

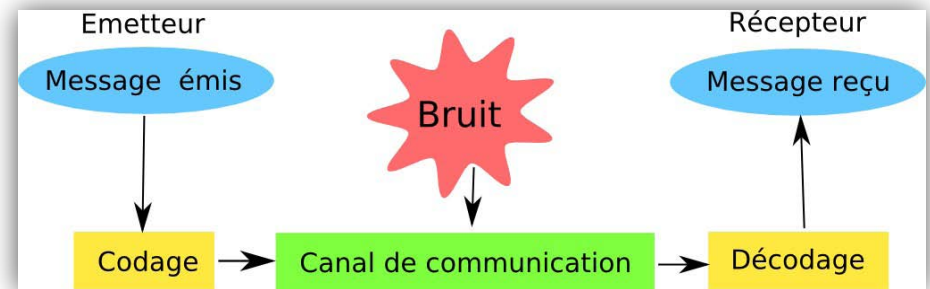
Chapitre 3

NUMÉRISATION D'UN SIGNAL AUDIO

Chaîne de transmission

- Chaîne de transmission

1. analogiques à l'origine



2. convertis en signaux binaires

- *Échantillonnage + quantification + codage*

3. brassage des signaux binaires

- *Multiplexage*

codage

4. séparation des signaux binaires

- *Démultiplexage*

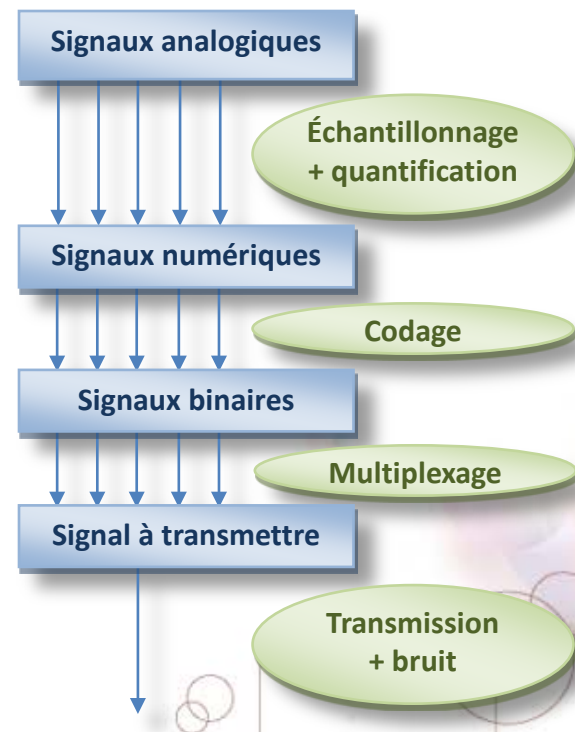
5. convertis en signaux analogiques

- *Décodage + Blocage + filtrage*

décodage

Principe de numérisation

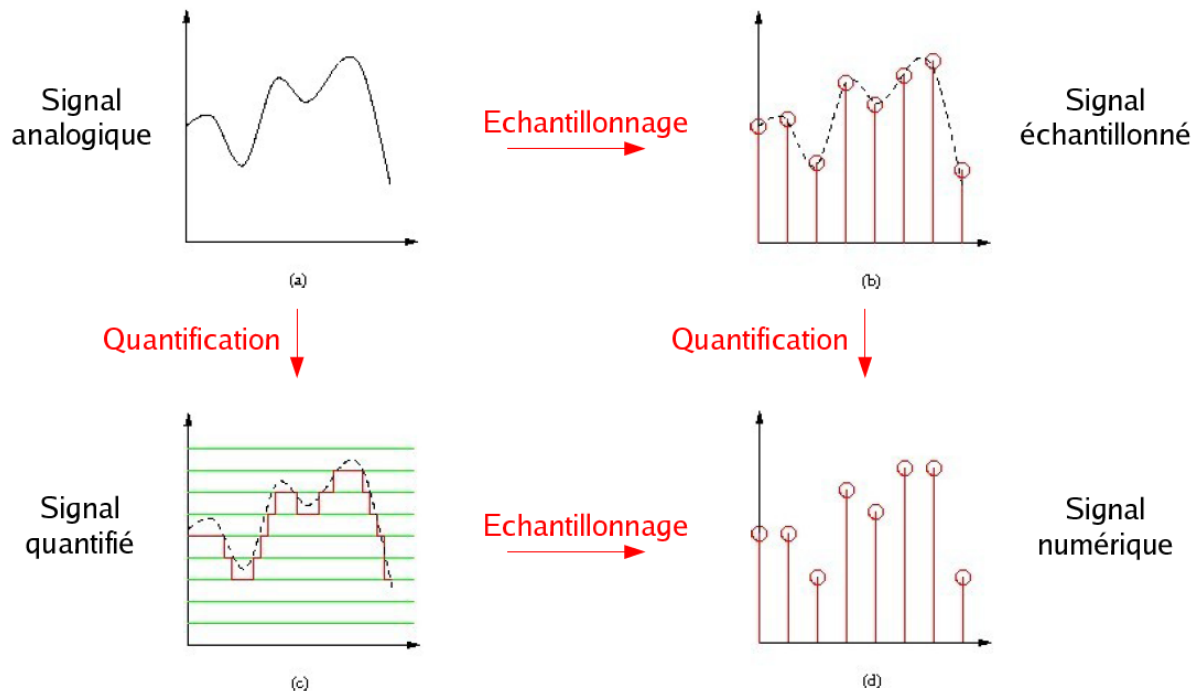
- La transformation d'un signal analogique en signal numérique binaire est appelée **numérisation**.
- La numérisation comporte plusieurs activités :
 1. l'**échantillonnage**
 2. la **quantification**
 3. le **codage** du signal numérique
 4. le **multiplexage** pour la transmission numérique



Conversion analog. / numér.

