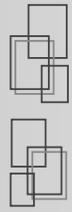




Caractéristiques physiques du son



Qu'est-ce que le son ? Entend-on tous les sons ? Pourquoi certains sons sont agréables et pourquoi d'autres ne le sont pas ?

L'augmentation des supports et des moyens de diffusion sonore, à travers l'accès aux plateformes musicales en streaming par exemple, a engendré une complexification de la compréhension du son. Difficile de juger d'un produit sonore sans être séduit par sa nature et son cortège émotionnel. Pourtant dans un contexte professionnel, il est nécessaire d'avoir une écoute objective construite à partir des fondements essentiels du son. Même si celui-ci est fortement dépendant du contexte d'écoute et du type de diffusion, le technicien du son doit néanmoins discerner une approche physique du son.

1. NATURE DU SON

1.1 LE SON

On définira par son, **tout événement pouvant être perçu par nos oreilles**. Cet événement, vient d'une modification mécanique du milieu dans lequel nous sommes immergés. Il s'agit évidemment principalement de l'air (mais nous pouvons aussi entendre des sons sous l'eau). Cette modification du milieu provient d'une source matérielle mise en vibrations. L'étude mécanique de son depuis son origine (émission) à sa réception par notre oreille est l'**acoustique** (Science du son).

1.2 SOURCE SONORE

Le son est la conséquence d'une **interaction mécanique particulière** (choc ou action entretenue) entre deux structures (doigt et corde de guitare, objet qui tombe sur le sol, le vent dans les feuilles d'un arbre...). Les éléments matériels principaux qui produisent le son sont appelés **la source sonore**.

Exemple : *La guitare est la source sonore principale produisant le son (et non le doigt qui pince la corde). Par contre si on jette une tôle métallique sur une autre tôle métallique les deux produisent un son.*

Pour pouvoir émettre un son, la source sonore doit être mise en vibration (mouvement résultant de l'interaction mécanique). Chaque point de la source a un mouvement d'oscillation autour d'une position dite de repos (voir **figure 1-1**).

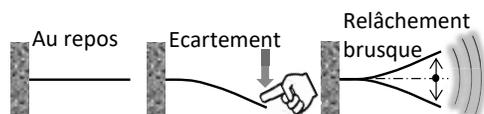


Figure 1-1 : Emission d'un son provoquée par une lame vibrante

Toute caractéristique du son aura pour modèle ce mouvement particulier qui en est l'origine : le mouvement vibratoire ou mouvement d'oscillation.

2. SIGNAL SONORE

Le son étant un événement se développant dans tout l'espace environnant, il est donc assez difficile de représenter la totalité de cet événement. De plus l'exploitation courante du son (à travers notamment la prise du son ou sa restitution par haut-parleurs) n'utilise la plupart du temps qu'une partie de cet événement. On appellera signal sonore la représentation « ponctuelle » de l'événement sonore ou plus exactement celle qui fige la position d'écoute. Par extension, on pourra qualifier de signal sonore, l'ensemble des événements transitant dans une chaîne de traitement et de transmission du son (effets, micro, amplificateur, console de mixage, haut-parleurs...).

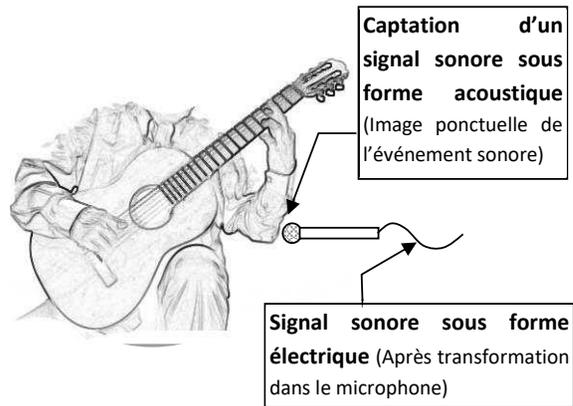


Figure 1-2 : Événement sonore se diffusant dans l'espace environnant

Cependant nous ferons souvent l'amalgame entre le terme « son » et « signal sonore » dans un but de simplification d'écriture.

2.1 CRITERES D'APPRECIATION DU SON

Pour un auditeur, le son véhicule un ensemble d'informations sur son environnement immédiat. On peut limiter à trois types d'informations majeures véhiculées par le son dans nos sociétés :

1. Les informations dues aux modifications dynamiques de notre environnement (objet qui tombe, vent dans les arbres, véhicule sur une route, personne qui marche...)
2. La communication entre personnes (la parole).
3. La musique.

