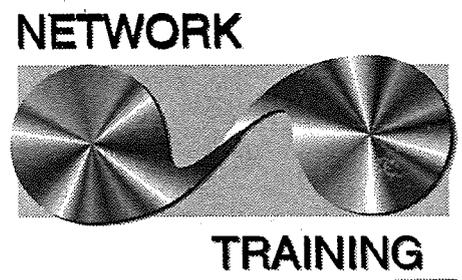


Transmission de données



Cours de base

Edition décembre 1999

swisscom
| | | | | ■
Network Training
Marcel Butty

Transmission de données

Cours de base

Introduction aux techniques et protocoles utilisés dans la transmission de données. Ce cours est destiné au personnel technique de l'entreprise Swisscom SA.

Auteur:

Marcel Butty

avec la contribution de:

Christian Bersier

Bibliographie

Traité d'électricité volume XVIII

Pierre-Gérard Fontolliet

Téléinformatique

Ecole d'ingénieurs de Fribourg

Réseaux Architectures, protocoles, applications

Andrew Tanenbaum

© 1999, Swisscom SA, Berne, <http://swisscom.com>

Tous droits réservés. Aucun extrait de cette documentation ne peut être reproduit sans autorisation préalable.

1. GÉNÉRALITÉS	3
1.1 PRINCIPE DE LA TRANSMISSION DE DONNÉES	3
1.1.1 Signaux numériques et analogiques	4
1.1.2 Liaison point à point	6
1.1.3 Suppression et annulation d'échos	7
1.1.4 Liaison multipoints	8
1.1.5 Type de transmission	8
1.1.6 Transmission de données asynchrone	9
1.1.7 Transmission synchrone:	9
1.1.8 Appellation des équipements de transmission	10
2. CODAGE	11
2.1.1 Codage avec des mots de même longueur.	12
2.2 CODAGE DE SOURCE	17
2.2.1 Codages statistiques	18
2.2.2 Les algorithmes de type dictionnaire	22
2.2.3 Les Méthodes de compression avec pertes	23
2.2.4 Codage audio	23
2.2.5 codage d'images	23
2.2.6 Codage d'images animées	24
2.3 CODAGE DE VOIE	25
2.3.1 Protection des données contre les erreurs	25
2.3.2 Détection d'erreurs	26
2.3.3 Correction d'erreurs	27
2.3.4 Techniques utilisées pour la détection des erreurs	27
3. MODES DE TRANSMISSION	32
3.1 TRANSMISSION EN BANDE DE BASE	32
3.1.1 Codage de canal	32
3.1.2 Réduction de la vitesse de modulation	34
3.2 MODULATIONS	35
3.2.1 Modulations numériques	36
3.2.2 Modulations analogiques discrètes	37
4. ÉQUIPEMENTS DE TRANSMISSION DE DONNÉES	43
4.1 MODEM	43
4.2 MODEM SUPRAVOCAL	47
4.3 MODEMS EN BANDE DE BASE ET LIGNES LOUÉES	48
4.4 MODEMS LARGE BANDE	50
4.5 INTERFACES	51
5. INTRODUCTION AU MODÈLE DE RÉFÉRENCE OSI	55

6. FONCTIONS ET PROTOCOLES DE COUCHE 2	58
6.1.1 Accès au canal physique	59
6.1.2 Délimitation de trame	60
6.1.3 Détection et correction d'erreurs	62
6.1.4 Régulation de flux	63
6.1.5 Accès au canal	64
6.2 PROTOCOLES DE COUCHE LIAISON DE DONNÉES	68
6.2.1 Protocoles élémentaires	68
6.3 PROTOCOLE HDLC	72
6.3.1 Introduction:	72
6.3.2 Structure de la trame	72
6.4 PPP (POINT TO POINT PROTOCOL)	73
7. FONCTIONS ET PROTOCOLES DE COUCHE 3	74
7.1 COMMUTATION DE PAQUETS X.25	77
7.1.1 Gestion de circuits virtuels	78
7.2 INTRODUCTION AU PROTOCOLE IP	80
7.2.1 Historique de TCP/IP et Internet	80

1. Généralités

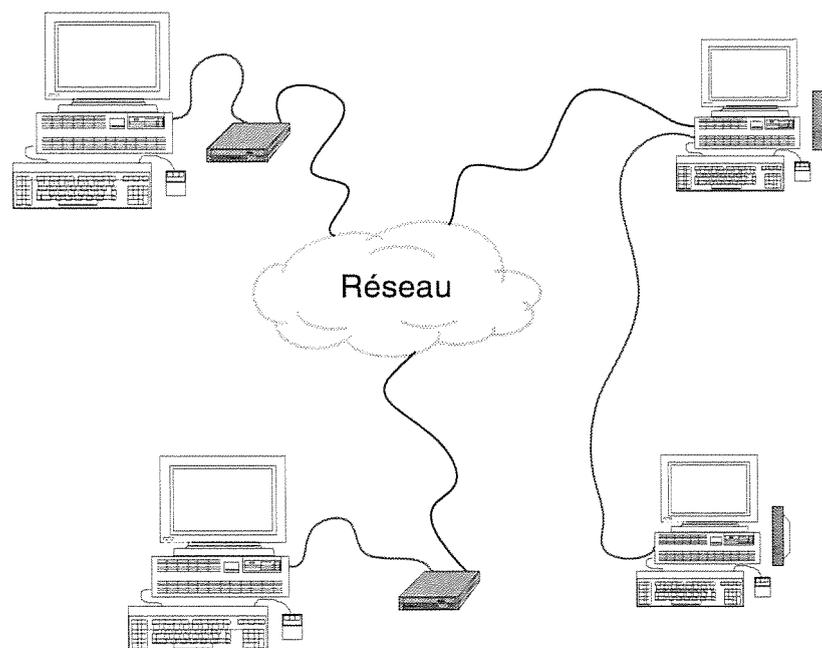
1.1 Principe de la transmission de données

La transmission de données traite de l'échange de données entre ordinateurs ou terminaux. Les données à transmettre sont de type numérique dès la source : texte, images, commandes, télémessures, alarmes, etc.

Exemples :

- communications interactives entre terminaux et ordinateurs;
- transfert de fichiers;
- consultation de banque de données à distance;
- courrier et messagerie électronique;
- accès Internet;
- téléaction (télécontrôle, télémessure, télécommande, télésurveillance ...).

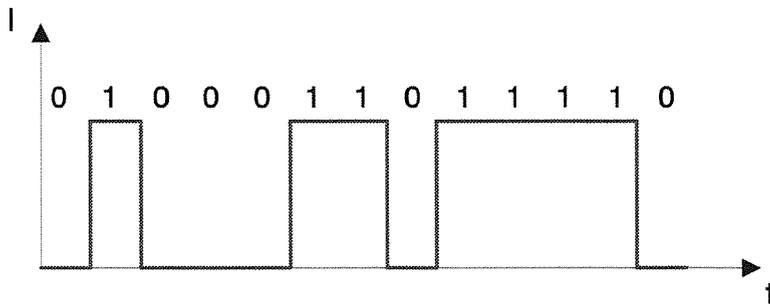
Dans ce contexte, on parle également de téléinformatique ou de télématique pour désigner les services associant les télécommunications et l'informatique.



1.1.1 Signaux numériques et analogiques

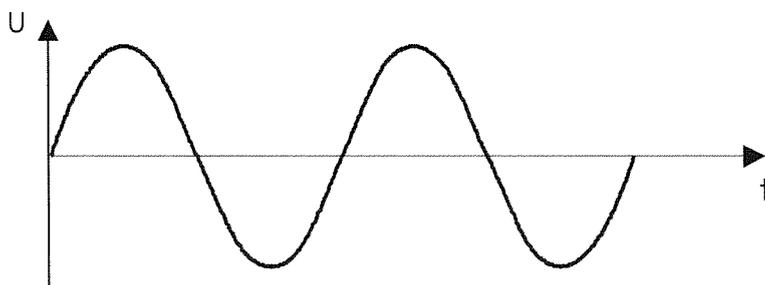
Les données sont transmises sur un support de transmission sous formes de signaux électriques, lumineux ou radio. Ces signaux peuvent être de deux types:

Signal numérique



- Un bit est la plus petite unité d'information numérique.
- Deux états binaires possibles ("0" ou "1").
- Un groupe de bits représente un caractère ou un signe.
- Un groupe de 8 bits est un octet (byte).
- La vitesse de transmission s'exprime généralement en bits par seconde [bit/s].

Signal ANALOGIQUE



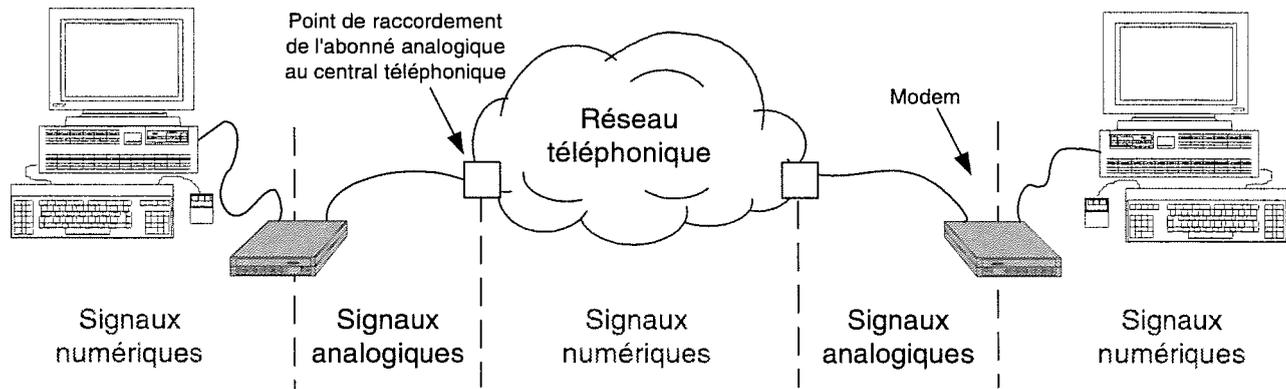
- Évolution constante du signal dans le temps.
- Possibilité d'adopter un nombre infini de valeurs dans des limites déterminées.
- Un signal analogique peut être défini par ses grandeurs électriques (courant [A], tension [U], fréquence [Hz]).

Le PSTN (Public Switched Telephone Network) ou réseau téléphonique public commuté a été conçu à l'origine pour le transport de la voix, soit de signaux analogiques de fréquences comprises entre 300Hz et 3400Hz.

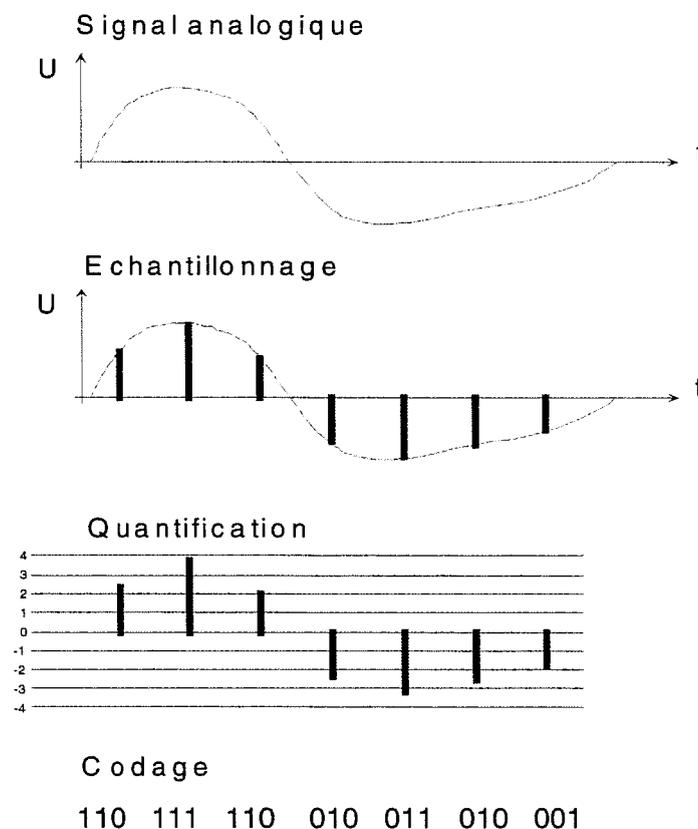
Conversion de signaux numériques en signaux analogiques

Un signal numérique ne peut pas être envoyé sur une ligne téléphonique analogique, il doit préalablement être converti en un signal analogique compatible avec la ligne en question. L'adaptation d'un signal numérique en un signal analogique est effectuée par un équipement de transmission appelé modem.

Le graphique suivant représente la répartition des signaux numériques et analogiques.



De même, un signal analogique ne peut pas être transmis tel quel sur un réseau numérique. Le signal analogique doit préalablement être adapté au réseau de transmission, par exemple en lui appliquant le codage MIC (Modulation par Impulsion et Codage = PCM ; Pulse Code Modulation).

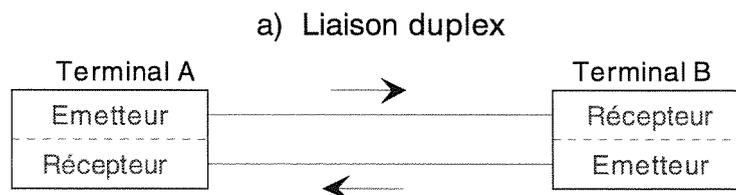


1.1.2 Liaison point à point

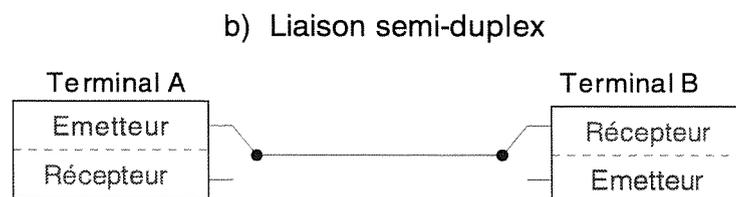
Une liaison point à point relie deux terminaux (ordinateurs, PC, ...etc).



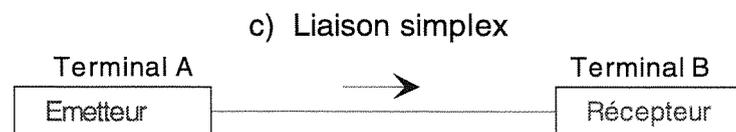
Dans le cas d'une liaison point à point, l'échange de données peut répondre à trois modes distincts:



Dans le cas d'une liaison duplex intégral (full duplex), l'échange de données a lieu simultanément dans les deux sens. Ce mode utilise soit un support de transmission propre à chaque canal de transmission, soit une transmission simultanée bidirectionnelle sur le même support. La deuxième méthode nécessite la mise en application d'un système d'annulation d'écho pour une transmission en bande de base ou d'un multiplexage FDM réservant à chaque canal une largeur de bande propre pour la transmission de signaux analogiques.



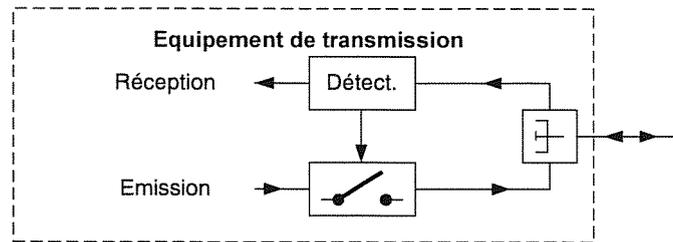
Dans le mode semi-duplex (half duplex), la transmission de l'information a lieu alternativement dans chaque sens (méthode Ping-Pong). Chaque terminal est à tour de rôle émetteur et récepteur.



On parle de mode simplex dans le cas de communication exclusivement unidirectionnelle.

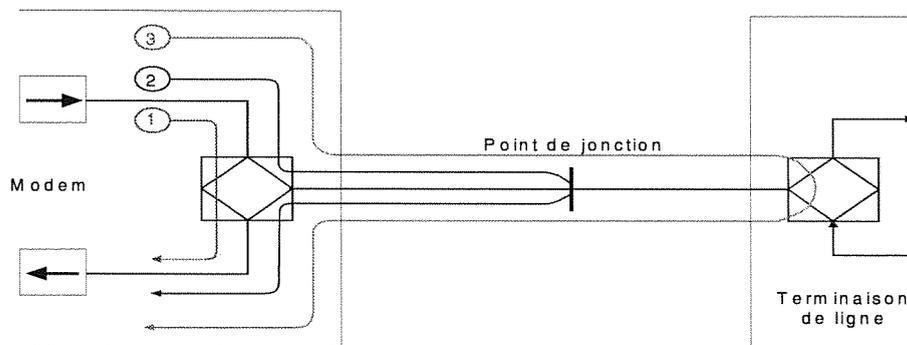
1.1.3 Suppression et annulation d'échos

La **suppression d'échos** est une technique qui consiste à interrompre une des directions de la transmission lorsqu'un signal est détecté dans l'autre direction. Le mode duplex est ainsi remplacé par un mode semi-duplex automatique.



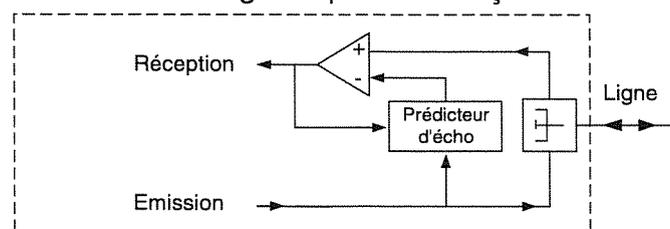
La perte du mode duplex, acceptable en dialogue alterné (par ex. en téléphonie), restreint cependant les possibilités en télématique, (transmission de données). Pour maintenir un mode duplex, il est nécessaire d'activer une technique d'annulation d'échos.

Des échos apparaissent essentiellement à trois endroits sur la voie de transmission.



- 1) L'écho rapproché, quand le signal d'émission parvient directement au circuit de réception par le terminer local. Il est généré par un mauvais équilibrage ou un défaut du terminer local.
- 2) L'écho réfléchi aux points de jonction de la ligne. Il est dû à la différence d'impédance entre deux tronçons de ligne constitués de câbles différents.
- 3) L'écho distant, réfléchi depuis le terminer distant. Il est généré par un mauvais équilibrage du terminer distant.

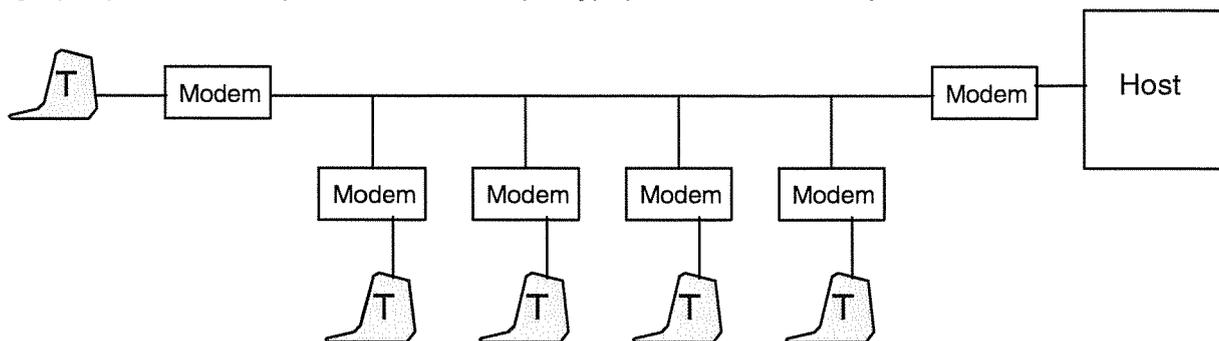
L'**annulation d'échos** consiste pour le récepteur à soustraire du signal reçu les échos décrits précédemment. L'annuleur d'échos anticipe par un calcul, généralement auto-adaptatif, la forme des signaux d'écho et les soustrait des signaux perturbés reçus.



L'annulation d'échos permet d'établir une liaison en bande de base en mode duplex entre deux stations sur un support de transmission unique.

1.1.4 Liaison multipoints

Le graphique suivant représente un exemple typique de liaison multipoint.



A la différence des liaisons point à point, il faut définir pour les liaisons multipoints des règles permettant aux équipements raccordés d'accéder à la ligne ou de communiquer entre eux. On parle alors de technique d'accès. Les règles de communication sont appelées protocoles.

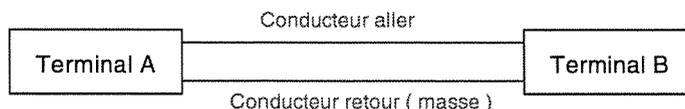
Le protocole définit les règles de communication entre entités paires du modèle OSI. Différents protocoles de couche 2 et 3 seront abordés dans ce cours.

1.1.5 Type de transmission

Il est possible de transmettre des données en série ou en parallèle. La transmission série est de préférence utilisée pour couvrir de grandes distances entre les stations de transmission, alors que la transmission parallèle offre des débits plus élevés sur de courtes distances.

Transmission série

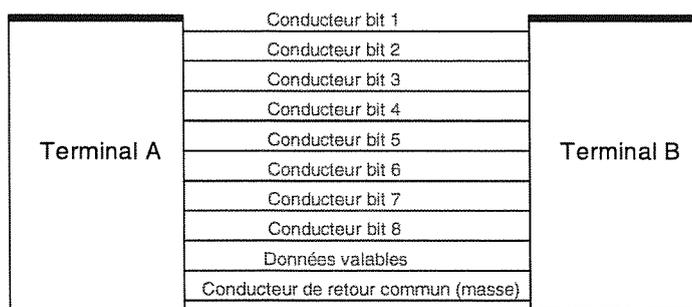
La transmission série est caractérisée par l'émission successive des bits de données sur deux conducteurs au minimum.



Exemples : RS 232, V.24/28, réseaux informatiques, transmission de données sur les réseaux Swisscom.

Transmission parallèle

Dans le cas d'une transmission parallèle, un groupe de bits est transmis simultanément. Ce type de transmission nécessite au minimum un nombre de conducteurs correspondant aux nombres de bits transmis simultanément +2.



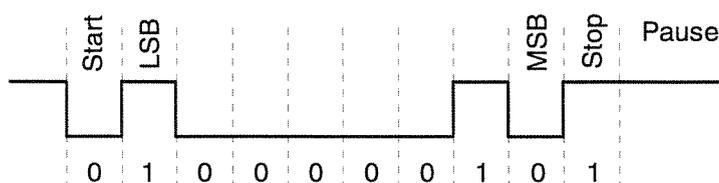
Exemples : Centronics, bus internes des ordinateurs, bus SCSI, etc.

1.1.6 Transmission de données asynchrone

Dans le cas d'une transmission asynchrone, les bits sont envoyés en groupes définis représentant des signes ou des caractères déterminés. Pour permettre à la station réceptrice d'identifier correctement cette succession de bits, des informations sont ajoutées au début et la fin de chaque caractère. Ces informations complémentaires sont appelées respectivement bits de départ (start bit) et bits d'arrêt (stop bit). La transmission est donc effectuée caractère par caractère, chaque caractère étant précédé d'un ou plusieurs bits start et suivi d'un ou plusieurs bits stop. Les horloges ne sont pas synchronisées, leur fréquence doit être prédéterminée de même que la tolérance acceptée.

Exemple: Envoi du caractère A en code EBCDIC = 01000001 (41H).

Le bit le moins significatif (LSB) est envoyé en premier, juste à la suite du bit Start.



1.1.7 Transmission synchrone:

Pour augmenter l'efficacité de la téléinformatique, les caractères sont regroupés en blocs et l'émission est effectuée bloc par bloc. Dans ce cas également, il est nécessaire d'établir le synchronisme entre l'émetteur et le récepteur. A cet effet, on délimite les blocs de données par des caractères de synchronisation (SYN), de début (STX) et de fin (ETX). Des caractères de contrôle (BCC) peuvent également être ajoutés aux données utiles. Les blocs de données ont une longueur variant de quelques dizaines à plusieurs milliers de caractères en fonction de l'application. L'horloge est transmise sur une ligne séparée ou elle est reconstituée à partir du signal reçu

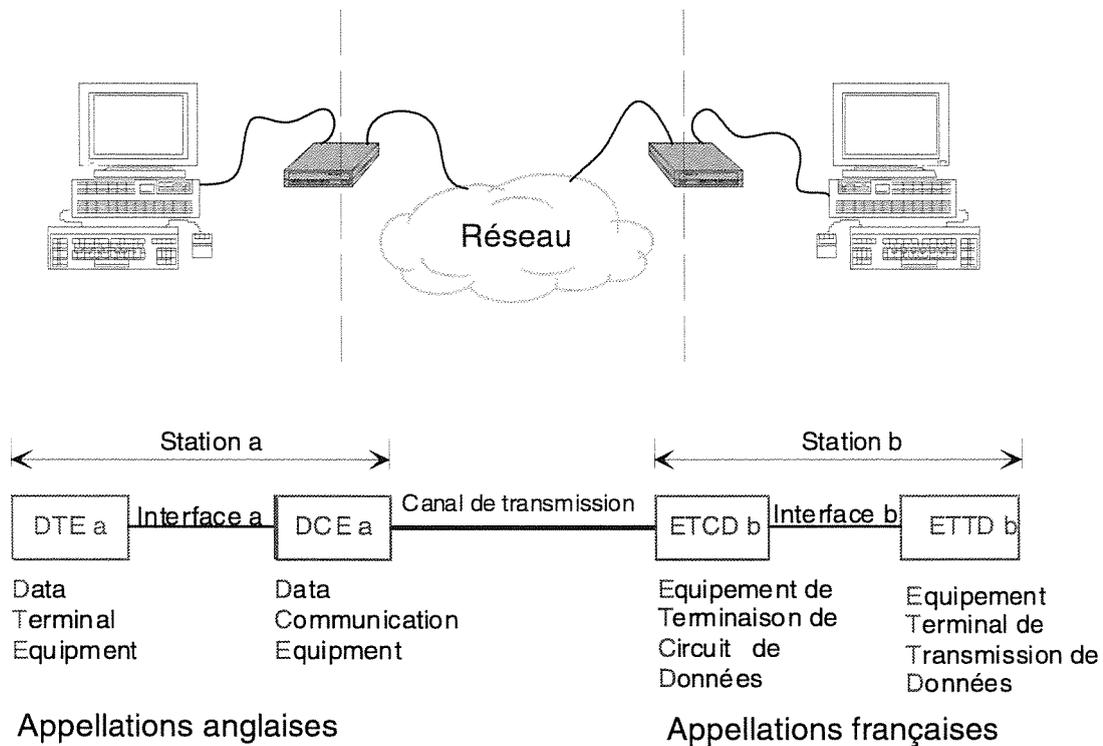


1.1.8 Appellation des équipements de transmission

Un poste de données relié à un autre par un support de transmission est appelé Equipement Terminal de Traitement de Données (ETTD) ou Data Terminal Equipment (DTE).

Un appareil qui adapte les données numériques du DTE au support de transmission est appelé Equipement de Terminaison de Circuit de Données (ETCD) ou Data Communication Equipment (DCE).

La connexion entre le DTE et le DCE est appelée interface ou jonction.



2. Codage

Le traitement informatique de l'information provenant de sources diverses, (texte, image, son, vidéo, etc.) nécessite que cette information soit représentée sous forme numérique.

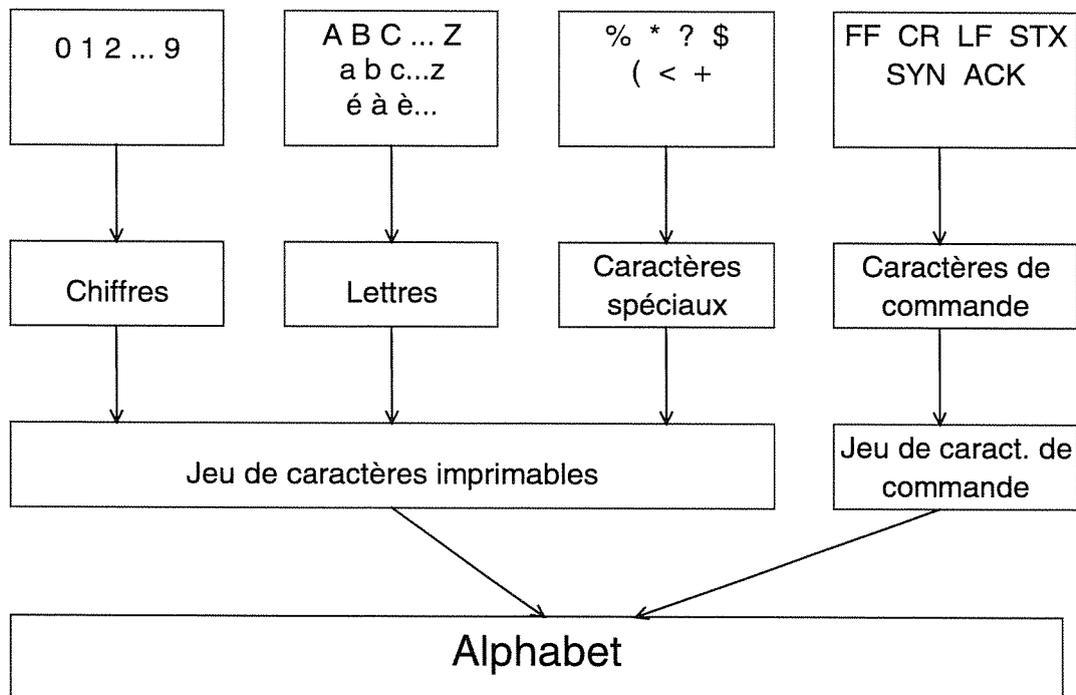
On entend par code une règle de correspondance entre deux jeux de symboles. Ainsi, le premier jeu de symbole peut correspondre aux lettres a, b et c, alors que le deuxième se compose des codes binaires 00, 01 et 10. On obtient donc un code lorsqu'on établit une correspondance entre ces deux jeux.

a = 00

b = 10

c = 01

Dans le cas d'un alphabet, la notion de symbole recouvre des lettres, des chiffres, des signes de ponctuation, des caractères de commande et d'autres caractères spéciaux.