- Signal numérique

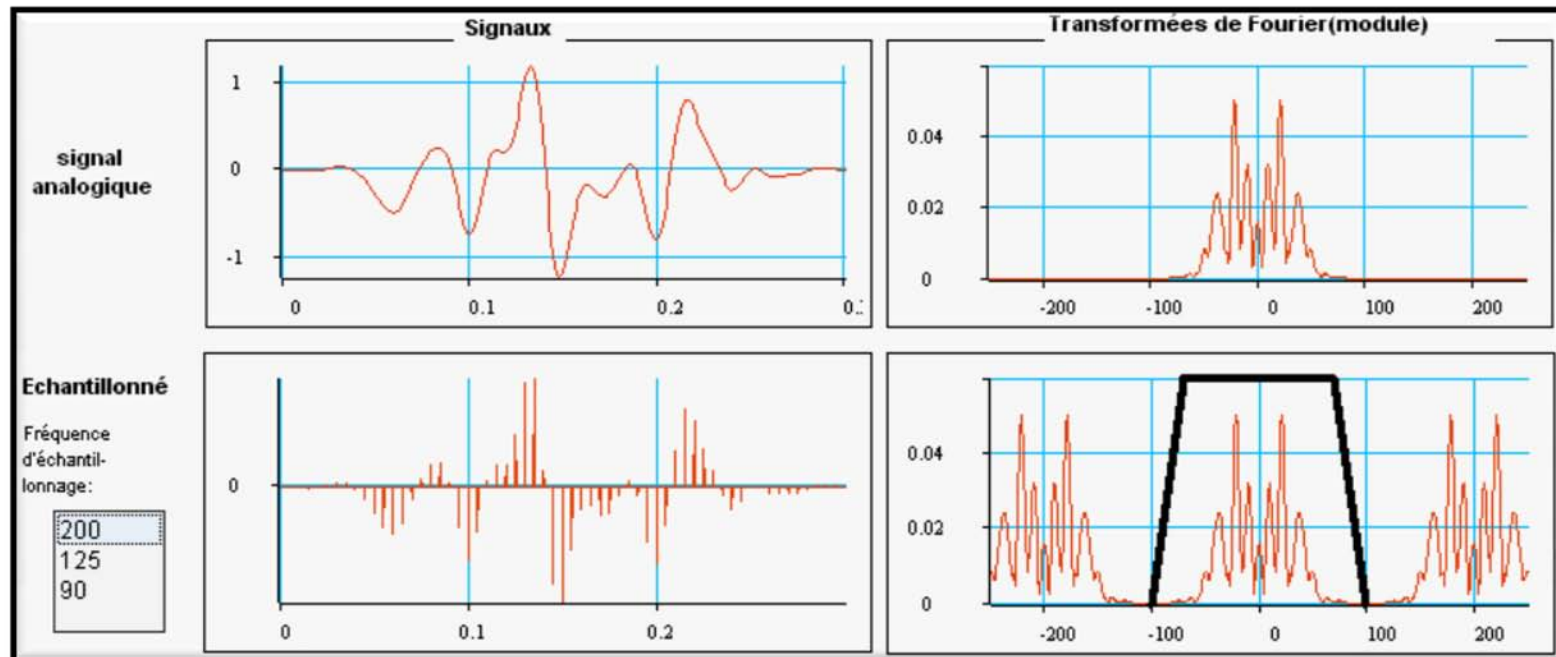
- Signal analogique échantillonné puis quantifié (ou quantifié puis échantillonné)



Échantillonnage

- Choix de la fréquence d'échantillonnage

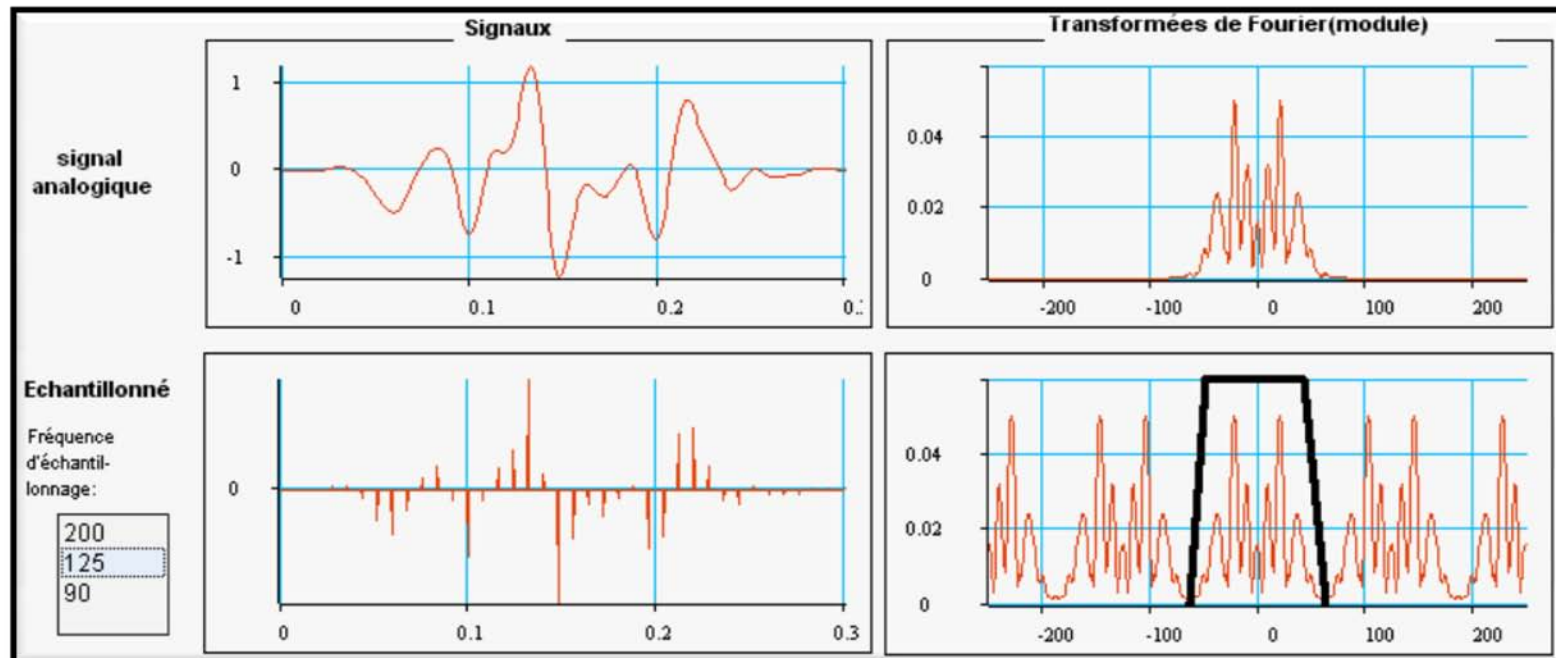
- Fréquence maximale du signal : $F_{\max} = 60 \text{ Hz}$
- Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 200 \text{ Hz}$
- $F_e > 2 \times F_{\max}$: le signal peut être RECUPERE



