉLEX, TÉLÉTEX Courrier électronique
Images fixes	x x	 x		(x) x		(x) x	x x x	x	Télocopie (Téléfax) Bélinographe Vidéotex
Images animées	x	x x (x)		x		(x) x	x (x) (x)	x (x)	TÉLÉVISION Visiophonie Téléconférence, visioconférence
Données	x x	x			x	x	x (x)	(x)	TÉLÉINFORMATIQUE Télémesure, télésurveillance Télécommande

1.2 LES TÉLÉCOMMUNICATIONS, L'HOMME ET LA SOCIÉTÉ

1.2.1 Notion de service

Les télécommunications sont un *service* en ce sens que leur produit est immatériel et répond à un besoin exprimé ou latent. Leur but n'est pas en premier lieu le profit, mais plutôt la satisfaction des usagers. A côté des préoccupations économiques indispensables pour assurer que le service soit rentable, ou au moins non déficitaire, et puisse être offert à un prix abordable, l'utilité et la qualité des prestations, l'équité sociale, la permanence du service sont des aspects essentiels qui relèvent plus d'un idéal que de froids calculs.

Trois groupes de partenaires sont impliqués dans le fonctionnement du service :

- le fabricant qui conçoit, développe, produit et vend les équipements nécessaires à la réalisation du service
- l'exploitant qui planifie, spécifie et installe le réseau, puis veille à son bon fonctionnement et à une saine gestion du service
- l'usager, consommateur du service, client exigeant mais inconscient des difficultés techniques.

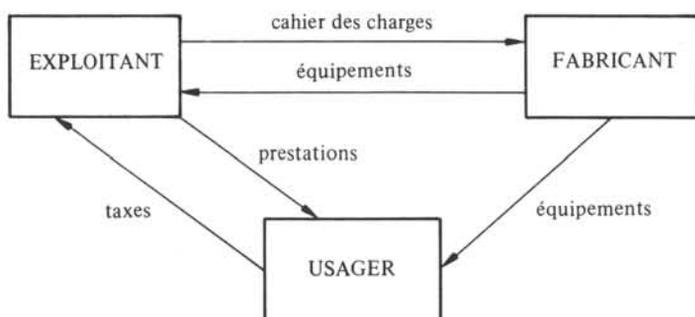


Fig. 1.4 Les trois partenaires des télécommunications.

L'objet du service est l'*information* (§ 1.5.1). Alors que les premiers services de télécommunications se contentaient de transporter et d'acheminer l'information fournie par les usagers, de nouveaux services se développent, consistant en plus à stocker, restituer, trier, structurer, traiter des informations privées ou banalisées.

En plus des trois partenaires de la figure 1.4, on voit apparaître des prestataires de nouvelles fonctions et des fournisseurs d'information qui offrent et vendent des *services à valeur ajoutée* (value added services, Mehrwertdienste). Ils utilisent les *services de base* (mise à disposition de moyens de transmission avec des caractéristiques données entre deux interfaces d'usager) et les *téleservices* (mise en communication selon une procédure complètement définie et standardisée, comme par exemple le service téléphonique ou le téléfax) du réseau public, avec des adjonctions matérielles et logicielles, pour en élargir considérablement les possibilités en offrant, par exemple, la messagerie vocale (dépôt et retrait de messages parlés), l'accès à des banques de données, le réveil automatique, la traduction, la taxation à crédit, etc.

1.2.2 L'interface avec l'homme

Les télécommunications ne peuvent ignorer l'homme, ses caractéristiques physiologiques, ses réactions psychologiques. Les propriétés de la voix et de l'ouïe ont une influence profonde sur la conception d'un système téléphonique. Celles de la vue dictent les paramètres d'une transmission télévisuelle. Les systèmes de commutation doivent tenir compte du comportement logique des abonnés, de leurs temps de réaction, de leurs initiatives imprévisibles ou intempestives.

Les télécommunications intercalent entre les usagers une machine destinée à prolonger et amplifier leurs sens. L'interface homme-machine exige une adaptation mutuelle : l'homme doit apprendre un langage de communication avec la machine (code télégraphique, composition d'un numéro d'appel sur un poste téléphonique, signification des tonalités, procédure de dialogue en vidéotex, etc.), la machine doit accepter l'homme tel qu'il est (résister aux erreurs de manipulation, admettre de grandes variations de niveau sonore, tenir compte des fluctuations statistiques des paramètres humains, etc.).

Pour l'exploitant aussi, l'interface homme-machine détermine l'efficacité de la maintenance (surveillance, localisation de défauts, modifications, interventions manuelles) et de la gestion (relevé des taxes, observation de trafic, statistiques, etc.). Le personnel d'exploitation doit pouvoir entrer en dialogue avec la machine, à un niveau plus ou moins élevé selon le degré d'automatisation de ces fonctions.

L'homme intervient dans les systèmes de télécommunications à double titre :

- comme *source et destinataire* de l'information transmise. A ce titre, il impose son type d'information (parole, écriture, images, etc.), son débit et ses exigences de qualité. Le dialogue a lieu d'homme à homme, à travers la machine;
- comme *élément de commande* dictant ses ordres au système, recevant ses réactions en retour. Le dialogue a lieu alors entre l'homme et la machine, selon un code convenu dont le niveau de technicité doit être adapté aux possibilités des usagers.

1.2.3 L'aspect public du service

La plupart des services de télécommunications touchent un vaste public qui s'intéresse au service lui-même et pas du tout aux moyens techniques mis en oeuvre pour le réaliser. Cela implique de la part des fabricants et surtout des exploitants un engagement et une responsabilité à l'égard des usagers en réponse à la confiance que ces derniers mettent en eux. Concrètement cette responsabilité se reflète dans les exigences suivantes, particulièrement valables pour un réseau commuté banalisé :

- une qualité de service suffisante doit être garantie
- des prévisions quantitatives à long terme doivent permettre de couvrir les besoins à venir
- un prix de revient minimum doit être recherché
- par équité sociale, le service devrait pouvoir être offert à ceux qui le demandent, sans discrimination géographique ou sociologique et taxé selon l'usage réel qui en est fait
- par une fiabilité correspondante des équipements, le service doit être assuré en permanence

- les appareils mis à la disposition des usagers doivent être simples d'emploi et robustes. Ils doivent supporter des manipulations intempestives et n'exiger qu'un strict minimum d'apprentissage préalable pour leur utilisation
- le secret des communications privées doit être absolument respecté.

En conséquence de ces exigences, dans la plupart des pays, la responsabilité du service public des télécommunications a été confiée exclusivement à l'Etat, sous la forme d'un *monopole*. Cette situation limite la liberté du marché en éliminant toute concurrence sur le plan des services, mais, pour autant que l'Etat prenne cette tâche au sérieux, elle est garante des intérêts des usagers en ce qui concerne la qualité du service offert.

Au nom de la libéralisation du marché, ce monopole est aujourd'hui contesté et doit évoluer vers une ouverture dynamique à la concurrence sur le plan national et, inéluctablement, international. En Europe, la plupart des pays ont convenu de privatiser leurs services et leurs réseaux de télécommunications dès 1998, ouvrant ainsi la voie à la concurrence dans leur marché national et sur le plan international.

1.2.4 L'impact social

Comme beaucoup d'inventions humaines, les télécommunications peuvent être utilisées pour le meilleur et pour le pire. Il faut distinguer cependant entre

- les communications de *masse* (du type radiodiffusion et télévision, c'est-à-dire unilatérales) qui sont censées informer et divertir un large public

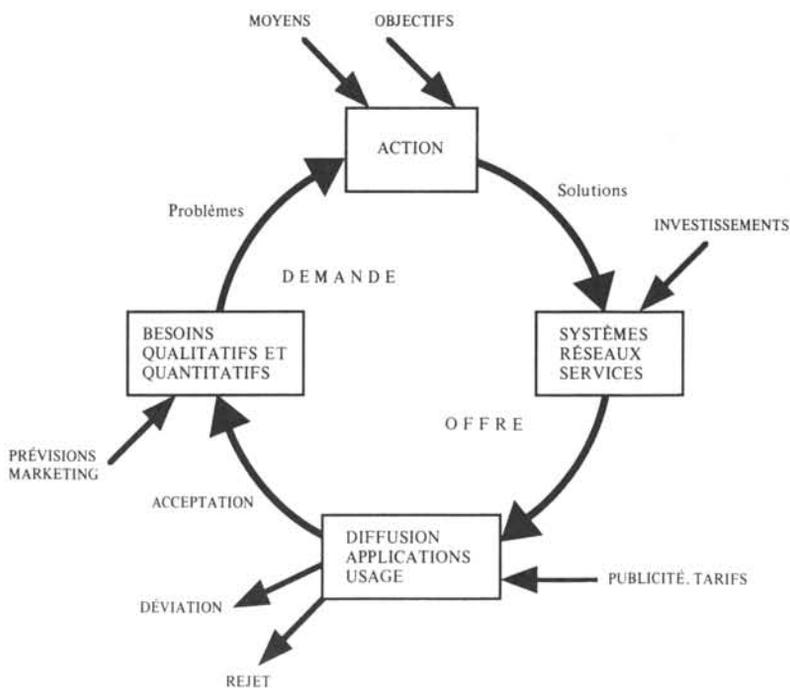


Fig. 1.5 Cycle de l'offre et de la demande.

- les communications *individuelles*, dont le téléphone est le principal représentant, bilatérales et commutées. Elles remplissent un rôle de contact et d'échange, utilitaire (en particulier dans le cadre professionnel), sécurisant et affectif.

Laissant aux sociologues le soin d'analyser les effets qu'ont eus et que pourront avoir ces deux types de communication sur la société, il est cependant important de relever les points suivants :

- historiquement l'*offre* en services de télécommunications a précédé la demande et le public a accepté, dévié ou refusé l'offre (fig. 1.5)
- la réaction du public ("acceptance") peut être influencée (publicité, tarif), expérimentée dans une certaine mesure, mais elle est impossible à prédire exactement.
- actuellement une *demande* (notamment en téléinformatique) se fait plus pressante et constitue un défi au monopole de l'Etat
- les télécommunications, associées à l'informatique, sont un facteur important de la vie professionnelle, communautaire et privée, actuelle et future. Elles peuvent être orientées de façon à influencer dans un sens ou dans un autre le modèle de la société de demain (citée câblée, société de l'information ?)
- ce qui est techniquement (et économiquement) faisable n'est pas forcément souhaitable, ni souhaité
- la responsabilité individuelle et collective des ingénieurs est engagée dans cette évolution, à côté de celle des pouvoirs politiques et des usagers.

1.3 NOTION DE SYSTÈME

1.3.1 Tentative de définition restrictive

Le terme de *système* est utilisé dans une quantité de contextes et de sens très différents, dont les définitions sont floues. Si, dans le domaine des télécommunications, on parle de système, on entend par là un ensemble *cohérent* d'éléments *interdépendants*.

La cohérence de l'ensemble implique une *finalité commune*, celle-là même que poursuivent les télécommunications (§ 1.1.1). L'interdépendance des éléments exprime les interactions dynamiques entre eux. Vu de l'extérieur, le système apparaît comme un tout qui est davantage que la somme de ses parties.

1.3.2 Approche systémique

A cause de leurs interactions mutuelles, les parties du système ne peuvent être que très incomplètement étudiées isolément. Un système doit être abordé d'une manière plus globale, par une *approche systémique* qui consiste à :

- considérer le système dans sa totalité et sa complexité
- étudier particulièrement les *interactions* entre les parties
- accorder une attention particulière à l'organisation fonctionnelle du système comme moyen de faire face à la complexité technique croissante

- associer les *aspects économiques, humains, sociaux, juridiques* aux considérations purement techniques.

L'approche systémique ne peut être linéaire ou séquentielle. À défaut de pouvoir être vraiment simultanée et parallèle, elle adopte une *démarche en spirale* qui, par touches successives, finit par cerner le problème en intégrant divers points de vue à des niveaux différents. Elle est multidisciplinaire par nature.

Alors que l'approche analytique classique procède par décomposition systématique et par déduction logique, l'approche systémique, qui lui est complémentaire, fait appel à l'induction et à l'intuition, elle tient compte de l'environnement (au sens large) et de ses interactions avec le système.

Ces deux démarches sont nécessaires pour concevoir et comprendre de grands systèmes techniques comme ceux de télécommunications. Elles seront utilisées alternativement dans ce volume.

1.4 ÉVOLUTION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

1.4.1 Développements historiques

Le début des télécommunications électriques remonte au milieu du XIX^e siècle dans le contexte de l'expansion industrielle et de l'accélération des moyens de communication matériels (chemins de fer). La transmission numérique codée (télégraphe) a systématiquement précédé la transmission analogique, beaucoup plus délicate, en particulier à grande distance. Très rapidement, et à la surprise de leurs inventeurs, les moyens de télécommunications ont pris une envergure extraordinaire : peu après la transmission, la commutation s'est développée (manuelle, puis automatique); les océans et les continents ont été franchis; les ondes ont permis ce qui était impossible par fil; le réseau a pris une dimension planétaire.

