

3 Introduction aux couches de connexion

Objectifs

L'objectif global de ce module est de présenter les télécommunications en général mais avec une orientation vers les couches physique et liaison des réseaux numériques. En premier, on retrouve un aperçu des besoins en télécommunications. On effectue également quelques rappels sur les concepts de base et sur la terminologie des réseaux. L'étudiant est ensuite amené à faire la distinction entre les divers types de réseaux.

Dans un second temps ce module introduit brièvement le codage numérique des informations (nombres, textes, sons et images) avec un estimé de la taille requise pour les représenter, avec ou sans compression. On explique ensuite le concept de sérialisation de ces données et de transformation sous la forme d'un signal n-aire dans le temps.

Le module présente ensuite à l'étudiant ce qu'est la transmission numérique et sa place dans les télécommunications. On énumère les divers supports qui peuvent servir à transmettre ces signaux entre deux appareils et on donne leurs caractéristiques générales.

Afin de situer la couche physique et la couche liaison dans l'univers des télécommunications, on donne un aperçu du concept de protocole, illustré par des diagrammes temporels. Pour terminer, on effectue un rappel du modèle OSI en mettant l'emphase sur les couches inférieures.

3.1 Introduction

Le processeur G4 exécute 10^9 instructions (entier et point flottant) par seconde, avec des pointes à 10 milliards d'instructions / s.

Les plus puissants ordinateurs exécutaient en 1970 moins d'un million d'instructions par seconde.

Les trente dernières années se caractérisent par une évolution extraordinaire des technologies de l'information. Les micro-ordinateurs d'aujourd'hui exécutent mille fois plus d'instructions par seconde que ce que pouvaient faire les gros ordinateurs de l'époque.

La progression des télécommunications est encore plus spectaculaire. Il y a trente ans, les réseaux à haute performance communiquaient à 54 Kbps (le réseau Arpanet). Les liens modernes transmettent 1 Gbps sur paires torsadées, 10 Gbps sur fibre optique et plus de 120 Gbps en laboratoire. La progression est presque aussi grande si on regarde le débit accessible à la maison qui est passé de 110 bauds à 10 Mbps (sur modem câble), un gain de près de 100 000 fois.

Du point de vue des coûts on a une situation très particulière. L'arrivée des micro-ordinateurs a révolutionné le prix des ordinateurs. Ils sont environ 100 fois moins chers que les mini-ordinateurs de l'époque et 1000 fois moins que les gros ordinateurs.

On ne bénéficie pas d'un gain comparable sur l'abonnement aux services de télécommunication qui est à peine inférieur aux prix de l'époque. Par contre, l'arrivée d'Internet, le réseau des réseaux, a donné une nouvelle dimension aux télécommunications. On peut maintenant communiquer partout dans le monde et cela sans frais d'interurbain.

3.2 De communications à télécommunications

Lorsque deux êtres humains communiquent entre eux, ils s'échangent des messages composés de mots (écrits ou parlés) et d'images (expressions corporelles, dessins, photos, vidéos, etc.). Tous ces modes de communication s'appuient sur des *codes* qui donnent un sens aux symboles échangés. Ces codes sont généralement très dépendants des considérations linguistiques et culturelles.

3.2.1 Communication écrite

En français on utilise quelques dizaines à quelques centaines de symboles écrits, selon le type de texte. Les langues asiatiques utilisent des milliers de symboles.

Dans le cas des messages écrits, les symboles utilisés pour codifier les messages sont les lettres de l'alphabet, les chiffres et quelques caractères divers. Le nombre de symboles différents est limité à quelques dizaines, centaines ou milliers, selon la convention utilisée.

« Rendez-vous à 15:45 au restaurant du coin. »

Figure 3-1 : Message écrit (37 symboles)

L'évolution des télécommunications a connu un essor considérable au 20^e siècle. Des premiers rudiments en télégraphie jusqu'aux réseaux modernes ultra performants, on a multiplié la capacité de transmission par un facteur incroyable. Ce qu'on transmet en une seconde sur une fibre optique moderne aurait pris mille ans avec les premiers systèmes de télégraphie du dix-neuvième siècle. Pour un historique des systèmes de télécommunication, voir Histoire des systèmes de télécommunication, Nowakowski Claude et Roux Alain, Technique et Documentation Lavoisier, 1994, 382 pages.

Les télécommunications permettent aux êtres humains (et à leurs équipements) d'échanger des informations, à distance, à l'aide de signaux porteurs électromagnétiques. Pour pouvoir transmettre ainsi ces informations, on doit les structurer en messages et utiliser des niveaux de codification supplémentaires. Les lettres et autres symboles écrits deviennent d'abord des nombres, par exemple sous la forme de caractères ASCII (voir le tableau 3-1). Puis ces nombres sont transformés en signaux électromagnétiques (incluant les signaux électriques et optiques). Ces signaux sont transmis au destinataire qui effectue les transformations inverses pour retrouver le message original. Pour décoder les signaux reçus, le destinataire doit ainsi connaître (ou découvrir) les codes à utiliser à chacun des niveaux du processus :

- A) Transformation du signal en nombre.
- B) Transformation des nombres en texte.
- C) Transformation du texte en concepts (dépend de la langue).

Tableau 3-1 : Table des codes ASCII (hexadécimal, décimal, caractère)

20	32	30	48	0	40	64	@	50	80	P	60	96	`	70	112	p
21	33	31	49	1	41	65	A	51	81	Q	61	97	a	71	113	q
22	34	32	50	2	42	66	B	52	82	R	62	98	b	72	114	r
23	35	33	51	3	43	67	C	53	83	S	63	99	c	73	115	s
24	36	34	52	4	44	68	D	54	84	T	64	100	d	74	116	t
25	37	35	53	5	45	69	E	55	85	U	65	101	e	75	117	u
26	38	36	54	6	46	70	F	56	86	V	66	102	f	76	118	v
27	39	37	55	7	47	71	G	57	87	W	67	103	g	77	119	w
28	40	38	56	8	48	72	H	58	88	X	68	104	h	78	120	x
29	41	39	57	9	49	73	I	59	89	Y	69	105	i	79	121	y
2A	42	3A	58	:	4A	74	J	5A	90	Z	6A	106	j	7A	122	z
2B	43	3B	59	;	4B	75	K	5B	91	[6B	107	k	7B	123	{
2C	44	3C	60	<	4C	76	L	5C	92	\	6C	108	l	7C	124	
2D	45	3D	61	=	4D	77	M	5D	93]	6D	109	m	7D	125	}
2E	46	3E	62	>	4E	78	N	5E	94	^	6E	110	n	7E	126	~
2F	47	3F	63	?	4F	79	O	5F	95	_	6F	111	o	7F	127	▯

Lorsqu'il s'agit de transmettre des textes écrits en français, la table ASCII n'est pas appropriée car elle n'inclut pas les lettres accentuées. On utilise alors d'autres tables, telle que la table ISO Latin-1 (voir le tableau 3-2).

Tableau 3-2 : Extension ISO Latin-1 pour coder les textes français

	80h	90h	A0h	B0h	C0h	D0h	E0h	F0h					
0h	128	144	160	176	°	192	À	208	Đ	224	à	240	đ
1h	129	145	161	177	±	193	Á	209	Ñ	225	á	241	ñ
2h	130	146	162	178	²	194	Â	210	Ò	226	â	242	ò
3h	131	147	163	179	³	195	Ã	211	Ó	227	ã	243	ó
4h	132	148	164	180	´	196	Ä	212	Ô	228	ä	244	ô
5h	133	149	165	181	µ	197	Å	213	Õ	229	å	245	õ
6h	134	150	166	182	¶	198	Æ	214	Ö	230	æ	246	ö
7h	135	151	167	183	·	199	Ç	215	×	231	ç	247	÷
8h	136	152	168	184	¸	200	È	216	Ø	232	è	248	ø
9h	137	153	169	185	¹	201	É	217	Ù	233	é	249	ù
Ah	138	154	170	186	º	202	Ê	218	Ú	234	ê	250	ú
Bh	139	155	171	187	»	203	Ë	219	Û	235	ë	251	û
Ch	140	156	172	188	¼	204	Ì	220	Ü	236	ì	252	ü
Dh	141	157	173	189	½	205	Í	221	Ý	237	í	253	ý
Eh	142	158	174	190	¾	206	Î	222	Þ	238	î	254	þ
Fh	143	159	175	191	¿	207	Ï	223	ß	239	ï	255	ÿ

3.2.2 Communication orale

Ces variations de pression se propagent dans l'air comme des vagues en surface de l'eau. Elles sont captées par l'oreille et analysées par une région spécialisée du cerveau. Finalement, les mots et les concepts ainsi transmis sont compris par l'interlocuteur qui peut alors répondre.

Lorsque les humains utilisent la voix, ils utilisent un moyen de communication infiniment plus complexe, composé de diverses suites de vibrations sonores. Ce mode de communication est notamment complexe parce que les vibrations sont toujours différentes, aussi bien d'une personne à l'autre que d'une fois à l'autre pour une même personne. Voir la figure suivante :

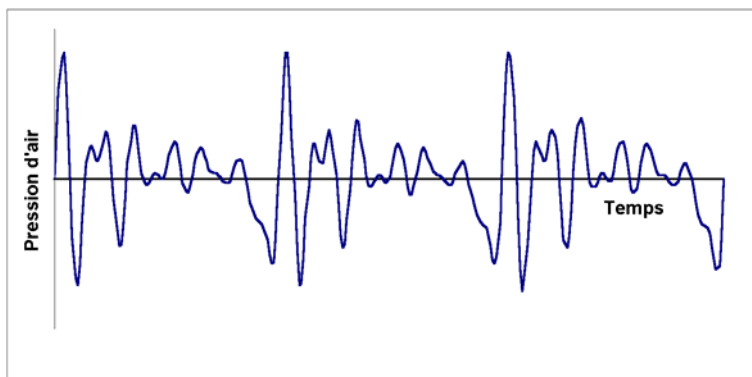


Figure 3-2 : Vibrations sonores pour la voyelle « a » (25 ms)

Pour transmettre la voix de façon électronique, on peut utiliser deux approches totalement différentes :

- ✧ **Numérique** (discret) ⇒ Transformer les ondes sonores en séquences de codes numériques et transmettre ces séquences

comme s'il s'agissait de textes. Cette approche est utilisée pour les séquences audio des pages Web ainsi qu'en *téléphonie IP* (basée sur la réseautique).

- ✧ **Analogique** (continu) ⇒ Émettre un signal électrique qui reproduit directement les variations de pression d'air produites par le locuteur. Cette approche est utilisée en téléphonie traditionnelle. Le signal capté par l'appareil chez l'abonné est transmis de façon analogique. Cependant, les systèmes téléphoniques modernes utilisent de plus en plus des méthodes de transmission numériques pour transmettre les signaux des concentrateurs de lignes au central.

Ces deux approches sont expliquées à la section 3.3.

3.2.3 Communication visuelle

Les messages de nature visuelle apportent une dimension supplémentaire à la communication. Ne dit-on pas qu'une image vaut mille mots ? Le domaine des télécommunications visuelles est une science en soit et déborde du cadre du présent cours. Cependant, on peut observer que tout comme la communication vocale, on fait face à un choix entre deux approches :

- ✧ **Numérique** (discret) ⇒ Transformer les images en séquences de codes numériques et transmettre ces séquences comme s'il s'agissait de textes.
- ✧ **Analogique** (continu) ⇒ Émettre un signal à haute fréquence dont l'amplitude reproduit le signal de la caméra, c'est-à-dire avec une transmission en amplitude modulée (AM).

Cependant, les câblodistributeurs modernes utilisent de plus en plus des processus de transmission numériques.

3.3 Aperçu des besoins en télécommunications

Les télécommunications servent à transmettre des informations au sens large du terme. En fait, pour être plus précis, on doit parler de transmission de *données*, car c'est une forme codifiée ou numérisée de l'information qui est manipulée par les systèmes informatiques.

La transmission peut servir à contrôler un appareil à distance, envoyer un message électronique, interroger un appareil distant ou une base de données, négocier le contrat du siècle, dialoguer avec un ami, transmettre des radiographies à un spécialiste éloigné, diffuser un reportage télévisé, etc. Le nombre et la diversité des besoins et des contraintes dépassent l'imagination ! C'est une diversité multidimensionnelle :

- ✧ nature des données (texte, audio, images, vidéo, etc.),
- ✧ autonomie du demandeur (ordinateur ou simple terminal),

- ✧ volume (de « quelques caractères » jusqu'à « des billions d'octets »),
- ✧ répartition des informations (centralisées ou distribuées),
- ✧ répartition du traitement (centralisé ou distribué),
- ✧ distance à parcourir (de « 1 mètre » à « des millions de kilomètres »),
- ✧ fiabilité du contenu (d'un « niveau acceptable » à un « niveau parfait »),
- ✧ régularité du débit (de « peu importe » à « 100% synchronisé »),
- ✧ confidentialité (de « public » à « ultra secret »),
- ✧ urgence de transmission (de « instantané » à « ajusté aux besoins »),
- ✧ urgence du besoin (de « aujourd'hui » à « dans 10 ans »),
- ✧ nombre de correspondants (de « 2 » à « des milliards »),
- ✧ technologies disponibles (contraintes monétaires, brevets, politiques, juridiques, historiques, scientifiques, etc.),
- ✧ envergure du projet (du « bricolage dans le coin du laboratoire » au « méga projet international »),
- ✧ budget de fabrication (de « quelques dollars » à « des milliards de dollars »),
- ✧ budget d'exploitation (par période, durée d'usage ou débit).

Quel que soit le besoin, les télécommunications effacent les distances, mais pas à n'importe quel prix. Tout est dans les compromis. On peut transmettre plus rapidement si on augmente le budget ou si on attend que la nouvelle technologie quitte les laboratoires. On peut envoyer un plus grand volume si on transmet pendant plus longtemps. On peut augmenter la confidentialité si on change les politiques internationales, etc. Cependant s'il est raisonnable de dépenser des millions pour interconnecter toutes les succursales d'une multinationale, ce budget est farfelu si le besoin est de permettre à un individu de consulter la météo sur Internet.

Ce qui précède ne couvre qu'une petite partie de la question. L'objectif ici est de bien mettre en évidence que la solution optimale dans une situation donnée ne s'applique pas nécessairement à une autre situation et, que si elle s'applique, il se peut qu'on n'ait pas le droit de s'en servir (contraintes de brevets, par exemple).

Ceci explique qu'il y a autant de diversité dans les technologies de télécommunication. Chaque variante est apparue pour une raison bien précise, entre autres parce que dans les premiers temps chaque fabricant se devait de faire différemment. Beaucoup de technologies sont dépassées mais sont encore en usage par inertie (coût de remplacement, dépendance des logiciels en exploitation, etc.). Il faut en tenir compte lorsqu'on modifie un réseau existant.

Depuis quelques années la tendance est aux produits *ouverts* qui utilisent des normes et des standards publics. À bien des égards c'est une nette amélioration car cela aide à interconnecter des systèmes différents. Mais la diversité est encore grande : il existe des centaines de normes et standards en télécommunications.

La meilleure façon de faire face à cette diversité est de diviser le problème en sujets similaires. On peut commencer par le point de vue de l'utilisateur (informations à transmettre) et creuser la question jusqu'aux éléments physiques du réseau (fils et connecteurs). Cette démarche va du plus général vers le plus précis.

Dans le présent cours on effectue la démarche inverse. On regroupe d'abord les types de supports (fils de cuivre, fibre optique, liaison radio, etc.) et on compare leurs caractéristiques physiques. Ensuite, on regroupe les diverses façons d'émettre des informations numériques (bit par bit) sur ces supports et on étudie les avantages et les défauts de chacune. Enfin, on structure les séquences de bits en unités d'informations cohérentes (début et fin des messages, paquets, trames, etc.)

3.3.1 Type de communication et débit

Une des contraintes majeures dont on doit tenir compte lors de la conception d'un réseau est le débit requis. Il dépend des services que le réseau doit supporter. En fait, le débit à satisfaire dépend de deux besoins : le volume à transmettre et l'urgence de la transmission.

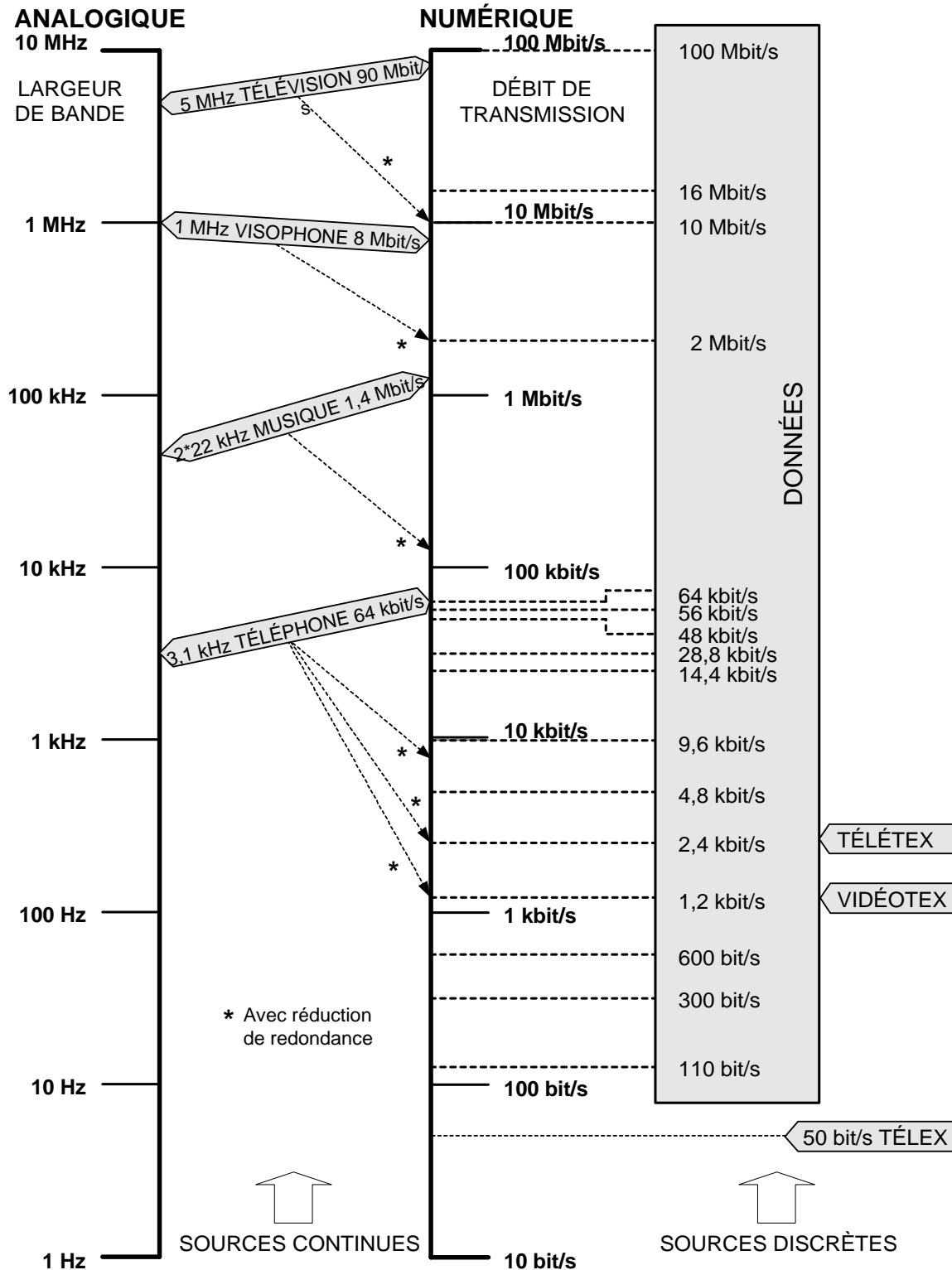


Figure 3-3 : Débit requis par divers services et débits disponibles

Exemple :

S'il faut transmettre 30 Ko en 1 minute, le réseau doit offrir un débit net de 4 kbps. S'il faut transporter 10 Mo en 4 secondes, le réseau doit fournir alors un débit net de 20 Mbps.

Pour spécifier la capacité d'un lien, nous indiquons son débit en bits par seconde :

- ✧ kbps = kilo (milliers de bits par seconde) = 10^3 bit/s,
- ✧ Mbps = mega (millions de bits par seconde) = 10^6 bit/s,
- ✧ Gbps = giga (milliards de bits par seconde) = 10^9 bit/s,
- ✧ Tbps = tera (billions de bits par seconde) = 10^{12} bit/s.

La Figure 3-3 illustre le débit requis pour divers services, avec la correspondance avec la *bande passante* (nombre d'Hertz requis) utilisée par ces services lorsqu'ils sont transmis par voie analogique. Par exemple, une vidéo de qualité télévision requiert :

- ✧ 5 MHz de bande passante, en analogique, sur le câble ;
- ✧ 90 Mbps sur un réseau, après numérisation ;
- ✧ 1,5 à 8 Mbps lorsque comprimé avec MPEG ;
- ✧ 1,5 MHz de bande passante lorsque numérisé, comprimé puis modulé en 256 QAM ou 16 VSB.

Les débits sur lignes dédiées sont passés de 50 bps avec les téléscripteurs du début du siècle à 10 Gbps sur les fibres optiques modernes. Un facteur de 200 000 000 fois plus rapide!

Pour être exact, on doit préciser que les modems dits 56 K transmettent en fait jusqu'à 54 kbps dans un sens et 33,6 kbps dans l'autre.

On observe également dans la Figure 3-3 l'évolution fulgurante du débit des modems sur lignes téléphoniques : de 110 bps (avec les appareils de 1975) jusqu'à 56 000 bps avec les nouveaux modems. En plus du gain de débit, les nouveaux modems utilisent des algorithmes de compression permettant de transférer deux fois plus de données que la vitesse de transmission indiquée (lorsque les contenus ne sont ni compressés, ni encryptés). Bref on a gagné un facteur de 1000 en 25 ans.

Le consommateur peut avoir encore mieux avec les nouveaux services intégrés : le *réseau numérique à intégration de services* RNIS (*ISDN*) et la *ligne numérique à paires asymétriques* LNPA (*ADSL*). Avec le premier il dispose à domicile d'un lien numérique à 144 kbps dont 64 kbps sert, lorsque requis, pour les communications téléphoniques.

La famille de services LNPA est prévue pour offrir des services de télévision à la demande. Dans sa version de base, le service permet un débit de 1,5 Mbps vers le consommateur mais un retour limité à 16 kbps. La version classique transporte 9 Mbps vers l'abonné et retourne 1,5 Mbps vers le central. Des versions plus rapides devant atteindre jusqu'à 52 Mbps sont annoncées.

3.4 Définitions et concepts globaux

Les télécommunications utilisent diverses technologies électroniques et informatiques pour transporter des messages parlés, écrits ou autres. Voici une rapide introduction à ce monde fascinant.

3.4.1 Signal et onde

Un *signal* est une variation dans le temps d'un phénomène physique. La variation se propage dans l'espace en formant une *onde*, un peu comme une vague à la surface de l'eau. En contrôlant les variations on peut transmettre des informations à un destinataire qui observe les variations.

Par exemple, lorsqu'on parle, les vibrations des cordes vocales provoquent des variations rapides de la pression de l'air ambiant. Les variations de pression d'air se propagent autour de soi comme autant de bulles concentriques qui s'agrandissent à grande vitesse. À chaque instant on crée une nouvelle bulle qui s'insère au centre des bulles précédentes et s'agrandit à la même vitesse que celles-ci. Dès qu'une bulle atteint l'auditeur, la pression d'air associée à cette bulle est détectée par son oreille puis analysée par son cerveau. L'information a été transmise.

En télécommunications, on crée un signal à l'aide de variations de potentiel électrique ou électromagnétique. Les capteurs sont des composants électroniques.

3.4.2 Transmission analogique

La majorité des systèmes téléphoniques modernes transforment de diverses façons les signaux de l'abonné afin de mieux utiliser le réseau.

Quand on parle au téléphone, les vibrations de l'air sont converties par le microphone en signaux électriques reproduisant la forme des ondes sonores. Le réseau transporte alors ces signaux jusqu'au destinataire. Le haut-parleur de son combiné recrée les vibrations sonores permettant d'entendre les sons prononcés.

Les différentes valeurs de pression d'air créées par le locuteur sont transposées dans le domaine électrique sous la forme de niveaux de tension correspondants. Le niveau du signal électrique peut prendre un nombre infini de valeurs différentes. Il varie de façon *continue* entre ces valeurs, basé sur les variations de pression d'air (voir la Figure 3-2). On parle alors de *transmission analogique*. Ce principe s'étend à tous les autres types de signaux analogiques, incluant les signaux vidéo analogiques.

3.4.3 Transmission numérique

À l'opposé, la transmission de messages numériques utilise une codification basée sur la répétition d'un nombre limité de formes d'ondes

On désigne communément ces signaux en tant que numériques. C'est un léger abus de langage car tout signal est analogique par nature. C'est l'information transportée qui est numérique ainsi que l'interprétation qui est faite du signal reçu.

Pour être exact, on doit préciser que le signal en bande de base traverse un filtre passe bas avant d'être transmis, ce qui amortit les transitions.

Le mot « Allô » a en fait été codé avec la convention ISO Latin-1, et non en ASCII, car celui-ci ne comporte pas les lettres accentuées.

(signaux électriques élémentaires). Par exemple, on peut n'utiliser que deux formes différentes : une tension constante à V+ et une à V-.