Échantillonnage

- Choix de la fréquence d'échantillonnage

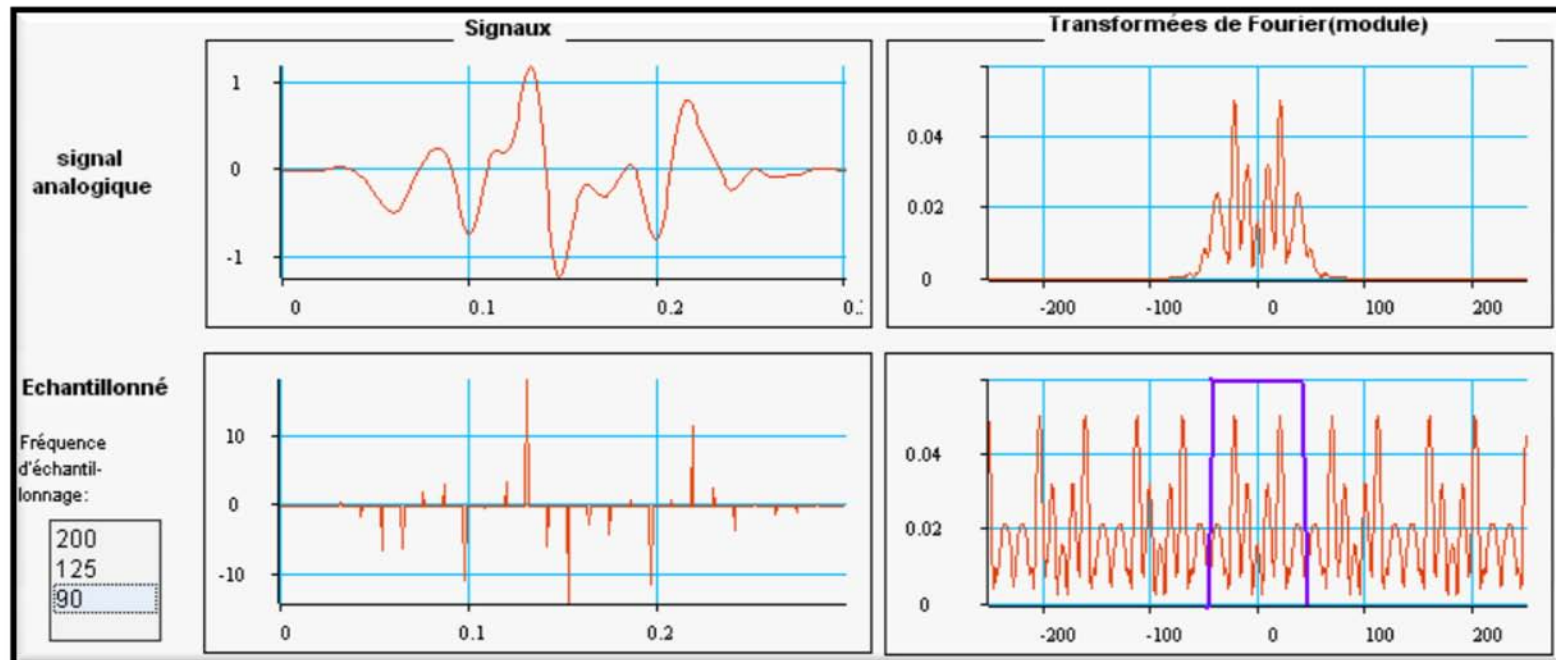
- Fréquence maximale du signal : $F_{\max} = 60 \text{ Hz}$
- Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 125 \text{ Hz}$
- $F_e \approx 2 \times F_{\max}$: le signal peut être DIFFICILEMENT RECUPERE



Échantillonnage

- Choix de la fréquence d'échantillonnage

- Fréquence maximale du signal : $F_{\max} = 60 \text{ Hz}$
- Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 90 \text{ Hz}$
- $F_e < 2 \times F_{\max}$: le signal est **IRRECUPERABLE** par filtrage



Échantillonnage

- Lors de la phase d'échantillonnage, il y a risque de perte d'information. Claude E. Shannon a donné une condition pour ne pas perdre d'information dans un signal (**théorème de Shannon**) :
 - La fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence maximale du signal analogique :

$$F_e \geq 2 \times F_{\max}$$

- La distance entre deux échantillons se traduit par :

$$T_e \leq 1 / (2 \times F_{\max})$$

Quantification

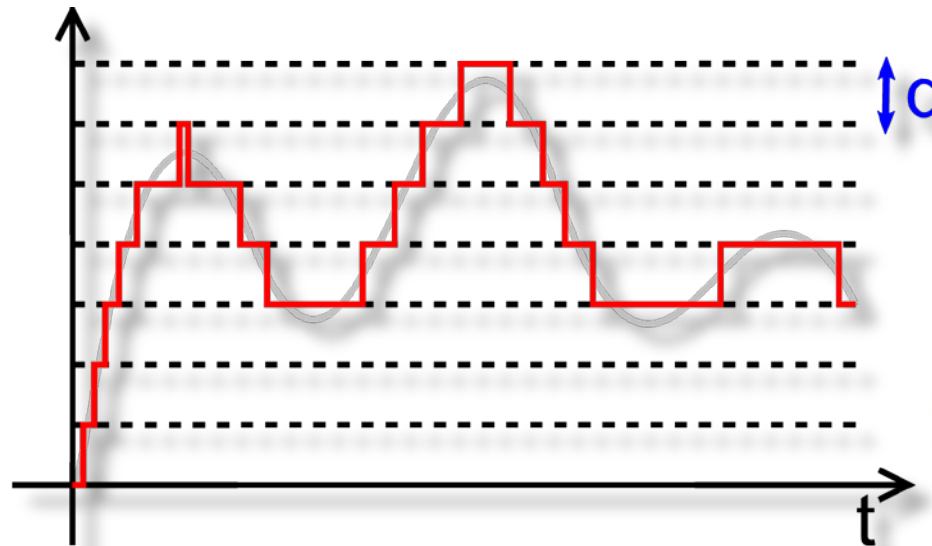
- Plusieurs types de quantification
 - Quantification uniforme (*linéaire*)
 - Simple
 - Avec zone morte
 - Quantification variable (*non linéaire*)
 - Logarithmique
 - Adaptative

Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- Ceci consiste à choisir les niveaux de quantification avec un **pas de quantification q constant**

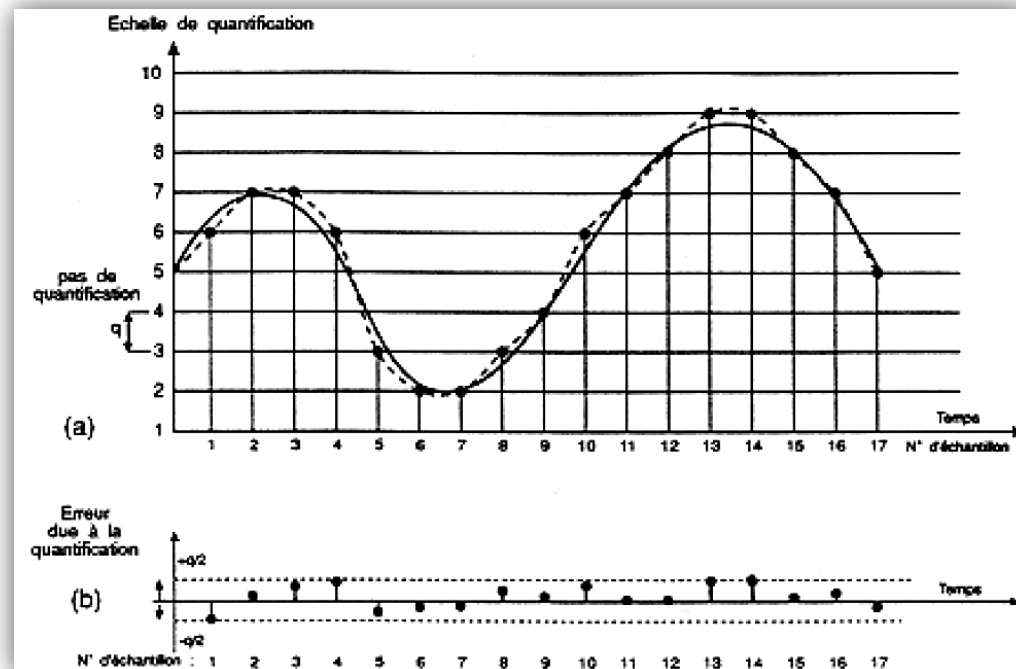


Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- Il y a perte d'information lors de la quantification
 - Perte maximale égale à $q/2$ (par échantillon)



