

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.1 Qu'est ce qu'un son

- La perception du son
- Une relation à la lumière
- Quelques définitions

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

- L'harmonie en musique
 - Structure d'un morceau de musique
 - Tonalité/Gammes/Accords/notes
 - Principe de tension/résolution

2.3 Analyse d'un son

- Le volume
- Décomposition du signal / ondelettes
 - Visualiser le son dans Touch Designer
- Analyse de la hauteur des notes
- Analyse du timbre d'un instrument
- Détection d'un rythme
- Descripteurs de sons

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.1 Qu'est ce qu'un son

La Perception du son

Dans notre oreille nous possédons : 15000 cellules ciliées (contre 7 millions de cônes et 120 millions de bâtonnets pour la vue) qui vibrent en fonction des différentes fréquences du son

Notre perception auditive est approximative, une dizaine de degrés
De 20 à 20 000 Hz (facteur 1000) 10 octaves

Vidéo explicative de l'oreille interne

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.1 Qu'est ce qu'un son

D'intimes relations avec la lumière

.La vue et l'ouïe : des sens privilégiés

.Son et lumière sont des ondes (et particules photons/phonons)

Phénomènes analogues : diffraction (prisme), interférence (casques anti-son), effet dopler (radar voiture, astronomie),...

Applications selon les mêmes principes : échographie (ultrasons), sonar (sound navigation and ranging)/lidar (par laser),...

Différence :

Le son nécessite un milieu matériel comme l'air (pas dans le vide)

Son : 340 m/s
20 à 20000Hz

Lumière : 300 000 km/s
 $4 \cdot 10^{14}$ $8 \cdot 10^{14}$

Anecdote : la touche Fa7 d'un piano à la même longueur d'onde qu'un micro-onde, 12.2cm (mais pas la même fréquence comme la vitesse est différente)

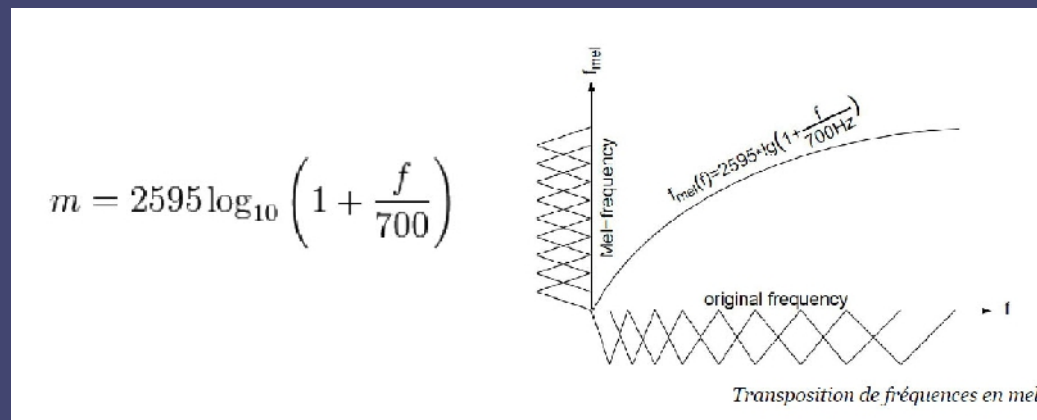
2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.1 Qu'est ce qu'un son

Quelques definitions

Fréquence : vitesse de répétition d'un signal périodique, pour une onde il s'agit de sa vitesse d'oscillation qui correspondra à la hauteur de la note.

Notre perception des fréquences se fait de manière logarithmique. En effet, à chaque octave, la fréquence d'un son double, alors que notre oreille a tendance à les percevoir de manière linéaire. On parle alors de « mel scale », une échelle introduite par Newman, Stevens et Volkman (en 1937) qui la définissent par cette formule :



Cette échelle correspond à notre écoute des sons. On parle du pitch qui correspond plus exactement à notre perception d'un son alors que la fréquence correspond à sa réalité physique.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.1 Qu'est ce qu'un son

harmonique : il faut se reporter au phénomène sonore lui-même. Chaque son émis par un corps sonore mis en vibration produit une note fondamentale que l'oreille perçoit et dont on peut aussitôt identifier la hauteur. Dans le même temps, sont émis d'autres sons, appelés harmoniques, que l'on peut entendre par exemple en écoutant une note sur un piano au cours de son évolution. Les harmoniques ont des fréquences multiples de la note fondamentale ($2f$, $3f$, $4f$, $5f$...)