Avec une transmission numérique, le fait d'avoir un nombre limité de formes d'ondes, et non des variations continues du signal, fait en sorte que le signal transmis est moins sensible au bruit. En effet, à moins d'une forte variation du signal, le destinataire reconnaît les formes de base utilisées. De plus, l'information ne dépend plus du niveau du signal reçu. C'est le choix des formes d'ondes, et leur agencement qui est significatif.

On nomme *transmission* l'opération consistant à transformer un message numérique en une succession de signaux électriques élémentaires appelés *éléments de signal* ou *moments de transmission*.

On dit d'un signal qu'il est en *bande de base* lorsque les éléments de signal prennent la forme de *n* niveaux de tension (voir la Figure 3-4) tandis qu'on parle de signal *modulé* lorsque les éléments de signal sont des formes d'ondes (sinus ou autres), voir la Figure 3-5.

Exemple :

Codé en ASCII le message «Allô» devient «41, 6C, 6C, F4» (représentation hexadécimale) ou «01000001, 01101100, 01101100, 11110100» (représentation binaire). Avec une transmission à 16 niveaux de tension cela donne le signal de la Figure 3-4a tandis qu'une transmission binaire donne le signal illustré à la Figure 3-4b.

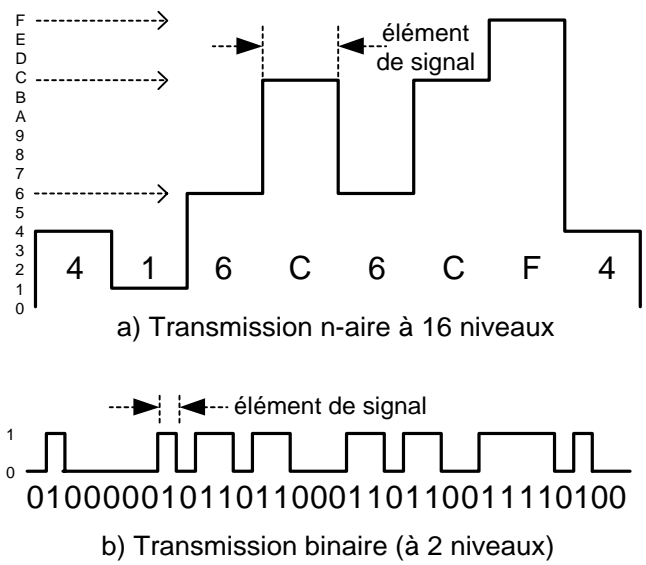


Figure 3-4 : Message « Allô » codé de deux façons

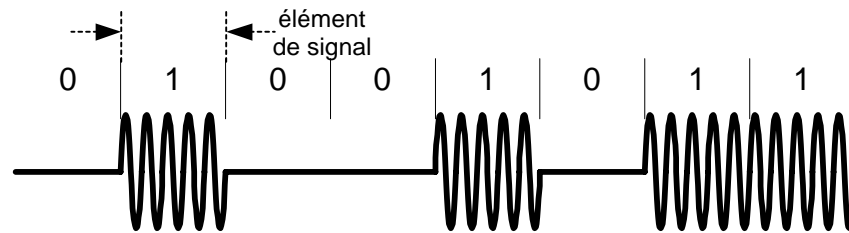


Figure 3-5 : Signal modulé pour le caractère « K » (ASCII 4Bhex)

Il existe une grande variété de méthodes de transmission qui ont été développées, chacune offrant des avantages spécifiques. Par exemple, lorsqu'on transmet plusieurs bits à la fois on peut conserver le niveau de tension plus longtemps (comme illustré à la Figure 3-4a) ou bien on peut profiter de la « richesse » du signal pour réduire le temps requis pour transmettre l'ensemble du message. La transmission à multiples niveaux offre un meilleur débit mais est plus difficile à générer et à décoder que la transmission binaire. Selon le budget et les besoins on choisira l'une ou l'autre méthode. Nous verrons plus loin les avantages et inconvénients de chaque type de transmission.

Certains protocoles utilisent plusieurs éléments de signal par bit. On a alors un débit en bits par seconde qui est inférieur au débit en bauds. Voir par exemple les protocoles courant porteur de CEBus (domotique).

Au niveau terminologique il importe de bien distinguer deux concepts qui sont souvent confondus : les *bauds* et les *bits par seconde*. Le premier désigne le nombre d'*éléments de signal* transmis par seconde (combien de fois qu'on change le signal en une seconde) tandis que le second indique le *débit d'information* du point de vue du message transmis. Lorsqu'il s'agit d'une transmission binaire, l'un et l'autre donne la même valeur, mais lorsqu'on utilise 2^M éléments de transmission, le débit en bits par seconde est alors égal à M fois le débit en bauds.

3.4.4 Perturbation du signal transmis

La transmission d'informations sur les supports numériques pose divers problèmes qui seront étudiés en détail dans les prochains chapitres.

Lorsqu'on transmet un signal sur un lien de communication, il arrive toujours déformé à l'autre bout. Autrement dit les réseaux ne sont pas parfaits ; ils introduisent des variations non désirées dans les signaux qu'ils transportent.

Lorsqu'un signal analogique est ainsi modifié, cela introduit du *bruit* (friture ou neige) dans le message. Plus la distance est grande, plus le signal est susceptible d'être déformé. La Figure 3-6 illustre quelques types de perturbations dont souffrent les réseaux ou les supports. En utilisant des filtres appropriés on arrive généralement à réduire l'impact du réseau. Malgré cela, le message se retrouve quand même perturbé car le filtre ne peut pas déterminer parfaitement quelles sont les variations de signal qui proviennent de la source ou du réseau.

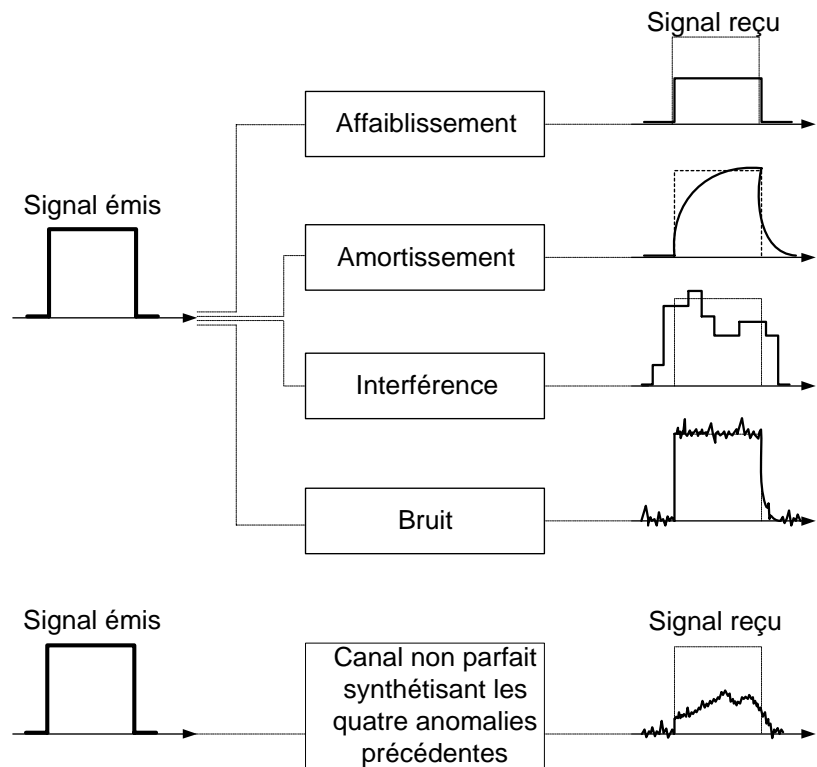
Dans le cas du signal numérique, les parasites sont éliminés. Le circuit récepteur comporte un *filtre* qui *régénère* le signal reçu. Quand le récepteur observe un signal numérique perturbé, il analyse le signal reçu, filtre les parasites, retrouve les *éléments de signal* qui ont été

produits à l'origine et finalement délivre au destinataire un message sans erreur. Ceci est possible car les signaux numériques sont restreints à un certain nombre de niveaux ou de formes (voir la Figure 3-4).

Si la distance à parcourir est trop grande alors on ajoute des filtres régénérateurs en milieu de parcours. Ces filtres analysent le signal reçu et régénèrent chacun des éléments de signal afin de retransmettre un signal exempt de bruit vers le destinataire. Voir la Figure 3-7. Cependant, les filtres possèdent une certaine capacité de correction. Passé ce seuil, l'information transférée n'est plus « fiable ».

Dans le cas des communications analogiques, un petit parasite perturbe à peine le destinataire ; plus on augmente les bruits, plus l'écoute devient désagréable. La dégradation est progressive. Avec une communication numérique la dégradation de l'information est nulle puis devient soudainement majeure. En effet, il suffit qu'un bit (mal placé) soit changé dans une facture pour que le total passe de 53 \$ à 1077 \$ (53+1024), ce qui est plutôt désagréable!

Pour réduire ce risque, les réseaux utilisent diverses techniques de détection et de correction d'erreurs qui seront étudiées ultérieurement.



Tiré de *Télécommunications et transmission de données* Samuel PIERRE et Marc COUTURE, p.137.

Figure 3-6 : Perturbations d'un signal numérique.

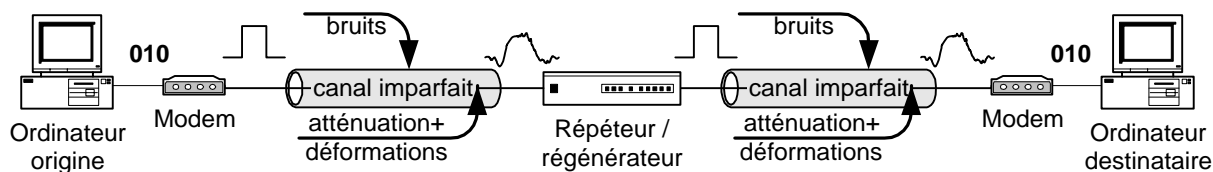


Figure 3-7 : Régénération du signal dans un réseau numérique

3.4.5 Transmission de données analogique numérisée

La conversion des signaux se fait dans le réseau, à la liaison avec la « boucle locale » de l'abonné : les signaux sont encore analogiques, sauf pour les abonnés aux « services intégrés » de type RNIS (ISDN).

Pour profiter de la robustesse de la transmission numérique, la majorité des compagnies de téléphone ont converti leurs réseaux en remplaçant la transmission analogique par une transmission numérique. Pour faire cette conversion, il faut d'abord transformer les signaux analogiques sous une forme numérique à l'aide de deux procédés complémentaires : l'échantillonnage et la quantification.

L'échantillonnage consiste à choisir un certain nombre de moments prédéfinis dans le temps et à observer le niveau de tension du signal analogique à chacun de ces moments, tel qu'illustré à la Figure 3-8a. Les valeurs ainsi observées sont appelées les *échantillons*. Le délai entre les échantillons doit être assez court pour s'assurer de bien observer toutes les variations importantes du signal. Pour la voix on échantillonne généralement 8000 fois par seconde.

Pour compléter le processus de numérisation du signal on attribue à chaque échantillon un nombre entier qui représente le plus fidèlement possible le niveau de tension observé, tel qu'illustré à la Figure 3-8b. C'est la *quantification*. La quantification fait perdre un peu de précision, plus ou moins selon la finesse de la grille d'attribution des nombres. Pour la voix, on utilise normalement une grille à 256 niveaux (les nombres ont donc 8 bits).

Remarque :

Lorsque les contenus audio correspondent à un échange interactif entre deux personnes, il faut que les signaux numérisés arrivent rapidement et sans interruption à l'interlocuteur. Cela requiert des mécanismes particuliers dans le réseau pour assurer le respect de cette contrainte. Un bon exemple est la structure en trames des lignes T1.

Une fois numérisé, un signal analogique peut être transmis sur un réseau numérique comme n'importe quel message de type texte. Par exemple, lors d'une consultation d'une page du Web, les contenus audio sont transmis à l'internaute sous forme numérique, puis transformés à nouveau en analogique par la carte de sons de son ordinateur.

Lectures suggérées :

Comme complément d'étude, lire sur la structure en trames des lignes T1 dans les ouvrages suivants :

La section 2.4.8.3 de *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, Pearson Education, 3e édition, traduction 1997.

La page 152 (et la figure) de *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, Pearson Education, 4e édition, 2003.

La section 2.5.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

En numérisant un signal on effectue deux approximations : une dans le temps et une dans le niveau de signal. La Figure 3-8c compare le signal numérisé avec le signal original. Les zones en gris correspondent à l'erreur occasionnée par la somme des deux approximations.

Divers procédés sont utilisés pour rendre moins audibles les imperfections dues à la numérisation. Le premier procédé consiste à augmenter la précision de la grille dans la zone où le voltage est proche de zéro. On appelle cela la *compression* de l'amplitude du signal.

Lecture suggérée :

Pour en apprendre davantage sur la compression, consulter *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996, page 71.

Pour réduire l'erreur on peut aussi augmenter le taux d'échantillonnage et la précision de la grille. Ainsi, pour la musique dite de « qualité CD » on échantillonne, en stéréo, 44 000 fois par seconde en utilisant 65 000 niveaux (16 bits). La fidélité augmente au prix d'un débit de transmission 22 fois plus élevé.

Le codage différentiel compare en fait le nouvel échantillon avec l'interprétation qui a été faite de ce qui a été transmis.

Il existe diverses méthodes pour réduire la taille des données produites et le débit requis pour leur transmission. Une méthode bien connue est le *codage différentiel*. Au lieu de transmettre les n bits de chaque échantillon, on transmet seulement la différence par rapport à l'échantillon précédent. Puisque les signaux sonores comportent une grande redondance, on peut réduire ainsi le débit de façon significative. À l'extrême on ne transmet qu'un seul bit : « 1 » si le nouvel échantillon est supérieur et « 0 » s'il est inférieur.

Lecture suggérée :

Pour de plus amples informations sur le codage différentiel, consulter la section 7 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

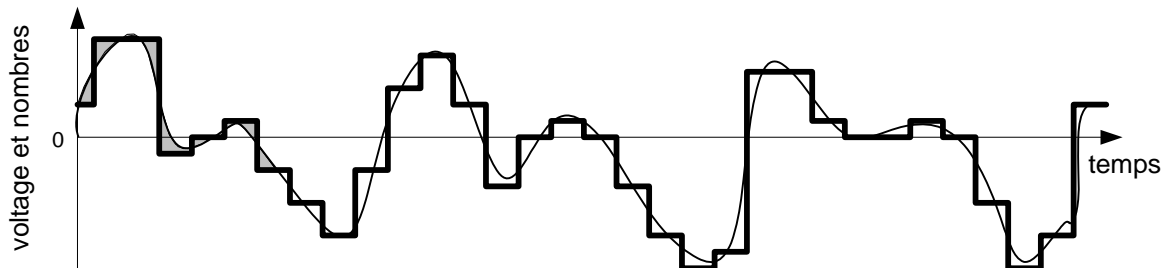


Figure 3-8 : Numérisation d'un signal analogique

Une autre façon de réduire le débit à transmettre est de diviser le signal en brefs intervalles de temps. Pour chaque intervalle, on analyse le signal afin d'en extraire des paramètres qui caractérisent le signal durant cet intervalle. On n'envoie que ces paramètres. Le récepteur reçoit les paramètres et effectue la transformation pour recomposer le signal.

Par exemple, le format MP3 peut coder un son de qualité *téléphone* pour aussi peu que 8 kbps, ce qui représente une réduction de 88 %. Ce format peut également coder un son de qualité semblable à celle d'un CD audio avec un débit moyen de 128 kbps, soit une réduction de 91 %.

En réseautique on exprime le débit d'un canal de transmission en bits par seconde. En téléphonie on désigne plus souvent la capacité en tant que « équivalent nombre de conversations téléphoniques simultanées ».

Les compagnies de téléphones (*telco*) utilisent énormément la numérisation des signaux. En plus d'améliorer la qualité des conversations transmises, on peut ainsi transmettre plusieurs conversations téléphoniques sur un même fil et économiser des montants considérables.

Lecture suggérée :

Pour une étude théorique de la numérisation et du multiplexage en téléphonie, voir les sections 4.3 et 4.4 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

Avec un bon algorithme de compression numérique, par exemple ACELP, on peut transporter simultanément 192 conversations sur une liaison de type T1. Cette transformation ne se fait pas sans impact (délai dans le signal et puissance de calcul requise).

*En fait, il y a 24x8 bits par trame plus un bit de synchronisation pour un total de 193 bits.
8000*193=1544000.*

On peut par exemple regrouper 24 liaisons téléphoniques sur une ligne T1 sous la forme de 8 000 trames par seconde, chacune contenant 24 échantillons de 8 bits, pour un débit total de 1,544 Mbps. Nous reviendrons sur ce sujet lorsque nous aborderons le partage du support physique.

En bref, les compagnies de téléphone transportent la voix de façon numérique à l'intérieur de leur réseau. Elles offrent même cette option jusque chez leurs clients dans le cadre des technologies d'intégration de la voix et des données RNIS (*ISDN*).

Lecture suggérée :

Pour une énumération des avantages des communications numériques en téléphonie, lire la section 9 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc., 1989.

3.4.6 Niveaux de codage

Les informations à transmettre sont codées à plusieurs niveaux. Les différents niveaux de codage sont :

- ✧ **Codage de l'information :**
les informations sont codées sous forme numérique afin d'être manipulables par des ordinateurs. Par exemple, pour les textes on utilise divers codes tel que l'ASCII qui attribue une valeur entière comprise entre 0 et 127 à chaque caractère. Les codes peuvent être imbriqués l'un par-dessus l'autre ; par exemple HTML code la présentation des pages Web avec des codes ASCII, le texte des pages étant lui aussi codé en ASCII.
- ✧ **Codage de sécurité :**
les informations confidentielles sont chiffrées (on dit aussi cryptées) pour les rendre inintelligibles sauf pour le destinataire. Le cryptage d'un message permet d'éviter qu'un observateur indésirable puisse prendre connaissance du contenu ;
- ✧ **Codage de source :**
la représentation numérique des informations est transformée (on dit comprimée) afin de réduire la redondance qui se trouve dans les informations. Cette étape est importante pour réduire les temps de transfert sur le réseau et optimiser par le fait même la rentabilité du réseau. On exploite par exemple la ressemblance entre les diverses parties des images.

On distingue deux types de compression : avec ou sans perte. Il y a perte lorsque le codage ne permet pas de retrouver exactement l'information initiale. Ce type de codage permet de mieux profiter de la redondance qui se trouve dans certains types de contenus. Par exemple, le codage vidéo JPEG réduit de 90 % la taille d'une image,

Certains canaux peuvent transmettre quelques bits simultanément, soit en utilisant plusieurs fils, soit en codifiant plusieurs bits dans un même élément de signal. Cependant, même dans ce cas, le besoin de sérialisation demeure.

avec pertes légères (généralement non visibles au premier regard). En général on utilise un codage sans perte pour les textes et un codage avec perte pour l'audio et la vidéo.

✧ **Codage temporel :**

Les informations sont représentées dans un ordinateur sous la forme d'un ensemble structuré de nombres binaires. Étant donné que les canaux de communication ne transmettent qu'un seul bit à la fois, on doit découper la structure en bits et les transmettre un par un. Ce processus est appelé la sérialisation des données. Lors de cette étape il faut s'assurer que les deux intervenants conviennent de l'ordre précis dans lequel la structure et les nombres sont transmis. En particulier il faut spécifier quel bit est transféré en premier (le plus ou le moins significatif).

Remarque :

Lorsqu'un nombre occupe plus d'un octet il faut spécifier si c'est la partie la plus significative ou la moins significative qui est transmise en premier, car la position en mémoire varie selon la famille d'ordinateurs concernée.

✧ **Codage de synchronisation :**

On ajoute un peu de redondance pour permettre une bonne synchronisation des intervenants (bits ou caractères de synchronisation, insertion de « 0 » (HDLC), caractères d'échappement, etc.).

✧ **Codage de fiabilité :**

les séquences à transmettre sont codées une fois de plus afin de protéger le contenu contre les effets indésirables des canaux utilisés pour la transmission. Lors de cette étape, on ajoute une redondance calculée pour permettre de détecter et parfois de corriger les erreurs de transmission. Certains codages vont jusqu'à doubler l'information transmise.

✧ **Codage anti-biais :**

Les circuits électroniques ont souvent besoin pour bien fonctionner que le niveau moyen du signal soit fixe (par exemple à 0 volt). On varie alors le niveau de sortie pour compenser le fait que certains contenus comportent plus de bits à 1 ou à 0. Par exemple, le codage bipolaire utilise des tensions positives et négatives, en alternance, pour transmettre les bits « 1 ». Avec un tel codage on évite les biais car les V+ et les V- s'annulent.

Par exemple, les canaux numériques du système VIDÉOWAY utilisent un brouillage pseudo-aléatoire PRBS pour protéger les canaux analogiques adjacents. Cela évite d'émettre des patrons répétitifs dans le signal.

✧ **Codage de confinement électromagnétique :**
un signal placé sur un canal a tendance à rayonner et à créer des interférences sur les autres signaux du même canal ou sur les canaux avoisinants. La situation peut devenir critique lorsque les données transmises comportent des patrons répétitifs. Pour limiter ces interférences, certains systèmes utilisent un codage pseudo-aléatoire (PRBS) pour éviter que les patrons puissent créer des interférences dans l'environnement.

✧ **Codage de canal :**
Finalement, le choix des éléments de signal se fait en tenant compte de tous les types de codage ci-dessus. À chaque période de temps on place sur le canal un de ces éléments, dans l'ordre convenu.

On distingue deux grands axes de codage du canal : en *bande de base* ou avec *modulation*. Avec le premier on met sur le canal une tension fixe pour toute la période allouée à un élément (ou une impulsion correspondant à une partie importante de cette période), tel qu'illustré à la Figure 3-4. Le codage avec modulation consiste à remplir la période de temps avec une onde (généralement) sinusoïdale dite *onde porteuse* tel qu'illustré à la Figure 3-5. On utilise l'une ou l'autre approche en fonction du type de support, de la distance, du débit requis et du budget.

Lecture suggérée :

Pour de plus amples informations sur les **niveaux de codage**, consulter :

La section 4.4 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Ayrolle, 1992.

La section 3.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996

3.4.7 Sens de transmission

Dans certains systèmes la communication se fait dans un seul sens, sans possibilité de retour. On parle alors d'un système *simplex*. C'est la configuration la moins dispendieuse. La liaison est simple et les circuits sont au minimum (un appareil est exclusivement émetteur, l'autre est récepteur). On utilise ce type de système pour les appareils de mesure qui doivent retourner des valeurs ou des statistiques à une unité centrale pour traitement ou historique (*logging*). Les liaisons simplex sont également utilisées dans les systèmes de diffusion d'information, tel que le système VIDÉOWAY. Dans ce système l'information à transmettre est diffusée simultanément à tous les terminaux, sans communication inverse.

C'est comme une communication par radio CB. Les interlocuteurs parlent chacun leur tour et ils s'échangent le droit de parole par un mot code du genre « roger ».

D'autres systèmes permettent une communication dans un sens ou l'autre, mais pas dans les deux en même temps. On parle alors d'une communication *semi-duplex (half-duplex)*. La contrainte peut être de nature physique (type de liaison, de signal ou d'amplificateur) ou informatique (restrictions dans les protocoles). Cette configuration est plus complexe que la précédente puisque chaque machine doit posséder à la fois des circuits de transmission et de réception. Du point de vue logiciel on conserve cependant une relative simplicité puisque les appareils n'ont à gérer que deux états. On retrouve souvent ce modèle de communication dans les systèmes maître-esclave. Seul le maître a le droit de parole, sauf de temps à autre lorsqu'il sollicite une réponse d'un appareil esclave. Pendant la réponse le maître se met en mode écoute.

Finalement, les autres systèmes offrent une communication bidirectionnelle simultanée. Les deux appareils peuvent s'envoyer des informations en même temps, sans conflit. On nomme cela une communication de type *duplex* ou *duplex intégral (full-duplex)*. C'est le mode le plus souple et le plus efficace, mais aussi le plus complexe et le plus dispendieux. On peut le bâtir de deux façons : en mettant deux communications simplex côte à côte ou bien en partageant la bande passante d'un seul support en deux parties (pas nécessairement égales). On retrouve ce type de système dans les connexions Internet par modem. L'utilisateur peut interroger un serveur et interrompre le transfert à n'importe quel moment. La commande d'arrêt croise les données transmises par le serveur.

3.4.8 Communication locale ou réseau

Tel que nous avons vu précédemment, la réponse à un problème de communication varie grandement en fonction des besoins à satisfaire et des contraintes à respecter (type de besoin, distance à couvrir, nombre d'appareils, etc.). La situation la plus simple correspond à deux ordinateurs qui se situent dans la même pièce ou le même édifice. On peut alors les relier directement par un câble de communication. Il n'y a aucune ambiguïté sur la destination. Les éléments de communication qui quittent un ordinateur atteignent directement l'autre et uniquement l'autre. On a une connexion *point à point* de base.

