

Transmission de Données

IFT3325

A. S. Hafid

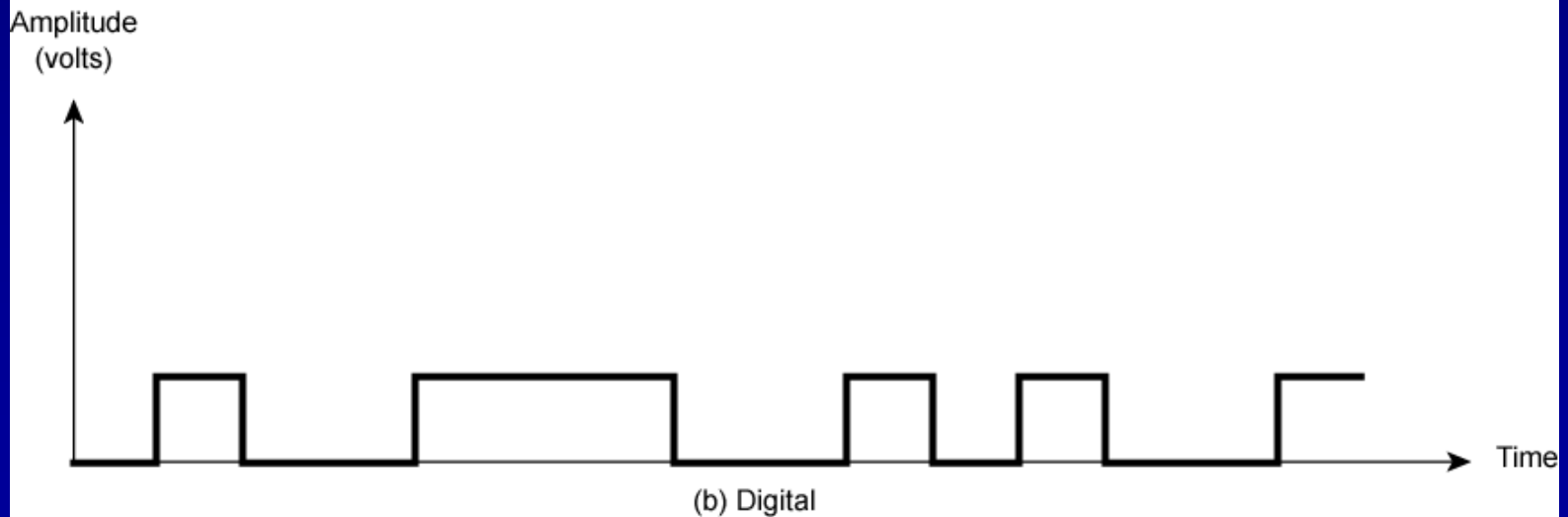
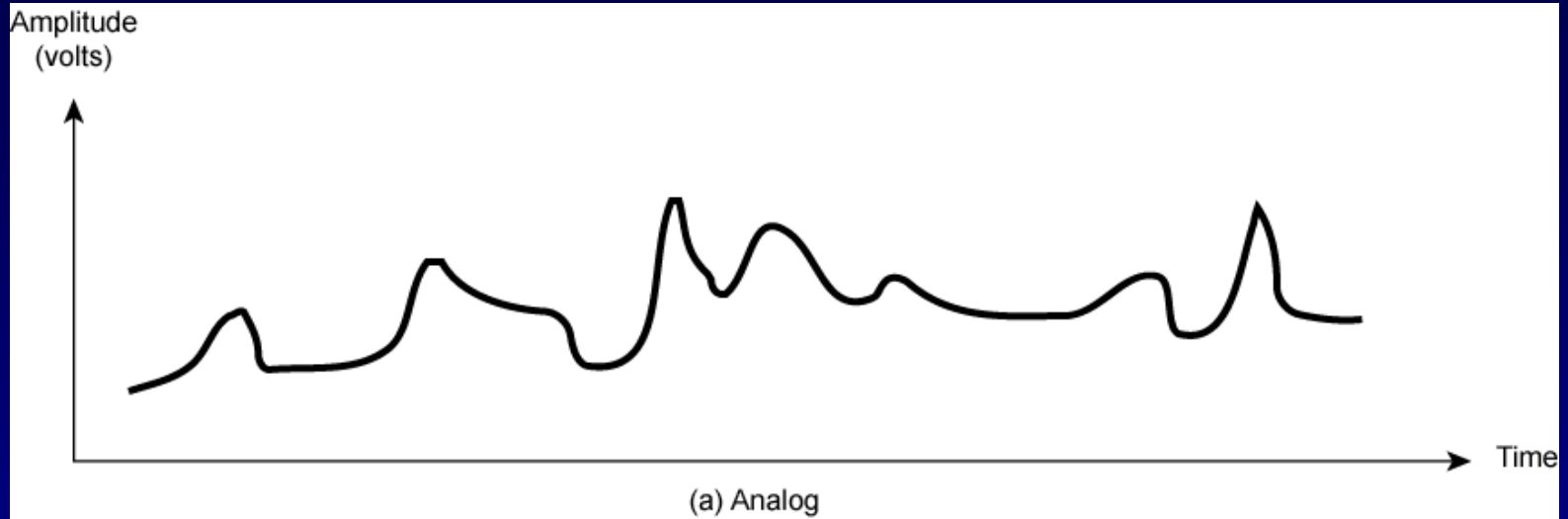
e-mail: ahafid@iro.umontreal.ca

phone: (514) 343-2446

Plan

- Signal analogique Vs. Signal digital
- Signaux périodiques
- Composantes harmoniques (ou de fréquence) d'un signal
- Théorème de Fourier
- Limitations à la transmission d'un signal
- Capacité d'un canal
- Transmission analogique Vs. Transmission digitale
- Les supports de communication
- Multiplexage
- Conclusion

Signal Analogique Vs. Signal digital



Signal Analogique Vs. Signal digital (cont.)

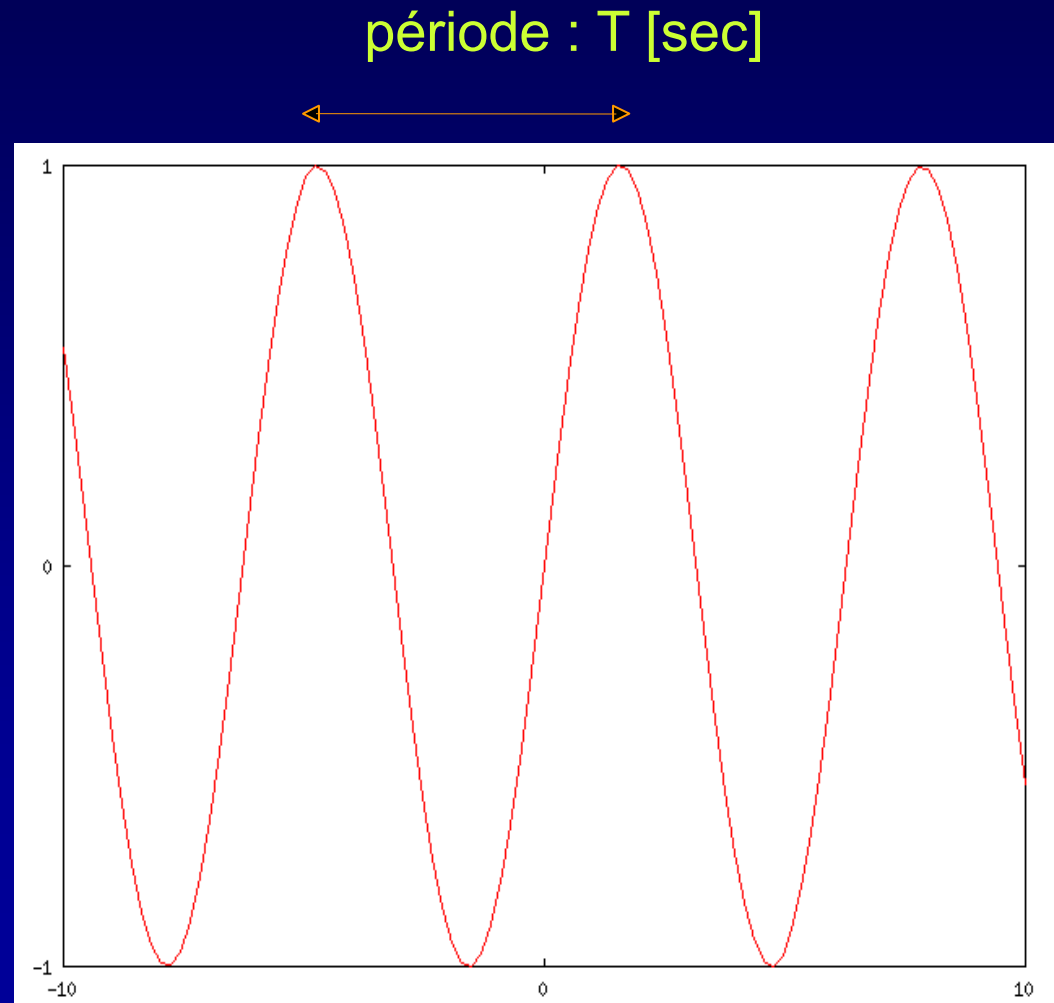
- **Analogique**
 - valeurs continues, par exemple, voix ou vidéo
- **Digital**
 - valeurs discrètes, par exemple, texte représenté par des caractères ASCII ou chaque caractère correspond à une séquence de 7 ou 8 bits.

Période Vs. Fréquence

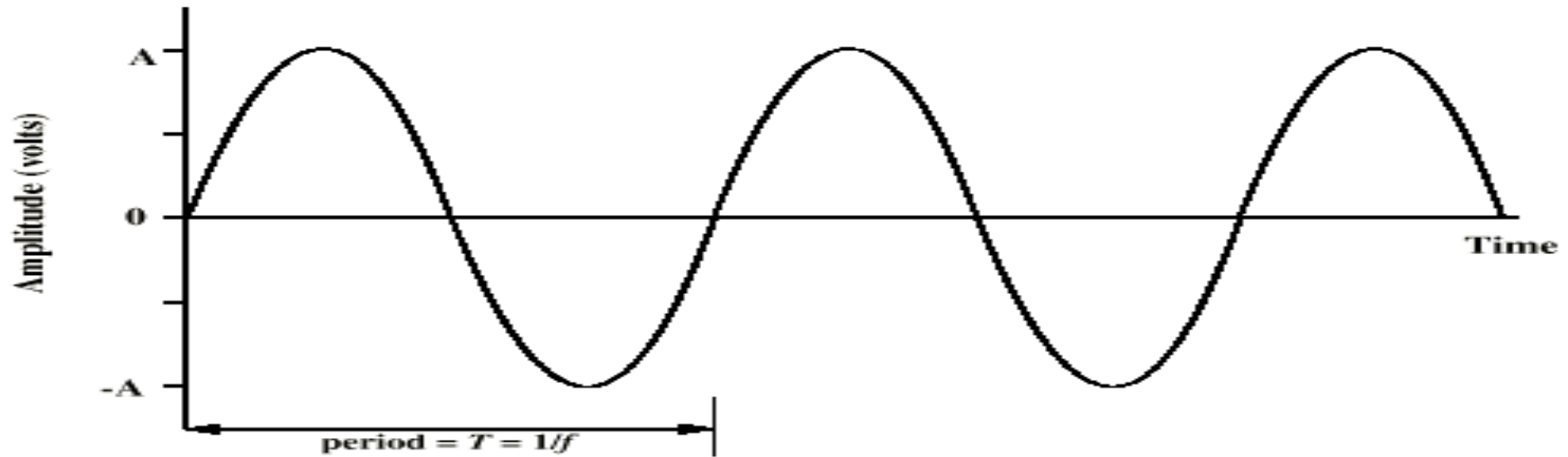
Bases théoriques Signal périodique

fréquence : $f = 1/T$ [Hz]

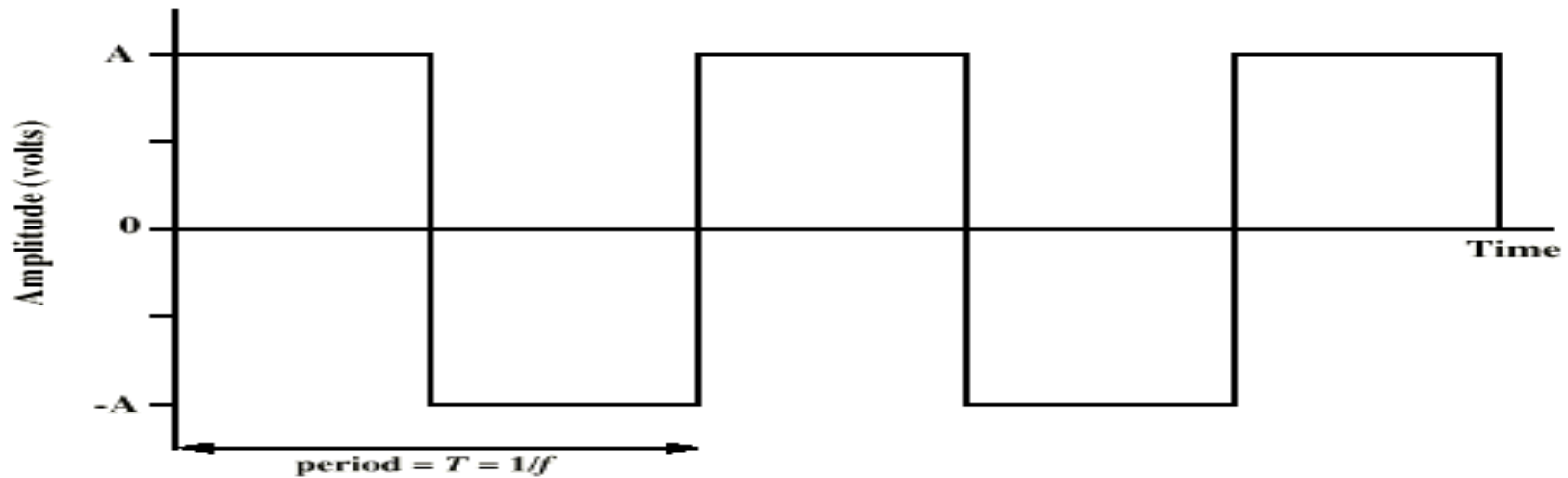
La fréquence d'un signal, exprimée en Hertz, est le nombre de périodes (ou d'oscillations) par seconde