On distingue des éléments d'appréciation plus ou moins importants suivant la nature de l'information. Le premier critère d'appréciation certainement le plus important est l'**intelligibilité** qui est la capacité à comprendre correctement l'information sonore. Ce critère est évidemment différemment apprécié suivant le type d'information et l'importance qu'on lui accorde. Pour les informations dues aux modifications dynamiques de notre environnement deux caractéristiques sont importantes à identifier dans ce cas : la reconnaissance de la source productrice du son et sa position dans l'espace (voiture qui klaxonne, téléphone qui sonne, personne qui crie). On peut trouver également pour les autres types d'informations (2 et 3) des caractéristiques qui découlent de l'intelligibilité.

Le second critère qui peut être lié à l'intelligibilité mais qui est souvent jugé différemment est la « gêne occasionnée ». Cette gêne peut être provoquée par un son trop fort, qui dure trop

longtemps ou par le caractère dissonant. L'imprévisibilité du son est aussi un facteur déterminant pour ce critère.

Le troisième critère qui prend surtout sa valeur dans le cadre du type d'information 3 (la musique) est l'**esthétique** qui est la capacité à trouver le son perçu plus ou moins harmonieux. Dans le cas de l'information liée à l'environnement, ce critère est lié à l'ambiance d'un lieu (chant des oiseaux, bruits de l'océan...). Le **tableau 1-1** dénombre quatre caractéristiques physiques principales intrinsèques à la source sonore :

- **Le temps** (durée du son, début du son).
- **La hauteur** (son plus ou moins grave ou aigu).
- **Le timbre** (son plus ou moins riche ou pauvre...).
- **L'intensité** (son plus ou moins fort).

D'autres caractéristiques physiques dépendent du placement source-auditeur comme : la localisation dans l'espace ou l'orientation par rapport à l'auditeur ou directement de l'auditeur : la conjugaison des stimuli ou l'imprévisibilité.

Critères d'appréciation	Type de son	Caractéristiques globales	Caractéristiques physiques	
Intelligibilité	Environnement	Identification de la source	Hauteur	
			Timbre	
			Durée	
		Localisation dans l'espace	Eloignement de la source (Intensité ...)	
	Orientation par rapport à l'auditeur			
	Parole	Compréhension du vocabulaire	Hauteur	
			Timbre	
			Durée	
	Musique	Identification de l'instrument	Intensité	
			Timbre	
			Durée	
			Intensité	
		Identification des plans sonores (mélodie / rythme / harmonie...)	Hauteur	
			Timbre	
Durée				
Intensité				
Localisation dans l'espace		Hauteur		
		Eloignement de la source (Intensité ...)		
Gêne occasionnée	environnement	Son trop fort	Intensité	
		Son trop long	Durée	
	Parole	Son désagréable	Répétitivité	
			Hauteur	
	Musique	Son agressif	Timbre	
			Localisation dans l'espace	
	Esthétique	environnement	Nature de l'environnement	Timbre / Durée / Intensité / Localisation des sources
			Harmonie générale	Ambiance sonore
Relation avec les autres sens			Conjugaison des stimuli	
Parole		Nature de la voix (femme / homme)	Timbre / Durée / Intensité / Localisation des sources	
		Emotion	Timbre / Durée	
Musique		Nature des instruments	Timbre / Durée / Intensité / Localisation des sources	

Tableau 1-1 : Liaisons entre critères d'appréciation généraux et caractéristiques physiques d'un évènement sonore.

2.2 NOTION DE FREQUENCE

Les caractéristiques physiques principales que nous avons listées proviennent du point de vue de l'auditeur. Le rôle des scientifiques est de quantifier ces caractéristiques et de trouver des instruments de mesure pouvant effectuer cette quantification.

Notamment la hauteur d'un son et le timbre d'un son sont des grandeurs liées à une autre caractéristique quantifiable : la **fréquence** (qui sera étudié au §4.2).