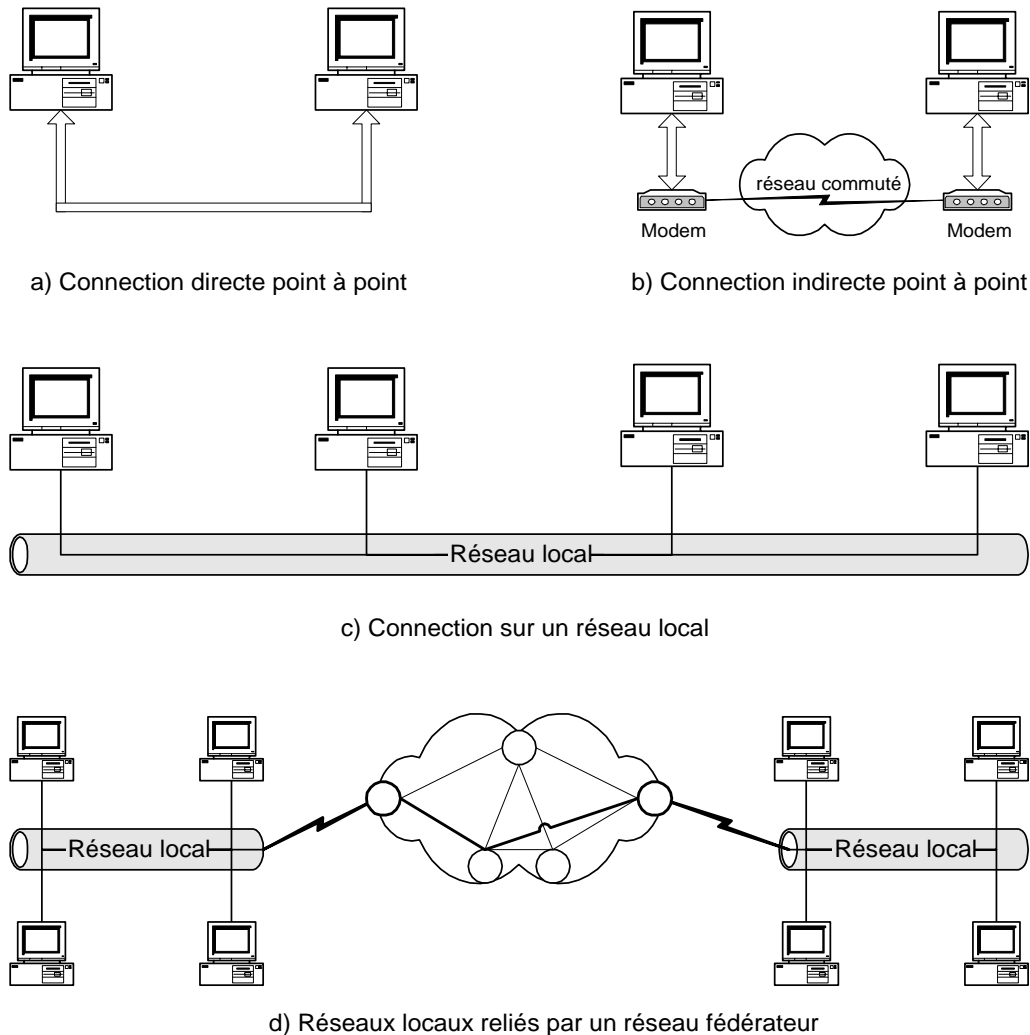


Figure 3-9 : Divers types de réseaux

Si les deux ordinateurs sont à une bonne distance l'un de l'autre, alors la solution la plus simple consiste à les relier par le réseau téléphonique (voir la figure b) de la figure précédente). On a encore une connexion point à point entre les deux ordinateurs mais l'un d'eux doit au préalable établir la connexion en signalant le numéro de l'autre. De plus, ce type de connexion requiert l'usage de *modems* (modulateur / démodulateur) car le système téléphonique ne supporte pas les transmissions de signaux en bande de base. Le modem émetteur effectue une modulation du signal source tandis que le récepteur démodule le signal reçu.

Dans les grands réseaux locaux les paquets émis n'atteignent pas **tous** les autres ordinateurs. En effet, ces réseaux sont partitionnés en « segments » séparés par des « ponts » (bridge) qui filtrent les paquets et laissent passer uniquement ceux qui sont destinés à un appareil situé de l'autre côté. Comme ce filtrage se fait de façon transparente pour l'émetteur, on peut l'ignorer pour l'instant.

Dans les réseaux comportant plusieurs ordinateurs il faut résoudre deux difficultés supplémentaires : à qui le message est-il destiné et comment faire pour atteindre le destinataire? La figure c) de la figure précédente illustre le cas le plus simple où les ordinateurs sont à proximité les uns des autres et reliés par un *réseau local*. Avec ce type de configuration les messages lancés par chaque ordinateur se propagent sur tout le réseau et atteignent le destinataire mais aussi tous les autres ordinateurs. L'émetteur doit donc spécifier l'identité du destinataire mais on n'a pas à se soucier de la façon de le rejoindre.

La figure d) de la figure précédente illustre le cas plus général où les ordinateurs sont répartis sur plusieurs réseaux locaux reliés par un réseau fédérateur. Ce type de réseau apporte une gamme infinie de difficultés supplémentaires : recherche du destinataire, choix du meilleur trajet, saturation des liaisons et des nœuds, panne éventuelle d'un élément du réseau, confidentialité, etc.

Lectures suggérées :

La section 1.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred Halsall, Addison-Wesley, 1996.

Les sections 1 à 5 du chapitre 11 de *Telecommunications System Engineering* de Roger L. Freeman, John Wiley & Sons inc. 1989.

3.5 Synthèse

Les télécommunications doivent répondre à de multiples besoins et satisfaire plusieurs contraintes. Ceci fait en sorte qu'il y a une grande diversité dans les technologies qui sont utilisées.

Les télécommunications sont en pleine effervescence. Par exemple, avec les premiers modems il fallait se méfier des erreurs de transmissions, surtout sur les liens distants. Aujourd'hui les modems vérifient les données transmises et les corrigent au besoin. Il est donc beaucoup plus facile d'utiliser un modem aujourd'hui. Mais cette simplicité apparente est rendue possible grâce à des modes de codage et de décodage fort complexes. Sans l'apparition des puces à haute densité d'intégration, ces modems occuperaient à eux seuls l'espace de plusieurs ordinateurs.

On assiste présentement à un bras de fer titanesque entre l'industrie du téléphone et celle du câble. Depuis la disparition des monopoles et l'ouverture à la concurrence, l'une et l'autre manœuvrent pour envahir le territoire de l'autre. Les compagnies de téléphone se lancent dans la vidéo à la demande tandis que les câblodistributeurs offrent des services de téléphonie. Le pas est grand dans les deux cas, mais la guerre est inévitable. Dans ces entreprises, l'infrastructure représente un investissement majeur qui dépend peu du nombre d'abonnés (installation du réseau et frais d'entretien). Dès lors c'est uniquement la dernière

tranche d'abonnés qui procurent des profits globaux. Tous les autres ne servent qu'à couvrir les dépenses associées à l'infrastructure. Pour ces entreprises, la menace de perdre une fraction de leurs abonnés pourrait s'avérer fatale. Un dossier à suivre.

3.6 Programme de lecture

Lectures obligatoires

La section 1.3 sur les logiciels de réseau dans *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, 4e édition, Pearson Education, 2003.

La section 1.4 sur les modèles de référence dans *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, 4e édition, Pearson Education, 2003.

Lectures suggérées

Lire sur la structure en trames des lignes T1 dans les ouvrages suivants :

La section 2.4.8.3 de *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, Prentice Hall, 3e édition, traduction 1997.

La page 152 (et la figure) de *Réseaux* de Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

La section 2.5.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Pour en apprendre davantage sur la compression, consulter la page 71 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Pour de plus amples informations sur le codage différentiel, consulter la section 7 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering* de Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

Pour une étude théorique de la numérisation et du multiplexage en téléphonie, voir les sections 4.3 et 4.4 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions* P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

Pour une énumération des avantages des communications numériques en téléphonie, voir la section 9 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering* de Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

Pour de plus amples informations sur les niveaux de codage, consulter :

La section 4.4 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

La section 3.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

La section 1.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Les sections 1 à 5 du chapitre 11 de *Telecommunications System Engineering* de Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

Pour approfondir le sujet service, protocole et interface on peut également lire :

Le chapitre 1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

La section 7.4 du chapitre 11 de *Telecommunications System Engineering* de Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

4 Voies de transmission

Objectifs

Une bonne connaissance des divers supports de transmission est essentielle en réseautique. L'architecte de système qui conçoit un réseau choisira parmi ceux-ci en fonction des besoins à satisfaire (coûts, débit, fiabilité, etc.).

Les réseaux sont constitués d'éléments passifs, semi-actifs et actifs. Les premiers, tels le câblage et les antennes, transportent l'information de façon brute. Les éléments semi-actifs (répéteurs) régénèrent le signal afin de compenser pour les diverses dégradations que lui font subir les premiers. Les éléments actifs (aiguilleurs (routeurs), proxy, pare-feu, etc.) vont plus loin. Ils extraient tous les paquets du signal et les traitent plus ou moins en profondeur selon le rôle qu'ils ont à jouer dans le réseau. Le présent chapitre étudie les caractéristiques techniques des éléments passifs.

Le terme liaison « éthérique » provient de la croyance initiale qui prétendait que pour se propager les ondes électromagnétiques avaient besoin d'un support invisible appelé « éther », comme les ondes sonores qui utilisent l'air pour se propager.

On distingue deux catégories fondamentales de liaisons en fonction de la présence ou non d'un support physique servant à véhiculer les informations. Dans un premier temps, nous étudions les caractéristiques des *liaisons physiques*, c'est-à-dire lorsque le signal est guidé par un support matériel (fil électrique ou fibre optique). Nous étudions ensuite les caractéristiques des *liaisons éthériques*, c'est-à-dire lorsque le signal est émis directement dans l'environnement, sous forme d'une onde électromagnétique (onde radio, micro-onde ou infrarouge).

Tous ces types de liaisons sont étudiés sous divers angles : les standards électriques, les types de signaux et la portée des signaux. On voit ensuite les principaux éléments de connexion : connecteurs pour les liaisons physiques et transmetteurs pour les liaisons éthériques. Pour finir, on énumère divers problèmes spécifiques aux communications sur réseaux câblés et non câblés.

4.1 Les liaisons physiques

Il existe de nombreuses technologies pour relier entre eux deux appareils qui doivent s'échanger des informations. Il peut s'agir de deux ordinateurs ou bien d'un ordinateur et d'un appareil servant de relais (modem, répéteur, aiguilleur, etc.). Dans la présente section, on étudie

les liaisons physiques, c'est-à-dire celles qui utilisent un support matériel pour transporter les signaux échangés entre les appareils.

On retrouve sur le marché trois grandes familles de supports physiques : les paires de fils, les câbles coaxiaux et les fibres optiques. Chaque famille comporte des variantes ayant chacune leurs caractéristiques propres. On choisit l'une ou l'autre en fonction du budget et des besoins à satisfaire. Les paires de fils sont les moins chères (pour de courtes distances) tandis que les fibres optiques donnent les meilleurs débits. Ces deux familles profitent depuis quelques années de poussées technologiques phénoménales qui ont centuplé leur capacité. Les câbles coaxiaux sont de moins en moins utilisés dans les nouvelles installations.

Un guide d'ondes c'est un peu comme un câble coaxial vide, c'est-à-dire sans le conducteur à l'intérieur.

En plus de ces trois familles, on retrouve aussi les guides d'ondes (*waveguides*). Ce sont des tuyaux creux, de formes diverses, servant à acheminer des ondes radio. Pour les hautes fréquences, le guide d'onde est beaucoup plus efficace qu'un fil de cuivre ou qu'un câble coaxial.

Une utilisation intéressante des guides d'ondes est l'acheminement d'un signal de haute énergie de l'amplificateur jusqu'au foyer d'une antenne parabolique.

Dans ce cours nous ne couvrons pas les guides d'ondes.

Lecture suggérée :

Pour une étude sur les guides d'ondes, voir le chapitre 14 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice- Hall, 1993.

4.1.1 Câbles, fils et brins

On appelle *fil électrique* un conducteur métallique (de préférence en cuivre) pouvant transporter un courant électrique entre une source et un consommateur. Les fils électriques sont recouverts d'une *gaine isolante* afin de confiner le courant à l'intérieur du conducteur. Le plus souvent on regroupe deux ou plusieurs fils dans un assemblage appelé *câble*. Voir la Figure 4-1. Un bon exemple est le câble de téléphone qui relie l'appareil à la prise murale.

Le conducteur est soit une mince tige flexible, soit une multitude de *brins* très fins. On préfère le premier cas pour les installations fixes et le second pour relier l'appareil à sa prise murale, les câbles à brins multiples étant plus résistants aux flexions.

Il existe aussi des rubans plats. Ceux-ci servent surtout à échanger des informations à l'intérieur d'un ordinateur. Ils ne sont pas utilisés en télécommunications.

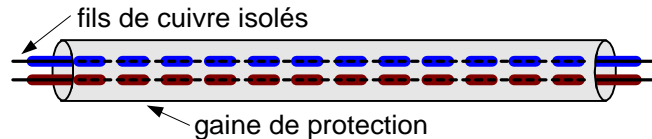


Figure 4-1 : Câble électrique

4.1.2 Câble électrique ordinaire

Le câble électrique ordinaire, tel que décrit ci-dessus, est parfait pour transporter des signaux à basse fréquence (ou comme câble d'alimentation électrique). Par contre, il n'est pas très bon pour transmettre des informations. Il a en effet tendance à capter les champs électromagnétiques environnants (alimentation de l'édifice, appareils divers, ondes radio, etc.), ce qui perturbe les signaux transmis. Voir la Figure 4-2. Le problème inverse existe aussi. Si on se servait d'un tel câble pour transmettre des signaux à haut débit, on risquerait de perturber les postes de radio et les téléviseurs du quartier! Enfin, plus le câble est long, plus l'influence s'accroît.

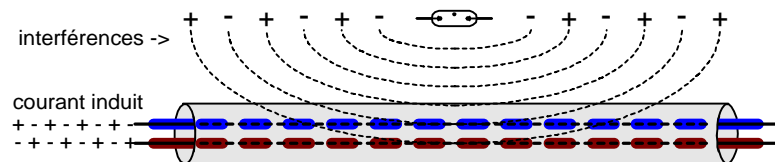


Figure 4-2 : Interférences dans un câble électrique ordinaire

Il y a un cas particulier qui mérite notre attention : la transmission sur « courant porteur ». Cette technologie consiste à utiliser les lignes d'alimentation électriques de la maison (ou de l'édifice) comme infrastructure de réseau local.

Cette solution offre un avantage important : étant donné qu'il y a déjà des prises de courant dans toutes les pièces, le réseau local est présent partout, instantanément et gratuitement. En plus de la communication entre les ordinateurs, ce type de réseau permet également de contrôler à distance des appareils divers, de l'ampoule électrique au système de chauffage.

Malheureusement, les lignes d'alimentation électriques forment un milieu particulièrement hostile à la transmission de données :

- ✧ Le bruit environnant est très élevé et instable (fort bruit impulsionnel : démarrage et arrêt d'appareils électriques).
- ✧ La réglementation impose des limites strictes quant aux fréquences utilisées et l'amplitude maximale de l'émetteur. On ne peut pas émettre plus fort pour compenser le bruit.

- ✧ La bande passante est partagée avec des appareils qui « polluent » l'espace fréquentiel (moniteur de bébé).
- ✧ L'impédance de la ligne passe d'un extrême à l'autre et souvent de façon cyclique (*switching transformer*).
- ✧ Deux prises qui semblent voisines sont souvent très « loin » l'une de l'autre (sur une phase différente).
- ✧ Connectivité asymétrique (si A entend B cela n'implique pas que B entend A).
- ✧ Le réseau local d'une maison est généralement couplé avec celui de tous ses voisins (jusqu'au prochain transformateur).

Malgré toutes ces difficultés, cette voie de communication a beaucoup d'avenir pour les communications à faible débit. Selon la méthode de transmission utilisée, le débit varie de 60 à 10 000 bauds.

4.1.3 Paire torsadée

Pour les spécifications détaillées des 5 catégories de câbles UTP, consulter la norme EIA/TIA-586.

La *paire torsadée* (*twisted pair*) est le support le plus répandu en télécommunications. Il s'agit de deux fils de cuivre isolés qui « s'enroulent » l'un autour de l'autre à la manière d'une molécule d'ADN (voir la Figure 4-3a).

Le fait de torsader ainsi les deux fils l'un autour de l'autre a pour effet de présenter alternativement l'un et l'autre conducteur aux interférences électromagnétiques. Ceci fait en sorte que le courant induit à un endroit annule presque parfaitement le courant induit un peu plus loin. Plus la torsade est serrée, meilleure est la protection.

On regroupe fréquemment plusieurs paires torsadées dans un câble multiconducteur tel qu'illustré à la Figure 4-3b.

Il y a deux sortes de câbles à paires torsadées : les câbles ordinaires et les câbles blindés. Les câbles blindés sont dotés d'une gaine métallisée située entre les paires torsadées et la gaine de protection (Figure 4-3c). Cette enveloppe supplémentaire isole les signaux transmis contre les interférences électromagnétiques. On nomme les premiers **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*) et les seconds **STP** (*Shielded Twisted Pair*).

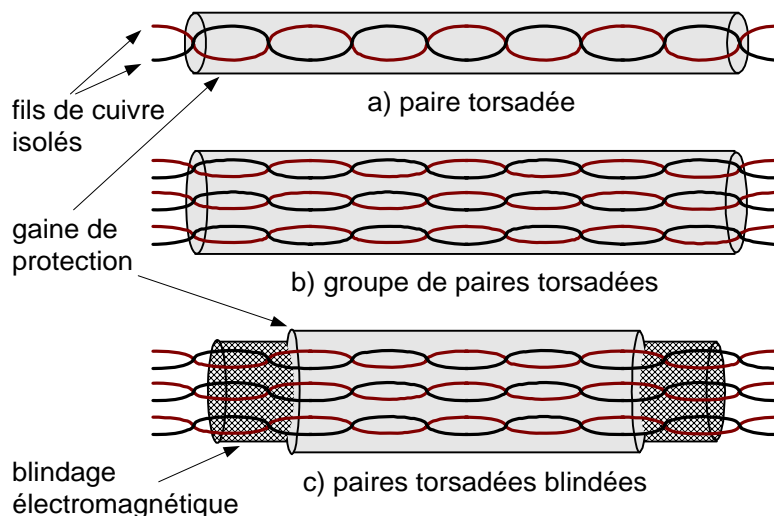


Figure 4-3 : Câbles à paires torsadées

Les câbles à paires torsadées sont classés en 7 catégories de 1 à 7. La qualité augmente avec le numéro de catégorie. On peut donc transmettre plus vite et plus loin avec un câble de catégorie 7 (voir le Tableau 4-1). La catégorie 1 est normalisée pour les connexions téléphoniques (fréquences vocales) mais elle peut aussi servir pour transmettre des données jusqu'à 1 Mbps. Pour un réseau Ethernet classique (10 Base T), on doit utiliser des câbles au moins de catégorie 3 tandis qu'on a besoin de la catégorie 5 pour un réseau Ethernet rapide (100 Base T). Toutefois, pour toute nouvelle installation, ça vaut la peine d'installer dès le départ des câbles de catégorie 5 ou plus. Les catégories 6 et 7 ont été mises au point à la fin des années 90 pour les applications à très haut débit. Pour obtenir plus de détails sur celles-ci, il faut consulter les fabricants de câbles.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des câbles UTP et STP

Nom	Type	Débit (Mbps)	Distance (mètres)	Utilisé par
Catégorie 1	UTP	1	90	Modem
Catégorie 2	UTP	4	90	Token-Ring-4
Catégorie 3	UTP et STP	10	100	10 Base T Ethernet
Catégorie 4	UTP	16	100	Token-Ring-16
Catégorie 5	UTP et STP	100	200	100 Base T Ethernet
Catégorie 5e	UTP et FTP	1000	variable	Gigabit Ethernet
Catégorie 6	STP	250	variable	Gigabit Ethernet
Catégorie 7	FTP et SFTP	600	variable	Gigabit Ethernet

Les câbles à paires torsadées sont largement utilisés dans les réseaux locaux. Ils sont peu dispendieux et faciles à installer. Ils comportent généralement de deux à quatre paires de fils. Les signaux en sortie

empruntent une paire tandis que les signaux en entrée utilisent une seconde paire.

On peut relier deux ordinateurs directement entre eux si on utilise un câble *croisé* (*crossed cable*), c'est-à-dire qui inverse les paires au connecteur de l'une des extrémités. Pour relier plusieurs ordinateurs en un réseau, on utilise un *hub* pour rediriger les signaux reçus de la paire « sortie » d'un ordinateur sur la paire « entrée » des autres ordinateurs.

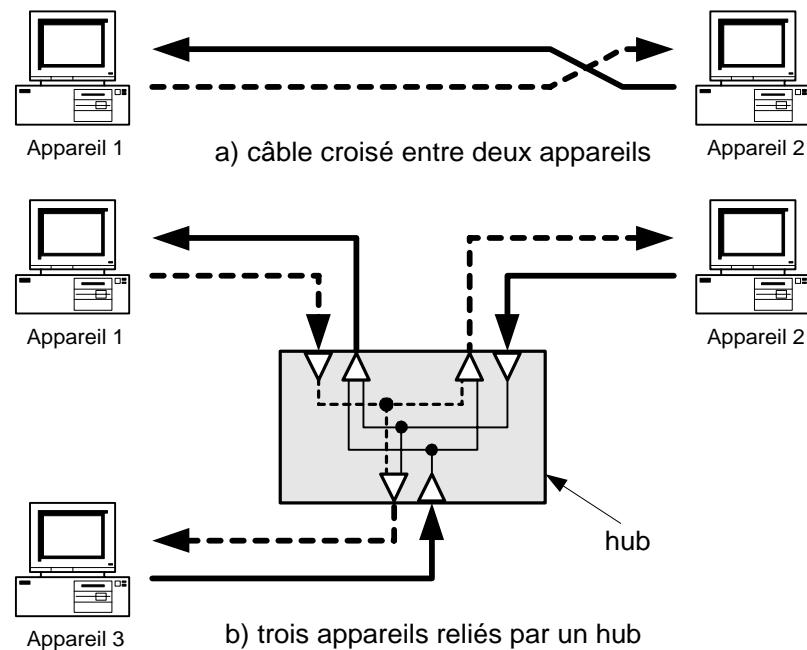


Figure 4-4 : Connexion entre deux ou N appareils.

Pour tester un câble à paires torsadées, cela prend un appareil spécialisé qui transmet des signaux et vérifie tous les aspects du câble. Les testeurs bas de gamme ne font que vérifier la continuité des fils.

Les câbles torsadés blindés (STP) ont été introduits par IBM au début des années 1980. Ils sont peu utilisés dans les réseaux locaux modernes lorsqu'ils sont dédiés à la bureautique.

Il faut tester les câbles à paires torsadées avec soin à l'aide d'appareils spécialisés, surtout pour les réseaux à haut débit. La moindre défaillance (ou une installation déficiente) peut provoquer des erreurs de transmission et paralyser le réseau. Les tests sont particulièrement importants lorsque les câbles sont fabriqués sur mesure. Il est en effet très facile d'intervertir des fils lorsqu'on fixe les connecteurs. De plus, la robustesse à haut débit dépend de la qualité de la torsade. Si la technique d'installation perturbe la torsade, par exemple si on détourne trop long de fil aux extrémités, on crée un problème de diaphonie (*crosstalk*).

Pour certains types de réseaux, on utilise de préférence un câble torsadé blindé (STP). Ces câbles sont plus dispendieux, mais ils offrent une meilleure isolation contre les interférences et offrent une plus grande portée. On choisit donc ce type de câble dans les environnements qui comportent beaucoup d'interférences, par exemple dans les milieux industriels. Dans ces cas-là, on peut aussi préférer l'installation de câbles coaxiaux ou de fibres optiques qui sont moins sensibles aux interférences.

Finalement, pour obtenir des débits dépassant les 100 Mbps, un troisième type de câble torsadé est apparu le FTP. Chaque paire est isolée des autres par une fine gaine métallique (typiquement un alliage à base d'aluminium).

En milieu « hostile », on déploiera (moyennant finances !), un quatrième type le SFTP alliant les caractéristiques du FTP et du STP. Dans ce cas, il faut aussi considérer la possibilité de déployer de la fibre optique.

Le Tableau 4-2 présente les avantages et les inconvénients des paires torsadées.

Tableau 4-2 : Avantages et inconvénients de la paire torsadée

(Adapté de Armand ST-PIERRE et William STÉPHANOS,
Réseaux Locaux, p.121)

Avantages	Inconvénients
Technologie bien développée. Grande polyvalence.	Sensible aux interférences électromagnétiques externes. Taux d'erreur très élevé.
Support le moins coûteux pour installer un réseau local.	Les paires torsadées sont plus sensibles aux intempéries. Si le câble doit passer à l'extérieur, il doit être protégé contre la foudre et la corrosion.
Technique de connexion des appareils bien maîtrisée.	Génère des ondes magnétiques et électriques qui peuvent être interceptées.
Installation rapide et facile.	Diaphonie entre deux fils, surtout à leurs extrémités, qui peuvent causer des erreurs.
Principal type de câble utilisé pour les téléphones dans un bureau.	La catégorie utilisée pour les téléphones n'est pas robuste. Elle est très sensible aux interférences.

Lectures suggérées :

Pour des études théoriques sur les caractéristiques des paires torsadées, voir :

Le chapitre 11 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.

Le chapitre 3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

4.1.4 Câble coaxial

Le câble coaxial offre une meilleure isolation et un meilleur débit que la paire torsadée. Il permet en effet de transmettre, dans certaines

conditions, entre 1 et 2 Gbps sur une distance de 1 km. Si on augmente le débit, il faut réduire la distance. Les technologies utilisées dans les réseaux locaux utilisent un débit de 10 Mbps sur une distance allant jusqu'à 10 km.

Le *câble coaxial* est constitué de deux conducteurs concentriques séparés d'une gaine isolante. Le premier conducteur est une mince tige de cuivre tandis que le second est une gaine métallique en forme de tube entourant la tige de cuivre. Le tout est protégé par une gaine de protection. La Figure 4-5 illustre un câble coaxial conventionnel.