Signaux Périodiques

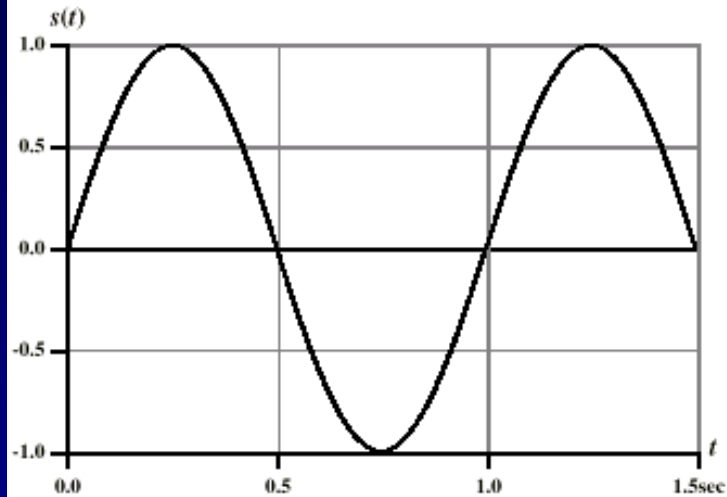


(a) Sine wave

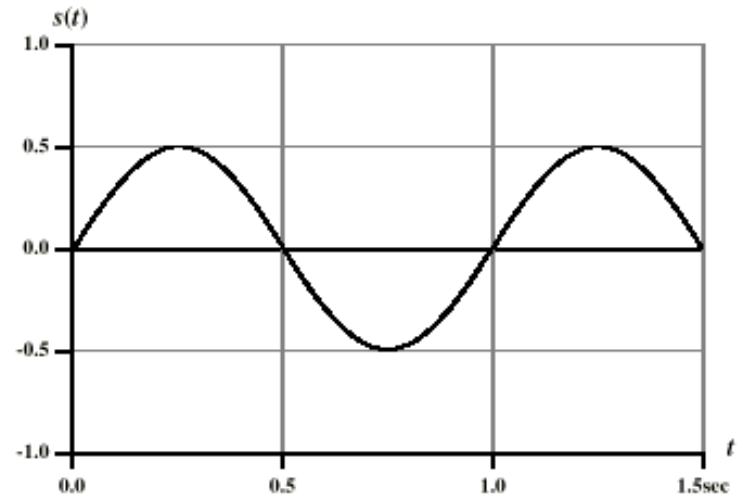


(b) Square wave

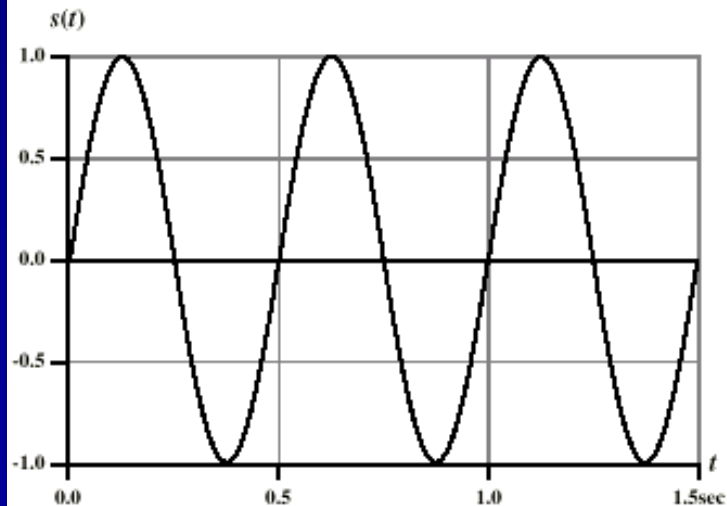
Fonctions Sinus

$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \Phi)$$


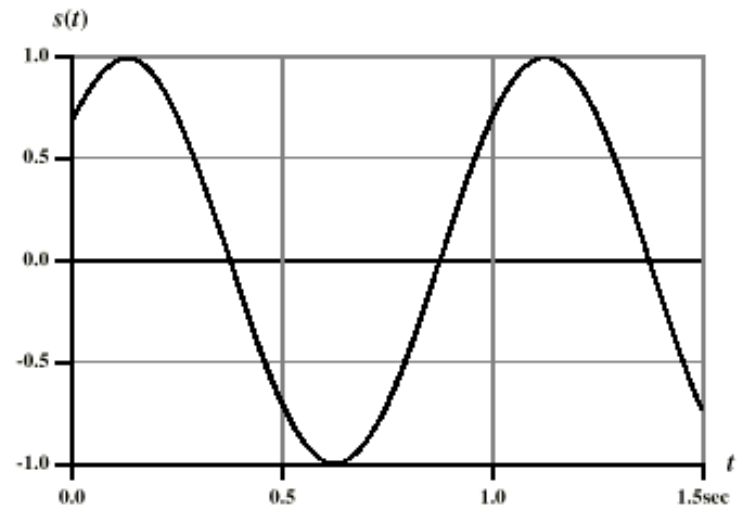
(a) $A = 1, f = 1, \phi = 0$



(b) $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$



(c) $A = 1, f = 2, \phi = 0$

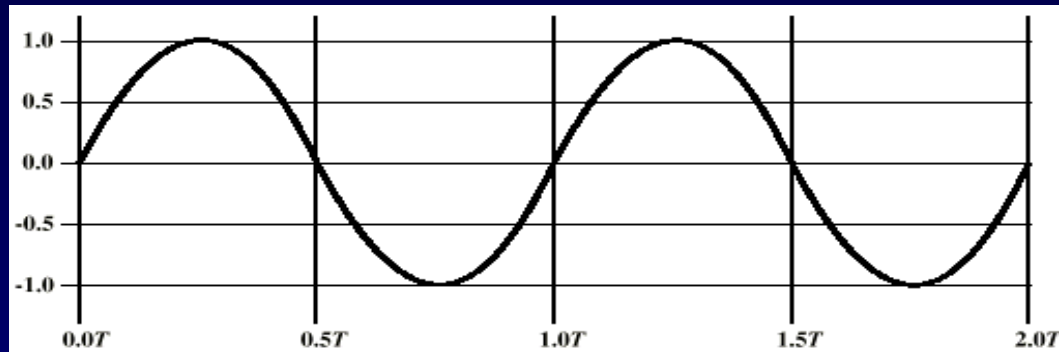


(d) $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

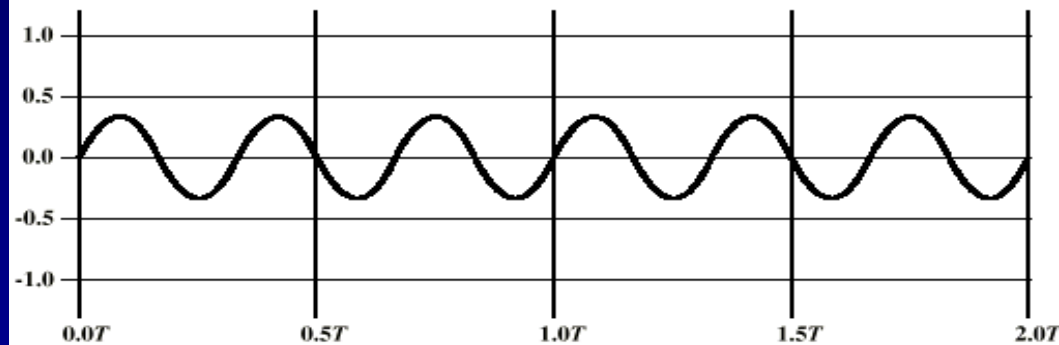
Composantes Harmoniques

- Généralement, un signal est composé de plusieurs fréquences
- Les composantes sont des fonctions périodiques sinusoïdales: les *composantes harmoniques*.

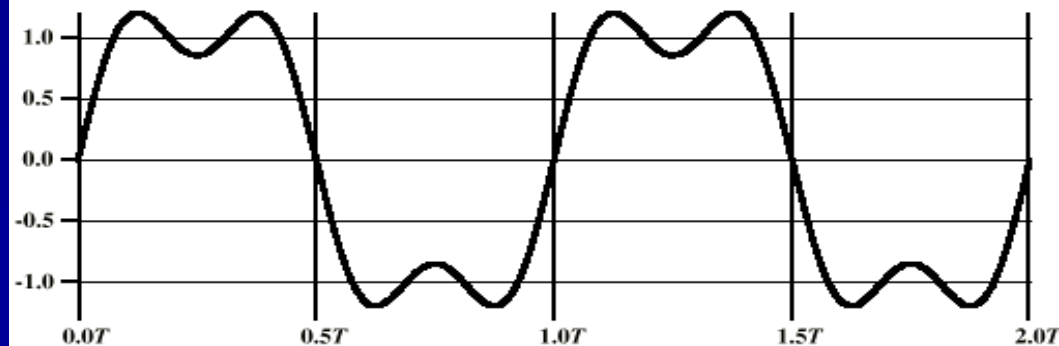
Addition de Composantes de Fréquence



(a) $\sin(2\pi ft)$

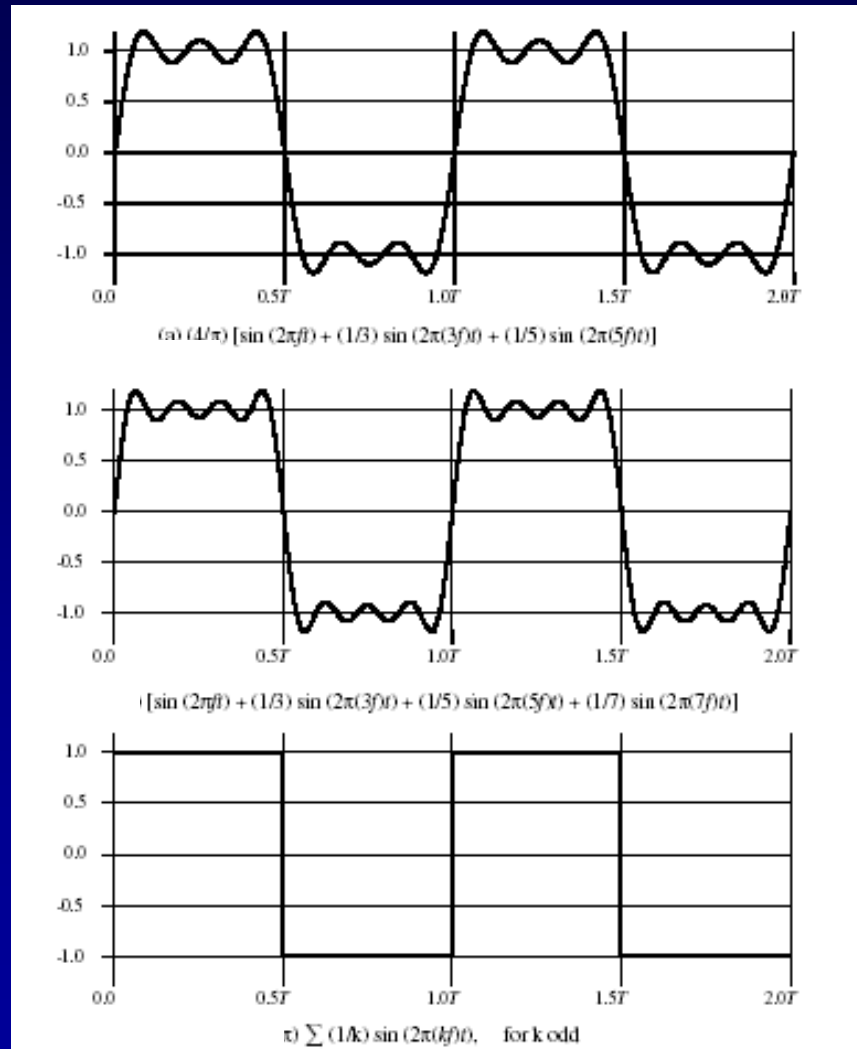


(b) $(1/3) \sin(2\pi (3f)t)$



(c) $\sin(2\pi ft) + (1/3) \sin(2\pi (3f)t)$

Addition de Composantes de Fréquence (Cont.)



Addition de Composantes de Fréquence (Cont.)

- Intuitivement
 - Un signal périodique est

Théorème de Fourier

- Théorème de Fourier
 - Un signal périodique $s(t)$, de fréquence f , peut s'écrire sous la forme d'une somme infinie de signaux périodiques (les harmoniques) sinusoïdaux et cosinusoïdaux dont la fréquence de chaque signal périodique est un multiple entier de la fréquence f du signal $s(t)$

$$s(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi n f t).$$

$f = \frac{1}{T}$ fréquence fondamentale

a_n, b_n amplitudes des composantes harmoniques

Théorème de Fourier (Cont.)

