Quatrième partie

Son et musique

Le son, un phénomène vibratoire

I Son pur, son composé

1 Le son

Le son musical est un phénomène périodique. il s'agit de la propagation dans un milue matériel (solide, liquide, gaz) d'une succession de compressions et détente.

2 Son pur, son composé

L'enregistrement d'un son pur est un signal périodiques

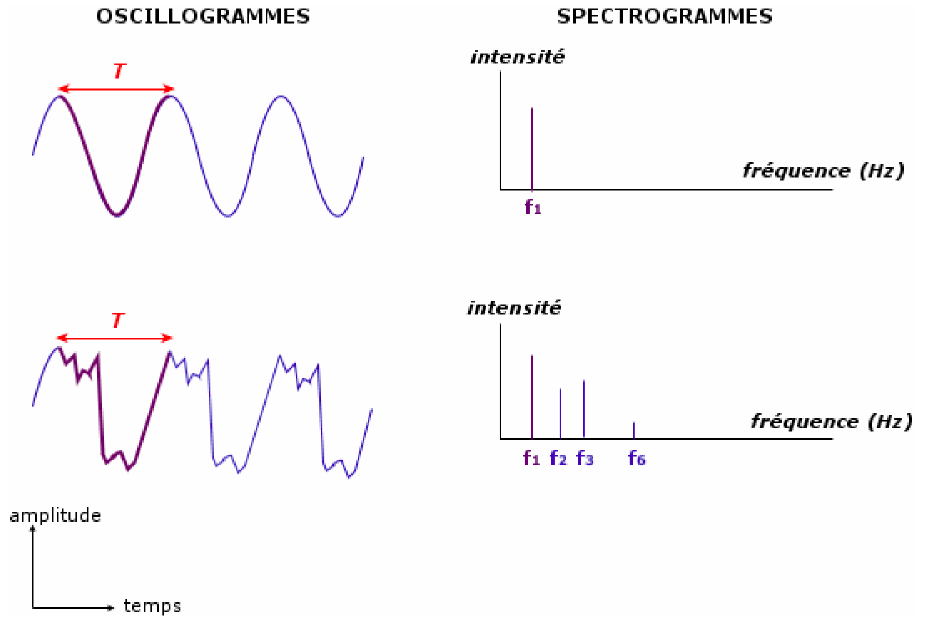
Définition

Dans le cas d'un son pur, le motif élémentaire est de forme sinusïdale.

Dans le cas d'un son composé, le motif élémentaire est différent. Il dépend de l'instrument utilisé.

3 L'analyse spectrale

L'analyse spectrale consiste à décomposer un signal périodique en une somme de signaux sinusoïdaux.



Un signal périodique de fréquence f est donc une superposition de signaux sinusoïdaux :
- un signal sinusoïdal à la fréquence f nommée **fondamental** ou première harmonique,
- un signal sinusoïdal à la fréquence $2f$, la «deuxième harmonique»,
- un signal sinusoïdal à la fréquence $3f$, la «troisième harmonique», etc.

La représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de la fréquence constitue le **spectre** du signal.

Les **harmoniques** sont des signaux sinusoïdaux de fréquences $f_n = n \times f$. Le nombre n est un entier positif appelé rang de l'harmonique.

Le spectre d'un son pur ne comporte qu'un seul pic.

4 Niveau d'intensité sonore

Pour caractériser une onde sonore, on peut définir deux grandeurs :

- L'intensité sonore (I) : c'est la puissance sonore reçue par unité de surface. Son unité est donc le $W.m^{-2}$.
- Le niveau d'intensité sonore (L) : l'oreille humaine ne perçoit pas l'intensité sonore de façon linéaire, mais logarithmique. Le niveau sonore est calculé à partir de l'intensité minimale I_0 que l'oreille humaine peut percevoir :

Intensité sonore ($W.m^{-2}$)

Niveau d'intensité sonore (dB)

$$L = 10.\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$I_0 = 10^{-12}$ ($W.m^{-2}$)

II Les notes produites par les instruments

1 La vibration d'une corde

Lorsque l'on pince une corde d'une guitare ou que l'on frappe la corde d'un piano, elle se met à vibrer. Cette vibration engendre un son composé.