2.1.1 Codage avec des mots de même longueur.

La longueur des mots binaires utilisés pour coder les différents symboles peut être de longueur identique ou de longueur différente. Les codes de longueurs différentes étant utilisés pour améliorer l'efficacité du code, nous analyserons tout d'abord les codes de longueurs identiques.

Le code CCITT n°2 (code BAUDOT)

Ce code a été le premier à être imaginé par Émile Baudot en 1874. Sa longueur est de 5 bits. Son défaut principal réside dans le faible nombre de combinaisons qu'il permet ($2^5 = 32$). Ce nombre ne suffit pas pour coder les lettres de l'alphabet et les chiffres. L'utilisation de 2 caractères particuliers soit : *inversion des lettres* et *inversion des chiffres* permet de désigner à tout moment dans quel sous-ensemble nous travaillons et de ce fait de dédoubler la signification des codes.

L'UIT-T (ancien CCITT) a normalisé ce code sous le terme d'alphabet télégraphique international n°2. Ce code est utilisé par les télex, il est réalisé physiquement par des perforations sur une bande de papier (représentées ici par le symbole O).

Numéro de combinaison	Rangée des lettres	Rangée des chiffres	Codage (O = perforation)					
			1	2	Tract.	3	4	5
1	A	-	O	O	o			
2	B	?	O		o		O	O
3	C	:		O	o	O	O	
4	D	⊕	O		o		O	
5	E	3	O		o			
6	F		O		o	O	O	
7	G			O	o		O	O
8	H				o	O		O
9	I	8		O	o	O		
10	J	Signal acoustique	O	O	o		O	
11	K	(	O	O	o	O	O	
12	L	)		O	o			O
13	M	.			o	O	O	O
14	N	,			o	O	O	
15	O	9			o		O	O
16	P	0		O	o	O		O
17	Q	1	O	O	o	O		O
18	R	4		O	o		O	
19	S	'	O		o	O		
20	T	5			o			O
21	U	7	O	O	o	O		
22	V	=		O	o	O	O	O
23	W	2	O	O	o			O
24	X	/	O		o	O	O	O
25	Y	6	O		o	O		O
26	Z	+	O		o			O
27	Retour du chariot				o		O	
28	Changement de ligne			O	o			
29	Inversion des lettres		O	O	o	O	O	O
30	Inversion des chiffres		O	O	o		O	O
31					o	O		
32	Espace				o			

Le code CCITT n°5 (code ASCII)

ASCII (American Standard Code for Information Interchange)

En 1963, une première version du code ASCII était définie aux USA. Les organisations internationales de normalisation (CCITT, ISO), soucieuses de définir un code universel accepté par toutes les machines (compatibilité) devaient en publier une version améliorée qui est maintenant connue sous le nom d'alphabet international n°5 (avis V.3 de l'UIT-T). Ce code, comportant 7 bits utiles, permet de représenter 128 caractères.

Binaire	Bits 765	000	001	010	011	100	101	110	111
Bits 4321	Hexa.	0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p
0001	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010	2	STX	DC2	'	2	B	R	b	r
0011	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0100	4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0101	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0110	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0111	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1000	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1010	A	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1011	B	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1100	C	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1101	D	CR	GS	-	=	M	]	m	}
1110	E	SO	RS	.	>	N	~	n	~
1111	F	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

C'est ainsi que ce code définit, par exemple, le mot binaire 100 0001 (71H) pour le caractère A.

Le code EBCDIC

Le code EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code), défini par IBM, est en même temps un code d'échange et une norme de saisie ou de fontes de caractères. Le codage s'effectue sur huit bits, ce qui permet l'identification de 256 caractères différents.

Ce code autorise également la représentation des caractères accentués propres à chaque langue, tels que ä, ö, ü, é, ê, è, à, etc usités en Suisse. De ce fait, il existe une multitude de tables de codage EBCDIC en fonction des caractères contenus dans les diverses langues à coder. La représentation des chiffres et des lettres (non accentuées) est la même dans tous les cas.

Standard Unicode

Les codes ASCII ou EBCDIC n'exploitent à la base que l'alphabet latin, or d'autres alphabets tels que l'hébreu, l'arabe etc. demandent également de pouvoir être traités par les systèmes informatiques. La représentation d'autres alphabets que l'alphabet latin passe par la conception de polices adaptées au langage utilisé, en attribuant à chaque code ASCII ou EBCDIC un nouveau caractère.

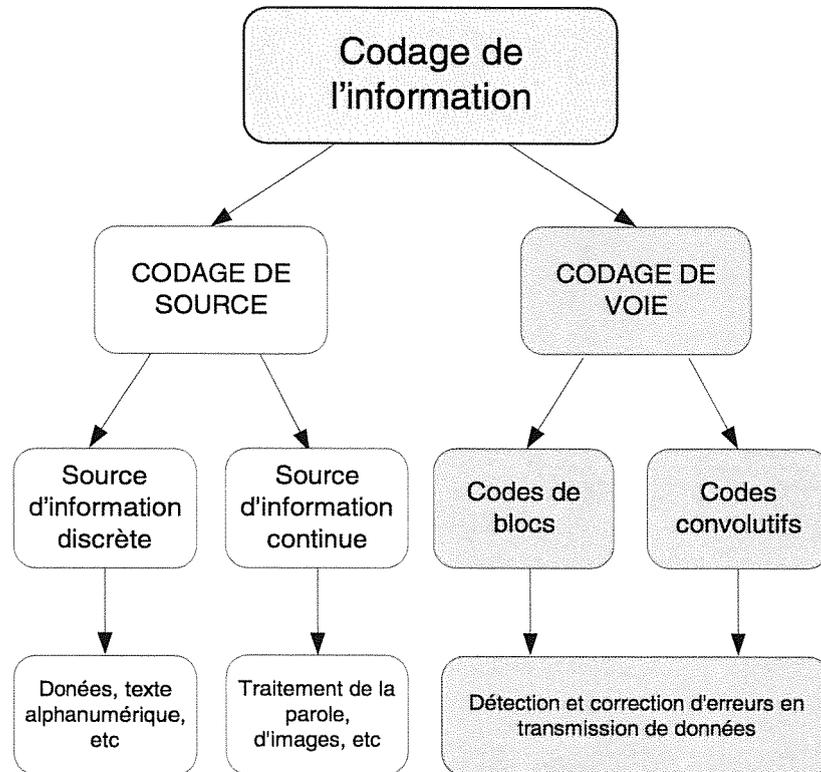
Il existe une multitude de pages de codes dans le monde. La difficulté, c'est que lorsque l'on passe d'une page de codes à une autre (celle du français, par exemple, à celle de l'allemand), l'interprétation des caractères est erronée et on a du mal à visualiser ou imprimer correctement les textes. La consultation de documents sur Internet nous confronte à la lecture de documents codés à partir de pages de codes très diverses. Cette multiplicité a incité les concepteurs des nouveaux systèmes d'exploitation, Windows NT, Unix, ainsi que des langages de programmation tel que JAVA a utiliser des jeux de caractères Unicode codés sur 16 bits.

Au milieu des années 80 déjà, l'ISO (International Standard Organisation) et un certain nombre de constructeurs informatiques, lancent l'idée d'un système universel où chaque caractère est codé sur 2, 3 ou 4 octets. Les travaux aboutirent à l'élaboration de deux systèmes différents, l'un de l'ISO et l'autre d'un consortium de vendeurs : Unicode. Finalement, un consensus s'est établi entre les deux parties. La norme ISO/IEC 10646, parue en mai 1993, propose un jeu universel de caractères codés sur 4 octets, sous la forme d'une table multilingue.

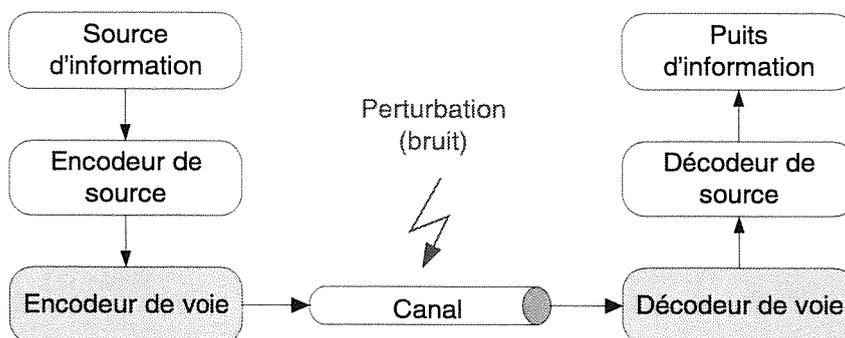
Unicode, utilisant un codage sur 2 octets, offre 65000 possibilités de codage. La norme ISO/IEC, codée sur quatre octets, représente 4,3 milliards de possibilités ! Elle offre ainsi la possibilité de coder tous les langages écrits, les symboles mathématiques, les signes diacritiques. A ce jour, plus de 20900 kanjis (idéogrammes chinois, japonais ou coréens) sont déjà représentés par le standard unicode.

Les codes que nous avons énumérés jusqu'ici permettent à la fois la saisie et le traitement d'alphabets. Ils sont également utilisés en transmission mais ils ne sont pas performants dans ce domaine.

Les différents codages destinés au traitement de l'information à transmettre par un système de transmission peuvent être subdivisés en deux catégories principales : le codage de source et le codage de voie.



Le but du codage de source est l'amélioration de l'efficacité par élimination de la redondance alors que la fonction du codage de voie est l'amélioration de la sécurité par réduction de la sensibilité au bruit. Dans les prochains chapitres, nous traiterons dans le détail les techniques mises en place pour ces deux types de codage.



2.2 Codage de source

Amélioration de l'efficacité par élimination de la redondance

Préambule

Claude Shannon, le fondateur de la théorie de l'information avait l'habitude de faire jouer à un petit jeu de société quand il était invité quelque part. Il prenait un livre au hasard, l'ouvrait au hasard, commençait à lire un paragraphe et s'arrêtait. Il demandait ensuite à l'assistance de deviner une à une les lettres suivantes. L'assistance se débrouillait bien et trouvait la lettre dans environ 75 % des cas. Shannon en déduisait que la langue anglaise possède un taux de redondance de 75 %.

Quand nous manipulons du texte, les caractères que nous utilisons n'ont pas la même probabilité d'apparition. De plus, il a une structure interne forte (la grammaire). Lorsque le mot arbre est au pluriel, on peut aisément prédire la lettre qui suit le " e " final.

Quand nous travaillons avec de la musique, la distribution des probabilités d'apparition des sons n'est pas uniforme non plus. Si nous manipulons des images, la succession des points qui les composent possèdent également des similitudes, ils ne sont pas aléatoires.

Bref, la majorité des données que nous traitons ont un ordre interne, c'est à dire une distribution non uniforme de certains symboles ou séquences de symboles. C'est cette caractéristique qui incite à compresser les données et c'est cette même caractéristique qui offre le moyen de réussir cette compression.

Un des principes de base du codage de source est relativement simple. Les caractères ou les blocs qui apparaissent fréquemment dans l'information à transmettre sont codés avec un nombre de bits peu élevé. En contrepartie, les caractères ou les blocs qui apparaissent rarement dans l'information sont codés avec un nombre de bits plus élevé.

Dans le cas du codage d'une source d'information discrète, le code Morse ou les codes de longueurs différentes appliqués aux différentes langues appliquent cette méthode.

2.2.1 Codages statistiques

L'algorithme d'encodage statistique repose sur la constatation que l'entropie, c'est dire la quantité d'information à la sortie de l'encodeur est maximale si les symboles à coder sont équiprobables.

Cet algorithme entropique génère un code de longueurs différentes ou code VLC (Variable Length Code).

Exemple :

Supposons que nous ayons à traiter un message qui ne contient que 4 caractères que nous nommerons A, B, C et D et que les fréquences d'utilisation de ces caractères dans notre message soient les suivantes :

A : 60 %

B : 30 %

C : 5 %

D : 5 %

On peut imaginer le code suivant qui tient compte de la fréquence d'apparition des caractères:

A = 0 ; B = 00 ; C = 01 ; D = 10

Ce code nous permettra assurément de gagner de la place mais si nous recevons le message suivant : 000010, comment l'interpréter ?

AAACA? BACA? ABAD? BBD? AAAAD ?

Cet exemple met en évidence le problème de la synchronisation.

La solution est le VLC préfixé. Un code est préfixé s'il n'est le début d'aucun autre. Le VLC que nous avons tenté d'utiliser tout à l'heure n'était pas préfixé. Nous pouvons corriger le problème en codant le même exercice comme suit :

A = 0 ; B = 10 ; C = 110 ; D = 111

Cette solution fonctionne ; aucun code ne correspond au début d'un autre. Comme nous avons obtenu ce code par tâtonnement, on ne peut pas affirmer que cette solution offre une compression optimale. La suite du chapitre nous prouvera cependant que ce VLC est optimal.

L'exercice suivant présente une méthode permettant de déterminer un VLC efficace (même s'il n'est pas toujours optimal). Supposons que nous voulions transmettre le message suivant :

" LE PRESIDENT EST ENTRE DANS LA SALLE "

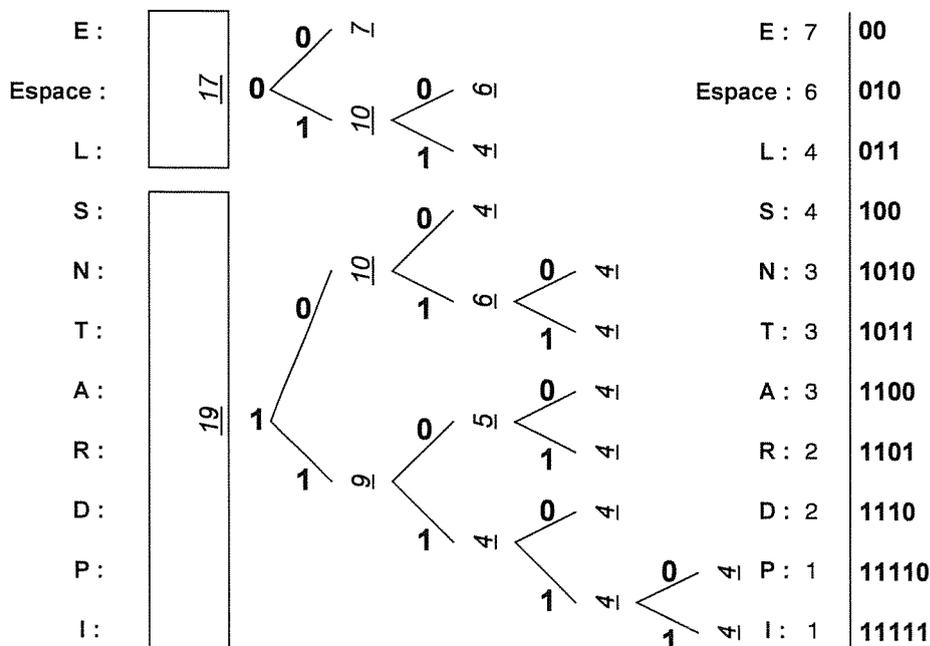
Ce message compte 36 caractères et occupe 36 octets, soit 288 bits dans la majorité des traitements de texte. La première étape consiste à compter les occurrences des différents caractères de l'alphabet utilisé et les classer par ordre décroissant des nombres obtenus. Nous obtenons la liste suivante :

E :	7
Espace :	6
L :	4
S :	4
N :	3
T :	3
A :	3
R :	2
D :	2
P :	1
I :	1

L'algorithme de codage est le suivant:

1. Ordonner les caractères à encoder selon l'ordre décroissant de la probabilité d'utilisation.
2. Diviser l'ensemble des caractères en deux sous-ensembles aussi équiprobables que possible.
3. Attribuer à chaque sous-ensemble un symbole binaire distinct.
4. Répéter la procédure pour chaque caractère à encoder, jusqu'à ce que chacun d'eux possède une transcription binaire distincte.

Voici le développement de cet algorithme sous forme d'arbre :



On numérote les branches de l'arborescence en binaire et on parcourt chaque branche pour déterminer les codes qui figurent dans la colonne de droite.

On peut vérifier que l'on obtient bien un VLC préfixé (aucun code obtenu ne correspond au début d'un autre).

Contrôle de l'efficacité de ce code:

Nous sommes partis d'un message de 36 caractères soit $36 \times 8 = 288$ bits. Pour coder 11 caractères, nous aurions pu choisir de coder chaque caractère sur 4 bits ($2^4 = 16$ possibilités). Le message à transmettre aurait alors nécessité 144 bits.

En utilisant le codage que nous venons de réaliser nous utiliserons :

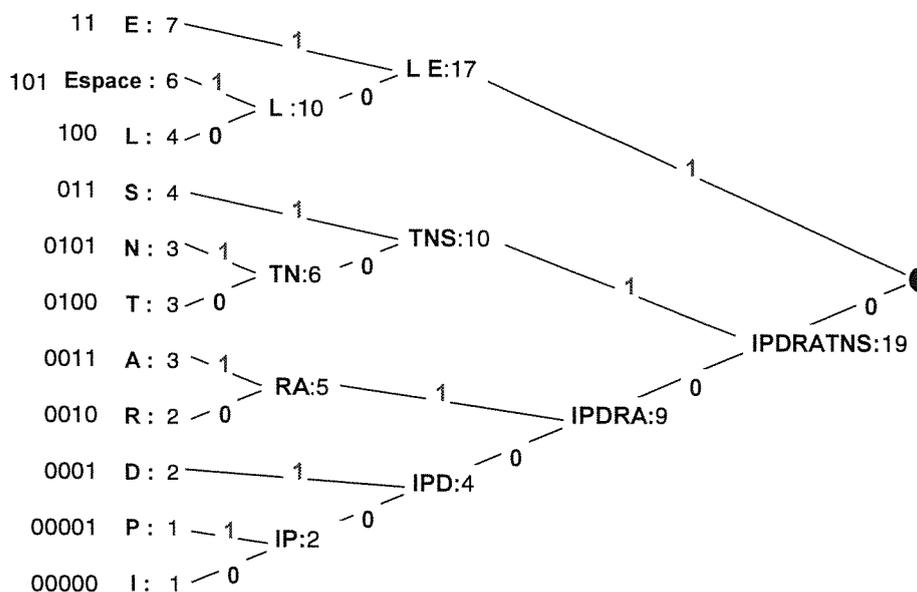
$(2 \text{ bits} \times 7 \text{ occurrences}) + (3 \times 6) + (3 \times 4) + (3 \times 4) + (4 \times 3) + (4 \times 3) + (4 \times 3) + (4 \times 2) + (4 \times 2) + (5 \times 1) + (5 \times 1) = 14 + 18 + 12 + 12 + 12 + 12 + 12 + 8 + 8 + 5 + 5 = 118$ bits

Le taux de compression par rapport à la représentation sur 8 bits est de $288/118 = 2.44$. Il est encore de $144/118 = 1,22$ par rapport à une représentation sur 4 bits.

L'algorithme que nous venons d'utiliser pour déterminer un VLC préfixé est appelé du nom de ses auteurs, l'algorithme de **Shannon-Fano**.

Le code de **Huffman** est très semblable. Son algorithme conduit toujours à un code possédant la plus petite longueur possible. Il peut être énoncé comme suit:

5. Ordonner les caractères à encoder selon l'ordre décroissant de la probabilité d'utilisation.
6. Construire un arbre d'encodage en partant de la fin, c'est à dire attribuer les symboles binaires 0 et 1 aux caractères ayant les plus faibles probabilités d'apparition.
7. Remplacer ces deux caractères par un nouveau caractère dont la probabilité d'apparition correspond à la somme des deux caractères précédents.
8. Répéter la procédure pour chaque caractère à encoder, jusqu'à ce que chacun d'eux possède une transcription binaire distincte. Le code se lit en partant de la base de l'arbre.



Le contrôle de l'efficacité de cet encodage démontre que, pour cet exemple, nous obtenons également 118 bits pour coder le message.

Les algorithmes de Shannon-Fano et de Huffman ont été utilisés pour le codage de multiples alphabets. Le tableau ci-dessous représente le code Shannon-Fano pour la langue allemande. Les caractères les plus utilisés dans cette langues (E; N) sont codés sur trois bits alors que les caractères les moins usités (Q; X) sont codés sur douze bits.

Caractère	Code	Caractère	Code	Caractère	Code
Espace	000	U	11000	K	1111011
E	001	L	11001	V	1111100
N	010	C	11010	Ü	1111101
R	0110	G	11011	P	1111110
I	0111	M	111000	Ä	11111110
S	1000	O	111001	Ö	111111110
T	1001	B	111010	J	1111111110
D	1010	Z	111011	Y	11111111110
H	10110	W	111100	Q	111111111110
A	10111	F	1111010	X	111111111111

Les tables suivantes sont extraites de la recommandation T.4 de l'UIT. Ce code appliqué pour la télécopie par les FAX de groupe 3 est un bel exemple d'application du code de Huffman pour le codage de blocs de tailles différentes.

Le codage des séquences de points est basé sur deux tables différentes. La première définit le nombre entier de blocs de 64 points consécutifs de la même couleur. Le nombre de points restant est codé par la seconde table.

Codes de configuration			
Longueur de plage correspondant au blanc	Mot de code	Longueur de plage correspondant au noir	Mot de code
64	1 1011	64	00 0000 1111
128	1 0010	128	0000 1100 1000
192	01 0111	192	0000 1100 1001
256	011 0111	256	0000 0101 1011
320	0011 0110	320	0000 0011 0011
384	0011 0111	384	0000 0011 0100
448	0110 0100	448	0000 0011 0101
512	0110 0101	512	0 0000 0110 1100
576	0110 1000	576	0 0000 0110 1101
:	:	:	:
1600	0 1001 1010	1600	0 0000 0101 1011
1664	01 1000	1664	0 0000 0110 0100
1728	0 1001 1011	1728	0 0000 0110 0101
FDL	0000 0000 0001	FDL	0000 0000 0001

La seconde table définit les séquences 0 à 63 de points.

Codes de terminaison			
Longueur de plage blanche	Mot de code	Longueur de plage noire	Mot de code
0	0011 0101	0	00 0011 0111
1	00 0111	1	010
2	0111	2	11
3	1000	3	10
4	1011	4	011
5	1100	5	0011
6	1110	6	0010
7	1111	7	0 0011
8	1 0011	8	00 0101
:	:	:	:
62	0011 0011	62	0000 0110 0110
63	0011 0100	63	0000 0110 0111

2.2.2 Les algorithmes de type dictionnaire

Les méthodes statistiques, en particulier l'algorithme de Huffman, ont été très employées jusqu'en 1978. C'est alors que sont apparues les méthodes de type dictionnaire.

Jusqu'à maintenant, nous avons effectué une compression en tenant compte des répétitions d'octets ou de caractères, mais dans les textes ou les images que nous manipulons ce sont souvent des séquences d'octets, des mots ou des motifs qui se répètent. L'idée est d'utiliser ces répétitions pour compresser les données.

La langue française comporte environ 10'000 mots de dix lettres. Sachant que l'alphabet utilisé comprend 26 lettres (sans compter les caractères accentués), cela permettrait de constituer 140'000 milliards de mots de 10 lettres différents. Autrement dit, les mots de 10 lettres qui ont un sens dans la langue française représentent 1 quatorze milliardième de l'ensemble des mots de 10 lettres réalisables.

Il est donc très judicieux, si l'on veut coder efficacement ces mots, d'en dresser une liste et de les indexer.

Les algorithmes LZ**

C'est en 1977 que Jacob Ziv et Abraham Lempel ont publié un article qui est à la base de tous les algorithmes à dictionnaire que nous utilisons actuellement.

En 1984, l'Américain Terry Welch améliore l'algorithme précédent et dépose un brevet. C'est la naissance de l'algorithme LZW. Il est plus performant que les méthodes statistiques. Il sert de base à la norme V.42bis de l'UIT-T utilisé par les modems. Le principe de l'algorithme LZW est d'utiliser un dictionnaire dynamique qui contient les mots du fichier traité.

L'inconvénient des algorithmes à dictionnaire, c'est qu'il est à priori nécessaire de transmettre le dictionnaire avec les données, ce n'est cependant pas le cas avec LZW. Le dictionnaire est construit à la compression et reconstruit à la décompression. Ce qui est également intéressant, c'est qu'il est inutile de lire et d'étudier le fichier avant de le compresser. La compression s'effectue au fur et à mesure de la lecture, le compresseur détectant au fur et à mesure les séquences qui se répètent.

Nous n'explicitons pas cet algorithme mais nous retiendrons deux points :

- D'une part, il s'agit d'un algorithme sophistiqué et " pilotable ". Il est possible par exemple de remettre à zéro le dictionnaire ou de modifier sa taille.
- D'autre part, on peut combiner LZW et un algorithme de codage statistique. C'est ce que font des programmes comme ARJ ou PKZIP qui utilisent LZW puis Shanon-Fano.

2.2.3 Les Méthodes de compression avec pertes

Les techniques décrites jusqu'ici sont dites sans pertes car elles assurent de pouvoir reconstituer la donnée originale dans son intégralité. Cependant, si pour certaines applications, par exemple le transfert de fichiers, nous n'acceptons pas de perte d'information, une dégradation du son ou de l'image est par contre tolérée si elle est imperceptible à l'œil ou à l'oreille ou suffisamment faible pour être acceptable. Le traitement des sources audio et vidéo est effectué par des codeurs dits sous-optima. L'information analogique subit dans un premier temps une conversion analogique-numérique. Les techniques de modulation par impulsions et codage (PCM), de modulation par impulsion et codage différentiel (DPCM), la modulation delta (ΔM), etc. sont utilisées lors de cette conversion.

2.2.4 Codage audio

Le codage du son doit prendre en considération les exigences de l'application. **Le codage de la parole**, utilisé par exemple pour la téléphonie, a pour but la restitution intelligible de la parole. **Le codage audio** appliqué à la musique exige la restitution d'une plus grande plage de fréquence.

Recommandation	Bande passante	Débit
Codage PCM (G.711)	3.4kHz	64 kbit/s
Codage téléphonique à large bande (G.722)	7kHz	64 kbit/s
UIT-T G.728	environ 3.4 kHz	16 kbit/s
UIT-T G.729	environ 3.4 kHz	8 kbit/s
UIT-T G.723.1	environ 3.4 kHz	6,3 et 5,3 kbit/s
MP3	selon le débit (7kHz – 18kHz)	32kbit/s à 192 kbit/s

2.2.5 codage d'images

Le codage de plages ou de blocs est utilisé pour réduire la redondance dans des documents graphiques (images, signal vidéo, document lu au scanner, télécopie, etc.) Ces techniques peuvent être divisées en codes utilisant des blocs de taille fixe et en codes utilisant des blocs de taille variable. Ces techniques sont généralement utilisées conjointement avec d'autres algorithmes comme par exemple l'algorithme de Huffman.

Pour le codage d'images, l'algorithme JPEG (Joint Picture Expert Group), occupe le devant de la scène depuis quelques années en raison de ses performances et de la facilité de son implémentation sur PC. D'autres méthodes (ondelettes et fractales en particulier) émergent actuellement.