L'histoire des télécommunications est le reflet d'une grande aventure humaine. En voici quelques dates particulièrement marquantes :

- 1837 Samuel Morse invente un système de transmission codée des lettres de l'alphabet, qui deviendra le *télégraphe*. Son code (encore utilisé) tient compte de la fréquence relative des lettres dans la langue anglaise pour optimiser le temps de transmission d'un message. À ce titre, c'est un précurseur intuitif de la théorie de l'information et du codage.
- 1858 Au prix d'efforts techniques et financiers considérables, un câble (unifilaire, isolé à la gutta-percha) est posé à travers l'Atlantique et permet la transmission télégraphique (très lente!) intercontinentale. Après un mois, un défaut d'isolation le rend inutilisable. Un autre câble est posé en 1866.
- 1870 Liaison télégraphique par ligne aérienne et sous-marine entre Londres et Calcutta (11 000 km).
- 1876 Alexander Graham Bell dépose (quelques heures avant Elisha Gray) un brevet concernant un moyen de transmettre électriquement des sons à l'aide d'une résistance variable. Succédant aux idées de Philipp Reis (1860), l'invention de Bell, motivée en fait par des recherches sur la surdité, marque le début du *téléphone*.

- 1889 Irrité par la partialité d'opératrices de commutation manuelle, Almon Strowger invente un sélecteur automatique télécommandé par le poste d'abonné.
- 1901 Guglielmo Marconi transmet un télégramme *par ondes* d'Angleterre à Terre-Neuve (télégraphie sans fils, TSF).
- 1907 L'invention de la *triode* par Lee de Forest permet l'amplification analogique de signaux et ouvre ainsi la voie aux transmissions téléphoniques à longue distance.
- 1927 Première liaison téléphonique transatlantique par ondes courtes.
- 1938 La modulation par impulsions codées PCM, inventée par Alec Reeves, permet la représentation numérique d'informations analogiques. Cependant, la technologie est encore mal adaptée à sa réalisation.
- 1948 L'invention du *transistor* déclenche l'essor de l'électronique et de ses applications nombreuses et multiples aux télécommunications.
- 1956 Un siècle après son précurseur télégraphique, le premier câble transatlantique téléphonique (avec 51 répéteurs immergés) est mis en service.
- 1962 Un troisième moyen de liaison transocéanique vient s'ajouter aux ondes courtes et aux câbles : le *satellite* actif "Telstar I" à basse altitude qui permet la première transmission transatlantique de télévision.
- 1965 Premier satellite géostationnaire "Early Bird" (Intelsat I).
- 1966 Propositions de *transmission optique* sur fibres de verre (1000 dB/km!).
- 1969 Transmission en direct des premiers pas d'un homme sur la Lune.
- 1975 Premières liaisons expérimentales par fibre optique (45 Mbit/s, 8 dB/km).
- 1980 Une sonde spatiale transmet des photos de Jupiter et de Saturne.
- 1984 Début des réseaux cellulaires de radiocommunications mobiles aux USA.
- 1987 Mise en service en France du premier réseau numérique à intégration de services (RNIS).
- 1988 Premier câble transatlantique optique (2 × 280 Mbit/s) TAT8.
- 1989 Concept nouveau de "réseau intelligent".
- 1990 Recherches et normalisation en vue d'un réseau intégré à large bande basé sur le mode de transfert asynchrone ATM.

1.4.2 La croissance du téléphone

Principal service de télécommunications, le téléphone connaît une croissance exponentielle soutenue : le nombre de postes téléphoniques reliés au réseau mondial croît actuellement de 6 % par an (il double donc en 12 ans) et dépassera un milliard avant la fin du siècle (fig. 1.6).

1.4.3 Perspectives de développement

L'effet conjugué de quatre facteurs donne un nouvel élan technologique aux télécommunications :

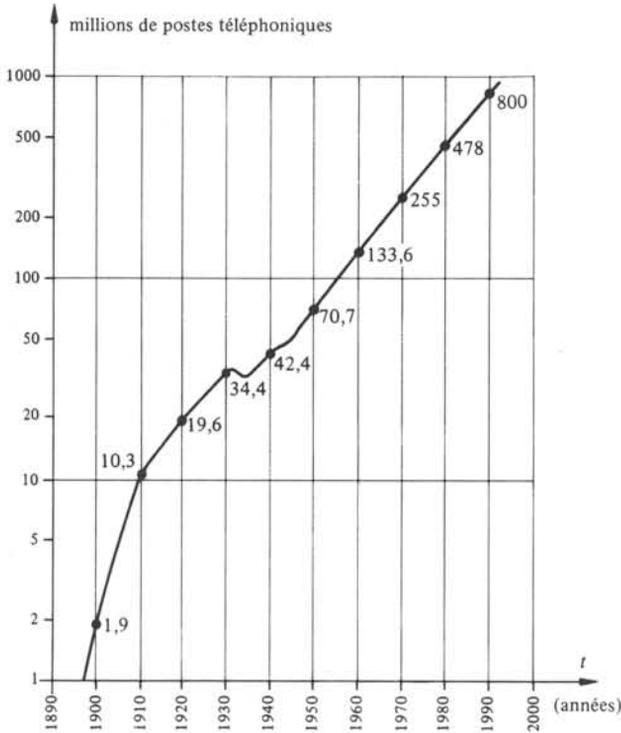


Fig. 1.6 Croissance du réseau téléphonique mondial.

- les possibilités offertes par l'électronique, en particulier la *microélectronique* et les circuits intégrés à large échelle;
- le développement des *techniques numériques* de transmission et de commutation;
- l'influence de *l'informatique* qui, d'une part, pose de nouvelles exigences aux télécommunications (télématique) et, d'autre part, leur apporte un outil puissant pour la commande des opérations de commutation et la gestion des réseaux.
- la maîtrise des *techniques optiques* (fibres), *optoélectroniques* (émetteurs, récepteurs) et *photoniques* (optique intégrée; amplification, modulation, commutation optiques) qui élargit considérablement la capacité des réseaux.

Parallèlement au téléphone, qui restera encore longtemps le service prépondérant, d'autres services commutés sont développés. Ils concernent, pour la plupart, des informations non parlées (textes, images, données) et, en premier lieu, les communications professionnelles. Il est dès lors séduisant d'envisager un *réseau numérique avec intégration des services RNIS* (integrated services digital network ISDN) dans lequel tous les services commutés (téléphoniques et autres) et peut-être même les services de diffusion (programmes musicaux et télévisuels) seraient offerts sous forme numérique (sect. 15.7 et 15.9).

1.5 INFORMATION

1.5.1 Notion d'information

L'information, comme l'énergie d'ailleurs, est une notion fondamentale, qui fait partie de notre vie quotidienne, mais il est difficile d'en donner une définition rigoureuse et satisfaisante. Sans chercher à la définir, on peut en illustrer divers aspects par les considérations suivantes :

- informer signifie littéralement : "donner une forme";
- l'information est une notion abstraite, de nature psychologique et philosophique à l'origine (idées), reprise par la science et la technique pour en faire une grandeur évaluable;
- l'information est un facteur d'ordre et de structure, elle diminue l'inconnu et l'incertitude. A ce titre elle est liée, par antithèse, à la notion thermodynamique d'entropie. C'est pourquoi on la désigne quelquefois par "néguentropie";
- la valeur d'une information réside dans l'effet de surprise qu'elle provoque; elle est d'autant plus intéressante qu'elle est moins prévisible;
- l'information n'est pas conservative : elle doit être générée, elle peut se perdre;
- l'information peut être transportée (transmission), stockée (mémorisation), transformée (traitement).

1.5.2 Sources d'information : définitions

Une source est dite *discrète* si elle produit de l'information à partir d'un nombre fini n de caractères (lettres, chiffres, signes, etc.) qui, par leurs diverses combinaisons, constituent des *messages*. L'information ainsi générée est de nature *numérique* (digital).

L'ensemble des n caractères disponibles constitue, par analogie avec la langue écrite qui est une source typiquement discrète, un *alphabet*.

Si la source est *continue* en ce sens qu'elle exprime des nuances d'une infinie subtilité, l'information produite est *analogique* (analogue, analog).

Il faut remarquer que la distinction entre numérique et analogique procède d'un passage à la limite et qu'elle dépend de l'échelle d'observation, c'est-à-dire du sens réel que l'on donne à la notion abstraite d'infini !

1.5.3 Quantité d'information : définition

Dans le cas d'une source discrète, chaque message produit par elle apparaît avec une certaine probabilité. Pour exprimer la *quantité d'information* H_i (information content, Informationsgehalt) portée par un message i , il semble intuitivement logique de l'associer à la probabilité d'apparition $\text{Prob}(i)$ de ce message et de remplir les conditions suivantes :

- si, à un instant donné, le message est certain ($\text{Prob}(i) = 1$), son apparition n'apporte aucune information, puisqu'il était parfaitement prévisible;
- plus un message est improbable, plus il apporte d'information (effet de surprise) s'il apparaît;
- si deux messages statistiquement indépendants, de probabilité $\text{Prob}(i)$ et $\text{Prob}(j)$ respectivement, apparaissent conjointement, la quantité d'information H_{ij} qu'ils apportent doit être logiquement la somme de leurs quantités d'information respectives H_i et H_j .

Ces conditions conduisent à une fonction logarithmique. Pour des raisons de commodité, on a choisi la base 2 pour exprimer ce logarithme (logarithme binaire lb). La définition de la quantité d'information du message i est alors :

$$H_i = \text{lb}[1/\text{Prob}(i)] = -\text{lb}[\text{Prob}(i)] \quad \text{Sh} \quad (1.1)$$

Ainsi, on a bien :

- $H_i = 0$ si $\text{Prob}(i) = 1$
- H_i croît si $\text{Prob}(i)$ décroît
- $H_{ij} = H_i + H_j$ si les messages i et j sont indépendants, car $\text{Prob}(i, j) = \text{Prob}(i) \cdot \text{Prob}(j)$

Si $\text{Prob}(i) = 0,5$, $H_i = 1$ et l'unité ainsi définie a reçu le nom de *shannon* (Sh), souvent désigné abusivement par bit (ce nom étant réservé à l'unité de quantité de décision, § 1.5.5). Il s'agit en fait d'une pseudo-unité, sans dimension, la grandeur qu'elle exprime étant logarithmique.

1.5.4 Entropie d'une source : définition

La quantité d'information *moyenne* H produite par une source discrète est l'espérance mathématique des quantités d'information H_i portées par chacun des messages qu'elle génère :

$$H = E(H_i) = \sum_i \text{Prob}(i) H_i = - \sum_i \text{Prob}(i) \text{lb}[\text{Prob}(i)] \quad \text{Sh} \quad (1.2)$$

Chaque message peut être constitué, dans le cas général, d'un nombre quelconque de caractères choisis chacun parmi les n disponibles. C'est sur l'ensemble de tous ces messages que doit porter la moyenne selon (1.2), avec la condition suivante :

$$\sum_i \text{Prob}(i) = 1 \quad (1.3)$$

H est appelé *entropie* de la source. Elle exprime en effet la même réalité que l'entropie thermodynamique : plus la source produit ses messages de manière aléatoire, plus son entropie est élevée. En particulier, elle est maximum lorsque les n caractères sont utilisés par la source avec la même probabilité (caractères équiprobables) et sans aucune condition séquentielle. On a alors

$$\text{Prob}(i) = 1/n \quad \text{avec } i = 1 \dots n \quad (1.4)$$

et (1.2) devient :

$$H = H_{\max} = \text{lb } n \quad \text{Sh} \quad (1.5)$$

En revanche, le terme d'entropie peut prêter à confusion lorsqu'on l'applique à la quantité d'information transmise à un destinataire. Ce dernier voit, en effet, son entropie (au sens thermodynamique) diminuer lorsqu'il reçoit de l'information ...

1.5.5 Quantité de décision : définition

Le choix que doit faire une source discrète parmi les n caractères dont elle dispose correspond à une certaine *quantité de décision* D (decision content,

Entscheidungsgehalt) définie par :

$$D = \text{lb } n \quad \text{bit} \quad (1.6)$$

Si $n = 2$ (choix binaire), $D = 1$ bit, pseudo-unité représentant le choix élémentaire minimum entre deux caractères.

A partir de cet alphabet de n caractères, une source discrète peut produire une quantité d'information H (entropie) qui, selon (1.5), est au plus égale à D .

Par exemple, l'alphabet latin dispose de $n = 27$ caractères (26 lettres + 1 espace). La quantité de décision correspondante est donc $D = \text{lb } 27 = 4,755$ bit par caractère.