Propriété

La fréquence du son composé produit par une corde dépend de plusieurs paramètres :
- la longueur L e la corde : plus elle est importante, plus le son est grave
- la tension T de la corde : plus elle est intense, plus le son est aigu
- la masse linéique μ : plus elle est grande, plus le son est grave

Tension de la corde (N)

Fréquence (Hz)

$$f = \frac{1}{2L}.\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Masse linéique $kg.m^{-1}$

La vibration de la corde peut de décomposer en une somme de vibrations plus simples appelés modes de vibration. Les fréquences de ces modes correspondent aux harmoniques du signal sonore. Le premier mode de vibre à la fréquence fondamentale.

2 Cas des instruments à vent

Un phénomène analogue est observé dans les instrument à vent.

Propriété

Pour un instrument à vent, le son est produit par la vibration de l'air dans un tuyau.

La longueur de la colonne d'air qui vibre dans un instrument à vent est inversement proportionnelle à la fréquence fondamentale du son émis.

Célérité du son dans l'air ($m.s^{-1}$)

Fréquence (Hz)

$$f = \frac{c}{2L}$$

Longueur du tube (m)

Chapitre 12

La musique

I Les intervalles en musique

1 L'école pythagoricienne

Dans l'Antiquité, des systèmes musicaux ont commencé à voir le jour en plusieurs endroits du globe. En Grèce, l'école pythagoricienne, active à partir du VIe siècle avant notre ère, considérait que les nombres entiers et leurs rapports comme l'expression ultime de l'harmonie musicale, et de celle de l'Univers tout entier.

2 Les intervalles consonants

Définition

En musique, l'**intervalle** entre deux sons correspond au rapport de leurs fréquences fondamentales.

L'écoute de différents intervalles musicaux provoque des sensation plus ou moins agréables. Les sons consonants (qui "sonnent" bien), sont liés à des rapports simples d'entiers. Ils ont alors des harmoniques en commun.

Définition

Deux notes séparées par une **octave** correspondent à une même note, à des hauteurs différentes.

II Les gammes de Pythagore

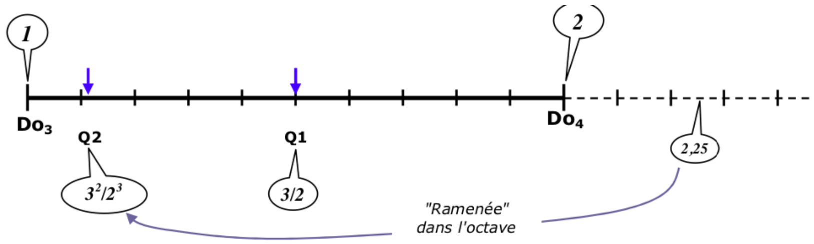
Pour construire une gamme (c'est-à-dire une suite finie de notes réparties sur une octave), les disciples de Pythagore ont exploité uniquement les intervalles qu'ils jugeaient les plus consonants, c'est-à-dire l'octave et la quinte.

Définition

Les gammes de Pythagore sont créées par une succession de quintes (caractérisées par une multiplication de la fréquence par 3/2) et de réductions à l'octave (caractérisées par une division de la fréquence par 2).