JPEG (Joint Picture Expert Group)

La compression JPEG exploite la redondance spatiale. L'algorithme de compression JPEG est basé sur les limites de l'œil humain qui est plus sensible aux légères variations lumineuses (ou luminance) qu'aux variations de couleurs (ou chrominance). La compression JPEG est une compression avec perte et l'image compressée sera de moins bonne qualité que l'originale. Il est heureusement possible de régler la quantité de perte, en fonction du choix de l'utilisateur. En effet, on peut décider de privilégier la compression à la qualité, ou l'inverse. Pratiquement, il est possible d'appliquer un taux de compression de l'ordre de 20 sans que l'image ne subisse une dégradation trop importante.

2.2.6 Codage d'images animées

La compression d'images animées implique deux types de redondance à réduire ou éliminer :

- **Redondances spatiales:** chaque point d'une image est souvent peu différent de ses voisins. Une photo comporte de nombreux points de même intensité et de même couleur. Cette redondance est supprimée par un algorithme similaire à celui appliqué par JPEG pour les images fixes, c'est à dire découper l'image en blocs élémentaires et ne plus transmettre des valeurs absolues mais des coefficients simplifiables par le biais d'une transformation mathématique (la DCT ou Discrete Cosine Transform). La méthode M-JPEG applique uniquement la compression spatiale.
- **Redondances temporelles:** La compression de séquences vidéo implique de plus une compression temporelle. Son objet est de ne transmettre que ce qui est modifié lors du passage d'une image à une autre dans une séquence vidéo. Les images ainsi compressées peuvent être de deux types : image clé ou image delta. Les images clés sont des images de références, qui contiennent en elle-même, toute l'information. Les images delta ne contiennent que les pixels modifiés vis à vis de l'image précédente, qui peut être elle-même une image clé ou une image delta. La première image est nécessairement une image clé. Des techniques particulières, dont la compensation de mouvement, permettent d'optimiser la génération et la compression des images delta. D'autre part, la mise en œuvre de méthodes prédictives et d'estimation des mouvements est appliquée en effectuant des calculs à partir de la succession des images précédentes.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des standards utilisés pour la compression vidéo.

Standard	Débit binaire après compression	Application, format d'image
H.261	1...30 kbits/s	Vidéoconférence (CIF, QCIF), progressif
H.263	28 kbits/s ... ~Mbits/s	Vidéotéléphonie (subQCIF jusqu'à 16CIF), progressif
MPEG-1	Typiquement 1.5 Mbits/s	Stockage et diffusion de vidéo de qualité VCR (~ CIF), progressif
MPEG-2 (= H.262)	> 4 Mbits/s	Diffusion et stockage TV (PAL, NTSC, HDTV, ...), progressif / entrelacé
MPEG-4	Tous	Multimedia
Real Video	28 kbits/s -1.5 Mbits/s	Distribution de vidéo-clips sur Internet

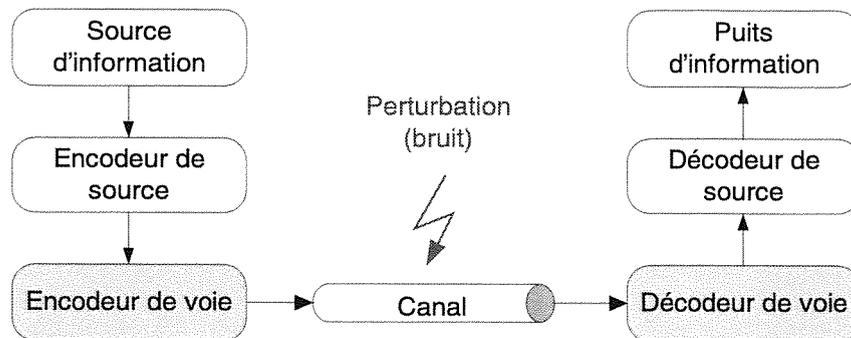
Caractéristiques des formats d'image:

Format d'image	Standard	Dimensions Luminance / chrominance	Images entières/s	Débit binaire MBit/s
subQCIF	H.263	128x96 / 64x48	29,97	4,4
QCIF	H.261, H.263	176x144 / 88x72	29,97	9,1
CIF	H.261, H.263	352x288 / 176x144	29,97	36,5
4CIF	H.263	704x576 / 352x288	29,97	146,6
16CIF	H.263	1408x1152 / 704x576	29,97	586,4
SIF	MPEG-1	352x240 / 176x120	29,97	30,4
PAL	MPEG-2	440x576 / 220x576	25 (entrelacé)	101,4
NTSC	MPEG-2	440x480 / 220x480	29,97 (entrelacé)	101,3
BT 601-5	(Qualité	720x576 /720x576	25 (entrelacé)	248,8
BT 601-5	studio)	720x480 /720x480	29,97 (entrelacé)	248,6
HDTV	MPEG-2	1920x1152 /1920x1152	60	3185,0

2.3 Codage de voie

Amélioration de la sécurité par réduction de la sensibilité au bruit

Suite à la réduction de la redondance, réalisée par le codage de source, l'information est beaucoup plus sensible aux perturbations des systèmes de transmission.



Le principe fondamental du codage de voie consiste à introduire une quantité généralement infime de redondance dans l'information transmise afin de pouvoir détecter, voir corriger une ou plusieurs erreurs.

2.3.1 Protection des données contre les erreurs

Les erreurs peuvent apparaître dans chaque élément de la chaîne de traitement d'une information:

- l'homme $>10^{-3}$ (~ 1 faute pour 300 caractères saisis);
- les supports de données;
- les appareils de saisie des données et les terminaux;
- les équipements de transmission des données;
- les voies de transmission des données;
- les équipements de traitement des données;
- un système informatique $<10^{-9}$ (\approx 1 faute pour 1'250'000 caractères).

Sachant qu'un livre de 300 pages contient environ 800'000 signes, ce qui correspond à 6'400'000 bits avec un code de 8 bits par signe, un système informatique génère environ 1 faute pour 2 livres alors que la dactylo fait en moyenne 9 fautes par page.

Dans un système de traitement de l'information, la probabilité d'erreur résiduelle d'un système ne peut être meilleure que le maillon le plus faible du système.

En transmission de données, il est aujourd'hui possible d'atteindre une probabilité d'erreur de l'ordre de 10^{-15} en appliquant des codes et des systèmes de détection et de correction d'erreur appropriés. Ceci correspond à une erreur pour 4954 ans avec une transmission de données à 64 kbit/s.

Ces erreurs de bits ne sont généralement pas réparties uniformément dans le temps mais elles sont le plus souvent générées par groupes (paquets ou salves). De plus, le taux d'erreur moyen n'est pas une constante dans le temps mais il peut varier d'heure en heure et d'un jour à l'autre.

Pour détecter des erreurs de transmission sur un système de transmission, il faut ajouter des informations aux données utiles. Cette adjonction d'informations augmente la capacité d'interprétation d'un caractère ; elle est appelée addition de redondance. Une erreur de transmission sera d'autant plus facilement détectée que la redondance est importante. Une redondance très élevée permet même d'effectuer la correction d'erreurs de transmission.

Définitions

Poids de Hamming:

Le poids de Hamming est le nombre de bits à 1 que contient un vecteur binaire.

Exemple: Le poids de Hamming du vecteur "01101011" est 5

Distance de Hamming

On appelle distance de Hamming le nombre de positions par lesquelles diffèrent deux vecteurs binaires.

Exemple:

A =	1000001
F =	<u>1000110</u>
somme modulo 2 =	0000111
distance de Hamming (A,F) =	3

2.3.2 Détection d'erreurs

Un code permet la détection d'erreurs que si la distance de Hamming entre les mots de son alphabet pris deux à deux est suffisante. Le code binaire ou le code ASCII par exemple ne permettent pas la détection d'erreurs car la modification d'un bit du code d'un quelconque caractère donne le code d'un autre caractère existant. La distance de Hamming de ces codes est de 1. Le nombre d'erreurs qu'un code permet de détecter dépend de la distance de Hamming.

Si n est la distance de Hamming d'un code, il permet de détecter $n-1$ erreur(s).

exemple:

La distance de Hamming du code binaire est de 1, il ne permet donc pas la détection d'erreur. En ajoutant un bit de parité à chaque vecteur, la distance de Hamming est de deux et la détection d'une erreur devient possible.

0	000	0001 = bit de parité
1	001	0010
2	010	0100
3	011	0111
4	100	1000
5	101	1011
6	110	1101
7	111	1110
distance de Hamming = 1		distance de Hamming = 2

on transmet 011 = 3
 on reçoit 001 = 1
pas d'erreur détectée

on transmet 0111 = 3
 on reçoit 0011 = ?
 ne correspond à aucun mot du code
Erreur détectée

2.3.3 Correction d'erreurs

La capacité de correction d'erreurs d'un code est également liée à la distance de Hamming entre les mots de son alphabet.

Si n est la distance de Hamming d'un code, il permet de corriger $\frac{n-1}{2}$ erreur(s).

exemple:	A =	110110	
	B =	111000	
	mot reçu =	111010	est-ce A ou B
Mot reçu =	111010	Mot reçu =	111010
A =	<u>110110</u>	B =	<u>111000</u>
Distance =	001100 = 2	Distance =	000010 = 1

⇒ Décision: le mot reçu est B

2.3.4 Techniques utilisées pour la détection des erreurs

- Codes à mots de même poids:
tous les caractères sont codés avec le même nombre de "1" (Alphabet CCITT n° 3).
- Protection par répétition:
Chaque symbole est émis plusieurs fois.
- Technique des échos:
le récepteur renvoie les informations reçues vers l'émetteur (cette méthode n'utilise pas nécessairement un codage de voie).
- Protection caractère par caractère:
bit de parité (ou d'imparité).
- Protection bloc par bloc:
bit de parité longitudinal.
- Protection croisée:
bit de parité par caractère et bit de parité longitudinal.
- Protection cyclique des blocs:
BCC ou CRC.
- Codes correcteurs d'erreurs:
redondance élevée pour permettre la correction (transmission simplex).

Code à mots de mêmes poids

Tous les caractères sont codés avec le même nombre de "1". Cette procédure est utilisée avec des codes comprenant des mots courts, par exemple dans le code CCITT n°3.

Code	Caractère A..	Caractère 1..	Code	Caractère A..	Caractère 1..
0011010	A	-	0101010	S	'
0011001	B	?	1000101	T	5
1001100	C	:	0110010	U	7
0011100	D		1001001	V	=
0111000	E	3	0100101	W	2
0010011	F		0010110	X	/
1100001	G		0010101	Y	6
1010010	H		0110001	Z	+
1110000	I	8	1000011	DR	
0100011	J		1011000	LF	
0001011	K	(	0001110	Caractère A..	
1100010	L	)	0100110	Caractère 1..	
1010001	M	.	1101000	SP	
1010100	N	,	0000111	N.U.	
1000110	O	9	0110100	S.R.	
1001010	P	0	0101001	S.A.	
0001101	Q	1	0101100	S.B.	
1100100	R	4			

Le code CCITT n°2 à 5 bits est converti en un code à 7 bits dans lequel chaque mot de code comprend trois 1 binaires et quatre 0 binaires. Pour augmenter le rendement de cette méthode, plusieurs caractères sont rassemblés en blocs (par ex. trois ou sept caractères). Cette méthode est utilisée pour la transmission de caractères télex par des liaisons HF (radiocommunication maritime).

Protection par répétition

Chaque symbole est émis plusieurs fois.



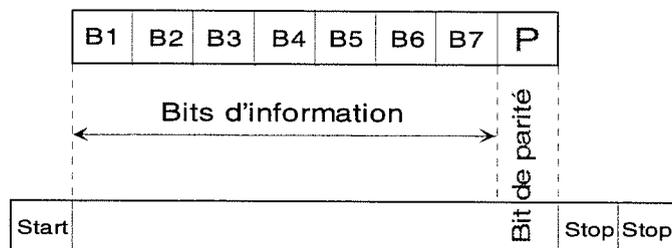
En supposant que chaque symbole soit émis un nombre impair de fois, en cas de symboles différents, le récepteur choisit le symbole majoritaire.

L'augmentation de la redondance est très importante et le rendement de cette méthode trop simpliste est déplorable.

Cette méthode trouverait une application dans des systèmes de transmission simplex.

Protection caractère par caractère

La parité simple ou parité transversale est certainement le code détecteur d'erreurs le plus simple et le plus utilisé. Il permet de détecter sûrement une erreur. En transmission, la règle usuelle est d'utiliser la parité paire en transmission asynchrone et impaire en transmission synchrone. L'exemple suivant représente la position du caractère de parité lors d'une transmission asynchrone.



Lors d'une transmission synchrone, les caractères à transmettre sont regroupés en blocs délimités par des caractères de synchronisation. La parité transversale ou parité de caractère consiste à ajouter un bit de parité à chaque caractère.

	S Y N	S Y N	S T X	C	O	D	A	G	E	E T X	
B8	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	Parité de caractère
B7	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
B4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
B3	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	
B2	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	
B1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	

Cette méthode permet de détecter une erreur par caractère

Protection longitudinale

La protection d'un bloc de caractère est réalisée avec le contrôle de parité longitudinale. Dans ce cas, le bit de parité n'est pas attribué à un caractère mais aux bits de même poids contenus dans le bloc. Tous les caractères sauf SYN et STX (Start Of Text) sont contrôlés par les bits du caractère LRC (Longitudinal Redundancy Check)

	S Y N	S Y N	S T X	C	O	D	A	G	E	E T X	L R C
B7	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
B3	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
B2	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1
B1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1

Caractères contrôlés par le LRC

Parité croisée

Dans la parité croisée, on utilise à la fois le contrôle de parité caractère par caractère que le LCR. L'application simultanée des deux méthodes de test améliore la protection des informations. La protection croisée permet de détecter des doubles erreurs qu'un seul des deux procédés ne permet pas de mettre à jour. Ce type de codage est essentiellement utilisé à des fins de démonstration.

	S Y N	S Y N	S T X	C	O	D	A	G	E	E T X	L R C	
B8	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	Parité de caractère
B7	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
B5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
B4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
B3	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	
B2	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	
B1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	

Cette méthode permet de détecter jusqu'à deux erreurs ou corriger une erreur.

Protection cyclique des blocs (codes polynomiaux)

De même que le procédé de parité longitudinale, la méthode de protection cyclique des blocs de données utilise un caractère de contrôle de bloc (BBC = Block Check Character). Ce type de code à pris une importance particulière en télécommunication et en informatique. Leur usage s'est généralisé pour la détection et parfois même pour la correction des erreurs de transmission.

La méthode de protection cyclique utilise un polynôme pour générer un ou plusieurs caractères de contrôle qui sont insérés à la suite du message à transmettre. Diverses abréviations sont utilisées pour identifier ces caractères :

BCC = Block Check Character (caractère de contrôle de bloc).

BCS = Block Check Sequence (séquence de contrôle de bloc).

CRC = Cyclic Redundancy Check (contrôle de redondance cyclique).

FCS = Frame Check Sequence (séquence de contrôle de trame).

FEC = Forward Error Correction (correction des erreurs vers l'avant).

Ces caractères de contrôle sont obtenus en effectuant une division modulo-2 du message à transmettre par un polynôme générateur propre au système utilisé.

$$\text{ISDN (accès primaire)} = X^4 + X + 1$$

$$\text{UIT, V.41} = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

$$\text{CRC-16} = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$$

$$\text{ATM} = X^8 + X^2 + X + 1$$

$$\text{Ethernet} = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^2 + X + 1$$

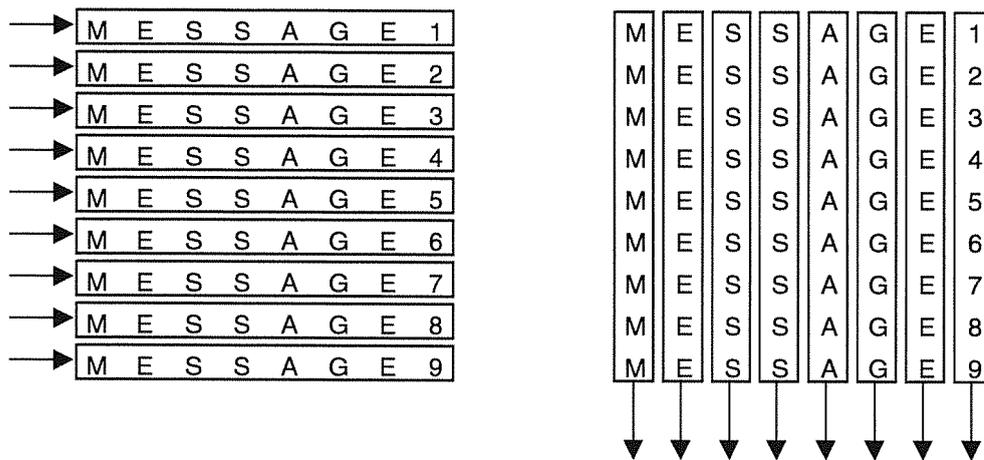
Ces polynômes sont fonction de chaque domaine d'application, de la structure et de la taille des blocs ou des trames de données à transmettre. A première vue, les opérations de calcul polynomial peuvent sembler compliquées. En pratique, il est possible de les effectuer simplement au moyen d'un registre à décalage et de portes logiques ou-exclusif.

Entrelacement

L'entrelacement n'est pas une technique de détection ou de correction des erreurs, c'est une méthode appliquée pour améliorer la robustesse des codes précités face aux rafales d'erreurs. En effet, en cas de rafale cette technique permet de distribuer les erreurs sur plusieurs messages. Les codes de détection ou de correction d'erreurs seront alors mieux en mesure de les détecter, voire de les corriger.

Cette technique est utilisée dans de nombreux systèmes même si elle présente l'inconvénient d'un temps de traitement relativement long.

Dans un premier temps, les informations à transmettre sont rangées par lignes de taille fixe pour constituer un bloc de données. Lorsque ce bloc est complet, les données sont émises colonne par colonne.



A la réception, le bloc est reconstitué avant d'être à nouveau traité ligne par ligne. De la sorte, si une rafale d'erreurs atteint la transmission d'une des colonnes, les erreurs seront distribuées sur plusieurs lignes. Il est ainsi possible d'améliorer la capacité de détection, respectivement de correction des erreurs même en cas d'erreurs groupées.

Code de Viterbi

Une autre méthode de correction liée à la modulation est utilisée par certain équipement de transmission. La technique de modulation en treillis utilise plusieurs constellations de points. La distance entre les points des diverses constellations permet de corriger les erreurs de transmission.

3. Modes de transmission

Le mode de transmission ou code de ligne détermine de quelle manière l'information numérique délivrée par le DTE est adaptée par le DCE pour être transmise sur le médium physique. Il ne faut pas le confondre avec le codage de voie décrit au chapitre 2.3, dont le but est la protection de l'information à transmettre.

Le mode de transmission doit en principe répondre aux exigences suivantes:

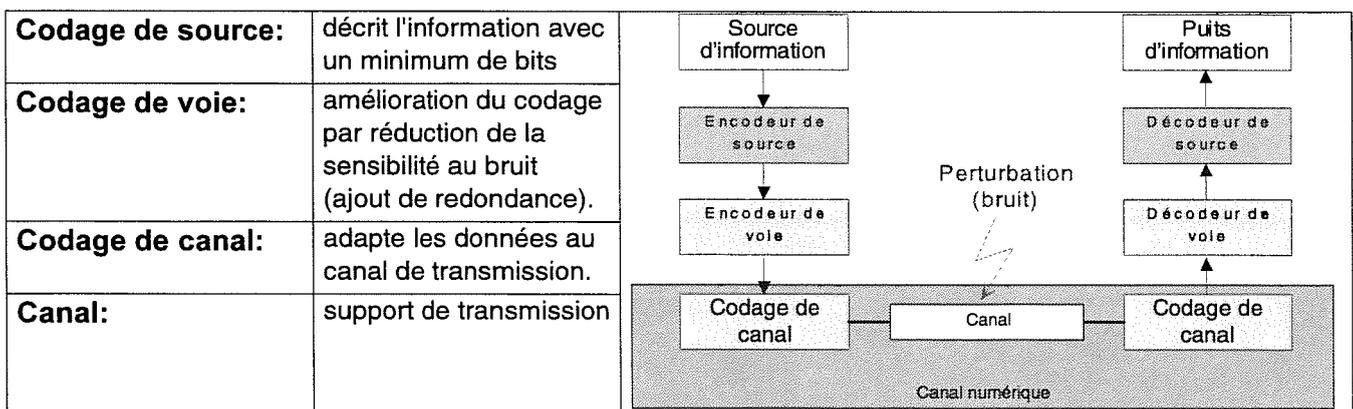
1. **Composante continue nulle**
(un signal avec une composante continue n'est pas compatible avec les translateurs, les couplages capacitifs et diverses techniques de modulation).
2. **Densité spectrale faible dans les basses fréquences**
(pour les mêmes raisons que précédemment).
3. **Densité spectrale faible dans les hautes fréquences**
(limitation en fréquence du canal de transmission).
4. **Densité spectrale importante au débit de décision**
(nécessité de pouvoir récupérer le signal d'horloge).
5. **Nombre faible de valeurs possibles par moment**
(plus le nombre est grand, plus le système est sensible au rapport signal/bruit).

Ces exigences sont partiellement contradictoires. Il est donc nécessaire de trouver le meilleur compromis en fonction du support physique utilisé.

3.1 Transmission en bande de base

Dans le cas d'une transmission en bande base, le signal à transmettre est envoyé sur la voie de transmission sans déplacement en fréquence et sans utiliser un type de modulation. Les supports de transmission, entrant en ligne de compte pour transmettre des signaux en bande de base, sont les lignes et les câbles cuivre. Lorsque ces supports entraînent une atténuation trop forte du niveau du signal, on utilise des amplificateurs ou des régénérateurs.

La transmission en bande de base de signaux numériques ou de données représentées sous cette forme n'est pas possible à travers le PSTN. Ce type de transmission utilise des lignes louées dans le cadre des raccordements Swisscom.

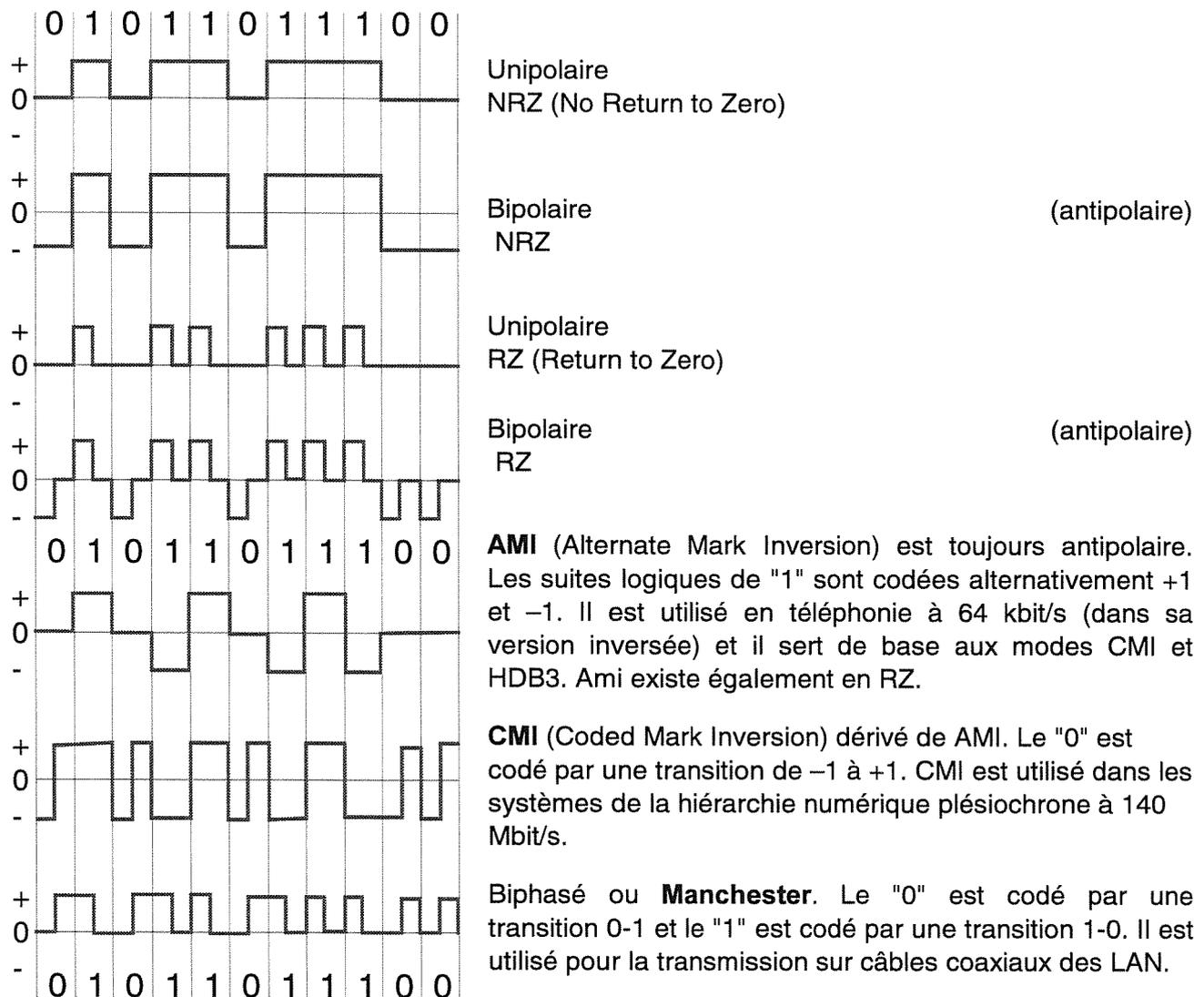


3.1.1 Codage de canal

Le codage de canal consiste à adapter au canal de transmission le signal provenant de l'encodeur de voie. Dans le cas le plus simple, il attribue un signal élémentaire (par exemple tension ou courant électrique) à chaque bit et émet la suite de ces signaux élémentaires sur le canal de transmission.

- On parle de mode unipolaire lorsqu'un élément binaire (1 ou 0) correspond à une impulsion de courant et que l'autre élément binaire est traduit par une absence de courant. Le mode bipolaire fait intervenir une inversion de la polarité.
- Le mode binaire NRZ (No Return to ZERO) est la solution la plus simple. L'état du signal numérique ne change pas durant toute la durée de transmission d'un élément binaire. Cette solution répond mal aux exigences 1 et 4 mentionnées au chapitre 3 (composante continue nulle et densité spectrale importante au débit de décision)
- Le mode binaire RZ (Return to Zero) est caractérisé par un retour à zéro avant la fin de chaque moment émis. Ce mode répond mieux aux exigences 2 et 4 (densité spectrale faible dans les basses fréquences et densité spectrale importante au débit de décision), il répond cependant moins bien à la troisième exigence (densité spectrale faible dans les hautes fréquences).

Modes de codes de canal



Codage HDB3

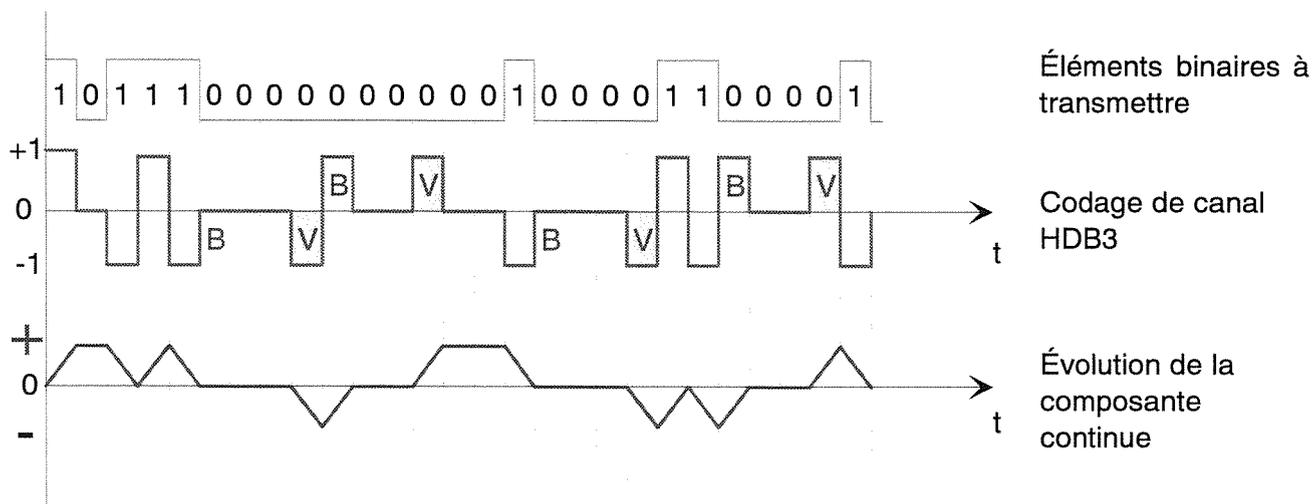
Le code HDB3 (third order High Density Bipolar code) est dérivé du code AMI.