La fréquence d'utilisation des caractères et des groupes de caractères varie cependant d'une langue à l'autre. L'entropie de la source constituée par une langue écrite dépend donc un peu de la langue. Elle peut être estimée (par des tests statistiques) à $H \cong 1,5$ Sh/lettre pour le français.

1.5.6 Redondance : définition

La *redondance* R est la différence entre la quantité de décision D d'un alphabet et la quantité d'information moyenne (entropie) H de la source discrète qui utilise cet alphabet.

$$R = D - H \quad \text{bit} \quad (1.7)$$

1.5.7 Débits d'information et de décision

Une source discrète génère ses caractères de manière plus ou moins rapide et plus ou moins régulière dans le temps.

Le *débit de décision*, appelé aussi très souvent *débit binaire* (bit rate, Bitrate), est le produit du nombre moyen de caractères générés par unité de temps, par la quantité de décision D de l'alphabet dont ils sont issus. C'est une grandeur très importante pour les systèmes de transmission numérique. Elle exprime en bit/s la capacité réelle de transmission du système. Elle sera notée ici \dot{D} ; le point au-dessus du symbole évoque une dérivation de la quantité de décision D par rapport au temps. De même le *débit d'information* \dot{H} représente la quantité d'information moyenne produite par la source pendant l'unité de temps (en Sh/s).

1.5.8 Codage

Le codage est une opération de traduction qui, à une liste d'expressions logiques (idées, messages, symboles), fait correspondre une autre liste, sans modifier l'information qui s'y trouve.

L'opération inverse, le décodage, doit être aussi parfaitement réciproque que possible. Elle nécessite donc une convention préalable entre le codeur et le décodeur.

Par exemple, la langue parlée est un code qui traduit les idées en mots. La langue écrite en est un autre qui représente ces mots par des lettres. Le code Morse transcrit à son tour ces lettres en traits, points et espaces.

1.6 COMMUNICATION

1.6.1 Principe et conditions

La *communication* est, au sens large, un transfert d'information d'une source vers un destinataire, à travers un milieu appelé *canal* (fig. 1.7). Pour qu'elle ait lieu, les conditions suivantes doivent être remplies :

- source et destinataire doivent se mettre d'accord sur la représentation symbolique de l'information à transmettre, par exemple sur le code utilisé;
- le canal devrait être parfaitement "transparent" c'est-à-dire ne jouer qu'un rôle neutre de convoyeur, sans interférer sur l'information transmise;
- le canal doit être adapté (techniquement et économiquement) au type de source et de destinataire en jeu;
- de même, l'information à transmettre doit être mise sous une forme compatible avec le canal.

1.6.2 Signaux : définition

Dans le cas des télécommunications, le canal est toujours un milieu physique qui exige que l'information, notion abstraite, soit, au préalable, concrétisée par des signaux, de nature électromagnétique.

On appelle *signal* une grandeur physique variable, porteuse d'information.

Le passage de l'information (généralement déjà codée) au signal, et réciproquement, est effectué dans des *transducteurs* électriques tels que microphone, écouteur, haut-parleur, caméra, écran, capteur, actionneur, etc.

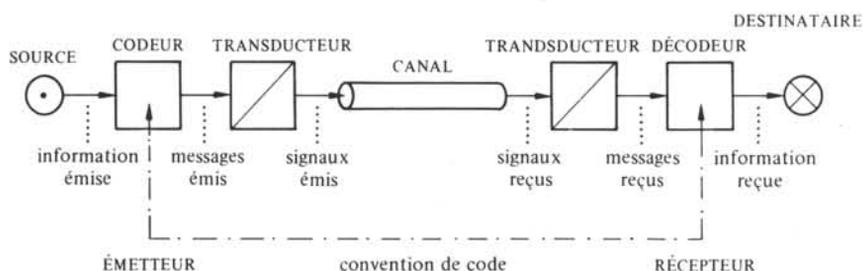


Fig. 1.7 Système de transmission idéal.

La définition du signal donnée ci-dessus appelle trois remarques :

- le *signal* se distingue du *bruit* par le fait qu'il porte de l'information;
- cette distinction n'a de sens que si la relation entre information et signal est parfaitement définie et de la même manière pour les deux partenaires (fig. 1.7). Un récepteur interprète comme du bruit les signaux qu'il reçoit, s'il ne peut en tirer une information qui ait un sens pour lui, quand bien même l'information que portent effectivement ces signaux serait parfaitement intelligible à d'autres récepteurs;
- les signaux sont, par nature, *toujours analogiques*, c'est-à-dire que leurs paramètres peuvent être l'objet de variations continues. En revanche, l'information qu'ils portent peut être analogique ou numérique. La différence réside dans

l'interprétation qu'en fait le récepteur (chap. 5 et 6). Par un regrettable abus de langage, on appelle quelquefois "signaux numériques" des signaux (analogiques !) porteurs d'information numérique.

1.6.3 Canal réel

Les canaux réels utilisables techniquement pour les télécommunications présentent les principaux défauts suivants :

- ils *déforment* les signaux qu'ils transmettent (distorsions, § 2.4.7 et 2.4.10)
- ils introduisent des *perturbations* indésirables (bruit, diaphonie, § 2.4.11)
- ils sont *chers* et doivent être utilisés aussi économiquement que possible.

Par un codage préalable, on cherche à adapter au mieux l'information à transmettre aux caractéristiques connues du canal disponible (fig. 1.8). Ce codage poursuit deux buts, en partie contradictoires :

- *Codage de source* pour réduire la redondance de la source et transmettre un débit de décision minimum, le plus proche possible du débit d'information réel de la source. Le code Morse est, par exemple, une tentative dans ce sens, qui optimise le temps de transmission (§ 11.2.2). En transmission d'images, on cherche à exploiter la dépendance statistique d'un point de l'image avec ses voisins ou avec le même point de l'image précédente.
- *Codage de canal* pour se protéger contre les effets (inévitables) des imperfections du canal. Ce codage nécessite l'introduction d'une redondance voulue, p. ex. pour permettre la détection, voire la correction d'erreurs de transmission ou éliminer la composante continue d'un signal (p. ex. mode AMI, § 9.6.4).

Ces deux opérations sont coûteuses, la première en équipement, la seconde en débit de décision dans le canal. Elles ne se justifient que dans une optique globale d'optimisation du système.

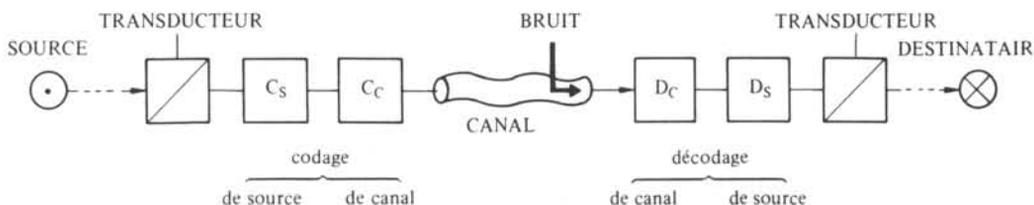


Fig. 1.8 Système de transmission réel.

1.6.4 Représentation numérique d'information analogique

On peut, sous certaines conditions, renoncer aux fines nuances d'une information analogique et lui substituer une information numérique plus ou moins équivalente. Cependant, l'opération inverse est impossible, les détails de l'information analogique sont définitivement perdus.

Les modalités de cette représentation numérique, forcément approchée, font l'objet du chapitre 7. Elle repose sur un principe simple, celui de la *quantification*, ou conversion analogique-numérique, qui consiste à remplacer une valeur analogique exacte par la plus proche parmi un ensemble fini de valeurs discrètes (numériques). En dépit de leur nom, les convertisseurs numériques-analogiques ne restituent pas une valeur analogique, mais bien la valeur discrète admise comme représentative lors de la quantification.

L'intérêt d'une représentation numérique réside dans la relative insensibilité de cette forme d'information aux imperfections du canal (chap. 5), comparativement aux exigences sévères posées par la transmission analogique (chap. 6).

Le prix à payer pour cet avantage est dans la complexité des convertisseurs et dans la dégradation de la qualité de transmission due à la perte des détails analogiques.

1.6.5 Moments : définitions

Les signaux utilisés pour porter de l'information numérique sont composés d'une suite de signaux élémentaires dans le temps, appelés *moments* (symbols). Le paramètre caractéristique (amplitude, fréquence, phase) de chacun d'entre eux reste constant pendant toute la durée T_M du moment et représente l'information numérique portée par ce moment. Dans le cas général, ce paramètre peut prendre m valeurs discrètes. Les moments sont alors appelés *m-aires*.

Suivant le nombre m , appelé *valence*, on a :

- $m = 2$ moments binaires
- $m = 3$ moments ternaires
- $m = 4$ moments quaternaires
- $m = 5$ moments quinaires, etc.

En vertu de (1.6), la quantité de décision correspondant à un moment m -aire est

$$D_M = \text{lb } m \quad \text{bit} \quad (1.8)$$

1.6.6 Débit de moments

Le nombre moyen de moments transmis par unité de temps est appelé *débit de moments* \dot{M} et exprimé en baud (Bd) pour le distinguer du débit de décision \dot{D} exprimé en bit/s.

$$\dot{M} = 1/T_M \quad \text{Bd} \quad (1.9)$$

Le débit de décision \dot{D} correspondant à un débit de moments m -aires \dot{M} se calcule en multipliant \dot{M} par la quantité de décision D_M de chaque moment, selon (1.8) :

$$\dot{D} = \dot{M} D_M = \dot{M} \text{lb } m \quad \text{bit/s} \quad (1.10)$$

En transmission numérique, le débit de moments \dot{M} revêt une importance particulière, car il exprime la vitesse de variation physique des paramètres des signaux. A ce titre, il est lié directement à la largeur de bande du canal (§ 4.1.4).

Pour un même débit de décision \dot{D} , on peut diminuer \dot{M} en augmentant m . Le débit de moments est maximum pour une transmission binaire ($m = 2$). Il est alors, et alors seulement, égal au débit de décision \dot{D} .

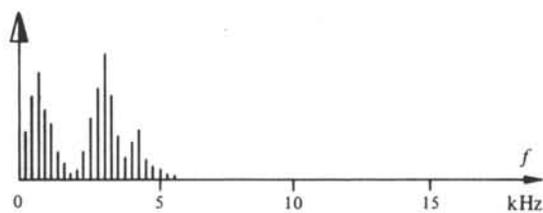
1.7 CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES ET DESTINATAIRES D'INFORMATION ET CONSÉQUENCES POUR LES SYSTÈMES DE TRANSMISSION

1.7.1 Voix humaine et parole

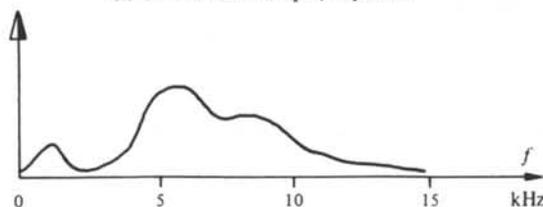
La voix constitue un vecteur d'information analogique primordial dans les communications humaines directes ou indirectes à travers un système de télécommunications. Son étude est rendue très complexe par les aspects physiologiques de la production des sons, d'une part, et par les éléments psychologiques (tempérament, humeur, etc.) qui l'influencent, d'autre part. Seule une approche statistique est possible. Elle conduit à des distributions de variables aléatoires continues, affectées de fortes variances dans le temps et d'un individu à l'autre.

Pour les besoins des télécommunications, il est utile de dégager grossièrement les caractéristiques principales suivantes concernant, d'une part, la voix et les sons qu'elle produit et, d'autre part, la parole qui structure ces sons en une langue parlée :

- La voix est un phénomène aléatoire non stationnaire et discontinu dans le temps. Il peut cependant être décomposé en une suite de sons élémentaires appelés *phonèmes* et considérés comme quasi stationnaires.
- La *répartition fréquentielle* (spectre) de l'énergie est très différente selon les sons : les sons *voisés* (voyelles, consonnes telles que j, l, m, n, v) ont un spectre de raies harmoniques d'une fondamentale (hommes : 100 ... 200 Hz, femmes : 200 ... 400 Hz); leur enveloppe spectrale et particulièrement ses maxima (appelés formants) sont spécifiques du son émis (fig. 1.9(a)); les sons *non voisés* (consonnes telles que f, s, p, ch) sont caractérisés par un spectre continu, stationnaire ou transitoire, mais non uniforme (fig. 1.9(b)).
- Le domaine spectral de l'ensemble des sons vocaux s'étend de 80 Hz à 12 kHz, avec une énergie fortement décroissante vers les hautes fréquences.
- La distribution statistique des amplitudes instantanées est particulièrement complexe et variable. Elle peut être approchée très grossièrement par une



(a) Son voisé: exemple, voyelle A



(b) Son non voisé: exemple, consonne F

Fig. 1.9 Exemples de spectres de sons vocaux.

