

Chapitre 2 La couche physique

Comment transmettre les données

Signal transmis sur un canal

- | Onde électrique
 - Support métallique
- | Onde radio
 - Canal sans fil
- | Onde lumineuse
 - Fibre optique

Comment une onde est-elle transmise

- | Quelles sont les contraintes sur la transmission

1

1. Bases théoriques de la transmission de données

1.1. Série de Fourier :

- | décomposition d'une fonction périodique en une somme de sinusoïdes de fréquences différentes
- | la fréquence temporelle est exprimée en Hertz

Définition : soit $g(t)$ une fonction périodique quelconque de période T .

- Sa décomposition en série de Fourier est donnée par la formule :

$$g(t) = 1/2 c + \sum_{n \geq 1} (a_n \sin(2\pi nft) + b_n \cos(2\pi nft))$$

2

1.1. Série de Fourier

- | $f = 1/T$ représente la *fréquence fondamentale* du signal $g(t)$
- | $c/2$ est la *composante continue*
- | a_n et b_n sont les *coefficients de Fourier*, et représentent les amplitudes respectives des sinus et cosinus de rang n
- | chaque terme de rang n est une *harmonique* du signal de fréquence $n*f$ ($f =$ fréquence fondamentale)
- | Inversement, a_n , b_n et c s'expriment en fonction de $g(t)$
- | Calcul des coefficients :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

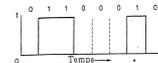
3

1.1. Série de Fourier

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

- | Exemple : transmission du signal formé par le caractère ASCII « b » 0110 0010

- | chronogramme du signal :



- | l'analyse de ce signal selon les séries de Fourier fait apparaître les coefficients suivants (calcul détaillé en TD) :

- $A_n = 1/\Pi n [\cos(\Pi n/4) - \cos(3 \Pi n/4) + \cos(6 \Pi n/4) - \cos(7 \Pi n/4)]$
- $B_n = 1/\Pi n [\sin(3 \Pi n/4) - \sin(\Pi n/4) + \sin(7 \Pi n/4) - \sin(6 \Pi n/4)]$
- $c/2 = 3/8$

4

1. Bases théoriques de la transmission de données

1.2. Bande passante

- | un canal qui transmet des signaux leur fait subir une déformation (en particulier un affaiblissement)
- | Pour certains canaux, les signaux sont transmis avec des affaiblissements d'amplitude négligeables jusqu'à une fréquence f_c , dite *fréquence de coupure*. Toutes les fréquences supérieures à f_c sont fortement atténuées
- | la **bande passante** est l'intervalle des fréquences que le canal transmet sans affaiblissement
 - Affaiblissement inférieur à un seuil, par ex: 3 dB)

5

1.2. Bande passante

- | Relation entre la bande passante du canal et le signal transmis :

- | l'affaiblissement dû au canal s'applique indépendamment à chaque harmonique du signal

- | pour qu'un signal soit correctement transmis sur un canal il faut que la plage des fréquences correspondant aux principales harmoniques du signal soit comprise dans la bande passante du canal

6

1.2. Bande passante

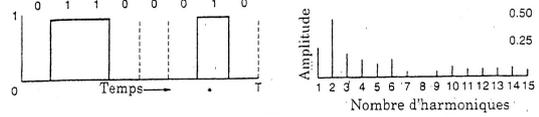
Relation avec la transmission de données

Exemple de transmission du caractère « b »

- les figures suivantes montrent la forme du signal reconstitué après sa transmission sur un canal qui ne laisse passer respectivement que 1, 2, 4 et 8 harmoniques :
- on observe l'évolution du signal reconstitué au fur et à mesure que la bande passante du canal augmente
- dans cet exemple, le signal est suffisamment reconstitué à partir de 8 harmoniques