1 Construction d'une gamme avec le cycle des quintes

- On construit la gamme à partir d'un son de fréquence f. Ex : Soit f la fréquence du DO
- On multiplie cette fréquence par 3/2 pour former une première quinte. Ex : $f(Sol) = \frac{3}{2}f$
- On trouve la quinte suivante en multipliant la fréquence de la note précédente par 3/2. Si la fréquence obtenue n'est plus dans l'intervalle $[f;2f]$, on la ramène dans l'octave en la divisant par 2. On obtient ainsi une nouvelle note. Ex : $f(R) = \frac{3}{2}f \times \frac{3}{2} = \frac{3^2}{2^2}$ si ce rapport n'est pas compris dans $[f;2f]$, on obtient $f(R) = \frac{3^2}{2^3}$



2 Gammes à 5, 7 et 12 notes

Propriété

Le cycle des quintes retombe "presque" sur la fréquence de la note de départ pour un nombre de notes égal à 5, 7 et 12

En effet, on a $3^5 \approx 2^8$, $3^7 \approx 2^{11}$, $3^{12} \approx 2^{19}$. Pendant des siècles, les musiciens ont employé des à 7 et 12 notes.

3 La quinte du loup

Un raisonnement mathématique montre qu'il n'existe aucun suite de notes construites sur le cycle des quintes qui reboucle exactement.

Définition

La dernière quinte de la gamme à 12 sonne un peu faux : c'est la quinte du loup.

III Les gammes au tempérament égal

1 Le problème de transposition

Une transposition consiste à adapter une mélodie au registre de la voix ou d'un instrument en la déplaçant vers l'aigu ou la grave.

Propriété

Les gammes de Pythagore ne facilite pas la transposition, car les intervalles entre les différentes notes de la gamme sont inégaux.

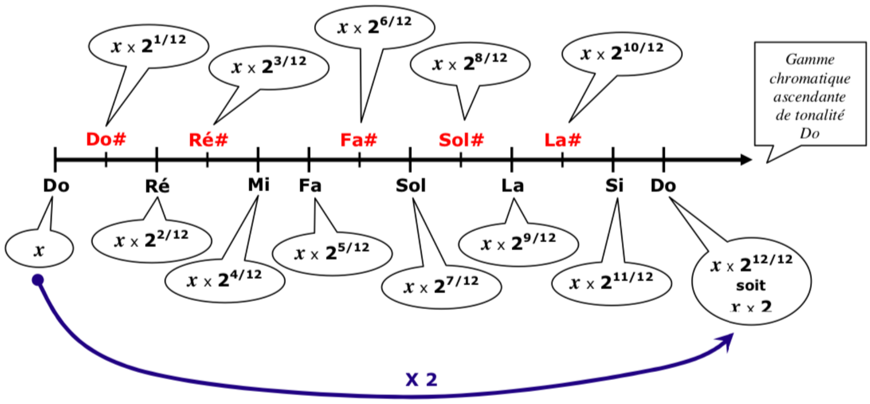
2 La gamme tempérée à 12 notes

Le modèle qui s'impose à partir du XVIIIe siècle est le tempérament égal, qui permet de transposer une mélodie dans toutes les tonalités sans la déformer.

Définition

La gamme tempérée à 12 notes est une gamme dont tous les intervalles sont égaux. L'intervalle d entre deux notes successives de la gamme est égal à la **racine douzième de 2**

$$d = \sqrt[12]{2} \approx 1,05946$$



L'oreille humaine tolère bien le tempérament égal même si aucun intervalle, sauf l'octave, n'est dans un rapport simple.

IV Bilan

	Do	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
Gamme de Pythagore	*1*	$3^2/2^3$ (1,125)	$3^4/2^6$ (1,266)	*4/3* (1,333)	*3/2* (1,5)	$3^3/2^4$ (1,688)	$3^5/2^7$ (1,898)	*2*
Gamme diatonique tempérée	**1**	$2^{2/12}$ (1,122)	$2^{4/12}$ (1,260)	$2^{5/12}$ (1,335)	$2^{7/12}$ (1,498)	$2^{9/12}$ (1,682)	$2^{11/12}$ (1,888)	**2**