Quantification

Quantification

- **Uniforme**

- simple
- avec zone morte

- **Variable**

- logarithmique
- adaptative

- Sensibilité au bruit :
 - Erreur moyenne $\varepsilon_{\text{moy}} = q / 2$
 - Erreur quadratique $\varepsilon_{\text{quad}} = q / 3.464$
- La sensibilité au bruit (bruit de quantification) augmente avec le pas de quantification q
- Rapport signal à bruit RSB
 - rapport entre la valeur efficace du signal S_{eff} et la valeur efficace du bruit $\varepsilon_{\text{quad}}$
 - Si l'amplitude du signal analogique est faible, pour un pas de quantification donné
 - RSB très faible
 - Bruit de quantification très important

Quantification

Quantification

- **Uniforme**

- simple
- avec zone morte

- **Variable**

- logarithmique
- adaptative

- **Débit d'information**

- Quantité d'information d'un échantillon du signal numérique, définie :
 - sur une N_{quant} bits de quantification
 - sur N_{canaux} canaux (mono : 1, stéréo : 2, ...)
 - avec une fréquence d'échantillonnage F_e :

$$D = N_{\text{quant}} \times N_{\text{canaux}} \times F_e$$

- **Volume d'information**

- quantité d'information transmise pendant un durée d

$$V = D \times d = N_{\text{quant}} \times N_{\text{canaux}} \times F_e \times d$$

Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- **Format audio PCM / MIC**
 - Procédé de numérisation des données audio sans compression (mono ou stéréo)
 - « *Pulse Code Modulation* » PCM
 - « *Modulation d'Impulsions Codés* » MIC
- **Utilisation du format PCM**
 - **CD-Audio**
 - stéréo : $N_{\text{canaux}} = 2$
 - profondeur de codage de $N = 16$ bits
 - fréquence d'échantillonnage $F_e = 44.1\text{kHz}$
 - débit binaire $D = 1378 \text{ kbps (kbits/s)} = 172.3 \text{ ko/s}$

Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- **Format PCM / MIC**
 - Procédé de numérisation des données audio sans compression
 - « *Pulse Code Modulation* » PCM
 - « *Modulation d'Impulsions Codés* » MIC
- **Utilisation du format PCM**
 - Implantée sur les cartes son d'ordinateurs
 - Quantification sur 8 ou 16 bits (256 à 65536 niveaux)
 - Numérisation brute, très fidèle au signal analogique, sans compression
 - Réseau Téléphonique Commuté (RTC)
 - Numérisation de communications téléphoniques sur 8 bits (256 niveaux)

Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- Format LPCM « *Linear Pulse Code Modulation* »
 - Évolution et amélioration du format PCM
 - PCM
 - format sonore non compressé, à 1 (mono) ou 2 (stéréo) canaux
 - fréquence d'échantillonnage de 44.1 kHz
 - profondeur de codage de 8 ou 16 bits
 - débit binaire $D = 345$ à 1378 kbps = 43.1 à 172.3 ko/s
 - LPCM
 - Format sonore non compressé, jusqu'à 8 canaux
 - Fréquence d'échantillonnage de 48 ou 96 kHz
 - Profondeur de codage de 16, 20 ou 24 bits
 - débit binaire D jusqu'à 17.6 Mbps = 2.2 Mo/s
 - Utilisation du format LPCM
 - DVD-audio
 - certains DVD-vidéo

Quantification

Quantification

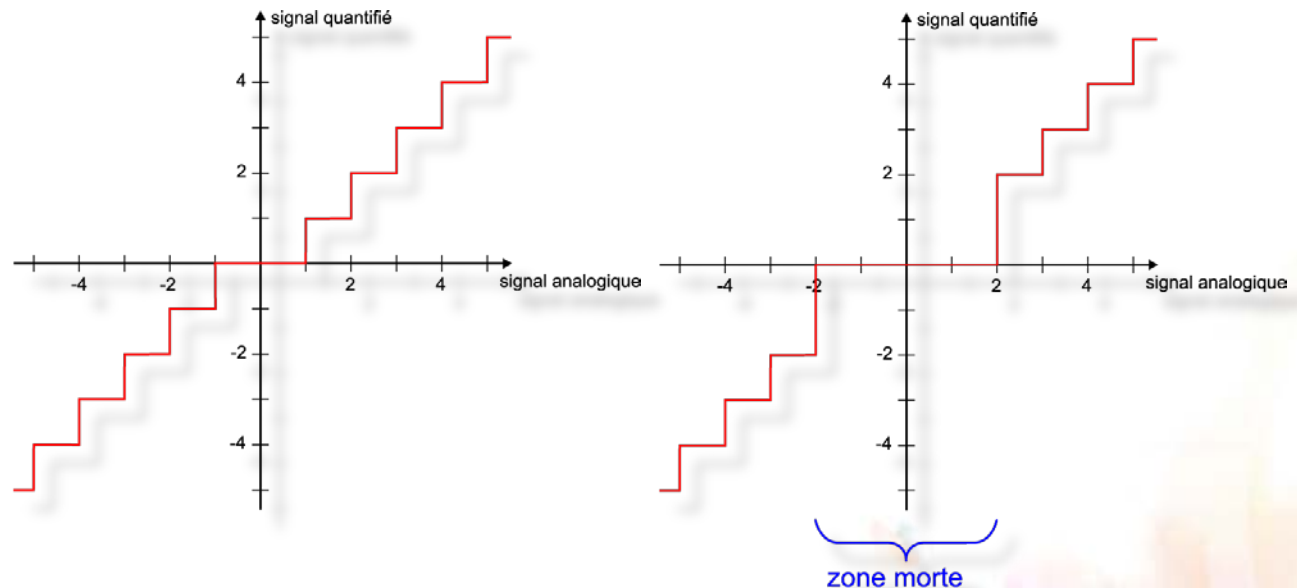
- **Uniforme**

- simple
- avec zone morte

- **Variable**

- logarithmique
- adaptative

- Quantification uniforme à zone morte
 - Variante de la quantification uniforme simple



- **Utilisation**

- Élimination des sons inaudibles de très faibles amplitudes ou cachés par des sons beaucoup plus forts

Quantification

Quantification

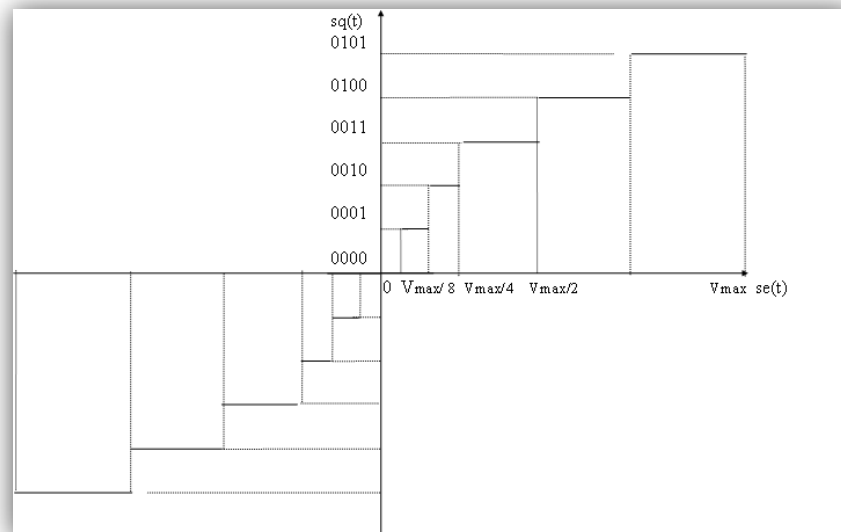
• Uniforme

- simple
- avec zone morte

• Variable

- logarithmique
- adaptative

- Afin de réduire la sensibilité au bruit
 - Utilisation d'un pas de quantification p variable
 - But : obtenir un rapport signal à bruit (RSB) constant
 - Conséquences :
 - p faible pour les petites amplitudes du signal
 - p important pour les grandes amplitudes