Le timbre : est ce qui caractérise deux sons de la même note produits par deux instruments différents. L'analyse des fréquences d'un spectre va alors faire ressortir les différentes harmoniques et sous harmoniques émis par un instrument et la nature de ce son. Cette approche est utilisée en reconnaissance vocale.

Le spectre sonore : Tous les sons peuvent se décomposer en une somme de sons purs, qu'on appelle partiels de ce son.

Les sons musicaux possèdent une décomposition spectrale approximativement harmonique ; mais le son d'instruments sonores comme une cloche peut aussi se décomposer en partiels inharmoniques.

Visualiser le spectre Touch Designer

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

Sans rentrer trop en profondeur dans la théorie musicale, on peut assez facilement déduire d'un morceau certaines informations essentielles à son interprétation visuelle. On cherche à déceler des informations de rythmes, de mélodies, de tensions et de résolutions pour détecter les événements importants permettant de créer un véritable dialogue..

la musique tonale est construite autour d'une tonalité comme Do majeur. Elle se base sur des principes d'harmonie entre les notes. En Do majeur, on utilise 7 notes principales et tout gravitera autour du Do. (la tierce Mi est alors majeur, Mi mineur)

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

Nous avons vu que les harmoniques d'une note sont les notes de fréquences multiples.
Si l'on prend le do à 32,7 Hz noté do-1, les harmoniques seront donc :

Harmonique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquence (Hz)	32,7	65,4	98,1	130,8	163,5	196,2	228,9	261,6	294,3	327	359,7	392
Note	do-1	do1	sol1	do2	mi2	sol2	sib2	do3	ré3	mi3	fa#3	sol3
Degré	1	1	5	1	3	5	7-	1	2	3	5b	5

On appelle ici degré le numéro de la note au sein même de la gamme. Ainsi en Ré Majeur la 5ème note appelée quinte aura le même rôle mélodique et le même rapport à sa fondamentale.

On s'aperçoit donc que dans la note do, on peut entendre un sol (la quinte), un mi (tierce majeur).

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

le chromatisme désigne la division de l'octave en douze intervalles égaux (un demi-ton) ; une musique chromatique utilisera donc douze demi-tons ;

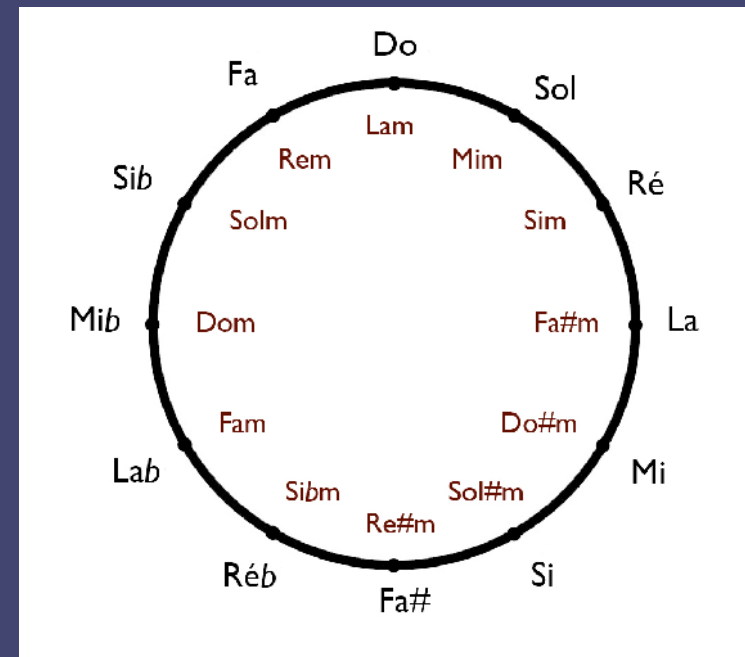
Le cycle des quintes :

Pythagore (-500) note que le rapport géométrique le plus simple après l'octave, la quinte ($3/2$) est parfaitement harmonique et, superposé, donne 12 notes également étagées, retournant presque à la note de départ.