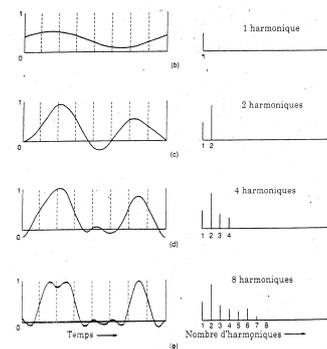
7

Signal numérique et ses composantes harmoniques



8

Approximations du signal en fonction du nombre d'harmoniques



9

1.3. Relation entre le débit binaire et les harmoniques

- $D = 1/T$: débit binaire en bits/sec (bps)
- T : période du bit
- pour un débit binaire de D bps :
 - le temps nécessaire pour transmettre un caractère (octet) est $8/D$ sec
 - la fréquence de l'harmonique fondamentale est $D/8$ Hz
 - une liaison téléphonique analogique possède une bande passante fixée à environ 3000Hz
 - intervalle des fréquences de la voix [300Hz,3400Hz]
- le nombre d'harmoniques effectivement transmises sera approximativement : $3000/(D/8)$
 - le tableau montre les valeurs des différents paramètres pour des débits courants
 - quand D augmente, le nombre d'harmoniques permettant de reconstituer le signal diminue
- Conclusion:** limiter la largeur de la bande passante limite le débit binaire maximum sur un canal

10

Relation entre le débit binaire et les harmoniques

Débit (bit/s)	Période (T, ms)	Première harmonique (f, Hz)	Nombre d'harmoniques transmises
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1 200	6,67	150	20
2 400	3,33	300	10
4 800	1,67	600	5
9 600	0,83	1 200	2
19 200	0,42	2 400	1
38 400	0,21	4 800	0

11

1.4. Rapidité de modulation

- débit binaire: $D = 1/T$ b/s (T = durée du bit)
- rapidité de modulation : $R = 1/\Delta$ bauds
 - Δ = moment élémentaire
 - Δ : plus petit intervalle pendant lequel le signal reste constant
 - R : nombre de fois où le signal change d'état par seconde
- Exemples
 - T = 1 μ s, $\Delta = 1 \mu$ s => D = R = 10^6
 - 1 bit par moment élémentaire
 - T = 1 μ s, $\Delta = 0,5 \mu$ s, D = 10^6 b/s, R = 2D = $2 \cdot 10^6$ bauds
 - 2 moments élémentaires par bit
 - T = 1 μ s, $\Delta = 8 \mu$ s, D = 10^6 b/s, R = D/8 = $1,25 \cdot 10^5$ bauds
 - 8 bits par moment élémentaire

12

1.5. Théorème d'échantillonnage

- | Claude Shanon, Harry Nyquist
- | Théorème : $R_{\max} = 2H$
 - | R = fréquence d'échantillonnage
 - | H = bande passante de la ligne
 - | si un signal quelconque est appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas ayant une bande passante H , le signal ainsi filtré peut être entièrement reconstitué en effectuant un échantillonnage de ce signal à une cadence égale à $2H$
 - | Exemple : si voie téléphonique de 4000 Hz => voix échantillonnée 8000 fois/sec

13

1.6. Débit maximum d'un canal

- | Conséquence du théorème d'échantillonnage :
 - | si un signal comporte un nombre V de niveaux significatifs (V = **valence** du signal), alors le débit binaire maximum est :
 - | $D_{\max} = 2H \log_2 V$
 - | Exemple : BP du canal = 3 000 Hz,
 - $V=2$ (signal bivalent) => $D_{\max} = 6\ 000$ bps
 - $V=4$ (signal quadrivalent) => $D_{\max} = 12\ 000$ bps
 - | signal multivalent : optimisation de la bande passante

14

1.6. Débit maximum d'un canal

- | Cas des canaux bruités :
 - | S/N : **rapport signal sur bruit**
 - S : énergie du signal
 - N : énergie des bruits et parasites
 - | $10 \log_{10} S/N$ (dB)
 - | Exemple :
 - $S/N = 10$ => 10 dB
 - $S/N = 1000$ => 30 dB
 - | Théorème de Shanon :
 - | $D_{\max} = H \log_2 (1 + S/N)$
 - | Exemple : $H = 3\ 000$ Hz, $S/N = 1000$ (30 dB)
 - => $D_{\max} \approx 30\ 000$ bps

15

1.6. Débit maximum d'un canal

- | Définition :
 - | BP à n décibels :
 - intervalle de fréquence où l'affaiblissement est inférieur à n décibels
 - | Affaiblissement du signal : $Aff = 10 \log_{10} P_e/P_r$
 - P_e : puissance du signal émis
 - P_r : puissance du signal reçu
 - | Exemple :
 - affaiblissement de 3 dB : $10 \log_{10} P_e/P_r = 3$ dB
 - => $P_e/P_r = 2$
 - | la fréquence de coupure f_c correspond au point où $P_e/P_r = n$ dB pour une BP à n dB
 - réseau téléphonique : BP [300, 3400] à 3 dB