Le calcul des fréquences donne

	Do	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
Gamme de Pythagore	*261,63*	*294,33*	*331,13*	*348,84*	*392,44*	*441,50*	*496,69*	*523,26*
Gamme diatonique tempérée	261,63	293,66	329,63	349,23	392,00	440,00	493,88	523,26

Chapitre 13

Le son : une information à coder

I Signaux analogiques et numériques

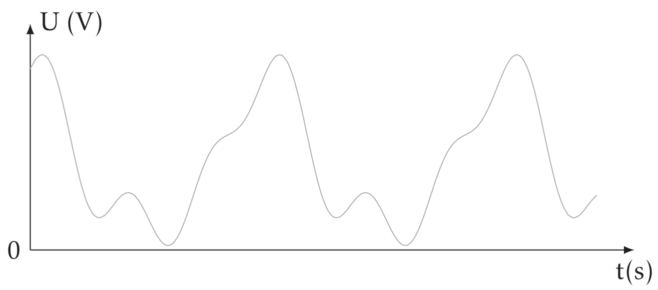
Définition

On appelle **signal**, toute grandeur physique mesurée au cours du temps.

Exemples : tension électrique (en V), température (en en °C), niveau sonore (dB), pH (sans), cours d'une action ...

1 Signal analogique.
Analogique : contraire de logique !
La logique étant ici "l'art de manipuler" des 0 et des1 ! (*Mais que sont donc ces 0 et ces 1 ?*)

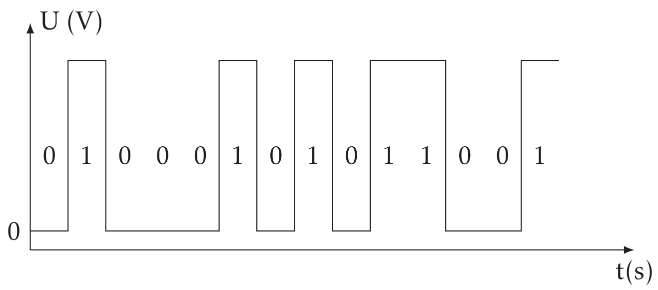
Un signal **analogique** est un signal **continu** au cours du temps.



2 Signal numérique.

Définition

Un signal **numérique** est une suite de 0 et de 1 logiques.



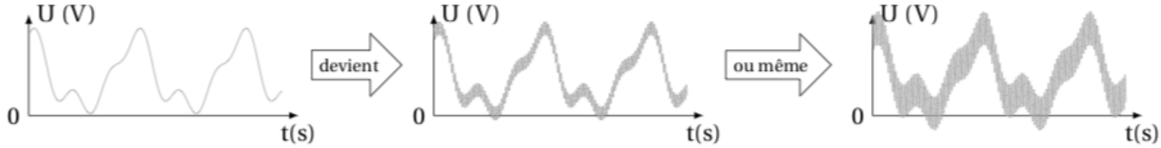
II Numérisation d'un signal

1 Intérêt.

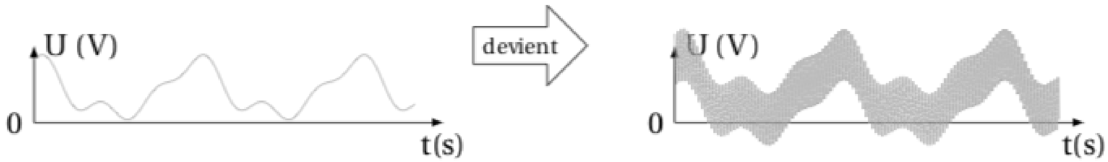
C'est une question de qualité !

Parmi les bambins de terminale S lisant ce cours, peu connaissent le "doux" grésillement d'un disque vinyle !!
(*Il paraît même qu'il y a des nostalgiques !*)
C'est ce qu'on appelle le **bruit de fond**.