L'écartement fondamentale/quinte a été très très légèrement rétréci pour obtenir des octaves parfaitement juste dans la gamme tempérée. (XVI^e s)

En commençant par une note quelconque et en montant par intervalles de quintes justes, on passe par toutes les notes de la gamme chromatique tempérée avant de retomber sur la note initiale.

Comme cet espace est circulaire, il est aussi possible de le parcourir en sens inverse : l'intervalle entre chaque note est alors une quarte juste (le renversement de la quinte juste). Le cycle des quintes est donc aussi le cycle des quartes.



2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

En acoustique, un intervalle désigne le rapport des fréquences de deux sons.

Un intervalle est pur (ou « naturel ») lorsque le rapport des fréquences de ses deux notes est égal à une fraction de nombres entiers simples. Il correspond au mélange de deux sons contenant des fréquences harmoniques voisines.

Principaux rapports acoustiques simples :

Unisson	1/1
Ton majeur	9/8
Tierce mineure	6/5
Tierce majeure	5/4
Quarte	4/3
Quinte	3/2
Sixte majeure	5/3

Quarte + Quinte : $4/3 * 3/2 = 12/6 = 2 \rightarrow$ un octave

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

A partir de ces 12 demi tons, les deux gammes usuelles sont :

La gamme majeure :

tonique, seconde majeur, tierce majeur, quarte, quinte, sixte majeur et septieme majeur.

Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si

La gamme mineure :

tonique, seconde majeur, tierce mineur, quarte, quinte, sixte mineur, septieme mineur

Do, Ré, Mib, Fa, Sol, Lab, Sib

→ Les degrés 3, 6 et 7 sont altérés par un bémol

Il existe ensuite autant de gammes que de possibilités de combinaisons des 12 demi tons.

La quarte et la quinte restent souvent un pilier de l'harmonie.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

Tension – Résolution

La musique tonale est construite sur une alternance de moments de tension et de moments de détente.

La dissonance (intervalles de seconde ou de septième, par exemple) est ressentie comme une tension nécessitant une détente — cette dernière consistera en une résolution sur la consonance de base la plus proche (la tonique le plus souvent)

La sensible, VIIe degré des modes majeur et mineur, par son attraction vers la tonique joue un rôle important pour créer de la tension, de la même manière la quinte (du fait du cycle des quintes) créer un mouvement descendant vers la tonique.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

Construction d'un Accord

A partir de la tonalité choisie on va pouvoir créer des accords (groupe de notes). On ajoute très souvent la tierce pour sa couleur (majeur/mineur) et la quinte (sous harmonique), on pourra ensuite enrichir l'accord d'autres couleurs (6e, 7e, 9e,...)

En Do majeur, si l'on veut un accord de basse ré, on prendra sa tierce (ré,mi,fa → FA) et sa quinte (ré,mi,fa,sol,la → LA). L'intervalle ré-fa d'un ton et demi correspond à un intervalle de tierce mineure, on aura donc un accord de ré mineur lorsqu'on joue en Do majeur.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

L'accord de tension principalement utilisé sera l'accord de degré 5 avec une 7e mineur soit en Do majeur :
Sol, Si, Ré et Fa.

On remarquera qu'il possède que des notes de tensions. Ici Si la sensible va créer avec Fa un intervalle bien particulier de triton (trois tons = quinte diminuée) renforçant la tension à l'extrême. Il existe ensuite de nombreuses substitutions (variantes) à cette accord de tension. Il sera possible en musique de remplacer un accord par un autre si ils sont suffisamment proche harmoniquement. Sans rentrer dans les détails mais parfois simplement en changeant l'ordre des notes on obtient un autre accord comme ré mineur 6, 11 avec ré à la basse.

Do majeur, Do mi sol permettra alors de résoudre cette tension.

