

RÉSEAUX

Anthony Busson

Plan

- Partie 1: Télécoms
 - Signal analogique - Définition d'un signal
 - Définition d'un signal complexe - Spectre d'un signal
 - Les supports et leurs propriétés
 - Transmission Analogique/Numérique
 - Intérêt de la transmission numérique
 - Transmission numérique: échantillonnage – codage
 - Transmission en bande de base
 - Transmission numérique: modulations complexes
 - OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).
- Partie 2: Architecture
 - Architecture d'un réseau
 - Réseau Téléphonique / ADSL
 - Multiplexage

PARTIE 1

Principes de transmission analogiques/numériques

1.1

Signal analogique
Définition d'un signal

Signal analogique

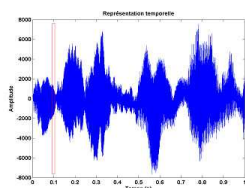
Définition: Un signal analogique est un signal qui varie de manière continue au cours du temps.

Il est souvent associé à la mesure d'un phénomène physique, évoluant de manière **analogue**.

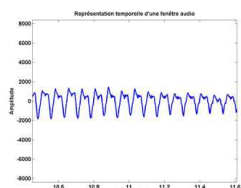
- Exemples:
 - Températures
 - Amplitude électrique
 - Pression de l'air (météorologie, sons, etc.)
 - Champ électromagnétique

Exemple: le son

- Vibration de l'air
- Changement de la pression de l'air en fonction du temps



Portion de 1 seconde de l'œuvre « Paritta n° 3 » de J.C. Bach en représentation temporelle du signal.



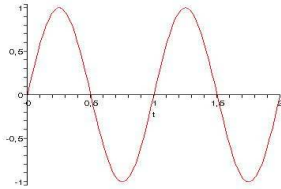
Extrait de 20 millisecondes de la portion de l'œuvre « Paritta n° 3 » de J.C. Bach en représentation temporelle du signal.

Source: https://interstices.inrp/jms/c_34530/le-tatouage-de-son

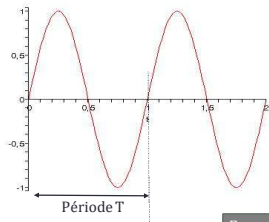
Nature et définition d'un signal

- Une onde simple peut être représenté au travers d'une fonction sinusoïdale

$$\text{signal}(x) = \sin(2\pi x)$$



Vocabulaire : période et fréquence



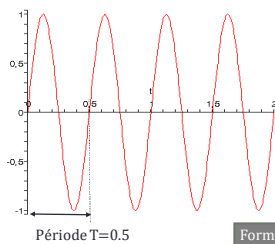
$$\text{Signal}(t) = \sin(2\pi \cdot t)$$

$$\text{Fréquence } f = 1/T$$
$$f = 1.$$

Formule générale: $\text{signal}(t) = \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

Dans cet exemple: $\text{signal}(t) = \sin(2\pi \cdot t)$

Vocabulaire: période et fréquence

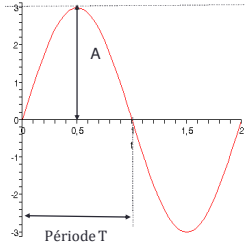


$$\text{Fréquence } f = 1/T$$
$$f = 2.$$

Formule générale: $\text{signal}(t) = \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

Dans cet exemple: $\text{signal}(t) = \sin(4\pi \cdot t)$

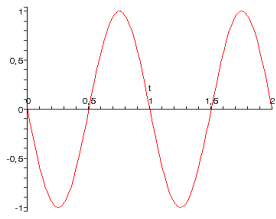
Vocabulaire: amplitude



Amplitude.
Amplitude $A = 3$

Formule générale: $\text{signal}(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$
Dans cet exemple: $\text{signal}(t) = 3 \cdot \sin(\pi \cdot t)$

Vocabulaire: phase

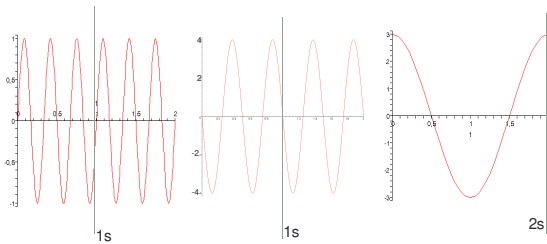


Amplitude $A = 1$
Fréquence $f = 1$
Phase $= \pi$

Formule générale: $\text{signal}(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$
Dans cet exemple: $\text{signal}(t) = \sin(2\pi \cdot t + \pi)$

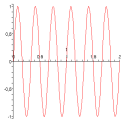
Exemples 1.1.1

- Trouvez la valeur des fréquences, des périodes, des amplitudes et des phases pour les signaux suivants.