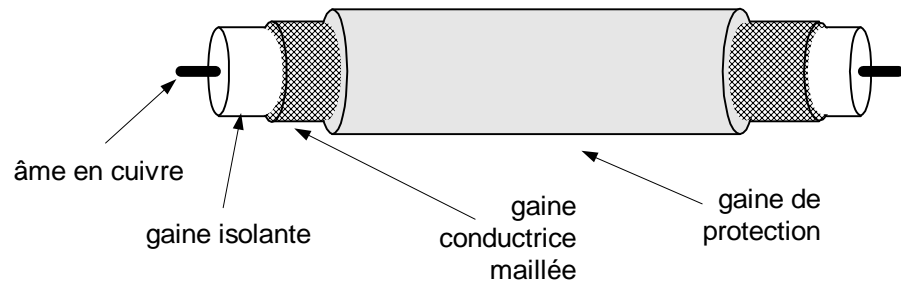


Figure 4-5 : Câble coaxial

Le signal est protégé par la gaine conductrice qui l'isole des interférences extérieures. Cette gaine a aussi un autre rôle tout aussi important : elle confine le signal électromagnétique, l'empêche de se disperser et le guide d'une extrémité à l'autre du câble (comme de l'eau dans un boyau d'arrosage). Ceci a pour effet de limiter la perte d'énergie du signal transmis.

Il existe divers types de câbles coaxiaux, chacun ayant ses caractéristiques propres (impédance, diamètre de l'âme et de la gaine conductrice, atténuation, bande passante, rigidité, etc.). Les principaux facteurs sont le diamètre du câble (câble mince ou épais) et le rapport entre le diamètre de la tige centrale et celui de la gaine conductrice (impédance de 50Ω ou de 75Ω).

Le câble coaxial de 50Ω est dit à « bande de base » (*baseband coaxial cable*). Il transporte un signal numérique à haut débit sur une distance plus ou moins longue selon le diamètre du câble. Un câble épais (*thick cable*) atténue moins le signal qu'un câble mince (*thin cable*) et permet de propager le signal sur une plus grande distance. On utilise l'un ou l'autre selon la topologie du réseau. En bout de course le réseau doit être « terminé » par une résistance de 50Ω afin d'éviter l'apparition d'écho dans le câble.

Le câble coaxial de 75Ω est dit à « large bande » (*broadband coaxial cable*). On l'utilise principalement dans les réseaux de *câblodistribution* (distribution de signaux de télévision par câble coaxial). Ce câble doit être terminé par une résistance de 75Ω .

Il est important de choisir des éléments du réseau qui aient tous la même impédance afin d'éviter l'apparition de signaux fantômes causés par l'écho. S'il faut passer de 50Ω à 75Ω ou vice versa, on doit insérer des adaptateurs adéquats et tenir compte de la perte qui s'en suit sur le niveau des signaux.

Les avantages et inconvénients du câble coaxial sont présentés au Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Avantages et inconvénients du câble coaxial

(tiré de Armand ST-PIERRE et William STÉPHANOS, *Réseaux Locaux*, p.122.)

Avantages	Inconvénients
Technologie bien développée. Installation rapide et facile sauf pour les câbles de câblodistribution (à large bande). N'émet presque pas de signaux. À l'abri des interférences.	Le câble de câblodistribution à large bande est gros et rigide. Il faut utiliser des outils et des connecteurs spéciaux pour les raccordements.
Technologie de connexion des appareils bien maîtrisée.	Les câbles coaxiaux et de câblodistribution de haute qualité sont assez chers contrairement à la paire torsadée.
Coût abordable pour de courtes distances.	Pour câbler un réseau sur de grandes distances, un répéteur doit être utilisé en raison de problèmes d'atténuation.

Lectures suggérées :

Pour des études théoriques sur la transmission des signaux dans un câble coaxial, voir :

Modem Electronic Communication, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993. p.415

Télécommunications et transmission de données, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992, page189.

Telecommunications System Engineering, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989, page 264.

4.1.5 Fibre optique

La fibre optique est le plus rapide des supports de communication. Elle offre de nombreux avantages par rapport aux autres supports : débit phénoménal, taux d'erreur très faible, transmission sur de longues distances, beaucoup plus légère, résistance à la corrosion, etc. Par contre elle est difficile à installer car l'alignement des composantes est critique.

Une fibre optique est composée d'un mince fil de verre appelé âme, cœur ou noyau, enrobé d'une gaine optique en verre et d'une enveloppe

de protection (voir la Figure 4-6). Le verre utilisé pour l'âme possède un indice de réfraction plus élevé que celui de la gaine optique. Le tout est environ de la grosseur d'un cheveu.

La fibre fonctionne selon le principe du guidage de la lumière. On place une source de lumière à une extrémité de la fibre et un détecteur à l'autre bout. Le message est transmis sous la forme d'impulsions de lumière. À l'autre extrémité le détecteur restitue les impulsions le plus fidèlement possible.

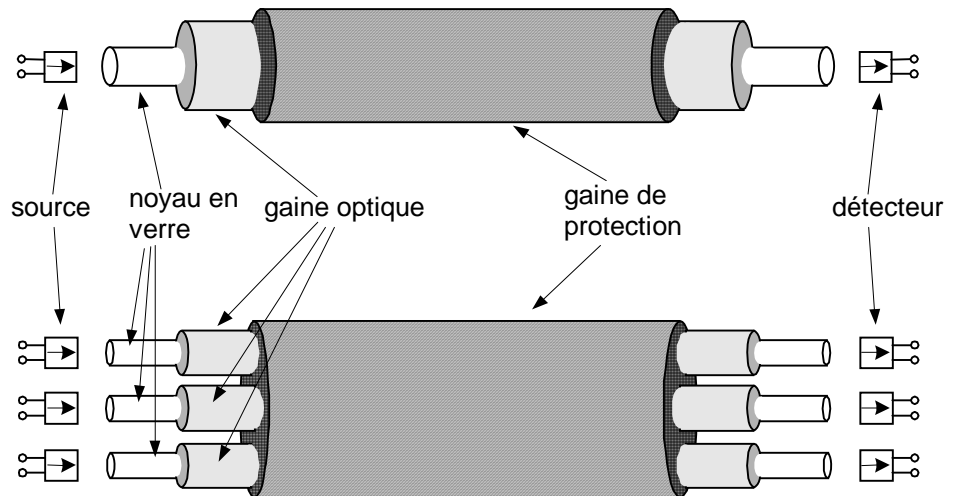


Figure 4-6 : Câble contenant une ou plusieurs fibres optiques

Une bonne quantité de lumière doit atteindre le détecteur pour que le signal reçu soit clair. Il faut donc minimiser les pertes dans la fibre. Pour cela on a besoin de deux choses. D'une part, il faut limiter l'absorption de la lumière par le verre de la fibre. On utilise donc de la silice de première qualité.

L'atténuation a beaucoup diminué avec l'amélioration de la technologie. En 1966 la fibre absorbait 90 % du signal après 10 mètres et 99 % après 20 mètres. En 1973 on avait réduit à 60 % d'absorption après 1 km.

Pour observer le phénomène de réfraction, plonger un bâton dans l'eau : il a l'air brisé à la surface de l'eau.

Remarque :

La transparence dans l'infrarouge est telle qu'après avoir traversé un kilomètre de verre, un rayon lumineux n'a perdu que 5 % à 20 % de sa puissance. L'atténuation de 5 % est pour une longueur d'onde de 1,5 micron tandis que 20 % est pour une longueur d'onde de 0,8 micron.

D'autre part, il faut éviter que l'énergie se disperse dans toutes les directions. Pour cela on met à profit la propriété de réfraction de la lumière quand elle passe entre deux éléments dont l'indice de réfraction est différent. La *réfraction* est la déviation d'un rayon lumineux ou d'une onde électromagnétique, qui franchit la surface de séparation de deux milieux, dans lesquels les vitesses de propagation sont différentes. Le rayon réfracté reste dans le plan formé par le rayon incident et la normale à la surface de séparation.

Pour profiter de ce phénomène, on fabrique des fibres dont l'âme est composée d'un verre ayant un indice de réfraction supérieur à celui de la gaine de verre (voir la Figure 4-7a). Si la lumière arrive avec un angle égal ou plus grand que l'angle limite de réfraction, elle passe dans la gaine ou elle se dissipe. Si elle arrive avec un angle plus petit, elle rebondit sur la surface de la gaine et continue son trajet dans l'âme. Ainsi, au-delà de l'angle limite, les rayons sont réfléchis par la surface âme/gaine et ne peuvent pas s'échapper. Tous les rayons qui entrent donc dans la fibre avec un angle assez étroit sont réfléchis par la paroi âme/gaine, des milliers de fois s'il le faut, et cela, sans perte d'énergie.

Lecture suggérée :

Pour une étude du phénomène de réfraction, voir le chapitre 2 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

*Le terme **multimode** provient d'une particularité des fibres optiques : seuls les rayons qui arrivent dans certains angles bien spécifiques arrivent à la sortie de la fibre. Les autres subissent des interférences et s'annulent en cours de route.*

Ce type de fibre optique est appelé *multimode à double indice de réfraction*. Il est facile à fabriquer et peu dispendieux. Il souffre toutefois d'un léger problème : les rayons lumineux qui entrent dans la fibre avec un angle suivent une trajectoire en zigzag dans la fibre (voir la Figure 4-7a). Ils doivent donc parcourir une plus grande distance que ceux qui entrent dans l'axe de la fibre. La conséquence de tout cela est que certains rayons arrivent au bout de la fibre avant les autres. Plus la fibre est longue, plus la dispersion se fait sentir.

Pour pouvoir distinguer les impulsions à la sortie, il faut donc qu'elles soient assez longues et qu'elles soient espacées par un délai minimum. Autrement dit, cela signifie qu'il existe une limite maximale du taux de transmission sur ce type de fibre optique. Pour conserver la lisibilité du message transmis, on peut soit réduire le débit, soit insérer le long du trajet des répéteurs qui redonnent au signal sa forme originale. Dans un cas comme dans l'autre, on augmente les coûts.

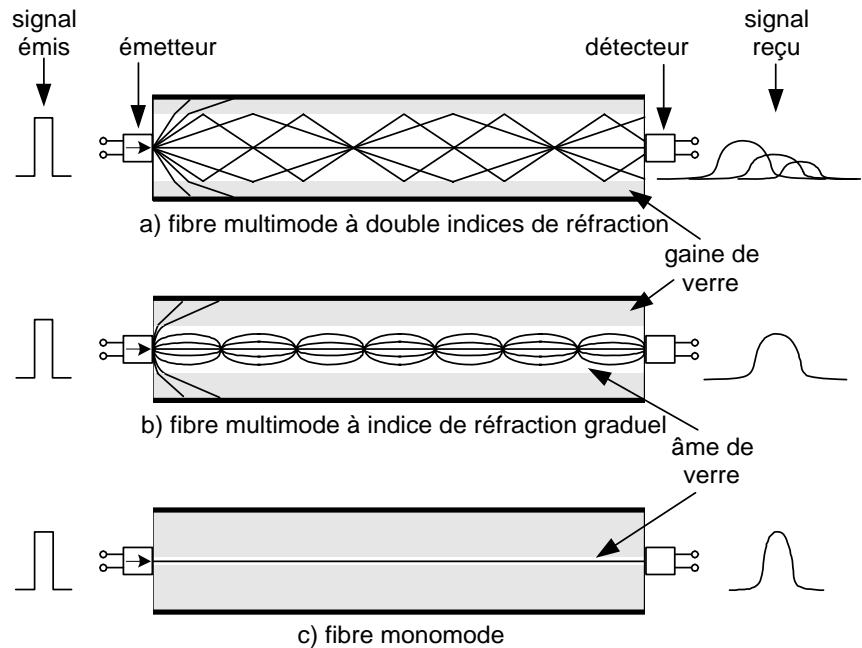


Figure 4-7 : Divers type de fibres optiques

Les Figures 2-7b et c proposent deux solutions au problème de dispersion des signaux dans les fibres optiques. La première consiste à fabriquer une fibre dotée d'une âme particulière : son indice de réfraction **diminue progressivement** au fur et à mesure qu'on se rapproche de la gaine. Avec une telle fibre, les rayons qui entrent au départ avec un angle sont déviés progressivement jusqu'à ce qu'ils suivent une trajectoire parallèle à l'âme. À partir de ce point, les rayons sont progressivement ramenés vers le centre, puis progressivement déviés de l'autre côté jusqu'à ce qu'ils suivent une trajectoire parallèle à l'âme, puis graduellement ramenés vers le centre, et le tout recommence. On parle alors de fibre multimode à indice graduel (voir la Figure 4-7b). Ce type de fibre réduit l'étalement des signaux et permet de meilleurs débits et de plus grandes distances.

Remarque :

Avec ce type de fibre, les rayons qui empruntent un trajet oscillant effectuent une bonne partie du trajet dans la portion extérieure de la fibre, là où l'indice de réfraction est plus faible. Et c'est là que réside le génie de cette solution : même si les rayons oscillants suivent un trajet plus long, ils arrivent au bout presque en même temps, car la vitesse de la lumière augmente quand l'indice de réfraction diminue.

Les longueurs d'onde utilisées sont autour de 0,8, 1,3 et 1,5 micron.

La seconde solution consiste à réduire le diamètre de l'âme de la fibre à quelques microns (entre 2 et 8 microns), c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on atteigne une dimension proche de la longueur d'onde de la lumière infrarouge. Avec un diamètre aussi petit, le rayon lumineux est « guidé » dans la fibre et le signal n'est plus dispersé (voir la Figure 4-7c). On dit alors de la fibre qu'elle est monomode. Ce type de fibre permet les meilleurs débits sur les plus grandes distances. Par contre, elles sont dispendieuses et on doit utiliser des diodes laser comme sources lumineuses.

Selon Guy Pujolle (*Les Réseaux*, 2^e édition, p. 391), la tendance actuelle est d'installer des fibres optiques partout où les paires torsadées ne sont pas suffisantes.

Lecture obligatoire :

Lire la section 2.2.4 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4e édition.

Lectures suggérées :

Pour une étude plus poussée de la théorie des fibres optiques, consulter :

La section 5.4 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

La section 7.6 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

Le chapitre 2 de *Digital Transmission*, Edwin JONES, McGraw-Hill, 1993.

La section 3.7 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

La section 2.1.4 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

4.2 Les liaisons éthériques

La façon la plus simple de relier deux ordinateurs n'est pas toujours d'installer un câble entre les deux. Pour diverses raisons, il est parfois préférable d'installer une liaison éthérique (sans support physique). Le message est émis dans l'atmosphère en utilisant une onde électromagnétique comme support. Ce signal est soit diffusé dans toutes les directions, soit confiné dans une direction spécifique (dirigé vers le destinataire). Dans ce dernier cas, le signal conserve un niveau d'énergie acceptable sur une plus longue distance. Le cas ultime est le faisceau laser qui reste confiné en un étroit rayon sur des kilomètres.

Les liaisons éthériques sont avantageuses lorsque le contexte ne se prête pas à l'installation de câbles. Par exemple :

◇ L'appareil à relier est mobile (ex. un ordinateur portable).

- ✧ On doit « diffuser » la même information à de multiples destinations (*broadcast*).
- ✧ Il existe un besoin de redondance (panne éventuelle d'un lien physique).
- ✧ Le réseau est temporaire (couvrir un événement politique, sportif ou culturel).
- ✧ L'édifice à câbler est vieux (un vieil édifice est difficile à câbler).
- ✧ La distance à couvrir est « plus grande » que le budget (coût d'enfouissement de câbles dans une ville).
- ✧ On se bute à un obstacle difficile à franchir (marécage, montagne, océan).

La technologie moderne offre une grande variété de solutions dans ce domaine : La transmission peut être effectuée par

- ✧ ondes radio ou ondes courtes,
- ✧ faisceaux hertziens (micro-ondes),
- ✧ satellites géostationnaires,
- ✧ satellites à basse ou moyenne altitude,
- ✧ ondes lumineuses (infrarouge et lumière visible).

L'influence de l'atmosphère terrestre

« L'atmosphère terrestre constitue un milieu complexe pour la propagation des ondes électromagnétiques. Contrairement aux lignes de transmission, il n'est pas optimisable, mais doit être accepté tel qu'il est. Grossièrement, l'atmosphère est constituée de trois régions superposées principales :

- ✧ la **troposphère** (altitude inférieure à 15 km) caractérisée par sa turbulence (vents), la présence de vapeur d'eau (nuages) et d'une diminution de température avec l'altitude. On y constate un gradient de l'indice de réfraction qui a pour effet de courber la trajectoire des ondes électromagnétiques en direction du sol;
- ✧ la **stratosphère** (15 à 40 km) pratiquement dépourvue de vapeur d'eau et dont la température croît avec l'altitude avant de se stabiliser;
- ✧ l'**ionosphère** (40 à 500 km) qui présente des couches ionisées dont la densité d'ionisation dépend fortement de l'heure, de la saison et de l'activité des taches solaires (cycle d'environ 11 ans). Cette région joue un rôle important dans la propagation des ondes radioélectriques. Elle est le siège de phénomènes de réfraction, de réflexion et d'absorption. »¹

¹ P.G. FONTOLLIET, *Systèmes de télécommunications*, page 108).

La propagation des ondes

Toute onde électromagnétique est constituée d'une combinaison de deux champs complémentaires : électrique et magnétique. Ils se propagent ensemble, dans la même direction, avec un angle de 90 degrés entre les deux.

Lorsqu'une onde est diffusée dans toutes les directions, elle forme des sphères concentriques autour de l'antenne émettrice. L'énergie se disperse progressivement et le niveau disponible pour l'antenne réceptrice diminue rapidement avec la distance (entre le carré et le cube de la distance). On peut placer des stations réceptrices partout dans le « rayon d'action ». Si on dépasse cette distance, le rapport signal à bruit devient trop faible et la réception n'est plus fiable.

Lorsqu'une onde est émise par une antenne parabolique, l'énergie reste concentrée dans un mince faisceau. Il est alors possible de conserver le niveau d'énergie acceptable sur une bien plus longue distance.

Les autres fréquences sont réservées pour les divers types de communication radio et pour la diffusion des émissions de radio et de télévision.

La plage des fréquences utilisées couvre diverses portions du spectre électromagnétique. Chaque plage a ses particularités très spécifiques : la portée du signal, sa sensibilité à la pluie et d'autres phénomènes météorologiques, sa sensibilité aux échos, la réfraction et réflexion sur les couches de la haute atmosphère, etc.

Lecture obligatoire :

Lire la section 2.3.1 sur le spectre électromagnétique de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4e édition.

Lecture suggérée :

Pour une étude plus approfondie de la propagation des ondes électromagnétiques, voir le chapitre 12 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.

4.2.1 Transmission par ondes radio

Les équipements qui utilisent les « ondes radio » pour communiquer constituent des « réseaux sans fil ». Dans la configuration de base, on a un émetteur principal pouvant communiquer avec tous les terminaux. Si la zone à couvrir est trop grande, on installe plusieurs antennes couvrant chacune une portion du territoire. On obtient alors un réseau multi-cellules. Lorsque les terminaux se déplacent, on parle d'un réseau mobile (mono- ou multi-cellules).

Les ondes radio forment la portion inférieure du spectre électromagnétique. Elles sont faciles à produire et se propagent dans toutes les directions. Elles pénètrent facilement les immeubles, ce qui les rend pratiques pour établir un réseau corporatif à faible coût lorsque le débit des informations à transmettre est relativement bas.

Le débit possible augmente avec la fréquence. Cependant, il reste très limité, car le rapport signal à bruit reste pauvre pour ces systèmes.

La portée du signal dépend énormément de la plage de fréquence. L'indice de l'air étant plus faible en altitude, cela provoque un effet de réfraction qui recourbe les ondes vers la surface de la terre. Les fréquences les plus basses (autour de 3 kHz) suivent la courbure de la terre et peuvent être captées jusqu'à 1 000 km.

Plus on augmente la fréquence, moins l'effet de réfraction se fait sentir. Les fréquences intermédiaires voyagent presque en ligne droite et le destinataire doit être en « ligne de vue » pour capter le signal, soit environ 50 Km (compte tenu de la hauteur des antennes et de la courbure terrestre).

Lorsqu'on monte encore plus en fréquence, on observe un autre phénomène : une partie des ondes est réfléchiée par la haute atmosphère puis rebondit sur l'écorce terrestre (*sky waves*). Ainsi, les ondes entre 3 à 300 MHz, peuvent se propager sur des milliers de kilomètres (de 5 000 à 15 000 km selon le nombre de rebonds).

Lecture obligatoire :

Lire la section 2.3.2, Andrew TANENBAUM, Réseaux, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

Lectures suggérées :

Pour approfondir les réseaux sans fil, lire :

la section 2.1.7 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Pour approfondir les radiocommunications cellulaires, lire :

la section 2.6 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4e édition, Pearson Education, 2003 ;

le chapitre 28 de *Les Réseaux*, Guy PUJOLLE, Eyrolles, 1998.

4.2.2 Transmission par faisceaux hertziens (micro-ondes)

Au-delà de 100 MHz, les ondes électromagnétiques peuvent être étroitement concentrées en « faisceau hertzien » par une antenne parabolique. On obtient ainsi un bien meilleur ratio signal à bruit et les débits deviennent excellents (jusqu'à 200 Mbps). Cependant, cela implique que l'antenne ne peut pas servir d'émetteur central d'un réseau sans fil. Il n'y a qu'un seul récepteur et il doit être situé exactement dans l'axe du faisceau hertzien.

Du point de vue de la portée, on est plutôt limité. Avec des tours de 100 mètres de haut, on obtient une portée d'environ 80 km (limité par la courbure de la terre).

Ce type de liaison doit contourner plusieurs difficultés et exige une technologie de pointe.

Lecture obligatoire :

Lire la section 5.3 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

Lecture suggérée :

Pour approfondir le sujet, lire les sections 3 et 4 du chapitre 7 de *Telecommunication System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc., 1989.

4.2.3 Transmission par satellites

Pour transmettre à haut débit, sur de longues distances, on peut utiliser des « liaisons satellites ». On utilise pour cela une antenne parabolique, comme pour les faisceaux hertziens, mais on dirige le faisceau vers le ciel, dans la direction d'un satellite de communication. Ce dernier capte le message et le retransmet vers la terre avec un faisceau qui peut être soit large, soit étroit. Plus le faisceau est large, plus la région couverte par le réseau est vaste, mais plus le signal est faible.

En fait, pour être précis, le satellite fait le tour de la terre en 23 heures et 56 minutes. Les quatre minutes de moins correspondent à $1/365^e$ de journée, car la terre tourne autour du soleil en un an.

En général, pour les réseaux de communication numérique on utilise des satellites géostationnaires, c'est-à-dire des satellites dont l'orbite est juste à la bonne distance pour qu'il fasse le tour de la terre en exactement une journée. Un tel satellite apparaît alors toujours au même endroit au-dessus de l'horizon ce qui facilite l'alignement de l'antenne parabolique.

La capacité d'un satellite moderne est énorme, jusqu'à plusieurs gigahertz. Cependant, cette technologie présente une difficulté de délai dans les communications. Lorsqu'un ordinateur veut en interroger un autre, le signal doit monter jusqu'au satellite et redescendre vers le destinataire, puis la réponse doit faire le chemin inverse. Puisqu'un satellite géostationnaire orbite à une distance de 36 000 km de la terre, les signaux doivent parcourir près de 150 000 km. Cela requiert 0,5 seconde à la vitesse de la lumière. Les protocoles de communication doivent tenir compte de ces délais.

Lecture obligatoire :

Lire la section 2.4 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4e édition.

Lecture suggérée :

Pour approfondir le sujet, lire la section 5.5 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

4.2.4 Transmission par infrarouge et lumière visible

On peut se servir d'émetteurs/récepteurs infrarouges pour établir une communication entre divers appareils. La portée de cette liaison est cependant plutôt courte (quelques dizaines de mètres). L'exemple le plus courant est la télécommande de nos appareils audiovisuels (télévision, magnétoscope, etc.).

On peut également utiliser cette technologie pour mettre en place un réseau local. Un avantage d'un tel réseau est qu'il ne nécessite aucun raccordement physique des appareils. On peut aller en réunion avec son portable et on est branché sur le réseau de l'entreprise sans avoir à courir les fils et les prises. Il faut cependant prévoir des répéteurs dans toutes les pièces, car les ondes infrarouges ne traversent pas les murs.

Un autre usage des ondes lumineuses est l'établissement de liens haut débit en utilisant un rayon laser comme émetteur. Dans ce cas l'usage de la lumière visible est recommandé afin de faciliter l'alignement du rayon laser sur le récepteur. De plus, il faut se méfier de divers phénomènes naturels qui peuvent altérer la communication : obstruction par la pluie, la neige ou le passage d'un oiseau ou autre objet dans le trajet du laser. Le rayon peut également être dévié par l'effet de loupe créé par des courants d'air chaud (par exemple les courants de convection causés par le réchauffement des murs de l'édifice dû au soleil, à l'extérieur ou au système de chauffage à l'intérieur). Pour aider à réduire ce problème, on peut installer à la sortie du laser une lentille optique qui déconcentre quelque peu le faisceau lumineux.

Lecture suggérée :

Pour approfondir les réseaux sans fil en général et les réseaux infrarouges en particulier, lire la section 6.4 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les divers supports utilisés pour transmettre des données : les supports physiques : les paires de fils, les fils coaxiaux et les fibres optiques ; les supports éthériques : les ondes radio, les faisceaux hertziens, les satellites et les rayons infrarouges. Il nous reste à couvrir ce qui relie les ordinateurs aux liaisons physiques et éthériques, soit les connecteurs et les antennes.