La fréquence d'un événement sonore est une notion relativement simple à saisir, si nous reprenons l'exemple de la **figure 1-1**. Les oscillations transmises à l'air par la vibration de la lame sont dépendantes de la rapidité de la vibration de la lame. Plus la vibration est rapide plus le son semblera aigu, plus la vibration est lente, plus le son semblera grave. La fréquence correspond au nombre d'oscillations par seconde (unité de temps normalisée). L'unité adoptée est le **Hertz** (en hommage au scientifique du même nom) et se note **Hz** derrière la valeur de la fréquence.

Si la lame produit un son de 440 Hz, cela signifie que la lame effectue 440 oscillations par seconde, ce qui est déjà une oscillation très rapide.

Soit **T** la période d'une oscillation (durée d'un aller-retour de la lame de la **figure 1-1**). On peut écrire que la fréquence $f = \frac{1}{T}$

E1-1

2.3 NOTION D'INTENSITE ACOUSTIQUE

L'intensité acoustique perçue par nos oreilles (qui nous permet de convenir qu'un son est plus ou moins fort) est liée à la quantité d'énergie produite par une source par unité de temps (c'est la notion de puissance acoustique) mais aussi par unité de surface. Car cette énergie sonore au cours de sa diffusion se déploie sur des fronts d'onde de plus en plus en grand.

Donc la définition de l'intensité acoustique est la puissance produite par la source, par unité de surface. Et elle est notée **I**.

L'oreille est capable de percevoir des sons d'intensité acoustique variant de 10^{-12} à quelques Watt.m^{-2} . Malgré cette capacité tout à fait remarquable, l'oreille est peu précise en ce qui concerne les variations d'intensité

2.4 NOTION DE NIVEAU SONORE

2.4.1 Le décibel (dB)

Pour traduire la caractéristique physique de l'intensité sonore en une grandeur plus représentative des capacités auditives, on utilise une transformation logarithmique qui sera détaillée dans le **chapitre II : le décibel (dB)**.

Cette transformation est définie de la manière suivante : $L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ Logarithme
décimal

Cette transformation est appelée **niveau sonore en intensité acoustique**. **I** étant l'intensité acoustique du son mesurée en un point donné en Watt/m^2 (noté plus simplement W.m^{-2})

Le Logarithme décimal est tel que pour un chiffre y tel que $y = \log(x)$, on peut écrire que $x = 10^y$. Par exemple si $y = 3$, on peut écrire que $3 = \log(10^3)$ ou $3 = \log(1000)$ → voir **annexe III-1**

I_0 étant en général la référence de l'intensité la plus faible pouvant être perçue par l'oreille (on définit dans ce cas l'échelle des dB_{SPL} (Sound Pressure Level)). Avec $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$, le niveau sonore en dB_{SPL} a pour expression : $L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{10^{-12}}\right)$ E1-2

Lorsque I est égale à une puissance de 10, le calcul du niveau sonore s'avère très facile.

Exemple général :

soit $I = 10^n$, n étant un nombre entier (positif ou négatif), on peut écrire que :

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{10^n}{10^{-12}}\right) \rightarrow L_I = 10 \cdot \log(10^{12} \cdot 10^n) \rightarrow L_I = 10 \cdot \log(10^{12+n}) \rightarrow L_I = 10 \cdot (n+12) \text{ dB}_{SPL}$$

Exemple particulier de calcul : soit $I = 0,1 \text{ W.m}^{-2} \rightarrow L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{0,1}{10^{-12}}\right)$

En suivant la méthode de l'exemple général, on trouve $L_I = 110 \text{ dB}_{SPL}$ (car $0,1 = 10^{-1}$)

Si on multiplie l'intensité acoustique par 10, I devient égale à 1 W.m^{-2} , et dans ce cas L_I augmente de 10 ($L_I = 120 \text{ dB}_{SPL}$).

Une règle simple peut donc se retenir pour le technicien du son : si on décuple l'intensité acoustique (le multiplier par 10) le niveau sonore augmente de 10 dB. Par extension on peut l'appliquer directement à la source sonore : Si nous avons une source sonore qui produit 90 dB_{SPL} , il faudra 10 sources identiques pour obtenir 100 dB_{SPL} et 100 sources identiques pour obtenir 110 dB_{SPL} (on voit l'intérêt des systèmes d'amplifications !!!)

D'autre part, le calcul de niveau sonore est souvent considéré, à tort, comme fastidieux. L'exemple ci-dessus démontre que l'on peut dans pas mal de cas, faire un petit calcul de tête pour évaluer les niveaux sonores. Si le technicien du son ne maîtrise pas ce type de raisonnement, il risque de perdre de la crédibilité professionnelle !!