Ce code évite de perdre la synchronisation d'horloge lors d'une longue suite de 0.

On remplace un groupe de quatre "0" binaires consécutifs par des groupes de quatre moments ternaires dont le dernier est non nul et émis avec la même polarité que le dernier moment non nul

⇒ violation de la loi d'alternance de polarité du code AMI

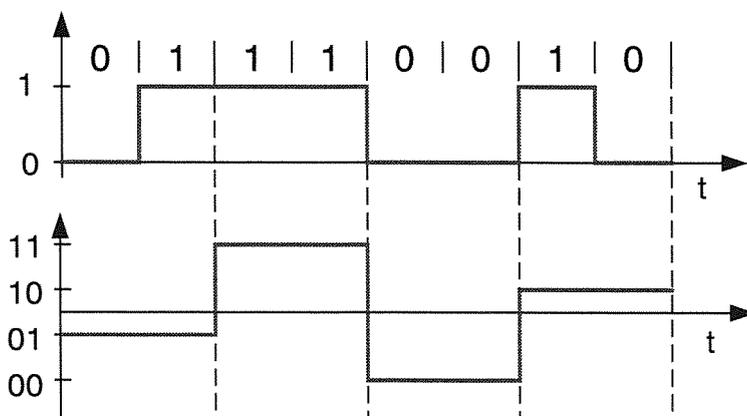
De plus, le premier des quatre moments ternaires est choisi positif, nul ou négatif de façon à maintenir ou ramener la composante continue à une valeur nulle.



3.1.2 Réduction de la vitesse de modulation

La vitesse de modulation est exprimée en bauds [Bd]. Elle représente le nombre de moments de modulation transmis par seconde.

Si un moment du signal ne peut prendre que deux valeurs différentes, on parle de signal binaire. Dans ce cas, le débit en bit/s correspond à la vitesse de modulation en bauds. Il existe des modes plus complexes dans lesquels plusieurs bits successifs sont regroupés en un moment de modulation. Le regroupement de deux bits successif (doublet ou dibit) exige en modulation en bande de base un codage de canal à 4 niveaux générant un signal quaternaire.



Signal binaire

p. ex. 28'800 bit/s → 28'800 Bd

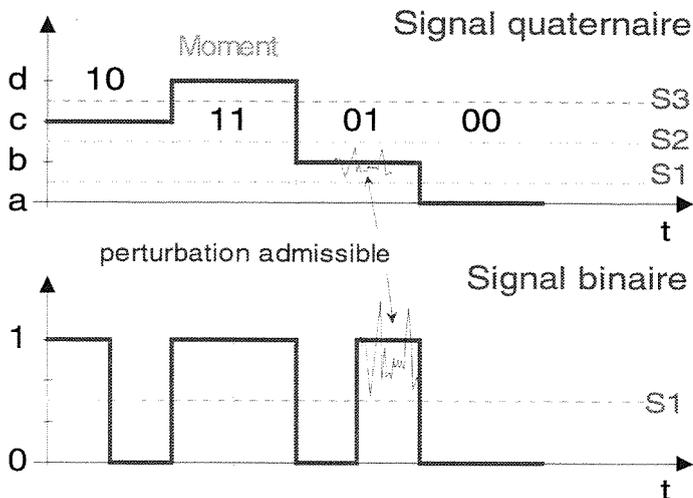
Signal quaternaire

modulation à 4 niveaux

2B1Q (2 éléments Binaires sont envoyés sous forme de 1 élément Quaternaire)

p.ex. 28'800 bit/s → 14'400 Bd

Le fait de regrouper n bits en 1 moment de modulation divise par le même facteur n la vitesse de modulation [Bd] et de ce fait la largeur de bande nécessaire, ceci permet donc de transmettre les données à des débits plus élevés sur une largeur de bande limitée. Cependant, ce regroupement exige une modulation à 2^n niveaux, or, les signaux comportant plus de deux seuils de décision sont plus sensibles aux perturbations, cette sensibilité augmentant avec le nombre de bits représentés par le même niveau.



Un signal quaternaire utilise 3 seuils de décision, alors qu'un signal binaire n'exige qu'un seul seuil.

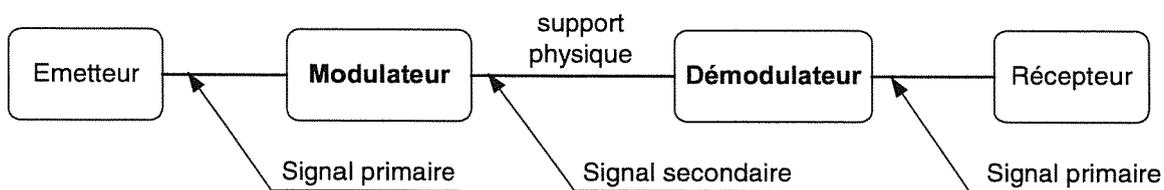
Ce graphique met en évidence la différence d'amplitude de la perturbation admissible pour les 2 signaux.

Le codage 2B1Q est utilisé pour les raccordements de base des générations de modems à large bande.

3.2 Modulations

Lorsque les signaux livrés par une source ne sont pas compatibles au canal de transmission choisi, il est possible de les adapter au moyen d'une technique de modulation appropriée. La modulation intervient également lorsque plusieurs canaux doivent être multiplexés sur le même support physique (multiplexage fréquentiel).

La translation entre le signal entrant ou signal primaire, et le signal secondaire est effectué par un modulateur. Côté réception, le démodulateur effectue l'opération inverse et restitue le signal primaire à partir du signal secondaire.



Les informations générées par les ordinateurs étant toujours numériques, seules les modulations dites analogiques discrètes entrent en ligne de compte pour leur transport. Selon le type de modulation analogique discrète utilisée, le signal primaire (numérique) agit sur les paramètres d'amplitude, de phase et de fréquence du signal secondaire (analogique).

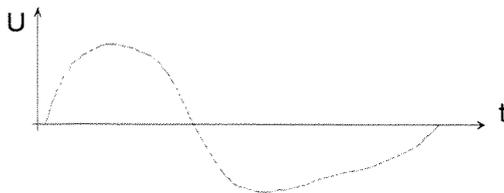
Les modulations numériques seront uniquement évoquées dans ce cours, elles permettent de transporter un signal primaire analogique sous forme d'un signal secondaire numérique. Ce type de modulation est indispensable au transport de la parole sur le réseau de transmission Swisscom.

3.2.1 Modulations numériques

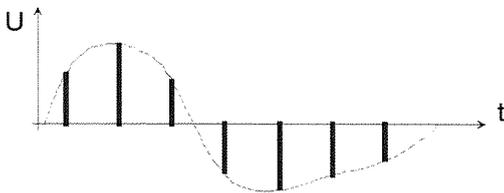
La modulation numérique consiste à transformer un signal primaire analogique en un signal secondaire numérique. Cette technique appliquée à la parole permet la réalisation des raccordements ISDN. Une fois numérisée, la parole peut être transportée sur le réseau de transmission numérique Swisscom comme n'importe quelle autre source de données. Pour la parole, comme pour toutes transmissions audio ou vidéo, le réseau de transmission doit cependant assurer un débit binaire constant et le synchronisme entre la source et le récepteur.

La modulation numérique comprend les étapes suivantes:

Signal analogique



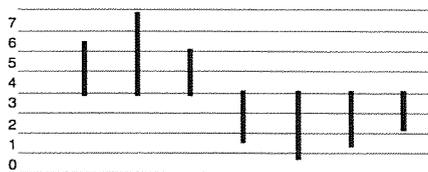
Echantillonnage



Echantillonnage de la tension analogique.

En modulation PCM (Pulse Code Modulation), la fréquence d'échantillonnage est de 8 kHz.

Quantification



Quantification

La valeur échantillonnée est représentée par le niveau le plus proche dans un nombre fini de valeurs (256 avec PCM) réparti selon une approximation logarithmique.

Codage

110 111 110 001 000 010

Codage

L'échantillon quantifié est défini par un mot de 8 bits.
Ceci représente un débit de 64 kbit/s.

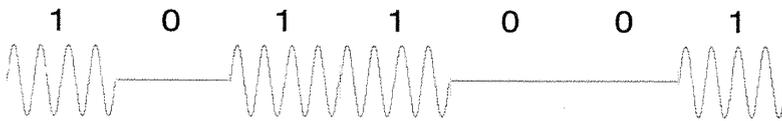
La technique PCM est la seule utilisée de nos jours pour la téléphonie fixe. La technique DPCM (Differential Pulse Code Modulation) code la différence de valeur entre deux échantillons successifs.

3.2.2 Modulations analogiques discrètes

La modulation numérique consiste à transformer un signal primaire numérique en un signal secondaire analogique. Le signal secondaire est sinusoïdal (porteuse) et ses divers paramètres, amplitude, phase et/ou fréquences sont modulés par pas discrets en fonction du signal primaire.

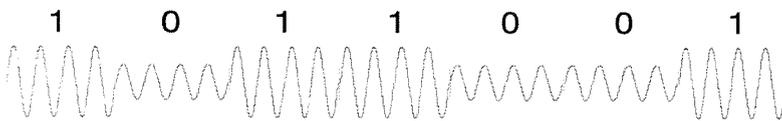
La suite du chapitre présente les types de modulations analogiques les plus courants.

OOK (On-Off Keying)



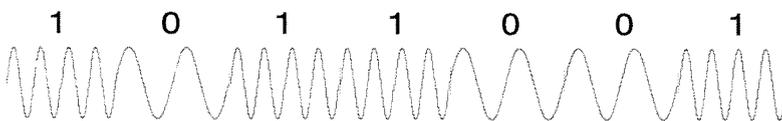
Modulation tout ou rien. La porteuse n'est émise que pour la valeur "1" du signal primaire. Pour la valeur "0", rien n'est émis.

ASK (Amplitude Shift Keying)



Modulation par sauts d'amplitudes. Ce type de modulation peut être constitué de moments n-aires correspondant à autant de valeurs discrètes de l'amplitude de la porteuse. (chapitre 3.1.2)

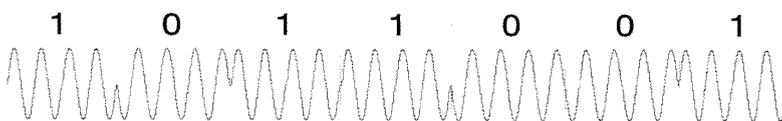
FSK (Frequency Shift Keying)



Modulation par sauts en fréquence. La fréquence de la porteuse peut varier de n valeurs discrètes, dépendant du nombre de valeurs des moments à transmettre.

Pour un mode binaire, les deux valeurs sont $f_p + \Delta f$ et $f_p - \Delta f$.

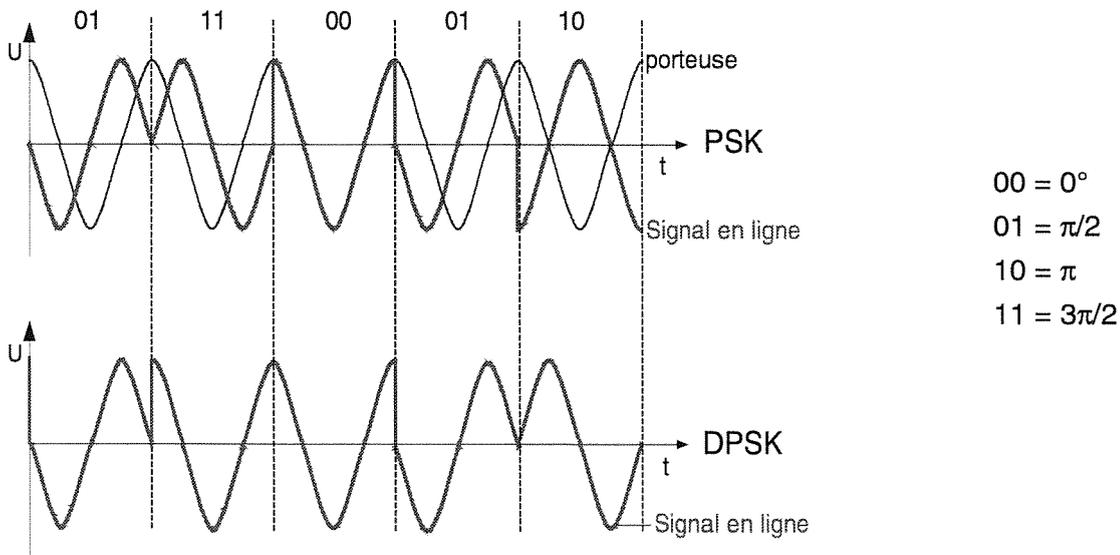
PSK (Phase Shift Keying)



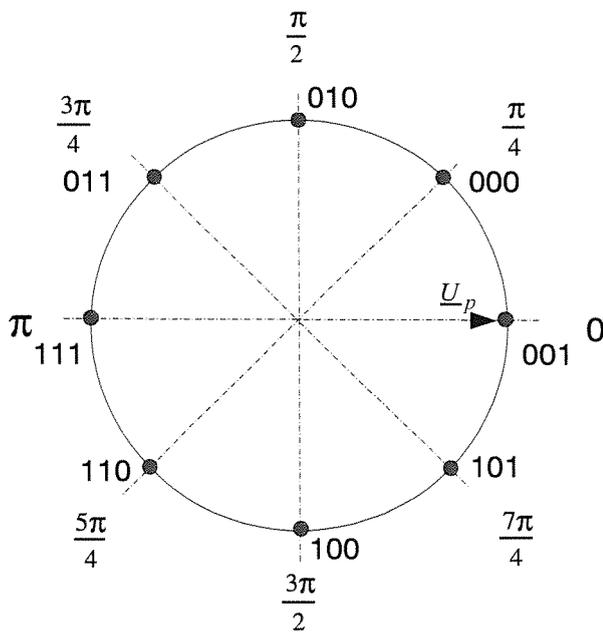
Modulation par sauts de phase. La phase de la porteuse peut varier de n valeurs discrètes, dépendant du nombre de valeurs des moments à transmettre.

Pour un mode binaire, les deux valeurs de phase sont généralement 0 et π . Pour un mode n-aires, les sauts de phase correspondent à $2\pi/n$.

DPSK (Differential Phase Shift Keying)



Modulation par sauts de phase différentielle. Le saut de phase n'est pas appliqué par rapport à la porteuse ($\alpha = 0$) mais par rapport au moment de modulation précédent.



Plutôt que d'être représentés dans le temps, les sauts de phases définis pour les modulations PSK et DPSK peuvent être représentés sur un plan. Les angles de déphasage définis pour les moments de modulation sont reportés sur le cercle trigonométrique. L'amplitude du signal U_p étant constante, les points se répartissent sur un cercle.

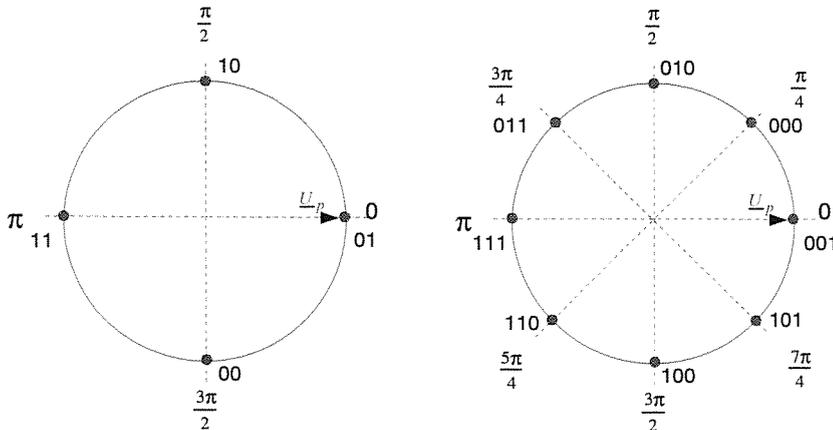
L'exemple ci-contre représente une constellation en cercle de huit moments de modulation, chaque moment définissant une séquence de trois éléments binaires.

Un système de transmission utilisant ce type de modulation offre un débit de 7200 bit/s pour une vitesse de modulation de 2400Bd

Modulations d'amplitude et de phase

Au chapitre 3.1.2, il est expliqué que le fait de regrouper n bits en 1 moment de modulation divise par le même facteur n la vitesse de modulation [Bd] mais qu'en contrepartie, ce regroupement exige une modulation à 2^n niveaux rendant le système plus sensible aux perturbations. Cette règle reste la même avec les modulations PSK et DPSK, faisant que pour chaque bit supplémentaire définit par moment de modulation il faut doubler le nombre de moment de modulation.

exemple:



Le fait de passer de 2 à 3 éléments binaires par moment de modulation oblige de passer de 4 à 8 moments de modulation.

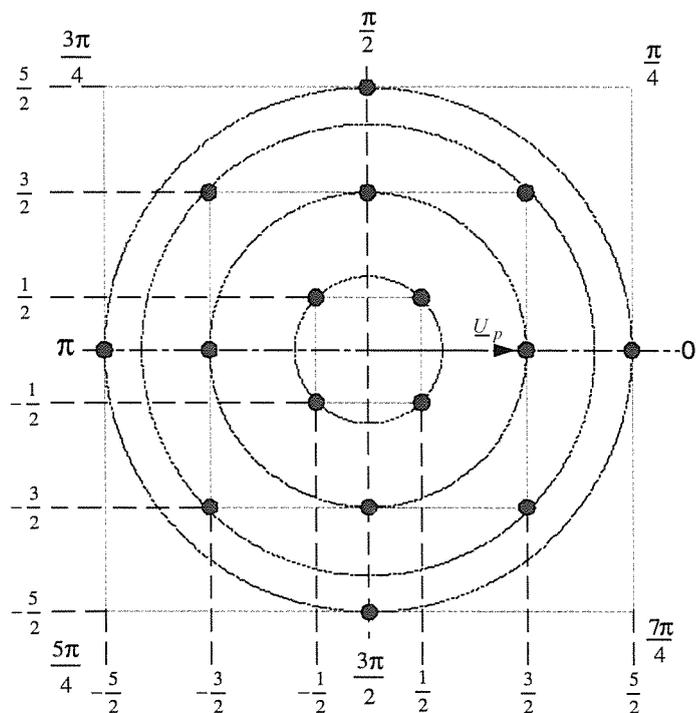
Lorsque le nombre de moments de modulation devient grand, il devient difficile pour le récepteur de les situer, ceci d'autant plus que la gigue est importante. Les modulations mixtes d'amplitude et de phase offrent une meilleure répartition sur le plan et augmente la distance entre les points de la constellation.

Modulation A+PSK

Modulation d'amplitude et de phase. Le modulateur agit simultanément sur l'amplitude et la phase de la porteuse afin d'augmenter la distance entre les points de la constellation. Il détermine ainsi une constellation dont les points sont équidistants.

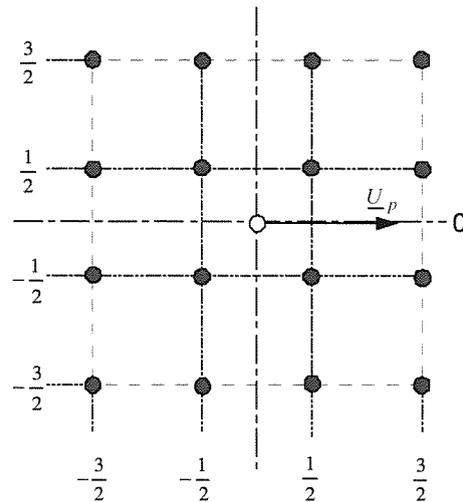
L'exemple ci-contre représente la constellation d'une modulation A+PSK 16. La répartition uniforme est obtenue en utilisant huit sauts de phase et quatre amplitudes U_p .

Cette modulation est définie par la recommandation V.29 (modem 9600 bit/s)



Modulation QAM

Modulation d'amplitude en quadrature (QAM: Quadrature Amplitude Modulation). Elle est similaire à la modulation de phase et d'amplitude. Deux porteuses en quadrature de phase sont modulées simultanément et de façon indépendante.



Modulation en treillis

La modulation en treillis (TCM: Treillis Coded Modulation ou Treillis Convolutional Coding) ajoute dans un premier temps des bits de redondance au débit informationnel. Diverses méthodes embrouillage (scrambling) sont également appliquées au débit primaire avant l'application d'une modulation QAM ou de phase et amplitude.

Le graphique ci-dessous est extrait de la recommandation V.32bis (modem à 14'400bits). Il représente le passage du débit informationnel de 6 éléments binaires par moment de modulation ($Q1_n - Q6_n$) à 7 éléments binaires envoyés au modulateur en treillis ($Q3_n - Q6_n + Y0_n - Y2_n$).

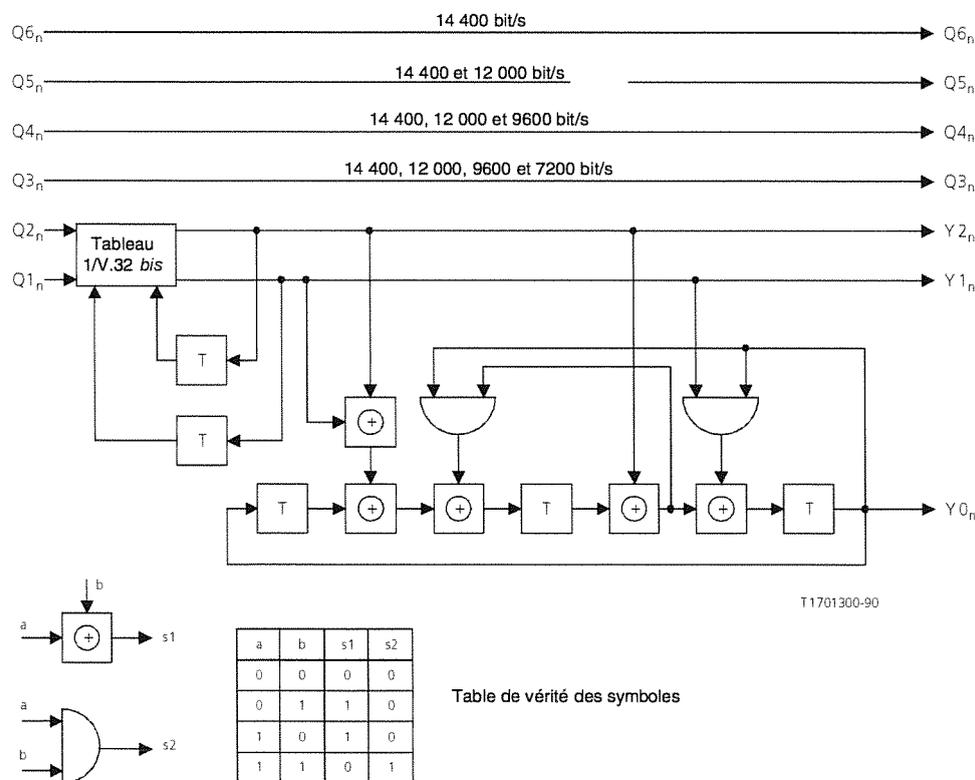
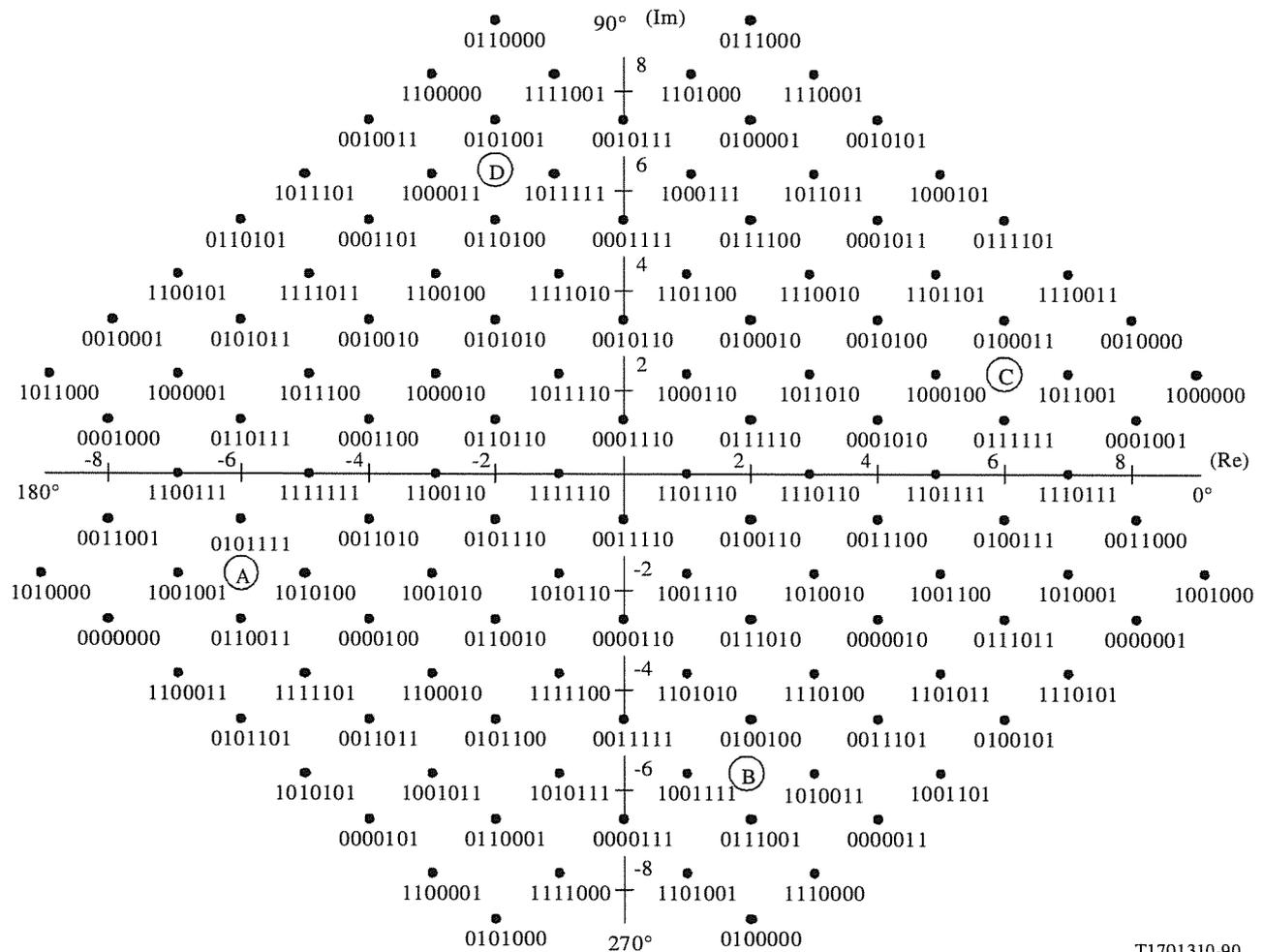


FIGURE 1/V.32 bis
Codage en treillis

Toujours issu de la recommandation V.32bis, la constellation suivante est celle obtenue à la sortie du modulateur pour une modulation à 14'400 bit/s.

Chaque moment de modulation ($2^7 = 128$) représente 6 bits informationnels et un bit de redondance.

La rapidité de modulation est de 14'400bit/s divisé par 6bits par moment de modulation = 2400 Bd. La fréquence de la porteuse est fixée à 1'800Hz. Les modems appliquant cette recommandation offre donc un débit de 14'400bit/s sur le réseau téléphonique dont la bande passante est de 2'100Hz.



T1701310-90

Remarque – Les nombres binaires représentent $Y_0, Y_1, Y_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$.
A, B, C, D se réfèrent aux éléments du signal de synchronisation.

FIGURE 2-1/V.32bis

Diagramme vectoriel du signal et correspondance pour la modulation à 14 400 bit/s

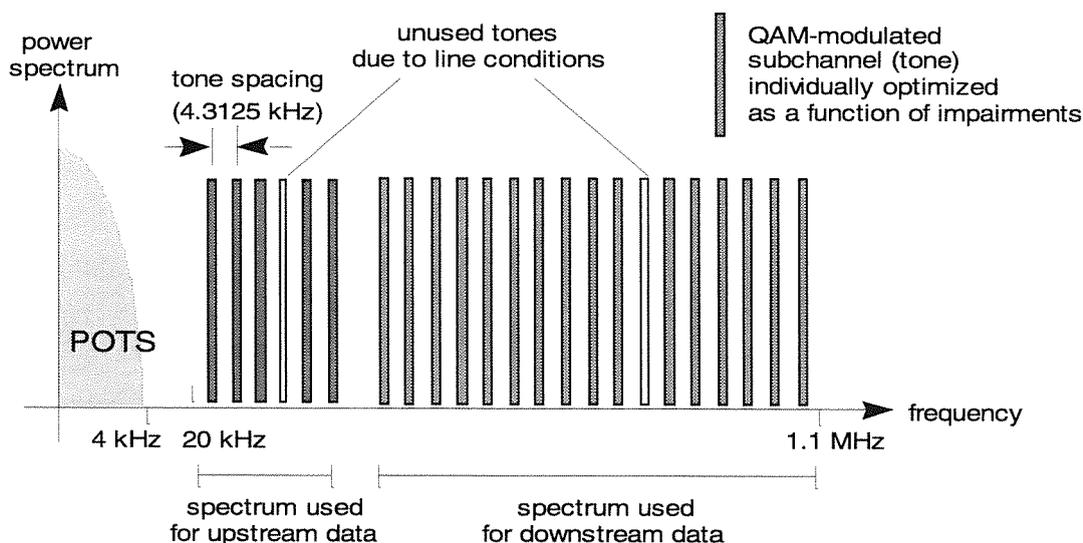
CAP

La modulation CAP (Carrierless Amplitude and Phase modulation) est une forme de modulation QAM sans porteuse. Chaque moment de modulation est défini par rapport au moment précédent et non par rapport à l'état d'une porteuse qui pourrait être prise comme référence fixe. La référence à l'état précédent entraîne donc une rotation de la constellation.