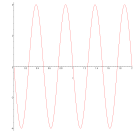


Correction 1.1.1

- Trouvez la valeur des fréquences, des amplitudes et des phases pour les signaux suivants.



Amplitude 1
Fréquence 3
Phase 0
 $S(t) = \sin(6 \cdot \pi \cdot t)$



Amplitude 4
Fréquence 2
Phase π
 $S(t) = 4 \sin(4 \cdot \pi \cdot t + \pi)$



Amplitude 3
Fréquence 1/2
Phase $\pi/2$
 $S(t) = 3 \sin(\pi \cdot t + \pi/2)$

Exemples 1.1.2

- Tracer les signaux sur $[0, 1$ ou $2]$ avec les propriétés suivantes:
 - $f=3 - A=2 - \varphi=3\pi/2$
 - $f=1 - A=1 - \varphi=-\pi$

Unité

- Fréquence
 - Hertz (nombre de périodes par seconde)
- Amplitude
 - Volt (électrique)
 - Pascal/Bar (pression de l'air – sons)
 - Volt/m (Champs électromagnétique – Radio)
 - Mètre (Corde vibrante: Violon / Guitare / Basse)
- Puissance
 - Watt
 - dB ou dBm

Puissance exprimée en dB ou dBm

- La relation avec la puissance est souvent logarithmique
- Exemple le son:
 - 1 mobylette = X Watt/m²
 - 5 mobylettes = 5 X Watt/m²
 - Le ressenti n'est pas 5 fois supérieure
 - Les petites variations d'amplitudes ne sont pas détectés à forte amplitude (la voix)
- Utilisation d'une unité logarithmique: le décibel.

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(P_W)$$

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(P_W / P_0)$$

dB: exemples

- 1 mobylette : 50 dB
- 5 Mobylettes : 77 dB
- Ecouteur (à fond) : 100 dB
- 1 avion: 130 dB
- Seuil de la douleur : 110-120 dB
- Puissance d'émission
 - Wi-Fi: -10 dB (100mW)
 - ADSL: 7-10 dB (5-10W)
 - Emetteur TV : 60 dB (1MW)



Exemple 1.1.3

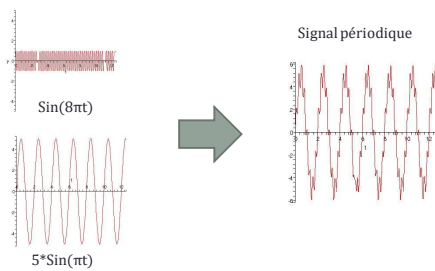
- Conversion:
 1. Donnez la formule permettant de convertir du dB à une puissance linéaire (W)
 2. Convertissez 100 W en dB
 3. Quelle est l'atténuation en dB si, pour un support donné, la puissance d'émission est de 100 W et la puissance en réception de 10W
 4. Convertissez 100mW en dBm
 5. Donnez la formule:
 - a) mW -> dBm
 - b) dBm -> mW
 - c) dBm -> W
 - d) dB -> mW

1.2

Définition d'un signal complexe
Spectre d'un signal

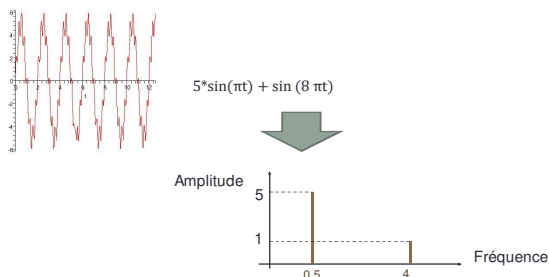
Signal complexe

- Les signaux complexes sont la somme de signaux sinusoïdaux de fréquences, d'amplitudes ou de phases différentes.



Spectre d'un signal

Définition: Le spectre du signal est la représentation des amplitudes des différentes composantes du signal en fonction de la fréquence.

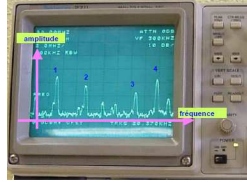


Exemple 1.2.1

• La radio FM

- 1: France Musique 91,2MHz
- 2: France Inter 95,7 MHz
- 3: Radio France alsace 102,4MHz
- 4: France Info 105,7 MHz

Le spectre montre des pics d'amplitude correspondant aux fréquences d'émissions des radios.



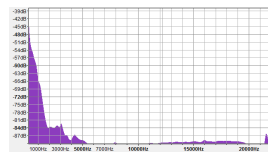
Source: cours d'analyse spectrale de Jean - Philippe Muller.

Exemple 1.2.2

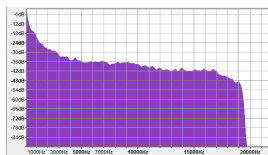
• La voix/musique



Ma voix



Get Lucky (Daft Punk)



Stocker un signal analogique

• Support qui doit permettre de restituer la suite continue de valeurs:

- Vinyle: la profondeur et largeur des sillons correspondent à l'amplitude et fréquence du signal
- Bande magnétique (cassette)
- Pellicule/Film photographique
- Etc.