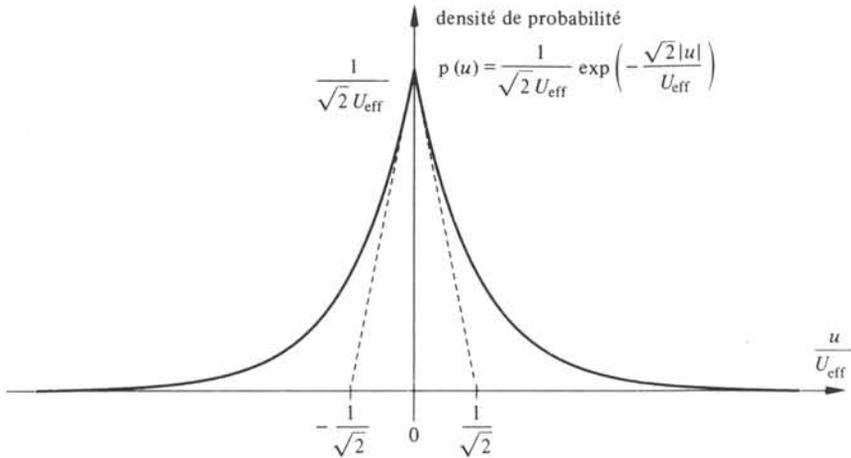


Fig. 1.10 Approximation de la distribution statistique des amplitudes instantanées dans la parole.

distribution exponentielle des valeurs absolues, dont l'écart-type (valeur efficace U_{eff}) varie beaucoup d'un individu à l'autre (fig. 1.10).

- La **structure temporelle** est irrégulière : les mots et les phrases sont séparés par des pauses (> 100 ms) qui représentent environ 50% du temps en monologue et environ 75% du temps pour chaque interlocuteur en dialogue.
- Le **débit** moyen de la parole peut être évalué à 80 ... 200 mots/minute. A raison d'une moyenne de 5 lettres par mot et $D = 4,7$ bit par lettre, cela représente un débit de décision moyen de $\dot{D} = 30 \dots 80$ bit/s. En admettant $H \cong 1,5$ Sh/lettre, le débit réel d'information moyen correspondant n'est que de $\dot{H} = 10 \dots 25$ Sh/s. Ces deux débits n'expriment que le débit sémantique de la parole (signification littérale des mots utilisés). En réalité, la parole transmet encore toute une enveloppe subjective (identité, timbre, humeur, nuances, etc.) difficile à évaluer.

1.7.2 Ouïe

Les quelques propriétés suivantes de l'oreille humaine et du sens de l'audition intéressent particulièrement les télécommunications :

- la sensibilité de l'oreille dépend de la fréquence et de l'intensité du son. Le domaine d'audibilité s'étend grossièrement de 20 Hz à environ 16 kHz (bien adapté à la voix);
- l'oreille est pratiquement **insensible à la phase relative** entre deux composantes sonores;
- l'effet de distorsions non linéaires est d'autant plus sensible que la bande de fréquences occupée par les signaux est plus large.

1.7.3 Conséquences pour la téléphonie

Les propriétés mentionnées aux paragraphes 1.7.1 et 1.7.2 sont exploitées par les systèmes téléphoniques de la façon suivante :

- restriction de la bande passante à un domaine de 300 ... 3 400 Hz, jugé suffisant pour l'intelligibilité (§ 2.4.9), au détriment cependant de la distinction de certains sons non voisés comme "s" et "f";
- la prépondérance de composantes à basse fréquence dans le spectre justifie l'utilisation de certaines modulations différentielles comme DPCM ou ΔM (sect. 7.8);
- les faibles amplitudes, relativement plus fréquentes, peuvent être valorisées par un procédé de compression-extension (sect. 6.6);
- l'insensibilité de l'oreille aux déphasages permet d'utiliser des modulations qui ne conservent pas la phase (modulation SSB dans les systèmes à courants porteurs, § 8.4.4 et sect. 10.1);
- les mesures de bruit tiennent compte de la réponse fréquentielle de l'oreille par un filtre de pondération psophométrique qui simule l'effet qu'aurait ce bruit sur un usager (§ 2.4.13);
- les pauses d'une conversation téléphonique, convenablement détectées, peuvent être utilisées pour intercaler des parties d'autres conversations (interpolation temporelle, time assignment speech interpolation TASI), par exemple dans des canaux très coûteux comme les câbles transocéaniques, ou pour transmettre des données simultanément avec la parole.

1.7.4 Musique

Bien que le destinataire (oreille) soit le même que dans le cas de la parole, la source d'information continue que représente la musique s'en distingue par :

- un spectre moyen à long terme plus étendu vers les hautes fréquences
- des basses fréquences dès 15 Hz
- une distribution statistique différente et moins structurée dans le temps
- des pauses moins fréquentes.

En conséquence, les exigences posées au canal sont plus sévères, en particulier en ce qui concerne la limite supérieure de la bande passante (10 ... 15 kHz), le rapport signal-sur-bruit et le taux de distorsion.

1.7.5 Textes

Un texte est un document constitué de caractères (lettres, chiffres, signes, etc.) issus d'un alphabet fini. Il contient donc une information numérique, produite par une source discrète, selon les règles de la sémantique (signification des mots) et de la syntaxe (grammaire) propres à une langue.

L'alphabet latin minimum comprend :

- 26 lettres
- 10 chiffres
- l'espace entre deux mots
- quelques signes de ponctuation.

C'est l'alphabet utilisé par le *télégraphe* et le *télex*.

En revanche, le *télétext*, nouveau service de télétypographie associé à la bureautique (traitement de textes), utilise un alphabet de 128 caractères et ordres, permettant

la distinction entre minuscules et majuscules, l'accentuation des minuscules et de nombreux signes spéciaux.

Les caractères alphanumériques d'un texte peuvent encore être complétés par des éléments graphiques simples dont la composition donne la possibilité de réaliser des schémas ou des signes quelconques. Le *vidéotex* se base sur un tel alphabet (alpha-mosaïque ou alpha-géométrique) pour la représentation d'informations écrites et graphiques sur un écran.

1.7.6 Images fixes en noir et blanc

Une image est un document bidimensionnel (surface). Pour pouvoir être transmis, il doit être transformé par une analyse séquentielle, ligne par ligne (balayage), en spirale, ou point par point (tramage).

La finesse de cette analyse, en relation avec les dimensions de l'image, est déterminée par le pouvoir séparateur du destinataire (oeil humain : environ 1,5' d'angle).

L'image, de nature analogique à l'origine, peut être représentée, sous forme numérique, après tramage, par des points discrets dont l'intensité lumineuse est quantifiée en un nombre fini g de niveaux de gris. L'équivalent numérique (quantité de décision D) d'une image de surface A , analysée avec une résolution de r points par unité de longueur est alors :

$$D = A r^2 \text{ lb } g \quad \text{bit} \quad (1.11)$$

Pour transmettre cette image à travers un canal dont le débit de décision est \dot{D} , il faut un temps T :

$$T = D/\dot{D} \quad (1.12)$$

La dépendance linéaire (traits) ou bidimensionnelle (surfaces) entre points voisins d'une image cohérente fait que la quantité d'information H correspondante (difficile à évaluer!) est beaucoup plus faible que D (effet de redondance). Par un codage de source approprié, on peut chercher à diminuer D , donc T .

Le système de *télécopie* (facsimilé, téléfax) permet la transmission d'images fixes avec les caractéristiques suivantes :

- $g = 2$ noir et blanc seulement, pas de nuances de gris
- format maximum A4 : $A = 1/16 \text{ m}^2$
- résolution : $r = 3,85$ points/mm, soit au total environ 10^6 points et
 $D \cong 1$ Mbit par page (groupes 1 et 2); $r = 7,7$ points/mm, $D \cong 4$ Mbit/page
 (groupes 3 et 4)

Le temps de transmission d'une page A4 à travers une voie téléphonique normale va de 6 minutes (sans réduction de redondance et $\dot{D} = 2400$ bit/s) à 5 s environ (avec codage de source et $\dot{D} = 64$ kbit/s, groupe 4).

1.7.7 Images animées en noir et blanc

L'illusion de mouvement est donnée par une succession d'images fixes suffisamment rapide pour tromper l'oeil (effet cinématique, persistance rétinienne). A raison de i images par unité de temps, le débit de décision \dot{D} correspondant aux images mises

sous forme numérique selon (1.11) est exprimé par

$$\dot{D} = i A r^2 \text{ lb } g \quad \text{bit/s} \quad (1.13)$$

En plus de la redondance intrinsèque de chaque image instantanée, les images successives ne sont manifestement pas indépendantes, mais au contraire généralement très peu différentes (redondance dynamique). Cette double redondance se traduit par une prépondérance des basses fréquences dans le spectre du signal résultant de l'analyse, ligne par ligne, d'une image mobile, appelé *signal vidéo*. Cependant les composantes à haute fréquence, bien que rares, sont très importantes lors de brusques changements (transition d'arrière-plan, mouvements très rapides) et rendent une réduction de redondance problématique.

La distribution statistique moyenne de l'amplitude du signal vidéo (luminance) peut être admise uniforme (niveaux de gris équiprobables).

La *télévision* commerciale décompose chaque image en 625 lignes (en Europe) ou 525 lignes (USA, Canada, Japon) le long desquelles l'intensité lumineuse est transmise de manière analogique. La transmission a lieu à raison de $i = 25$ images/s. Le signal vidéo ainsi obtenu occupe, dans le système européen, une bande de fréquences de 0 à environ 5 MHz.

Pour l'éventuelle *visiophonie* (service commuté de qualité réduite accompagnant la téléphonie), on cherche à diminuer cette énorme largeur de bande en réduisant le format de l'image, sa résolution lumineuse et, si possible, sa redondance.

1.7.8 Images en couleur

En plus de l'intensité lumineuse, ou *luminance*, d'une image en noir et blanc, l'information concernant la couleur, ou *chrominance*, se décompose en deux paramètres supplémentaires :

- la couleur proprement dite, c'est-à-dire la composition spectrale au sens de l'optique;
- le degré de saturation de cette couleur (densité, pâle ou soutenue).

Ces trois paramètres peuvent être dérivés de trois composantes monochromes judicieusement choisies, par exemple rouge, vert et bleu, dont l'addition permet de reconstituer pratiquement n'importe quelle nuance colorée.

Cependant pour éviter de tripler la quantité de décision d'une image en couleur par rapport à la même image en noir et blanc (et par conséquent de tripler la largeur de bande nécessaire à la transmettre), on tient compte de trois propriétés physiologiques de l'oeil :

- l'acuité visuelle pour les nuances colorées est plus faible que pour une image en noir et blanc. Il en résulte que les paramètres de chrominance peuvent être transmis avec moins de détails (c'est-à-dire une largeur de bande plus faible) que la luminance;
- l'acuité visuelle pour la chrominance dépend de la couleur; elle est maximum pour les contrastes entre les couleurs complémentaires orange - bleu ciel;
- la sensibilité de l'oeil dépend de la couleur, elle est maximum pour le jaune ($\lambda \cong 550 \text{ nm}$).

En conséquence, les systèmes de télévision en couleur effectuent, pour les besoins de la transmission, une transformation par combinaison linéaire des trois composantes monochromes R (rouge), V (vert) et B (bleu) captées par la caméra et restituées par l'écran. Cette transformation livre les signaux suivants :

- luminance Y par addition des trois composantes, pondérées par la courbe de sensibilité chromatique de l'oeil

$$Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B \quad (1.14)$$

Ce signal offre la compatibilité avec les récepteurs en noir et blanc;

- premier signal de chrominance I , selon l'axe orange - bleu ciel, déduit de R , V et B par combinaison linéaire

$$I = 0,60 R - 0,28 V - 0,32 B \quad (1.15)$$

- deuxième signal de chrominance Q , selon l'axe violet - vert, orthogonal au premier

$$Q = 0,21 R - 0,52 V + 0,31 B \quad (1.16)$$

Les différents systèmes utilisés (NTSC, PAL, SECAM) se distinguent par les solutions techniques apportées au problème de la transmission de ces trois signaux (§ 10.5.7).

1.7.9 Données

On désigne d'une manière générale par *données* (data, Daten) des informations de nature numérique, représentées par convention sous forme codée, en vue d'un traitement, généralement par des moyens automatiques.

Les sources et les destinataires de données sont donc en premier lieu des *machines* (terminaux, ordinateurs, processeurs) et indirectement, le cas échéant, des hommes.