16

2. Codage et modulation

- | transmission en **bande de base**
 - | signaux « tout ou rien » (binaires)
 - | pas de décalage de fréquence
- | transmission en large bande ou **transposition de fréquence**
 - | signaux sinusoïdaux (analogiques)
 - | modulation du signal
 - | transposition de fréquence autour de la fréquence de la porteuse

17

2.1. Transmission en bande de base

- | code **NRZ** (Non Retour à Zéro)
 - | 1 -> +a $t \in [0, T_b]$
 - | 0 -> -a
 - | $\Delta = T_b$
 - | spectre du signal : puissance maximale au voisinage de la fréquence 0
 - | coupure des basses fréquences
 - | problème des longues suites de 0 ou 1 (signal continu) => perte de synchronisation
 - | => codes à transition

18

2.1. Transmission en bande de base

- code **biphase** ou **Manchester**
 - | 1 -> +a t ∈ [0, T_B/2], -a t ∈ [T_B/2, T_B]
 - | 0 -> -a t ∈ [0, T_B/2], +a t ∈ [T_B/2, T_B]
 - | Δ = T_B/2
 - | valeur moyenne du signal nulle
 - | spectre s'étale deux fois plus que pour le NRZ (dû à la transition)
 - | Avantage : élimine le problème de synchronisation
 - | Inconvénient : occupation plus grande de la bande passante

19

2.1. Transmission en bande de base

- code biphase (ou Manchester) **différentiel**
 - | le codage ne se fait plus en termes de niveaux, mais de transitions
 - | 1 -> 2 transitions (en début et en milieu de bit)
 - | 0 -> 1 transition (en milieu de bit)
 - | même spectre et mêmes propriétés que les codes biphase
 - | Insensible aux erreurs de polarité
- code bipolaire
 - | 0 -> 0 t ∈ [0, T_B]
 - | 1 -> +a, -a (alternativement)
 - | Δ = T_B
 - | problème de synchronisation si longues suites de 0

20

2.1. Transmission en bande de base

- codes BHDn (bipolaires à haute densité)
 - | suites de n 0 consécutifs remplacées par des séquences de remplissage
 - | Remplissage détecté en réception par viol d'alternance
 - => Cf. TD
- Conclusion
 - | codes bipolaires occupent la même BP que les NRZ, mais possèdent 3 niveaux, ce qui augmente leur sensibilité au bruit

21

2.2. Transmission en large bande

- transmission par transposition de fréquence
- le signal entrant est modulé par une porteuse sinusoïdale de la forme :
 - | $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi)$
 - A est l'amplitude de la porteuse
 - f₀ est la fréquence de la porteuse
 - φ est la phase de la porteuse
- quand on module le signal entrant par la porteuse on fait varier un (ou une combinaison) de ces trois paramètres

22

2.2. Transmission en large bande

- Modulation d'amplitude.
 - | Ex :
 - 1 -> A sin(2π f₀ t) t ∈ [0, T_B]
 - 0 -> A/2 sin(2π f₀ t)
 - | Inconvénient : l'amplitude est sensible aux bruits
- Modulation de fréquence
 - | Ex :
 - 1 -> A sin(2π f₀ t) t ∈ [0, T_B]
 - 0 -> A sin(2π f₁ t)
 - | Inconvénient : s'étale davantage sur la bande passante

23

2.2. Transmission en large bande

- Modulation de phase
 - | Ex :
 - 1 -> A sin(2π f₀ t) φ = 0
 - 0 -> A sin(2π f₀ t + π) φ = π
 - | très utilisée dans la transmission de données binaires
- Modulation combinée
 - | les modems élaborés permettent de regrouper n bits par Δ (= signal de valence 2ⁿ)
 - | exemple : 8 niveaux phase et 2 niveaux amplitude
 - Valence = 16, 4 bits par moment (D = 4R)

24

3. La synchronisation bit

- un coupleur de communication doit sérialiser l'info à l'émission et la désérialiser à la réception
- le récepteur doit échantillonner le signal reçu :
 - à la bonne fréquence ($1/\Delta$)
 - à la bonne phase (par ex. au milieu de Δ)
- la synchronisation bit peut être maintenue
 - en permanence : transmission synchrone
 - rétablie pour chaque caractère : transmission asynchrone