- Les coefficients a_n et b_n sont appelés amplitudes de la $n^{\text{ème}}$ harmonique et peuvent être calculés de la manière suivante :

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

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

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

avec $f = 1/T$ la fréquence fondamentale

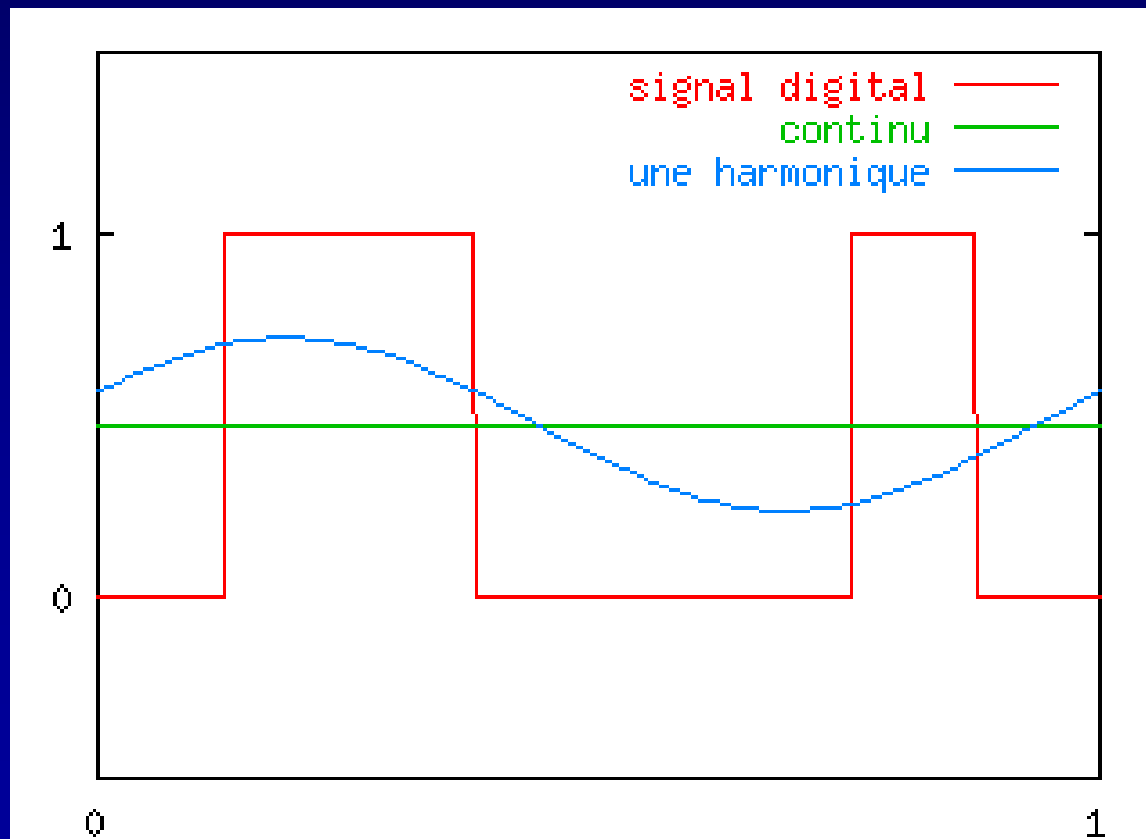
- Une telle décomposition est appelée série de Fourier. Le terme n correspond à la $n^{\text{ème}}$ harmonique.

Question

- Comment on fait pour les signaux qui ne sont pas périodiques?
 - P.ex., une suite de bits qui représente une requête web (HTTP)

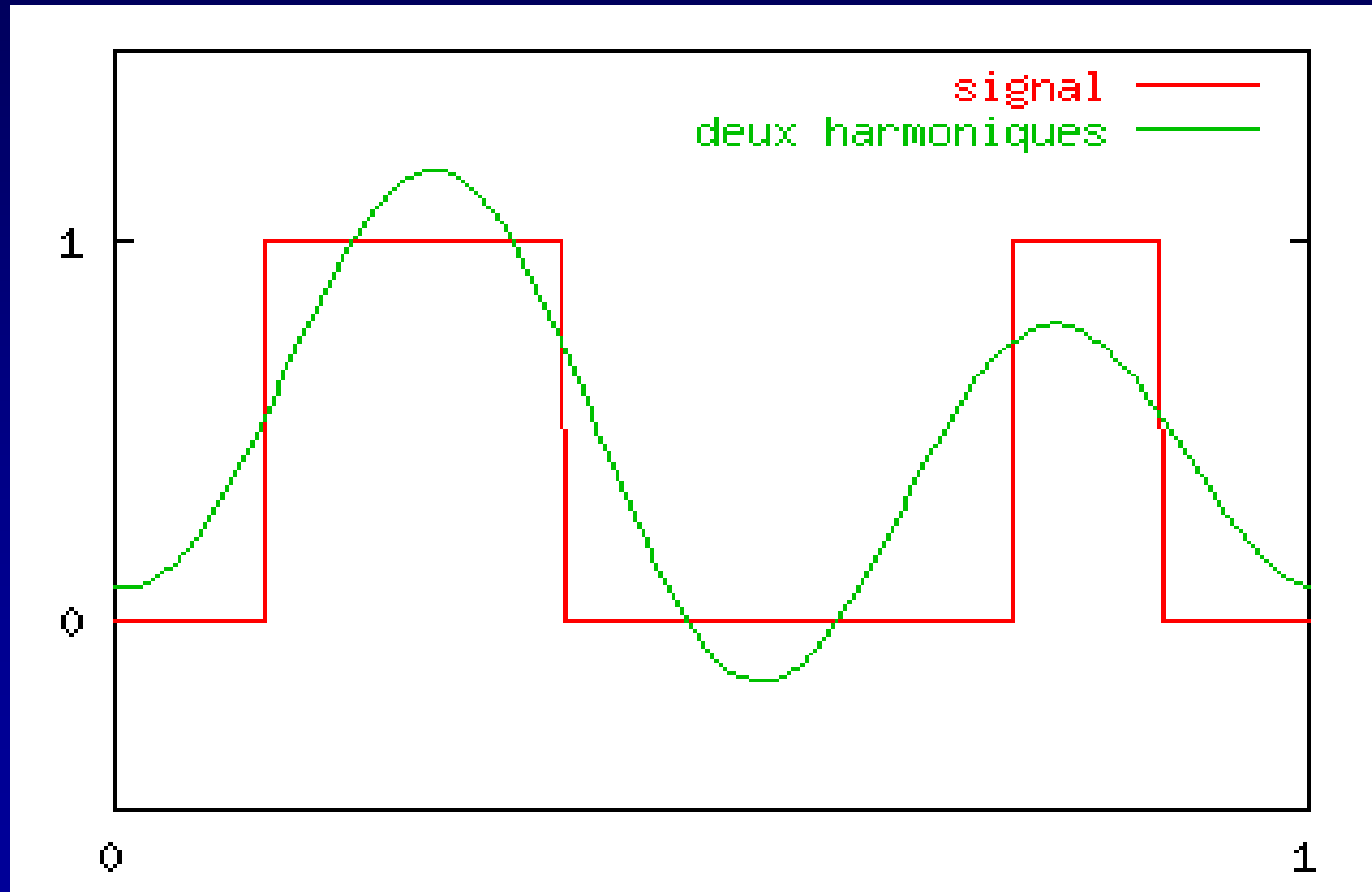
Théorème de Fourier (Cont.)

- Décomposition d'un signal digital en harmoniques
 - composante continue
 - composante continue et première harmonique



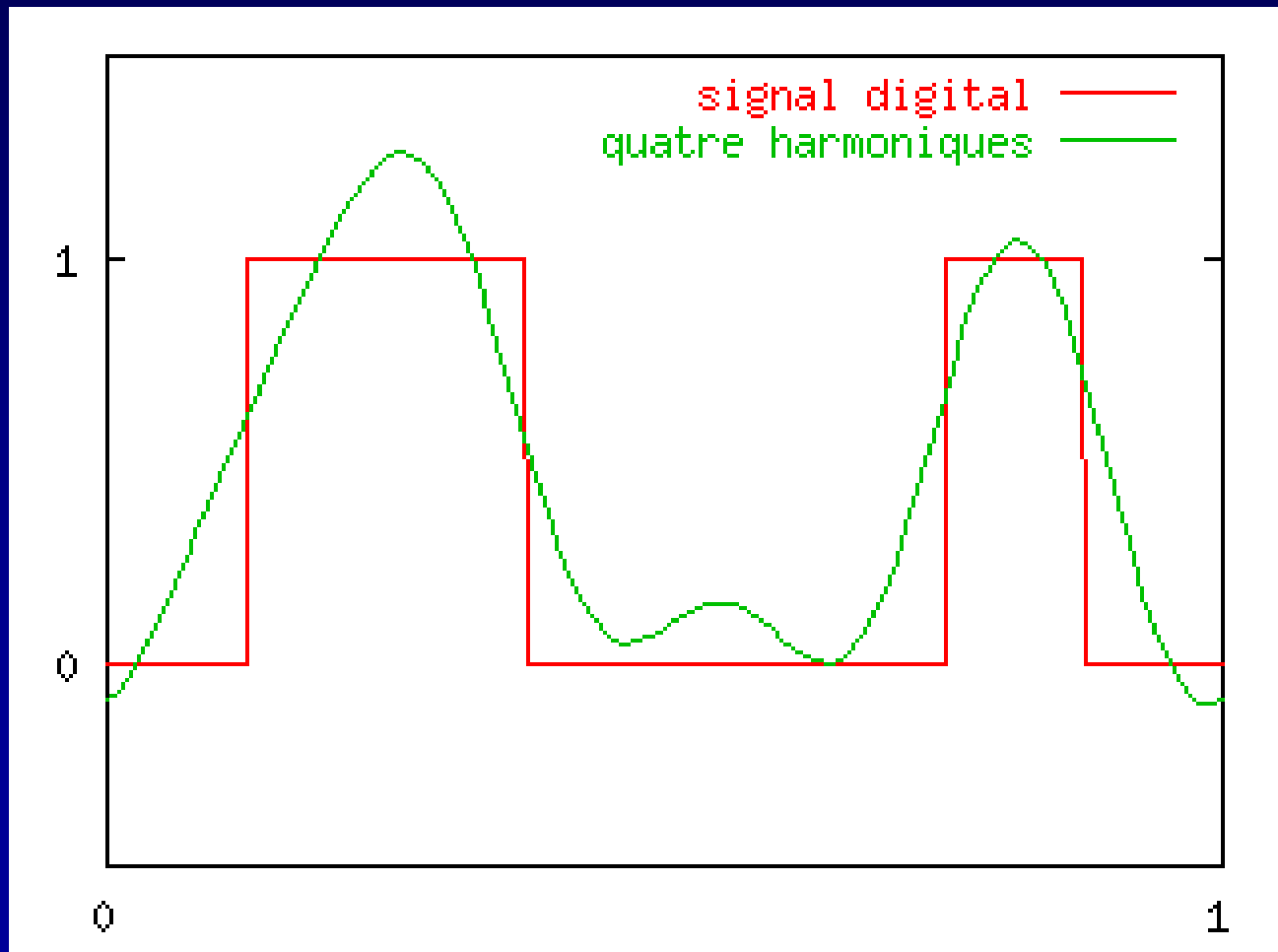
Théorème de Fourier (Cont.)

- Deux premières harmoniques



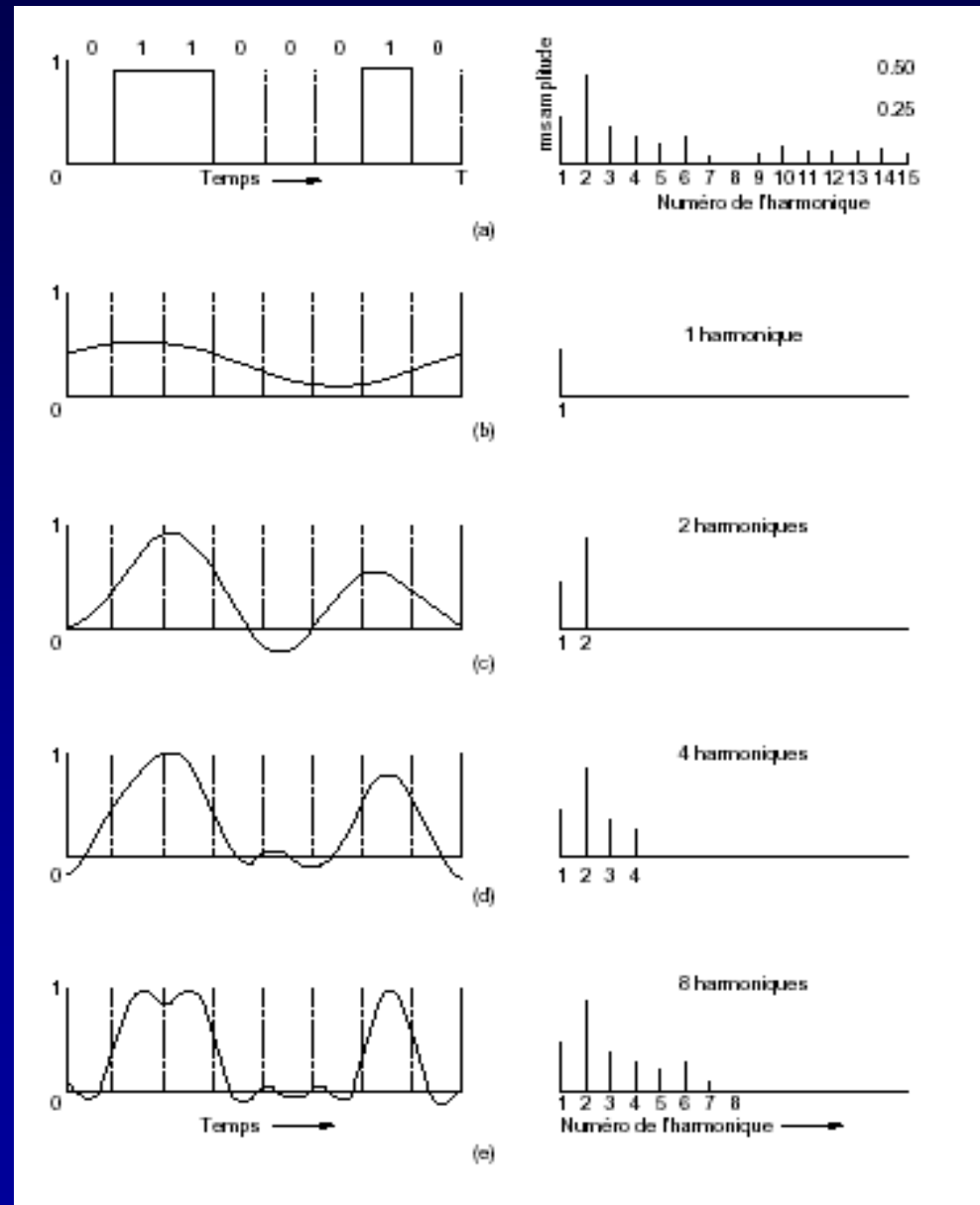
Théorème de Fourier (Cont.)