Le terme de données est souvent utilisé dans un sens générique englobant toutes les *informations non parlées* qui peuvent être aussi transmises sous forme numérique dans un réseau téléphonique. A ce titre, ce terme recouvre par exemple les informations suivantes :

- textes
- images fixes (télécopie)
- croquis ou messages manuscrits (téléécriture)
- résultats de mesure (télémesure)
- ordres (télécommande)
- alarmes, etc.

Le débit de décision \dot{D} produit par une source ou accepté par un destinataire de données constitue le principal paramètre d'une liaison, vu de l'utilisateur. Il est à mettre en relation avec le débit de décision possible à travers le canal disponible, par exemple :

- voie télégraphique : $\dot{D} = 50$ (100 ou 200) bit/s
- voie téléphonique analogique : $\dot{M}_{\max} \cong 1\,600$ Bd, voire 2400 Bd
 $\dot{D} = 1\,200$ bit/s... 14,4 kbit/s
- voie téléphonique numérique : $\dot{D} = 64$ kbit/s

La probabilité d'apparition des différents caractères dont dispose la source peut être quelconque. Ils sont généralement produits de manière qui semble aléatoire, mais des motifs répétitifs ou persistants ne sont pas exclus (plages uniformes dans des images, chaînes de signes identiques, etc.).

1.7.10 Comparaisons des besoins des différents services

Le tableau 1.11 donne une idée comparative de l'importance relative des différents services de télécommunications en ce qui concerne

- la largeur de bande B admise pour les transmissions analogiques
- le débit de décision \dot{D} nécessaire pour les transmissions numériques

en tenant compte également de la possibilité de représenter numériquement des informations analogiques.

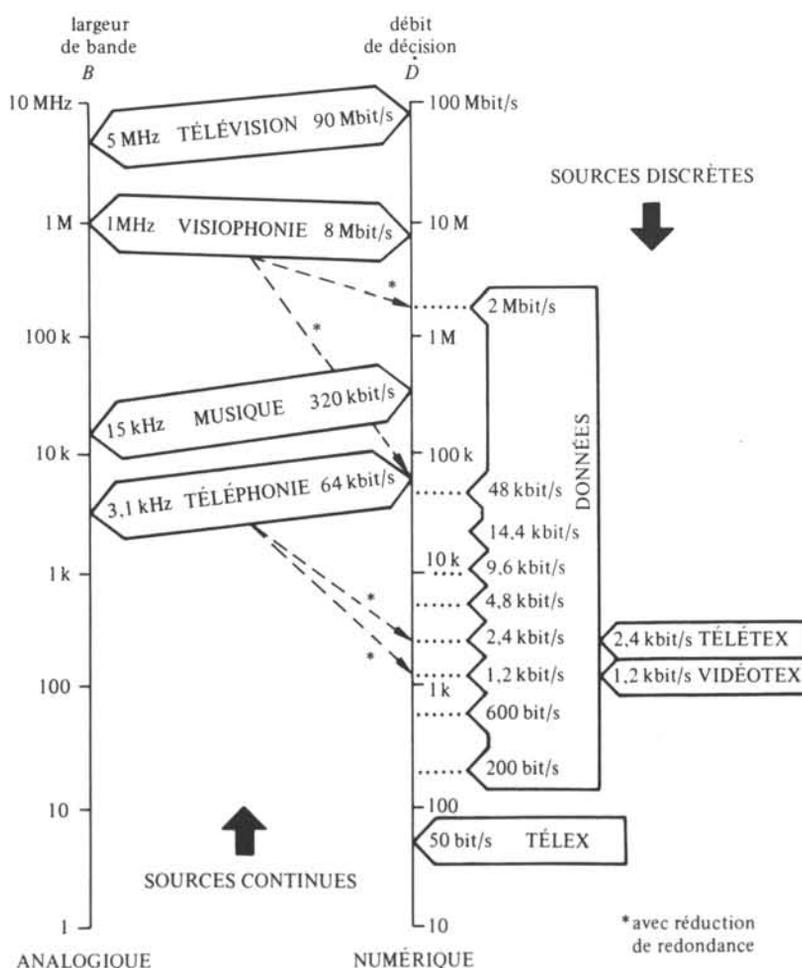


Tableau 1.11 Largeurs de bande et débits binaires.

PLANIFICATION : OBJECTIFS, CONTRAINTES, MÉTHODES

2.1 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

2.1.1 Planification qualitative et quantitative

On entend par *planification* (planning, design; Planung) la détermination de tous les paramètres d'un système en fonction des exigences du moment et de leur évolution présumée dans le temps. Dans le cas des réseaux de télécommunications, cette opération revêt deux aspects distincts :

- planification qualitative qui consiste à concevoir et à dimensionner le système dans son ensemble et chacun de ses organes en particulier, en fonction d'objectifs exprimés en termes de qualité de service, en particulier de qualité de transmission; l'utilisateur du téléphone attend, par exemple, qu'une certaine intelligibilité des communications soit garantie en toute circonstance;
- planification quantitative qui concerne l'évaluation du nombre d'organes (lignes, voies, itinéraires, équipements, etc.) à prévoir dans un réseau pour faire face au trafic (de nature aléatoire) produit par les usagers; les critères de planification quantitative se réfèrent aussi à la notion de qualité de service exigée par les usagers, mais il s'agit alors de qualité de commutation; par exemple, le nombre de voies téléphoniques banalisées disponibles entre deux villes doit être suffisant pour ne pas refuser trop d'appels aux heures de pointe ou ne pas faire attendre trop longtemps l'utilisateur.

2.1.2 Qualité de service

En télécommunications, la notion de qualité de service sert de référence fondamentale pour toutes les phases de la planification. Trois des principaux aspects de la qualité de service, présentés ci-dessous, seront traités dans les sections 2.4, 2.5 et 2.6.

La *qualité de transmission* concerne la fidélité de l'information transmise. L'information confiée par la source au système doit parvenir au destinataire autant que possible sans pertes, sans adjonction et sans altération. Les critères globaux de qualité dépendent du type de service, par exemple :

- l'intelligibilité en téléphonie
- la fidélité et la pureté en transmission musicale

- la conformité en transmission d'images
- le débit et la probabilité d'erreurs en télégraphie et en transmission de données.

Sur le plan technique, des critères particuliers concernant des paramètres du système doivent être considérés, ce sont principalement :

- l'affaiblissement général de la liaison
- le temps de propagation
- la largeur de bande
- le comportement en présence de distorsions
- l'influence de perturbations (bruit, diaphonie).

La *qualité de commutation* concerne l'acheminement des communications à travers un réseau banalisé. Les ordres de la source (demandeur) précisant l'identité du destinataire de l'information (demandé) doivent être exécutés avec exactitude et rapidité. Les principaux critères de qualité sont ici :

- la probabilité d'encombrement du réseau
- la probabilité de perte d'informations ou de retard d'acheminement, ainsi que les caractéristiques statistiques de ce retard (valeur moyenne, variance, distribution, etc.)
- le délai moyen d'établissement des connexions
- la probabilité de fausses connexions
- l'exactitude de la taxation.

La *fiabilité* est un aspect très important de la qualité de service. Elle exprime l'aptitude du système à satisfaire aux exigences de fonctionnement durant un laps de temps donné. On la spécifie et on l'évalue à l'aide des critères suivants :

- la probabilité des pannes partielles et totales
- la réparabilité du système (durée moyenne des pannes)
- les conséquences d'une panne
- le comportement du système en cas de panne (détection, localisation, isolation).

2.1.3 Compromis entre qualité et coût

Il est toujours possible d'améliorer la qualité d'un système, à condition d'y mettre le prix. Toutefois, le perfectionnisme est une attitude néfaste à l'ingénieur. Tout l'art de la planification consiste donc à garantir la qualité minimum requise à un prix raisonnable, c'est-à-dire concurrentiel, compte tenu des possibilités technologiques du moment.

La définition de la qualité minimum requise est délicate, d'autant plus qu'en télécommunications elle est souvent liée à des facteurs d'appréciation humains, subjectifs par nature. On cherche donc, sur la base de tests statistiques très étendus, à fixer une limite de qualité telle qu'un pourcentage important (p. ex. 95 %) d'utilisateurs se déclarent satisfaits. Les critères de qualité ainsi définis ont fait, pour la plupart, l'objet de conventions internationales (sect. 2.2) qui sont elles-mêmes déjà le résultat d'un compromis entre coût et qualité.

2.1.4 Démarche pour la conception d'un système

Au départ, trois facteurs déterminent la conception d'un système :

- les *objectifs* à atteindre, énoncés en termes de besoins qualitatifs et quantitatifs; par exemple : desserte d'une région, introduction d'un nouveau service, rationalisation de l'exploitation, augmentation de la capacité de transmission, exploration d'une nouvelle technologie, couverture d'un marché potentiel, etc.;
- les *contraintes* à respecter, dont les principales sont de nature économique (rentabilité); à cela s'ajoutent le respect de recommandations et de normes nationales et internationales, la compatibilité avec d'autres systèmes existants, les conditions climatiques, les exigences particulières de l'exploitation, du transport ou du montage; les délais, souvent impératifs et toujours ressentis comme trop courts, constituent aussi une contrainte non négligeable parmi toutes celles qui limitent la liberté de l'ingénieur;
- les *moyens* disponibles, c'est-à-dire d'une part ce qu'on appelle le matériel (hardware) : composants, circuits, construction, etc. et le logiciel (software) : méthodes de calcul, programmes, etc.; d'autre part, les ressources en personnel de développement et en expérience.

L'énoncé précis des objectifs et des contraintes constitue la *spécification* du système qui sert de cahier des charges général et de référence pour toute la conception et l'évaluation du système. Sur la base de cette spécification et des moyens disponibles s'élabore la conception du système soumise sans cesse à un processus itératif d'évaluation par :

- confrontation avec la spécification
- analyse des moyens (faisabilité)
- comparaison de variantes
- choix d'options fondamentales
- estimation des coûts, notamment ampleur et durée du développement.

De ce travail se dégage un *concept du système* sur la base duquel le système peut être décomposé en sous-systèmes ou unités, définis chacun et par rapport aux autres par un *cahier des charges* qui sert de base au développement.

La phase exploratoire (conception, évaluation) ne doit pas être sous-estimée ni en temps, ni en difficulté. Des décisions bien fondées à ce niveau permettent d'éviter de coûteux déboires en cours de développement.

La figure 2.1 résume de manière schématique la genèse d'un système technique.

2.1.5 Cahier des charges

Dans le cadre général de la spécification d'un système, le *cahier des charges* (specification, Pflichtenheft) est le document technique de base et de référence pour le développement ou l'acquisition d'un sous-système ou d'une unité. A ce titre, il doit couvrir sans ambiguïté les points suivants :

- situer l'unité dans le cadre du système
- en définir exactement les *fonctions*
- préciser avec beaucoup de soin les *interfaces*, c'est-à-dire les points de contact avec d'autres unités du système, tant sur le plan fonctionnel (échange d'information, codes, séquences, etc.) qu'électrique (polarité, niveau, impédance, etc.)

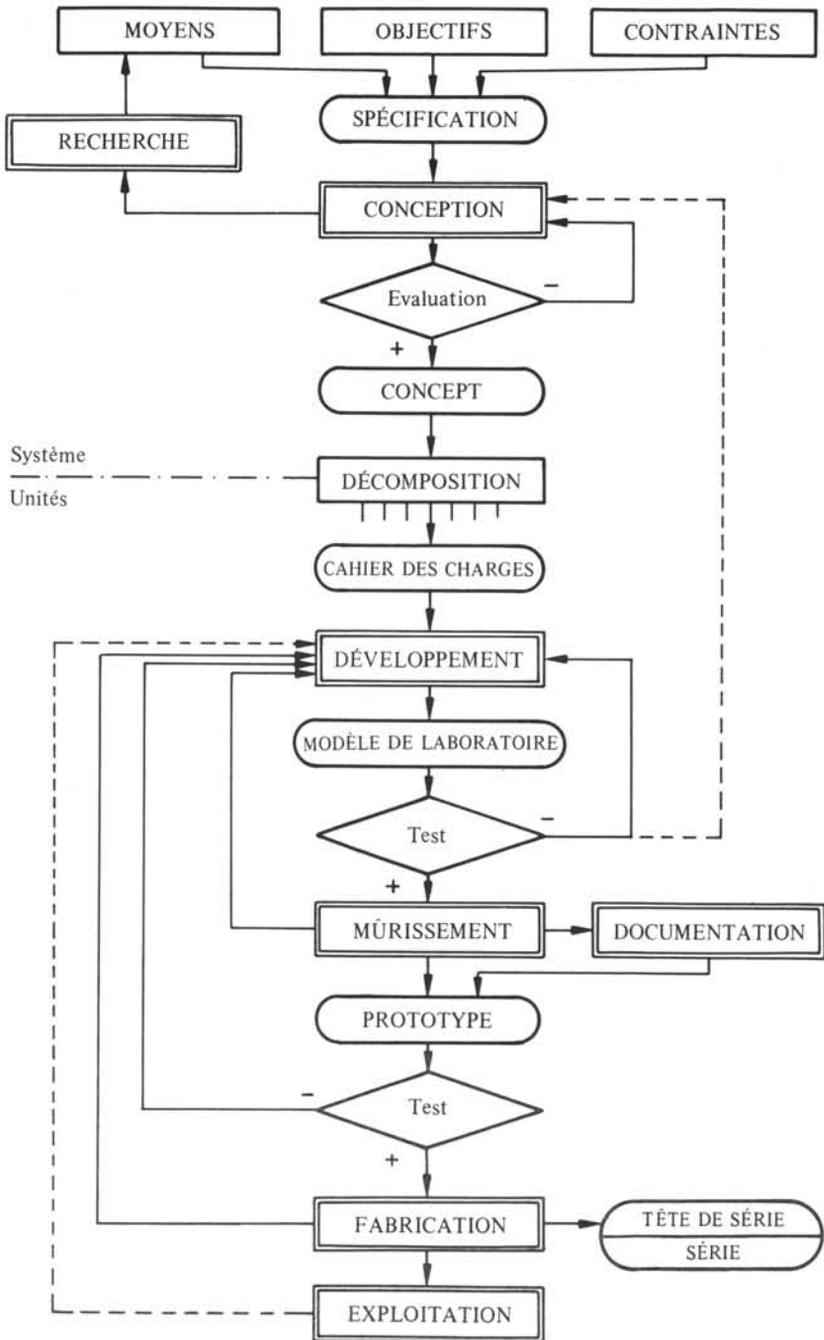


Fig. 2.1 Genèse d'un système technique.