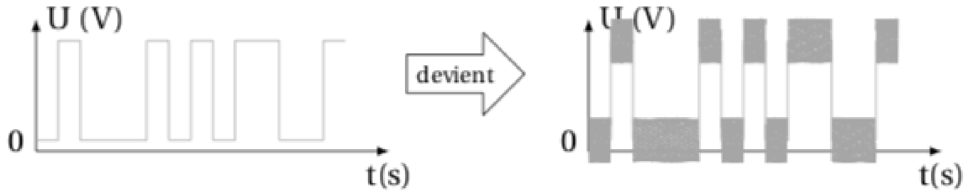
Il a pour origines, l'agitation thermique des électrons libres (transmetteurs du signal) dans les circuits électriques et surtout les perturbations dûes aux ondes électromagnétiques dans lesquelles nous baignons littéralement !
Alors, un joli signal peut devenir :



Si le signal est trop faible, on peut même ne plus rien reconnaître du tout !



Il est donc impossible de transmettre un tel signal !
Alors qu'en numérique :

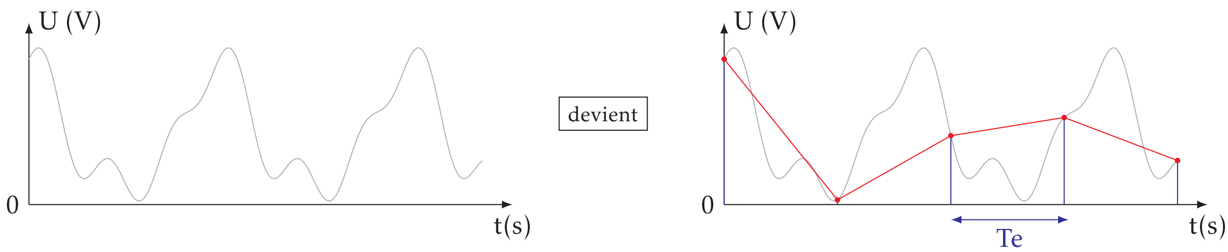


Malgré le bruit, on reconnaît quand même les 0 et les 1 !

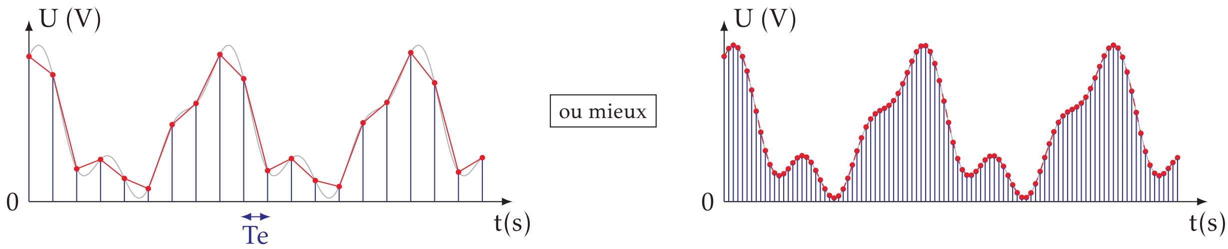
III Échantillonnage

Définition

Comme son nom l'indique, l'échantillonnage consiste à prendre un échantillon du signal à intervalle de temps régulier.
Les échantillons, mis bout à bout doivent restituer le signal le plus fidèlement possible.



Ici, la courbe rouge ne représente pas du tout le signal original. Il faut échantillonner plus **fréquemment** !



Propriété

Le "rendu" d'un signal est meilleur si la **fréquence d'échantillonnage** est élevée.
Le signal est "saucissonné" dans le temps le plus finement possible !

Théorème

Théorème de Shanon : pour que le signal puisse être entièrement reconstruit à partir des échantillons, il faut et il suffit que la fréquence d'échantillonnage doit être strictement supérieure à deux fois la plus grande fréquence présente dans le spectre du signal continu.

$$f_e \geqslant 2 f_{max}$$

IV Quantification

Il faut également saucissonner le signal en amplitude et attribuer un nombre entier aux différentes valeurs de la tension.