- Quatre premières harmoniques



Transmission de Donnée Vs. Nombre d'harmonique

- Le caractère b est encodé par 01100010 (ASCII)



Transmission de Donnée Vs. Nombre d'harmonique

- Conclusion
 - Un signal

Spectre et Largeur de Bande

- Spectre
 - L'ensemble de fréquences contenues dans le signal
 - E.g., f et $3f$
- Largeur de bande absolue
 - Largeur du spectre
 - E.g., $2f=3f - f$
- Largeur de bande effective
 - Généralement, largeur de bande ou bande passante est utilisée
 - Calculée en utilisant seulement un sous-ensemble de fréquences qui contiennent la majeure partie (énergie) du signal

Limitations à la Transmission d'un Signal

- Un canal de transmission ne transmet que certaines plages de fréquence
 - Bande passante d'un canal de transmission
 - Exemples
 - » 300 Hz à 3400 Hz pour une ligne téléphonique normale
 - » 20 à ~20 kHz pour l'oreille humaine
 - » 0 à 500 Mhz pour télédistribution
- Généralement, un signal périodique est composé d'une infinité d'harmoniques
 - Les harmoniques de fréquence supérieure à la bande passante du canal ne seront pas transmises par le canal

Limitations à la Transmission d'un Signal: Voie Téléphonique

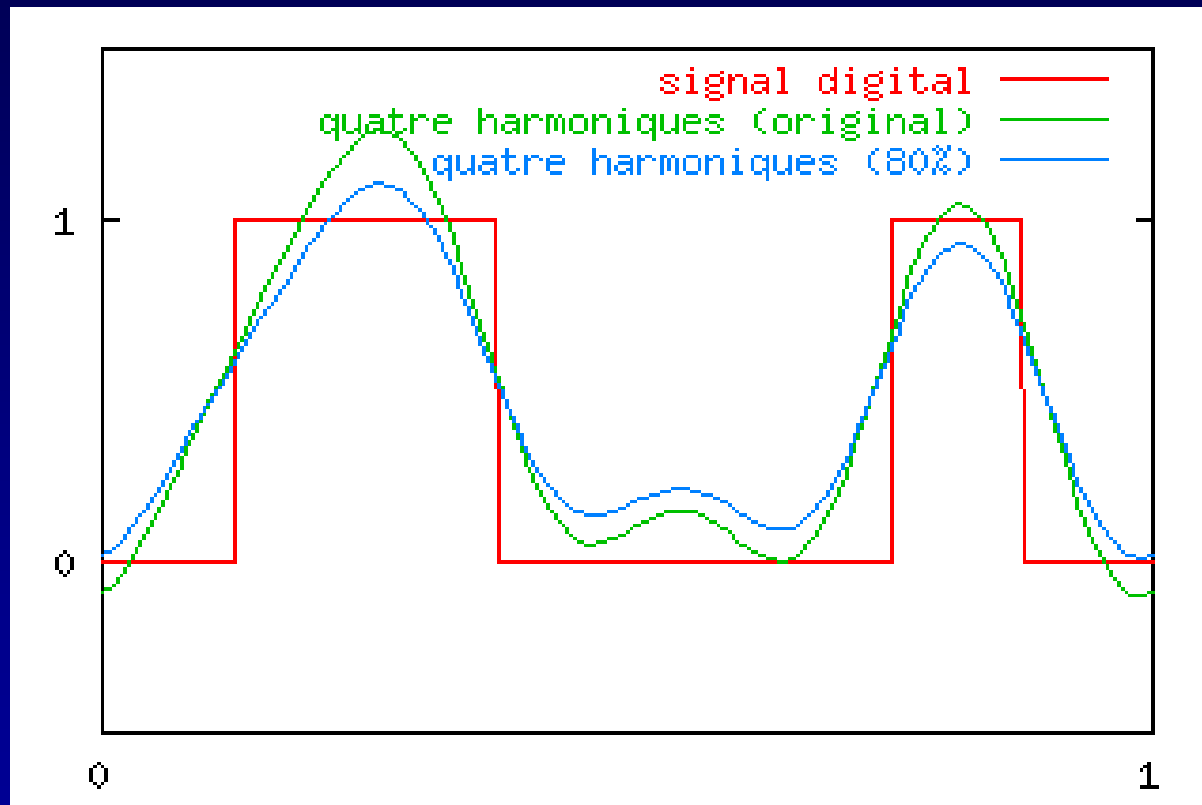
- Une voie téléphonique a une largeur de bande (*bande passante*) de ~ 3000 Hz
- Envoyer un caractère de 8 bits
- Question:
 - Combien d'harmoniques on peut envoyer sur la voix téléphonique pour un débit de 300 bps, 600 bps, 1200 bps, 2400 bps, 4800 bps, 9600 bps, 19200 bps, 38400 bps
 - C'est quoi le débit maximal qu'on peut avoir sur une voix téléphonique
 - Comment expliquer ce 'bas' débit

Limitations à la Transmission d'un Signal: Voie Téléphonique (cont.)

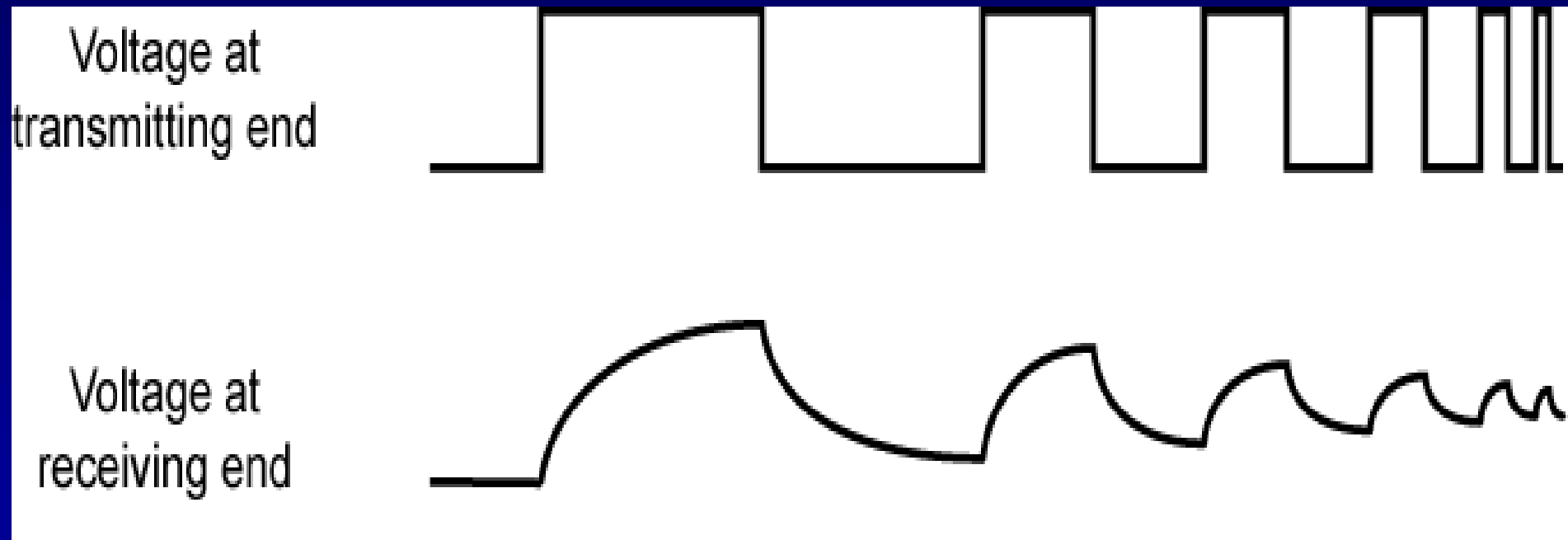
Considérer un signal périodique
 $\text{Période} = 8 / \text{débit} \rightarrow \text{Fréquence} = \text{débit} / 8$

Bps	T(msec)	Première harmonique (Hz)	# harmoniques
300	26.67	37.5	80
600	13.34	75	40
1200	6.67	150	20
2400	3.33	300	10
4800	1.67	600	5
9600	0.83	1200	2
19200	0.42	2400	1
38400	0.21	4800	0

Atténuation



Atténuation (Cont.)



Atténuation (Cont.)

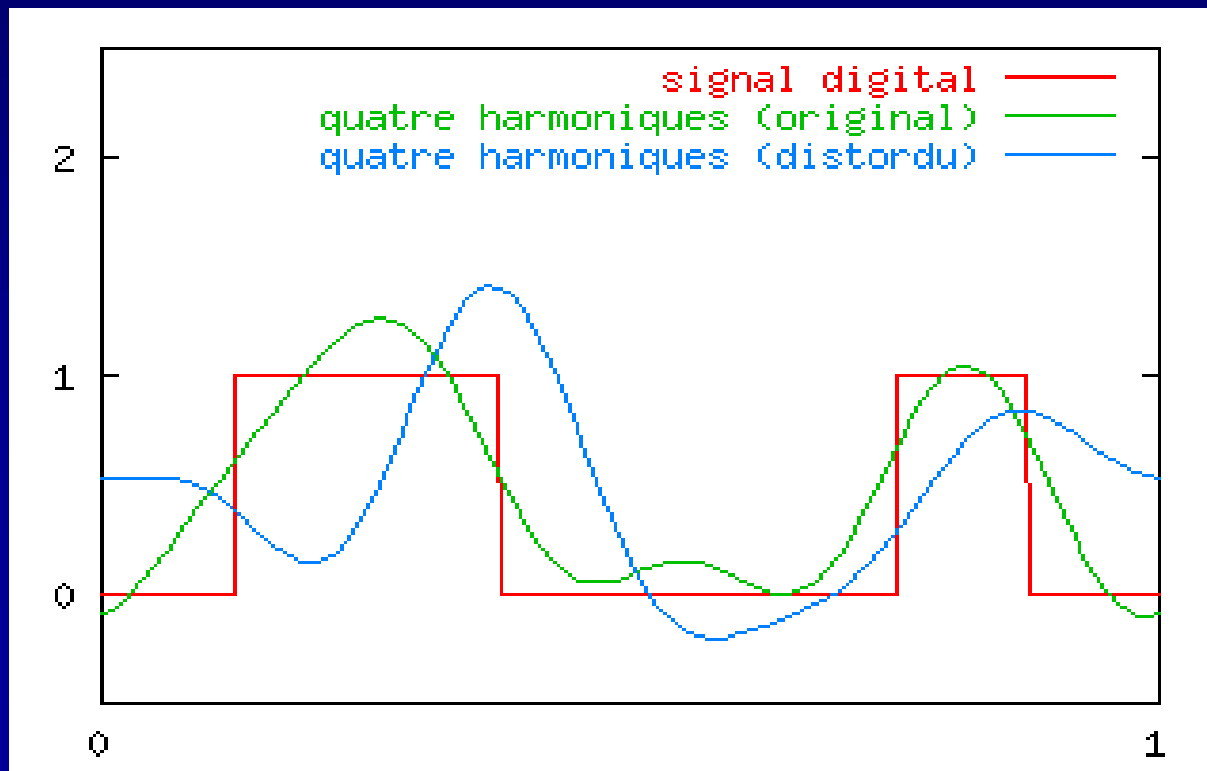
- L'atténuation et l'amplification sont quantifiées en décibels (dB).
 - **Atténuation:** $10 \log(P1/P2)$ dB
 - **Amplification:** $10 \log (P2/P1)$ dB
 - P1 = puissance du signal à l'émission
 - P2 = puissance du signal à la réception.
 - P1/2 sont exprimés en **watt**.
- **Exemple:** Soit un signal émis à 400 mW avec une atténuation de 16 dB.
 - $16 = 10 \log_{10} (400/P2)$
- La puissance du signal reçu P2?

Atténuation (Cont.)

- La puissance du signal reçu est donc: $P_2 = 10.0475 \text{ mW}$

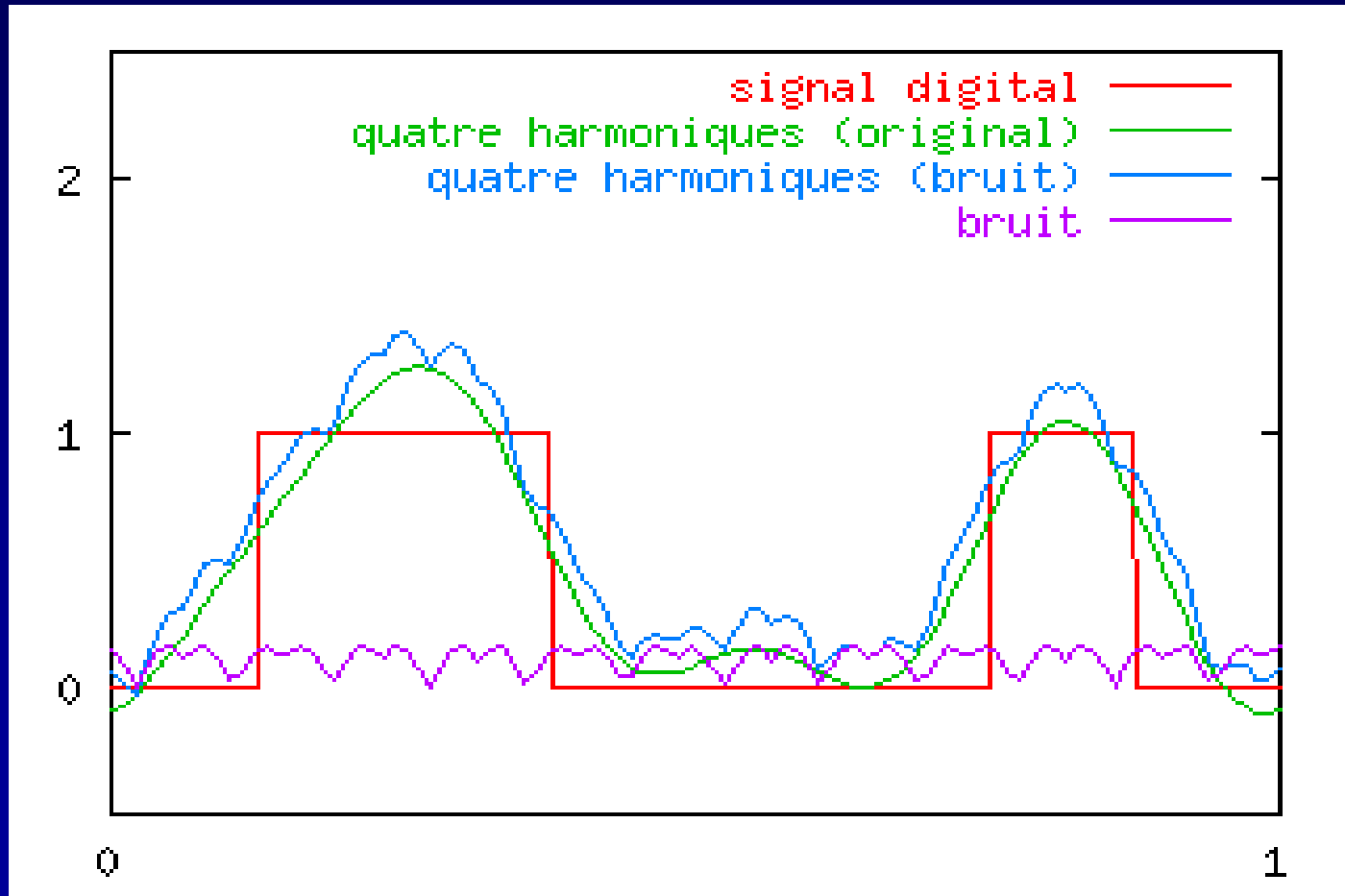
Distorsion

- Changement de la forme du signal
 - Sur des lignes de communication, certaines harmoniques sont transmises plus "rapidement" que d'autres sur le canal
 - Certaines lignes de communication extraient plus d'énergie de certaines harmoniques que d'autres.