• Inconvénient de ces supports

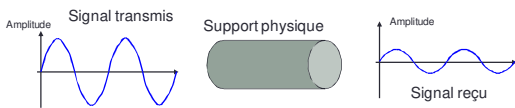
- Dégradation dans le temps
- Dégradation en fonction de l'usage
- Copie (qui peuvent être) imparfaite

1.3

Les supports et leurs propriétés

Transmission d'un signal sur un support

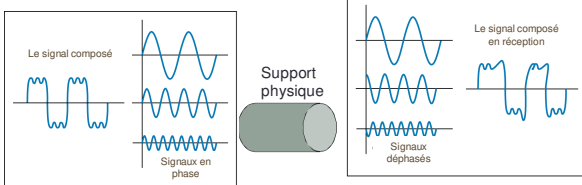
• Lors de la transmission d'un signal sur un support physique plusieurs phénomènes viennent l'altérer.



Atténuation: le support physique agit comme une résistance. Une partie de l'énergie du signal transmis est dispersé dans le médium. Le signal reçu à une amplitude plus faible.

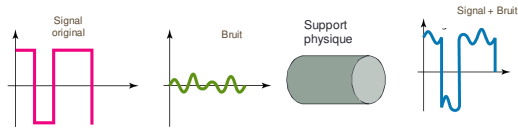
hina.com

Transmission d'un signal sur un support (2)



Distorsion: les composants d'un signal composé (de plusieurs fréquences) subissent des délais différents. Les phases des composantes en réception sont décalés.

Transmission d'un signal sur un support (3)



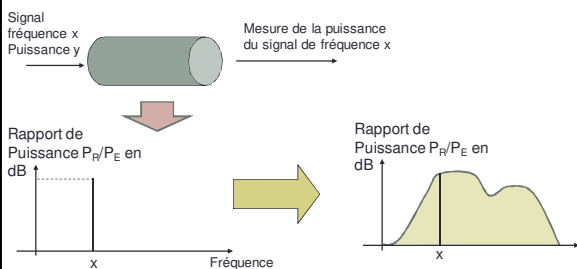
Bruit: perturbation naturelle du milieu. Par exemple, bruit aléatoires des électrons sur un câble créer un signal supplémentaire.

Notion de bande passante

- Tous les signaux ne « passent » pas sur un support.
- Le support se comporte comme un filtre.
- Exemples:
 - Oreille humaine : 20Hz / 20kHz (sons audibles)
 - Oreille du chien : 15Hz – 30kHz
 - Enceinte : 30Hz – 40 kHz
 - Fil en cuivre: 10Hz – 2MHz
 - Etc.

Mesure de la bande passante

- Définition: quand est-ce qu'un signal « passe »?
- La bande passante est l'ensemble des fréquences pour lesquelles la réponse (le résultat en sortie) est supérieure à un certain niveau.
- Pour chaque fréquence on mesure l'amplitude en sortie.



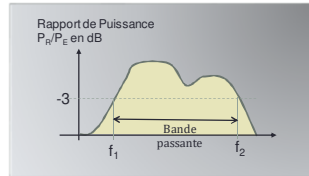
Seuil sur la bande passante

- Un seuil est fixé entre la puissance à l'émission et en réception (pour une fréquence donnée)
- Par exemple : -3dB

$$10 \log_{10}(P_{\text{réception}} / P_{\text{émission}}) > -3$$

$$10 \log_{10}(P_{\text{émission}} / P_{\text{réception}}) < 3$$

La bande passante est l'intervalle de fréquence [f1,f2] pour lesquelles l'équation ci-dessus est vérifiées.



Les seuils évoluent car les systèmes électroniques sont de plus en plus performants (ADSL par exemple).

Exemple 1.3.1

- Une série de mesure a été effectuée sur la boucle locale (câble du téléphone).



- La puissance d'émission est de 5W.
- Le résultat est décrit sur le tableau ci-dessous:

Fréquences (kHz)	Puissance reçu (W)
0,8	1,64
300	1,5e-4
750	1,65e-7
1000	1,15e-8
1300	7,10e-10
1600	5,94e-11
1900	6,22e-12
2200	7,73e-13

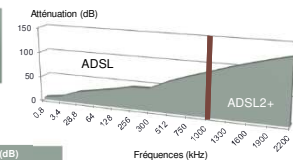
Questions:

1. Quelle est la bande passante à 128dB et 87dB?
2. La ligne est elle éligible pour l'ADSL sachant que la bande de fréquence utilisée est [0,1;1MHz] et le seuil de bande passante est 128dB?
3. Même question pour l'ADSL2+ avec une bande de [0,2;2MHz] et un seuil de 87dB.