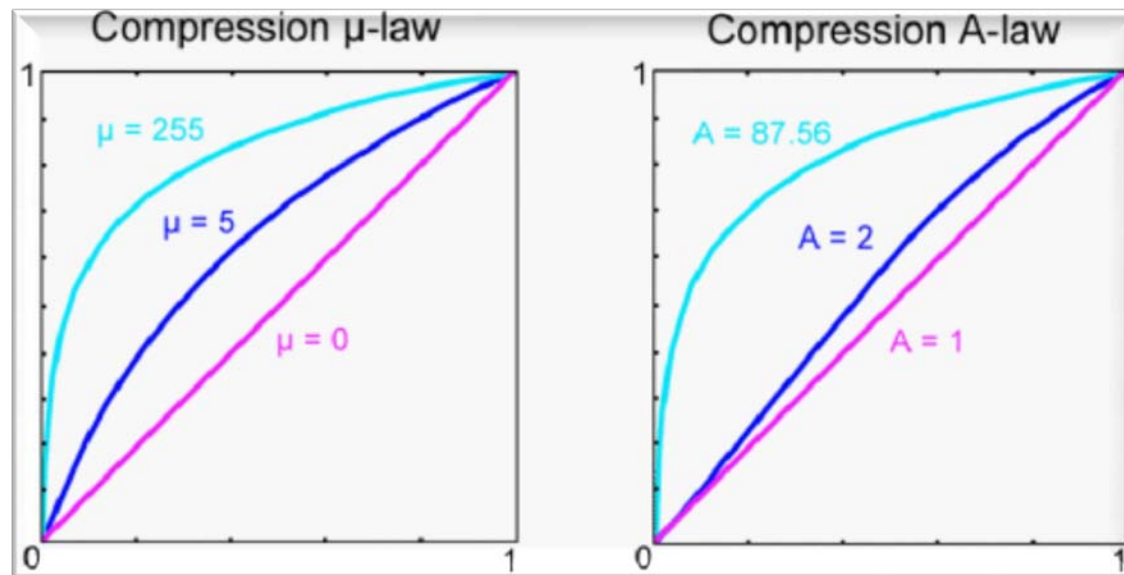


Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- En pratique
 - Utilisation d'une quantification dite **semi-logarithmique**
 - Loi μ (USA et Japon)
 - Loi A (Europe et reste du monde)



Quantification

Quantification

- **Uniforme**

- simple
- avec zone morte

- **Variable**

- logarithmique
- adaptative

- **Format CCITT / UIT**
 - Procédé de numérisation des données audio avec compression
 - « *Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique* » (CCITT)
 - « *Union internationale des télécommunications* » (UIT)
- **Utilisation du format CCITT A-law / CCITT μ -law**
 - applications téléphoniques sur le Web
 - initialement développé comme standard de communication téléphonique.

Quantification

Quantification

• Uniforme

- simple
- avec zone morte

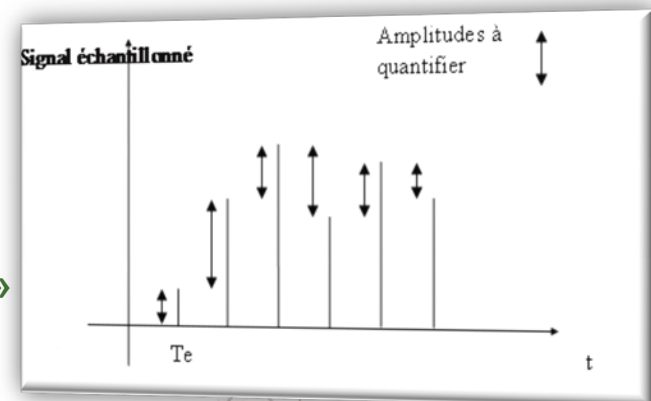
• Variable

- logarithmique
- adaptative

- Pour réduire le débit binaire sans perte de qualité
 - Quantifier la différence Δ entre 2 échantillons successifs
 - différence Δ plus faible que la valeur d'un échantillon
 - moins de bits nécessaires pour la quantification
 - en pratique pas de gain important
 - Pour l'audio, réduction du nombre de bits de 25 % environ par rapport au PCM

• Exemple :

- format DPCM
« *Differential PCM* »

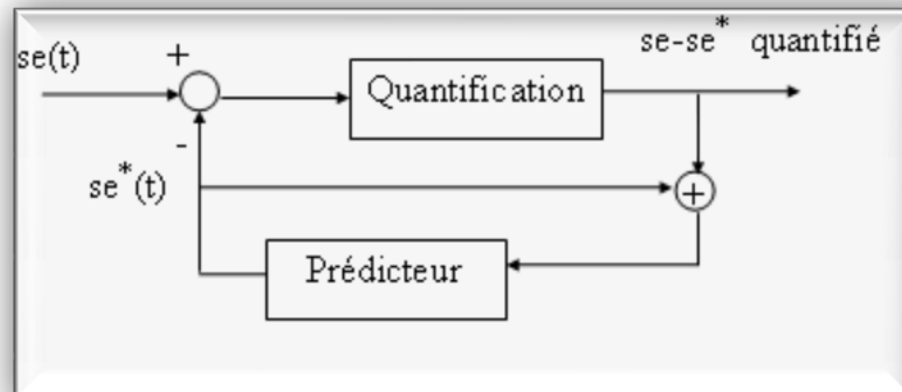


Quantification

Quantification

- **Uniforme**
 - simple
 - avec zone morte
- **Variable**
 - logarithmique
 - adaptative

- Quantification adaptative
 - Utiliser un prédicteur
 - $se(t)$ = signal à numériser
 - $se^*(t)$ = signal généré par le prédicteur, capable de reconstruire une approximation du signal en fonction des caractéristiques statistiques du signal
 - Quantifier la différence $\Delta = se(t) - se^*(t)$ entre un échantillon et la valeur estimée par le prédicteur



Quantification

Quantification

• Uniforme

- simple
- avec zone morte

• Variable

- logarithmique
- adaptative

- Format ADPCM « *Adaptive Differential PCM* »
 - Évolution et amélioration du format PCM
 - Le format ADPCM implanté sous Windows effectue un codage sur 4 bits.
 - Il permet donc d'obtenir un rapport de compression de 4:1 par rapport à un codage en PCM sur 16 bits, stéréo, à $F_e = 44.1$ kHz.
 - Débit binaire ADPCM : $D = 352.8$ kbps = 44.1 ko/s
 - Débit binaire PCM : $D = 1411.2$ kbps = 176.4 ko/s
 - Format très utilisé, en particulier par le système de téléphonie numérique sans fil à usage domestique DECT (*Digital Enhanced Cordless Telephone*).
 - Il est possible ainsi d'obtenir une qualité excellente pour des débits inférieurs à PCM.