Bruit

- Signal parasite se superposant au signal utile
 - interférences avec d'autres signaux



Bruit (cont.)

- Il y a en réalité du bruit parasite sur les lignes de transmission. Ce bruit s'exprime par rapport à la puissance utile du signal transmis:
 - Rapport signal sur bruit: PS/PN
 - PS énergie du signal, PN énergie du bruit.
- La quantité de bruit est exprimée en décibel:
 $10 \log (PS/PN) \text{ dB}$

Comment augmenter le débit
(nombre de bits per second)?

Bauds - Bits par seconde

- Au lieu d'envoyer les bits un par un sur la ligne téléphonique, on peut transmettre un signal représentatif d'un groupe de n bits
 - Le signal transmis pourra prendre 2^n valeurs différentes.
- Si on groupe les bits 4 par 4 et qu'on transmet 9.600 signaux par seconde, on transmet 38.400 bits par seconde.
 - Chaque signal envoyé peut prendre 16 valeurs différentes qu'il faut pouvoir distinguer
- Le nombre de changements du signal par seconde est exprimé en **bauds**
- Le nombre de **bits** transmis **par seconde** est égal au nombre de bauds multiplié par le nombre de bits transmis en une fois.

Capacité d'un Canal

- Mesure de la capacité d'un canal
 - Rapidité de modulation (Baud)
 - nombre de changements du signal par seconde
 - Bits par seconde
 - nombre de bits transmis par seconde
- Exemples
 - Signal digital
 - deux niveaux différents
 - un changement de signal représente 1 bit
 - capacité en bits/seconde = Rapidité de modulation ?
 - quatre niveaux différents
 - un changement de signal représente 2 bits
 - capacité en bits/seconde = Rapidité de modulation ?

Capacité d'un Canal

- Exemples
 - Signal digital
 - deux niveaux différents
 - un changement de signal représente 1 bit
 - capacité en bits/seconde = capacité en bauds
 - quatre niveaux différents
 - un changement de signal représente 2 bits
 - capacité en bits/seconde = 2*capacité en bauds

Capacité d'un Canal Parfait

- Capacité maximale d'un canal parfait
- Théorème de Nyquist
 - un signal limité à la fréquence H peut être reconstruit complètement à condition de le mesurer à une fréquence $2H$
 - Signal discret à V niveaux
 - Canal de bande passante H
 - Débit maximum : $2 \cdot H \cdot \log_2(V)$ bits par seconde
 - Exemple
 - signal digital à deux niveaux sur ligne téléphonique
 - » $H=3400$, $V=2 \rightarrow 6800$ bits/seconde
 - signal à digital 4 niveaux sur ligne téléphonique
 - » $H = 3400$, $V=4 \rightarrow 13600$ bits/seconde

Capacité d'un Canal Parfait (Cont.)

- **En théorie, on peut transmettre à une vitesse aussi grande qu'on veut en augmentant le nombre de niveaux discrets.**
- **Problème?**

Capacité d'un Canal Parfait (Cont.)

- **Cependant le canal de transmission n'est pas parfait**
 - Il faut que le bruit de fonds (les parasites) ne fassent pas confondre des niveaux voisins.

Capacité d'un Canal Imparfait

- Canal avec bruit aléatoire
 - Mesure du bruit
 - Rapport signal bruit (SNR)
 - $\text{SNR} = \text{puissance du signal utile} / \text{puissance du bruit}$
 - SNR est souvent exprimé en décibels (dB)
 - $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 * \log_{10} (\text{SNR})$
 - Débit maximum = $H * \log_2(1 + \text{signal/bruit})$ bits/sec
 - Théorème de Shannon
 - Exemple
 - ligne téléphonique avec SNR_{dB} de 30 dB
 - rapport signal/bruit : 1000
 - débit maximum = $3400 * \log_2(1 + 1000) = 34000$ bits/sec

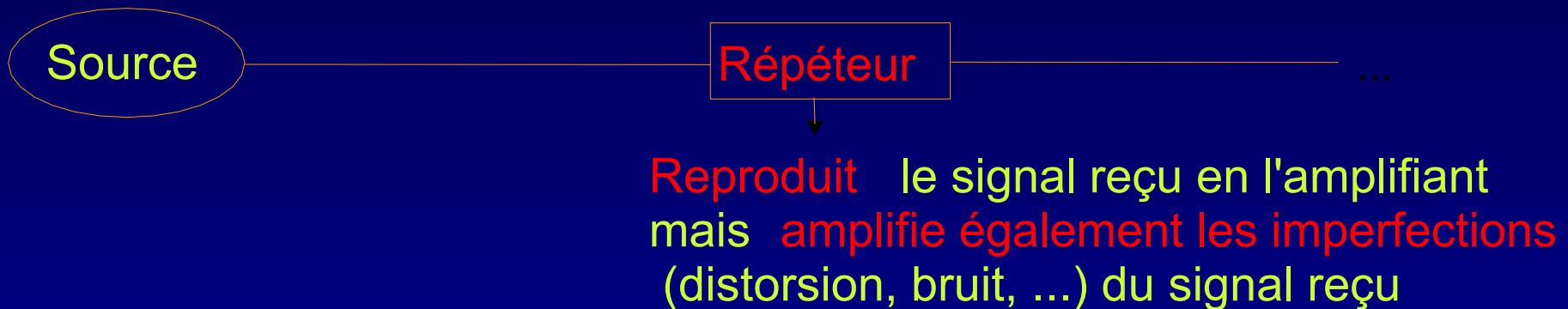
Question

- Typiquement, le débit d'un canal T (4KHz) est limité à 3.4 kbps à cause du bruit. Cependant, en utilisant des signaux à niveaux multiples, on peut atteindre des débits plus grands.
 - Calculer le nombre de niveaux de signal nécessaire pour atteindre le *débit maximum* pour ce canal avec un bruit de 30dB
 - Calculer la rapidité de modulation
 - En combien de temps on peut transmettre un caractère de 8 bits en utilisant le canal T
- Débit maximum = $H \cdot \log_2(1 + \text{signal/bruit})$ bits/sec
- Débit maximum : $2 \cdot H \cdot \log_2(V)$ bits par seconde

Comment régler le problème
d'atténuation?

Transmission d'un signal

Transmission analogique



Transmission digitale

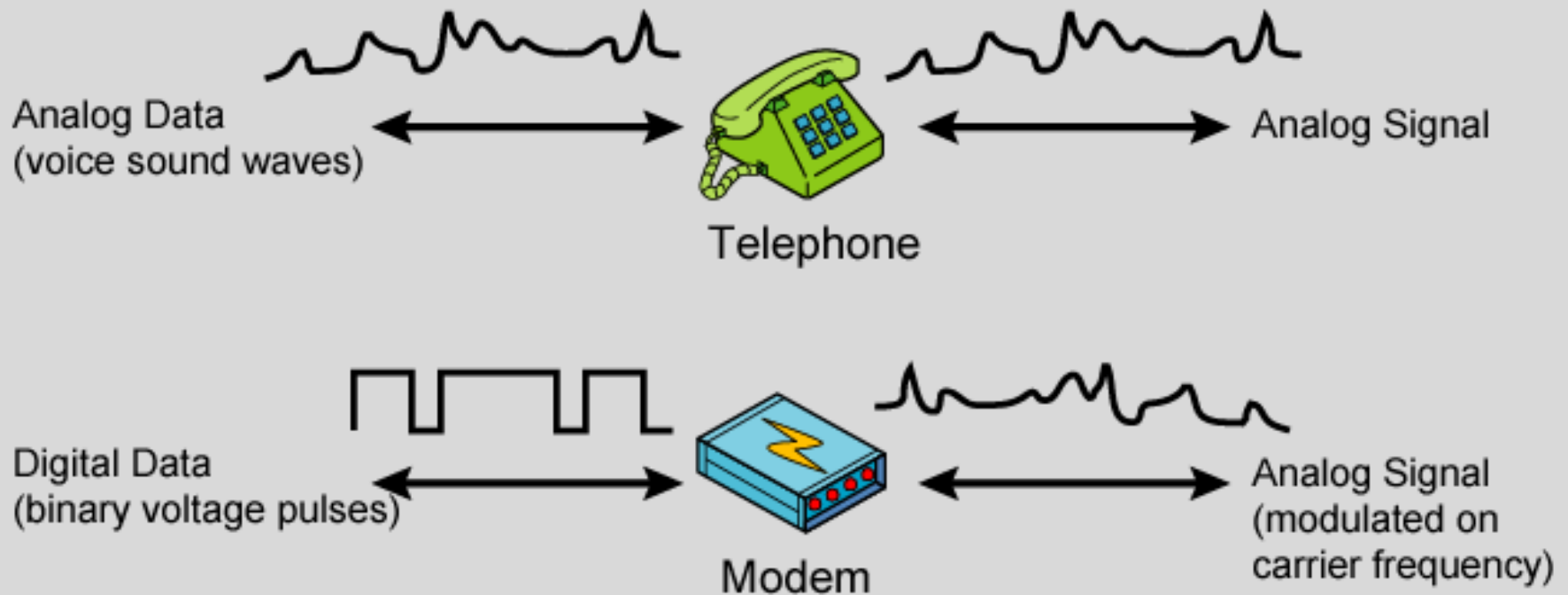


Transmission d'un signal (cont.)

- Généralement, utiliser signaux digitaux pour les données digitales et signaux analogiques pour les données analogiques
- Peut utiliser signal analogique pour transmettre des données digitales
 - E.g., Modem
- Peut utiliser signal digital pour transmettre des données analogiques
 - E.g., voix

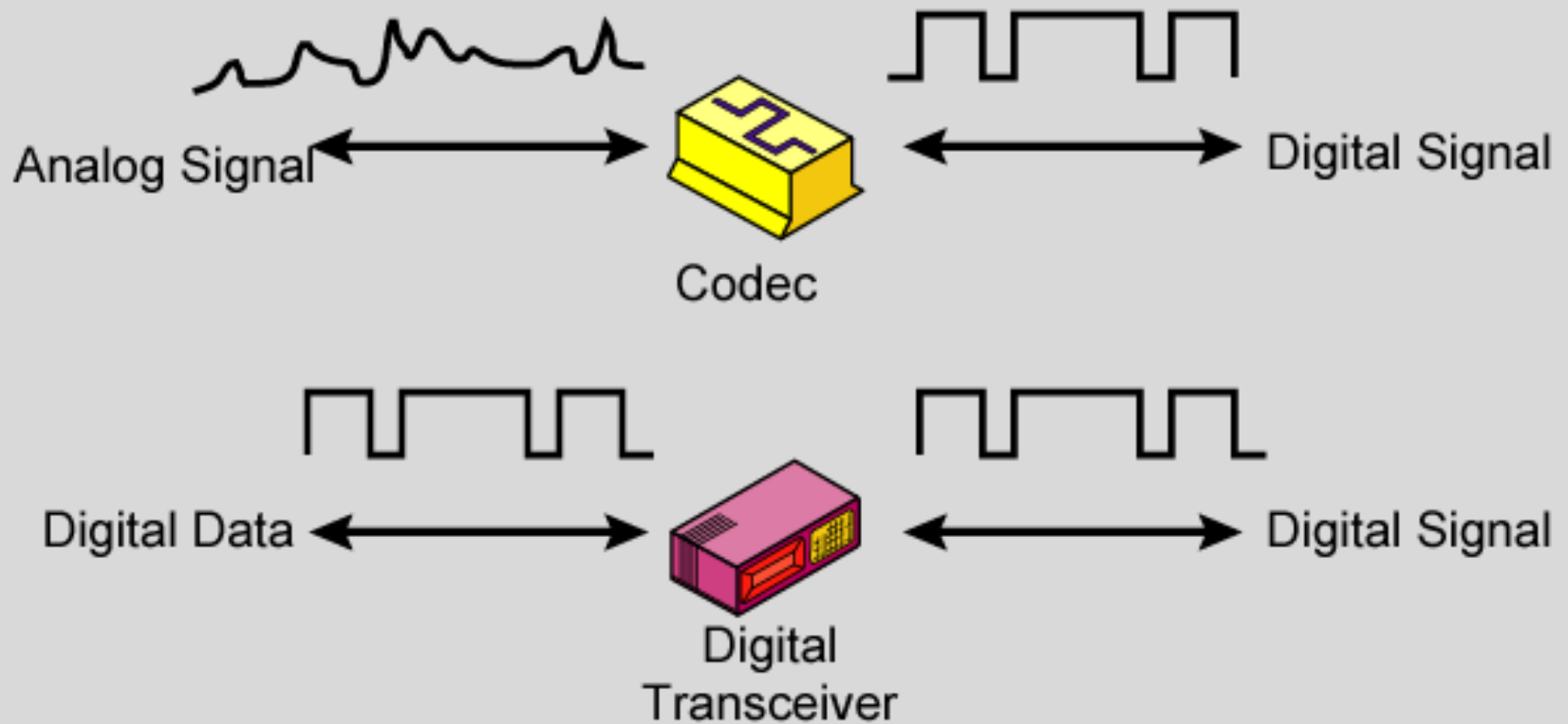
Transmission d'un signal (cont.)