2.4.2 Evolution graphique du niveau sonore en fonction de l'intensité acoustique

La variation possible d'intensité acoustique en échelle linéaire que l'oreille peut traiter est de :

$$10^{-12} \text{ W.m}^{-2} \text{ à } 10 \text{ W.m}^{-2}$$

La variation possible d'intensité acoustique correspondante pour notre audition en échelle logarithmique est de :

$$0 \text{ dB}_{SPL} \text{ à } 130 \text{ dB}_{SPL}$$

On s'aperçoit rapidement de l'avantage de l'échelle logarithmique pour l'appréciation de l'intensité sonore.

0 dB_{SPL} correspond au seuil d'audibilité théorique de l'oreille et c'est à 120 dB_{SPL} que l'on considère le seuil de douleur

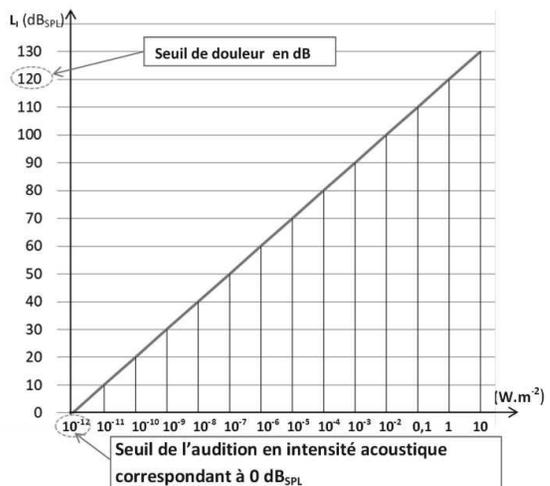


Figure 1-3 : Evolution graphique du niveau sonore en dB_{SPL} en fonction de l'intensité acoustique I reçue par l'oreille

3. REPRESENTATIONS DU SIGNAL SONORE

3.1 REPRESENTATION TEMPORELLE

Il s'agit d'une représentation plane mettant en relation l'amplitude de l'oscillation en fonction du temps. Des appareils comme les oscilloscopes ou les logiciels d'édition de son donnent ce type de représentation.

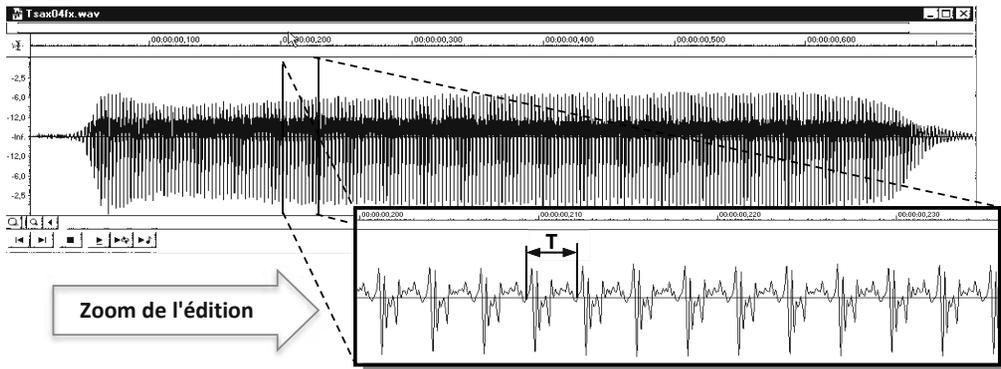


Figure 1-4 : Représentation temporelle d'un son de saxophone alto. On peut remarquer sur le zoom, la périodicité du signal : le son est donc ici qualifié de signal harmonique. La vue globale montre par contre l'évolution globale de l'intensité du son.

Lors d'une opération d'enregistrement d'une piste audio, les logiciels d'édition ou les studios d'enregistrements virtuels (**figure 1-4**), permettent une visualisation des événements sonores de plus en plus précise sous la forme d'un signal. Suivant l'exploitation professionnelle du signal sonore, il est possible d'avoir différentes échelles temporelles. Par exemple en audiovisuel le son est contraint par rapport aux pistes vidéo obligeant l'utilisation de norme audiovisuelle (Timecode). Cette précision est rendue nécessaire pour les travaux de calage entre pistes audio ou pistes audio-vidéo. Dans le cas du studio d'enregistrement il est nécessaire d'avoir des échelles temporelles permettant de visualiser les événements sonores les plus rapides (quelques dizaines de microsecondes).