4.3 Les connecteurs

Pour brancher l'ordinateur sur une liaison physique, cela prend deux connecteurs complémentaires : un sur l'ordinateur et un à l'extrémité de la liaison qui se branche sur celui-ci. En général on a un des connecteurs qui présente un creux et l'autre qui a la forme appropriée pour pénétrer dans le premier. On désigne le premier par le terme « connecteur femelle » et le second par « connecteur mâle ».

Les connecteurs appartiennent à plusieurs familles. Pour les connexions servant pour les paires de fils, une des plus répandues est la famille de connecteurs DBxx, où xx désigne le nombre de points de contacts établis par le connecteur. On rencontre souvent le DB25, le DB15 et le DB9. Il s'agit d'un connecteur de forme trapézoïdale composé de deux rangées d'aiguilles (connecteur mâle) et de trous correspondants (femelle).

Une autre famille bien connue est le connecteur RJ-xx. Par exemple le RJ-45 pour les réseaux Ethernet. Ce connecteur ressemble à une prise de téléphone qui a pris des hormones de croissance.

Pour le câble coaxial, on a principalement le connecteur BNC.

Lectures suggérées :

Pour des illustrations des connecteurs DBxx, consulter les figures 2.31 et 2.35 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996, pages 83 et 89.

Pour une illustration d'un connecteur Ethernet, voir la figure 2.36 à la page 90 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

4.4 Les antennes

Il existe une grande diversité d'antennes, chacune ayant des caractéristiques bien spécifiques de forme et de taille.

On utilise des antennes de type filiforme pour les réseaux à diffusion (transmission et réception 360 degrés). On utilise des antennes paraboliques pour focaliser le signal dans une direction spécifique, soit pour les réseaux à faisceaux hertziens, soit pour les communications satellites.

Pour les antennes filiformes, la taille est spécifique à la fréquence utilisée : elle doit être en rapport **exact** avec la longueur d'onde afin de provoquer un phénomène de résonance dans l'antenne. On peut ainsi avec une puissance limitée obtenir une onde de bonne amplitude.

Pour les antennes paraboliques, la taille est en rapport avec la puissance du signal. Une antenne plus grande émet avec plus de puissance et, à l'inverse, capte des signaux plus faibles.

Les antennes sont généralement en haut d'une tour qui doit être assez haute pour garantir une bonne diffusion. Pour les réseaux satellites, il faut une élévation suffisante pour « voir » le satellite qui est généralement près de l'horizon. Pour les faisceaux hertziens, l'élévation de l'antenne permet de laisser une plus grande distance entre les tours (à cause de la courbure de la terre).

Pour les liaisons infrarouges, on utilise des diodes luminescentes ou des diodes laser selon la puissance et l'angle d'ouverture désirés. Pour les faisceaux laser visible, on choisit un laser doté d'une lentille qui déconcentre le faisceau.

Pour les récepteurs, on utilise des photodiodes avec le filtre passe-bande correspondant à la fréquence de modulation qui est utilisée.

Lectures suggérées :

Pour en savoir davantage sur les antennes, consulter :

Le livre *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmission* de P.-G. FONTOLLIET. On y voit divers modèles d'antennes filiformes au tableau 3.46 et diverses antennes paraboliques à la figure 12.5. En particulier le diagramme de l'antenne parabolique de type « Cassegrain » est intéressant (figure 13.8).

Le chapitre 7 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989

Le chapitre 13 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.

La section 13.4 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

4.5 Problèmes inhérents aux supports câblés et non câblés

Pour éviter toute détérioration, il faut choisir des composants de bonne qualité. Les câbles doivent comporter une gaine de protection robuste, approuvée pour l'usage qui en est fait (intérieur ou extérieur, sur poteaux, sous terre, immergé, etc.). Les connecteurs doivent être protégés contre l'oxydation. Ils sont soit plaqués avec une couche d'étain ou une couche d'or (de préférence).

Si les câbles sont enfouis, il faut des écriteaux pour avertir ceux qui creusent de se procurer les plans de localisation. Si les câbles sont suspendus, tendus entre des poteaux, il faut s'assurer qu'ils comportent une structure de renforcement qui protège les composants internes contre une élongation qui pourrait s'avérer fatale, surtout pour de la fibre optique.

Les communications non câblées ont un problème généralisé : la diffusion des messages dans les airs facilite grandement le travail des espions et des pirates. Il faut prévoir un chemin alternatif pour les données confidentielles ou utiliser un algorithme fiable de chiffrage.

4.6 Synthèse

Pour mettre en place des réseaux, on a le choix entre un nombre effarant de technologies différentes. Partout où c'est possible, il faut privilégier les technologies normalisées et les systèmes ouverts. Lorsque le débit requis ou la distance à couvrir sont limités, on favorise les paires torsadées (de catégorie 5 ou plus). Dans un environnement industriel, on favorise les câbles blindés. Les débits élevés et les grandes distances sont mieux servis par la fibre optique.

Les livres de référence donnent des nombres très différents concernant le débit des réseaux de fibres optiques.

Les technologies des paires torsadées et des fibres optiques sont en pleine effervescence. Depuis quelques années, le débit pour les paires torsadées est passé de 10 à 100 Mbps (600 Mbps en laboratoire). Les nouvelles technologies Gigabit Ethernet atteignent 1 Gbps en partageant le débit sur 4 paires torsadées. Chaque paire transmet 250 Mbps sur un signal à 125 Mbauds (transmission N-aires).

La limitation actuelle des systèmes de transmission optique est de l'ordre de 10 Gbps (80 Gbps en laboratoire). Dans le cadre des fibres optiques, la principale contrainte est dans les interfaces électroniques/optiques. Une des techniques utilisées pour augmenter la capacité des fibres est d'injecter simultanément plusieurs longueurs d'onde dans les fibres, chacune transportant ses propres messages. La technologie DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) permet d'injecter jusqu'à 160 longueurs d'onde sur une même fibre, pour un total de 1,6 Tbps par fibre (6,4 Tbps en laboratoire).

Lecture suggérée :

Lire « Multiplexage en longueur d'onde ou WDM » à la section 2.5.4, page 152, de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

D'ici quelques années l'on devrait disposer de débits allant jusqu'à un terabit/s. Bref, la réalité dépasse encore la fiction. Pour connaître les limites « du jour » en télécommunications, il faut magasiner. Par exemple, consulter les dernières technologies de transmission offertes par Nortel (**OpTera**) ou Lucent Technologies.

En fait, le verre utilisé pour fabriquer les fibres optiques a une bonne transparence pour une gamme étendue de longueurs d'ondes. Dès lors, du point de vue de la bande passante du canal, une seule fibre peut théoriquement transmettre plus de 50 000 Gbps (50 terabit/s)!

Un tel câble, contenant 50 millions de paires torsadées, aurait une taille gigantesque : environ 250 mètres de diamètre !

Sachant qu'on peut facilement regrouper une centaine de fibres dans un câble, cela signifie qu'on pourrait à la limite remplacer 50 millions de paires torsadées par un seul câble de la grosseur d'un crayon! Mais la technologie n'est pas encore arrivée là.

Le dossier des fibres optiques est plein de promesses pour l'évolution des télécommunications. Le développement des processeurs optiques

pourrait repousser encore les limites dues aux conversions électriques-optiques, permettant ainsi d'augmenter considérablement les débits.

4.7 Programme de lecture

Lectures obligatoires

- Lire la section 2.2.4 sur la fibre optique de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
- Lire la section 2.3.1 sur le spectre électromagnétique de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
- Lire la section 2.3.2 sur les ondes radio de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
- Lire la section 5.3 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Lire la section 5.3 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Lire la section 2.4 sur les satellites de communication de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

Lectures suggérées

- Pour une étude sur les guides d'ondes, voir le chapitre 14 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.
- Pour des études théoriques sur les caractéristiques des paires torsadées, voir :
 - Le chapitre 11 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.
 - Le chapitre 3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- Pour des études théoriques sur la transmission des signaux dans un câble coaxial, voir :
 - Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993. p.415.
 - Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992, page 189.
 - Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989, page 264.
- Pour une étude du phénomène de réfraction, voir le chapitre 2 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Pour une étude plus poussée de la théorie des fibres optiques, consulter :
 - La section 5.4 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

- La section 7.6 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Le chapitre 2 de *Digital Transmission*, Edwin JONES, Migra-Hill, 1993.
- La section 3.7 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- La section 2.1.4 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Pour une étude plus approfondie de la propagation des ondes électromagnétiques, voir le chapitre 12 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.
- Pour approfondir les réseaux sans fil, lire la section 2.1.7 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Pour approfondir les radiocommunications cellulaires, lire :
- La section 2.6 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
 - Le chapitre 28 de *Les Réseaux*, Guy PUJOLLE, Eyrolles, 1998.
- Pour approfondir le sujet, lire les sections 3 et 4 du chapitre 7 de *Telecommunication System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc., 1989.
- Pour approfondir le sujet, lire la section 5.5 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Pour approfondir le sujet, lire la section 5.5 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Pour approfondir les réseaux sans fil en général et les réseaux infrarouges en particulier, lire la section 6.4 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Pour des illustrations des connecteurs DBxx, consulter les figures 2.31 et 2.35 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996, pages 83 et 89.
- Pour une illustration d'un connecteur Ethernet, voir la figure 2.36 à la page 90 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Pour en savoir d'avantage sur les antennes, consulter :
- Le livre *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmission* de P.-G. FONTOLLIET. On y voit divers modèles d'antennes filiformes au tableau 3.46 et diverses antennes paraboliques à la figure 12.5. En particulier le diagramme de l'antenne parabolique de type « Cassegrain » est intéressant (figure 13.8).
 - Le chapitre 7 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989

Le chapitre 13 de *Modem Electronic Communication*, Gary M. MILLER, Prentice Hall, 1993.

La section 13.4 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

Pour en savoir davantage sur l'augmentation de la capacité des fibres optiques, lire « Multiplexage en longueur d'onde ou WDM » à la section 2.5.4, page 152, de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

4.8 Références complémentaires

Extrait tiré du site [GuideInformatique.com](http://www.guideinformatique.com) (septembre 2007), plus précisément la fiche « Réseaux et communications – Fibre optique » présentée à la page http://www.guideinformatique.com/fiche-fibre_optique-506.htm.

Réseaux et communications – Fibre optique

On peut sans trop se tromper dire que la fibre optique est à la base de l'explosion des communications planétaires modernes. Qu'il s'agisse de téléphonie ou d'Internet, la « toile d'araignée » n'est pas en fil de soie mais en fil de verre.

Principe

Grossièrement, la fibre optique est composée :

- d'un fil de verre très fin, le **cœur** (quelques microns), d'un seul tenant, parfois très long (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres)
- d'une gaine qui emprisonne la lumière dans le cœur en la réfléchissant pratiquement sans perte (généralement, une enveloppe transparente d'un indice de réfraction inférieur (certains se rappelleront leur cours de physique),
- d'un fourreau de protection qui peut réunir plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fibres,
- d'un système de connexion très spécifique (sinon la lumière butte aux extrémités et ne sort pas).

La durée de vie d'un tel conducteur est estimée à au moins 20 ans. Le signal électrique à transmettre, à l'origine conduit par des conducteurs métalliques est transformé en signal lumineux à l'aide d'un **transceiver**. Le *transceiver* utilise une **LED** (*Light Emitting Diode* - diode électroluminescente) ou un laser pour produire la lumière. Pour l'opération inverse, consistant à convertir le signal lumineux en signal électrique, on utilise un **détecteur**. Généralement une photodiode.

Avantages de la fibre optique

Les intérêts de ce procédé de transmission par fibre optique, a priori exotique, sont nombreux :

- perte de signal sur une grande distance bien plus faible que lors d'une transmission électrique dans un conducteur métallique,
- vitesses de transmission très élevées,
- poids au mètre faible (c'est important, aussi bien pour réduire le poids qu'exercent les installations complexes dans les bâtiments, que pour réduire la traction des longs câbles à leurs extrémités),
- insensibilité aux interférences extérieures (proximité d'un néon ou d'un câble à haute tension, par exemple),
- pas d'échauffement (à haute fréquence le cuivre chauffe, il faut le refroidir pour obtenir des débits très élevés).

Une affaire de mode

En optique, le mode c'est le nombre de chemins (pour simplifier). Dans une fibre multimode, la lumière peut emprunter un grand nombre de chemins (voir le schéma). Dans une fibre monomode, elle est prisonnière d'un trajet direct. Elle conserve donc vitesse et cohérence. La fibre monomode est donc une

fibres plus performantes que la fibre multimode, mais elle nécessite l'utilisation de sources lumineuses (laser) très puissantes.

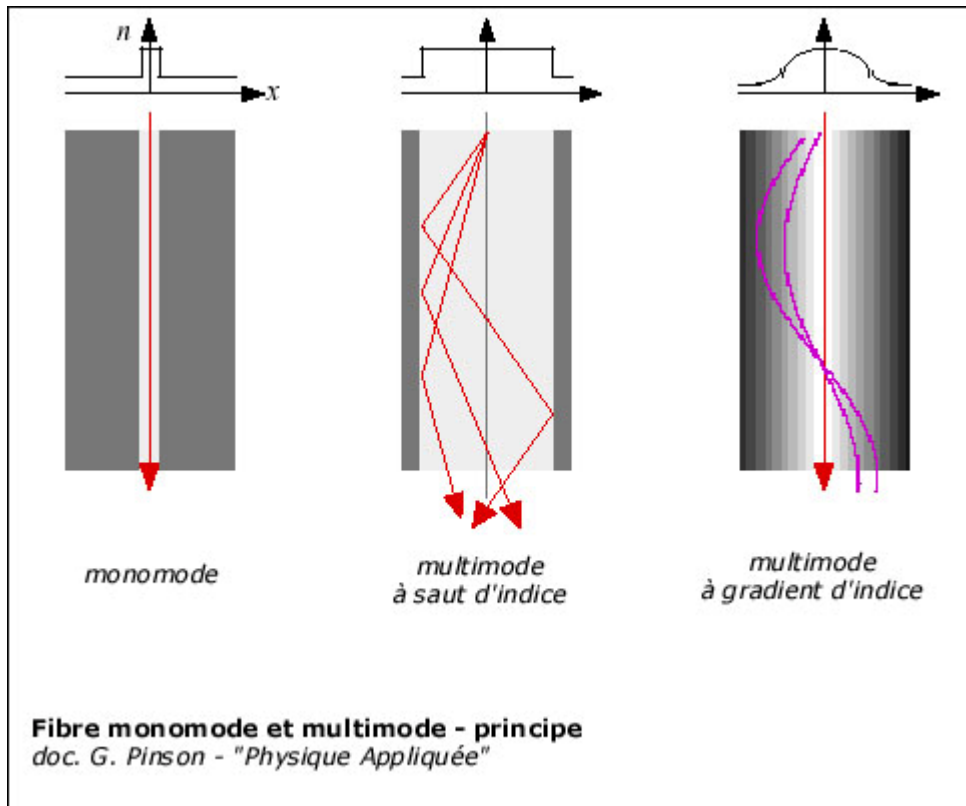


Figure 4-8 : Fibre monomode et multimode - principe

Fibre optique monomode

La **fibre monomode**, ou **SMF** (*Single Mode Fiber*) est utilisée pour les réseaux métropolitains ou les communications longue distance des opérateurs. Son cœur est extrêmement fin (quelques microns). La transmission des données y est assurée par des lasers émettant des longueurs d'onde de 1300 à 1550 nanomètres et par des amplificateurs optiques situés à intervalles réguliers. On peut distinguer plusieurs catégories de plus en plus performantes, tant en débit qu'en distance :

- **G.652** - fibre à dispersion non décalée : la plus courante. Elle permet une transmission à 2,5 Gbps au maximum.
- **G.653** - fibre à dispersion décalée : pour les câbles sous-marins.
- **G.655** - fibre à dispersion non nulle (NZDF : *Non Zero Dispersion Fiber*) : conçue pour des applications de type WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) amplifiés (cf. ci-dessous).
- **G.692** - plus récente, elle est compatible avec le multiplexage DWDM. Elle permet de soutenir les hauts débits sur des distances de 600 à 2000 km (câbles sous-marins).

Il faut noter que plus la distance est grande, moins le débit peut-être élevé.

Multiplexage, modulation WDM, DWDM

Dans toute transmission, il est intéressant de faire passer au même moment dans le même conducteur (ici une même fibre) un maximum de communications concurrentes, sans que l'une vienne brouiller l'autre. On les achemine donc chacune sur une longueur d'onde différente : c'est le **multiplexage**.

Le multiplexage et sa fonction inverse sont assurés par des Mux/Demux. Les différentes longueurs d'onde sont généralement assemblées et séparées par des procédés optiques, comme les filtres en couches minces (les plus communément répandus).

Un peu comme on a associé la technologie *common rail* à une nouvelle génération de moteurs diesels plus performants, on associe les différents types de modulation aux différents types de transmission par fibre optique, sans qu'il soit possible de choisir un type de modulation pour un même matériel, ni nécessaire d'en connaître le principe physique pour l'employer dans le SI.

Pour info, voici quelques termes :

- **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) (G.692) : plusieurs trains de signaux numériques à la même vitesse de modulation, mais chacun à une longueur d'onde distincte.
- **DWDM** (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) La technologie WDM est dite dense lorsque l'espacement utilisé entre deux longueurs d'onde est égal ou inférieur à 100 GHz. On l'emploie désormais pour les transmissions longue distance. Dans la pratique, cela signifie que l'on fait passer dans une même fibre beaucoup de signaux portés par des fréquences très rapprochées les unes des autres.
- **U-DWDM** (*Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing*) permet jusqu'à 400 canaux de transmission.
- **CWDM** (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) seulement 8 à 16 canaux, mais une technologie moins coûteuse utilisable notamment pour les boucles locales (MAN).

Protocoles

Les protocoles transmis sur la fibre optique sont notamment :

- **SONET - Synchronous Optical NETwork**
Norme américaine de transmission synchrone sur fibre optique.
La débit de base SMS-1 est de 51,84 Mb/s et ses multiples jusqu'à 40 Gb/s.
source (octobre 2007) : <http://www.guidelinformatique.com/index.php?act=definition&def=SONET>
- **SDH - Synchronous Digital Hierarchy**
Norme européenne de transmission synchrone sur fibre optique, équivalente à SONET offrant la possibilité de transmettre dans une même trame des services de types et débits différents, tels que les conversations téléphoniques, les données informatiques, notamment Internet, et la vidéo numérique.
Les données à transporter, venant de liaisons synchrones ou asynchrones, sont accumulées dans un conteneur virtuel et transportées sous forme de trame multiplexée.
Trois topologies de réseau sont prévues (bus, étoile ou anneau).
source (octobre 2007) : <http://www.guidelinformatique.com/index.php?act=definition&def=SDH>
- **ATM - Asynchronous Transfer Mode**
Protocole de transmission rapide par paquets de longueur fixe (53 octets): les cellules. Toutes les cellules portent une étiquette et suivent le même chemin. C'est une technologie de commutation hybride entre la technique de commutation de circuit, utilisée dans les réseaux téléphoniques, et la technologie de commutation de paquets, utilisée dans les réseaux informatiques.
L'appel du correspondant est préalable au transfert des informations (technologie orientée connexion). Lors de cette phase d'appel, il y a une négociation des paramètres de trafic et de

qualité de service (urgent, normal, lent, accusé de réception ...).

Ce mode de transmission à paquets courts fixes apporte les avantages de performance suivants :

- simplification de la gestion mémoire
- parallélisme des traitements
- délai entre deux paquets optimisé.

Les vitesses atteintes sont de 1,5 à 622 Mbps utilisée pour les données, la voie, la vidéo. C'est le protocole utilisé par France Telecom.

L'installation d'une liaison ATM s'accompagne de la notion de QoS :

- respect des délais,
- intégrité des données.

source (octobre 2007) : <http://www.guideinformatique.com/index.php?act=definition&def=ATM>

- **Ethernet**

- **ESCON - ENterprise System CONnection**

Protocole de transmission à haute vitesse pour les connexions par fibre optique entre un mainframe IBM et les équipements de stockage. Déjà ancien, il permet une transmission jusqu'à 10 km.

source (octobre 2007) : <http://www.guideinformatique.com/index.php?act=definition&def=ESCON>

- **FICON - Fiber channel CONnexion**

Protocole de transmission à haute vitesse pour les connexions par fibre optique entre un mainframe IBM et les équipements de stockage.

Analogue à Fibre Channel, il permet une transmission sur des distances allant jusqu'à 100 km.

source (octobre 2007) : <http://www.guideinformatique.com/index.php?act=definition&def=FICON>

- **Fibre channel**

Technologie de connexion réseau utilisant la fibre de verre, mais aussi la paire torsadée ou le coaxial. Elle permet des liaisons de 10 km avec environ 16 millions de ports.

source (oct 2007) : <http://www.guideinformatique.com/index.php?act=definition&def=FIBERCH>

2 Mb/s	155 Mb/s	2,5 Gb/s	10 Gb/s
30	1 890	30 240	120 960
SDH : nombre de conversations téléphoniques suivant le débit de la liaison <i>doc. Yalta</i>			

CWDM

La technologie DWDM présente des coûts assez élevés.

- fibre haute performance,
- lasers refroidis,
- contrôle fin des longueurs d'onde très proches les unes des autres.

La technologie CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) est une solution WDM économique. Les canaux sont plus écartés (*coarse*). De fait, selon sa qualité, on ne dispose que de 8 ou 16 canaux par fibre. Le matériel utilisé, d'un coût modéré et d'une utilisation sans contraintes importantes, permet une installation dans les équipements finaux (boucles locales, entreprises).

Transmission à longue distance

Par longue distance, on pense immédiatement aux câbles transatlantiques, mais dans la réalité c'est plusieurs millions de kilomètres de liaisons qui constituent l'infrastructure des opérateurs, aussi bien au niveau téléphonique (maintenant complètement numérisé), qu'au niveau de la toile Internet. Il existe des liaisons le long des routes, dans les égouts, le long des voies de chemin de fer et de métro.

Boucle locale, MAN

Les différents opérateurs alternatifs ont installé des boucles locales permettant de desservir les différents clients.

En cas de défaillance à l'un des points de jonction, une fonctionnalité dite **autocicatrisation** permet de rétablir la boucle en quelques millisecondes.

Les abonnés peuvent être raccordés à la boucle par fibre optique ou par liaison de type xDSL sur un point dénommé ADM (*Add Drop Multiplexer*).

France Telecom se propose d'installer dans chaque région une centaine de boucles de type analogue dans un plan baptisé ZAE (Zone d'Activité Economique). Ce dispositif doit permettre aux entreprises d'une même zone d'activité de se raccorder à la boucle locale sans être obligé de rejoindre individuellement un point de présence.

Les boucles locales utilisent généralement le protocole SDH. La technologie économique CWDM est maintenant souvent employée.

5 Communication numérique

Objectifs

Ce module traite des principaux modes de communication numérique.

On débute par une introduction au codage numérique des messages, ce qui inclut un bref rappel quant à la façon d'indiquer les niveaux relatif et absolu des signaux (dB et dBm). On termine cette section par une étude de la limite théorique du taux de transfert.

On présente ensuite les grands concepts qui gouvernent les modes de transmission en bande de base puis on voit les principaux modes de transmission. On termine cette section par un aperçu des problèmes rencontrés et des limites de la transmission en bande de base.

On décrit ensuite les divers types de modulation utilisés pour la transmission de signaux numérisés et on explique la combinaison de canaux modulés dans un système à bande large.

Finalement, on compare divers supports et leur capacité de transmettre des signaux numériques. Puis, on voit les caractéristiques des lignes publiques.

5.1 Codage numérique du message

Le présent module traite de la forme des signaux transmis et non de la synchronisation ni de l'organisation des données en trames ou paquets. Ces autres aspects font l'objet de chapitres distincts.

5.1.1 Transfert d'information

On peut définir les télécommunications comme étant l'art de transmettre des informations de façon fiable sur un canal non fiable, tel qu'illustré à la Figure 5-1. En fait, si on voulait être formel, on devrait parler de **transmission de données**, car c'est une forme codifiée ou numérisée de l'information qui est manipulée par les systèmes informatiques.

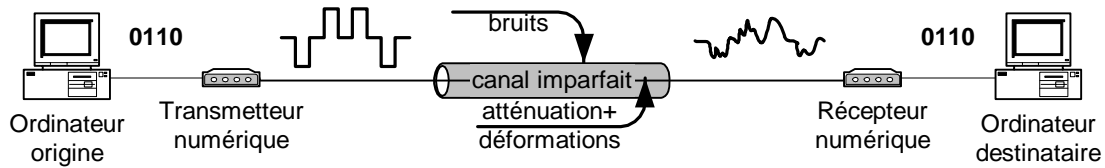


Figure 5-1 : Transmission fiable sur un canal non fiable

5.1.2 Nature des données

Les données à transmettre peuvent être de nature **analogique** ou **numérique** :

- ✧ **Analogique** : composées de valeurs qui varient de façon continue (température, voix, signal de télévision, etc.).
- ✧ **Numérique** : composées de valeurs discrètes, c'est-à-dire que les données sont représentées par un ensemble fini ou dénombrable de valeurs distinctes ou séparées (nombres, caractères, pixels, etc.).