Analog Signals: Represent data with continuously varying electromagnetic wave



Transmission d'un signal (cont.)

Digital Signals: Represent data with sequence of voltage pulses



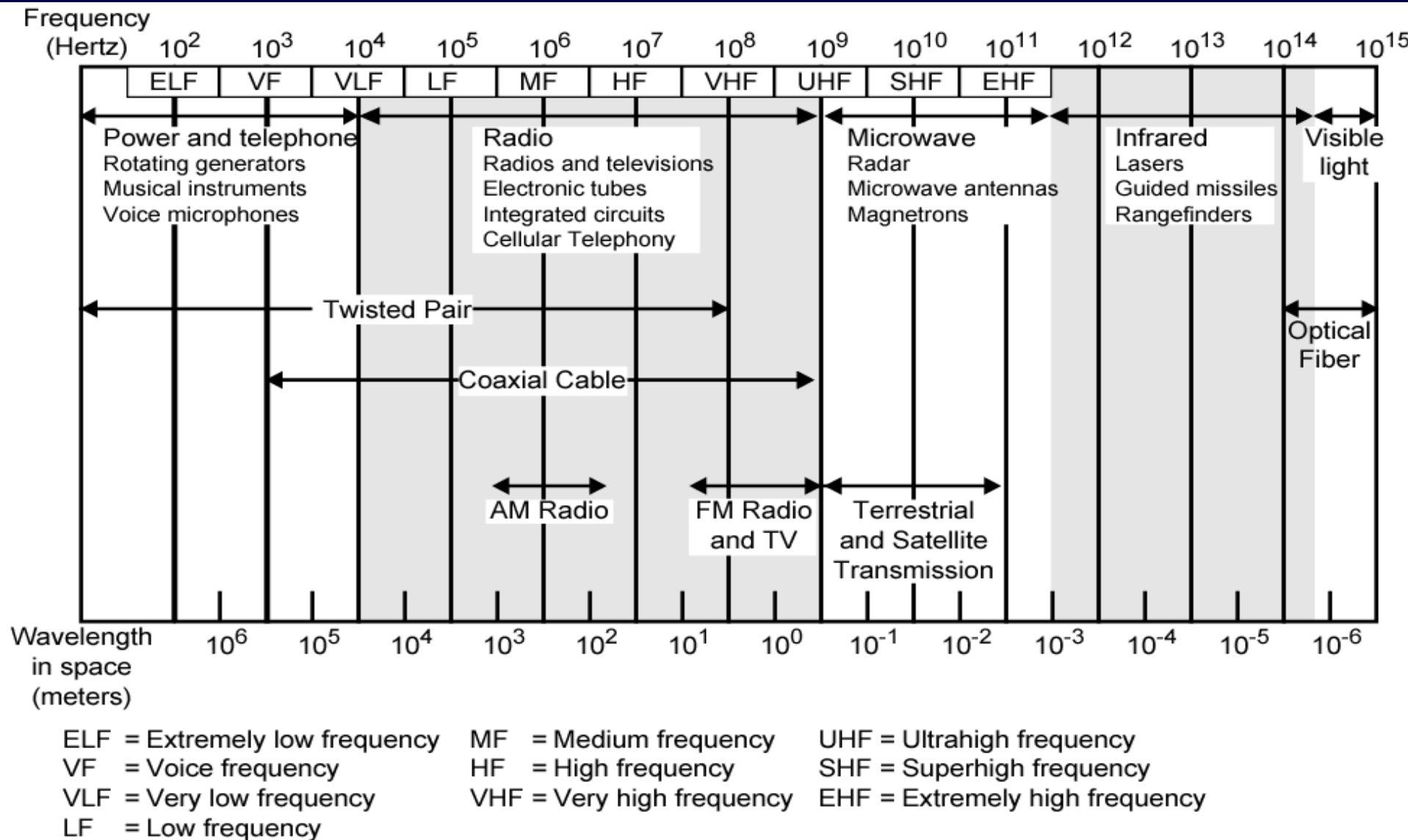
Transmission Analogique

- Signal analogue est transmis sans tenir compte du contenu
- La transmission peut être pour des données digitales ou analogiques
- Atténuation avec la distance
- On utilise des amplificateurs pour contrer l'atténuation
- Amplificateurs amplifient aussi le bruit!

Transmission Digitale

- Tient compte du contenu
- Bruit, atténuation, etc. peuvent causer la corruption des données
- Répéteurs sont utilisés pour contrer bruit, atténuation, etc.
 - Répéteurs reçoivent le signal
 - Régénèrent les données digitales (bits)
 - Retransmettent le signal
- Le problème d'atténuation est résolu
 - si répéteurs sont placés à des distances adéquates
- Le bruit n'est pas amplifié mais éliminé

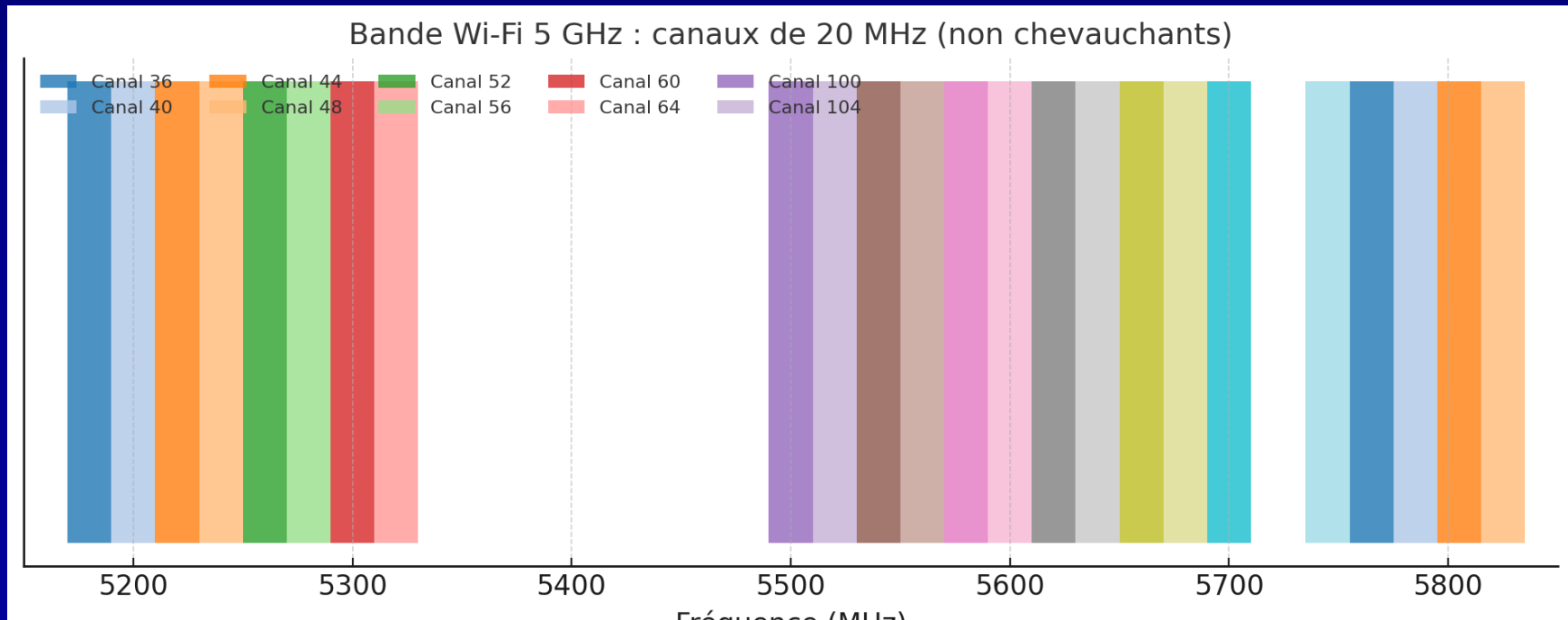
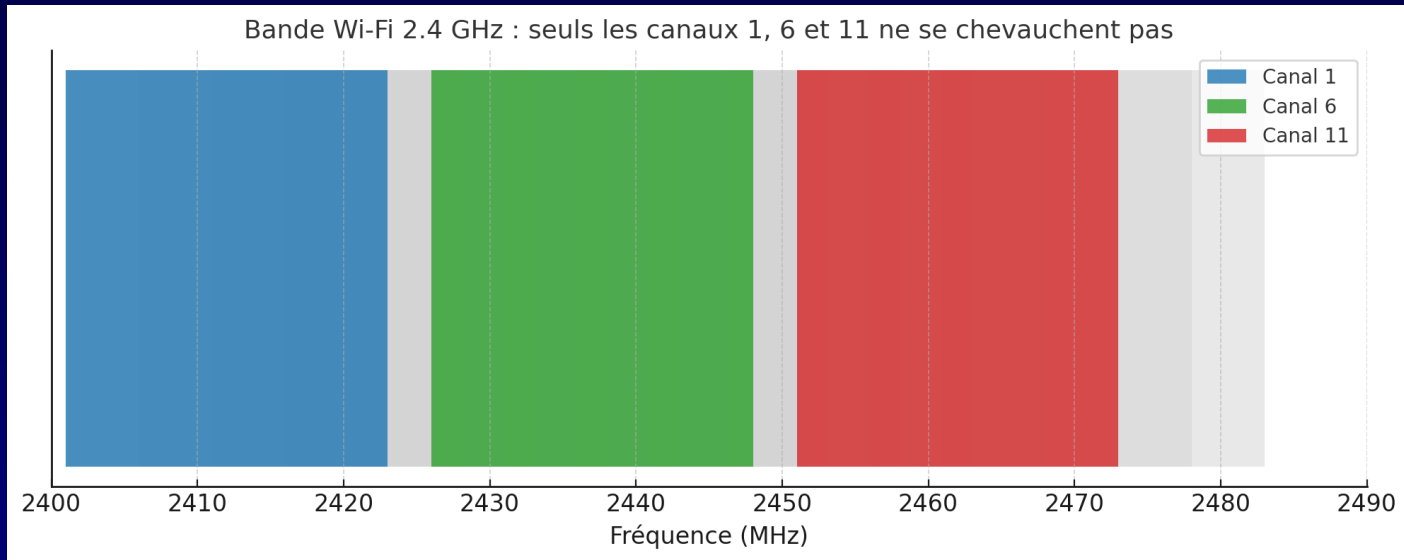
Spectre Électromagnétique (1)



Spectre Électromagnétique (2)

- **Plus la fréquence d'une onde électromagnétique est élevée, plus sa longueur d'onde est courte. Les ondes à haute fréquence transportent davantage d'informations, mais elles se propagent moins loin et traversent difficilement les obstacles.**
 - Les matériaux de construction (béton, briques, métal) absorbent davantage les hautes fréquences.
 - perdent plus vite de l'énergie en traversant les murs.
- **À l'inverse, les basses fréquences se propagent plus loin et pénètrent mieux les matériaux**
- **WIFI**
 - **2.4 GHz** : meilleure portée et pénétration à travers les murs, mais moins de bande passante disponible → débits plus faibles.
 - ~2.400–2.483 GHz (≈ 83)
 - **5/6 GHz** : débits beaucoup plus élevés (plus de canaux disponibles), mais portée plus courte et pénétration limitée.
 - ~5.150–5.825 GHz (≈ 500 –700 MHz)

Spectre Électromagnétique (3)



Réponse

- Cause principale de l'absence de signal dans les ascenseurs = effet de cage de Faraday
 - les parois métalliques bloquent les signaux externes
- Effet additionnel si un faible signal parvient à pénétrer = évanouissement sélectif (multipath fading), qui rend la connexion instable
 - barres de signal qui montent et descendent, appels qui se coupent brusquement).

Paires Torsadées

- Separately insulated
- Twisted together
- Often "bundled" into cables
- Usually installed in building during construction

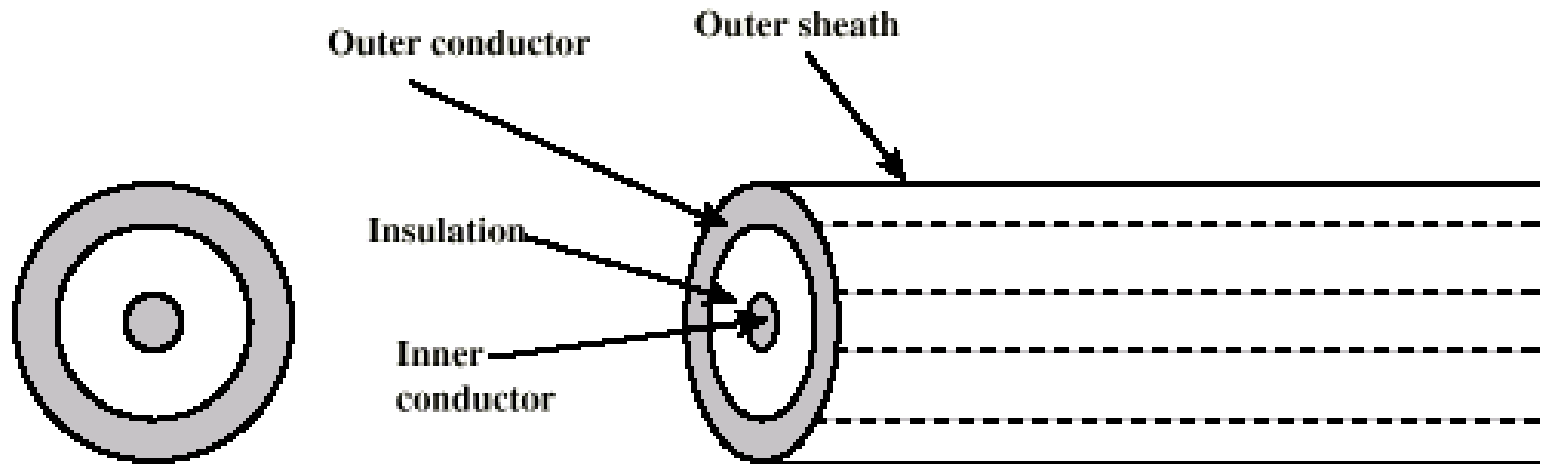


(a) Twisted pair

Paires Torsadées

- Unshielded Twisted Pair (catégorie 3 - catégorie 5) plusieurs Mbits/sec sur plusieurs kilomètres
 - Autres catégories: 5E, 6, et 7
- Très populaire (câblage universel)
- Réseau téléphonique
 - Entre le client et l'échangeur local
- Pour les réseaux locaux (LAN)
- Vitesse: de 100 Mbps (Cat5) à 10Gb (Ethernet, Gigabit Ethernet)
- Caractéristiques
 - Pas coûteux; Facile à travailler avec; Distance courte; Débit pas grand, plus sensible aux interférences et au bruit
- Transmission de données
 - Analogique
 - » Amplificateur chaque 5km à 6km
 - Digitale
 - » Utilise les signaux analogiques ou digitaux
 - » Répéteur chaque 100 mètres (Cat 6)