D'autres caractéristiques du son plus globales apparaissent :

- l'évolution de l'intensité du son (enveloppe du son)
- l'évolution du timbre (complexité du signal)

3.2 REPRESENTATION SPECTRALE

Le contenu fréquentiel est évidemment inaccessible avec la représentation temporelle. Des appareils comme les analyseurs de spectre permettent de transformer le signal audio en son contenu spectral. Le principe consiste à filtrer le signal avec des filtres passe bandes plus ou moins larges (suivant la finesse de l'analyse souhaitée) pour en déduire l'amplitude ou le niveau. On distingue deux types d'analyse :

- L'analyse à Δf constant. Plus la largeur de bande est étroite (1 Hz par exemple), plus le spectre sera précis. C'est ce qui est utilisé pour l'analyse des timbres des instruments de musique.

- L'analyse à $\Delta f/f_c$ constant (où f_c représente la fréquence de la hauteur centrale de Δf). Il s'agit ici de privilégier l'équilibre perceptif des fréquences : la hauteur qui évolue comme le logarithme de la fréquence. Deux types d'analyse sont normalisés : analyse par bande d'octave et par tiers d'octave).

Propriété : la fréquence de la hauteur centrale f_c d'une bande de fréquence

$\Delta f = f_2 - f_1$ est telle que $\frac{f_c}{f_1} = \frac{f_2}{f_c}$

La fréquence centrale est donc :

$$f_c = \sqrt{(f_1 \cdot f_2)} \quad \boxed{E1-3}$$

3.2.1 Analyse par bande d'octaves

On appelle **octave**, l'intervalle entre deux fréquences tel que $\frac{f_2}{f_1} = 2$

$\boxed{E1-4}$

La fréquence centrale est donc :

$$f_c = \sqrt{(f_1 \cdot f_2)} \quad \text{à partir de la relation } \boxed{E1-3}$$

$$\Leftrightarrow f_c = f_1 \cdot \sqrt{2} \quad \text{en remplaçant } f_2 = 2 \cdot f_1$$

L'écart de fréquence de la bande n'est pas constant mais égal à :

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

$$\Leftrightarrow \Delta f = f_1 \quad \text{en remplaçant } f_2 = 2 \cdot f_1$$

On remarque que pour les bandes de fréquences écartées d'un intervalle d'octave, le rapport $\Delta f/f_c$ est constant et égal à :

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_1}{\sqrt{2} \cdot f_1} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7$$

Les analyseurs de spectre et les égaliseurs graphiques que l'on peut rencontrer en audio travaillent par bande d'octave (ou tiers d'octave voir § suivant). Il est rarement utile dans l'exploitation sonore de décomposer plus précisément le spectre.

Les fréquences centrales des bandes d'octave sont normalisées :

31,5 Hz / 63 Hz / 125 Hz / 250 Hz / 500 Hz / 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz / 8000 Hz

La bande passante est doublée à chaque bande d'octave supérieure.

Exemple : Considérons un son dont le niveau sonore en intensité est constant pour toutes les fréquences (définition du bruit blanc – voir § 5.4).

Si on effectue une analyse par bandes d'octave pour ce son. Chaque bande étant le double de la bande précédente, l'analyse rendra compte d'un doublement d'énergie sonore chaque fois que l'on passera à une bande supérieure (principe de superposition). Le niveau par bande d'octave augmente de 3 dB :

$$L_{(oct+1)} = L_{(oct)} + 10 \cdot \log(2) \quad \Leftrightarrow \quad L_{(oct+1)} = L_{(oct)} + 3 \text{ dB}$$

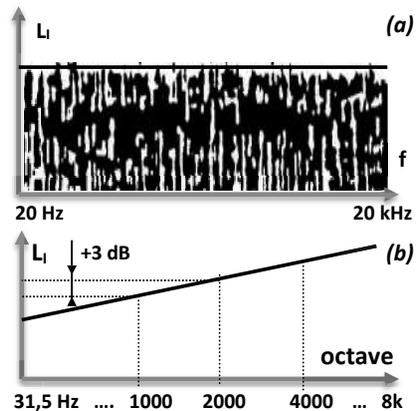


Figure 1-5 : Représentation spectrale d'un bruit blanc (a) et analyse par bandes d'octave (b). L'énergie sonore d'un bruit blanc augmente de 3 dB/octave