- prescrire les *tolérances* de tous les paramètres essentiels
- fixer les principes de surveillance (alarmes, affichages, contrôles, etc.), de maintenance et de service (interface homme/machine, interventions manuelles, etc.)
- énoncer les exigences de *fiabilité*, conséquences admissibles de pannes (disponibilité, temps de réparation, etc.)
- donner les paramètres constructifs (système de construction modulaire, dimensions, connecteurs, type de câblage, interfaces mécaniques, etc.)
- indiquer les sources d'énergie à disposition (alimentation par secteur, par batterie, etc.)
- préciser les conditions ambiantes (climat, chocs, etc.).

Lorsque l'unité doit réaliser des fonctions logiques (séquences d'opérations, exécution conditionnelle d'opérations), comme c'est le cas par exemple dans les organes de commande ou les dispositifs d'alarme et de test, un texte ne suffit généralement pas à spécifier sans ambiguïté le déroulement exact et complet de ces fonctions, c'est-à-dire le *programme* au sens large (indépendamment de son mode de réalisation, câblé ou non). Il faut alors avoir recours à des représentations symboliques (algèbre de Boole, réseaux de Petri, organigrammes, structogrammes, etc.).

2.1.6 Développement et fabrication

Le processus de *développement*, comme celui de la conception est aussi itératif. Le résultat de tests, des évaluations techniques et économiques, la confrontation avec le cahier des charges permettent de rectifier les options prises en cours de développement et de s'approcher d'une solution optimale (pour autant que les délais le permettent et que le procédé converge ...).

La phase de développement est suivie d'une phase de "*mûrissement*", c'est-à-dire de mise au net de tous les détails, et de la constitution parallèle d'une *documentation technique* complète (schémas, liste de pièces, programmes, prescriptions de montage, d'ajustage, de test, mode d'emploi, etc.). Cette phase, dont l'ampleur est comparable à celle de développement proprement dit, doit permettre la fabrication de l'unité.

L'importance de la documentation est énorme. Elle constitue le trait d'union entre le bureau d'études ou le laboratoire et la production (fabrique, atelier, locaux d'essais), puis le client (installation, mise en service, exploitation, dépannage, etc.). L'ingénieur de développement ne réalisant généralement pas lui-même ce qu'il conçoit, il doit être à même de communiquer ses idées à des tiers, sans aucune ambiguïté, dans un langage conventionnel (symboles, dessins, plans, etc.), intelligible par eux.

Pour un système complexe, les étapes de réalisation sont généralement les suivantes :

- modèles de laboratoire (première édition de la documentation)
- prototype en service expérimental (deuxième édition de la documentation)
- tête de série en service réel (troisième édition de la documentation)
- fabrication en série.

De la spécification du système à sa mise en service réel, un volume de travail considérable est nécessaire (plusieurs centaines d'hommes - années dans le cas de nouveaux systèmes de transmission ou de commutation de grande envergure).

2.2 STANDARDISATION NATIONALE ET INTERNATIONALE

2.2.1 Nécessité d'une coordination

L'intérêt des télécommunications pour transmettre des informations à grande, voire très grande distance a été reconnu dès le début de leur histoire. C'est pourquoi, très tôt, il a fallu s'entendre de part et d'autre des frontières nationales sur un certain nombre de points fondamentaux pour garantir la qualité du service. Il s'agit notamment de

- questions techniques : définition de la qualité de service et détermination des paramètres qui l'influencent; spécification détaillée et très précise des interfaces (caractéristiques électriques et logicielles), notamment la nature des signaux utilisés pour la transmission et les conventions définissant l'échange d'information (signalisation) pour la commutation automatique;
- planification générale du réseau : structure du réseau international, mode d'acheminement des communications, répartition des affaiblissements (plan de transmission), distribution des numéros d'appel (plan de numérotage);
- problèmes d'exploitation et de gestion : en particulier décompte des taxes des communications internationales, observation de trafic.

Sur le plan *national* également une standardisation stricte du réseau et des équipements est absolument nécessaire pour

- garantir la *compatibilité* des éléments de systèmes provenant de fournisseurs différents
- assurer la même qualité de service minimale à tous les usagers
- respecter les conventions internationales.

2.2.2 Rôle de l'Union internationale des télécommunications

En 1865, en plein essor des liaisons télégraphiques trans- et intercontinentales et onze ans avant l'invention du téléphone, se tenait à Paris la première conférence qui marqua le début de l'Union télégraphique internationale, transformée en 1947, en *Union internationale des télécommunications* UIT (International Telecommunication Union ITU), sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies.

L'UIT a son siège à Genève et compte 184 pays membres (1994). Réorganisée par sa Constitution de 1992, mise en vigueur en 1994, elle comprend, outre son Secrétariat général, trois secteurs :

- *normalisation des télécommunications* UIT-T : à la suite des travaux du *Comité consultatif international télégraphique et téléphonique* CCITT, ce secteur assure la coordination et la comptabilité du développement des équipements, systèmes, réseaux et services de télécommunications, tant sur le plan technique que sur celui de l'exploitation et de la tarification, sur une base mondiale.
- *radiocommunications* UIT-R : reprenant la tâche du *Comité consultatif international des radiocommunications* CCIR et du *Comité international d'enregistrement des fréquences* (International Frequency Registration Board IFRB), ce secteur régit l'usage de toutes les fréquences du spectre radioélectrique de 9kHz à 400 GHz pour assurer la couverture des besoins et la cohabita-

tion d'un nombre croissant de services sur le plan mondial (radiodiffusion, services fixes et mobiles, satellites, applications scientifiques, etc.)

- **développement des télécommunications** UIT-D : ce secteur assiste les pays en développement dans leurs décisions relatives à la planification, à l'exploitation et à la gestion de leurs réseaux et services de télécommunications. Il promeut les transferts de technologie et la formation.

Le travail de normalisation de l'UIT est fait dans de nombreuses commissions auxquelles participent des experts de l'industrie et des exploitants. Il en résulte des "**Recommandations**" (recommandations) ratifiées tous les quatre ans par la Conférence de normalisation des télécommunications (naguère : Assemblée plénière du CCITT ou du CCIR). Bien que l'UIT n'ait aucun moyen de les faire respecter, ces recommandations (actuellement plus de 32 000 pages!) ont pratiquement l'effet de normes auxquelles les pays se soumettent dans leur propre intérêt (importation, exportation de matériel; interconnexion de réseaux; cohérence des services).

Sans cet énorme effort de normalisation, il serait impossible de garantir la qualité du service offert aux usagers et la compatibilité des systèmes sur le plan mondial. Il doit être entrepris suffisamment tôt pour éviter que des développements avancés n'imposent un standard de facto et pour focaliser une coûteuse recherche sur des objectifs harmonisés. Par ailleurs, une normalisation prématurée risque d'entraver la production d'idées originales et la réalisation de solutions nouvelles, plus adéquates.

Les recommandations de l'UIT limitent certes la liberté de l'ingénieur concepteur de systèmes, mais assurent d'autre part à ses produits une insertion judicieuse dans le contexte général et local du service public des télécommunications.

Le tableau 2.2 situe les principales séries de recommandations de l'UIT-T, désignées chacune par une lettre caractéristique de la série. Il y sera fait fréquemment référence dans les chapitres qui suivent.

Tableau 2.2 Principales séries de recommandations de l'UIT-T.

	Tarification	Exploitation	Equipements	Commutation	Transmission	Maintenance	
Téléphonie	D	E	P	Q	G	K L M	
Audio		N					J
Vidéo							
Textes		F	T				
Données					V		
Réseaux			X I				
Langages					Z		

2.2.3 ETSI

Sur le plan européen, l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) créé en 1988 et installé à Sophia-Antipolis (France) édicte des normes en accord avec les exploitants de réseaux, les industriels, les associations d'utilisateurs, les fournisseurs de services, les instituts de recherche de ses 24 pays membres.

Ces normes découlent des recommandations de l'UIT qu'elles précisent et complètent.

2.3 AFFAIBLISSEMENT ET NIVEAU

2.3.1 Affaiblissement et gain : définitions générales

D'une manière générale l'affaiblissement A (attenuation, loss; Dämpfung) ou le gain G (gain, Gewinn) sont définis par le logarithme du rapport de deux puissances apparentes P_1 et P_2 caractérisant l'une les conditions à l'entrée d'un quadripôle (ligne, circuit, filtre, etc.), l'autre celles à la sortie :

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad \text{dB} \quad (2.1)$$

$$A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad \text{Np} \quad (2.2)$$

$$G = -A \quad (2.3)$$

Il faut remarquer que :

- on parle de gain lorsque $P_2 > P_1$ ($G > 0, A < 0$);
- suivant la base choisie pour le logarithme, l'affaiblissement et le gain sont exprimés en *décibel* dB, plus pratique que le *bel* (base 10) ou en *néper* Np (base e) qui sont deux pseudo-unités (sans dimension) semblables;
- le néper, mathématiquement plus "naturel" puisque lié directement à la fonction exponentielle, apparaît spontanément dans la théorie des quadripôles et des lignes (chap. 3); cependant le décibel est d'un usage beaucoup

Tableau 2.3 Expressions logarithmiques de rapports de puissances.

$\frac{P_1}{P_2}$	$10 \lg \frac{P_1}{P_2}$	$\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}$
	dB	Np
1	0	0
2	~ 3	~ 0,35
3	~ 4,7	~ 0,55
10	10	~ 1,15
10^n	10 n	~ 1,15 n

plus répandu ; on passe de l'un à l'autre par les relations

$$1 \text{ Np} = 20 \lg e \text{ dB} \cong 8,68 \text{ dB} \quad (2.4)$$

$$1 \text{ dB} = (1/20) \ln 10 \text{ Np} \cong 0,115 \text{ Np} \quad (2.5)$$

- l'intérêt d'une représentation logarithmique réside dans la possibilité d'additionner les affaiblissements et gains partiels au lieu de multiplier les rapports de puissance.

Le tableau 2.3 donne quelques valeurs importantes de rapports sous forme logarithmique.

2.3.2 Affaiblissement, gain et déphasage composites : définitions

En pratique, il est rarement possible de terminer exactement une ligne, un circuit ou un quadripôle (p. ex. un filtre) sur son impédance caractéristique, d'autant moins qu'elle n'est, en général, pas purement réelle et qu'elle dépend de la fréquence.

Dans le cas d'une terminaison du quadripôle sur deux impédances quelconques Z_1 à l'entrée et Z_2 à la sortie, on définit l'*affaiblissement composite* A_{cp} (composite attenuation, Betriebsdämpfung) selon la relation générale (2.1) avec :

- P_1 = puissance apparente maximum que peut fournir la source d'impédance interne Z_1 ; on l'obtient en chargeant la source directement avec une impédance égale à Z_1 (fig. 2.4 (b)) ;
- P_2 = puissance apparente fournie par la source à travers le quadripôle aux bornes de l'impédance Z_2 (fig. 2.4 (a)).