5.1.3 Types de transmission

Pour être transmises sur un canal de communication, les informations doivent être transformées en signaux électriques (ou électromagnétiques). Bien qu'un signal soit de nature essentiellement analogique, on distingue quand même (abus de langage commode) trois formes de transmission :

- ✧ **Analogique** : le signal représente directement la valeur de l'information analogique qu'elle transmet, soit par les variations de la tension du signal, de la fréquence du signal ou par les variations d'une autre caractéristique physique.
- ✧ **Hybride** : le signal présente une succession de valeurs analogiques échantillonnées (non quantifiées). Chaque intervalle de temps véhicule une valeur analogique qui demeure stable pour la durée dudit intervalle. Ce signal est analogique en amplitude (ou autre paramètre) mais discret dans le temps. Ce type particulier de signal sert en téléphonie pour transmettre simultanément plusieurs conversations sur un même support.
- ✧ **Numérique** : le signal est constitué d'une séquence de signaux élémentaires transmis les uns après les autres, chacun durant une brève période de temps. Les signaux sont choisis parmi un ensemble fini de valeurs ou formes prédéfinies (voltage, fréquence, etc.)

Si l'ensemble ne comporte que 2 éléments, on a une transmission binaire ; si l'ensemble est plus riche, les éléments supplémentaires servent alors soit à transporter plusieurs bits par élément, soit à inclure de la redondance afin d'aider à la synchronisation ou à la correction des erreurs de transmission.

Par exemple des formats hybrides basé sur un multiplexage temporel de signaux codés avec les modulations PAM, PDM et PPM.

La transmission numérique remplace de plus en plus les autres formes de transmission, aussi bien en téléphonie qu'en câblodistribution. Les signaux analogiques ou hybrides sont numérisés puis acheminés avec une transmission numérique. Par exemple, le format **T1** transporte simultanément 24 conversations téléphoniques et remplace ainsi certains formats hybrides :

Lecture suggérée :

Pour de plus amples informations sur les formats hybrides, voir la section 3.5.3 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

5.1.4 Adaptation des signaux

On retrouve sur le marché divers appareils permettant d'adapter des informations de type analogique ou numérique à un canal du même type ou d'un autre type. Par exemple, la caméra vidéo transforme des informations analogiques (intensité lumineuse de la scène) sous forme d'un signal analogique pouvant être transmis vers les téléspectateurs.

Pour les canaux numériques, on a trois classes d'appareils :

- ✧ **Modem** : (modulateur / démodulateur) transforme des données numériques sous forme de signaux numériques modulés. À la réception, reconvertit les signaux numériques modulés en données numériques.
- ✧ **Codec** : (codeur / décodeur) transforme de l'information analogique en signaux numériques, par exemple pour transmettre des signaux de télévision sur une fibre optique, et, reconvertit les signaux numériques en information analogique à l'arrivée.
- ✧ **Transmetteur numérique** : transforme des informations numériques sous forme de signaux numériques, par exemple pour transmettre sur un canal Ethernet.

5.1.5 Exemple de codage

Supposons qu'on veuille transmettre le message « Allo » entre deux ordinateurs. Première opération : coder le message qui devient « 41 6C 6C 6F » en ASCII (représenté en hexadécimal, sans l'accent circonflexe). Deuxième opération : transformer le message ainsi codé sous la forme d'un signal à émettre sur le canal de transmission.

Si on choisit une transmission à 16 niveaux de voltage, cela donne, par exemple, le signal de la Figure 3-4a. Chaque période de transmission transporte 4 bits ($2^4 = 16$ possibilités).

Si on choisit plutôt une transmission à deux niveaux de voltage, on utilise alors la forme binaire de ce message : « 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 0 »

1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1». Cela donne, par exemple, le signal illustré à la Figure 3-4b. Chaque période transmet un bit.

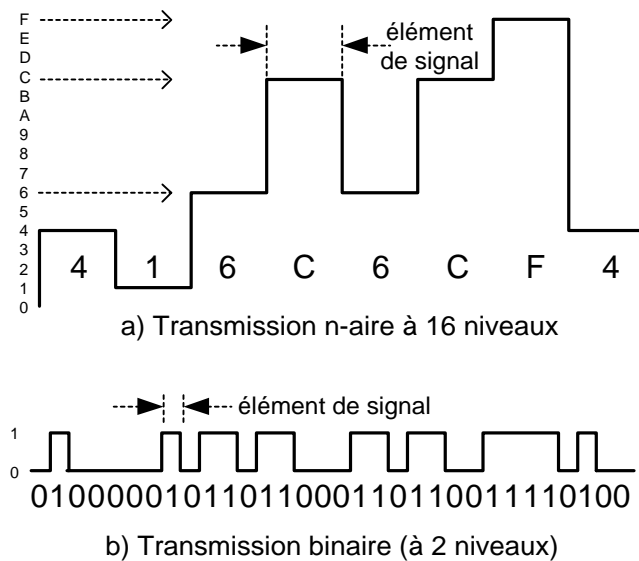


Figure 5-2 : Message « Allo » codé de deux façons.

5.1.6 Mode de transmission

Le présent chapitre met l'accent sur les traitements de la couche physique. On utilise donc le terme « message » de façon générale. Il désigne une information à transmettre sans égard à la couche OSI.

On nomme **transmission** l'opération consistant à transformer un message numérique en une succession de signaux électromagnétiques élémentaires appelés **éléments de signal** ou **moments de transmission**. Chaque élément a une forme ou caractéristique particulière. Selon le type de transmission utilisé, on a entre 2 et 256 éléments différents (ou plus). Ils ont le plus souvent tous la même durée. On parle alors de **transmission cadencée** ou **isochrone**.

Lorsque les éléments ont une forme complexe, on les définit à l'aide de **signaux élémentaires de base**: signaux de forme très simple et servant à construire les éléments de signal.

On nomme **mode de transmission** la série de règles qui régit la correspondance entre les bits du message, les valeurs possibles de chaque élément de signal et le choix des caractéristiques physiques utilisées pour représenter l'élément de signal. En général, à chaque élément correspond un ou quelques bits du message. Voir la Figure 3-4.

Par exemple, la transmission CEBus sur courant porteur comporte des éléments de durée simple (pour coder un « 1 ») et des éléments de durée double (pour coder les « 0 »). Ce protocole utilise aussi des éléments de triple et quadruple durée pour séparer les champs d'une trame.

Rappel :

Le nombre d'éléments de signal par seconde se nomme bauds tandis que bits par seconde ou bit/s ou bps désigne le débit d'information du point de vue du message transmis.

Lorsqu'il s'agit d'un mode de transmission binaire, l'un et l'autre donnent la même valeur. Lorsqu'on utilise 2^M éléments de signal, alors le débit en bits par seconde est égal à M fois le débit en bauds.

À l'inverse, le débit en bit/s peut être inférieur aux bauds. Par exemple, la transmission courant porteur de CEBus transmet 10kUST/s (unités d'encodage) mais utilise de 1 à 8 éléments de signal pour coder un symbole. Le débit moyen de ce protocole est égal au 2/3 du nombre de bauds.

Il existe certains modes de transmission qui combinent des variations de forme et de durée pour construire l'ensemble des éléments de signal.

Les éléments de signal sont placés sur le support les uns après les autres jusqu'à ce que l'ensemble du message ait été transmis sur le réseau. Les signaux se propagent alors sur le support à une vitesse qui se rapproche de la vitesse de la lumière (entre 200 et 300 m/ μ s, selon le type de support). Après un court délai les signaux arrivent à destination.

L'appareil récepteur observe en permanence les fluctuations électromagnétiques qui lui arrivent du réseau. Il analyse ces fluctuations et, lorsqu'il détecte un début de message, il en extrait les éléments de signal puis, à partir de là, il retrouve les bits puis le message. La Figure illustre ce processus.

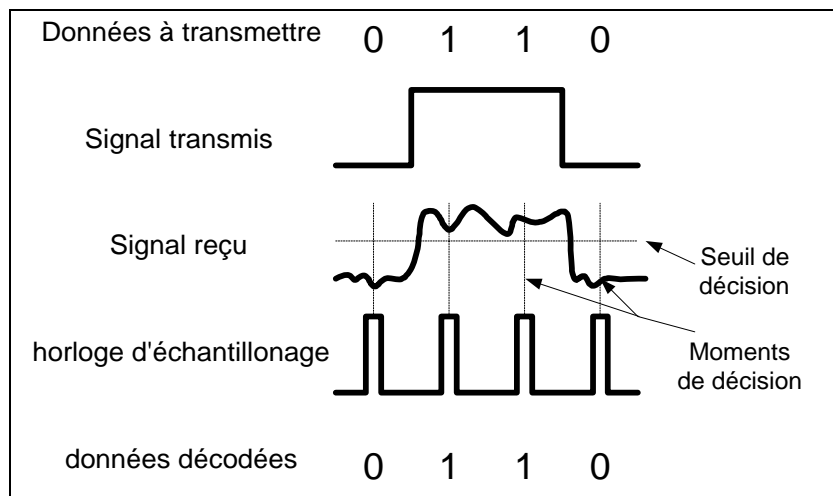


Figure 5-3 : Extraction réussie de données transmises

5.1.7 Fiabilité de la transmission

Ce travail d'extraction n'est pas aisé car le support déforme le signal (plus ou moins selon le type de support et la distance). Parfois, un élément de signal prend la forme d'un autre élément de signal. L'extraction est alors prise en faute et le message reçu ne correspond pas au message émis. Il y a erreur de transmission tel qu'illustré à la figure suivante où les bits 0110 sont décodés en tant que 0100 par le destinataire.

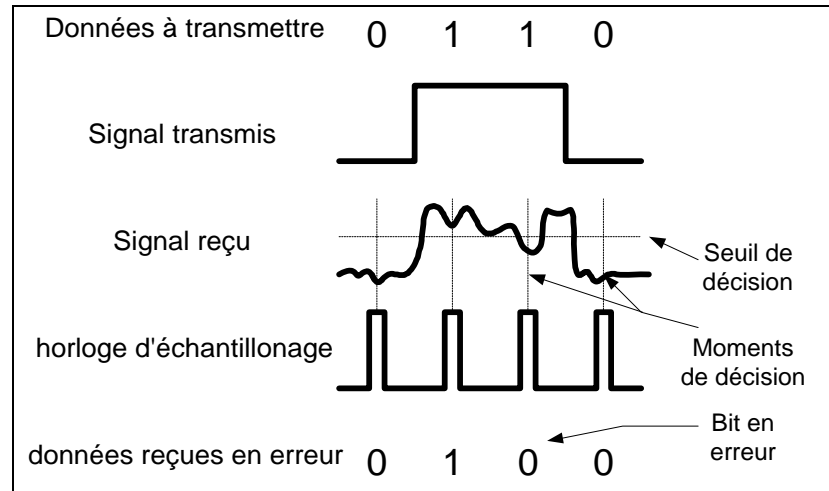


Figure 5-4 : Extraction erronée de données transmises

Il existe plusieurs solutions pour permettre une transmission fiable sur un médium non fiable. Dans un premier temps, il faut détecter qu'il y a une erreur. Pour ce faire, on ajoute de la redondance à la transmission et lorsqu'on observe une inconsistance, on passe en mode récupération d'erreur. Selon le type de redondance et de réseau, on adopte alors une des stratégies suivantes :

- ✧ Le message est rejeté à bas niveau ; mais l'un des services de la pile de protocole se charge de demander une nouvelle transmission (après expiration d'un délai).
- ✧ L'erreur est signalée à la couche supérieure qui demande une retransmission.
- ✧ La séquence d'éléments reçus viole les règles de codage pour le mode de transmission utilisé. En se basant sur les règles de codage convenues, le destinataire détermine les éléments qui ont été mal reçus et les corrige.
- ✧ Le message source contenait de la redondance, ce qui permet au destinataire de trouver quels sont les bits en erreur et de les corriger.

5.1.8 Unité de mesure du niveau d'un signal

Le *niveau relatif* L_x d'un signal est l'expression sous forme logarithmique du rapport d'une grandeur, généralement la puissance P_x , et d'une grandeur de référence de même nature, par exemple une puissance $P_{réf}$.

$$L_x = 10 * \text{Lg} (P_x \div P_{réf}) \quad \text{en décibels ou dB}$$

On double le coefficient pour tenir compte du fait que la puissance est proportionnelle au carré de la tension.

où Lg est le logarithme en base 10. Si on connaît la tension (V_x et $V_{réf}$) au lieu de la puissance des signaux, alors la formule s'écrit avec un coefficient de 20 au lieu de 10. De cette façon on obtient le même niveau relatif entre deux signaux (en dB) :

$$L_x = 20 * \text{Lg} (V_x \div V_{réf}) \quad \text{en décibels ou dB}$$

Si la grandeur de référence $P_{\text{réf}}$ est définie indépendamment du système, le niveau par rapport à cette grandeur s'appelle **niveau absolu de puissance**. Il est d'usage en télécommunication de choisir comme référence une puissance de 1 mW.

$$L_x (\text{re } 1 \text{ mW}) = 10 * L_g (P_x \div 1 \text{ mW}) \quad \text{en dBm}$$

Cette façon de noter la puissance des signaux est très utile. Si un signal est 10 fois plus puissant qu'un autre alors on a 10dB d'écart entre les deux. S'il est 2 fois plus fort, on a environ 3 dB tandis que s'il est 3 fois plus fort, on a environ 5 dB. Dans l'univers des logarithmes, les multiplications se transforment en addition, ce qui facilite grandement les calculs.

5.1.9 Limite théorique du taux de transfert

Si on disposait d'un canal parfait, on pourrait y injecter un signal quelconque et obtenir à l'autre bout exactement le même signal. On pourrait alors utiliser une transmission très rapide et le débit serait aussi élevé que voulu. Malheureusement, les canaux de transmission obéissent aux diverses lois de l'électromagnétisme ; ils limitent les signaux de diverses façons. On peut étudier la question sous deux angles complémentaires : dans les domaines fréquentiel et temporel.

- ✧ **Domaine fréquentiel** : l'affaiblissement du signal augmente en fonction de la fréquence. Le canal se comporte comme un filtre passe bas.
- ✧ **Domaine temporel** : la réponse du canal à un changement brusque de niveau (onde carrée) se fait progressivement, la forme de l'onde reçue a les coins arrondis.

Dans le domaine **fréquentiel** on regarde le signal transmis comme étant composé d'une multitude d'harmoniques émises simultanément qui, un coup combinées, donnent la forme d'onde du signal transmis (analyse de Fourier). Sachant que les hautes fréquences passent peu ou pas, si on tente de transmettre trop vite, il ne reste pas assez d'harmoniques pour que les éléments de signal soient reconnus. Voir la Figure qui montre à quoi ressemble la donnée « 01100010 » sur un canal qui ne laisse passer que la première harmonique.

Dans le domaine **temporel** on regarde le **temps de montée**, c'est-à-dire combien de temps cela prend au signal pour passer d'un niveau à un autre. Sachant que le destinataire doit pouvoir observer le niveau visé, on en déduit qu'on ne peut faire varier plusieurs fois le signal pendant le temps de montée. Autrement le signal n'a pas eu le temps de « quitter » le premier niveau que déjà on lui en assigne un autre. On mesure le temps de montée en calculant le temps que ça prend à un signal pour passer de 10% à 90% de sa valeur finale (voir Figure 5-6.)

La limite théorique du taux de transfert a été étudiée par Nyquist en 1928 puis par Shannon en 1948. Selon le théorème de Nyquist, un canal dont

la bande passante est H Hertz ne peut laisser passer plus de $2 * H$ bauds (éléments de signal par seconde).

$$\text{taux de transfert : } B = 2 * H$$

Si on pouvait atteindre cette limite, alors un canal de 3000 Hz pourrait transmettre 6000 éléments de signal par seconde. Malheureusement il faut aussi tenir compte du temps de montée des signaux, cela fait que la limite pratique est ramenée à environ 1,25 baud par Hertz de bande passante.

Lecture suggérée :

Pour le développement complet, voir la section 4.1.4 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

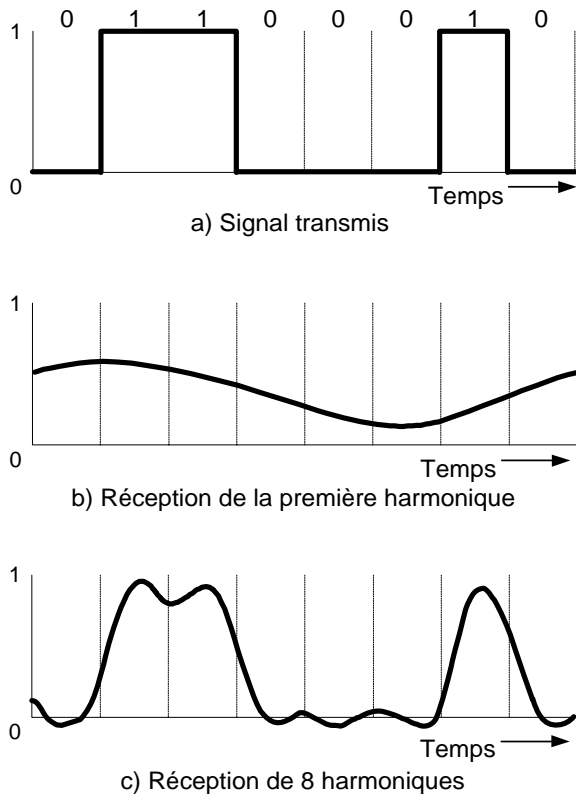


Figure 5-5 : Forme du signal reçu en fonction du nombre de composantes harmoniques

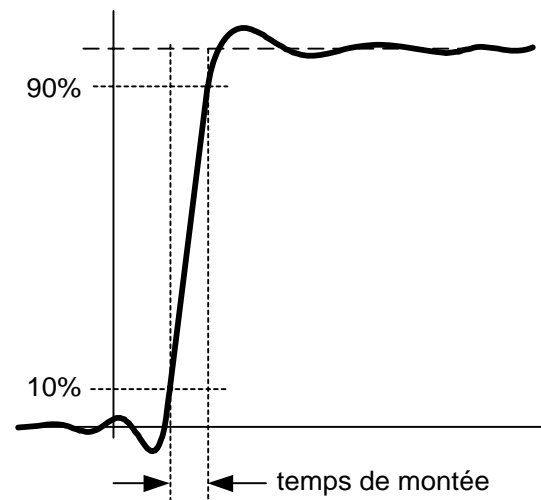


Figure 5-6 : Temps de montée d'un signal

Donc, sur le canal de 3000 Hz, si on utilise un signal binaire, on peut transmettre 3750 bit/s. Par contre, si on utilise 64 niveaux, on peut transmettre 6 bits à la fois \Rightarrow 22 500 bit/s. Seconde contrainte : on ne peut pas augmenter le débit indéfiniment à cause du bruit sur le canal. En effet, si l'intensité du bruit est trop près de la différence de niveau

entre deux valeurs rapprochées des signaux possibles alors le destinataire ne peut plus extraire les éléments de signal de façon fiable.

Shannon a établi la capacité théorique d'un canal compte tenu du bruit. Soit S la puissance d'un signal et N la puissance du bruit, alors le débit D en bit/s en fonction de la bande passante H en Hertz comme suit :

$$\text{le débit : } D = H * \log_2 (1 + S \div N)$$

Un facteur de 50 correspond à un ratio signal à bruit de 17dB tandis qu'un ratio de 2500 correspond à 34dB.

Par exemple, si le signal est 50 fois plus puissant que le bruit alors un canal de 3000 Hz peut transmettre $3000 * \log_2(1+50) \approx 3000 * 5,67 \approx 17\ 000$ bit/s. Avec un meilleur canal pour lequel le rapport signal à bruit vaut 2500 notre bande passante de 3000 Hz peut transmettre près de 33 900 bit/s.

Lecture obligatoire :

Lire la section 2.1 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

Lectures suggérées :

La section 4.3 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

La section 4.1 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

La section 2.2.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

On doit également tenir compte du fait que chaque canal de communication possède ses caractéristiques propres. Il laisse bien passer certains signaux mais bloque les autres. Par exemple, une ligne téléphonique transmet bien les fréquences comprises entre 300 et 3300 Hz mais bloque toutes les autres ou encore la lumière traverse bien le verre (donc les fibres optiques) mais non le métal. On doit donc choisir judicieusement le type de transmission en fonction du canal.

On distingue deux modes de transmission :

- ✧ transmission en bande de base ;
- ✧ transmission avec modulation (à bande large).

5.2 Transmission en bande de base

Pour être plus rigoureux on doit parler de niveaux de tension pour un câble électrique et d'intensités lumineuses pour une fibre optique. Dans ce dernier cas on considère l'intensité sans tenir compte de l'aspect ondulatoire de la lumière.

On dit d'un signal qu'il est en **bande de base** lorsque les éléments de signal prennent la forme de séquences simples de tension (voir la Figure 3-4). La forme la plus simple, pour un élément de signal donné, est un niveau de tension constant du début à la fin de la période allouée à l'élément.

Lorsque le codage du signal utilise plusieurs éléments, ceux-ci sont généralement tous de la même forme mais avec une intensité proportionnelle au numéro de l'élément. Par exemple, on peut avoir 5 éléments respectivement transmis comme des niveaux de tension de 1 volt, 2 volts, 3 volts, 4 volts et 5 volts.

Par ailleurs, on parle de **signal modulé** lorsque les éléments de signal sont formés d'ondes périodiques (sinus ou autre).

Lorsqu'on transmet plusieurs bits à la fois on peut conserver le niveau de tension plus longtemps (comme illustré à la Figure 3-4a) ou profiter de la « richesse » du signal pour réduire le temps requis pour transmettre l'ensemble du message. La transmission à multiples niveaux offre un meilleur débit tandis que la transmission binaire est plus simple à générer. Il existe une grande variété de méthodes qui ont été développées, chacune offrant des avantages spécifiques. Selon le budget et les besoins, on choisira l'une ou l'autre.

Noter que le présent chapitre examine seulement la façon de transmettre des bits sur un support. L'aspect synchronisation des bits, des octets et des trames sera traité dans un autre chapitre.

5.2.1 Caractéristiques des modes de transmission

Les modes de transmission se caractérisent par diverses propriétés qui se définissent comme suit :

- ✧ **Binaire, ternaire, quaternaire ou N-aire** : fait référence au nombre d'éléments de signal dans le mode de transmission (respectivement 2, 3, 4, N). Dans les noms donnés aux modes on retrouve souvent une lettre qui désigne le nombre d'éléments : 2=B, 3=T, 4=Q.
- ✧ **Unipolaire** : tous les éléments ont un voltage positif ou nul.
- ✧ **Antipolaire** : les éléments de signal sont uniformément répartis en paires de voltages égaux mais de polarité opposée.
- ✧ **Biphasé** : mode comportant une transition (positive ou négative) à mi-temps des éléments.
- ✧ **Retour à zéro (RZ)** : les éléments présentent une impulsion puis retournent à zéro avant la fin du temps de l'élément.
- ✧ **Non retour à Zéro (NRZ)** : les éléments maintiennent leur valeur pendant toute leur durée (opposé de RZ).

- ✧ **Cadencé ou isochrone** : tous les éléments ont la même durée.
- ✧ **Tout-ou-rien** : les bits « 0 » sont codés par un voltage nul, toute l'énergie est mise dans les bits « 1 ».
- ✧ **Bipolaire** : les bits « 1 » sont codés alternativement par un voltage positif puis négatif ; les « 0 » ont un voltage nul².
- ✧ **Différentiel** : le codage et l'interprétation d'un élément se font en rapport à l'élément précédent (avec une mémoire).
- ✧ **Mode à mémoire** : comporte des règles qui lient le choix d'un élément de signal aux éléments passés.
- ✧ **Violation de polarité** : règle de codage qui introduit des éléments illégaux dans une transmission de type bipolaire. Plus précisément, pour éviter une perte de synchronisation du récepteur lors de l'envoi d'une longue suite de « 0 », un certain nombre de « 0 » sont transmis comme des « 1 », mais avec polarité inversée (en violation avec la règle d'alternance de polarité du mode bipolaire).
- ✧ **Codage groupé** : type d'encodage où X bits du message sont codés à l'aide de Y éléments M-aires. On nomme ces modes X B Y M, c'est-à-dire en insérant la lettre B entre les nombres X et Y puis en terminant par une lettre qui désigne le nombre d'éléments du système. Par exemple 4B3T code 4 bits sur 3 éléments ternaires. Autre exemple : 6B4T.

5.2.2 Problèmes avec les modes de transmission

Tous les modes de transmission présentent des inconvénients qui font qu'il ne sont pas appropriés pour certains types de réseaux. De nombreux modes de transmission existent, chacun apportant des améliorations intéressantes de l'un ou l'autre aspect de la transmission numérique. Avant d'aborder ces modes, voici les principales difficultés dont il faut tenir compte.

- ✧ Certains modes ont tendance à bâtir une tension résiduelle non nulle, provoquant l'apparition d'une composante en *courant continu* CC (DC). Un mode unipolaire *Tout-ou-rien*, par exemple, présente une tension moyenne égale à $V/2$. Les modes antipolaires sont moins biaisés mais peuvent être très dépendants des données transmises (si $0 \rightarrow +V$ et $1 \rightarrow -V$). Si une donnée comporte plus de bits à « 1 » que de bits à « 0 », une composante CC apparaît. Lorsqu'on pousse les capacités d'un réseau à l'extrême, cela suffit à rendre la réception instable.
- ✧ Lorsqu'un message comporte plusieurs bits consécutifs à « 1 » ou à « 0 », certains modes transmettent un voltage fixe, sans aucune

² À l'encontre des autres auteurs, Fred HALSALL ([Hal96], p.112) définit bipolaire comme un mode dans lequel on utilise un voltage positif pour encoder les « 1 » et un voltage négatif pour encoder les « 0 ».

transition. Si cela arrive pendant une bonne période de temps, le récepteur n'arrive plus à synchroniser son horloge sur le signal.