Quantification

Quantification

- **Uniforme**

- simple
- avec zone morte

- **Variable**

- logarithmique
- adaptative

- Format ADPCM « *Adaptive Differential PCM* »
 - Avantages
 - Réduction du débit binaire à qualité constante
 - augmentation de la capacité du support de transmission
 - Amélioration de la qualité à débit constant
 - Exemple : téléphonie améliorée sur le RNIS
 - Inconvénients
 - traitement plus complexe
 - moins bonne réponse aux transitions brusques
 - plus grande sensibilité aux erreurs de transmission
 - exige une bonne connaissance à priori du signal
 - signal parfaitement aléatoire ne pourra être extrapolé, donc le format ADPCM sera inefficace

Quantification

Quantification

• Uniforme

- simple
- avec zone morte

• Variable

- logarithmique
- adaptative

- Encodeurs adaptatifs
 - « *Code Excited Linear Prediction* » (CELP)
 - Algorithme de codage de la parole
 - « *Global System Mobile* » (GSM)
 - norme numérique de 2nde génération pour la téléphonie mobile
- Principe
 - Utilisation de prédicteurs linéaires (filtres linéaires)
 - Transmission des caractéristiques statistiques du signal afin de faire fonctionner le prédicteur.
 - Le codage d'un signal vocal (fréquences comprises entre 0 et 4 kHz) peut être échantillonné à 8 kHz.
 - Une quantification PCM mono sur 8 bits nous donne un débit de 64 Kb/s.
 - Avec un codec GSM on obtient un débit de 13 kbps.
 - Rapport de compression d'environ 5:1.

Quantification

- La qualité du signal numérique dépend de :
 - Résolution N : nombre de bits / échantillon
 - Profondeur P : nombre de valeurs différentes / échantillon
 - Plus N est grand, plus P est grand, meilleure est la qualité.
 - Fréquence d'échantillonnage F_e
 - Condition de Shannon : $F_e \geq 2 \times F_{\max}$
- Le type de quantification
 - Linéaire PCM :
 - sensible au bruit
 - Non linéaire CCITT :
 - peu sensible au bruit, mais débit important
 - Adaptative ADPCM (avec prédicteur) :
 - réduction du débit selon les caractéristiques statistiques du signal

Quantification

- Récapitulatif

Codecs audio	Échantillonnage (kHz)	Résolution (bits)	Débit (ko/s)	Mono - Stéréo
PCM	8 à 48	8 ou 16	7.8 à 187.5	mono / stéréo
LPCM	8 à 96	8 à 24	7.8 à 2250	1 à 8 canaux
CITT A-Law	8 à 44.1	8	7.8 à 86.1	mono / stéréo
CITT μ -Law	8 à 44.1	8	7.8 à 86.1	mono / stéréo
IMA ADPCM	8 à 44.1	4	3.9 à 21.5	mono
Microsoft ADPCM	8 à 44.1	4	3.9 à 21.5	mono / stéréo
Lernout&Hauspie CELP	5 à 16	8 ou 16	4.9 à 31.3	mono
GSM 6.10	8 à 44.1		1 à 8	mono

PCM (*Pulse Code Modulation*)

LPCM (*Linear PCM*)

ADPCM (*Adaptive Differential PCM*)

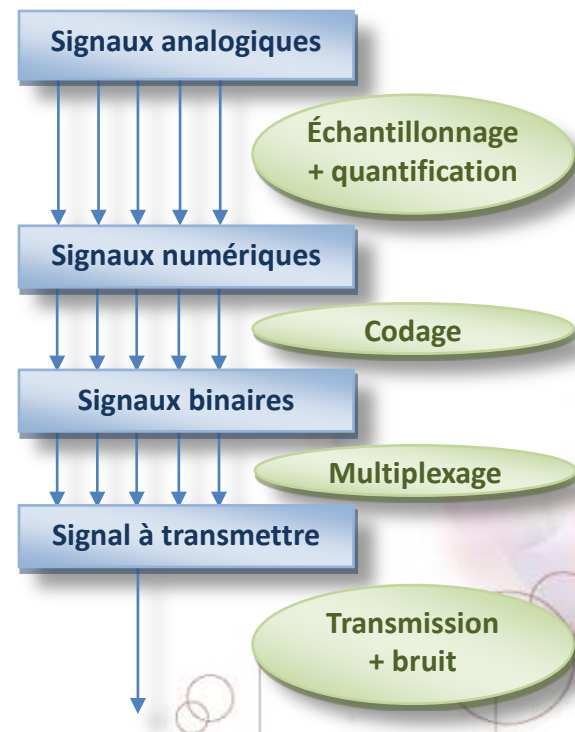
CCITT (*Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique*)

CELP (*Code Excited Linear Production*)

GSM (*Global System Mobile*)

Principe de numérisation


- La transformation d'un signal analogique en signal numérique binaire est appelée **numérisation**.
- La numérisation comporte plusieurs activités :
 1. l'**échantillonnage**
 2. la **quantification**
 3. le **codage** du signal numérique
 4. le **multiplexage** pour la transmission numérique

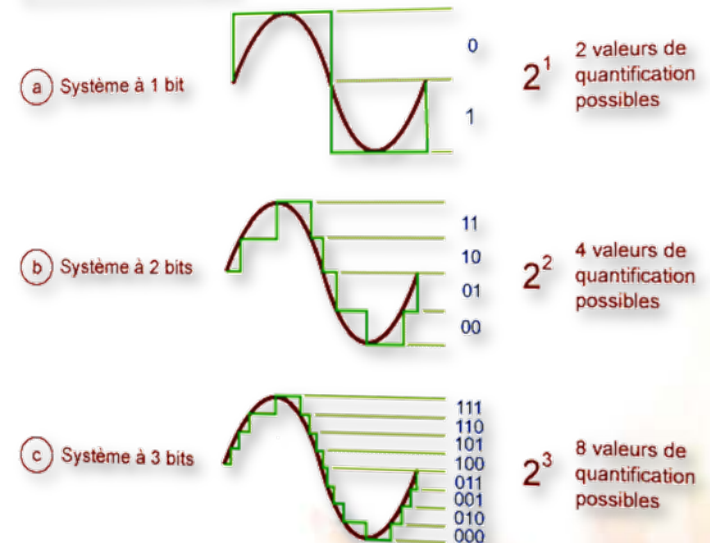


Codage

- En numérique :
 - chaque niveau est codé sur N bits (appelé **nombre de bits de quantification**)
 - soit 2^N combinaisons pour quantifier des échantillons
- Exemples :
 - 1 bit : 2 combinaisons
 - 8 bits : 256 combinaisons
 - 16 bits : 65536 combinaisons
 - 24 bits : 16 millions de combinaisons
 - 32 bits : 4 milliards de combinaisons