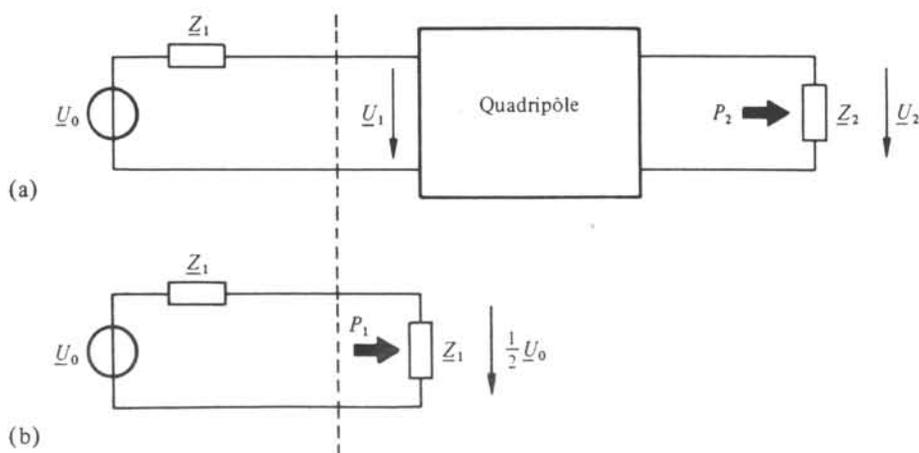


Fig. 2.4 Définition de l'affaiblissement composite.

L'affaiblissement composite est ainsi :

$$A_{cp} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \lg \frac{U_0^2}{4 Z_1} \cdot \frac{Z_2}{U_2^2} = 20 \lg \frac{U_0}{2 U_2} - 10 \lg \frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{dB} \quad (2.6)$$

Si $P_1 < P_2$, on parle plutôt de *gain composite* :

$$G_{cp} = -A_{cp} \quad \text{dB} \quad (2.7)$$

De même le *déphasage composite* b_{cp} (composite phase change, Betriebsphase) est défini par la différence de phase entre la tension de source \underline{U}_0 et la tension de sortie \underline{U}_2 .

$$b_{cp} = \arg(\underline{U}_0) - \arg(\underline{U}_2) \quad (2.8)$$

Il faut noter que :

- si et seulement si $Z_1 = Z_2$ (en module), alors

$$A_{cp} = 20 \lg \frac{U_0}{2 U_2} \quad \text{dB} \quad (2.9)$$

- l'affaiblissement composite n'exprime *pas* le rapport des tensions U_1 à l'entrée et U_2 à la sortie du quadripôle, *sauf* si $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_c$ = impédance caractéristique du quadripôle. Dans ce cas, on obtient l'*affaiblissement sur images* (image attenuation, Wellendämpfung).

2.3.3 Notion de niveau : définition

Le *niveau* L_x (level, Pegel) est l'expression sous forme logarithmique du rapport d'une grandeur, généralement une puissance P_x , et d'une grandeur de référence de même nature, par exemple une puissance $P_{réf}$:

$$L_x = 10 \lg \frac{P_x}{P_{réf}} \quad \text{dB} \quad (2.10)$$

$$L_x = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{P_{réf}} \quad \text{Np} \quad (2.11)$$

Sur une impédance donnée, la puissance est proportionnelle au carré de la tension. On peut donc écrire aussi

$$L_x = 10 \lg \frac{U_x^2}{U_{réf}^2} = 20 \lg \frac{U_x}{U_{réf}} \quad \text{dB} \quad (2.12)$$

$$L_x = \frac{1}{2} \ln \frac{U_x^2}{U_{réf}^2} = \ln \frac{U_x}{U_{réf}} \quad \text{Np} \quad (2.13)$$

La notion de niveau est étroitement liée à celle d'affaiblissement ou de gain. En effet, selon (2.1)

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \lg \frac{P_1}{P_{réf}} - 10 \lg \frac{P_2}{P_{réf}} = L_1 - L_2 \quad \text{dB} \quad (2.14)$$

Affaiblissement est donc synonyme de baisse de niveau entre deux points; de même, un gain exprime une élévation de niveau.

2.3.4 Niveau absolu : définition

Si la grandeur de référence $P_{réf}$ est définie indépendamment du système, le niveau par rapport à cette grandeur s'appelle *niveau absolu de puissance*. Il est d'usage en télé-

communications de choisir comme référence une puissance de 1 mW :

$$P_{\text{réf}} = 1 \text{ mW} : \quad L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) = 10 \lg \frac{P_x}{1 \text{ mW}} \quad \text{dBm} \quad (2.15)$$

Le suffixe m ajouté à l'abréviation dB indique la référence à 1 mW. Cette notation, extrêmement répandue pour désigner les niveaux absolus, n'est toutefois pas conforme aux règles de la CEI selon lesquelles on devrait écrire dB (1 mW).

Le niveau absolu est une manière d'exprimer la puissance d'un signal. La correspondance entre niveau absolu et puissance est donnée graphiquement en annexe (fig. 16.4). Par exemple :

$$L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) = 0 \text{ dBm} \quad \text{correspond à } P_x = 1 \text{ mW}$$

$$L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) = + 20 \text{ dBm} \quad \text{correspond à } P_x = 100 \text{ mW}$$

$$L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) = - 13 \text{ dBm} \quad \text{correspond à } P_x = 50 \mu\text{W}$$

Sur une résistance de $R_{\text{réf}} = 600 \Omega$, quasi universellement adoptée pour la terminaison des circuits et surtout pour les interfaces des instruments de mesure en basse fréquence, la puissance de référence $P_{\text{réf}} = 1 \text{ mW}$ produit une tension :

$$U_{\text{réf}} = \sqrt{P_{\text{réf}} R_{\text{réf}}} = 774,6 \dots \text{ mV} \cong 775 \text{ mV} \quad (2.16)$$

qui peut être prise comme tension de référence pour définir un niveau absolu de tension :

$$L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) = 20 \lg \frac{U_x}{775 \text{ mV}} \quad \text{dB} \quad (2.17)$$

Le choix de cette tension de référence a comme conséquence que, sur une résistance de 600Ω (et sur cette valeur seulement), le niveau absolu de tension est exprimé par la même valeur, en décibel ou en néper, que le niveau absolu de puissance :

$$L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) = L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) \quad (\text{sur } 600 \Omega) \quad (2.18)$$

A chaque niveau absolu de tension correspond, indépendamment de l'impédance en ce point, une certaine tension selon le diagramme de la figure 16.5 donnée en annexe. En particulier, par exemple :

$$L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) = 0 \text{ dB} \quad \text{correspond à } U_x = 775 \text{ mV}$$

$$L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) = + 20 \text{ dB} \quad \text{correspond à } U_x = 7,75 \text{ V}$$

$$L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) = - 65 \text{ dB} \quad \text{correspond à } U_x = 435,8 \mu\text{V}$$

En télécommunications, les mesures de tension se font très fréquemment avec des voltmètres particuliers appelés *hypsomètres* (level meter, Pegelmesser) gradués en dB et qui indiquent directement le niveau absolu de tension par rapport à 775 mV, indépendamment de l'impédance au point de mesure.

D'autres tensions de référence sont quelquefois utilisées, par exemple :

$$U_{\text{réf}} = 1 \text{ V} : \quad L (\text{re } 1 \text{ V}) \text{ en dBV}$$

$$U_{\text{réf}} = 1 \mu\text{V} : \quad L (\text{re } 1 \mu\text{V}) \text{ en dB}\mu\text{V}$$

En haute fréquence, la résistance de référence est conventionnellement de 50Ω ou de 75Ω (câbles coaxiaux de transmission). La puissance de référence de 1 mW y produit une tension de 223,6 mV, respectivement 273,9 mV. On a alors

$$\begin{aligned} L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) &= L_x (\text{re } 223,6 \text{ mV}) = \\ &= L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) + 10,8 \text{ dB} \quad (\text{sur } 50 \Omega) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) &= L_x (\text{re } 273,9 \text{ mV}) = \\ &= L_x (\text{re } 775 \text{ mV}) + 9,0 \text{ dB} \quad (\text{sur } 75 \Omega) \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.3.5 Niveau relatif : définition

On appelle *niveau relatif* en un point X d'un système la *différence* entre le niveau absolu en ce point et le niveau absolu en un point de référence propre au système (généralement l'entrée du système), où la puissance du signal est P_1 .

$$L_x (\text{re } P_1) = 10 \lg \frac{P_x}{P_1} = L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) - L_1 (\text{re } 1 \text{ mW}) \quad \text{dB} \quad (2.21)$$

Le niveau relatif est donc égal par définition à l'affaiblissement A changé de signe entre le point de référence et le point X considéré :

$$L_x (\text{re } P_1) = -A \quad (2.22)$$

Il est quelquefois utile, mais contraire aux règles de la CEI, d'exprimer le niveau relatif en dBr pour le distinguer du niveau absolu exprimé en dBm.

2.3.6 Hypsogramme : exemple

Le *diagramme de niveau* ou *hypsogramme* donne le niveau absolu ou relatif en tout point d'un système. On y reporte toutes les baisses (affaiblissements) et les hausses de niveau (gains) intervenant au cours de la transmission sur les lignes, les trajets par ondes et dans les amplificateurs. L'avantage de la représentation logarithmique devient évident dans la facilité de combinaison de ces éléments par simple addition ou soustraction de décibels.

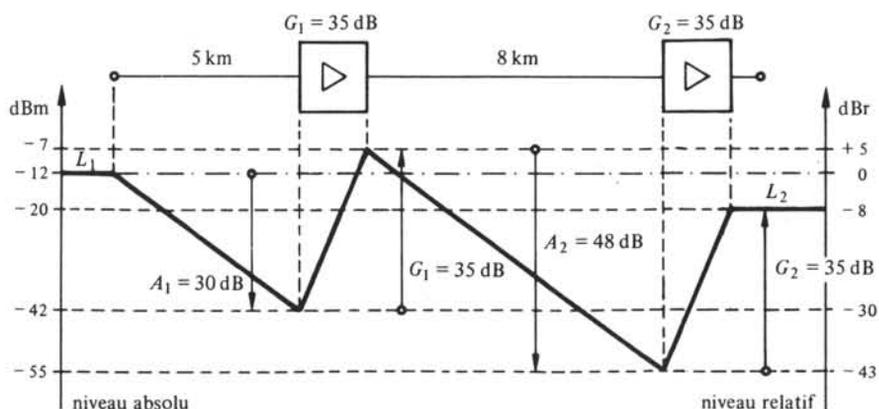


Fig. 2.5 Exemple d'hypsogramme.

La figure 2.5 donne un exemple d'hypsogramme relatif à une ligne de transmission dont l'affaiblissement vaut 6 dB par kilomètre et munie de deux amplificateurs de gain identique égal à 35 dB situés à 5 et 13 km du début de la ligne. Le niveau absolu d'entrée est de -12 dBm.

Le niveau de sortie L_2 se calcule immédiatement par la somme algébrique des gains et affaiblissements :

- niveau absolu :

$$\begin{aligned} L_2 \text{ (re 1 mW)} &= L_1 \text{ (re 1 mW)} - A_1 + G_1 - A_2 + G_2 = \\ &= -12 \text{ dBm} - 30 \text{ dB} + 35 \text{ dB} - 48 \text{ dB} + 35 \text{ dB} = -20 \text{ dBm} \end{aligned}$$

- niveau relatif :

$$\begin{aligned} L_2 \text{ (re } P_1) &= A_1 + G_1 - A_2 + G_2 = -30 \text{ dB} + 35 \text{ dB} - 48 \text{ dB} + 35 \text{ dB} = \\ &= -8 \text{ dBr} \end{aligned}$$

Ce niveau relatif de -8 dBr signifie que le niveau de sortie se situe à 8 dB au-dessous du niveau d'entrée, donc à un niveau absolu de $L_2 \text{ (re 1 mW)} = L_2 \text{ (re } P_1) + L_1 \text{ (re 1 mW)} = -8 \text{ dBr} - 12 \text{ dBm} = -20 \text{ dBm}$.