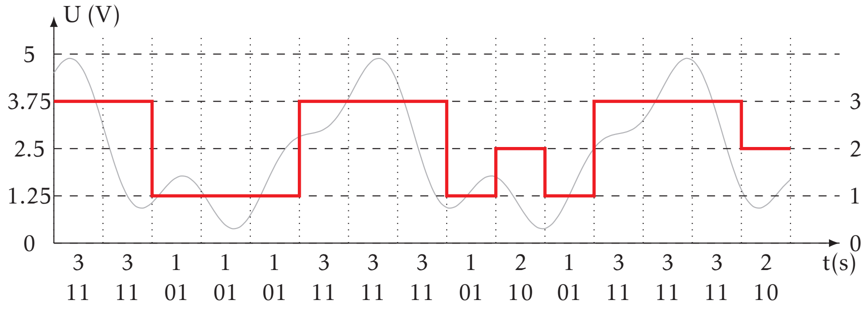
Comme l'ordinateur "travaille" en binaire, on divise la tension par une puissance de 2.

Dans les exemples suivants, on prendra toujours la même fréquence d'échantillonnage.

La tension varie entre 0V et 5V et la valeur numérique attribuée est immédiatement supérieure à la valeur réelle.

Codé sur 2 bits :
On obtient les correspondances :

U (V)	Décimal	Binaire
0	0	00
1,25	1	01
2,5	2	10
3,75	3	11



Définition

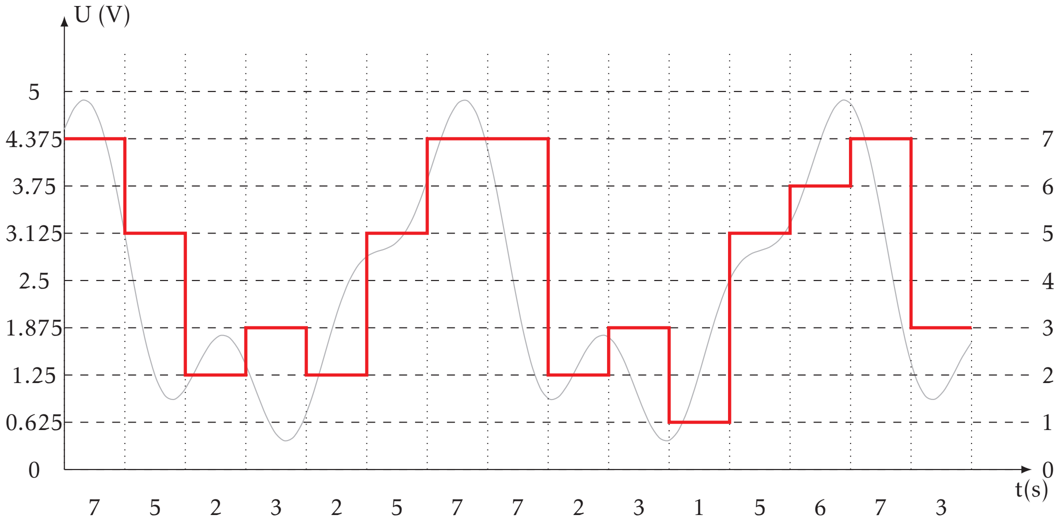
On appelle **pas**, la différence de tension entre deux valeurs successives.
Il dépend du nombre n de bits utilisés pour le codage ainsi que de la valeur de la tension maximale U_{max} :

$$p = \frac{U_{max}}{2^n - 1}$$

Le signal rouge est la restitution en tension du signal numérique. Il n'est pas très ressemblant au signal analogique !

Il faut donc "saucissonner" davantage.