3.2.2 Analyse par tiers d'octave

On appelle tiers octave, l'intervalle entre deux fréquences tel que $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$

La fréquence centrale devient cette fois :

$$\begin{aligned} f_c &= (f_1 \cdot f_2)^{1/2} \\ \Leftrightarrow f_c &= f_1 \cdot 2^{1/6} \quad \text{en remplaçant } f_2 = 2^{1/3} \cdot f_1 \end{aligned}$$

L'écart de fréquence de la bande est égal à :

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_2 - f_1 \\ \Leftrightarrow \Delta f &= 2^{1/3} \cdot f_1 - f_1 \quad \text{en remplaçant } f_2 = 2^{1/3} \cdot f_1 \\ \Leftrightarrow \Delta f &= (2^{1/3} - 1) \cdot f_1 \end{aligned}$$

On remarque que pour les bandes de fréquences écartées d'un intervalle d'un tiers d'octave, le rapport $\Delta f/f_c$ est constant et égal à :

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{(2^{1/3}-1) \cdot f_1}{2^{1/6} \cdot f_1} \Leftrightarrow \frac{\Delta f}{f_c} = \frac{(2^{1/3}-1)}{2^{1/6}} \approx 0,23$$

Les fréquences centrales des bandes de tiers d'octave sont normalisées :

20 / 25 / 31,5 / 40 / 50 / 63 / 80 / 100 / 125 / 160 / 200 / 250 / 315 / 400 / 500 / 630 / 800 / 1000 / 1250 / 1600 / 2000 / 2500 / 3150 / 4000 / 5000 / 6300 / 8000 / 10000 / 12500

Exemple pour un son de clarinette :

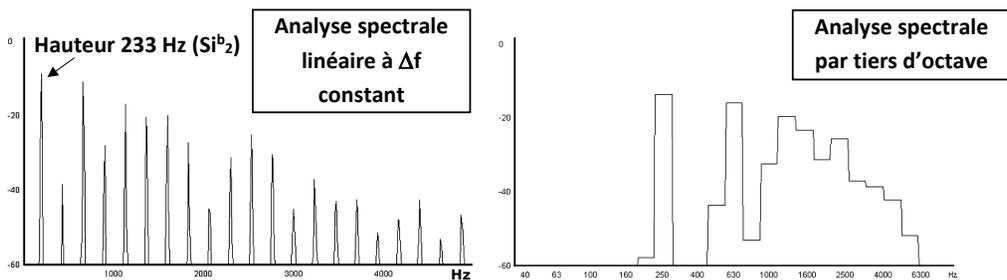


Figure 1-6 : Analyse comparative de deux analyses fréquentielles (l'une par bande de fréquence constante, l'autre par bande de tiers d'octave) du même son. La seconde analyse est plus courante en audio-visuel.

3.2.3 Sonagramme

Le sonagramme d'un son, met en relation les fréquences composantes du son avec le temps.

Cette représentation apporte donc des renseignements sur l'évolution d'un spectre dans le temps. De plus l'épaisseur d'un trait représente l'intensité relative de la fréquence par rapport aux autres. Il s'agit juste d'une appréciation qualitative. Un trait épais sera perçu comme une fréquence forte, alors qu'un trait fin sera perçu comme une fréquence faible.

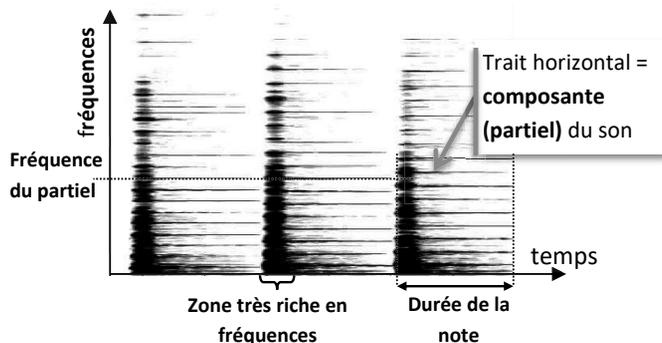


Figure 1-7 : Sonagramme de trois notes successives de la gamme diatonique de piano. La répartition des fréquences très riche au départ (transitoire), tend à s'appauvrir au cours du temps.