La modulation CAP est de plus en plus utilisée par les modems à large bande. Par rapport à la modulation 2B1Q, CAP utilise une bande passante plus étroite et permet selon les cas de libérer la bande passante inférieure à 4kHz. Cette technique permet l'utilisation simultanée du téléphone et d'une transmission de donnée sur la même ligne bifilaire.

DMT

DMT (Discrete Multi Tone) est une forme de modulation multiporteuses. Dans la solution adoptée par la norme T1.413 pour les modems ADSL, le spectre de fréquence compris entre 0Hz et 1.104MHz est divisé en 256 sous-canaux distincts espacés de 4,3125 kHz. Les sous-canaux inférieurs sont généralement réservés au POTS, ainsi, les sous-canaux 1 à 6 sont en principe inutilisés par ADSL et réservent la bande de fréquence jusqu'à 25.875kHz à la téléphonie analogique. Selon T1.413, seuls les sous-canaux 1 à 31 peuvent être utilisés pour le débit upstream.



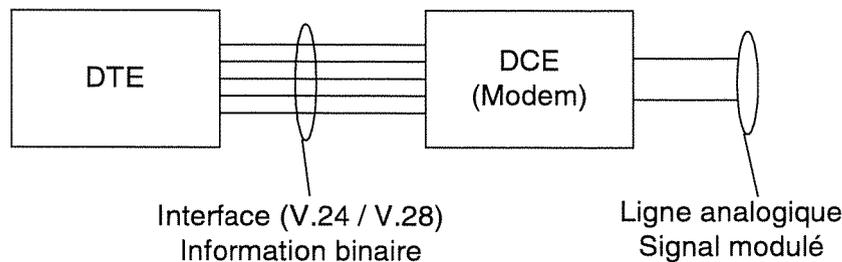
Chaque canal reçoit une modulation de type QAM avec un nombre variable de niveaux. DMT va en effet adapter dynamiquement la capacité de chaque canal en fonction des caractéristiques de la ligne. Chaque sous-canal de 4kHz peut être modulé indépendamment de 0 à 15 bit/s par Hz, ce qui porte le débit maximal de chaque canal à 60 kbit/s. Certaines implémentations autorisent même 16bit/s par Hz, ce qui porte le débit max. à 64kbit/s par sous-canal.

La division de la bande passante disponible en un ensemble de sous-canaux indépendants, est la clé des performances obtenues par DMT. En mesurant la qualité de chaque sous-canal et en allouant un nombre de bits par sous-canal basé sur sa qualité, DMT optimise le signal transmis sur chaque ligne. Ainsi, DMT évite d'utiliser des sous-canaux pour lesquels l'atténuation du signal ou le rapport signal/bruit est trop important.

4. Équipements de transmission de données

4.1 Modem

Le terme modem signifie modulateur-démodulateur. Le modem a pour fonction essentielle d'adapter les données numériques provenant du DTE aux caractéristiques de la ligne.



Les divers types de modems se distinguent par les critères suivants:

- Le débit: de 300 bit/s (V.21) à 56 kbit/s (V.90).
- La technique de modulation utilisée.
- Le mode synchrone ou asynchrone.
- La possibilité de transmettre en semi-duplex ou en duplex intégral.

Dans tous les cas, la fréquence porteuse est choisie de sorte que le spectre du signal se trouve à l'intérieur de la bande passante téléphonique.

Les modems utilisent les techniques de modulation étudiées précédemment pour échanger des données numériques sur le réseau téléphonique analogique. Rapidement, il a été nécessaire de permettre aux modems développés par des fabricants différents de communiquer entre eux sur le réseau téléphonique international. C'est la raison qui a conduit à l'élaboration de recommandations par l'UIT-T. Les premières recommandations datent des années 60 alors que les modems V.22 et V.22bis ont contribué au succès du minitel français ou du vidéotex dans les années 80. Aujourd'hui, les modems qui n'offrent pas un débit minimal de 28'000bit/s sur le réseau téléphonique ne répondent certainement plus au besoin des applications multimédia (accès Internet).

Le tableau suivant présente les standards les plus courants

UIT	AT&T	Débit (bit/s)	Valeurs/ moment	Débit de moment (Bauds)	Mode sync. / async.	Semi-duplex / duplex	2/4 fils	Modulation
V.21	103J 113D	300	2	300	async.	Duplex FDM	2	FSK
V.22	212A	1200	4	600	sync. async.	Duplex FDM	2	DPSK
V.22bis		2400	16	600	sync. async.	Duplex FDM	2	QAM
V.23	202	600, 1200	2	600, 1200	sync. async.	Semi-duplex	4	FSK
V.26	201B	2400	4	1200	sync.	Duplex	4 (louée)	DPSK
V.26bis	201C	2400, 1200	4	1200, 600	sync.	Semi-duplex	2	DPSK
V.27	208A	4800	8	1600	sync.	Semi-duplex / duplex	4 2 (louée)	DPSK
V.27bis	208A	4800/ 2400	8	1600	sync.	Semi-duplex / duplex	4 2 (louée)	DPSK
V.27ter	208B	4800/ 2400	8	1600	sync.	Semi-duplex	2	DPSK
V.29	209	9600	16	2400	sync.	Semi-duplex / duplex	4 2 (louée)	A+PSK
V.32		9600	16	2400	sync.	Semi-duplex	2	TCM
V.32bis		14400 (12000, 9600...)		2400	sync.	Semi-duplex / duplex	2	TCM
V.33		14400	128	2060	sync.	Semi-duplex / duplex	4 2	TCM
V.34		28800 (26400, 24000...)		2400-3429	sync.	duplex	2	TCM
V.34+		33600			sync.	duplex	2	TCM
56Kflex		→33600 ←56000			sync.	duplex	2	
X2		→33600 ←56000			sync.	duplex	2	
V.90		→33600 ←56000			sync.	duplex	2	

Adaptation automatique des débits et des recommandations

Les dernières générations de modems sont tous auto-adaptatifs. L'adaptation automatique du débit est liée aux caractéristiques de la ligne et aux protocoles supportés par l'équipement opposé.

- ✓ Les modems adaptent leur débit aux caractéristiques de la ligne. Le modem tentera toujours d'établir une communication avec le plus haut débit qu'il est capable d'appliquer. Cependant, lorsque le modem détecte un taux d'erreur trop important, il réduit automatiquement le débit d'entente avec l'équipement opposé afin d'appliquer une modulation plus robuste. La recommandation V.34+, par exemple, définit des vitesses de transmissions relativement proches (33'600 bit/s; 31'200 bit/s; 28'800 bit/s; 26'400 bit/s; 24'000 bit/s; 21'600 bit/s; 19'200 bit/s; 16'800 bit/s; 14'400 bit/s; 12'000 bit/s; 9'600 bit/s; 7'200 bit/s; 4'800 bit/s; 2'400 bit/s).
- ✓ Lors de l'établissement d'une communication, les recommandations définissent des séquences de synchronisation qui permettent aux modems de dialoguer ensemble. Ces séquences permettent par exemples à un modem V.90 (56 kbit/s) de reconnaître un modem de la série V.32 (9'600 bit/s) ou même V.26bis (2'400 bit/s) et d'adapter ses paramètres de modulation. Cette reconnaissance de recommandations multiples prend toute son importance pour les modems installés chez les services provider (BBS ou provider Internet).

Protection des données

La firme américaine Microcom Inc. a développé dans les années 80 des protocoles destinés à établir des communications protégées contre les erreurs de transmission entre des modems de marques différentes. Le but était de permettre aux terminaux sans intelligence de communiquer entre eux de façon optimale. Le protocole se déroulant directement entre les modems, les terminaux n'ont pas besoin de disposer d'un logiciel de communication complexe. La firme développa ainsi les protocoles MNP (Microcom Networking Protocol) dont la spécification des classes 2 à 4 a été reprise par l'UIT dans la recommandation V.42. Les premiers modems ont utilisé exclusivement le protocole propriétaire MNP-4

Le LAP-M (Link Access Procedure for Modem) est un protocole de correction d'erreurs spécifié par l'UIT dans la recommandation V.42. Il s'agit d'un protocole HDLC (High Level Data Link Control) destiné à être utilisé entre deux modems.

Le protocole V.42 inclut généralement deux possibilités : le LAP-M (Link Access Protocol for Modems) et le protocole MNP-4 en alternative.

LAP-M et **MNP4** sont des protocoles spécifiques aux modems inclus dans la recommandation **V.42**. Ils sont appliqués sur une liaison synchrone et se déroulent directement entre les modems, sans impliquer les DTE. Ces protocoles appliquent tous deux une détection des erreurs par l'ajout d'un CRC (Cyclic Redundancy Check).

Lors de l'établissement de la communication, V.42 définit une procédure pour la négociation du protocole appliqué. Le modem appelant envoie une suite de caractères appelée ODP (*Originator Detection Pattern*) et attend pendant 750 ms une réponse de type ADP (*Answerer Detection Pattern*) de la part du modem appelé. La réponse ADP peut indiquer que le modem appelé supporte la correction d'erreur ou non. Si la correction d'erreur est supportée, le modem appelant négocie le LAP-M (une procédure qui ne sera pas décrite ici). Si la négociation échoue, le modem appelant envoie une séquence de "polling" MNP (protocole alternatif). S'il n'a pas de réponse, le mode normal (sans correction) est alors établi.

Compression des données

Le protocole de compression est soit le **V.42bis**, soit le **MNP5**, dépendant du protocole de correction d'erreur négocié lors de l'établissement de la communication. MNP5 utilise un codage statistique basé sur la fréquence d'occurrence de chaque caractère, alors que la norme V.42bis utilise une compression de type dictionnaire LZW basée sur la fréquence d'occurrence des chaînes de caractères.

Le Taux de compression obtenu avec MNP-5 est de 2, alors que le V.42bis arrive à un maximum théorique de 4. Ce taux de compression doit être pris en compte pour fixer le débit sur l'interface du DTE. Si par exemple nous disposons d'un modem V.34+ offrant un débit compressé sur la ligne téléphonique de 33'600 bit/s, le débit utile pourra être multiplié par 4, soit 134'400 sur l'interface du DTE si V.42bis est appliqué entre les modems.

Le débit effectif dépend surtout du type de données à comprimer. La compression sera importante sur des fichiers non compressés par les logiciels, par exemple des fichiers texte *.txt ou bitmap *.bmp, inversement elle sera faible, voire inexistante sur des fichiers compressés à partir des logiciels tels que *.zip, *.jpg etc.

Le contrôle de flux

Le débit sur l'interface entre le DTE et le DCE (V.24, USB ...) est généralement différent du débit entre les DCE. D'autre part, la liaison entre DTE et DCE est souvent asynchrone alors que le flux de données entre les DCE est généralement synchrone. Ces différences nécessitent la mise en place d'une régulation de flux.

Un modem supporte généralement le contrôle de flux hardware (CTS/RTS) et software (XON/XOFF) et comporte un buffer interne pour les données. Le contrôle de flux hardware est souvent utilisé pour des vitesses supérieures à 9'600 bit/s.

Le contrôle de flux local est utilisé entre l'équipement terminal (DTE) et le modem (DCE); il ne doit pas forcément être du même type que celui du modem à distance. Il doit cependant être valable dans les deux sens (terminal <-> modem).

Lorsque le modem n'arrive plus à transmettre assez vite les données, son buffer étant presque plein, il le signale en supprimant le signal CTS (ou en envoyant le caractère XOFF). Le rétablissement du signal (ou l'envoi du caractère XON) rétablit le flux terminal -> modem.

Lorsque le terminal n'arrive plus à absorber les données provenant du modem, il le signale en supprimant le signal RTS (ou par le caractère XOFF). Lorsque le terminal désire rétablir le flux, il remet le signal RTS (ou le caractère XON).

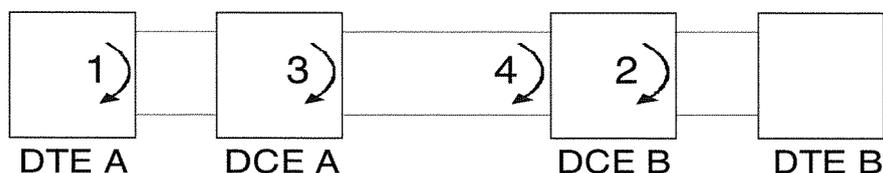
Certains programmes de communication (avec PPP notamment) utilisent les caractères XON et XOFF comme données, dans ce cas, il est absolument nécessaire d'utiliser le contrôle de flux hardware, côté utilisateur.

Maintien du synchronisme

Dans la transmission de données synchrone, il importe de maintenir le synchronisme entre les modems, même en l'absence de données à transmettre. Cette fonction est assurée par le **scrambler** (embrouilleur) qui génère des données symboliques en l'absence de données utiles. La partie essentielle du scrambler est constituée d'un registre à décalage à boucle fermée. Le train de bits du signal de données est combiné avec le contenu du registre et ainsi brouillé. L'information ainsi traitée est envoyée au descrambler (désembrouilleur) du modem récepteur qui se compose d'un registre à décalage identique à celui de l'émetteur. Le train de bit original est reconstitué par le registre à décalage du récepteur.

Boucles de contrôle

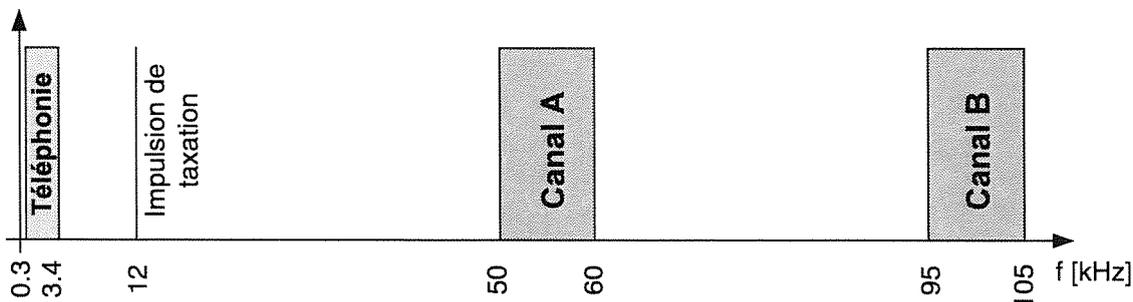
Il est possible de simplifier la détection des sources d'erreur dans la transmission des données si on boucle les signaux d'émission à des endroits déterminés sur la voie de transmission. Quatre boucles numérotées 1 à 4 sont définies dans la recommandation V.54.



- **Boucle 1**
constitue le test de base pour un DTE. Cette boucle se trouve au sein du DTE.
- **Boucle 3**
se trouve dans la partie analogique de DCE, à proximité de la sortie vers la ligne de transmission. Cette boucle ne cause aucun problème sur une liaison à 4 fils. Sur deux fils, elle peut causer une désadaptation du terminateur
- **Boucle 2**
permet de vérifier la ligne de transmission et le DCE distant. Cette boucle est uniquement réalisable sur un système duplex.
- **Boucle 4**
réalisée sur l'interface de ligne du DCE, elle exige une liaison 4 fils entre les DCE.

4.2 Modem supravocal

La transmission d'une conversation téléphonique utilise la bande passante inférieure à 3'400Hz, alors que la ligne de raccordement du client offre une largeur de bande supérieure à 100kHz. La technique **DOV** utilise la bande passante supérieure et permet ainsi d'effectuer simultanément sur la même ligne de raccordement une communication téléphonique et une transmission de donnée. La séparation des canaux est réalisée à l'aide d'un filtre passif installé d'une part chez le client et d'autre part dans le central de raccordement.



Les équipements DOV utilisent une modulation FSK et offrent un accès duplex jusqu'à 19.2 kbit/s sur les deux fils de la ligne de raccordement. Ils sont principalement utilisés par Swisscom pour offrir aux clients des services télématiques à protocoles d'accès conformes aux recommandations X.25 et X.28 vers le réseau de transmission de données par paquets.

La ligne utilisée doit être non pupinisée. La portée dépend essentiellement de la section du câble, elle est de l'ordre de 5 km pour une section de 0.4mm, 10 km pour 0.6mm et atteint 15 km pour une section de 0.8mm.

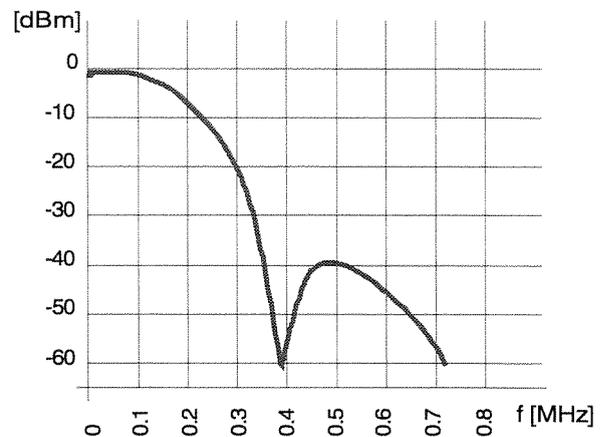
4.3 Modems en bande de base et lignes louées

On parle de modulation en bande base lorsque les données sont transmises sur le support de transmission sans transposition en fréquence. Le codage **2B1Q** est le plus fréquemment utilisé dans ce cas. Il n'est pas possible d'effectuer une transmission en bande base sur le POTS pour les raisons suivantes:

1. La bande passante téléphonique est comprise entre 300Hz et 3400Hz. Cette limitation n'est pas compatible avec la composante continue présente dans le spectre de signaux en bande de base.
2. La transmission numérique exige un canal sans distorsion de phase. Ce type de distorsion est bien présent sur le réseau téléphonique, même si elle n'est pas gênante pour la transmission de la parole, car l'ouïe y est insensible.
3. Le réseau téléphonique génère de plus une distorsion d'amplitude et des réflexions qui sont très néfastes à la transmission de données.

Le graphique ci-contre représente le spectre de puissance du signal 2B1Q d'un équipement de transmission à 2 Mbit/s. Il met en évidence deux caractéristiques du signal qui le rendent incompatible avec le POT.

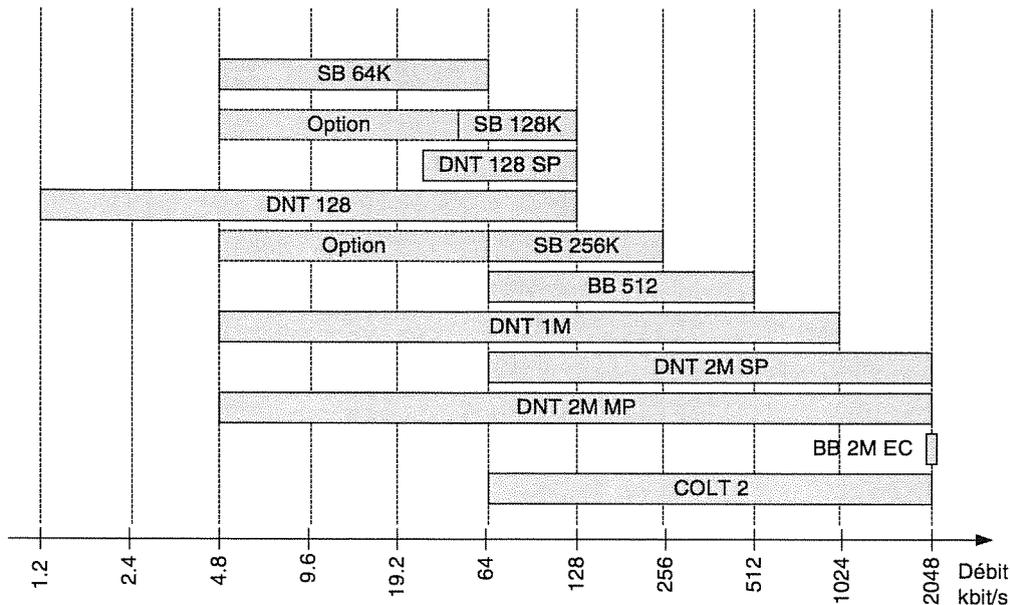
- Ce signal possède une composante continue.
- La bande passante nécessaire dépend de la vitesse de modulation, les débits nécessaires font que la bande passante téléphonique se montre rapidement trop étroite.



Les modems en bande de base sont utilisés pour la mise à disposition de lignes louées pour les clients. Ils utilisent la ligne cuivre du réseau de raccordement AN (Anschluss Netz) pour les liaisons Direct Link et Private Line.

- Dans le premier cas (Direct Link), les équipements de transmission sont installés chez les clients, aux extrémités d'une ligne cuivre de bout en bout réalisée uniquement par un renvoi au distributeur du central de raccordement du client.
- Dans le second cas (Private Line), les équipements sont installés d'une part chez le client, d'autre part à l'autre extrémité de la ligne, dans la station de transmission, pour donner l'accès aux plates-formes Milanet et FlexMux ou au réseau de transport.

Swisscom dispose d'une large palette de modems en bande de base dont le graphique ci-dessous donne un aperçu:



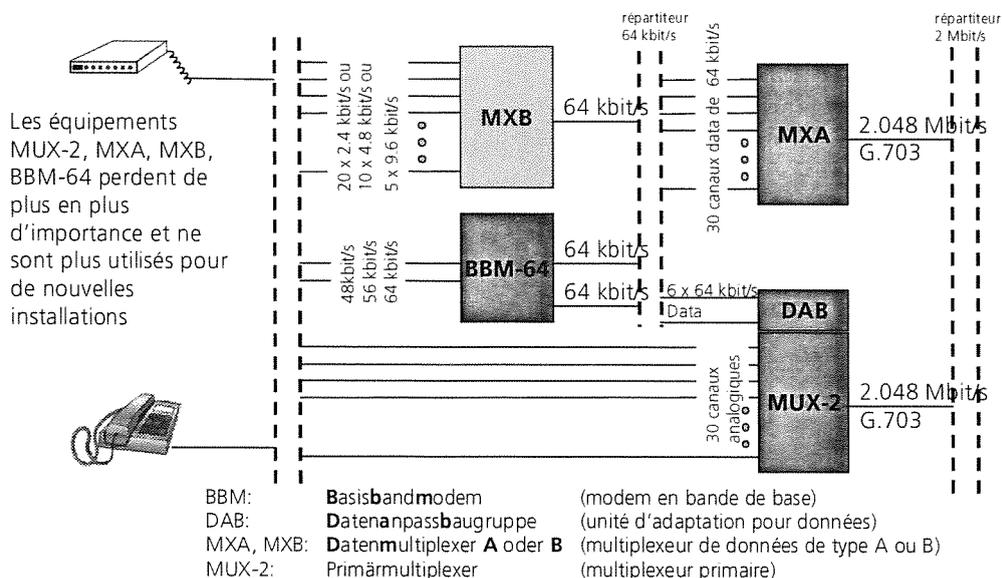
Les modems installés chez le client sont le plus souvent fournis sous la forme d'un boîtier de table, alors qu'au niveau de la station de transmission, les modems sont généralement installés sous forme de cartes enfichables dans un rack.

Aujourd'hui, la prise en charge des débits vers le réseau de transport est assurée par les plateformes pour lignes louées Flex-Mux ou MilaNet.

Flex-Mux est une plateforme pour circuits loués offrant des débits ≤ 2 Mbit/s. Elle utilise les modems de la série DNT fabriqués par Nokia. Cette plateforme est encore largement exploitée mais ne bénéficie plus d'extensions.

MilaNet est une plateforme homogène de circuits loués bénéficiant d'un système de gestion de réseau centralisé. Elle permet la réalisation de circuits de base et à valeur ajoutée (Managed Bandwith), gérées "End-to-End", pour des débits ≤ 2 Mbit/s. Cette plateforme utilise les modems NAG 2D.C, NAG 2D.Fs1, 26xx, 27xx fabriqués par Newbridge.

Des systèmes de multiplexage sont encore en service pour regrouper les débits inférieurs à 64 kbit/s des anciens modems vers le débit E1 qui sera pris en charge par les réseaux PDH ou **SDH du réseau de transport Swisscom.**



4.4 Modems large bande

Les modems à large bande offrent des débits importants (2Mbit/s et plus) sur la ligne de raccordement bifilaire du client. Ces modems utilisent des techniques xDSL dont le tableau ci-dessous représente les principales caractéristiques:

	Débit de transmission maximal (max.)	nbre de lignes TP	Code de ligne	Remarques
HDSL High-bit-rate DSL	↓↑ 2 Mbit/s	1, 2 ou 3	2B1Q CAP	le plus largement utilisé, il a été principalement conçu comme alternative peu coûteuse aux lignes T1/E1 (sans répéteurs). Portée maximale: environ 6km
SDSL Single Pair DSL	↓↑ 768kbit/s ou 2 Mbit/s	1	2B1Q CAP	Perfectionnement de HDSL permettant de transporter le service T1/E1 sur une seule paire torsadée au lieu de 2 ou de 3. Certaines versions SDSL supporte également le POTS, le rendant plus approprié aux besoins des abonnés. Portée maximale: environ 4km
IDSL ISDN-based DSL	↓↑ 128 (/64) kbit/s	1	2B1Q	Le système offre à l'abonné un débit de 2x 64 kbit/s sur une ligne téléphonique habituelle. Ce débit peut aussi bien être utilisé par un bridge ou un routeur que pour offrir deux communications téléphoniques simultanées. Les NT (terminaisons de réseau) permettent le raccordement d'appareils analogiques conventionnels. Portée maximale: environ 8km
ADSL Asymmetric DSL	↓ 8 Mbit/s ↑ 1 Mbit/s	1	CAP DMT	ADSL supporte POTS ou ISDN-BA sur la même ligne. ISDN-BA nécessite une diminution de la largeur de bande ce qui réduit la portée d'environ 15%. Portée maximale: environ 5km
RADSL Rate-adaptive ADSL	Technologie non standard d'ADSL, considérée plutôt comme une évolution des systèmes ADSL basés sur la technique de modulation CAP. La technique DMT est implicitement RADSL.			
VDSL Very high-bit-rate DSL	13/26/52 Mbit/s (symétrique ou asymétrique)	1	DMT	Destiné principalement à une utilisation dans des configurations FTTC/B (Fiber-To-The-Curb/Building) du fait de sa portée limitée. Encore au stade expérimental. Portée maximale: environ 1.5km
G.Lite Splitterless DSL ou EZ-DSL ou DSL-LITE	↓ 1.5 Mbit/s ↑ 512kbit/s	1	DMT	Equipement d'abonné ADSL ne nécessitant pas l'installation de splitter. Ces modems s'installent de façon analogue aux modems traditionnels et sont compatibles avec les ATU-C conçus selon la recommandation T1.413.

4.5 Interfaces

On appelle interface toute jonction entre un poste de données et un autre appareil ou un réseau. La normalisation des interfaces est rendue obligatoire afin de garantir l'interopérabilité entre des équipements de fabricants différents. Aucun appareil ne pourrait fonctionner avec un autre sans définition des connecteurs, de la disposition et du nombre de broches du connecteur, de la fonction et des grandeurs électriques présentes sur ces broches.

La connexion d'un équipement informatique (ETTD) à un modem (ETCD) est réalisée par l'intermédiaire d'une jonction ou interface. L'étude de la jonction est une illustration intéressante des protocoles mis en œuvre au sein de la couche physique des architectures de communication. La jonction spécifie les caractéristiques mécaniques, électriques et fonctionnelles d'une connexion physique.

Les normes de l'UIT sont nommées à l'aide d'une lettre suivie d'un point et d'un numéro :

- V : Transmission de données par le téléphone.
- X : Réseaux publics de données.
- G : Connexions et circuits téléphoniques internationaux.

Le numéro identifie la norme parmi plusieurs autres dans un même champ d'application. C'est ainsi que l'on rencontre les normes UIT V.24, V.11, V.35, G.703 ou X.21.