25

3.1. Transmission asynchrone

- Ex : transmission asynchrone par caractère
 - synchronisation maintenue pendant la durée d'émission (réception) d'un caractère
 - caractère encadré par bits START et STOP
 - bit START : fait passer la ligne de l'état repos à actif
 - bit STOP : remet la ligne à l'état de repos
 - Quand START est détecté par le récepteur, H_R fait échantillonnage par bit
 - le nombre de bit du caractère est connu
 - décalage d'horloge insensible pendant 1 caractère
- intervalle entre deux caractères quelconque
 - Pas nécessairement un multiple de la durée du bit

26

3.2. Transmission synchrone

- l'horloge du récepteur est (re-)synchronisée en permanence sur celle de l'émetteur :
 - le signal d'horloge est transmis
 - sur une ligne séparée (ex. entre ETTD et ETCD)
 - véhiculée dans le signal (ex: codes à transition)
- il faut ajuster la phase (synchro « caractère ») :
 - La synchronisation caractère se fait au niveau des groupes de bits (blocs ou trames) :
 - ex: préambule Ethernet 10101010...11
 - insertion de caractères de synchronisation

27

4. ETTD et ETCD

- **ETTD (Equipement Terminal de Transmission de Données)**
 - fonction d'émission / réception des données
 - contrôleur de communication ou coupleur:
 - sérialisation / désérialisation, protection contre les erreurs, etc.
 - Ex : ordinateur et sa carte réseau
- **ETCD (Equipement Terminal de Circuit de Données)**
 - codage (bande de base ou modulation)
 - rapidité de modulation, débit binaire
 - transmission synchrone / asynchrone
 - sens de transmission (half ou full duplex)
 - EX : **modem** (téléphonique, câble,...)
 - Ex : avis V.90 et V.91, ADSL

28

5. Multiplexage

5.1. Types de multiplexage

- le multiplexage consiste à partager un même support physique entre plusieurs utilisateurs
- Largement utilisé dans la plupart des réseaux
 - Partage = diminution des coûts
- Multiplexage en fréquence
 - FDMA : Frequency Division Multiple Access
 - partage la bande passante du support en un nombre de canaux (ou sous-bandes) plus étroits, affectés chacun à un utilisateur
- Multiplexage temporel
 - TDMA : Time Division Multiple Access
 - affecte à tour de rôle à chaque utilisateur la totalité de la bande passante pendant un instant (partage dans le temps)

29

5.1. Types de multiplexage

- Multiplexage temporel statique
 - les intervalles de temps (IT) sont affectés à chaque utilisateur de façon rigide et invariable dans le temps
 - pas nécessaire d'identifier les émetteurs
 - Remplissage des IT inutilisées
 - inconvénient : gaspillage important si les émetteurs ont un taux d'activité faible
- Multiplexage temporel statistique
 - seuls les caractères significatifs sont transmis => identifier l'émetteur correspondant
- Multiplexage par code
 - CDMA Code Division Multiple Access
 - Chaque émetteur a un code et utilise les n fréquences
 - Ex : Téléphonie mobile US
- Multiplexage hybride
 - EX : GSM fréquentiel + temporel

30

5.2. Multiplexage : Principes de base

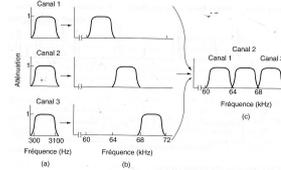
- le **multiplexeur** est un équipement permettant d'utiliser une voie haute vitesse VHV pour écouler le trafic en provenance de plusieurs voies basse vitesse VBV
- efficacité d'un multiplexeur
 - $e = \sum d_i / D$
 - d_i : débit utile de la $i^{\text{ème}}$ voie basse vitesse
 - D : débit maximum sur la voie haute vitesse
- $e < 1$: cas du multiplexage statique
- $e \geq 1$: cas du multiplexage statistique



31

5.3. Multiplexage fréquentiel

- le multiplexeur transforme les signaux de chaque voie basse vitesse en signaux sinusoïdaux
- la transmission sur la voie haute vitesse se fait en transposition de fréquence avec une porteuse f_i pour chaque voie basse vitesse i
- Ex en modulation de fréquence :
 $0, 1$ codés par $f_i + \Delta f, f_i - \Delta f$