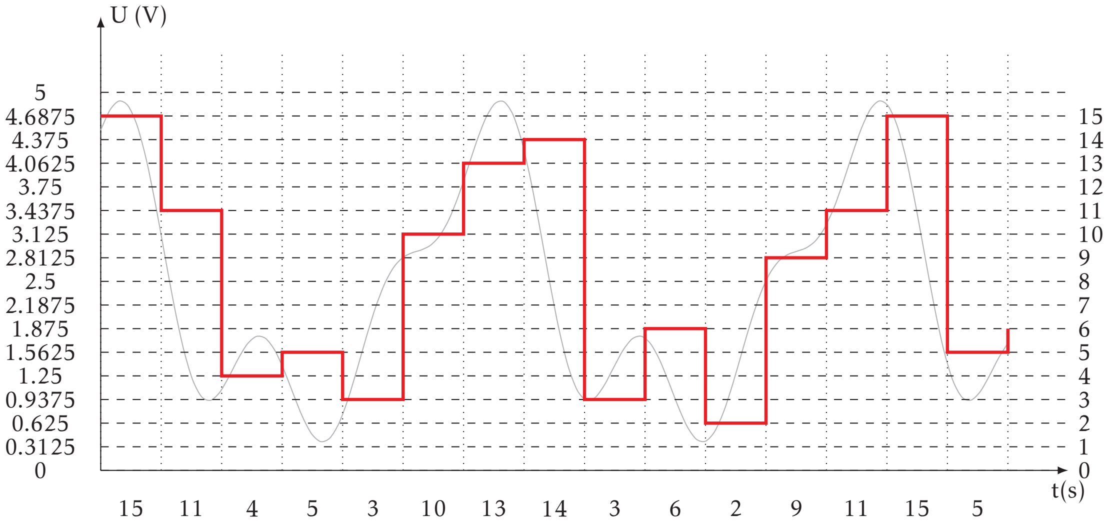
Sur 3 bits



7 5 2 3 2 5 7 7 2 3 1 5 6 7 3

111 101 010 011 010 101 111 111 010 011 001 101 110 111 011

Sur 4 bits

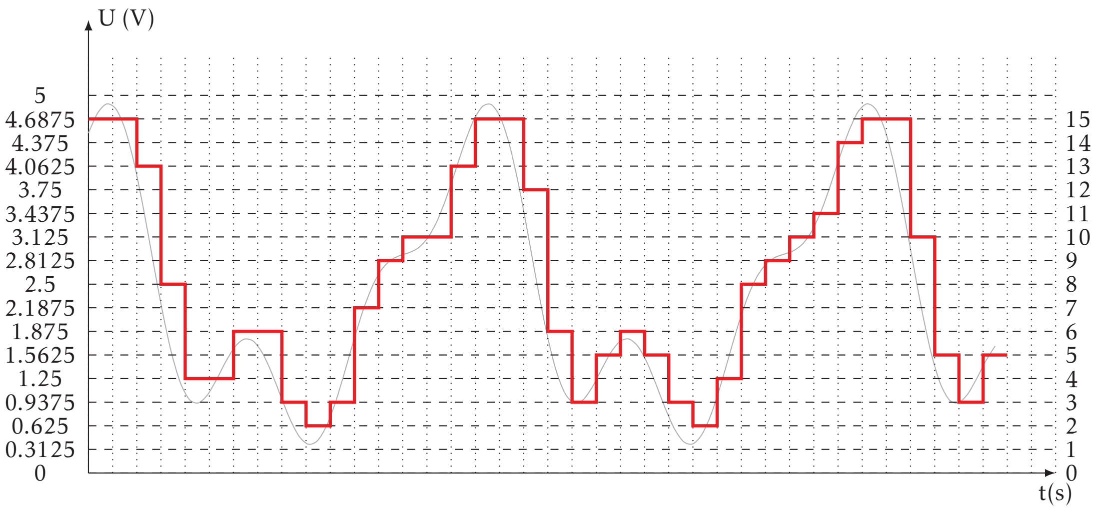


15 11 4 5 3 10 13 14 3 6 2 9 11 15 5

1111 1011 0100 0101 0011 1010 1101 1110 0011 0110 0010 1001 1011 1111 0101

Même si le signal rouge s'approche un peu de signal réel, la ressemblance n'est tout de même pas frappante !