Câbles Coaxiaux

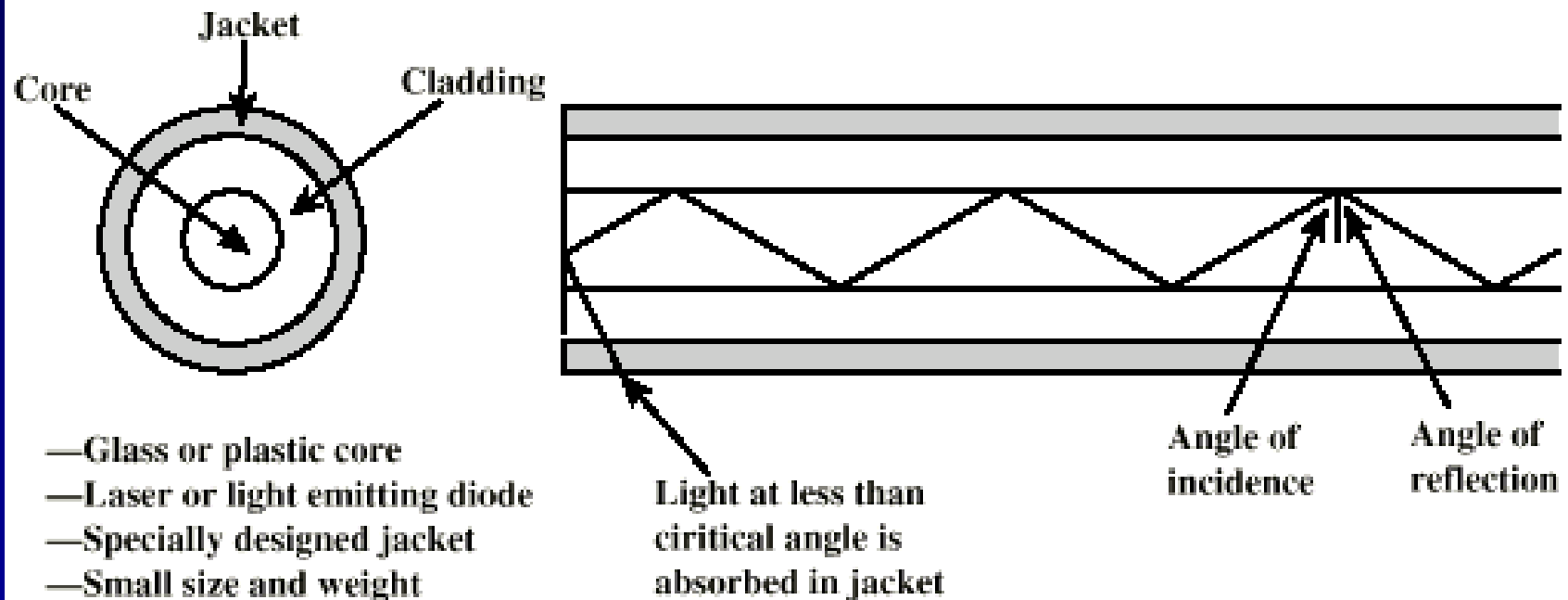


- Outer conductor is braided shield
- Inner conductor is solid metal
- Separated by insulating material
- Covered by padding

Câbles Coaxiaux

- Le support le plus versatile
 - bande de base (baseband), large bande (broadband)
 - Généralement baseband utilisé pour transmission digitale et broadband pour transmission analogique
- Large bande
 - Jusqu'à 500MHz
 - Divisés en canaux de 6 Mhz utilisés généralement pour la télévision
 - Amplificateur chaque qcq km
- bande de base
 - Peut transmettre 1-2 Gbps sur des distances courtes (1 km)

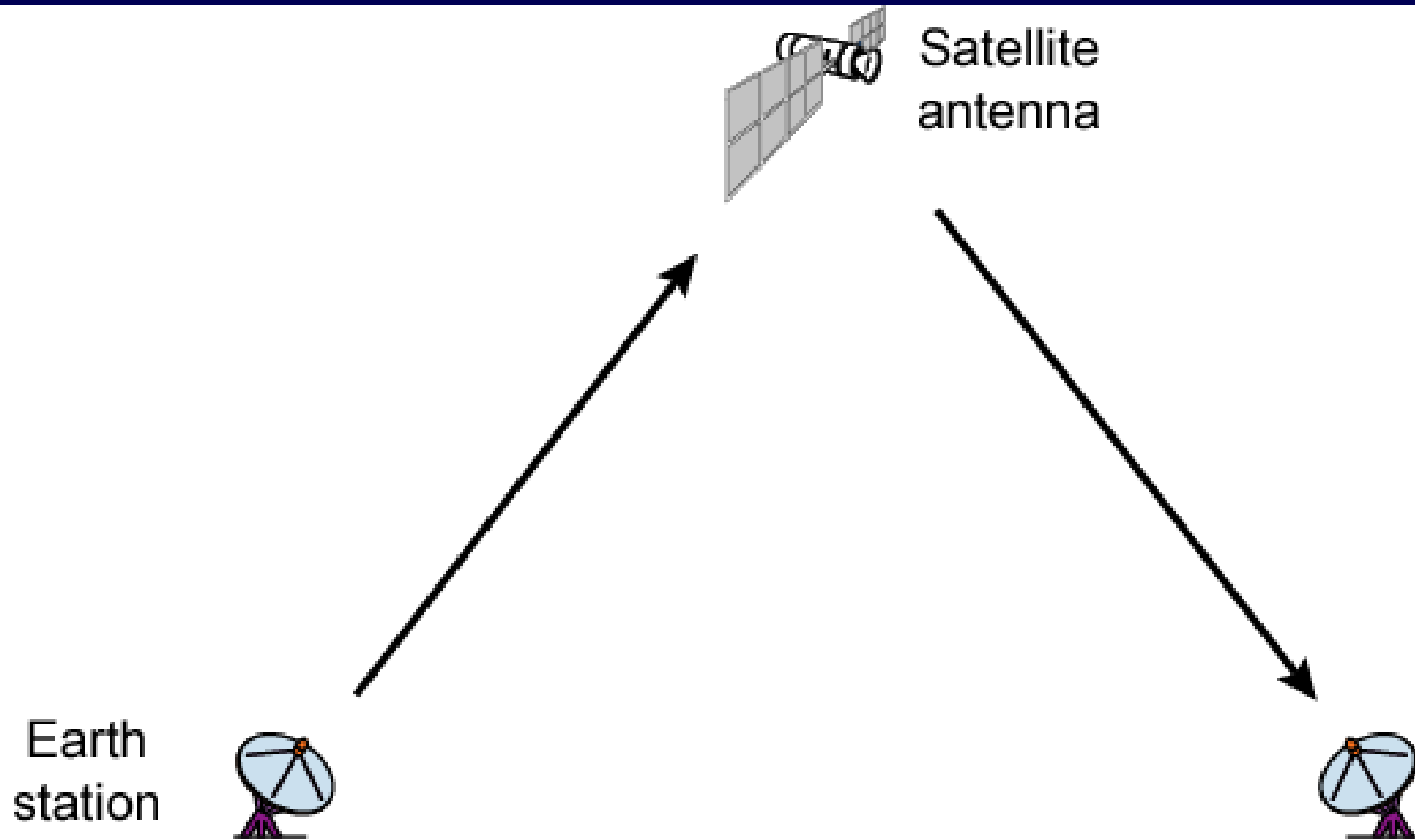
Fibre Optique



Fibre Optique

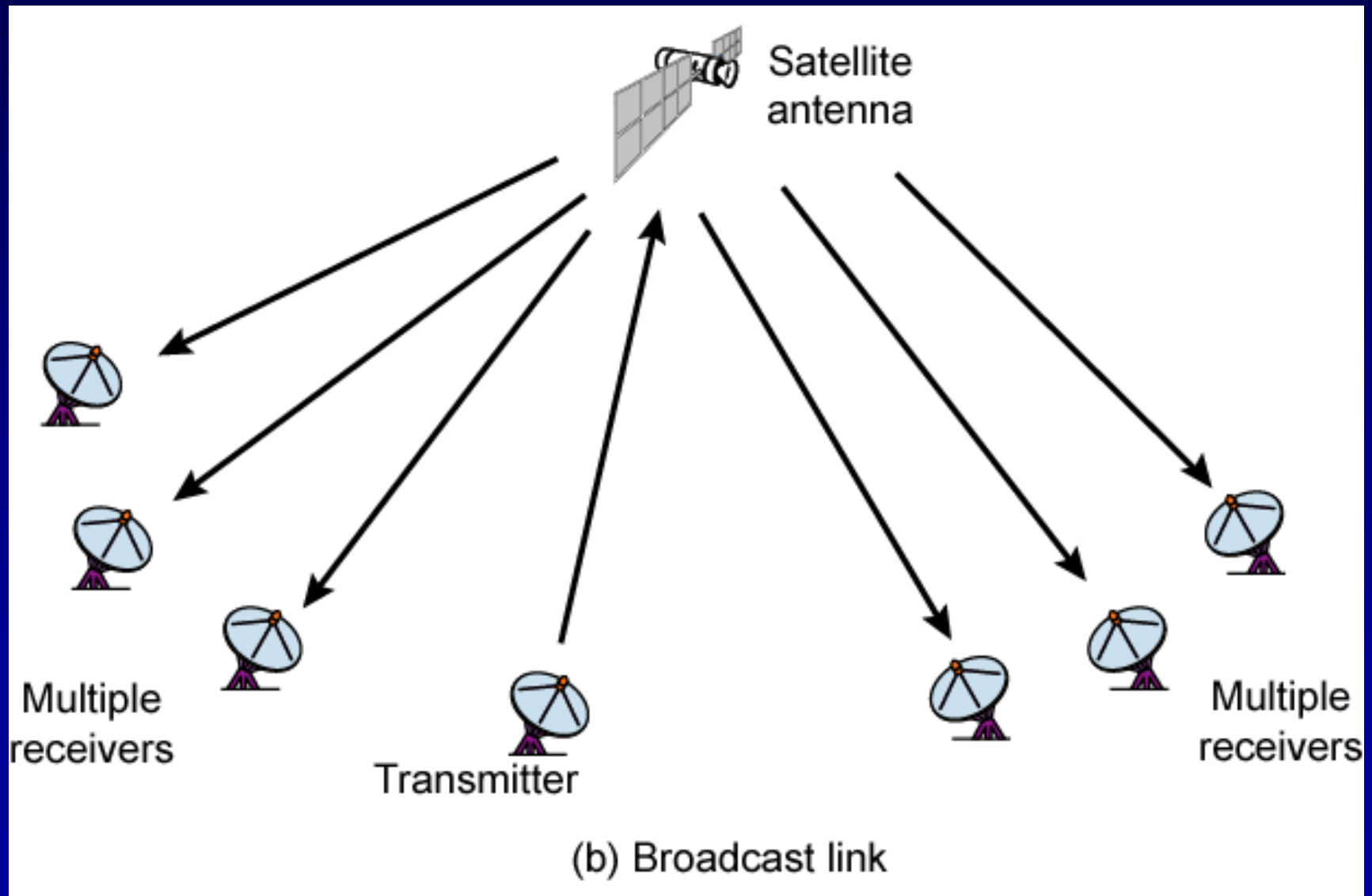
- Transmission basée sur réflexion totale.
- Capacité de 1 Gbits/sec ... 100s de Gbits/sec
- Taille et poids plus petit
- Moins d'atténuation
- Isolation électromagnétique
- Répéteur chaque 10s de Km
- Utilisées pour les liens longue distance et les liens à haute vitesse (e.g., WAN)
- Source de lumière - canal de réception - détecteur
 - Source laser : haute vitesse, monomode (parfois multimode), longue distance(plusieurs Gbits/sec sur 30 km), coûteuse, sensible à la température, courte durée de vie.
 - Light Emitting Diode : basse vitesse, multimode, courte distance, bon marché, peu sensible à la température, longue durée de vie.