32

5.3. Multiplexage fréquentiel - Exemples

- Exemple du réseau téléphonique analogique :
 - bande passante des voies basse vitesse :
 - 4000 Hz = 3100 Hz + 2* 450 Hz (espaces inter-bande)
 - la bande passante de la voie haute vitesse est découpée en canaux de 4000Hz
 - Gr. primaire = 12 canaux entre 60 kHz et 108 kHz
 - Gr. secondaire = 5 groupes primaires 312-552 kHz 60 voies
 - Gr. tertiaire = 5 groupes secondaires, 300 voies
 - Gr. quaternaire = 3 gr. Tertiaires, 900 voies

33

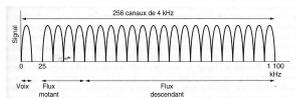
5.3. Multiplexage fréquentiel - Exemples

- ADSL (téléphonie analogique + canaux numériques)
 - ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)
 - Service à large bande
 - On n'élimine pas sur la boucle locale les fréquences n'appartenant pas à [300Hz, 3400Hz]
 - La boucle locale est divisée en plusieurs canaux :
 - Canal téléphonique
 - Théoriquement les canaux peuvent être utilisés en full duplex, mais dans la pratique on préfère les utiliser en simplex (diaphonie, écho) :
 - Canaux montants (vers le FAI)
 - Canaux descendants (vers l'utilisateur) : environ 80% (Adsl)
 - Principe de séparation des signaux données des signaux vocaux
 - Séparateur de ligne (filtre)
 - Pas de séparateur de ligne (microfiltre)
 - Choix des couches supérieures laissé à l'opérateur (ex: ATM)

34

ADSL (téléphonie analogique + canaux numériques)

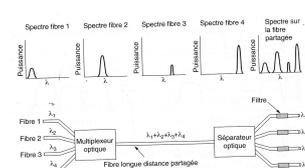
- Technique DMT (Discrete MultiTone)
- Plage de fréquences de la boucle locale (environ 1,1MHz) divisée en 256 canaux indépendants d'environ 4300Hz chacun
 - Canal 0: service téléphonique
 - Canaux de 1 à 5 : non utilisés (éviter interférences entre signaux vocaux et données)
 - 250 canaux restants :
 - un pour la signalisation du flux montant (upstream)
 - un pour la signalisation du flux descendant (downstream)
 - les autres disponibles pour le transport des données utilisateur (environ 32 dans le sens montant et 216 dans le sens descendant)



35

5.3. Multiplexage fréquentiel - Exemples

- WDM Wavelength Division Multiplexing
 - Fréquence \Leftrightarrow longueur d'onde λ .
 - Exemple : 4 fibres à longueur d'onde différente arrivent sur un prisme (système à diffraction)
 - La fibre partagée transporte les 4 flux : multiplexage fréquentiel à très hautes fréquences
 - Quand le nombre de canaux est important et que l'espace de séparation des longueurs d'onde est infime (ex: 0,1nm) => multiplexage dense en longueur d'onde (DenseWDM) (ex: 2500 canaux à 10GHz chacun)



36

5.3. Multiplexage fréquentiel - Exemples

- | GSM (Global System for Mobile communications)
 - plusieurs canaux (fréquences) par cellule
 - chaque mobile transmet sur une fréquence et reçoit sur une fréquence plus élevée
 - bande passante des canaux de 200kHz
 - multiplexage temporel pour partager les canaux entre plusieurs téléphones

37

5.4. Multiplexage temporel

- | il n'est utilisable que dans les réseaux numériques
- | 5.4.1. Multiplexage temporel statique
 - | le temps est découpé en tranches fixes (IT) qui sont allouées cycliquement aux voies basse vitesse
 - | *Multiplexage temporel par caractère*
 - on envoie cycliquement des trames de longueur L sur la voie haute vitesse
 - D = débit VHV => on envoie D/L trames par sec
 - une trame est divisée en IT de λ_i bits, avec $\sum \lambda_i = L$
 - la succession des IT de $n^o i$ des différentes trames constitue un circuit de données, ou canal $n^o i$, associé à la voie i et de débit binaire $\lambda_i * D / L$ bps
 - ex : D = 4800 bps, $d_i = 80$ bps => $\lambda_i * D / L \geq 80$, soit $\lambda_i / L \geq 80 / 4800 (= 1 / 60)$
 - si n (nombre de voies basse vitesse) = 60 => e = 1