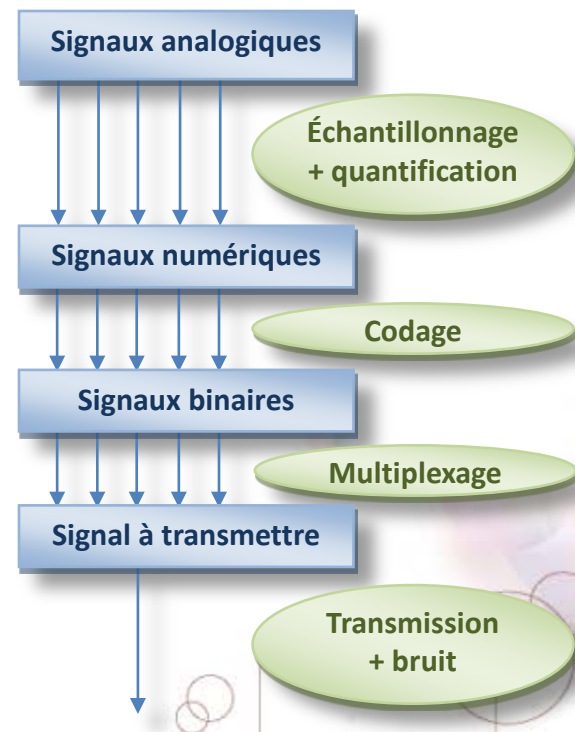
Valeurs de quantification

Signal d'origine 



Principe de numérisation

- La transformation d'un signal analogique en signal numérique binaire est appelée **numérisation**.
- La numérisation comporte plusieurs activités :
 1. l'**échantillonnage**
 2. la **quantification**
 3. le **codage** du signal numérique
 4. le **multiplexage** pour la transmission numérique



Multiplexage

- Définition

On appelle **multiplexage**, la capacité à transmettre **sur un seul support physique** (appelé *voie haute vitesse*), des données provenant de plusieurs émetteurs et allant vers plusieurs émetteurs (on parle alors de *voies basse vitesse*).



Multiplexage

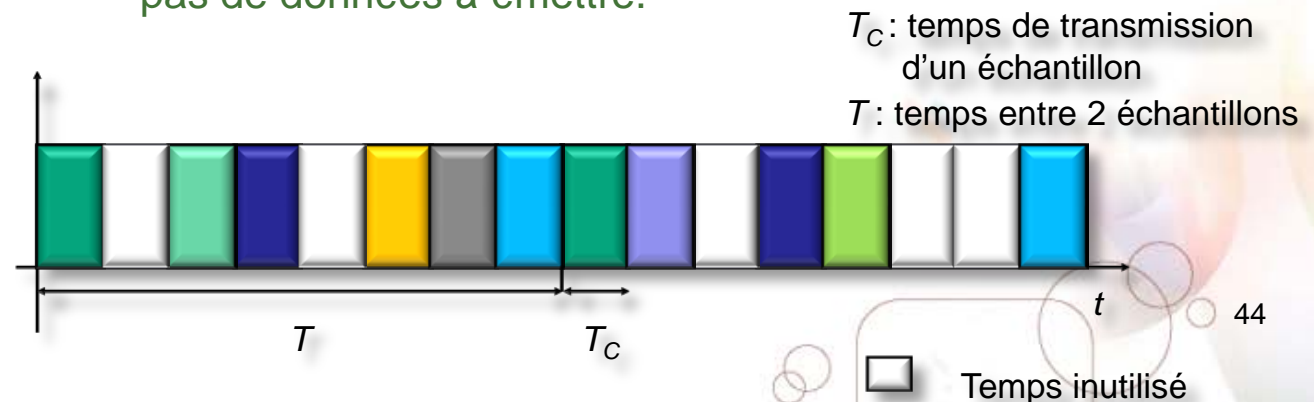
- Types de codage
 1. Multiplexage **temporel**
 2. Multiplexage **fréquentiel**
 3. Multiplexage **temporel statistique**

Multiplexage

Multiplexage

- **Temporel**
- Fréquentiel
- Temporel statistique

- Multiplexage temporel
 - appelé aussi *MRT* (*Multiplexage par répartition dans le temps*)
 - Intérêt
 - permet d'échantillonner les signaux des différentes voies « basse vitesse » et de les transmettre successivement sur la voie « haute vitesse » en leur allouant la totalité de la bande passante, et ce, même si celles-ci ne possèdent pas de données à émettre.



Multiplexage

Multiplexage

- **Temporel**
- **Fréquentiel**
- **Temporel statistique**

- **Multiplexage temporel**
 - **Avantages**
 - Multiplexage le plus simple et le plus rapide
 - Facilité pour déterminer la position d'une donnée dans la trame
 - Le changement de fréquences (basses ↔ hautes vitesses) est identique pour toutes les données
 - **Inconvénients**
 - Non optimisation de la bande passante
 - La trame peut posséder des trous s'il y a aucune donnée à transmettre entre un émetteur et un récepteur
 - Très peu efficace en cas de liaisons à débit variable
 - Peu souple

Multiplexage

Multiplexage

- Temporel
- **Fréquentiel**
- Temporel
statistique

- Multiplexage fréquentiel
 - appelé aussi *MRF* (*Multiplexage par répartition de fréquences*)
 - Intérêt
 - permet de partager la bande de fréquence disponible sur la voie « haute vitesse » en une série de canaux de plus faible largeur afin de faire circuler en permanence sur la voie « haute vitesse » les signaux provenant des différentes voies « basse vitesse ».
 - Ce procédé est notamment utilisé sur les lignes téléphoniques et les liaisons physiques en paires torsadées afin d'en accroître le débit.

Multiplexage

Multiplexage

- Temporel
- **Fréquentiel**
- Temporel statistique

- Multiplexage fréquentiel

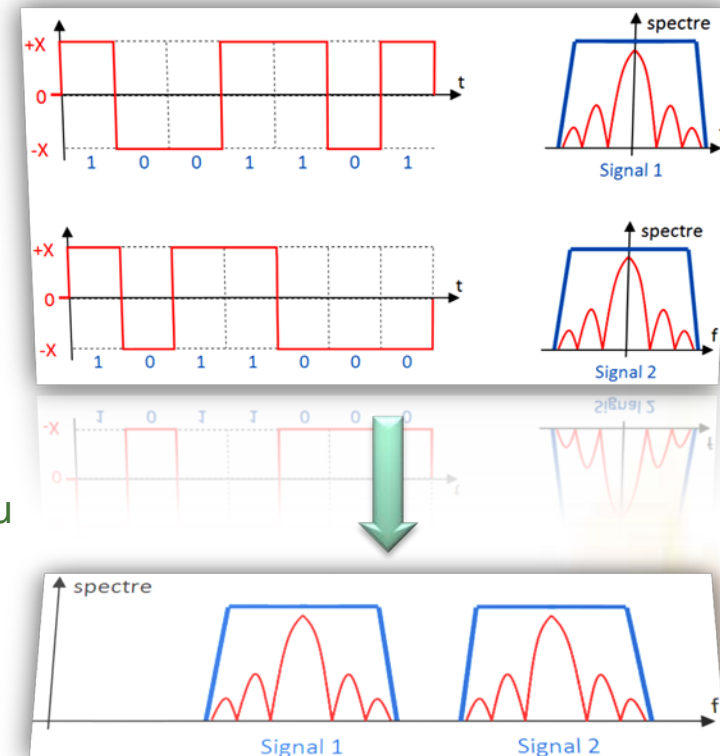
- Principe

- Multiplexage

- Décalage du spectre en fréquence de chaque signal autour d'une fréquence F_C , par une modulation en fréquences

- Démultiplexage

- Filtrage du signal reçu autour de la fréquence F_C , à l'aide d'un filtre passe-bande de largeur ΔF
 - Décalage du spectre en fréquence résultant autour de 0.