Satellite: Lien Point-à-Point



(a) Point-to-point link

Satellite: Lien à Diffusion

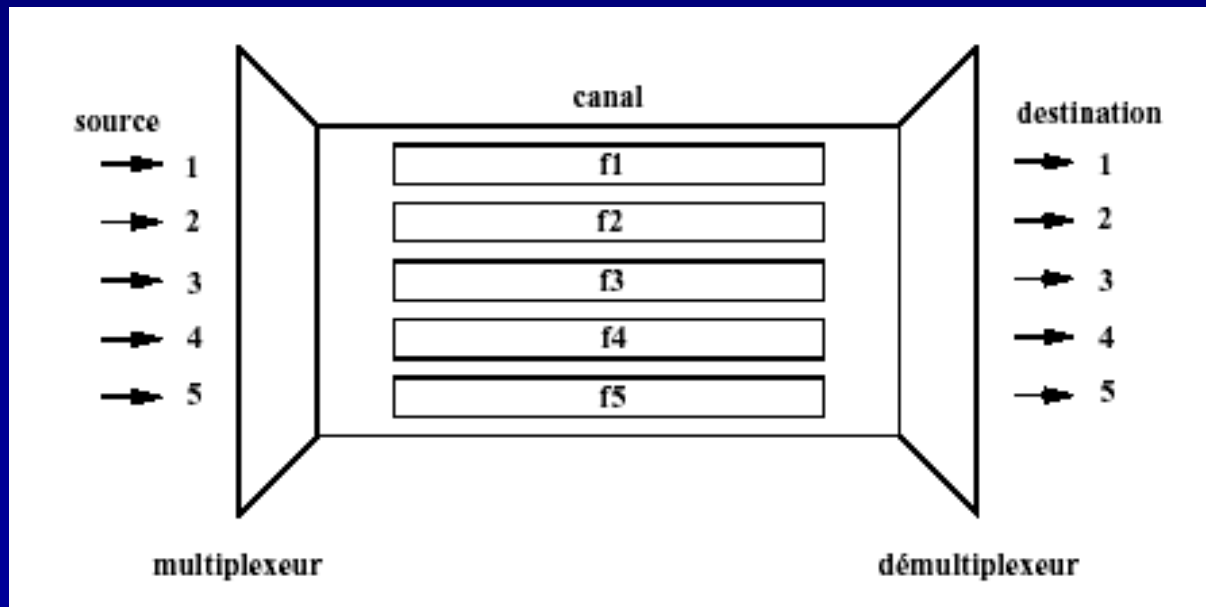


Multiplexage

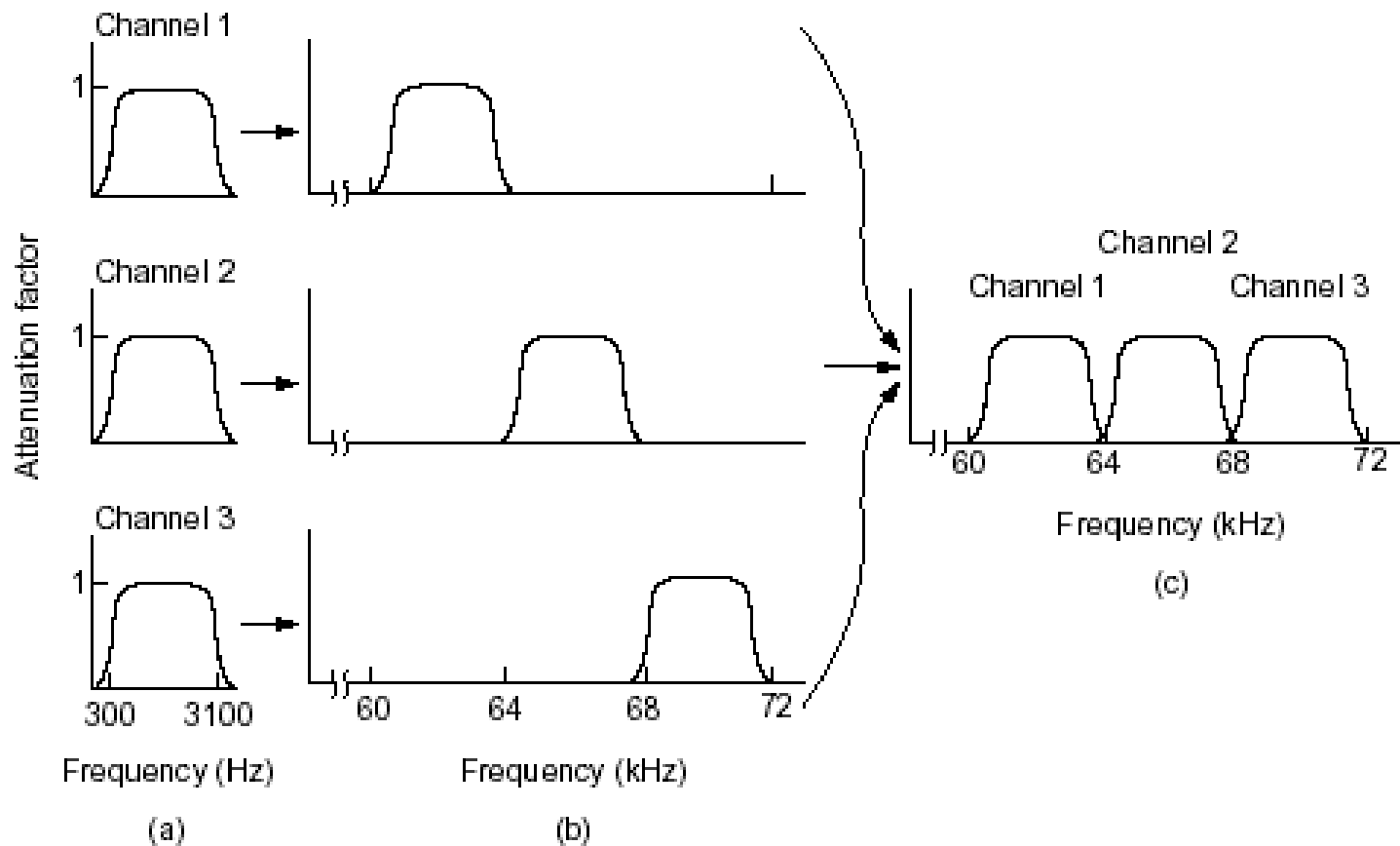
- Objectif
 - Transmettre plusieurs signaux sur un seul canal de transmission
- Multiplexage analogique
 - Multiplexage fréquentiel (FDM)
 - Réseau téléphonique
 - Télédistribution
 - Fibres optiques
 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)
- Multiplexage temporel

Multiplexage en Fréquence

- Le multiplexage en fréquence (*FDM: Frequency Division Multiplexing*) consiste à partager la bande de fréquence disponible en différents canaux à bande plus étroite et à mettre à la disposition d'un utilisateur de façon exclusive chacun de ces canaux.



Multiplexage en Fréquence (Cont.)

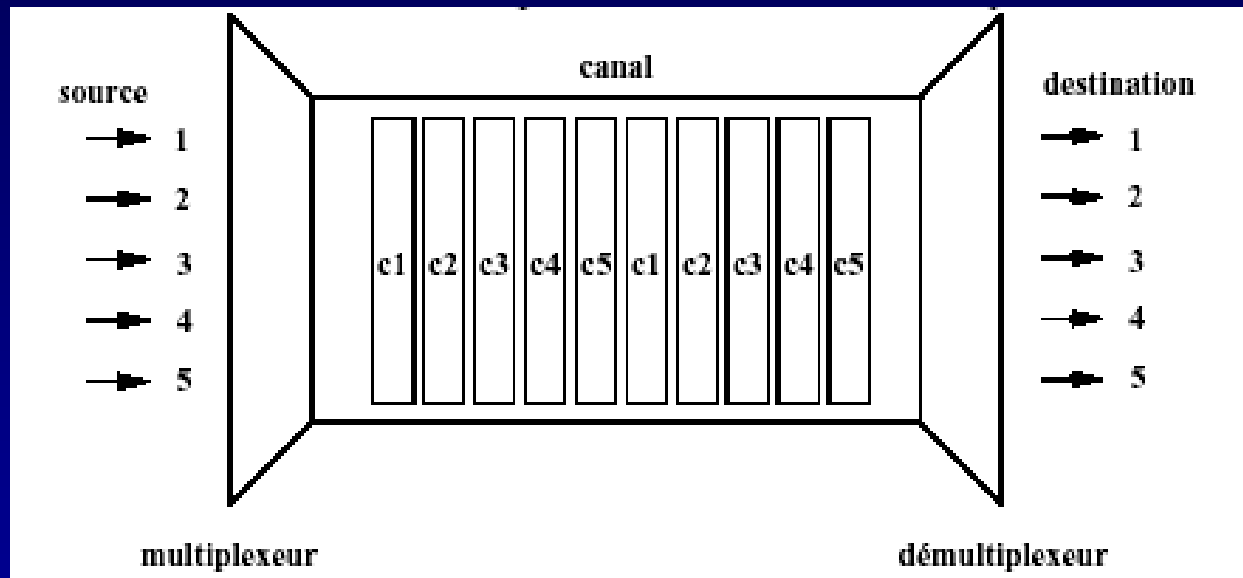


Multiplexage Temporel (Synchrone)

- ?

Multiplexage Temporel (Synchrone)

- Le multiplexage temporel (*TDM: Time Division Multiplexing*) synchrone assigne à chaque utilisateur la totalité de la capacité de transmission pour un court instant



- Problème?

Multiplexage Temporel (Cont.)

- Multiplexage temporel asynchrone,
 - on assigne la capacité de transmission de façon dynamique (*multiplexage temporel statistique*).
- Le multiplexage statistique (asynchrone) utilise le fait que la capacité de la ligne de sortie ne doit pas nécessairement être égal à la somme des capacités de la ligne d'entrée (à ajuster).
- Le prix à payer?

Multiplexage Temporel (Cont.)

- Le prix à payer est de :
 - associer un identificateur à chaque unité d'information transférée;
 - prévoir des buffers capables d'absorber les pics éventuels (au moment où la ligne de sortie ne suit pas).
- Le multiplexage temporel ne peut être appliqué que dans le cas de la transmission numérique
 - Les signaux analogiques sont transformés en informations numériques (7 ou 8 bits) par un **codec**.

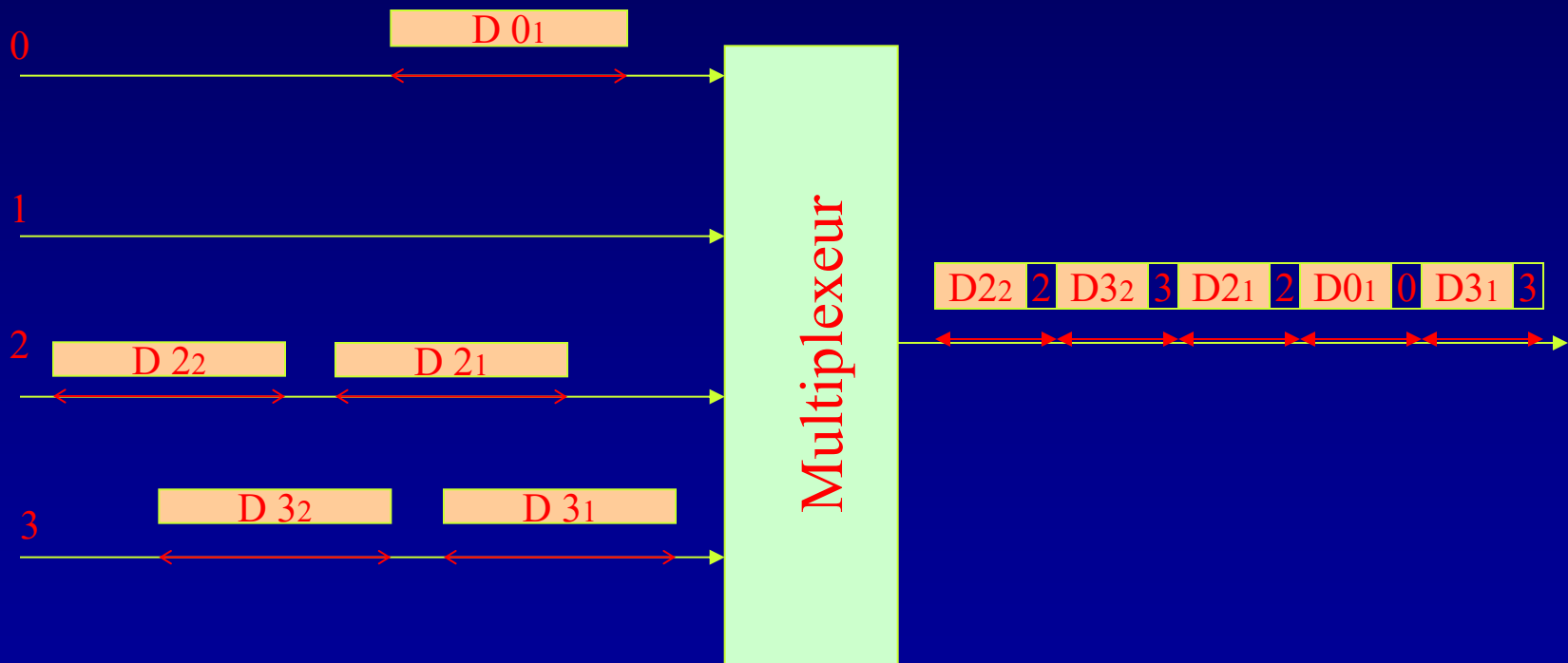
Problème

- Un système de multiplexage par division de temps (TDM) prend en charge 8 canaux de communication. Chaque canal nécessite 100 kbps. Quelle doit être la capacité totale du système ?

Réponse

- La capacité totale du système est donnée par
 - *Capacité totale* = nombre de canaux ×
débit par canal = 8 canaux × 100 kbps = 800 kbps.

Multiplexage statistique - exemple



Conclusion

- Un signal $s(t)$ peut s'écrire sous la forme d'une somme (qui peut être infinie) de signaux périodiques (les harmoniques) sinusoïdaux et cosinusoidaux
 - La fréquence de chaque signal périodique est un multiple entier de la fréquence f du signal $s(t)$
 - Théorème de Fourier
- Bande passante d'un signal est généralement calculée en utilisant seulement un sous-ensemble de fréquences qui contiennent la majeure partie (énergie) du signal
 - C'est pas pratique (et pas nécessaire) de transmettre toutes les fréquences
- Un canal de transmission ne transmet que certaines plages de fréquence
 - Bande passante d'un canal de transmission est limitée
 - Étant donnée un signal, ses fréquences (harmoniques) supérieure à la bande passante du canal ne seront pas transmises par le canal
- Débit maximum d'un canal parfait est $2 \cdot H \cdot \log_2(V)$ bits par seconde
 - H : largeur de bande en Hz; V : nombre de niveaux du signal
 - Théorème de Nyquist

Conclusion (Cont.)

- Débit maximum d'un canal imparfait est $H \cdot \log_2(1 + \text{signal/bruit})$ bits/sec
 - H: largeur de bande en Hz;
 - Théorème de Shannon
- Rapidité de modulation (Baud)
 - nombre de changements du signal par seconde
- Bits par seconde
 - nombre de bits transmis par seconde
- Multiplexage permet de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal de transmission
 - Multiplexage en fréquence Vs. Multiplexage temporel
 - Multiplexage temporel peut être utilisé seulement pour la transmission numérique