Exemple 1.3.1: réponses

- Formule: atténuation=10*log10(PE/PR)

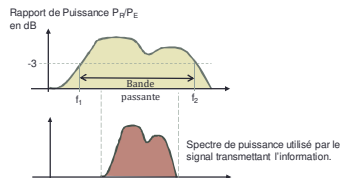
1. BP=[0,2;2MHz] et BP=[0,1;0MHz]
2. Éligible ADSL
3. Non éligible ADSL2+



Fréquences (kHz)	Puissance reçu (W)	Atténuation (dB)
0,8	1,64	4,8
300	1,5e-4	45,0
750	1,65e-7	74,8
1000	1,15e-8	86,4
1300	7,10e-10	98,5
1600	5,94e-11	109,0
1900	6,22e-12	119,0
2200	7,73e-13	128,0

Adéquation Spectre – Bande passante

- Les fréquences utilisées pour transmettre l'information ne doivent pas être filtrées.
- Le spectre du signal doit être inclus dans la bande passante du support.
- Exemple:
 - Voix: 50Hz ; 3 - 4 kHz (Spectre)
 - Boucle local du réseau téléphonique: [10Hz ; 1 - 2 MHz] (BP)
 - Oreille : 20Hz – 20kHz (BP)
 - Son : 50Hz – 20kHz (Spectre)
 - Enceinte : 30Hz – 40kHz (BP)



Les supports et leur bande passante

- Boucle locale: [0-1/2MHz]



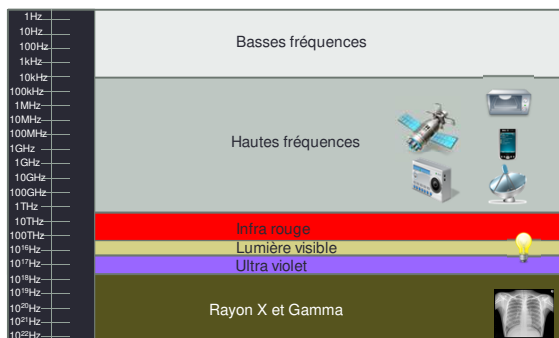
- Paire torsadé :
 - Catégorie 5 [0-100MHz]
 - Catégorie 6 [0-200MHz]



- Fibre optique: GHz - THz



Le champ électromagnétique



Débit théorique

- Le débit maximum d'un support de transmission dépend de la largeur de sa bande passante.
- Une estimation très grossière du débit maximum est donné par la formule de Shannon:

$$\text{Débit Max} = H \log_2 (1 + S/B)$$

H: bande passante

S: puissance du signal en réception (unité linéaire)

B: puissance du bruit

Idée reçue: le débit ne dépend pas de la vitesse de propagation de l'onde sur le médium. La raison pour laquelle la fibre optique offre des débits plus importants est du au fait que sa bande passante est supérieure à celle d'un câble électrique. La vitesse est d'ailleurs à peu près la même sur une fibre optique et sur un câble électrique (de l'ordre de 200 000km/s).

Exemple 1.3.2

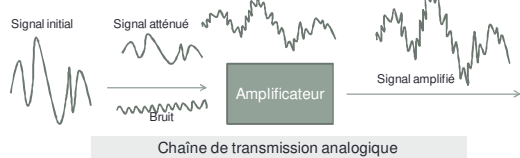
- Nous considérons une ligne de transmission.
- Le bruit est $1.0e-9$ Watt.
- Le signal en réception est de $7.0e-9$ W.
- La bande passante est [100Hz, 1MHz]
- Quel est le débit maximum théorique?

1.4

Transmission Analogique/Numérique
Intérêt de la transmission numérique

Transmission d'un signal analogique

- Une information/signal analogique peut être transmis directement sur le support
 - Si son spectre se trouve dans la bande passante
- Exemple : le son sur la boucle locale (téléphone)
- Inconvénients: $\text{Signal reçu} = \text{Signal atténué} + \text{bruit}$

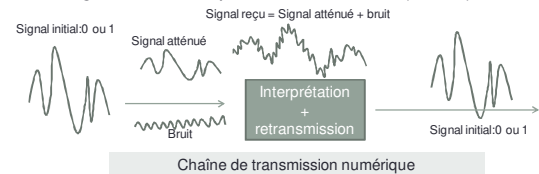


Chaîne de transmission analogique

L'atténuation du signal oblige l'utilisation d'amplificateurs. Ils amplifient l'amplitude du signal d'entrée. Lors d'une transmission analogique sur de longues distances, il peut y avoir plusieurs amplificateurs. Ceux-ci amplifient le signal et ses défauts: le bruit, la distorsion, etc. La réception finale peut alors être dégradée.