Multiplexage

Multiplexage

- Temporel
- **Fréquentiel**
- Temporel
statistique

- Multiplexage fréquentiel
 - Avantages
 - Peu de pertes induites par le multiplexage
 - Garantie de débit si tous les spectres ont des fréquences inférieures à la fréquence maximale admissible pour le support de transmission
 - Inconvénients
 - Problèmes de recouvrement de spectre si les spectres des différents signaux se recoupent
 - Gaspillage de la bande passante lorsqu'elle possède des trous s'il n'y a aucune donnée à transmettre entre un émetteur et un récepteur

Multiplexage

Multiplexage

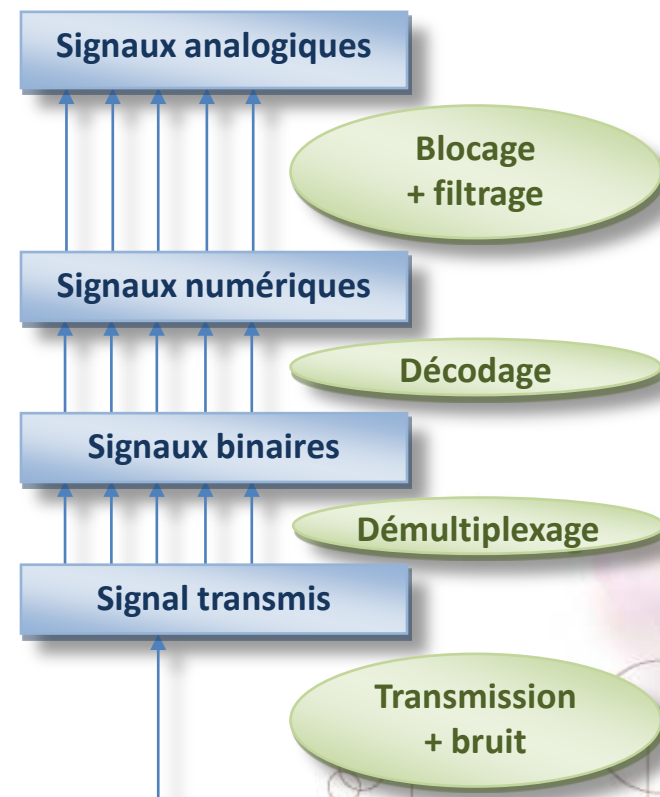
- Temporel
- Fréquentiel
- Temporel statistique

- Multiplexage temporel statistique
 - Intérêt
 - reprend les caractéristiques du multiplexage temporel, à la différence près qu'il ne transmet sur la voie haute vitesse uniquement les voies basse vitesse comportant des données.
 - Le multiplexage se base sur des statistiques concernant le débit de chaque ligne basse vitesse.
 - Conséquence
 - la ligne haute vitesse ne transmet pas les *blancs*
 - les performances sont meilleures qu'avec un multiplexage temporel

Conversion numér. / analog.

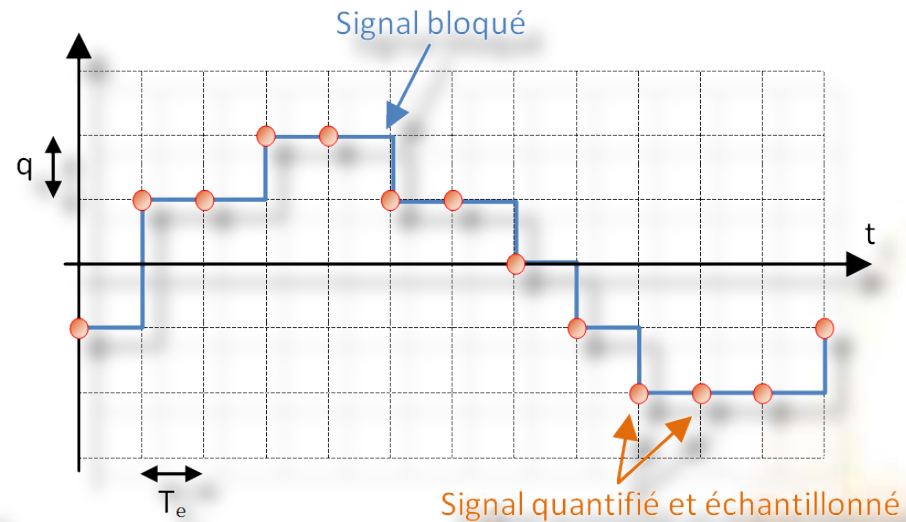
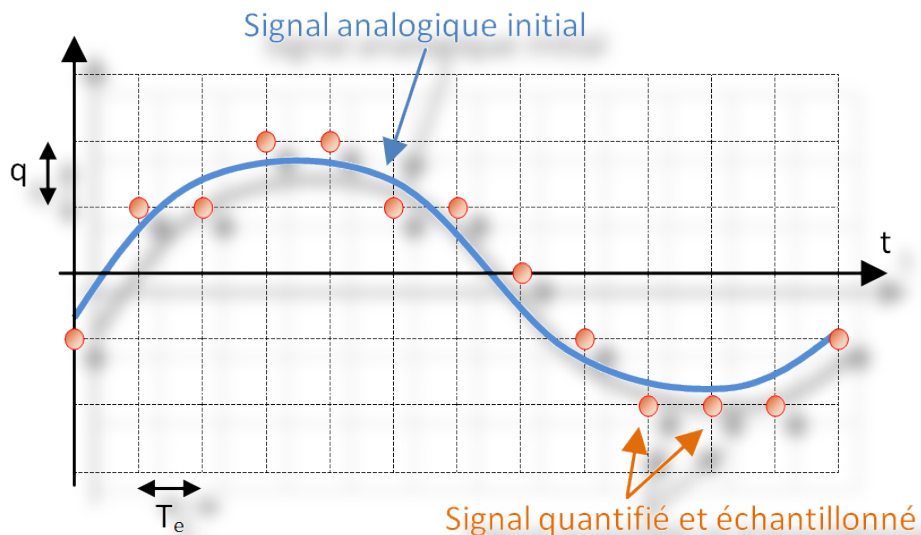
- Conversion numérique / analogique
 - pour être écoutés et/ou visualisés

- La conversion comporte plusieurs activités :
 1. Le **démultiplexage**
 2. Le **décodage** en signal informatique
 3. Le **blocage** et le **filtrage**



Conversion numér. / analog.

- 1^{ère} étape : blocage
 - On utilise un bloqueur



- Celui-ci doit maintenir la valeur de l'échantillon pendant toute la durée T_e .
- On obtient alors un signal en marches d'escalier.

Conversion numér. / analog.

- 2^{nde} étape : filtrage
 - Utilisation d'un filtre passe-bas
 - filtre moyenneur car temporellement il conserve la valeur moyenne entre deux échantillons
 - Lissage du signal
 - suppression des harmoniques parasites (hautes fréquences) dus à l'échantillonnage