- ✧ Tout canal physique disperse l'énergie des éléments de signal qu'il transmet. Lorsqu'un mode utilise des éléments de signal qui occupent tout le temps alloué aux éléments, l'énergie dispersée d'un élément perturbe les éléments voisins. Cela limite la distance et le débit maximum.
- ✧ Certains modes de transmission comportent des transitions de voltage abruptes, d'où une composition harmonique riche en hautes fréquences. Cela crée des interférences diverses.
- ✧ Lorsque l'énergie transmise sur le support est élevée, cela augmente les problèmes de *diaphonie* (signal qui passe d'un conducteur au conducteur voisin dans un câble). Cela limite donc le débit et la distance sur les câbles à brins multiples.
- ✧ Beaucoup de modes ne comportent pas de redondance. En cas d'erreur de transmission le circuit de réception n'a aucun indice pour l'aider à retrouver la séquence d'éléments qui a été transmise. Certains systèmes de communication ajoutent de la redondance à l'intérieur même des messages, les couches de plus haut niveau peuvent alors corriger les erreurs. Cependant, cela est difficilement utilisable dans les réseaux de type *diffusés* (*broadcast*).
- ✧ Certains canaux de transmission peuvent inverser la polarité des signaux qu'ils transportent. Pour plusieurs modes de transmission, ceci est inacceptable car cela inverserait tous les bits du message. On utilise alors un mode de type différentiel, insensible à l'inversion de la polarité du signal.

Dans les réseaux de type diffusés, le circuit de réception doit filtrer les messages qui arrivent et rejeter tous ceux qui ne lui sont pas destinés. Lorsqu'une erreur est détectée, le circuit ignore si l'erreur est dans la partie adresse de l'entête ou dans les données.

5.2.3 Mode de transmission Tout-ou-rien

Le type de transmission le plus simple se nomme *Tout-ou-rien* (*OOK*, *On-Off Keying*). Avec ce mode de transmission l'émetteur d'un message code directement le train de bits de son message en séquence d'éléments de signal. Il y a deux éléments de signal nommés *V* et *Nul* qui transportent respectivement les bits « 1 » et « 0 ».

Chaque élément de signal consiste en un voltage constant pendant toute la durée de l'élément. On utilise un voltage positif pour l'élément *V* et un voltage zéro (absence de courant) pour l'élément *Nul*. Voir l'exemple illustré à la Figure .

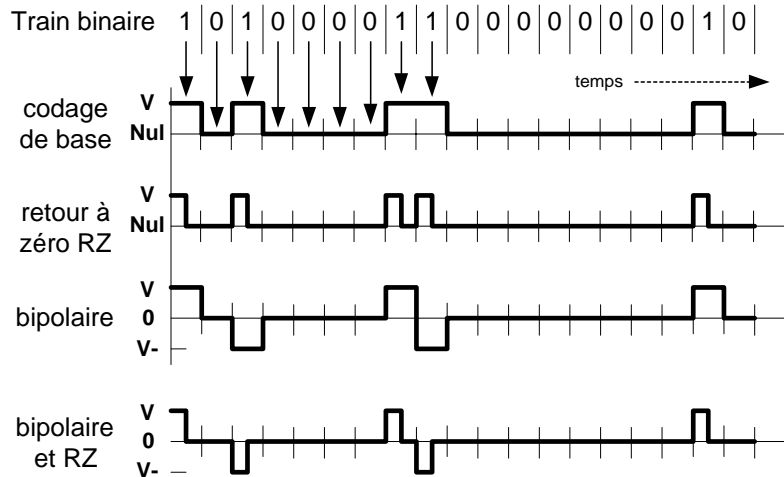


Figure 5-7 : Quatre variétés de transmission *Tout-ou-rien*

Ce mode *Tout-ou-rien* s'utilise beaucoup sur les fibres optiques où V implique émission de lumière tandis que Nul signifie source éteinte. On le retrouve également comme canal de communication interne entre les divers processeurs de certains appareils électroniques (0 et 5 volts).

La variante de base de ce mode de transmission s'utilise peu sur les autres canaux de communication en bande de base à cause de la composante CC qu'il engendre : en moyenne $V/2$, mais variable selon le type de données transportées. Cela cause divers problèmes de décodage et d'isolation électrique à la réception et d'amplification dans le réseau.

5.2.3.1 Variantes du codage *Tout-ou-rien*

Il existe diverses variantes du codage *Tout-ou-rien* (voir la Figure) :

- ✧ avec l'ajout d'une caractéristique de **retour à zéro** ou **RZ** : l'élément V conserve le voltage pendant $\frac{1}{2}$ de la période puis retourne à zéro ;
- ✧ de type **bipolaire** : on ajoute un 3^e élément $V-$ qui est utilisé pour coder les « 1 » en alternance avec l'élément V . Ce mode utilise donc trois éléments de signal (V , Nul et $V-$) mais n'est pas véritablement ternaire puisqu'à tout instant il n'y a que deux éléments qui peuvent être utilisés. On parle alors de mode **pseudo-ternaire**. Noter que ce mode évite le problème de courant CC résiduel ;
- ✧ de type bipolaire avec retour à zéro.

5.2.4 Modes de transmission NRZ

Pour éviter le problème de composante CC , on utilise souvent les codages de type *NRZ* (*non return to zero*). Il s'agit d'une famille de modes de transmission qui utilise deux éléments de signal, chacun composé d'un voltage constant (comme avec *Tout-ou-rien*). Au lieu

d'avoir V et Nul , les éléments se nomment $V1$ et $V2$ tel qu'illustré à la Figure .

On attribue au premier un voltage positif et au second un voltage négatif mais de même magnitude ($V1 = -V2$). Si on transmet autant de $V1$ que de $V2$ on évite la composante CC du signal. Les valeurs de voltage utilisées varient selon l'usage qu'on fait de ce mode de transmission. Le tableau 5-1 énumère les valeurs spécifiées dans certains standards.

Pour spécifier complètement le mode de transmission il faut en plus décrire précisément de quelle façon les éléments de signal sont choisis en fonction du message à coder. On peut utiliser un algorithme de son choix dans la mesure où l'on respecte deux conditions : la séquence d'éléments produite doit être non ambiguë (pour que le récepteur puisse retrouver le message source) et l'appareil récepteur doit connaître l'algorithme utilisé.

5.2.4.1 Attribution des éléments de signal

Il y a plusieurs variantes du code NRZ. La première (et la plus simple) consiste à établir une relation directe entre les valeurs des bits du message et les éléments de signal (même chose que le mode Tout-ou-rien ci haut). Ce mode NRZ de base attribue des éléments $V1$ à tous les bits « 0 » et des éléments $V2$ à tous les bits « 1 ». On le désigne par *NRZ-L* (*L* pour *Level*) ou encore par *NRZ neutre*.

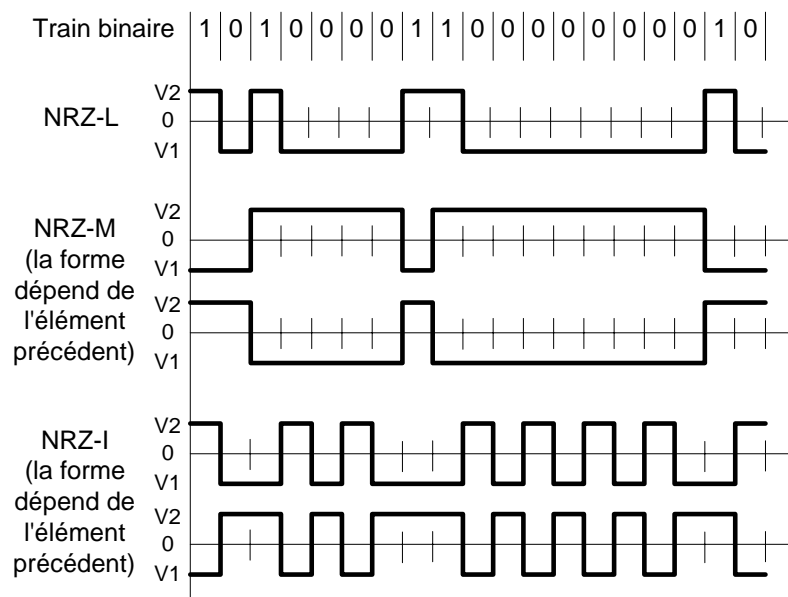


Figure 5-8 : Trois variantes de la transmission NRZ

5.2.4.2 Variantes du codage NRZ

Le mode NRZ-I est aussi connu sous le nom de NRZ-S (S pour Space).

Le codage NRZ s'utilise également en deux variantes : *NRZ-M* (M pour Mark) et *NRZ-I* (I pour inverse). Le NRZ-M utilise l'algorithme d'attribution suivant (voir la Figure) :

- ✧ Pour coder un bit « 1 », on choisit un élément de signal qui est différent de l'élément qui le précède ;
- ✧ Pour coder un bit à « 0 », on choisit le même élément de signal que celui du bit qui précède.

On remarque qu'on peut avoir deux codages différents pour une même suite de bits puisque les éléments tiennent compte de l'élément précédent.

Pour NRZ-I on fait l'inverse de NRZ-M, ce sont les « 0 » qui font alterner V1 et V2 tandis que les « 1 » laissent l'élément inchangé.

Avec les modes NRZ-M et -I on n'a plus la correspondance directe entre les bits et les éléments de signal. On a une composante de mémorisation dans le signal. Si on observe un élément isolé on ne peut pas savoir comment l'interpréter ; il faut regarder l'élément qui précède. Ainsi, pour NRZ-M, lorsque l'élément précédent est pareil on en déduit que le bit envoyé est un « 0 ». Autrement on sait que c'est un « 1 » qui a produit l'élément reçu.

Remarque :

Le mode NRZ-I offre une meilleure synchronisation que les deux autres. En effet, nous avons vu que le récepteur a besoin de transitions sur le signal entrant pour synchroniser son horloge sur celle de l'émetteur. Comme les modes NRZ peuvent engendrer de longues séquences sans transition, cela prend une méthode pour contrer ce problème.

Sur les ports sériels *asynchrone*, les caractères sont envoyés un à la fois avec un élément de synchronisation de début (*start*).

Sur les liaisons plus rapides on utilise une transmission *synchrone* (séquence ininterrompue d'éléments). Une solution astucieuse vient de la combinaison de NRZ-I et HDLC : le premier a des transitions sur les « 0 » et le second insère un bit « 0 » à chaque fois qu'un message contient une séquence de bits « 1 ».

5.2.4.3 Niveaux de tension

Le mode NRZ-L est largement utilisé pour les communications à bas débit des micro-ordinateurs (ports sériels COM1 et COM2), par exemple pour les relier à un modem téléphonique.

Divers standards ont été spécifiés pour ce type de liaison. Le tableau 5-1 présente le niveau de tension sur quelques liaisons de type sériel basées sur NRZ-L.

Tableau 5-1 : Niveaux de voltage V1 et V2 des liaisons séries

Norme	V1 : état « 0 »	V2 : état « 1 »
V.28 et EIA/RS-232c	≥ 3 volts	≤ -3 volts
V.28 typique	12 à 15 volts	-12 à -15 volts
V.10 et V.11	0,3 volt	-0,3 volt
V.35	0,55 volt	-0,55 volt
TTL	≤ 0,8 volt	≥ 2 volts

On remarque dans ce tableau que l’attribution des niveaux de voltage se fait souvent en *logique négative*, c’est-à-dire que l’élément de signal V1, associé au « 0 » logique se voit attribuer un voltage positif tandis que l’élément V2 associé au « 1 » logique reçoit un voltage négatif.

5.2.5 Autres modes de transmission

Il existe de nombreux modes de transmission qui ont été mis au point pour satisfaire toutes sortes de besoins spécifiques. La Figure illustre quelques modes simples : Manchester et Manchester différentiel, Biphase-M et -S, Miller, Bipolaire et BHD (bipolaire haute densité).

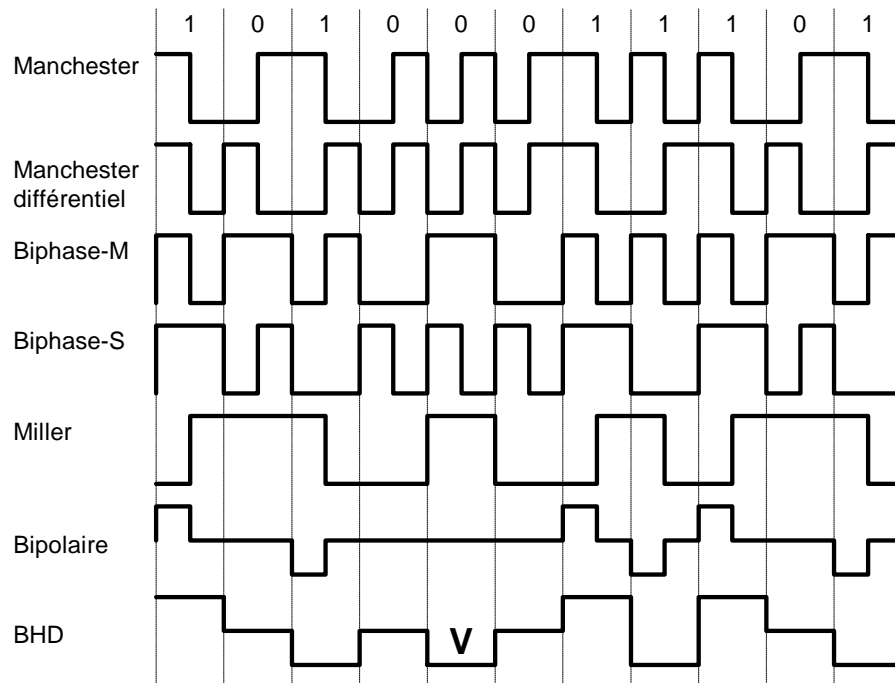


Figure 5-9 : Quelques modes de transmission simples

Les modes Manchester et autres codes biphases ont au moins une transition par bit codé, ce qui rend facile la synchronisation de circuit récepteur. Cependant, cela se fait au coût d’une bande passante plus grande (le double de celle requise pour un code NRZ).

Lectures suggérées :

Pour plus de détails sur ces modes, lire la section 3.3.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Pour ceux qui préfèrent une approche formelle, lire la section 5.1 de *Systèmes de télécommunications* de P-G FONTOLLIET.

Autre complément de lecture : la section 7.6 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

5.2.6 Problèmes de transmission en bande de base

Les canaux de transmission ne sont jamais parfaits ; ils introduisent des variations non désirées sur les signaux qu'ils transportent. Lorsque le canal et les données sont de nature **analogique**, cela introduit du **bruit** dans le message. Plus la distance est grande, plus le signal est déformé. En utilisant des amplificateurs (avec filtre approprié), on arrive généralement à réduire l'impact du canal. Mais en bout de ligne le message se retrouve perturbé car le filtre ne peut pas toujours déterminer si les petites variations de signal proviennent de la source ou des perturbations du canal.

Au contraire, avec la transmission **numérique**, on peut éliminer les perturbations du réseau (jusqu'à une certaine limite). Ceci est possible car le signal est restreint à une séquence de signaux de base qui ont des formes prédéterminées. Quand un filtre pour signal numérique observe un signal perturbé, il analyse le signal reçu et retrouve les éléments de signal qui ont été produits à l'origine. Si le filtre est en fin de course, il délivre au destinataire le message ainsi corrigé. Si le filtre est en milieu de parcours (pour couvrir de longues distances), il régénère alors chacun des éléments de signal et retransmet un signal exempt de bruit vers le destinataire. Voir la Figure 3-7.

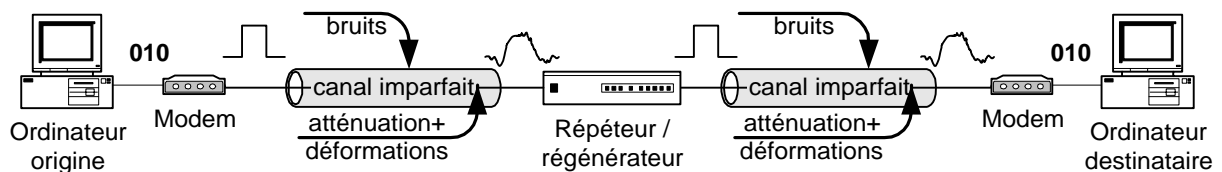


Figure 5-11 : Régénération du signal dans un réseau numérique

Voici une description sommaire des principaux problèmes rencontrés en transmission numérique (voir la Figure qui illustre ces anomalies).

- ✧ **affaiblissement** ou **atténuation** : le signal arrive plus faible et, lorsque l'affaiblissement dépend de la fréquence, le signal subit des distorsions non linéaires qui créent diverses interférences harmoniques.

- ✧ **amortissement** : le canal résiste aux changements brusques de niveau de voltage, ce qui arrondit l'épaulement des signaux et peut causer une mauvaise lecture.
- ✧ **retard** : le signal arrive en plusieurs copies avec décalage entre les copies ; ou bien les diverses composantes du signal n'arrivent pas en même temps. Dans tous les cas, la partie en retard interfère avec les éléments qui le suivent.
- ✧ **interférences** (avec d'autres signaux sur le même support) sur le même câble ou sur câbles voisins : diaphonie causée par des perturbations électromagnétiques diverses (*crossstalk*), interférences des échantillons suivants sur un support multi-canaux TDM.
- ✧ **auto-interférences** : écho, repliement du signal sur lui-même suite à une quantification mal filtrée ;
- ✧ **bruit blanc et impulsionnel** : variations aléatoires continues ou occasionnelles du signal (bruit thermique, atmosphérique, cosmique ou provenant d'autres composants de l'appareil ou d'autres appareils) ;
- ✧ **bruit de quantification** : lorsque le signal traverse un réseau qui numérise le signal émis.

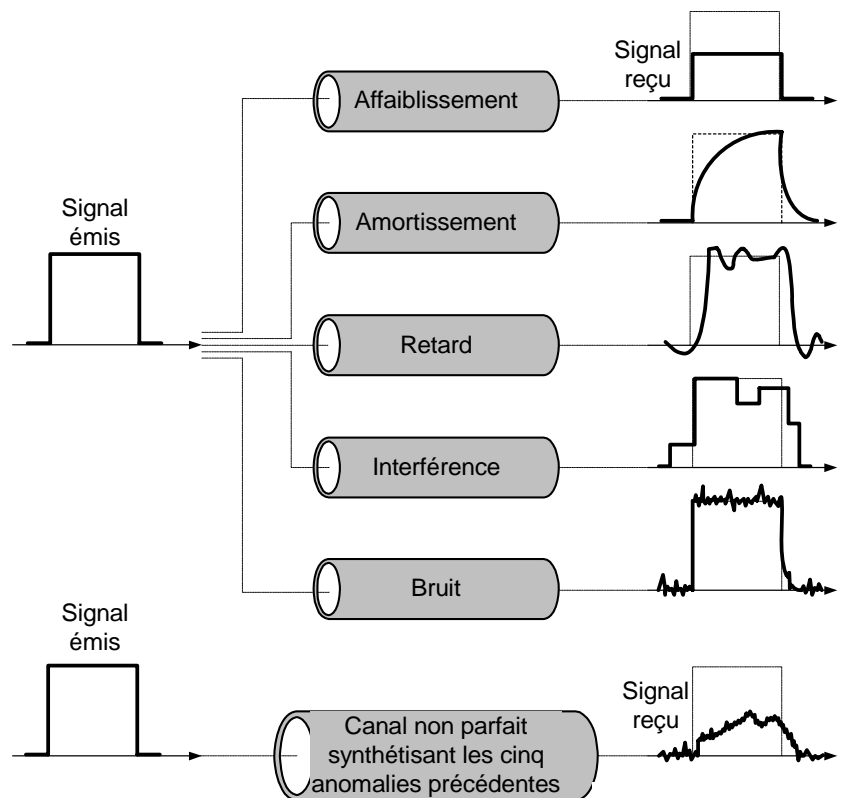


Figure 5-12 : Cinq causes de détérioration d'un signal numérique et signal résultant

Lectures obligatoires :

Lire la section 4.2 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

Lire également la section 2.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Lectures suggérées :

Le chapitre 2 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

Les sections 2.4, 5.2 et 5.3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

La section 7.4 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

5.2.7 Transmission à distance

En simplifiant, on peut résumer la transmission en bande de base en disant que cela consiste à mettre sur un support un niveau de tension, haut ou bas, à le maintenir pendant un bref instant, puis à refaire ce choix pour chaque bit à transmettre.

Ce type de transmission se caractérise par de fréquents et brusques changements de tension. Ceci est excellent pour aider le circuit de décodage à se synchroniser sur l'émetteur. On s'assure ainsi que la lecture du niveau de tension de chaque élément se fait au bon moment, c'est-à-dire lorsque la tension est stable (à mi-temps de l'élément).

Les circuits capables de générer de tels signaux et ceux capables de les décoder sont (relativement) simples à réaliser et bon marché. C'est ce qui explique le succès de ces méthodes, d'autant plus qu'au début des télécommunications la micro-électronique n'existait pas encore et les circuits complexes étaient très dispendieux.

Un problème survient lorsqu'on doit transmettre des données à grande distance. En effet, les signaux électriques s'atténuent avec la distance jusqu'à un point où ils deviennent trop faibles pour être décodés de façon fiable. En plus de s'affaiblir, ils sont déformés de diverses façons (voir la section précédente).

Pour transmettre plus loin, on peut ajouter sur le trajet des circuits qui amplifient le niveau du signal, avec reconnaissance et régénération des éléments de signaux, tel qu'illustré à la Figure 3-7. Malheureusement ces circuits sont dispendieux.

Un signal en bande de base qui serait placé directement comme source d'une antenne émettrice produirait une onde électromagnétique limitée aux variations de tension, donc la

Pour économiser des coûts, il devient intéressant d'utiliser des circuits amplificateurs plus simples, sans régénération des éléments de signal. Le problème est que ces circuits réagissent mal aux tensions constantes et aux transitions brusques des signaux en bande de base. De plus, comme le taux d'affaiblissement dépend de la fréquence, le signal

dérivée du signal. Ceci fait disparaître tous les paliers de tension, là où l'information est codée.

devient de plus en plus déformé avec la distance. La solution : utiliser les techniques de modulation de signal tel qu'expliqué ci-après.

Par ailleurs, pour transmettre sur de longues distances, on peut également utiliser des supports éthériques (c'est-à-dire non physiques). Toutefois, cela ne peut pas se faire avec des signaux en bande de base. La solution : utiliser les techniques de modulation de signal tel qu'expliqué ci-après.

5.3 Transmission avec modulation

Noter que certains protocoles utilisent d'autres formes d'ondes pour moduler les signaux à transmettre. Par exemple CEBus utilise un balayage de fréquences (Chirp) pour transmettre sur courant porteur.

La modulation de signal est utilisée depuis très longtemps en radiophonie (technologies AM et FM). Le principe est simple : le circuit de l'émetteur combine deux signaux : le signal source contenant l'information à transmettre et un signal de forme sinusoïdale qu'il génère à l'intérieur. Plus précisément, l'émetteur modifie l'amplitude, la fréquence ou la phase du sinus en prenant comme guide le niveau de tension du signal source. On parle alors de **modulation** du signal source.

La Figure illustre trois façons de *moduler* ainsi le signal : la *modulation en amplitude*, ASK (*Amplitude Shift Keying*), la *modulation en fréquence*, FSK (*Frequency Shift Keying*) et la *modulation de phase*, PSK (*Phase Shift Keying*). Cette figure illustre la modulation de signaux binaires. On peut dans le même esprit moduler des signaux N-aires en prenant plusieurs valeurs de modulation. Par exemple, on peut coder un signal quaternaire en utilisant quatre phases différentes (0° , 90° , 180° et 270°). Ce type de modulation permet de coder deux bits du message à la fois. Il se nomme QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*).

5.3.1 Combinaison de modulations

Ces trois techniques de modulation peuvent être combinées. Par exemple la technique QAM combine la modulation en amplitude et la modulation de phase pour augmenter le débit de transmission. On peut illustrer ces deux paramètres sur un graphique en deux dimensions avec l'angle étant la phase et la distance au centre étant l'amplitude. Voir la Figure . Avec le mode 8-QAM, chaque élément de transmission transporte 3 bits de données ($2^3 = 8$). Avec le mode 16-QAM, chaque élément transporte 4 bits ($2^4 = 16$). Noter qu'il existe d'autres modèles de modulation 16-QAM, en particulier une variante qui combine 8 phases et 4 amplitudes, et qui utilise 16 des 32 possibilités pour coder les messages.

Lecture obligatoire :

Lire à ce sujet la section Multilevel modulation methods (pages 66 à 68) de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems* de Fred HALSALL.