Intérêt de la transmission numérique

- L'information est binaire.
- La transmission numérique consiste en la transmission d'un signal dont l'interprétation est binaire (0 ou 1)



Chaîne de transmission numérique

Lors d'une transmission numérique, des motifs/signaux correspondent à des valeurs binaires (0 ou 1 pour le plus simple). Les relais décodent le signal (0 ou 1) et retransmettent le motif. Il n'y a donc pas d'amplification ni de dégradation de l'information. La seule erreur possible est l'ambiguïté sur un signal reçu (erreur binaire: un 0 a été interprété comme un 1 ou inversement).

Code détecteur et correcteur d'erreur

- L'information binaire peut être protégée.
- Utilisation de code détecteur d'erreurs.
 - Permettent de détecter les erreurs binaires
 - Exemple:
 - Ajout de la somme des valeurs en fin de transmission
 - Checksum: somme des compléments à 1
 - CRC: code plus élaboré basé sur la division par un polynôme générateur
- Utilisation de code correcteur d'erreurs
 - Permettent de corriger les erreurs
 - Exemple:
 - Code de Hamming

Numérisation d'un signal analogique

- Les informations/signaux analogiques sont numérisés.
 - Meilleure performances de transmission
 - Facilité de stockage
- Exemples:
 - Voix sur le réseau téléphonique (numérisation à la volée): RTC, réseaux cellulaires (2G-4G)
 - Les sons et les images (MP3, MPEG 4, etc.)

Questions de cours / QCM

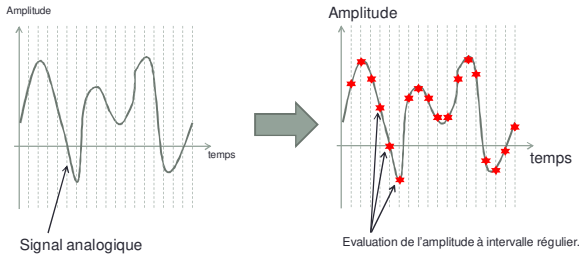
- Quels sont les défauts de la transmission analogiques?
- Le débit dépend de la Bande Passante et de la vitesse de propagation sur le support physique.
- Quels sont les intérêts de la transmission numérique? 3 réponses.

1.5

Transmission numérique:
échantillonnage - codage

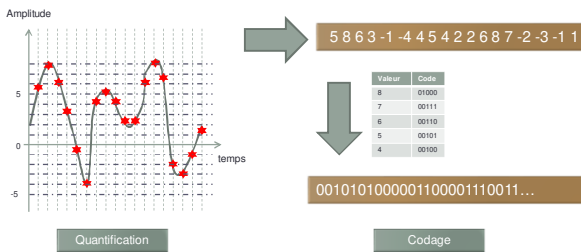
Principe de la numérisation

- Pour numériser un signal analogique, l'amplitude du signal est évalué à intervalle régulier.



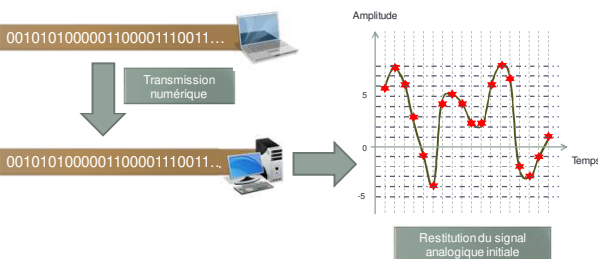
Principe de la numérisation

- Quantification: les valeurs d'amplitudes sont mesurés et comparer à une échelle discrète.
- Codage: codage en binaire des valeurs mesurés (par rapport à une échelle)



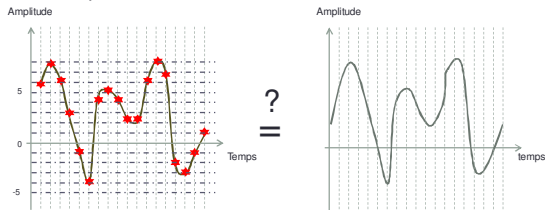
Transmission et restitution

- Quantification: les valeurs d'amplitudes sont codés par rapport à une échelle discrète.



Qualité de la numérisation

- La qualité de la numérisation dépend de deux facteurs:
 - Le nombre d'échantillons par seconde
 - La finesse de l'échelle
- Qualité arbitraire (aussi fine que l'on veut)
- Limité par le volume / débit

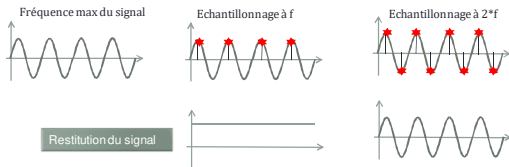


Echantillonnage et Théorème de Shannon

- La fréquence d'échantillonnage est le nombre de fois où le signal est évalué par seconde.