En résumant les accords de basse Do, Mi et La (1,3,6) vont avoir tendance à résoudre et les accords Ré, Fa, Sol, Si à créer une tension. Leur rôle peut ensuite changer suivant le contexte.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.2 Théorie musicale : la musique tonale

Construction d'un morceau

En musique on répète très souvent des motifs et des suites d'accords.

Un style de musique comme le jazz improvisé a en réalité une structure très précise, quasi mathématique.

On a une grille composé de suites d'accords A, B,... qui vont structurer le morceau, par exemple de cette manière AABA.

Le refrain ou le thème viennent ensuite se placer sur cette structure qui se répète.

Il faut aussi prendre en compte qu'une note seule ne prend sens que dans un enchaînement de notes, qu'il y a résolution que lorsque l'on passe d'un état de tension à un état de repos. Les phrases que l'on peut détecter à l'aide de silences ou de grands changements de notes permettront ensuite de structurer la mélodie.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

2.3 Analyse d'un son

La musique est le plus souvent enregistrée sous forme d'ondes échantillonnées. Le format WAV (contraction de « WAVEform audio file format ») est en fait un simple conteneur permettant de recevoir différents formats comme le MP3, le WMA, ou encore le PCM. Le format PCM est le plus courant car non destructif, il échantillonne à intervalle régulier le signal analogique. L'échantillonnage est généralement de 11 025 à 48 000 valeurs par seconde sur 2 canaux (en stereo).

Différentes informations peuvent être extraites de cette onde sonore. Les plus courantes sont l'amplitude et le spectre des différentes fréquences de l'onde. Il est ensuite possible d'en déduire les notes correspondantes, la fréquence fondamentale et de chercher à retrouver des informations de rythmes, de basses ou de percussions.

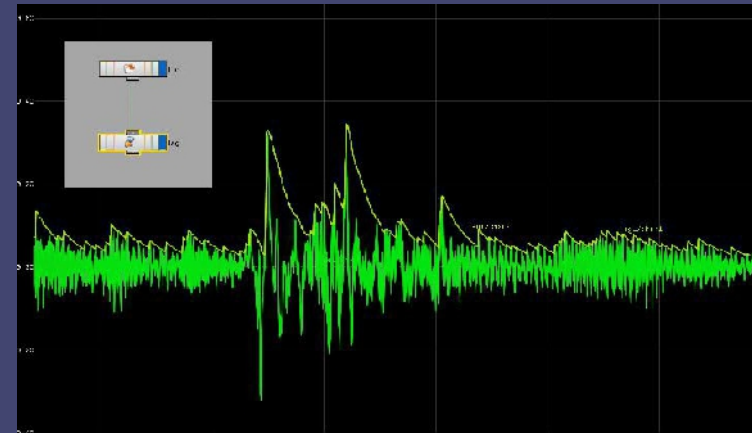
2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

Récupérer le volume

Cette onde sonore oscille positivement et négativement. Pour récupérer l'amplitude du son, ce qui se rapproche le plus de l'intensité générale perçue, il faut retrouver l'enveloppe positive extérieure de l'onde. Pour ce faire, différentes approches sont possibles, on utilise un retard sur les valeurs absolues de l'onde, les valeurs absolues les plus élevées dans une certaine région ou encore la transformée de Hilbert.

La méthode la plus simple consiste à utiliser uniquement les valeurs positives de l'onde. Le calcul d'une enveloppe plus globale peut se faire en conservant seulement la valeur la plus élevée autour de chacun des points de la courbe et en interpolant ces résultats comme le propose le noeud «*enveloppe*» du logiciel Houdini et Touch Designer.



2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

Décomposition du signal

En analysant l'onde sonore, il est possible de connaître ses différentes fréquences. Celles-ci vont permettre d'en déduire les notes, mais aussi plus généralement la quantité de graves, d'aigues et la répartition des différentes fréquences. Pour ce faire, on utilise une transformée de Fourier (FT) sur un petit échantillon du signal (STFT). Une transformée de Fourier décompose une onde en une somme de cosinus ou de sinus de différentes fréquences. L'analyse de ces fréquences va se faire par échantillon à chaque image. L'algorithme « fast fourier transform » (FFT) est très rapide et très utilisé. On connaît grâce à cette analyse les quantités des différentes fréquences qui composent une onde.