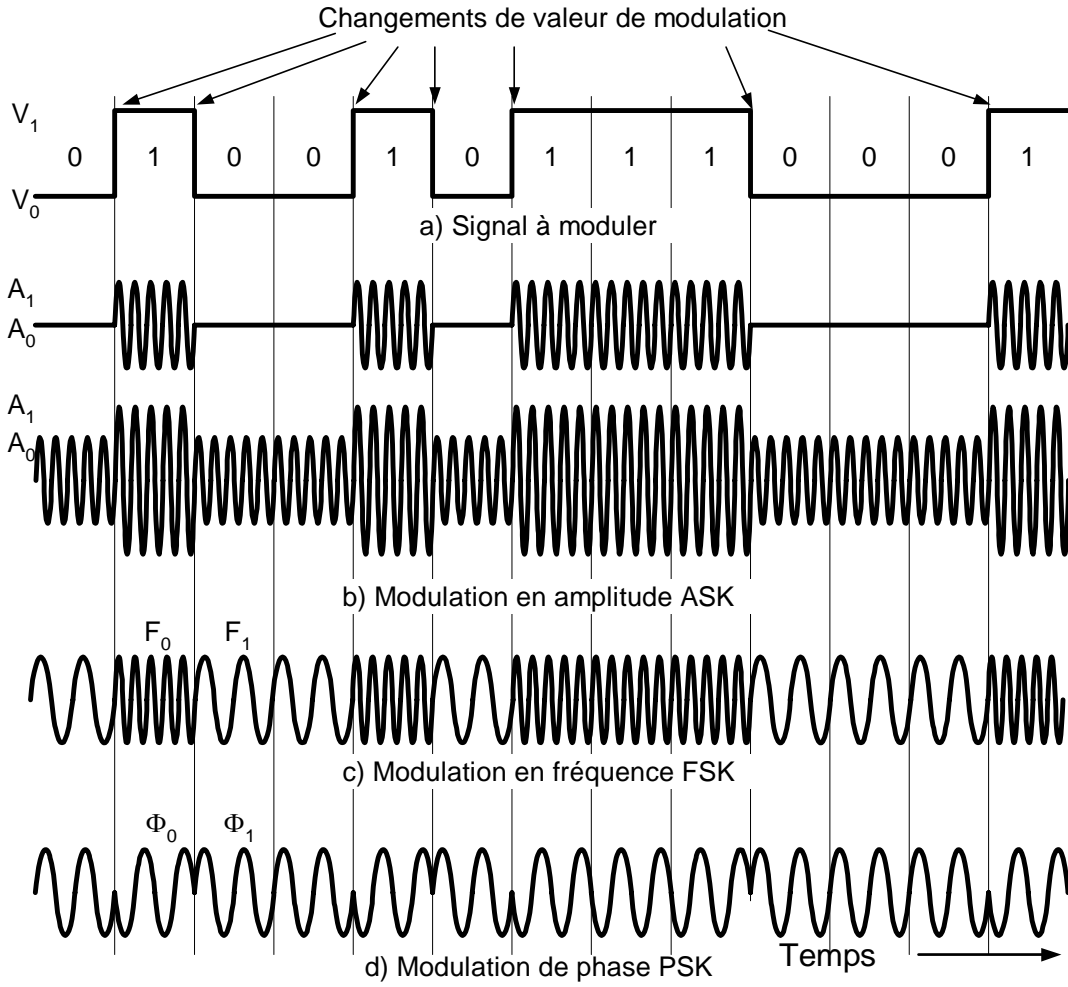


Figure 5-13 : Types de modulation de base

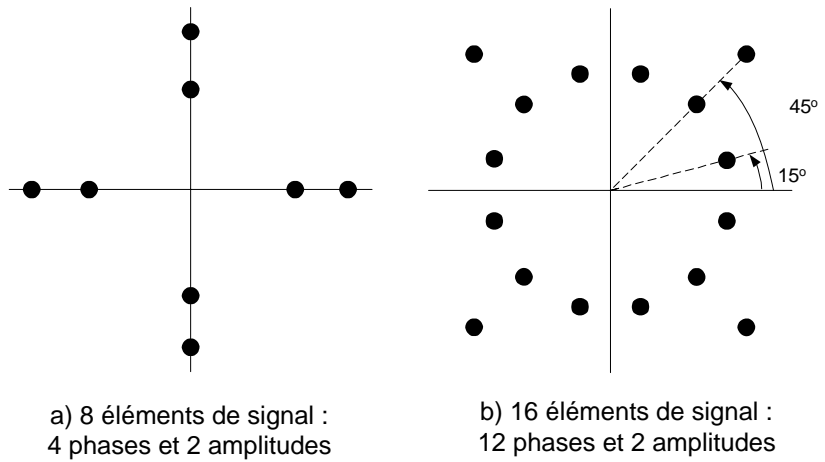


Figure 5-14 : Modulation combinée de type 8-QAM et 16-QAM

Une autre dimension des transmissions avec modulation est le domaine des techniques de spectre étendu (*Spread Spectrum*). Il s'agit de modes d'encodage basés sur des séquences complexes de signaux. Ces techniques offrent une robustesse particulière aux bruits et autres interférences. On les utilise par exemple pour transmettre sur courant porteur dans les protocoles CEBus et aussi dans les communications radio-numériques.

Lecture suggérée :

Pour en savoir plus sur le sujet, lire la section 6.4.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Une application majeure des techniques de modulation est la transmission de données sur le réseau téléphonique. On utilise pour cela un appareil appelé *modem* (modulateur / démodulateur) qui transforme le signal produit par l'ordinateur sur sa sortie série (de type NRZ-L bande de base) vers un signal modulé en QAM.

Lectures obligatoires :

Lire la section 3.5 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

Lire la sous-section *Modems* de la section 2.5.3 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

Lectures suggérées :

Comme complément d'information, lire la section 2.5.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Consulter également la section 4.2 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

Pour une description des modems téléphoniques, voir la section *Modems* (pages 21 à 25) de *Réseaux locaux, Une introduction à la communication des données et à Internet*, Armand ST-PIERRE et William STÉPHANOS, Édition Vermette inc., 1996.

Les systèmes téléphoniques utilisent plusieurs autres types de modulation des signaux : PAM, PDM, PPM et PCM. Le dernier correspond approximativement au processus de numérisation présenté à la section 5.3.4. Les autres modes intéressent plus la téléphonie que la réseautique et ne seront pas traités ici.

Lecture suggérée :

On trouve une excellente présentation de ces modes au chapitre 3 de *Télécommunications et transmission de données* de Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.

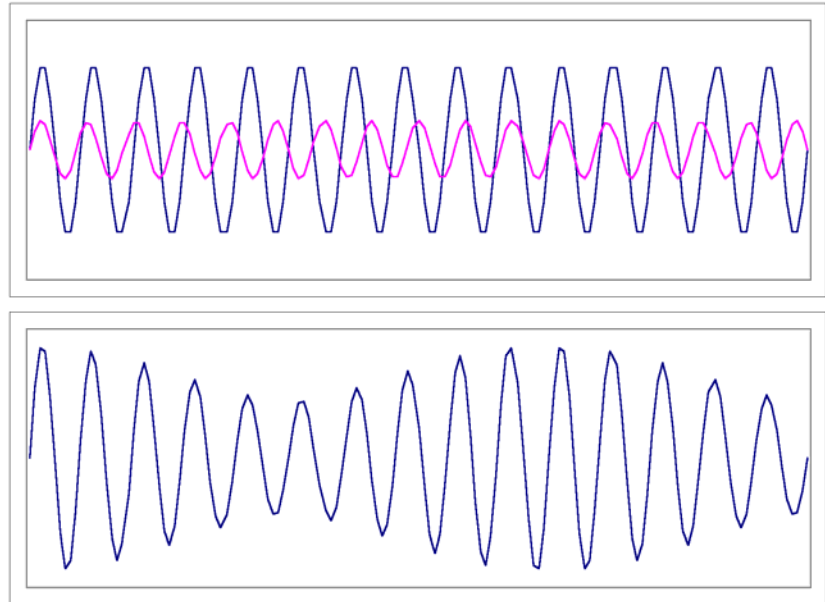
5.3.2 Problèmes de modulation

Les signaux modulés sont sensibles aux interférences, mais moins que les signaux en bande de base. Plus on utilise d'éléments de signal, plus le risque de confusion augmente. Par exemple, si l'amplitude d'un signal ASK est perturbée, cela peut provoquer des erreurs de transmission si le destinataire reçoit le mauvais niveau de signal. Les modulations FSK et PSK sont plus robustes que ASK.

Sur un canal de télévision analogique (en modulation d'amplitude) on peut observer l'effet d'un battement avec un signal interférant jusqu'à 60dB plus faible (1 / 1 000 000).

En plus d'être sensible aux fluctuations d'amplitude, la modulation ASK peut souffrir d'un problème de battement. En effet, si les porteuses de deux canaux voisins ne sont pas parfaitement synchrones, on peut avoir des interférences de type *battement*, tel qu'illustré à la Figure . Ce type d'interférences peut causer des perturbations significatives sur la porteuse d'un signal et sur le signal transmis par la même occasion. La transmission en modulation d'amplitude est particulièrement sensible à ce problème puisque le battement entre directement en conflit avec le signal. Les autres types de modulation sont beaucoup moins sensibles.

La situation est encore plus sensible lorsqu'on utilise des combinaisons de modulation. Si on se réfère au diagramme en constellation de la Figure , on comprend aisément que les perturbations combinées d'amplitude et de phase créent une zone floue (*gigue*) autour de chaque élément de signal. Lorsque les perturbations du canal sont trop fortes, la zone floue augmente au point où les éléments de signal deviennent ambigus.



Graphique du haut : deux porteuses (où la 2e a 1/3 d'amplitude et 110% de fréquence); graphique du bas : la somme des deux.

Figure 5-15 : Problème de battement entre les porteuses de deux signaux.

Lectures suggérées :

Comme complément de lecture concernant les techniques de modulation et les divers problèmes reliés, lire :

Le chapitre 8 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983

La section 10 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

5.4 Transmission à bande large

Une analogie intéressante est la capacité de l'oreille humaine d'entendre le tintement d'un triangle même si les autres instruments de l'orchestre jouent en même temps.

Lorsqu'un signal est modulé par une onde porteuse, voir la figure suivante, on crée une nouvelle dimension aux communications : la **transmission à bande large** (*broadband*). Ce type de transmission consiste à combiner plusieurs signaux sur un même support. Pour permettre après coup de distinguer les divers signaux ainsi combinés, l'émetteur utilise une porteuse de fréquences différente pour chaque signal. Le circuit récepteur peut alors décoder le signal qui l'intéresse en éliminant les autres grâce à un filtre approprié.

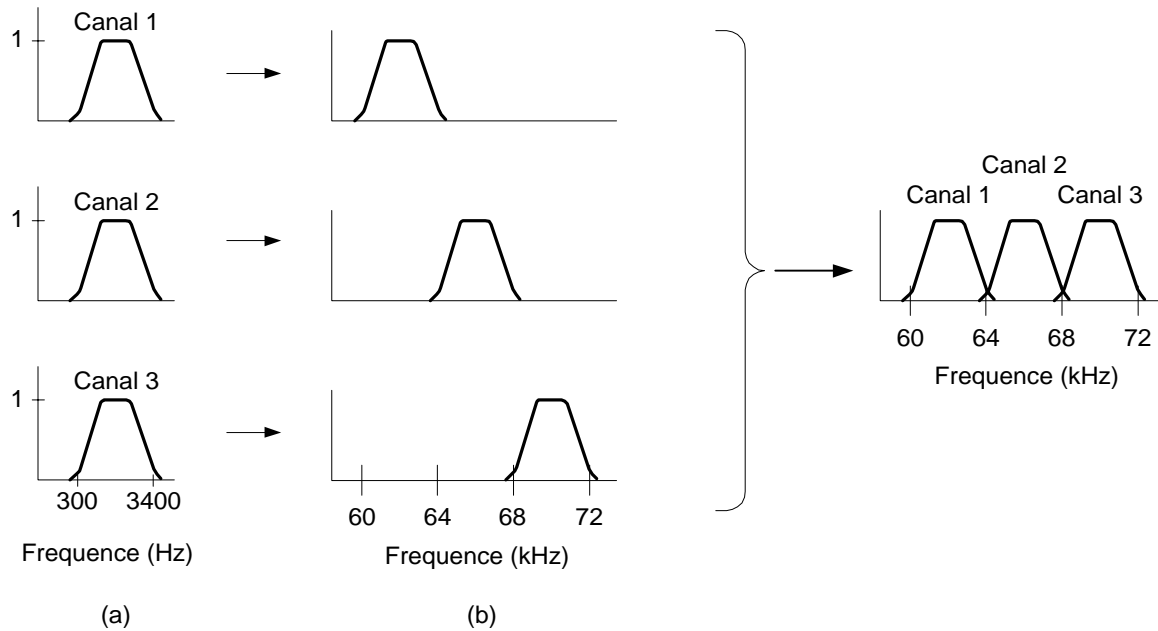


Figure 5-16 : Partage de la bande passante dans un système à bande large

La transmission à bande large apporte donc une technologie de partage d'un canal entre plusieurs signaux indépendants (FDM *Frequency Division Multiplexing*). Dans le monde analogique, cela correspond au réseau de télévision par câble : un seul câble transporte toute une série de canaux de télévision. Le téléviseur sélectionne un de ceux-ci à l'aide de son circuit de syntonisation puis le décode pour l'afficher sur son écran.

Sur les fibres optiques, en plus des techniques FDM ci-dessus, on peut profiter d'une caractéristique particulière. On peut partager une fibre entre plusieurs canaux même si ceux-ci sont en bande de base. Ceci est possible parce qu'un signal en bande de base est en fait modulé par le faisceau lumineux. Il suffit d'utiliser des sources de couleur différente pour rendre les signaux transmis complètement indépendants les uns des autres. Ceci est le concept des technologies WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Pour combiner les faisceaux lumineux à l'émetteur et les séparer à l'autre extrémité, il suffit d'utiliser un prisme et de choisir l'angle approprié pour chaque fibre entrant ou sortant. Voir la Figure .

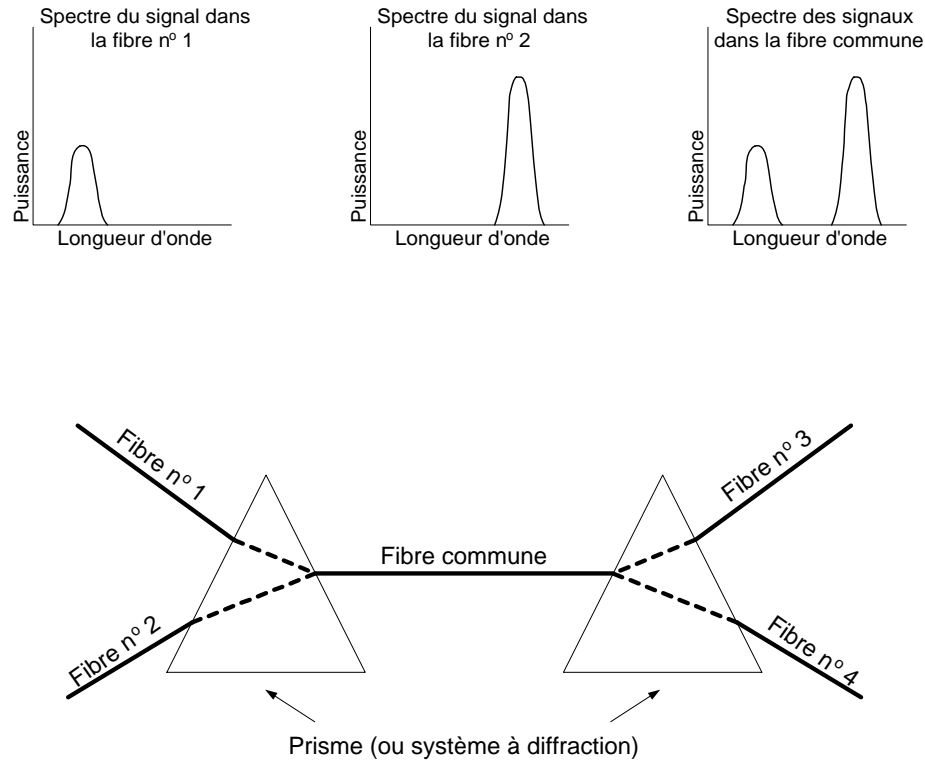


Figure 5-17 : Illustration du mode de codage WDM

5.5 Les supports de transmission

Plusieurs facteurs influent sur le choix du support à utiliser pour la transmission de données. Ces facteurs sont souvent reliés les uns aux autres, tel que le coût versus le débit, la distance versus le débit, etc. C'est le besoin de l'application et les contraintes du projet qui dicteront les choix à faire.

Les critères de sélection sont : coût, capacité de transmission, disponibilité, possibilité d'expansion, taux d'erreur, sécurité, distance, environnement, application et entretien.

Noter que le temps de réponse d'un appareil est influencé par quatre facteurs : le délai du support et le délai dans le réseau, la durée de transmission (débit), la durée de traitement de part et d'autre (puissance CPU) et la charge des appareils (nombre de tâches à exécuter en parallèle, nombre de liaisons à acheminer, etc.).

Lecture obligatoire :

Lire la section Comparaison des média de communication (pages 42 à 45) de *Réseaux locaux, Une introduction à la communication des données et à Internet*, Armand ST-PIERRE et William STEPHANOS, Édition Vermette inc., 1996.

5.5.1 Liens sériels

Lorsque deux appareils sont rapprochés et n'ont besoin que d'un débit réduit, on peut les relier par une interface simple, généralement une liaison sérielle. Plusieurs standards ont été mis au point :

- ✧ **RS-423A** : un premier fil reçoit des variations de tension pour transmettre les informations dans un sens, un second fil transmet dans le sens inverse tandis qu'un troisième est mis à la terre et sert comme référence. On peut utiliser un câble multiconducteurs ordinaire ; la portée est limitée.
- ✧ **boucle de courant de 20mA** : l'émetteur transmet le signal en fermant et ouvrant une source de courant. Chaque transmission requiert une paire de fils. Ceci peut transmettre plus loin et est moins sensible au bruit.
- ✧ **RS-422A** : le signal est transmis simultanément sur les deux fils d'une paire torsadée, mais en polarité inversée. Supporte un meilleur débit et transmet plus loin.

Les standards RS-423 et 422 décrivent les caractéristiques électriques des liaisons. On doit également spécifier le type de connecteurs, le plus souvent EIA-232D (évolution du RS-232) qui utilise théoriquement un connecteur DB-25, mais on rencontre souvent un connecteur DB-9 sur les appareils.

On retrouve également la spécification RS-449 qui utilise deux connecteurs, un DB-37 et un DB-9.

La terminaison se fait par l'ajout d'un circuit placé à la fin du câble et qui absorbe l'énergie du signal. Ceci évite d'avoir des échos sur le support.

Tableau 5-2 : Performance de quelques liaisons sérielles

type de liaison	distance (m)	débit (Kbps)
RS-423A (V.10)	10	100
(aussi EIA/RS-232)	100	10
	1000	1
boucle 20mA	1000	20
RS-422A (V.11)	10	1000
non terminé	100	100
	1000	10
RS-422A (V.11)	10	10 000
terminé	100	1000
	1000	100

Lecture suggérée :

Pour un complément d'informations, consulter la section 4.6.7 de
Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions, P.-G.
 FONTOLLIET, Dunod, 1983

5.5.2 Autres liens

L'évolution rapide des câbles de paires torsadées apportera bientôt des réseaux encore plus rapides, tel le Gigabits Ethernet.

Pour les réseaux VSAT (Very Small Aperture Terminals) il faut doubler ce temps car la liaison passe par une station pivot terrestre qui capte, amplifie et retransmet les signaux émis par les terminaux.

Lorsque les besoins exigent un débit plus élevé sur une plus grande distance (ou l'un des deux), on doit choisir alors un canal plus performant. On peut choisir une interface plus évoluée, telle une liaison Ethernet rapide (*fast Ethernet*) sur un câble de catégorie 5 ou plus (jusqu'à 100 Mbps). On peut aussi changer de support et opter pour un câble coaxial (jusqu'à 500 Mbps), de la fibre optique (jusqu'à 10 Gbps), des ondes radio de type cellulaire (jusqu'à 2 Mbps), des faisceaux hertziens (jusqu'à 140 Mbps), des ondes infrarouges (jusqu'à 4 Mbps).

Si la distance à parcourir est très grande ou si on doit rejoindre de nombreux destinataires, on peut opter pour une liaison satellite (jusqu'à 50 Mbps), dans la mesure où le délai de transmission d'une demi seconde n'est pas un inconvénient.

Lectures obligatoires :

Lire les sections 2.2 et 2.4 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

Lire la section 2.3 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

Lectures suggérées :

La section 2.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

La section 8 du 8^e chapitre de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

La section 9.6.1 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

La page 29, *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.

5.6 Caractéristiques des lignes publiques

Les lignes téléphoniques publiques sont souvent utilisées en réseautique pour établir certaines liaisons distantes. Il est donc très important de connaître les caractéristiques de ce support.

5.6.1 Lignes commutées

Telle que perçue par l'abonné résidentiel, la ligne téléphonique est un support dédié aux communications parlées avec une bande de fréquence limitée (300 Hz à 3400 Hz). Ceci correspond aux caractéristiques de la partie **boucle locale** de l'abonné. Passé cela, lorsqu'on approche de la centrale téléphonique, la voix est numérisée

puis acheminée à la centrale sur une liaison partagée avec les autres abonnés. Chaque abonné se voit attribuer une partie de la bande passante qui correspond à 64 Kbps.

Ce regroupement de lignes d'abonnés se fait généralement sur des liens T1 qui comportent 24 communications en parallèles. Les liaisons T1 se regroupent encore en liaisons T2 puis T3. (Noter qu'en Europe on utilise plutôt des liaisons E1, E2, E3 et E4 pour regrouper les liaisons téléphoniques.)

La transition entre la boucle locale analogique et la liaison numérique cause une distorsion de quantisation, ce qui limite la capacité de transmission à environ 33,6 Kbps.

Par contre, s'il faut relier deux établissements commerciaux, on peut généralement profiter d'une ligne numérique sur place. À l'aide d'une interface appropriée (RNIS), on peut utiliser la pleine bande passante du circuit, soit 64 Kbps.

La situation hybride correspond à une liaison entre un modem à domicile, sur boucle locale analogique, et un commerce doté d'une liaison numérique. Dans un tel cas, on peut augmenter la débit de communication de la centrale vers le client à 56 Kbps. Le lien inverse demeure limité à 33,6 Kbps. Ceci correspond à la nouvelle technologie des modems dits à 56 Kbps.

La situation la plus efficace correspond à un abonné qui demande une ligne numérique jusque chez lui. Il bénéficie alors d'une double connexion à 64Kbps. On appelle cela un **réseau numérique à intégration de service**, RNIS (*ISDN*). Lorsque la liaison réservée pour la parole est inutilisée, elle peut servir à la transmission numérique, pour un total de 128 Kbps.

L'abonné peut également demander une connexion de type **lien numérique à paires asymétriques** LNPA (*ADSL*). La famille de services LNPA est prévue pour offrir des services de télévision à la demande. Dans sa version de base, le service permet un débit de 1,5 Mbps vers le consommateur mais un retour limité à 16 kbps. La version classique transporte 9 Mbps vers l'abonné et retourne 1,5 Mbps vers la centrale. Des versions plus rapides devant atteindre jusqu'à 52 Mbps sont annoncées.

5.6.2 Lignes dédiées

Lorsqu'une communication doit être permanente, ou presque, on peut acheter ou louer une ligne dédiée. Ces lignes sont spécialement ajustées pour permettre une transmission de meilleure qualité du canal.

Lectures obligatoires :

Lire la section 2.7 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

La section *Transmission câblée et Transmission non câblée* (pages 37 à 41) de *Réseaux locaux, Une introduction à la communication des données et à Internet*, Armand ST-PIERRE et William STEPHANOS, Édition Vermette inc., 1996.

Lectures suggérées :

Pour voir un schéma de la connexion au réseau téléphonique et des problèmes de ces réseaux (*echo, signing, distortion de phase*), lire : la section 8 du chapitre 6 et la section 10.3 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

Pour consulter les procédures permettant de vérifier si le lien fonctionne correctement, consulter :

La section 8 du chapitre 11 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

La section 9.10 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

Pour un complément d'information, se référer à la section 15.3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

On peut également consulter la section 2 du chapitre 5 et la section 8.2 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.

5.7 Synthèse

<à venir>

5.8 Programme de lecture

Lectures obligatoires

Section 2.1 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.

- Section 4.5 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Section 4.2 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Section 2.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section *Multilevel modulation methods* (pages 66 à 68) de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Sous-section *Modems* de la section 2.5.3 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4e édition, PrenticeHall, 2003.
- Section *Comparaison des média de communication* (pages 42 à 45) de *Réseaux locaux, Une introduction à la communication des données et à Internet*, Armand ST-PIERRE et William STÉPHANOS, Édition Vermette inc., 1996.
- Sections 2.2 et 2.4 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
- Section 2.3 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 2.5 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 2.7 de *Réseaux*, Andrew TANENBAUM, 4^e édition, Pearson Education, 2003.
- Section *Transmission câblée et Transmission non câblée* (pages 37 à 41) de *Réseaux locaux, Une introduction à la communication des données et à Internet*, Armand ST-PIERRE et William STÉPHANOS, Édition Vermette inc., 1996.

Lectures suggérées

- Section 3.5.3 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992).
- Section 4.3 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Section 4.1 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- Section 2.2.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 3.3.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 5.1 de *Systèmes de télécommunications*, P-G FONTOLLIET.
- Section 7.6 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Chapitre 2 de *Télécommunications et transmission de données*, Samuel PIERRE et Marc COUTURE, Eyrolles, 1992.
- Sections 2.4, 5.2 et 5.3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.

- Section 7.4 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Section 6.4.2 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 2.1 de *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 8 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Section 9.6.1 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- Section 8 du chapitre 6 et section 10.3 du chapitre 8 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Section 8 du chapitre 11 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- Section 9.10 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- Section 15.3 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983.
- Section 2 du chapitre 5 et section 8.2 du chapitre 9 de *Telecommunications System Engineering*, Roger L. FREEMAN, John Wiley & Sons inc. 1989.
- La page 29, *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, Fred HALSALL, Addison-Wesley, 1996.
- Section 4.6.7 de *Systèmes de Télécommunications, Bases de transmissions*, P.-G. FONTOLLIET, Dunod, 1983