Théorème de Shannon:

Un signal de fréquence maximal f doit être échantillonné à une fréquence supérieure à $2 * f$.



Exemple 1.5.1

- Quelle doit être la fréquence d'échantillonnage d'un signal analogique dont le spectre est [10Hz, 1500Hz]?
- Quelle doit être la fréquence d'échantillonnage de la voix?
- Quelle doit être la fréquence d'échantillonnage d'une chanson / de la musique?
- Quel est le débit binaire pour ces deux numérisations sachant que les échelles sont de 256 valeurs (voix), et 512 valeurs (musique)?

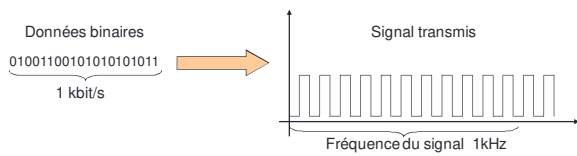


1.6

Transmission en bande de base

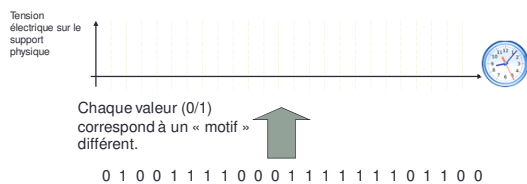
Transmission en bande de base

- La transmission est dite en bande de base si elle ne subit aucune transposition de fréquence.
- Vulgarisation: la fréquence du signal est un multiple du débit binaire.
- La valence du code est 2



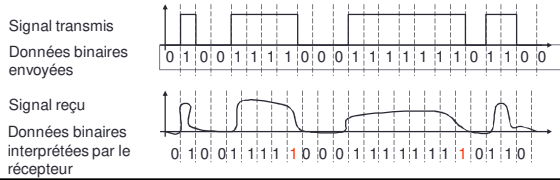
Transmission en bande de base

- Le temps est divisé en intervalle régulier
 - Utilisation d'une horloge
 - Jusqu'à 20 000 intervalles par seconde pour un port série RS 232
- Un bit (0/1) est émis dans chaque intervalle



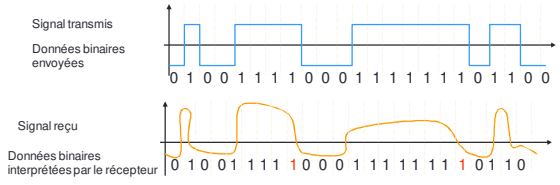
Exemple: un signal bande de base simple

- Signal bande de base le plus simple:
 - 0 V -> 0 binaire
 - 1 V -> 1 binaire
- A la réception on estime la tension à intervalle régulier.
- Problème de dérive l'horloge (si plusieurs 0 ou 1 consécutifs).
- Mauvaises propriétés électriques



NRZ: Non return to 0

- Signal bande de base simple:
 - +A Volts pour transmettre un 1
 - A Volts pour transmettre un 0
- Intérêt:
 - Amplitude du signal plus importante (2*A Volts) limitant les erreurs d'interprétation liées à l'atténuation du signal.
 - Détection de la présence du signal.
- Défaut:
 - Dérive d'horloge possible
- Exemple
 - V24 / RSR 232 (port série)



NRZI: Non return to 0 Inverse

- Transmission:
 - Transmission d'un 1: changement d'état à chaque milieu d'intervalle
 - Transmission d'un 0: aucun changement d'état, sauf si 6 zéros consécutifs alors insertion d'un 1.
- Intérêt:
 - Amplitude du signal plus importante (2*A Volts) limitant les erreurs d'interprétation liées à l'atténuation du signal.
 - Synchronisation régulière des horloges
 - A chaque front montant (si 1)
 - Tous les 6 intervalles (si plusieurs 0 consécutifs)
- Exemple
 - USB / Fast Ethernet (variante)

Transmission d'un 1: changement d'état à chaque milieu d'intervalle

Transmission d'un 0: aucun changement d'état, sauf si 6 zéros consécutifs alors insertion d'un 1.

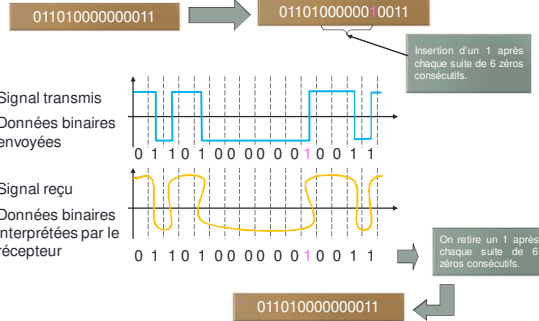
Exemple: transmission de 7 zéros (0000000)