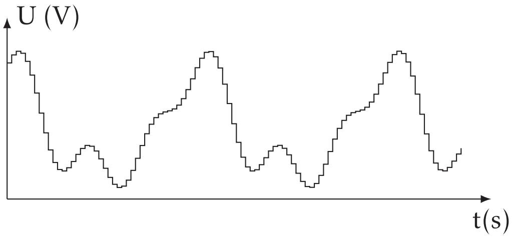
Pour progresser encore, il faut augmenter la fréquence d'échantillonnage et diminuer le pas.



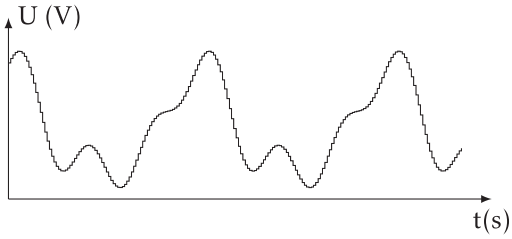
Je vous laisse vérifier que le codage est bien :

1111111111011000010001000110011000110010001101111001101010101101111111111000

110001101010110010100110010010010001001101010111110111111110100101001101 01
Finalement, le signal pourrait ressembler à :



puis à



Qu'en est-il aujourd'hui ?

Les ordinateurs actuels codent les informations sur 64 voire 128 bits, c'est-à-dire une suite de 64 ou 128 zéros ou uns par échantillon et à des fréquences avoisinant le MHz.
Cela laisse imaginer le nombre d'informations à stocker !

V Estimation de la taille d'un fichier audio

La taille d'un fichier audio correspond au nombre N d'octets nécessaire pour décrire numériquement un signal sonore d'une durée Δt :

$$N = f_e \times \frac{Q}{8} \times \Delta t \times n$$

où

f_e est la fréquence d'échantillonnage

Q la quantification en bits

n le nombre de voies ($n = 2$ pour un son stéréo et $n = 1$ pour un son mono)

Δt en secondes

N en octets

VI Compression d'un fichier audio

1 Nécessité

L'information est aujourd'hui essentiellement stockée et diffusée sous forme numérique. La place non infinie de stockage de toutes les données produites et la limitation de la transmission conduisent à une nécessaire compression des données.

2 Principe

Définition

La compression consiste à réduire la taille d'un fichier numérique.

Il existe deux types de compression :

- la compression sans perte d'information, les données se retrouvent à l'identique après décompression ;
- la compression avec perte d'information, elle élimine les information sonores pour lesquelles les oreilles sont peu sensibles

3 Taux de compression

Le taux de compression traduit le niveau de compression d'un fichier au regard du fichier initial. Ainsi un taux de compression de 50 % signifie que les données ont été divisées par deux pour traduire l'information.

$$\tau = 1 - \frac{N_f}{N_i}$$

où

τ taux de compression (sans unité)

N_f nombre de bits après compression

N_i nombre de bits avant compression

4 Exemples de formats de compression.

	Original	Compressions			
Format	WAV	MP3 (320)	MP3 (56)	FLAC	WMA
Durée	59 s	59 s	59 s	59 s	59 s
Taille	10,4 Mo	2,36 Mo	413 ko	2,36 Mo	690 ko
Taux	1	0,23	0,04	0,23	0,07

5 Qualité d'un fichier compressé

Plus un fichier est compressé, plus il est aisé de le stocker et de le transmettre mais moins il sera de qualité. Il y a donc un compromis à faire. L'exigence en qualité d'un son ne sera pas la même si l'enregistrement est écouté sur une tour ou avec son smartphone.

On évitera de compresser un fichier son à un taux de compression supérieur à 90 % pour l'écouter sur une chaîne hi-fi.