2.3.7 Addition de signaux

Lorsque n signaux *indépendants* (au sens de la statistique, c'est-à-dire à corrélation nulle) sont combinés, la *puissance* du signal résultant est égale à la *somme des puissances* P_i des n signaux. Si ces signaux ont la même valeur efficace U_{eff} (donc la même puissance P), on obtient :

$$P_{\text{rés}} = \sum_{i=1}^n P_i = nP \quad (2.23)$$

soit

$$U_{\text{rés eff}} = \sqrt{n} U_{\text{eff}} \quad (2.24)$$

et pour le niveau résultant :

$$L_{\text{rés}} = L + 10 \lg n \quad \text{dB} \quad (2.25)$$

Dans le cas très particulier de n signaux *isochrones*, c'est-à-dire de même forme et parfaitement synchronisés dans le temps, donc complètement corrélés, ce sont les *valeurs efficaces* des signaux qui s'additionnent pour donner la valeur efficace du signal résultant. Si ces signaux ont non seulement la même forme, mais la même puissance (signaux identiques), on obtient :

$$U_{\text{eff rés}} = \sum_{i=1}^n U_{\text{eff } i} = n U_{\text{eff}} \quad (2.26)$$

soit

$$P_{\text{rés}} = n^2 P \quad (2.27)$$

et le niveau résultant

$$L_{\text{rés}} = L + 20 \lg n \quad \text{dB} \quad (2.28)$$

Dans la pratique des télécommunications, on a le plus souvent affaire à la somme de signaux aléatoires manifestement indépendants, comme, par exemple, lorsqu'on

cherche à évaluer le niveau résultant de n conversations téléphoniques simultanées. On aura donc recours à l'*addition en puissance* selon (2.25). Toutefois, dans certains cas la corrélation entre les n signaux n'est pas parfaitement nulle, sans qu'ils soient isochrones pour autant (p. ex. : perturbation d'une transmission numérique par un petit nombre d'autres, de fréquences voisines, voire égales). Dans ce cas, l'*addition en tension* selon (2.28) donne une indication, pessimiste il est vrai, mais qui peut être utile.

2.4 QUALITÉ DE TRANSMISSION

2.4.1 Notion d'équivalent : définition

Les conditions d'impédance aux extrémités d'un réseau de télécommunications (lignes locales, postes terminaux, translateurs, etc.) ne sont pas toujours très bien définies.

Pour *dimensionner et mesurer* l'affaiblissement global de bout en bout d'un réseau téléphonique, on convient de le terminer par une *résistance pure* de 600Ω . L'affaiblissement composite ainsi défini porte le nom d'*équivalent* $A_{\text{éq}}$ (overall loss, Rest-dämpfung).

On a alors, selon (2.9), avec $Z_1 = Z_2 = 600 \Omega$ (réel) :

$$A_{\text{éq}} = 20 \lg \frac{U_0}{2U_2} \quad \text{dB} \quad (2.29)$$

L'intérêt de la notion d'équivalent est de permettre une mesure pratique et une comparaison claire des différents systèmes. La valeur de 600Ω , choisie pour des raisons historiques (§ 3.5.2), est actuellement la valeur nominale conventionnelle de l'impédance aux interfaces à basse fréquence des équipements et des instruments de mesure.

2.4.2 Equivalent de référence : définition

La qualité d'une liaison téléphonique (intelligibilité) dépend essentiellement de l'intensité sonore parvenant à l'oreille du destinataire. Cette intensité dépend à son tour

- du rendement de transducteur d'émission (microphone)
- du rendement du transducteur de réception (écouteur ou haut-parleur)
- de l'affaiblissement (équivalent $A_{\text{éq}}$) du système de transmission global entre les deux transducteurs.

Afin de permettre une évaluation comparative de différents systèmes, on a défini sur une base internationale (UIT-T) un *système-étalon*, comprenant principalement un microphone et un écouteur spécifiés, et désigné par NOSFER (NOUveau Système Fondamental pour la détermination des Equivalents de Référence, fig. 2.6).

L'*équivalent de référence* $A_{\text{éq réf}}$ (reference equivalent, Bezugsdämpfung) est l'affaiblissement à intercaler dans le système NOSFER pour obtenir la même intensité sonore (évaluée par comparaison subjective) qu'à travers la liaison à tester.

$$\left. \begin{array}{l} A_{\text{éq réf}} < 0 \text{ si la liaison est meilleure} \\ A_{\text{éq réf}} > 0 \text{ si la liaison est moins bonne} \end{array} \right\} \text{ que NOSFER}$$

Il faut relever que, en dépit de son nom français, l'équivalent de référence n'est pas à proprement parler un équivalent au sens donné au paragraphe 2.4.1 !

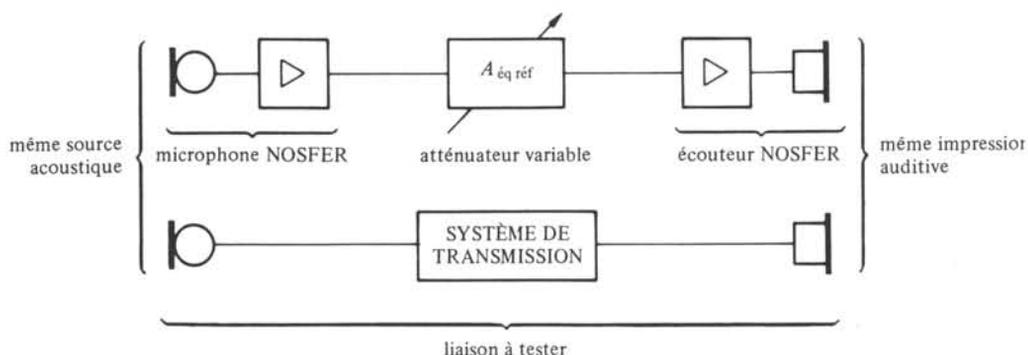


Fig. 2.6 Mesure de l'équivalent de référence.

2.4.3 Equivalent de référence mondial

Pour garantir une intelligibilité suffisante à une communication téléphonique entre deux postes terminaux quelconques raccordés au réseau mondial, il est nécessaire de s'assurer que l'équivalent de référence ne dépasse jamais une valeur limite, quels que soient les types de postes d'abonnés et de lignes interconnectés, et de planifier le réseau mondial en conséquence. Cette valeur limite a été fixée par convention internationale (UIT-T, Rec. G 111) à :

$$A_{\text{éq réf}} \leq 36 \text{ dB} \quad (2.30)$$

Compte tenu des propriétés du système NOSFER, cette valeur correspond à l'intensité sonore reçue lors d'une liaison acoustique directe à une distance d'environ 3 m.

Afin de permettre la planification des réseaux nationaux, l'équivalent de référence mondial est réparti de la façon suivante :

- réseau national côté émetteur (y compris le rendement électroacoustique du microphone) :

$$A_{\text{éq réf}} \leq 21 \text{ dB}$$

- réseau international :

$$A_{\text{éq}} \leq 3 \text{ dB}$$

- réseau national côté récepteur (y compris le rendement électroacoustique de l'écouteur) :

$$A_{\text{éq réf}} \leq 12 \text{ dB}$$

Les pays répartissent les équivalents à l'intérieur de leur réseau national (transducteurs, lignes locales, lignes interurbaines) selon un *plan de transmission* (sect. 15.4) propre à chaque pays.

2.4.4 Éléments de téléphonométrie

Les transducteurs électroacoustiques (microphone et écouteur) transforment une variation de pression acoustique en une variation de tension électrique et vice versa. Leur efficacité intervient directement dans l'évaluation de l'équivalent de référence national.

Un transducteur de bonne qualité, c'est-à-dire avec un faible équivalent de référence, permet de tolérer un affaiblissement plus important dans le réseau national. Un délicat compromis est à trouver entre le rendement des transducteurs (lié à leur coût très critique, vu le grand nombre de postes d'abonnés) et les investissements à consentir dans le réseau (calibre des lignes locales et rurales, amplificateurs) pour en garantir l'équivalent. La somme de l'équivalent de référence du transducteur et de l'équivalent du réseau national ne doit pas dépasser la valeur assignée par le plan de transmission mondial, quel que soit l'abonné considéré.

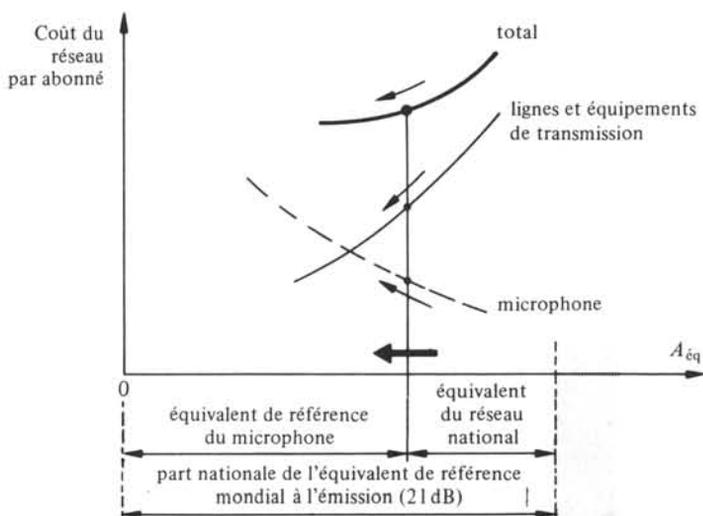


Fig. 2.7 Effet d'une amélioration du microphone sur le coût du réseau.

La figure 2.7 montre que la qualité (équivalent de référence à l'émission) du microphone est interchangeable contre celle (équivalent) du réseau. Il peut en résulter un optimum économique dans le cadre de la faisabilité technologique.

La mesure de l'équivalent de référence des transducteurs par comparaison directe avec le système de référence NOSFER est très malaisée. Elle se fait plutôt à l'aide de bouches artificielles qui produisent une pression acoustique étalonnée ou à l'aide d'oreilles artificielles qui permettent, avec un microphone étalonné, de mesurer une pression acoustique dans des conditions très bien déterminées. La comparaison de la tension électrique délivrée sur 600Ω par le microphone à tester, excité par la bouche artificielle, avec la valeur connue de la tension produite par le microphone de NOSFER dans les mêmes conditions, permet de trouver l'équivalent de référence. De même avec l'oreille artificielle pour l'écouteur.

2.4.5 Retard de transmission

Le temps que met une information pour parvenir de la source au destinataire peut être un élément d'appréciation de la qualité de transmission. Il est dû essentiellement au temps de propagation par ondes ou par fil mais, dans certains cas de transmission de données notamment, un retard dû à la commutation (commutation par blocs, § 15.5.3) s'y ajoute.

Le retard n'est pas critique dans les communications unilatérales (radiodiffusion, télévision, télécopie, etc.). Il le devient dès qu'une réponse est attendue dans l'autre sens (conversation, mode interactif).

Dans une conversation téléphonique, le retard est sensible à partir d'un temps de propagation (un seul trajet) d'environ 150 ms. Pour des raisons psychologiques, la conversation devient très pénible, voire impossible sans entraînement particulier, lorsque ce retard dépasse 400 ms.

Des retards de l'ordre de 250 ms se rencontrent dans les liaisons d'un point à un autre par satellite géostationnaire. En conséquence, on doit éviter de réaliser une communication téléphonique avec deux liaisons par satellites en série.

2.4.6 Transmission conforme

En transmission analogique, l'information est contenue dans la forme du signal. Il s'agit donc de la sauvegarder. Pour une transmission *conforme*, c'est-à-dire sans déformation, le signal reçu $u_R(t)$ ne doit différer du signal émis $u_E(t)$ que

- par un facteur a constant
- par un retard τ constant.

Ces deux signaux sont liés par la relation

$$u_R(t) = a u_E(t - \tau) \quad (2.31)$$

A cette identité dans le domaine temporel correspond, par transformation de Fourier (théorème du retard, § VI. 4.1.9), une relation dans le domaine fréquentiel complexe :

$$\underline{U}_R(f) = a \underline{U}_E(f) \exp(-j 2\pi f \tau) = \underline{H}(f) \cdot \underline{U}_E(f) \quad (2.32)$$

qui définit la *fonction de transfert* $\underline{H}(f) = \underline{U}_R(f) / \underline{U}_E(f)$.

Il en résulte que

- l'*affaiblissement* A de la transmission doit être *constant*, indépendamment de la fréquence :

$$A = 20 \lg[U_E(f)/U_R(f)] = -20 \lg[|\underline{H}(f)|] = 20 \lg(1/a) = \text{cste} \forall f \text{ dB} \quad (2.33)$$

- le *déphasage* b doit être une *fonction linéaire* de la fréquence :

$$b = \arg[\underline{U}_E(f)/\underline{U}_R(f)] = -\arg[\underline{H}(f)] = 2\pi f \tau \sim f \quad (2.34)$$

Ce sont les deux conditions requises pour une transmission conforme idéale.

En transmission numérique, la conformité n'est pas nécessaire. Le signal reçu étant échantillonné avant que l'information numérique en soit extraite, il suffit que l'*interférence entre moments* soit nulle, c'est-à-dire que la valeur du signal à un instant d'échantillonnage ne dépende que de l'information numérique portée par ce moment et non pas des valeurs aux instants d'échantillonnage voisins (sect. 5.3).

2.4.7 Distorsions linéaires : définition

Les conditions (2.33) et (2.34) ne peuvent pas être satisfaites parfaitement dans la pratique. Au contraire, les voies de transmission présentent des imperfections à cet égard, appelées *distorsions linéaires* (linear distortions, lineare Verzerrungen). On parle