38

5.4.1. Multiplexage temporel statique

- | une partie de la bande passante est réservée à la **signalisation** :
 - allocation des IT, synchronisation, etc.
- | signalisation **hors bande** :
 - un ou plusieurs IT sont réservés à la signalisation
- | signalisation **dans la bande** :
 - un ou plusieurs bits de signalisation sont ajoutés aux IT
 - ex : $\lambda_i = 8 + 1$ ce bit peut être un flag indiquant s'il s'agit d'un caractère de donnée ou de signalisation
- | verrouillage de la trame :
 - permet de délimiter le début de la trame (caractère de synchronisation)
 - le multiplexeur récepteur vérifie qu'entre deux caractères de verrouillage il y a une trame de longueur L
 - prise de synchronisation entre les multiplexeurs

39

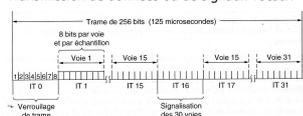
5.4.1. Multiplexage temporel statique

- | Téléphonie numérique MIC : Modulation par Impulsions et Codage
 - Transmission de voix numérisée sur des réseaux téléphoniques numériques
 - conversion de signaux analogiques en signaux numériques (CODEC)
 - voix (signal analogique de bande passante 4000Hz) échantillonnée à 8000Hz
 - R = 8000 Hz (R = 2H) => $\Delta = 125 \mu s$
 - les voies basse vitesse ont un débit de :
 - 64 kbps = $8000 * 8 = R \log_2 V$ (V = $2^8 = 256$)

40

5.4.1. Multiplexage temporel statique

- | Exemple : norme G.732
 - le débit normalisé sur la voie haute vitesse est :
 - 2,048 Mbps ($32 * 64 000$)
 - 32 échantillons de 8 bits dans une trame de 125 μs
 - 30 IT contiennent des données utiles
 - 2 IT sont réservées à la signalisation (IT 0 et 16) :
 - IT0 : synchronisation ou verrouillage
 - IT16 : signalisation hors bande (4 bits par voie)
 - => 15 trames pour assurer signalisation des 30 voies
 - => + 16^e trame : structure multi-trame
 - une voie MIC (VHV) transporte donc 30 voies téléphoniques (VBV)
 - Transmission de données ou de signaux vocaux



41

5.4.1. Multiplexage temporel statique

- | GSM
 - | Multiplexage fréquentiel + temporel
 - | 124 paires de canaux
 - Montants : de 890 à 915 MHz
 - Descendants : de 935 à 960 MHz
 - | Chaque canal a une largeur de 200 kHz (MF) et supporte 8 connexions séparées (MT)
 - | Un téléphone mobile actif se voit attribuer un slot de temps dans chaque canal d'une paire : 4 slots dans chaque direction
 - | L'émission et la réception ne peuvent pas avoir lieu dans le même slot
 - | Ex : le cas (slot 3)
 - Diagram showing frequency allocation: 955.8 MHz (Base vers mobile), 955.2 MHz (Mobile vers base), 914.8 MHz (Base vers mobile), 890.2 MHz (Mobile vers base).
 - Time axis labeled 'Temps'.

42

5.4.2. Multiplexage temporel statistique

- | les IT sont alloués dynamiquement aux voies qui en ont besoin
 - gain d'efficacité
 - un codage particulier doit permettre d'identifier les voies
- | **Méthode 1 :**
 - le contenu de chaque voie active est précédé de 2 octets
 - n° de la voie concernée
 - nombre de caractères transférés pour cette voie
 - aucune place n'est allouée aux voies inactives
 - codage des données transparent

43

5.4.2. Multiplexage temporel statistique

- | **Méthode 2 :**
 - une place est attribuée à toutes les voies basse vitesse, actives ou non
 - un mot très court sépare les emplacements de deux voies successives
 - si une voie n°i est inactive, on n'intercale que le séparateur
- | l'ensemble des caractères de données et de signalisation et le séparateur sont précodés dans un alphabet de longueur variable (code de Huffman) :
 - Les symboles les + fréquents ont les codes + courts
 - efficacité $> 1 : \sum d_{i, \text{moyen}} < D_{HV} < \sum d_{i, \text{max}}$

44

5.4.2. Multiplexage temporel statistique

- | si tous les canaux entrants deviennent actifs simultanément alors le débit global ne peut pas être écoulé. Le multiplexeur doit :
 - stocker une partie de l'information pour la retransmettre plus tard
 - bloquer le trafic sur une ou plusieurs voies entrantes (contrôle de flux)
 - protocole XON / XOFF