0000000 → 00000010



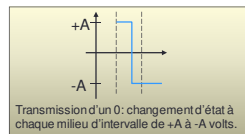
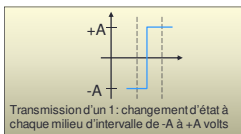
NRZI: Non return to 0 Inverse (2)

Exemple: transmission de la chaîne 01101000000011



Manchester

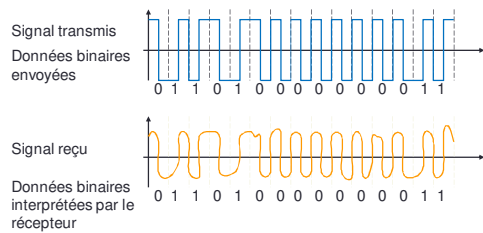
Transmission:



- Intérêt:
 - Amplitude du signal plus importante (2*A Volts) limitant les erreurs d'interprétation liées à l'atténuation du signal.
 - Synchronisation systématique des horloges; aucune dérive possible
- Exemple
 - Ethernet (Bus) / Token ring: ancienne technologie réseau

Manchester (2)

Exemple: transmission de la chaîne 01101000000011



Exemple 1.6.1

· Donnez les signaux en émission pour la suite binaire suivante:

0101100000001100011

· pour les modes de transmissions en bande de base suivant:

- NRZ
- NRZI
- Manchester

Exemple 1.6.2

· Donnez les avantages et inconvénients des modes de transmission suivants:

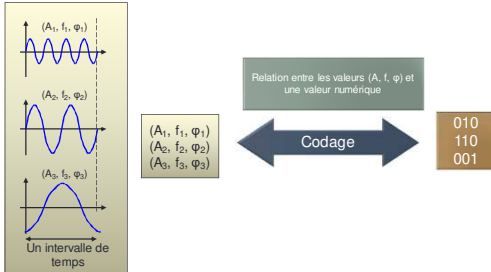
- NRZ
- NRZI
- Manchester

1.7

Transmission numérique: modulations complexes

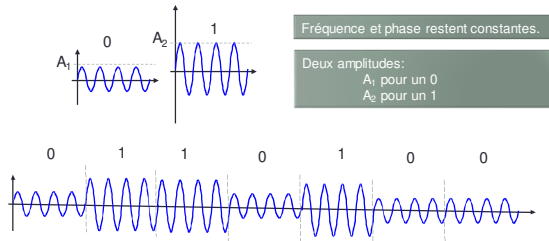
Modulation et codage

- Principe de base:
 - Le temps est divisé en intervalle de taille fixe
 - Le signal est modulé dans chaque intervalle



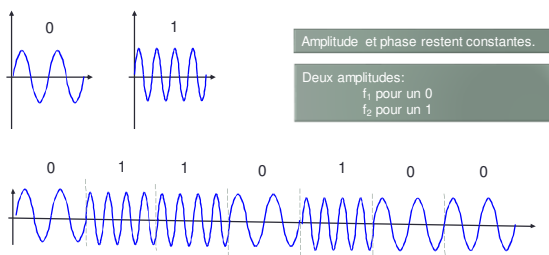
Modulation d'amplitude

- Une porteuse est transmise. Il s'agit d'une onde sinusoïdale de fréquence donnée.
- La valeur binaire est donnée au travers de l'amplitude crête.



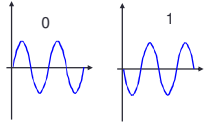
Modulation de fréquences

- La valeur binaire est donnée au travers de la fréquence du signal.



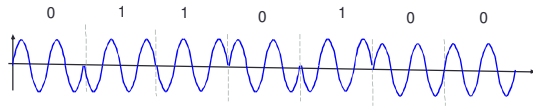
Modulation de phases

- La valeur binaire est donnée au travers de la fréquence du signal.



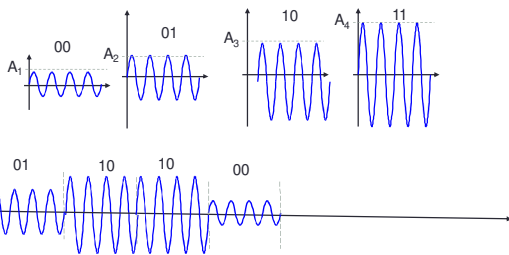
Fréquence et amplitude restent constantes.