Les définitions de jonctions décrites par RS-xxx ont été élaborées par l'EIA (Electronic Industry Association) américaine. Elles ont généralement été reprises par les recommandations de l'UIT.

Classification des circuits d'interface

D'une manière générale, les différentes lignes des interfaces sont réparties en quatre groupes

- Lignes de terre et de masse.

Elles sont utilisées comme point de référence du potentiel et comme conducteur de retour pour les autres circuits d'interface. Le plus souvent, des circuits électriques séparés sont prévus pour les lignes de terre et pour les lignes de masse.

- Lignes de données.

Ainsi que le nom l'indique, les données utiles sont transmises sur les lignes de données entre les appareils de données. En fonction de la nature de l'interface, le mode de fonctionnement des lignes de transmission de données est unidirectionnel ou bidirectionnel.

- Lignes d'horloge.

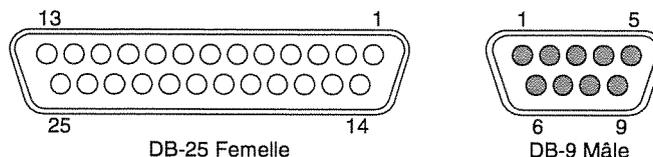
Les signaux de synchronisation nécessaires pour les données d'émission et de réception sont transmis sur les lignes d'horloge. Cependant, des lignes d'horloge ne sont pas toujours indispensables. C'est ainsi qu'il n'y a pas de lignes d'horloge dans la transmission de données asynchrones car les informations pour la synchronisation de l'émetteur et du récepteur sont fournies avec chaque caractère sous la forme du bit "start".

- Lignes pilotes.

Les lignes pilotes entre les appareils de données servent en premier lieu à commander l'échange des données. Un ETTD est informé par exemple que le modem raccordé est prêt au service ou non. Le déroulement dans le temps et l'ordre d'arrivée des différents signaux doivent être absolument respectés.

V.24

La recommandation V.24 définit par l'UIT définit les spécifications fonctionnelles de la jonction alors que la recommandation V.28 en décrit les caractéristiques électriques des signaux. Les dimensions mécaniques des connecteurs correspondent à la norme ISO 2110 et sont couramment appelés DB-9 pour la version à 9 broches et DB-25 pour la version à 25 broches.



La liste des principaux circuits de la jonction V.24 est représentée sur le tableau suivant:

UIT V.24	EIA RS 232	broche DB-25	broche DB-9	Description	ETCD	ETTD
101	A A	1	-	Terre de protection PE Protective ground	lignes de terre et de masse	0--0
102	A B	7	5	Terre de signalisation / Terre de service SE Signalground /Common return		0--0
103	B A	2	3	Émission des données TD Transmitted data	lignes de transmission de données	↔
104	B B	3	2	Réception des données RD Received data		↔
105	C A	4	7	Demande pour émettre RTS Request to send	lignes pilotes	↔
106	C B	5	8	Prêt à émettre CTS Clear to send		↔
107	C C	6	6	Poste de données prêt DSR Data set ready		↔
108.1		20	4	Connectez le poste de données sur la ligne Connect data set to line		↔
108.2	C D	20	4	Équipement terminal de données prêt DTR Data terminal ready		↔
125	C E	22	9	Indicateur d'appel Ring indicator		↔
109	C F	8	1	Détecteur du signal de ligne reçu sur la voie de données DCD Data channel received line signal detector		↔
110	C G	21		Détecteur de la qualité du signal de données Signal quality detector		↔
113	D A	24		Base de temps pour les éléments de signal à l'émission (ETTD)	lignes d'horloge	↔
114	D B	25		Base de temps pour les éléments de signal à l'émission (ETCD)		↔
115	D D	17		Base de temps pour les éléments de signal à la réception (ETCD)		↔
118	S B A	14		Émission des données sur la voie de retour	lignes pour la voie de retour (canal auxiliaire)	↔
119	S B B	16		Réception des données sur la voie de retour		↔
120	S C A	19		Transmettez les signaux de ligne sur la voie de retour		↔
121	S C B	13		Voie de retour prête		↔
122	S C F	12		Détecteur du signal reçu en ligne sur la voie de retour		↔

Confection de câbles "nullmodem"

Le câble "nullmodem" permet de relier deux DTE sans équipements de transmission. Le tableau suivant indique quelles broches du connecteur DB9 ou DB25 doivent être reliées par le câble.

	Extrémité A		Extrémité B		
	Type de connecteur		Type de connecteur		
	DB25	DB9	DB25	DB9	
Receive Data	3	2	2	3	Transmit Data
Transmit Data	2	3	3	2	Receive Data
Data Terminal Ready	20	4	6+8	6+1	Data Set Ready + Carrier Detect
System Ground	7	5	7	5	System Ground
Data Set Ready + Carrier Detect	6+8	6+1	20	4	Data Terminal Ready
Request to Send	4	7	5	8	Clear to Send
Clear to Send	5	8	4	7	Request to Send

V.28

La recommandation V.28 décrit les caractéristiques électriques pour les circuits d'interface décrits dans la recommandation V.24. Il s'agit de circuits électriques asymétriques pour des signaux à double courant. Les valeurs limites d'utilisation de V.24/V.28 sont de l'ordre de 20 kbit/s pour le débit et 15m pour la longueur du câble. Toutefois, pour les équipements existants, le fonctionnement jusqu'à 64 kbit/s est possible dans des conditions spécifiques.

Pour les nouveaux équipements destinés à être utilisés à des débits binaires supérieurs à 20 kbit/s, il convient d'envisager l'utilisation des caractéristiques électriques spécifiées dans les Recommandations V.10 et V.11.

V.11

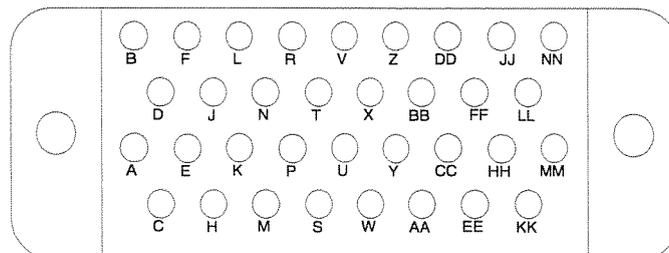
La recommandation V.11 définit les caractéristiques électriques des circuits de jonction symétriques à double courant fonctionnant à des débits binaires jusqu'à 10 Mbit/s.

Cette recommandation équivalente à RS-422 est également désignée comme **X.27** dans les recommandations de la série X.

V.35

La recommandation V.35 caractérise des liaisons avec un débit supérieur à 20 kbit/s entre l'ETTD et l'ETCD. Contrairement à V.24, cette recommandation décrit également les caractéristiques électriques des signaux. Ces caractéristiques sont proches de V.11 et permettent un interfonctionnement entre les deux recommandations. La longueur maximale du câble de jonction DCE-DTE et d'environ 15m.

ISO 2593 / Connector M34 female



PIN ISO 2593		V.35	FONCTION (CIRCUIT DESIGNATION ITU-T V.24)	DIRECTION DTE - DCE	TYPE
A		101	Protective ground		Ground
B		102	Signal ground / Common return		Ground
C		105	Request to send	⇒	Control
D		106	Ready for sending	⇐	Control
E		107	Data set ready	⇐	Control
F		109	Data channel received line signal detector	⇐	Control
R	T	104	Received data	⇐	Data
V	X	115	Receiver signal element timing (DCE)	⇐	Timing
Y	AA	114	Transmitter signal element timing (DCE)	⇐	Timing
P	S	103	Transmitted data	⇒	Data

RS-232

La liaison RS-232, définie par l'EIA (Electronic Industry Association) américaine, très souvent dénommée liaison série, est couramment employée pour relier un micro-ordinateur ou un terminal à un modem ou une interface réseau. Par son ancienneté, elle est généralisée sur de nombreux équipements et sert très souvent d'interface de télécommande. Les données sont transmises en mode asymétrique sur deux conducteurs dont l'un est la masse, ce qui limite le débit et la longueur maximale de la liaison. La norme RS-232 définit l'interface à trois niveaux : mécanique, électrique et fonctionnel.

Les principales caractéristiques de la RS-232 ont été reprises par l'UIT-T (ex-CCITT) sous la recommandation V.24, les caractéristiques électriques étant définies dans la Rec. V.28. On a pris l'habitude de dénommer indifféremment la liaison série RS-232 ou V.24/V.28.

RS-449

La liaison RS-449 est une version améliorée de la RS-232 avec une définition plus précise des connecteurs au niveau mécanique et fonctionnel. Elle est fondée sur l'utilisation de connecteurs DB-9 ou DB-37. Elle incorpore une meilleure gestion des masses et des facilités de tests. Elle permet une transmission de 2 Mbit/s sur une distance de 60 m.

RS-422

La liaison série RS-422 est fondée sur une transmission symétrique des signaux sur deux conducteurs indépendants, ce qui élimine la référence à un niveau de masse électrique. Les débits et les longueurs sont sensiblement améliorés par rapport à la RS-232. La norme RS-422 ne définit que les caractéristiques électriques et peut être utilisée sur des connecteurs de nature très différente (bornier, DB-9, DB-25, etc.). Elle est équivalente à la Rec. V.11 de l'UIT-T.

Il existe aussi une norme RS-423 proche de la RS-422 mais fonctionnant en mode asymétrique. Son câblage est cohérent avec celui de la RS-232. Il devient alors possible d'établir des liaisons directes entre RS-232 et RS-423.

X.25

La recommandation X.25 concerne la transmission de données par paquets sur réseau public. Elle introduit la notion de circuit virtuel. Elle définit les couches interface physique, liaison et réseau selon le modèle OSI à 7 couches. Elle a été adoptée dans le monde par tous les réseaux transportant des données en mode paquets. En Suisse elle est exploitée au sein du réseau TELEPAC et correspond à des liaisons fixes permanentes de 300 kbit/s à 256 kbit/s ou commutées via les PAD X.25 (Packed Assembler/Disassembler).

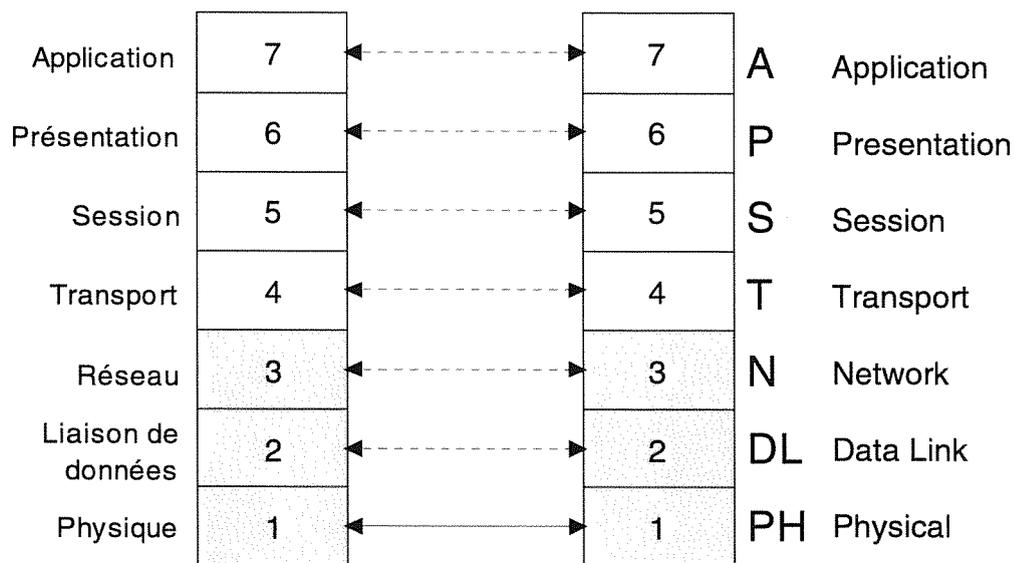
La transmission en mode paquet sera traitée au chapitre 7.1.

5. Introduction au modèle de référence OSI

Le modèle de référence de l'ISO, appelé modèle OSI (Open System Interconnection) est prépondérant pour la définition des services de télécommunication. Il structure les fonctions d'équipements de télécommunication et décrit la relation entre fonctions similaires d'équipements ou logiciels capables de communiquer entre eux. Les caractéristiques essentielles du modèle OSI sont les suivantes:

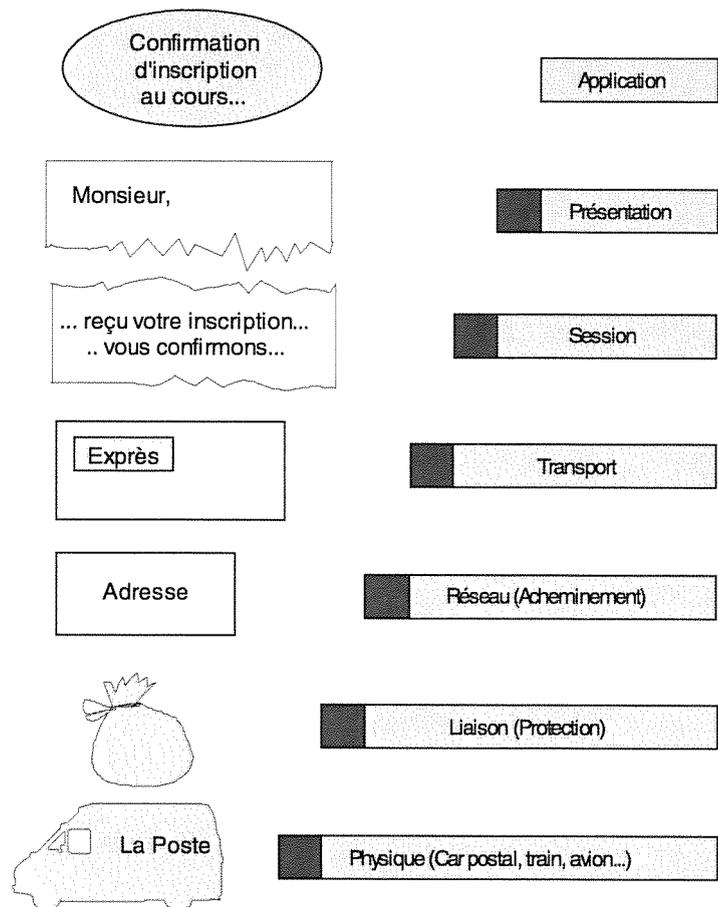
- Le modèle de référence OSI constitue un cadre de référence pour l'interconnexion de systèmes hétérogènes (dits aussi systèmes ouverts).
- Un système est dit ouvert lorsqu'il permet une communication entre équipements de types et de fabricants différents.
- Le modèle de référence OSI définit une architecture modulaire en 7 couches, applicable pour toutes les catégories de réseaux.
- Le modèle de référence développé en 1979-80 par l'ISO (International Standardization Organization) est publié dans la norme ISO 7498 en 1984.
- Le modèle OSI n'est pas une norme mais un modèle d'architecture de réseau. Il sert de base pour différents standards et normes.

Modèle de référence OSI



- Chaque couche offre des services à la couche adjacente supérieure et utilise les services de la couche adjacente inférieure.
- Le passage d'une couche vers une autre est régi par les primitives de services (ASP: Abstract Service Primitives)

Comparaison avec le trafic postal



Couche Physique (couche 1)

La couche physique représente le support des propriétés mécaniques et électriques, respectivement électromagnétiques ou optiques, de l'interface de communication. Elle assure la transmission transparente d'un débit binaire sur le support de transmission

- Fonctions :
- Etablissement, maintien et libération des liaisons "physiques".
 - Transport du flux de bits (non contrôle).
 - Mise à disposition des adresses "physiques".
 - Contrôle de direction.
 - Essai des circuits.
 - Commande/contrôle de la vitesse de transmission.

Couche Liaison de données (couche 2)

La couche liaison de données garantit une transmission sûre de données numériques entre deux nœuds, respectivement entre un nœud et un terminal.

- Fonctions :
- Etablissement, maintien et libération de connexions de liaison de données.
 - Accès au canal de transmission.
 - Délimitation et synchronisation de trame.
 - Séquencement des trames.
 - Détection d'erreurs.
 - Correction d'erreurs par retransmission.
 - Reprise.
 - Régulation de flux.

Couche Réseau (couche 3)

La couche réseau établit l'association des liaisons partielles à travers le réseau pour constituer une liaison de bout en bout (mais pas un protocole de bout en bout).

- Fonctions :
- Etablissement, maintient et libération de connexions de réseau.
 - Mise à disposition d'adresses de réseaux / routage.
 - Multiplexage de connexions réseaux sur une connexion de couche 2.
 - Segmentation et réassemblage.
 - Régulation de flux.

Couche Transport (couche 4)

La couche de transport assure un transport transparent et fiable des données de bout en bout pour les couches supérieures en les déchargeant des détails d'exécution. Elle établit une connexion fiable et conforme à la classe de service requise par l'application.

- Fonctions :
- Etablissement, maintient et libération de connexions de transport.
 - Multiplexage de bout en bout de connexions de transport sur une connexion réseau.
 - Séquencement sur chaque connexion.
 - Détection d'erreur de bout en bout.
 - Sélection de la classe de transport en fonction des exigences requises par l'application.
 - Régulation de flux de bout en bout.

Couche Session (couche 5)

La couche session assure la mise à disposition des moyens d'établissement et de clôture de la session et de ceux de supervision du dialogue.

- Fonctions :
- Etablissement, maintient et libération de connexions de session.
 - Synchronisation de la session sur des points de reprise.
 - Gestion des échanges (interaction bilatérale simultanée, à l'alternat, unilatérale).
 - Régulation de flux.
 - Reprise / Mise en quarantaine.

Couche Présentation (couche 6)

La couche présentation assume la mise à disposition des moyens de présentation (polices de caractères, attributs) des informations. Elle effectue la traduction de la syntaxe locale spécifique au constructeur et à l'appareil en une syntaxe commune (syntaxe de transfert) et inversement.

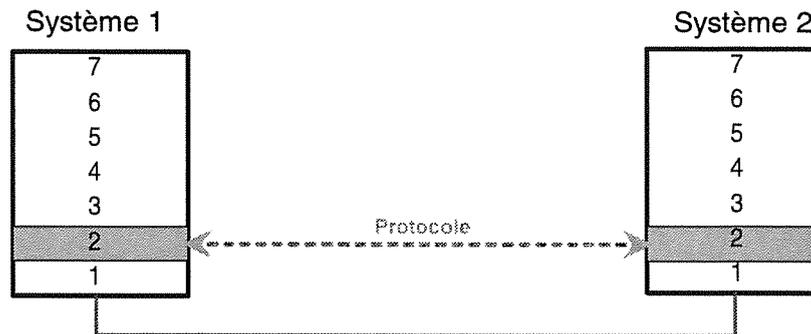
- Fonctions :
- Demande d'établissement et de libération de session.
 - Transformation de l'information (compression, chiffrement).
 - Transcodage.
 - Négociation de la syntaxe.
 - Modification de formats.

Couche Application (couche 7)

La couche application représente le lien entre le processus d'application (distribué) et le système de communication. Elle met à disposition de l'utilisateur les applications issues du monde de l'informatique et de la télécommunication (messagerie électronique, transfert de fichiers, visiophonie, etc.)

- Fonctions :
- Authentification et identification des partenaires de la communication.
 - Délivrance du droit de communiquer.
 - Détermination des ressources et de la qualité de service nécessaires.
 - Identification des contraintes de syntaxe (alphabet, structure de données).

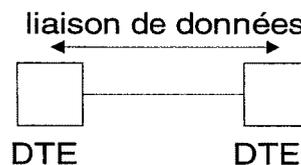
6. Fonctions et protocoles de couche 2



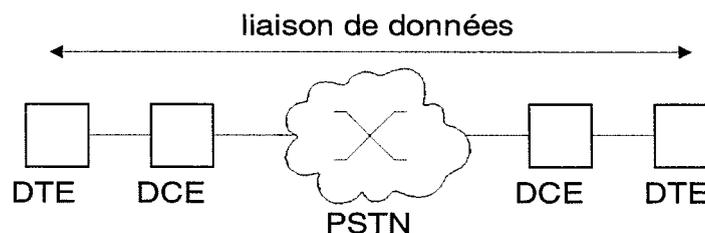
La couche liaison de données met en œuvre des algorithmes permettant d'offrir aux couches supérieures un **service fiable** de transmission de **blocs de données** entre entités paires connectées à un support physique partagé.

Le protocole liaison de données sera mis en œuvre de bout en bout:

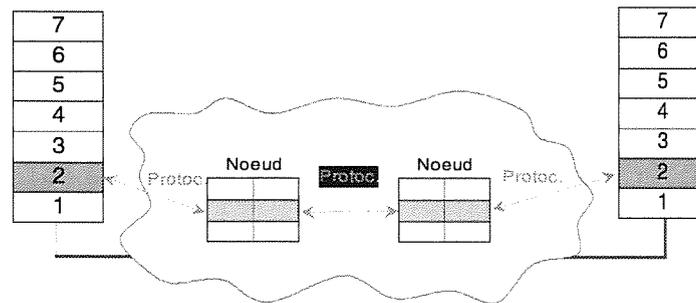
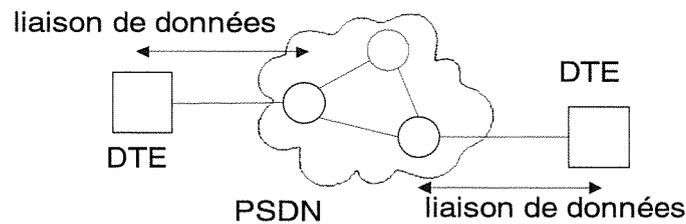
- Si deux terminaux sont reliés en point à point par une connexion physique directe.



- Si la liaison physique est établie à l'aide de modems ou d'adaptateurs de terminaux au travers du réseau téléphonique analogique ou numérique.



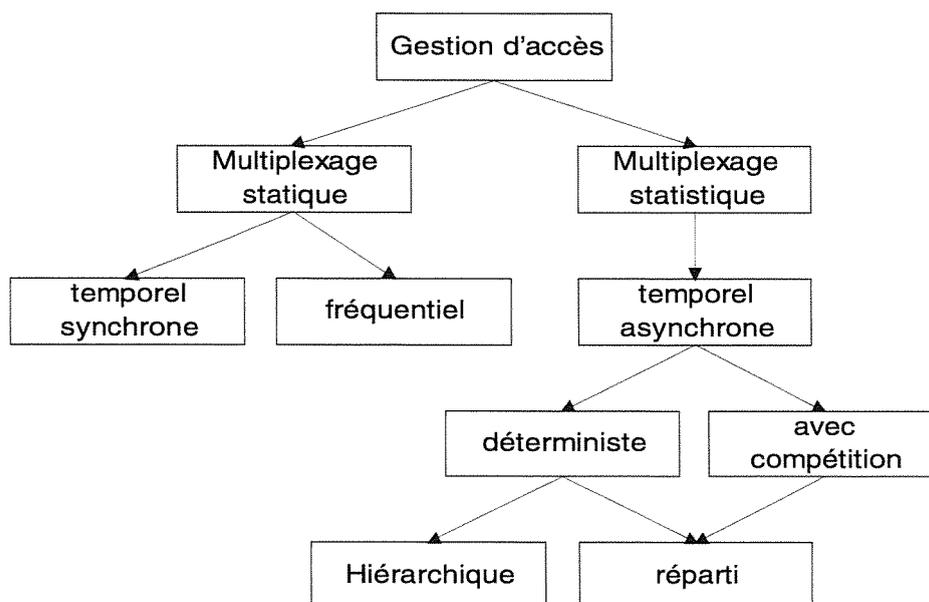
Le protocole de liaison de données est mis en œuvre localement par exemple entre un nœud d'un réseau à commutation de paquets et un DTE.



6.1.1 Accès au canal physique

- Cette fonction est simple si la topologie est de type point à point.
- Dans le cas d'une topologie multipoint, la gestion de l'accès des stations au canal est réalisée en fonction de facteurs tels que le temps d'accès moyen, le rendement moyen ou la courtoisie d'accès.

La classification des différentes méthodes d'accès au canal est illustrée ci-dessous en fonction du type de multiplexage pratiqué. Nous effectuons dans ce chapitre uniquement un rappel des divers types de multiplexage. Le cours *Technique de transmission* vous donne plus de détail sur cette matière.



Multiplexage temporel synchrone (multiplexage statique)

Ses principales caractéristiques sont:

- Il est pratiqué en téléphonie numérique.
- Il garanti un débit constant.
- L'accès au canal est rythmé par l'horloge système.
- Le nombre de stations est limité au nombre de canaux disponibles.
- Il est mal adapté à la transmission de données par son manque de souplesse.

Le multiplexage fréquentiel présente les mêmes caractéristiques que le multiplexage temporel synchrone.

Multiplexage temporel asynchrone (multiplexage statistique)

Ses principales caractéristiques sont:

- Ce type de multiplexage est bien adapté au trafic de données.
- Il nécessite la résolution de la problématique de l'accès au canal.

Pour cela, les méthodes énoncées ci-dessous peuvent être appliquées. Elles peuvent être réparties en deux catégories.

Les méthodes d'accès déterministes.

- Assurent un meilleur contrôle de l'accès.
- Garantissent un temps d'accès minimal au canal.
- Offrent un meilleur rendement lorsque le trafic est important.

Les méthodes d'accès par compétition.

- Minimisent le temps d'accès au canal.
- Offrent un meilleur rendement lorsque le trafic est faible.

6.1.2 Délimitation de trame

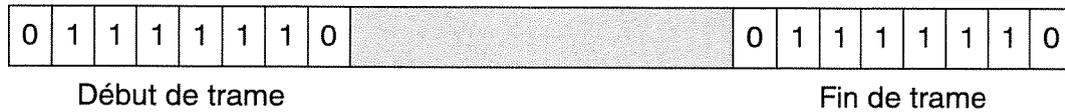
La couche liaison de données manipule des blocs de données appelés *Unités de données de protocoles de couche liaison de données* (L-PDU Link layer Protocol Data Unit) ou plus simplement des trames (frames).

Les techniques suivantes sont appliquées pour délimiter les trames:

- L'utilisation de fanions en début et en fin de trame.
- L'utilisation de caractères de délimitation.
- Le comptage d'octets.
- La violation de codage de couche physique (réalisé par la couche physique).

Délimitation de la trame par des fanions

Cette méthode peut être utilisée pour délimiter les trames lorsque le protocole appliqué est orienté bit. Le principe consiste à placer en début et en fin de trame une séquence particulière de bits. Une séquence souvent rencontrée est la suivante:

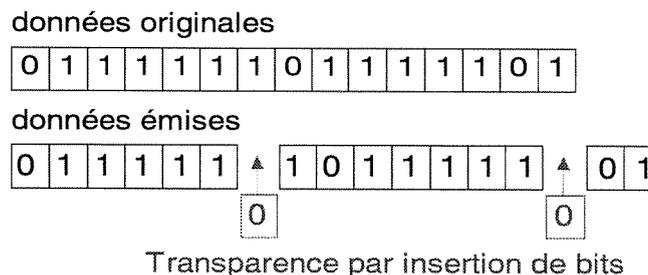


Il est alors nécessaire d'éviter que la séquence servant à délimiter la trame n'apparaisse dans un autre champ de la trame et ne soit confondue avec le fanion.

La méthode utilisée est l'application d'un mécanisme appelé *bit stuffing*, c'est à dire insertion de bits de transparence.

Ce mécanisme est le suivant:

- A l'émission, l'émetteur ajoute systématiquement un bit "0" après une séquence de 5 bits "1" consécutifs.
- A la réception, le récepteur supprime le "0" suivant une séquence de 5 bits "1" consécutifs.
- Les fanions ne subissent pas ce mécanisme.



Cette technique de délimitation de trame est mise en œuvre dans le protocole générique HDLC décrit au chapitre 6.3 et dans tous les protocoles qui en sont dérivés (LAPB, LAPD, LAPF, etc.).

Délimitation de la trame par des caractères de délimitation

La délimitation des trames par des caractères de délimitation est utilisée lorsque le protocole est orienté caractère.

Cette technique de délimitation de trame n'est plus beaucoup rencontrée car la majorité des protocoles utilisés à ce jour sont orientés sur l'élément bit et non sur l'élément caractère.