45

5.4.2. Multiplexage temporel statistique

- Multiplexage dans les réseaux à commutation de paquets
- Possibilité que $d_{i, \text{max}} = D_{HV}$
 - | Tant que $\sum d_{i, \text{moyen}} < D_{HV}$
 - | Capacité mémoire importante
 - | Méthode 1 (données adressées)
 - | Ex :
 - Commutateur de trames ethernet
 - Routeurs paquets IP
- Conclusion :
 - | le multiplexage est une fonction transversale au sein d'une architecture de communication

46

6. Supports de transmission

- avec guide physique
 - | câbles électriques, fibres optiques
- sans guide physique
 - | ondes hertziennes ou lumineuses
- caractéristiques de supports
 - | bande passante
 - | affaiblissement
 - | sensibilité aux bruits
 - | Coût (du support, des équipements d'extrémité, de l'installation)

47

6.1. Câbles électriques à paires torsadées

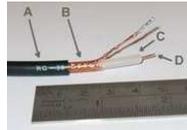
- composés de deux conducteurs en cuivre enroulés de façon hélicoïdale
- réseau téléphonique ou réseaux locaux
- signaux analogiques ou binaires
 - | câbles UTP (Unshielded Twisted Pair)
 - câbles de catégorie 3 : 4 paires de câbles
 - Ex. Ethernet 10BaseT
 - câbles de catégorie 5 : mieux adaptés aux transmissions à haut débit
 - Ex. Ethernet 100BaseT
 - | câbles STP (Shielded Twisted Pair)
 - Chaque paire est blindée séparément
 - Ex : réseaux Token Ring



48

6.2. Câbles coaxiaux

- composés de deux conducteurs métalliques imbriqués (tresse, cœur) séparés par un isolant
 - large bande passante
 - excellente immunité aux bruits
- câbles coaxiaux en bande de base
 - transmission de signaux numériques
 - hauts débits (jusqu'à 2 Gb/s sur 1 km)
 - ex. Ethernet 10 Base 5 (« thick Ethernet »)
- Câble coaxial flexible type RG-59.
 - A: Gaine extérieure en plastique
 - B: Blindage en cuivre
 - C: Diélectrique
 - D: Conducteur central (âme) en cuivre



49

6.2. Câbles coaxiaux

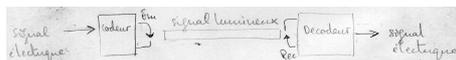
- câbles coaxiaux en large bande
 - transmission de signaux analogiques
 - distances proches de 100 km
 - canaux de transmission utilisés pour la TV analogique, le son numérisé ou les données
 - moins performants pour la transmission des signaux numériques que ceux en bande de base
 - très utilisés dans les MAN (réseaux de TV et Internet par câble)
 - Multiplexage en fréquence
 - Canaux TV analogique, TV numérique, internet

Remplacés par la fibre optique sur les longues

50

6.3. Fibres optiques

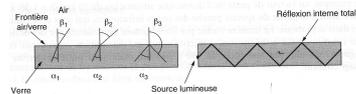
- bits transmis sous forme d'impulsions lumineuses :
 - 1 : impulsion, 0 : absence d'impulsion
 - lumière : onde de fréquence 10^{14} Hz
 - bande passante de potentiel énorme
- système formé de 3 composants :
 - support de transmission de la lumière (fibre optique)
 - dispositifs d'émission et réception de l'onde lumineuse :
 - LED (Light Emitting Diode)
 - photodiode ou phototransistor
- Système de transmission unidirectionnel
 - Câble optique : au moins deux fibres



51

6.3. Fibres optiques

- Principe de réfraction entre deux milieux (air/verre) :
 - Au-delà d'un certain angle d'incidence, le rayon est réfléchi
 - => se propage à l'intérieur de la fibre par réflexions multiples
 - => propagation sur de longues distances sans affaiblissement



- Signal :
 - Propagation directe dans le cœur
 - Signaux réfléchis sur la gaine => retard