Deux amplitudes:
 ϕ_1 pour un 0 ($\phi_1 = 0$)
 ϕ_2 pour un 1 ($\phi_2 = \pi$)



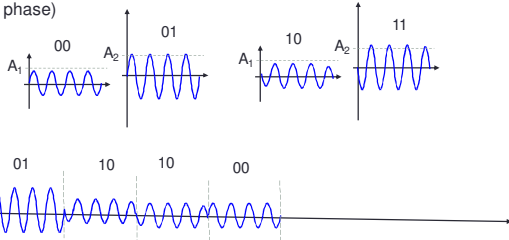
Modulation complexe

- Il est possible d'augmenter le débit au travers de modulations plus complexes
- 4, 8, 16, ... valeurs d'amplitudes/fréquences/phases



Modulation complexe (2)

- Il est possible d'augmenter le débit au travers de modulations plus complexes
- Combinaisons de plusieurs types de modulation (ex: amplitude + phase)



Valence d'un code

- Valence d'un code: nombre de valeurs possibles d'un symbole
- Valeurs (A, f, φ) différentes possibles
- Si le nombre de valeurs possibles est:
 - 2: 0 ou 1
 - 4: 00, 01, 10 ou 11.
 - 8: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 ou 111
- La valence est généralement de la forme 2^n .
- Valence = 2^n implique n bits codés par symbole.

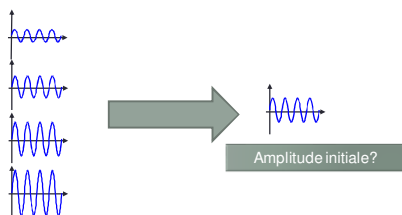
Nombre de bits du code = $\log_2(\text{Valence})$

Baud (Bd)

- Baud: nombre de symbole par seconde / rapidité de modulation.
- Nombre d'intervalles de temps par seconde.

Limite de la modulation complexe

- Le débit peut être arbitrairement grand si l'on considère des modulations de plus en plus complexe
- Limite physique fixer par la capacité à interpréter les symboles en réception.
- Exemple:



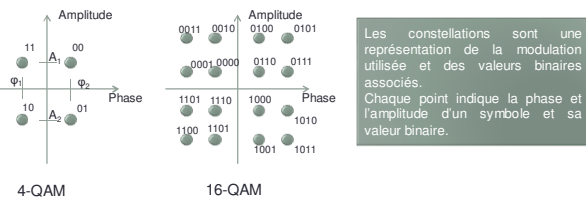
Exemple 1.7.1

1. Donnez les 4 symboles correspondant à une modulation complexe de phases.
2. On considère une modulation complexe à 4 phases et 2 amplitudes:
 - a. Décrire les symboles.
 - b. Combien de bits sont envoyés par slot?
 - c. Si la ligne de transmission à une vitesse de 1000 bauds, quel est le débit binaire?
 - d. Donnez le signal pour la transmission de la chaîne binaire suivante:

001101110000010

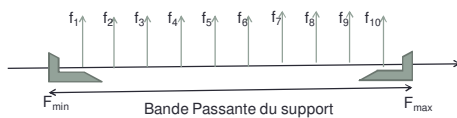
Modulation complexe en pratique

- Quelques exemples:
 - BPSK (Binary Phase Shift Keying)
 - Modulation phase et amplitude : 4-QAM / 16-QAM / 64-QAM / etc.
 - QAM: Quadrature Amplitude Modulation



OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

- Utilisation efficace de la bande passante
- Division de la bande passante: utilisation de plusieurs porteuses
- Chaque sous porteuse est modulé



OFDM (2)

010101010110101

Porteuse de fréquence f_1

Porteuse de fréquence f_2

Porteuse de fréquence f_3

Les bits à transmettre sont envoyés sur les différents porteuses en parallèle. Les modulations peuvent être différentes d'une porteuse à l'autre.

OFDM: applications

- Les technologies utilisant l'OFDM:
 - ADSL:
 - 256 sous porteuses: 16 porteuses sens montant, 224 sens descendant
 - Les modulations dépendent de la qualité de la ligne (atténuation, etc.), et donc le débit aussi.
 - Il existe des versions symétriques (SDSL) pour les entreprises.
 - L'ADSL2+ utilise 511 porteuses, les nouvelles se trouvant dans la bande [1,1MHz ; 2,2MHz].

L'asymétrie des sous porteuses (le A de ADSL) est fait pour offrir un débit nettement supérieure au *download* par rapport à l'*upload*. Il correspond aux besoins des particuliers mais pas toujours des entreprises.

- Wi-Fi / WiMax
- LTE
- Etc.

Exemple 1.7.2

- Donnez les symboles correspondant à la constellation suivante.
 - Quelle est la valence du code ?
 - Quelle est le débit si la ligne est de 5000 bauds ?

$A_1 = 1V$ $A_2 = 2V$ $\varphi_1 = \pi/2$ $\varphi_2 = 3\pi/2$

- On suppose l'utilisation de l'OFDM sur 256 porteuses.
 - 50 sont utilisés pour l'upload. Les autres sont utilisés pour le download.
 - La moitié des porteuses utilise une modulation QAM-16, l'autre moitié QAM-64 (moitié/moitié pour chaque sens).
 - La vitesse de chaque porteuse est de 200 bauds
 - Quel est le débit montant et descendant (en Mbit/s)?