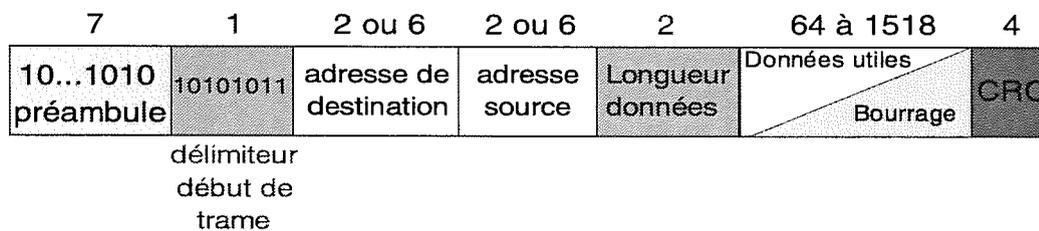
Délimitation de la trame par violation de codage

Cette technique de délimitation de trame est mise en œuvre par la couche physique, sous contrôle de la couche liaison de données. Elle consiste à violer la règle de codage appliquée par la couche 1 pour indiquer le début ou la fin de la trame. Cette technique ne nécessite pas de mesure particulière pour garantir la transparence des données.

Délimitation de la trame par comptage d'octets

Cette technique consiste à indiquer dans un champ particulier de l'entête le nombre d'octets de la trame. Cette technique ne nécessite pas de mesure particulière pour garantir la transparence des données mais nécessite la mise en place d'un autre mécanisme pour marquer le début de la trame et trouver le champ de longueur de trame.

Par exemple dans IEEE 802.3 (CSMA/CD), une suite particulière de bits SFD (Start of Frame Delimiter) marque le début de la trame.



6.1.3 Détection et correction d'erreurs

La couche liaison de données doit fournir aux couches supérieures une liaison exempte d'erreurs sur la base d'une liaison physique au taux d'erreurs parfois élevé. Pour y parvenir, les protocoles de couche liaison de données appliquent les mécanismes suivants:

- Groupement des données dans une trame dont la longueur est choisie en fonction du taux d'erreur de la ligne et de l'application.
- Insertion d'un mécanisme de détection, parfois de correction d'erreur.
- Mise en œuvre d'un protocole de retransmission des trames erronées.
- Signalisation aux couches supérieures les erreurs irrécupérables (coupure de ligne ...).

6.1.4 Régulation de flux

Une régulation de flux doit être mise en œuvre lorsque le récepteur n'est pas en mesure de suivre le rythme imposé par l'émetteur.

- **Régulation de flux par tout ou rien**

- **=Protocole XON-XOFF**

- Ce mécanisme est fréquemment utilisé lorsque le protocole est orienté caractère. Le récepteur envoie à l'émetteur des caractères signifiant l'arrêt ou la reprise de l'émission des données. Cette méthode de régulation de flux est généralement utilisée pour réguler le flux entre un terminal et un hôte reliés par une ligne série.

- **Régulation par rétention des acquittements**

- Le récepteur omet de quittance les trames reçues tant qu'il est dans l'impossibilité de les traiter. Cette technique est particulièrement performante lorsque le protocole autorise l'envoi de trames en anticipation des acquittements.

- Cette méthode de régulation de flux est utilisée dans les protocoles génériques HDLC.

- **Régulation de flux par octroi de crédits d'émission**

- Contrairement à la méthode précédente, celle-ci dissocie la régulation de flux et le mécanisme de protection contre les erreurs de transmission.

- Cette technique est mise en œuvre dans la signalisation ATM.

Catégories de services

Les services offerts peuvent être classifiés en trois catégories:

Service sans connexion et sans acquittement

Les caractéristiques principales de ce type de service sont:

- L'envoi de données sans connexion préalable.
- Aucun mécanisme n'est activé pour assurer la réception sans erreurs de l'information.
- Ce type de service est envisageable sur un canal peu perturbé et sans contraintes temporelles.

Ce type de service est typiquement mis en œuvre par exemple dans les réseaux locaux qui appliquent une méthode d'accès au canal par compétition (Ethernet, IEEE 802.3).

Service sans connexion avec acquittement

Les caractéristiques principales de ce type de service sont:

- L'envoi de données sans connexion préalable.
- Chaque donnée est acquittée auprès de l'émetteur.

Ce type de service est typiquement mis en œuvre par exemple dans les réseaux locaux qui appliquent une méthode d'accès au canal par passage de jeton sur une topologie en anneau.

Service avec connexion

Les caractéristiques principales de ce type de service sont:

- Il représente le type de service le plus fiable.
- L'utilisation de ce service est caractérisé par trois phases distinctes:
 - a) L'établissement de la connexion (réservation des ressources).
 - b) L'échange de données dans des trames numérotées (mise en œuvre des mécanismes de protection et de régulation de flux).
 - c) La libération de la connexion.

6.1.5 Accès au canal

L'accès au canal est une des fonctions assurées par la couche liaison de données. Les techniques mises en place à cet effet sont liées au type de liaison entre la ou les stations reliées au support physique.

Liaison point à point

La gestion de l'accès au canal sur une liaison point à point est la configuration la plus simple. Nous utiliserons cette configuration pour présenter quelques mécanismes utilisés également dans des configurations plus complexes.

- *Mode d'exploitation logique:*

Les modes d'exploitation duplex, semi-duplex ou simplex se réfèrent au sens de circulation des données (et non au sens de circulation des bits défini par le mode d'exploitation physique de la couche 1).

- Les modes d'exploitation physiques et logiques doivent être compatibles.
- Il faut régler l'accès au canal lors d'une exploitation logique semi-duplex.

Structure Hiérarchique

La hiérarchisation de la liaison consiste à allouer à l'une des stations la responsabilité de la gestion de la liaison. Cette station est nommée station primaire, elle a pour fonction d'allouer le droit d'accès au canal, de superviser la liaison et de mettre en œuvre des mécanismes de reprises en cas de perte de trame. L'autre station est appelée station secondaire, elle a pour unique obligation de répondre aux commandes d'invitation de la station primaire.



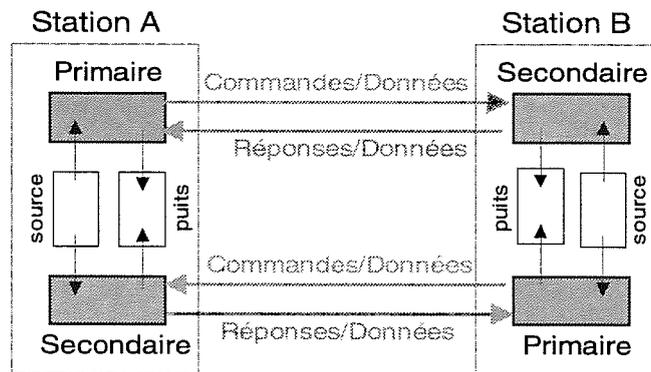
Les états primaires ou secondaires sont des états permanents des stations. Par contre, les états maître et esclave sont des états temporaires. La station qui dispose du droit d'émettre prend temporairement la fonction de maître et la station réceptrice devient esclave.

Lorsque la station primaire doit transmettre des données à la station secondaire, elle occupe la fonction de maître et transmet une invitation à recevoir ou sélection (selecting) à la station secondaire. Lorsque la station secondaire doit transmettre des données à la station primaire, la fonction de maître lui est transmise par une invitation à émettre ou scrutation (polling).

- La station primaire peut octroyer le droit d'émettre pour une seule ou plusieurs trames. De ce fait, elle reprend le contrôle du canal sitôt l'envoi terminé.
- La transmission bidirectionnelle peut être obtenue en superposant deux liaisons unidirectionnelles, l'une fonctionnant par invitation à émettre et l'autre par invitation à recevoir.
- Ces types de procédures sont peu efficaces, car elles génèrent un trafic supplémentaire important.

Structure équilibrée

Cette structure est rencontrée lorsque les deux stations disposent de caractéristiques et de responsabilités identiques. Chaque station dispose ainsi des fonctions primaires et secondaires.



- Les stations ont des caractéristiques et des responsabilités identiques.
- Une station peut émettre et recevoir des données de sa propre initiative ou à l'invitation de la station distante.

Liaison multipoint (accès au canal)

Une liaison multipoint ne permet pas l'échange de données en duplex (collision). Elle nécessite un adressage des stations raccordées au canal, chaque trame circulant sur le support de transmission doit contenir l'adresse de la station réceptrice. Ce type de liaison utilise un multiplexage temporel statique du canal.

Gestion hiérarchique du canal

La gestion hiérarchique du canal peut être décrite succinctement comme suit:

- Une station primaire assure la gestion du canal (attribution du canal, mise en œuvre des mécanismes de reprise en cas d'erreur ou de perte).
- Les stations secondaires répondent aux sollicitations de la primaire (invitation à émettre ou à recevoir).
- Deux procédures sont utilisées par la station primaire pour interroger les stations secondaires:
 - le **tour de table** (Roll Call Polling);
 - le **chaînage** (Hub Polling).

Tour de table (Roll Call Polling)

Les caractéristiques essentielles de la procédure d'interrogation des stations par tour de table sont les suivantes:

- Les stations secondaires sont interrogées tour à tour par la station primaire.
- Ce principe offre une grande flexibilité, la station primaire pouvant varier l'ordre d'interrogation des secondaires en fonction de leur importance.
- Le trafic de contrôle est important, d'où une baisse du rendement de la liaison lorsque les stations secondaires ont peu de données à émettre.

Chaînage (Hub Polling)

Les caractéristiques essentielles de la procédure d'interrogation des stations par chaînage sont les suivantes:

- La station primaire interroge la première station secondaire, celle-ci transmet si besoin ses données puis indique à la station secondaire suivante qu'elle peut émettre à son tour.
- Les stations suivantes procèdent de même jusqu'à ce que toutes les stations secondaires aient transmis leurs données.
- La station primaire prend alors la main et peut relancer l'interrogation.
- Cette méthode implique que les stations soient ordonnées les unes par rapport aux autres et qu'elles connaissent cet ordre (géographique ou lié à une adresse).

Gestion équilibrée du canal

Gestion répartie par passage de jeton

Cette technique reprend le principe du chaînage, la différence étant la suppression de la station primaire. Ses caractéristiques essentielles sont les suivantes.

- Les stations sont équivalentes et se passent le droit d'émettre par un jeton (token).
- Cette technique est appliquée sur les topologies en anneaux et en bus.
- Comme il n'y a pas de station primaire, les stations doivent détecter la perte du jeton ainsi que les jetons multiples, dans ces cas, elles désignent la station qui est chargée d'émettre ou d'éliminer un jeton.
- D'autres procédures gèrent l'insertion ou le retrait de stations

Gestion répartie par arbitrage bit à bit

Les caractéristiques essentielles de la gestion de l'accès au canal par arbitrage bit à bit sont les suivantes:

- Les stations émettent librement leurs données bit après bit, tout en écoutant le canal.
- Lorsqu'il y a différence entre les bits émis et les bits perçus sur le canal, la station se retire et tente un nouvel essai plus tard, lorsque le canal est à nouveau libre.
- Une adaptation du délai d'attente permet d'assurer à toutes les stations d'accéder au support ou de gérer des accès prioritaires.
- L'émission des bits sur le canal est synchronisée afin d'assurer une lecture correcte des bits.
- Un principe d'émission électrique open collector permet à deux stations d'émettre simultanément des bits de niveaux logiques différents sans qu'il y ait conflit.
- Cette technique offre un rendement à charge maximale presque aussi élevé que l'anneau à jeton.
- Elle est mise en œuvre pour assurer le partage du canal D par les usagers utilisant un raccordement de base ISDN.

Gestion répartie par compétition

Les caractéristiques essentielles de la gestion de l'accès au canal par compétition sont les suivantes:

- C'est la technique la plus utilisée sur les topologies en bus.
- L'accès des stations au canal est aléatoire et implique une compétition pour y gagner le droit d'y émettre.
- Elle est caractérisée par l'absence totale de déterminisme, d'où impossibilité de garantir un temps maximal pour la transmission des données. Cette technique est inapte à satisfaire des besoins en temps réel.
- Son grand avantage est sa simplicité de mise en œuvre.

Les méthodes d'accès ci-dessous utilisent une gestion répartie par compétition.

- **Aloha:** mis en œuvre par l'université de Hawaï pour partager un canal de transmission radio. Cette technique est totalement permissive. La station émettrice attend un accusé de réception dans un délai égal à deux fois le temps de propagation.
- **CSMA:** la station écoute si le canal est libre. Si elle ne détecte pas de porteuse, elle émet sa trame. Si elle ne reçoit pas d'accusé de réception, elle recommence n fois.
- **CSMA/CD:** identique à CSMA sauf que la station émettrice détecte les collisions et cesse son émission. Elle attend un délai aléatoire avant une nouvelle tentative. Cette méthode d'accès décrite par le standard IEEE 802.3 est utilisée sur Ethernet.

6.2 Protocoles de couche liaison de données

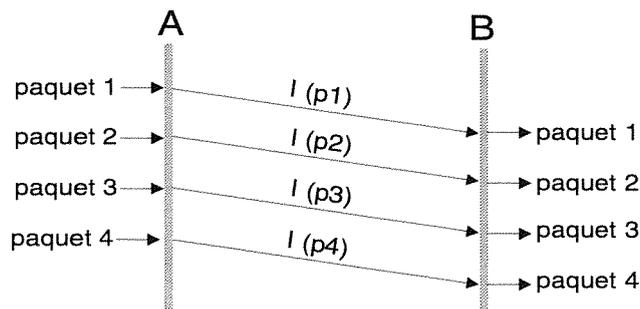
Un protocole est mis en œuvre entre entités paires de la couche 2 du modèle OSI pour assurer un transfert fiable de la trame de données. Ceci implique le maintien de la séquence, la correction des erreurs de transmission détectées et une régulation du flux.

Les protocoles présentés dans ce chapitre sont orientés connexion. Ils présupposent donc un établissement préalable de la connexion et une libération à la fin du transfert des données.

6.2.1 Protocoles élémentaires

Nous allons vous présenter les protocoles de couches 2 dans un ordre croissant de complexité.

Protocole utopique

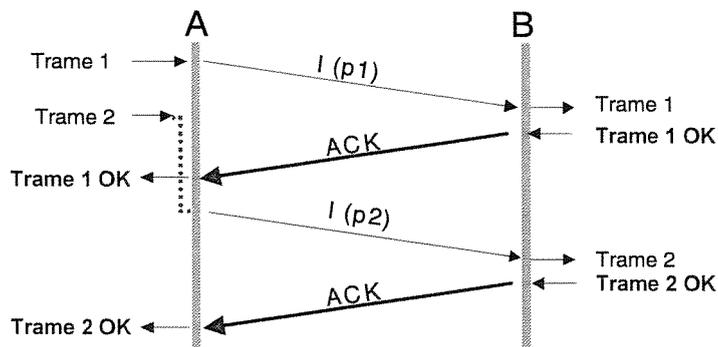


Les caractéristiques de ce protocole sont les suivantes:

- Transmission unidirectionnelle.
- Toutes les trames reçues sont acceptées.
- Aucune surcharge.
- Excellent rendement.

Ce protocole purement théorique est appelé protocole utopique car il se base sur des caractéristiques idéales d'une transmission de données. Il implique entre autre qu'aucune erreur de transmission ne peut survenir.

Protocole "envoyer et attendre"



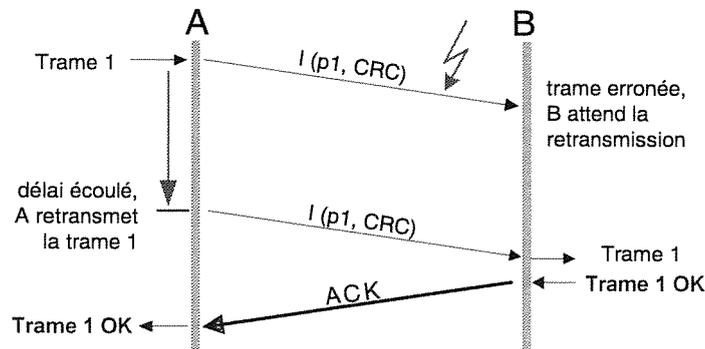
Ce protocole active un mécanisme de régulation de flux. Une nouvelle trame ne sera émise que lorsque le récepteur aura envoyé la confirmation qu'il a terminé de traiter la trame précédente.

- Il assure la régulation de flux. Le récepteur envoie une quittance pour chaque paquet reçu.

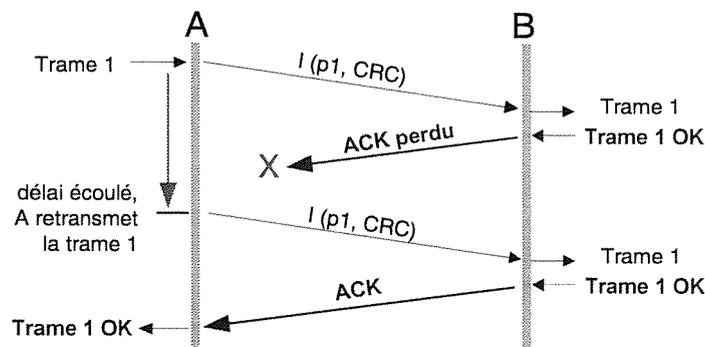
Dans ce cas, aucun mécanisme de protection des données n'est activé pour détecter des erreurs de transmission.

Mise en place d'un mécanisme de protection

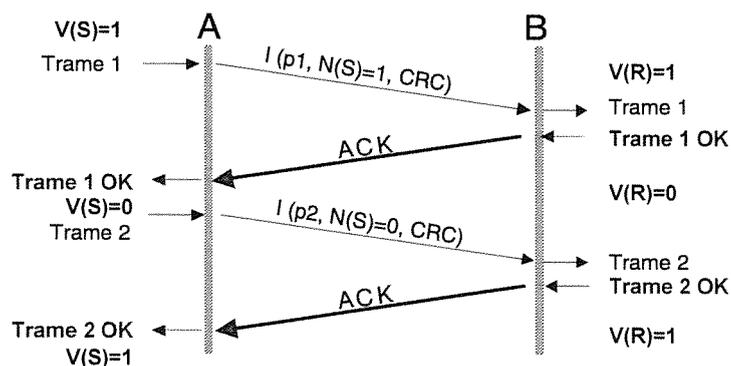
L'insertion d'un CRC ou d'un autre mécanisme étudié au chapitre 2.3 permet à la station réceptrice de quitter seulement les trames reçues sans erreur. Si la quittance ne parvient pas dans un délai donné, l'émetteur retransmet la dernière trame envoyée.



Le défaut de ce système est qu'en cas de perte de l'acquittement d'une trame correctement reçue, l'émetteur retransmet la même trame qui, pour le récepteur est quittancée comme une nouvelle trame. Il en résulte une duplication de l'information.



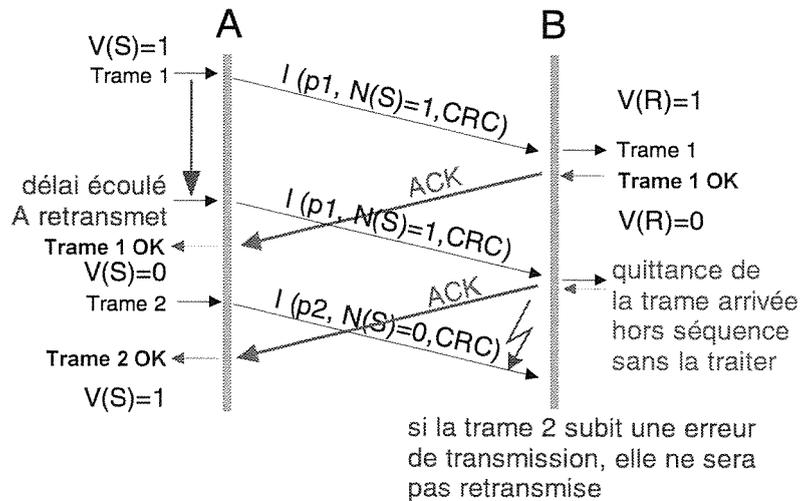
Le mécanisme mis en place pour éviter cette duplication est la numérotation des trames. Une quittance étant attendue pour chaque trame, la numérotation modulo 2 est suffisante.



- La numérotation des trames modulo 2 permet au récepteur de détecter la retransmission d'une trame reçue correctement et quittancée.
- L'émetteur tient à jour une variable d'émission $V(S)$ dont le contenu est inséré dans le champ $N(S)$ de la trame.
- Le récepteur tient à jour une variable de réception $V(R)$ qui contient le numéro de la trame attendue.
- Ce mode de gestion est appelé **gestion passive**.

Mauvais réglage du temporisateur

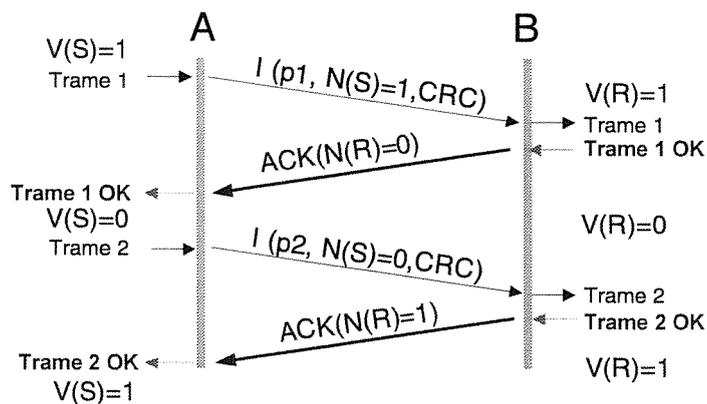
Si le temps d'attente de la quittance est trop court, la situation suivante peut se produire:



L'illustration ci-dessus met en évidence un cas où une trame ayant subi une erreur de transmission ne sera pas retransmise par l'émetteur car un mauvais réglage du temporisateur provoque un décalage entre les trames envoyées et leur accusé de réception réciproque.

Protocole "envoyer attendre" avec numérotation des acquittements

La numérotation des acquittements permet de résoudre ce problème.

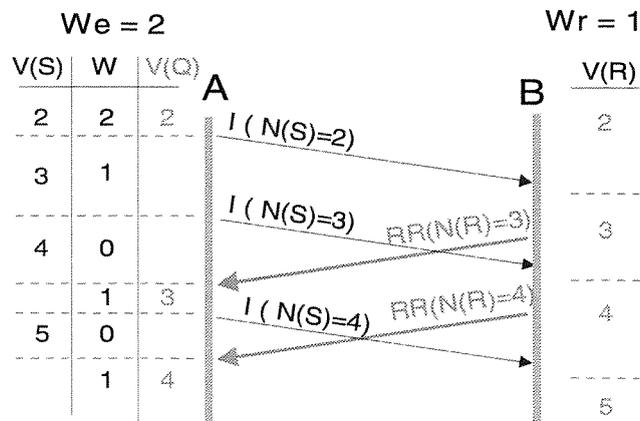


Le récepteur copie le contenu de la variable $V(R)$ dans le champ $N(R)$ de l'entête de l'acquiescement. Cette indication informe l'émetteur du numéro de séquence attendu par le récepteur. Ce mécanisme évite toute ambiguïté sur le séquençement des trames envoyées et des acquiescements.

Le défaut de ce protocole est son mauvais rendement. Pour le mettre en évidence, imaginons l'exercice suivant:

Fenêtre d'anticipation

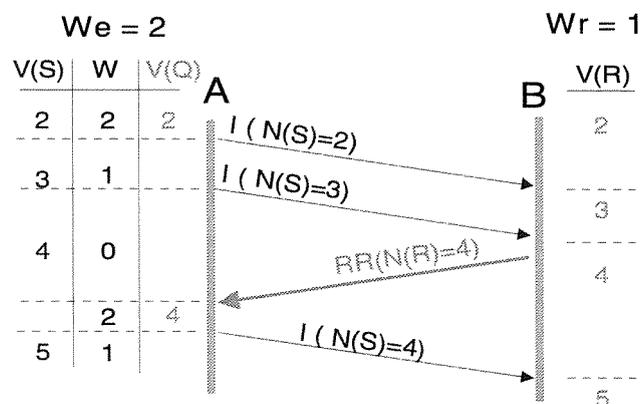
Le rendement peut être amélioré en permettant à l'émetteur d'émettre des trames en anticipation des acquittements encore à venir.



- La largeur de la fenêtre d'émission (W_e) détermine le nombre de trames qu'il est autorisé d'envoyer en anticipation.
- L'émetteur doit mémoriser toutes les trames envoyées jusqu'à ce qu'elles soient quittancées.
- W_r détermine le nombre de trames que le récepteur doit pouvoir mémoriser (par exemple si les trames arrivent dans le désordre).

Groupement des acquittements

Pour éviter au récepteur d'envoyer un acquittement pour chaque trame reçue, le mécanisme suivant est utilisé.



- Le récepteur n'émet qu'un acquittement pour la dernière trame reçue correctement, les autres étant implicitement acquittées.
- En cas d'erreurs, tant que $W_r=1$, l'émetteur devra dans tous les cas retransmettre toutes les trames à partir de la dernière trame acquittée correctement.
- Si le nombre de trames est numéroté module M , W_e doit être plus petit que M .

Encapsulation des acquittements

L'encapsulation des acquittements consiste à introduire l'acquittement dans une trame d'information envoyée par la station B.

6.3 protocole HDLC

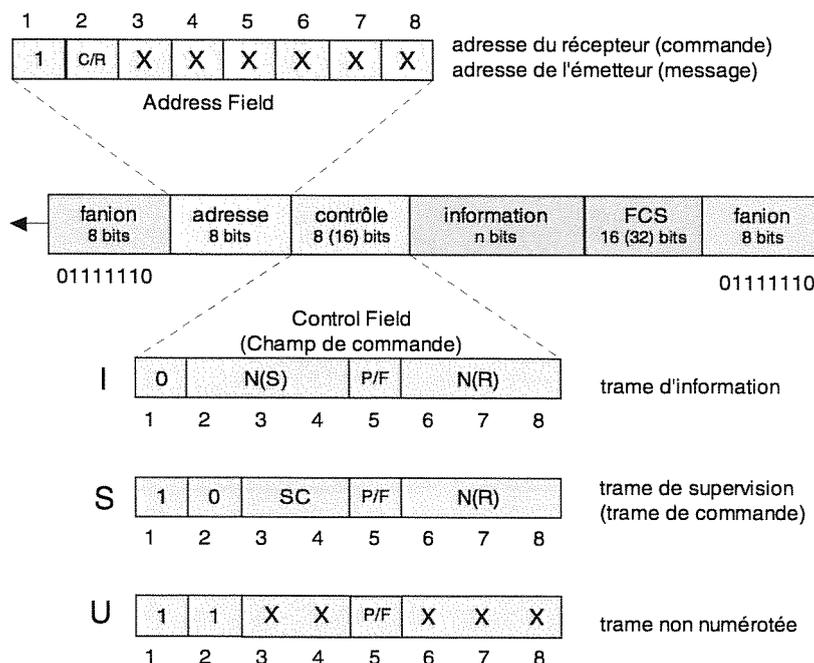
6.3.1 Introduction:

HDLC est un protocole de ligne entre deux terminaux dont la liaison physique est déjà établie. Les caractéristiques principales de ce protocole sont:

- HDLC définit une procédure de transmission de données synchrone avec orientation sur l'élément bit.
- HDLC autorise les liaisons point à point et multipoint.
- Il est indépendant du code de transmission.
- Il permet l'échange d'informations simultanément dans les deux sens (duplex).
- Il assure une transmission sécurisée par numérotation des blocs de données et par l'insertion de caractères de test (FCS).
- Il met en œuvre les mécanismes d'acquittement décrits au chapitre 6.2:
 - anticipation;
 - groupement;
 - encapsulation.
- Il assure une gestion passive par rejet simple ou sélectif.
- De nombreux protocoles sont dérivés de HDLC:
 - LAPB (réseau X25 à commutation de paquets)
 - LAPF (réseau à relayage de trames)
 - LAPD (signalisation ISDN)
 - LLC (mise en œuvre dans les LAN au-dessus de la sous-couche MAC)
 - PPP (Point to Point Protocol) mis en œuvre pour transporter de multiples protocoles sur une liaison point à point. Ce protocole sert entre autre au transport du protocole IP pour les accès Internet.

6.3.2 Structure de la trame

La trame constitue l'élément fondamental du protocole HDLC. Sa structure est la suivante:



Le fanion (*Flag*) indique le début et la fin de la trame. Il est constitué de la séquence binaire 01111110. Le mécanisme de transparence décrit au chapitre 6.1.2 est appliqué.

Le champ adresse (*Address Field, A*) contient l'adresse du récepteur pour une commande ou l'adresse de l'émetteur pour un message.

Le champ de contrôle (*Control Field, C*) est normalement composé d'un octet. Il peut être défini à 2 octets en mode étendu (*extended mode*).

Le champ de contrôle précise si la trame est:

- une trame d'information,
- une trame de commande ou
- une trame non numérotée.

Selon le type de trame, ce champ contient également deux numéros:

- N° de suite de la trame émise (normalement 0-7 et pour le mode étendu 0-127)
- N° de suite de la trame à recevoir. Il indique le N° de la prochaine trame attendu.