52

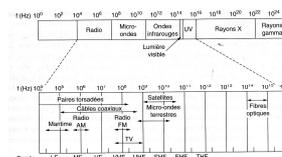
6.3. Fibres optiques

- fibre **multimode** :
 - plusieurs rayons (modes) se propagent dans la fibre
 - Retard, interférence => limite débit
 - moins coûteux
 - Diamètre :
 - Cœur 50 à 62,5 μ m
 - Gaine 125 à 150 μ m
- fibre **monomode** :
 - un seul rayon (direct) se propage dans la fibre
 - meilleur débit
 - distances plus longues
 - Diamètre
 - Cœur 10 μ m
 - Gaine 125 μ m
- Possibilité de multiplexage (D)WDM

53

6.4. Transmission sans fil

- Ondes électromagnétiques
 - Observées pour la première fois par Hertz (1887)
 - Le nombre d'oscillations par seconde : fréquence (Hz)
 - Distance entre deux minima (ou maxima) consécutifs d'une onde : longueur d'onde
 - Dans le vide, les ondes se propagent à la vitesse de la lumière c ($c=3 \cdot 10^8$ m/s)
 - Dans le cuivre ou dans une fibre, la vitesse tombe à environ $2 \cdot 10^8$ m/s
- Spectre électromagnétique et bandes d'ondes associées :



54

6.4. Transmission sans fil

6.4.1 Ondes radio

- | basses fréquences (VLF, LF, MF) :
 - Omnidirectionnelles (diffusion radio)
 - Faible bande passante
- | hautes fréquences (HF, VHF) :
 - tendance à rebondir sur les obstacles (réfraction)
 - Réseaux GSM, Wifi

6.4.2 Micro-ondes

- Fréquence > 100 MHz
- Propagation en ligne droite
- => faisceaux hertziens
- hauts débits
- antennes paraboliques
- émetteur et récepteur doivent être dans un alignement parfait (tours hertziennes)
- Moins coûteux que les fibres optiques (équipements d'extrémité)

55

6.4. Transmission sans fil

6.4.3 Ondes infra-rouges

- | communications à faible portée (ex: télécommandes)
- | ne traversent pas les obstacles
- | utilisées dans RL sans fil à l'intérieur des bâtiments
- | faible portée => pas très utilisées pour télécommunications

6.4.4 Ondes lumineuses (ondes laser)

- | se propagent en ligne droite
- | peu coûteuses, large bande passante
- | sensibles aux perturbations météorologiques

56

6.4. Transmission sans fil

6.4.5 Liaisons satellite

- | Satellite ⇔ répéteur de micro-ondes dans l'espace
 - Liaisons à diffusion
 - Faciles à écouter => cryptage pour assurer confidentialité
 - Taux d'erreurs faibles
 - Coût indépendant de la distance parcourue
- | Satellite géostationnaires (GEO : Geostationary Earth Orbit) :
 - 35 800 km d'altitude
 - Fixes, long délai de propagation
 - Bandes de fréquences allouées par l'UIT-T pour éviter interférences avec les utilisateurs de micro-ondes
 - Dans chaque bande :
 - plage de fréquences plus basses pour le trafic montant (vers satellite)
 - plage de fréquences plus hautes pour le trafic descendant (depuis le satellite)

57

6.4.5 Liaisons satellite

Satellites à défilement (constellations, LEO, MEO)

- Délais plus faibles, changement de satellite
- MEO (Medium Earth Orbit)
 - Altitudes d'environ 18 000 km
 - Environ 6h pour faire le tour de la planète
 - Ex: satellites GPS (Global Positioning System)
- LEO (Low Earth Orbit)
 - Faible altitude d'environ 1 000 km
 - Déplacement rapide
 - Ex: Iridium: utilisé dans la marine, l'aviation, les zones désertiques ou montagneuses
 - => 66 satellites qui communiquent entre eux dans l'espace
 - => 1268 cellules cellulaires en mouvement qui recouvrent la planète

58

Conclusion supports

Transmissions sur câble

- | Paires torsadées pour LAN
- | Paire téléphonique (ADSL), coaxial (TV) pour accès
- | Fibres optiques pour réseaux LAN haut débit ou liaisons des MAN ou WAN (câbles trans-océaniques)

Transmissions sans fil

- | Faisceaux hertziens : moins coûteux que les fibres optiques
 - | sites difficilement accessibles, liaisons mobiles temporaires
- | Réseaux locaux sans fil (Wifi, Bluetooth)
- | Téléphonie cellulaire (GPRS, UMTS)
- | Réseaux satellite (large couverture)

59