Le champ de données (*Information Field, I*) contient les données utiles. Ce champ n'existe pas pour les trames n'exerçant que des fonctions de commande.

Le caractère de contrôle des trames (*Frame Check Sequence, FCS*) est composé de 16 bits ou 32 bits. Sa formation obéit aux règles de la sécurisation cyclique des blocs décrit au chapitre 2.3.4.

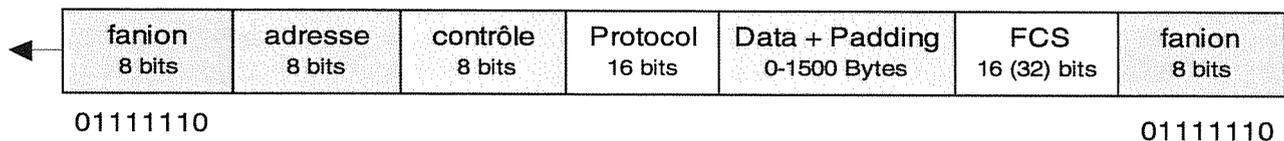
6.4 PPP (Point to Point Protocol)

Ce protocole de couche liaison de données, issu de HDLC, permet de transporter des datagrammes de protocoles de couche 3 différents sur une liaison point à point. PPP est décrit dans le RFC 1548. Si le premier protocole transporté par PPP est IP, il est également capable de transporter les protocoles propriétaires IPX (Netware), ARA (Apple), NetBEUI (LanManager), etc.

Les composants de PPP sont:

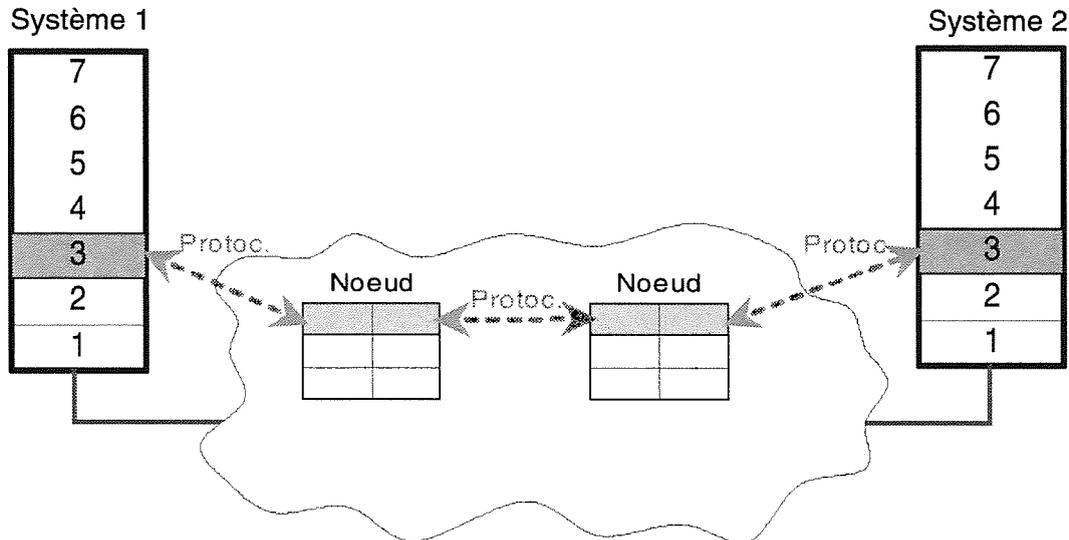
- Une méthode d'encapsulation et de multiplexage de datagrammes pouvant provenir de différentes applications de couche réseau sur une connexion série synchrone ou asynchrone. (RFC 1661,1662).
- Un protocole de contrôle de liaison (LCP) permettant de gérer l'établissement, la configuration et le test d'une liaison de couche 2. (RFC 1548).
- Un support pour toute une famille de protocoles de couche réseau.

Le graphique suivant représente une trame PPP pour laquelle nous reconnaissons le format de la trame HDLC. Le champ Protocole détermine quel type d'information est contenu dans le champ Data.



7. Fonctions et protocoles de couche 3

La couche réseau établit l'association des liaisons partielles à travers le réseau pour constituer une liaison de bout en bout (mais pas un protocole de bout en bout). Elle est de ce fait la seule à connaître la topologie du réseau.



- Fonctions :
- Etablissement, maintien et libération de connexions de réseau.
 - Mise à disposition d'adresses de réseaux / routage.
 - Multiplexage de connexions réseaux sur une connexion de couche 2.
 - Segmentation et réassemblage.
 - Régulation de flux.

Les fonctions de base qu'assure la couche réseau visent à acheminer les paquets (commutation et multiplexage) à destination (adressage), au travers du réseau, en empruntant un chemin si possible optimal (routage). Pour adapter le format des données à transmettre aux caractéristiques requises par le réseau, l'entité de couche réseau doit en outre pouvoir fragmenter et réassembler les paquets dans le réseau et dans les équipements terminaux.

Elle doit de plus mettre en œuvre des techniques de prévention, de détection et d'élimination des phénomènes de congestion.

Commutation et multiplexage

Les réseaux téléinformatiques actuels utilisent en majorité la commutation de paquets ou de cellules:

- Commutation de paquets (X.25, Frame Relay, Internet).
- Commutation de cellules (ATM).

Ces techniques sont généralement associées à une technique de multiplexage temporel asynchrone.

On distingue deux méthodes utilisées pour l'acheminement des paquets.

- **Le circuit virtuel:**

Utilisé généralement dans les réseaux orientés connexion (par exemple X.25, Frame Relay, ATM). Le routage est effectué à l'établissement de la connexion réseau et le chemin choisi, correspondant au circuit virtuel, reste le même pour tous les paquets échangés durant la communication.

L'entête de chaque paquet ne contient qu'un indicateur du circuit virtuel emprunté.

- **Le datagramme:**

Utilisé dans les réseaux offrant un service minimal (par exemple Internet). Chaque paquet contient dans son en-tête l'adresse de destination complète, ils sont ainsi acheminés indépendamment les uns des autres, parfois par un chemin différent. Aucune connexion n'est requise préalablement à l'envoi des données.

Le tableau suivant compare ces deux modes d'exploitation:

	Datagramme	Circuit virtuel
Etablissement	Impossible	exigé
Routage	pour chaque paquet	pour le paquet d'appel uniquement
Adressage	adresse complète dans le paquet	voie logique dans le paquet
Effet d'une panne	faible, quelques paquets perdus	important, tous les circuits sont coupés
Contrôle de gestion	Difficile	par réallocation de ressources

Routage

Le routage est l'opération par laquelle le réseau décide du chemin que doit emprunter un paquet pour arriver à destination. Il sera effectué pour chaque paquet dans un réseau exploité par datagramme, alors que dans un réseau exploité par circuit virtuel, le chemin est tracé à l'établissement de la communication.

Adressage

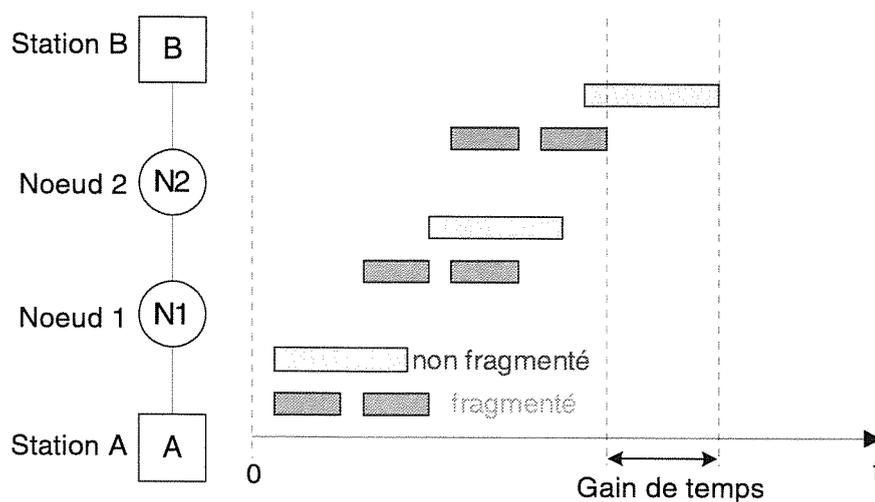
Il existe de nombreux plans d'adressage à l'échelle mondiale, le cours technique de transmission traite ce thème de façon plus approfondie. Nous nous contentons de rappeler ici quelques éléments de cette matière.

L'adressage peut être géré:

- Sur une base géographique
= réseau téléphonique (E.163), réseau ISDN (E.164), réseau à commutation de paquets X.25 (X.121).
- Par constructeur
= adresses MAC.
- Par utilisateur
= adresses Internet.

Fragmentation et réassemblage

La taille des messages émis par une application et celle des paquets qu'un réseau est capable de transmettre sont souvent incompatibles. Un fichier à transmettre peut par exemple avoir plusieurs Moctets, alors que le réseau n'est capable de gérer des paquets que de quelques centaines d'octets (par exemple 1500 pour Ethernet). La fragmentation consiste à découper le message en paquets dont la taille est optimisée pour un rendement optimal. La segmentation permet ainsi d'augmenter le taux d'utilisation des lignes dans le réseau et de diminuer le temps de réponse du système.

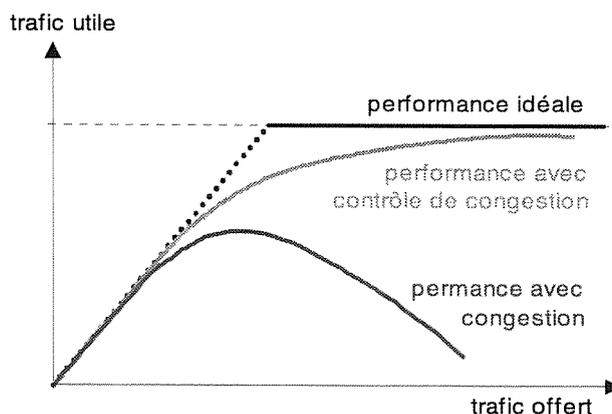


Contrôle de congestion

Les phénomènes de congestion du réseau découlent des éléments suivants :

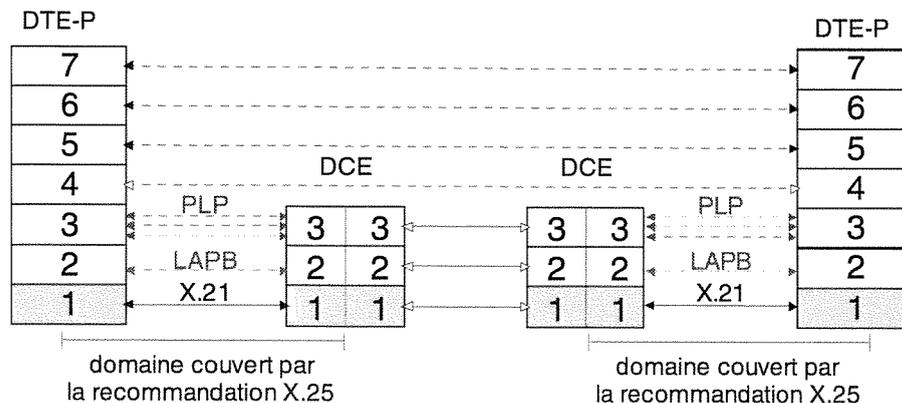
- Débits différents des lignes de transmission.
- Puissance de traitement des nœuds.
- Nombre de tampons disponibles.

Le réseau idéal devrait être capable d'absorber le trafic offert jusqu'à ce que sa capacité maximale soit atteinte, puis de continuer à fonctionner à cette capacité. En réalité, sans contrôle de congestion, les performances s'écroulent à partir d'un certain seuil, car certains paquets doivent être rejetés et aussitôt, l'émetteur les retransmet.



7.1 Commutation de paquets X.25

Le système public de commutation de paquets s'inspire essentiellement des recommandations **X.25**. Cette recommandation a été proposée à fin des années 70 par l'UIT (alors CCITT) pour le raccordement d'équipement de transmission de **données** en paquets de 64 à 256 octets. X.25 spécifie l'interface d'un équipement terminal en mode paquet à un réseau à commutation de paquets. La recommandation couvre les spécifications des procédures et des formats des couches 1 à 3 du modèle de référence OSI.



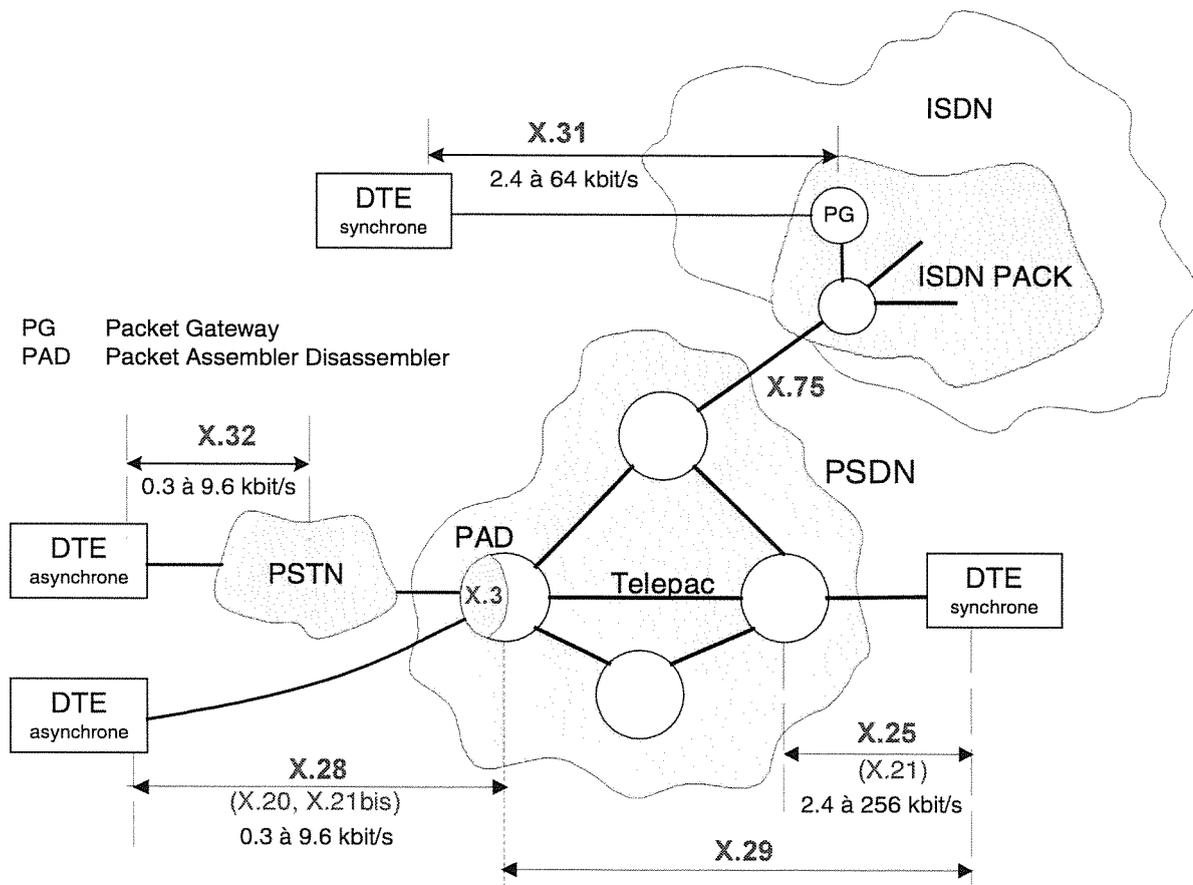
La recommandation X.25 est divisée en trois couches.

- **La couche Physique** spécifie l'utilisation de l'interface X.21 ou X.21bis.
- **La couche Liaison de données** est définie par le protocole LAPB, (Link Access Procedure Balanced) qui est un sous-ensemble de la procédure générique HDLC.
- **La couche Réseau** applique X.25 PLP (Packet Level Protocol), ce chapitre décrit ses principales caractéristiques.

D'autres recommandations sont souvent liées à la transmission de données en mode paquet. La liste suivante donne une brève description des plus souvent utilisées.

- X.20 Interface entre terminal DTE et DCE pour transmissions asynchrones.
- X.21 Interface entre terminal DTE et DCE pour transmissions synchrones. (couche physique, identique à V.24/V.28).
- X.24 Liste des définitions relatives aux circuits de jonction établis entre des DTE et des DCE sur le réseau public pour données. (description des lignes).
- X.25 Spécifie l'interface d'un équipement terminal en mode paquet à un réseau à commutation de paquets (couches 1 à 3 du modèle OSI).
- X.28 Interface entre DTE et DCE pour l'accès d'un DTE asynchrone au service complémentaire d'assemblage et de désassemblage de paquets (PAD).
- X.29 Procédures d'échange d'informations de commande et de données utiles entre un service complémentaire d'assemblage et de désassemblage de paquets (PAD) et un DTE fonctionnant en mode paquet ou un autre PAD.
- X.31 Support d'un DTE en mode paquet sur ISDN.
- X.32 Interface entre DTE et DCE pour terminal en mode paquet et accédant au PSDN via PSTN ou ISDN.
- X.75 Est une recommandation similaire à X.25 qui est utilisée pour l'interworking entre deux réseaux X.25.

Vue d'ensemble des recommandation appliquées aux réseaux X.25



7.1.1 Gestion de circuits virtuels

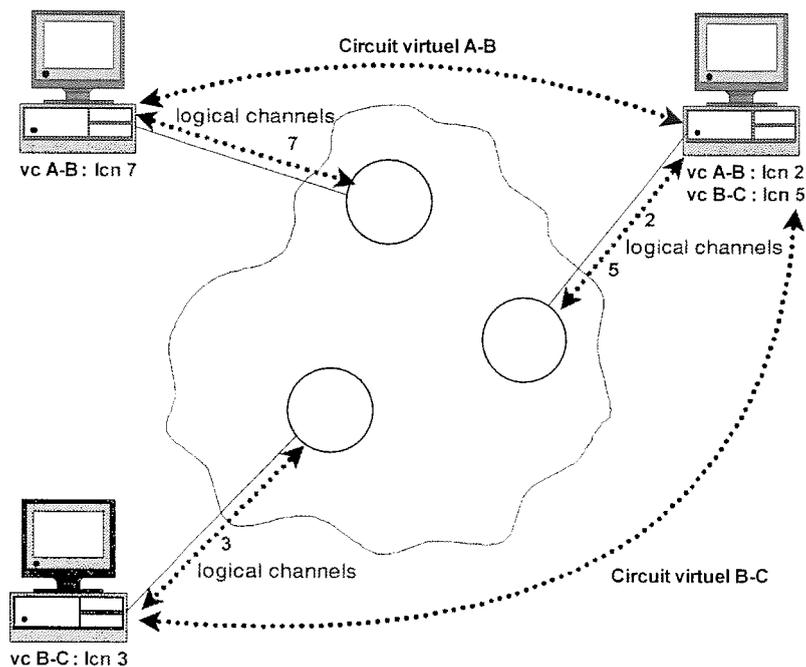
Le protocole X.25 doit pouvoir établir, couper et gérer les circuits virtuels établis avec l'équipement terminal. En particulier, il doit maintenir une correspondance entre canaux logiques et circuits virtuels.

Par virtuel, on entend que la liaison entre les terminaux n'est pas physique mais logique. Les paquets peuvent de ce fait emprunter des chemins différents au travers du réseau mais ils doivent être délivrés dans le bon ordre.

X25 affecte à chaque circuit virtuel un numéro de groupe logique (0-15) et un numéro de canal logique (0-255). C'est aux équipements terminaux et aux nœuds du réseau d'associer ces numéros de groupe et de canal à un circuit virtuel de manière à mettre en correspondance de bout en bout les équipements concernés.

L'utilisation de voies logiques permet d'activer simultanément plusieurs circuits virtuels sur une liaison de données (couche 2) unique.

Circuits virtuels et canaux logiques



X25 propose 3 options d'interface pour l'établissement et le maintien de sessions entre le terminal et le réseau.

- PVC (Permanent Virtual Circuit) circuit virtuel permanent
- SVC (Switched Virtual Circuit) circuit virtuel commuté
- FSC (Fast Select Call) appel à sélection rapide

Circuit virtuel permanent (PVC)

Ce type de circuit est analogue à une ligne louée dans le réseau téléphonique. Il ne requiert aucun établissement de communication préalable à l'envoi de données. Le numéro de voie logique est attribué une fois pour toutes par l'opérateur du réseau. Il est ainsi caractérisé par un taux de disponibilité élevée et temps de réponse court.

Circuit virtuel commuté (SVC)

Cette variante exige d'établir le circuit virtuel avant de pouvoir transmettre des données. Les ressources utilisées dans le réseau sont libérées après l'échange des données.

Appel à sélection rapide

Cette option limite la surcharge et les délais dus à l'établissement du circuit lors de sessions très courtes et très peu nombreuses. Elle est utilisée typiquement pour des applications à caractère questions/réponses avec un temps de réponse court ou lorsque l'option PVC est trop chère.

Dans ce cas, le paquet d'appel émis par un DTE peut contenir jusqu'à 128 octets de données. L'équipement appelé peut répondre par un *paquet d'appel accepté* (call accepted) ou par un *paquet de requête de coupure* (clear request). Dans les deux cas, la réponse peut également contenir jusqu'à 128 octets de données.

7.2 Introduction au protocole IP

7.2.1 Historique de TCP/IP et Internet

TCP/IP est intimement lié à Internet. C'est en effet en 1969, sous l'impulsion du département américain de la défense (DOD), qu'Internet est né. Le réseau, qui s'appelait alors ARPANET, devait assurer les échanges d'informations électroniques entre les centres névralgiques américains dans le contexte de la guerre froide.

Le cahier des charges établi par le DOD imposait que le réseau puisse poursuivre ses activités en cas d'attaque nucléaire soviétique. Si l'un ou plusieurs des sites et lignes de connexion venait à être détruit, les messages parviendraient à leur destinataire par des itinéraires alternatifs. L'idée du protocole TCP/IP était né.

TCP/IP a été développé dans les années 1978-79 sur des fonds fédéraux américains par BBN (Bolt Beranek and Newman, Inc.) et c'est dans le début des années 80 que tout les ordinateurs connectés à ARPANET migrent vers TCP/IP.

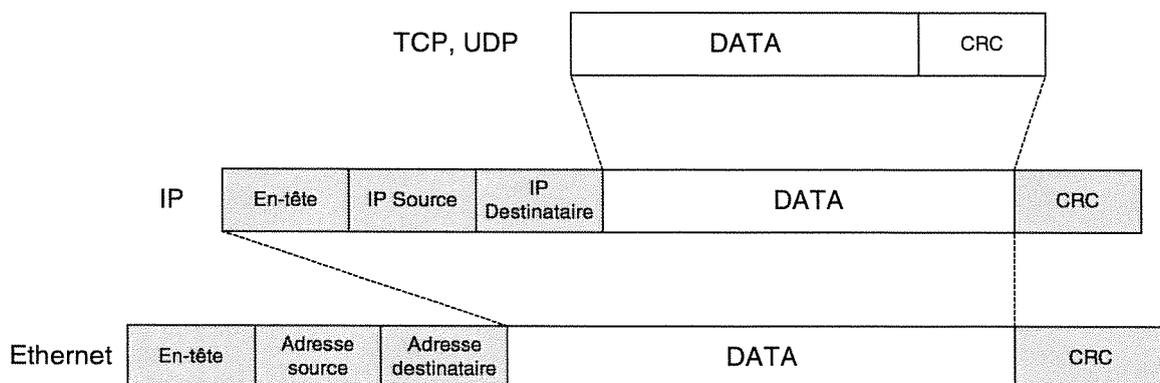
C'est en 1982 qu'Internet arrive en Europe. L'année 1984 est une année charnière: Internet perd son caractère militaire. Son financement n'est plus assuré par le DARPA (Defense Advanced Projects Research Agency) mais par un organisme scientifique civil créé deux ans plus tard: la National Science Foundation (NSF). Depuis, Internet s'est largement ouvert au grand public et à l'exploitation commerciale. World Wide Web apparaît l'année suivante. Sa facilité d'utilisation contribue grandement à populariser les autoroutes de l'information.

La version IP actuelle (version 4) utilisant un champ d'adresse de 4 octets commence à atteindre ses limites. C'est pourquoi une nouvelle génération (version 6) est en phase de test.

Que veut dire TCP/IP ?

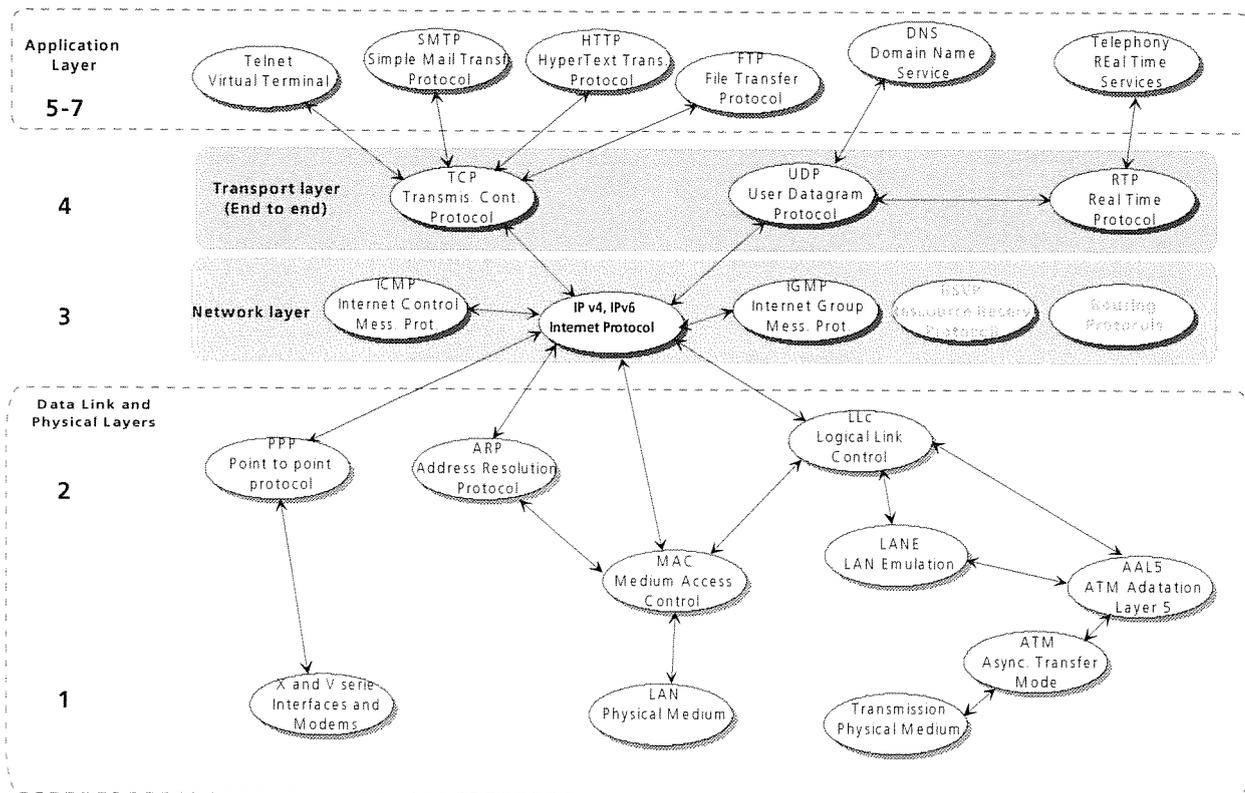
TCP = Transmission Control Protocol (Protocole de transport)

IP = Internet Protocol (Protocole de réseau)

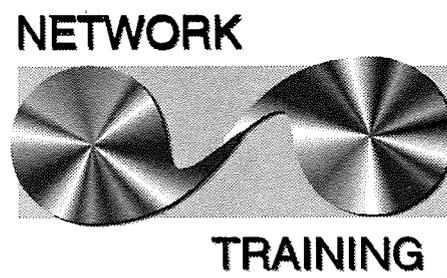


Le protocole IP transporte des datagrammes d'une station source à une station de destination au travers d'un réseau interconnecté par des routeurs. Chaque station (ou plutôt sa connexion réseau) possède une adresse IP. Chaque datagramme contient les adresses IP complètes de source et de destination. Les routeurs utilisent un algorithme de routage pour décider à partir de l'adresse IP de destination quel port doit être utilisé. Ce protocole offre un service non garanti dit "best effort". IP ne contrôle pas les erreurs du champ de donnée et ne fournit pas de quittance

Le tableau suivant donne un aperçu des différents protocoles utilisés dans l'environnement IP.



Transmission de données



Cours de base

Edition décembre 1999

swisscom
Network Training
Marcel Butty