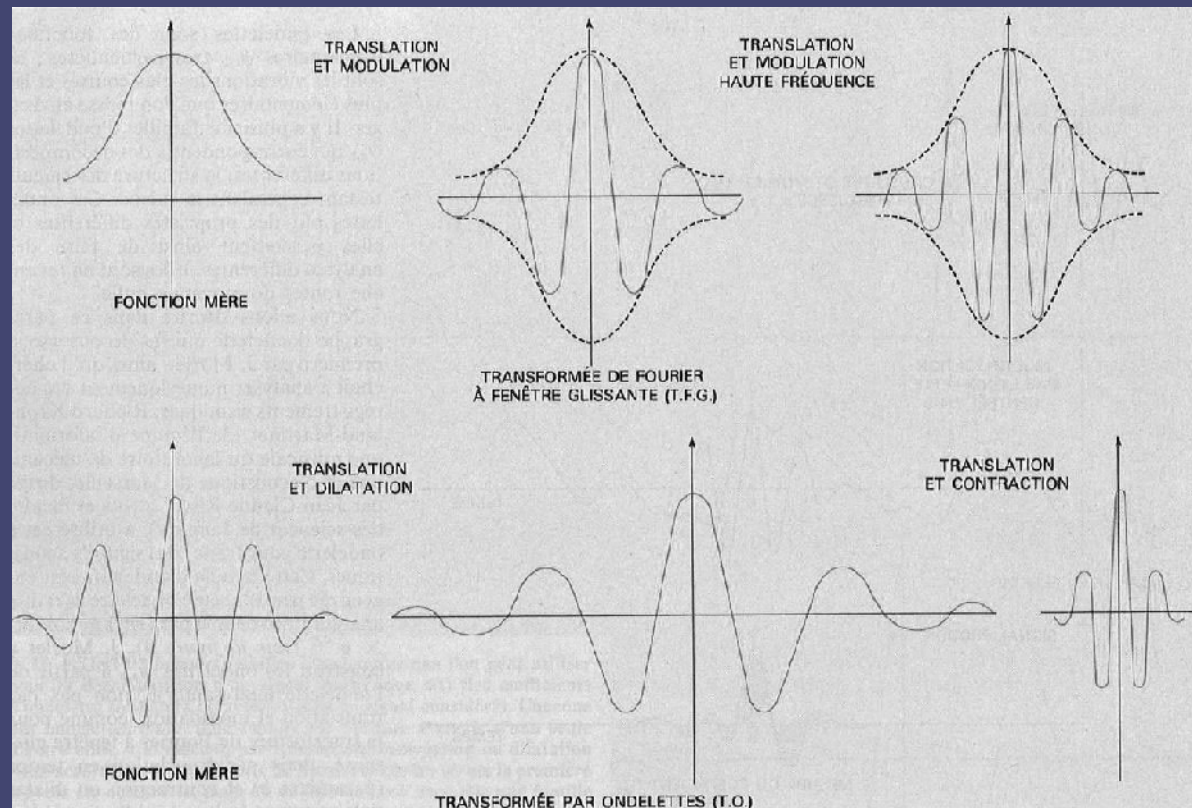
On analyse de petits échantillons à travers une fenêtre glissante qui se déplace pour segmenter le signal. Pour éviter les artefacts et amortir les sinusoides dans le temps, le signal est multiplié par une fonction qui atténue les valeurs d'entrée et de sortie (rectangulaire, triangulaire, de Hamming, etc.).

Une transformation souvent utilisée est la transformation de Gabor qui utilise une fenêtre gaussienne pour l'analyse des signaux. On peut aussi utiliser un « overlap », une zone qui se superpose entre les différents morceaux analysés définis en pourcentage.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

Il est aussi possible de décomposer le signal en ondelettes (au lieu de cosinus/sinus). Les fenêtres symétriques (de Gabor par exemple) sont remplacées par des signaux localisés. Les deux langages se complètent et les STFT (short time fourier transform) sont toujours utilisés dans de nombreux cas.



2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

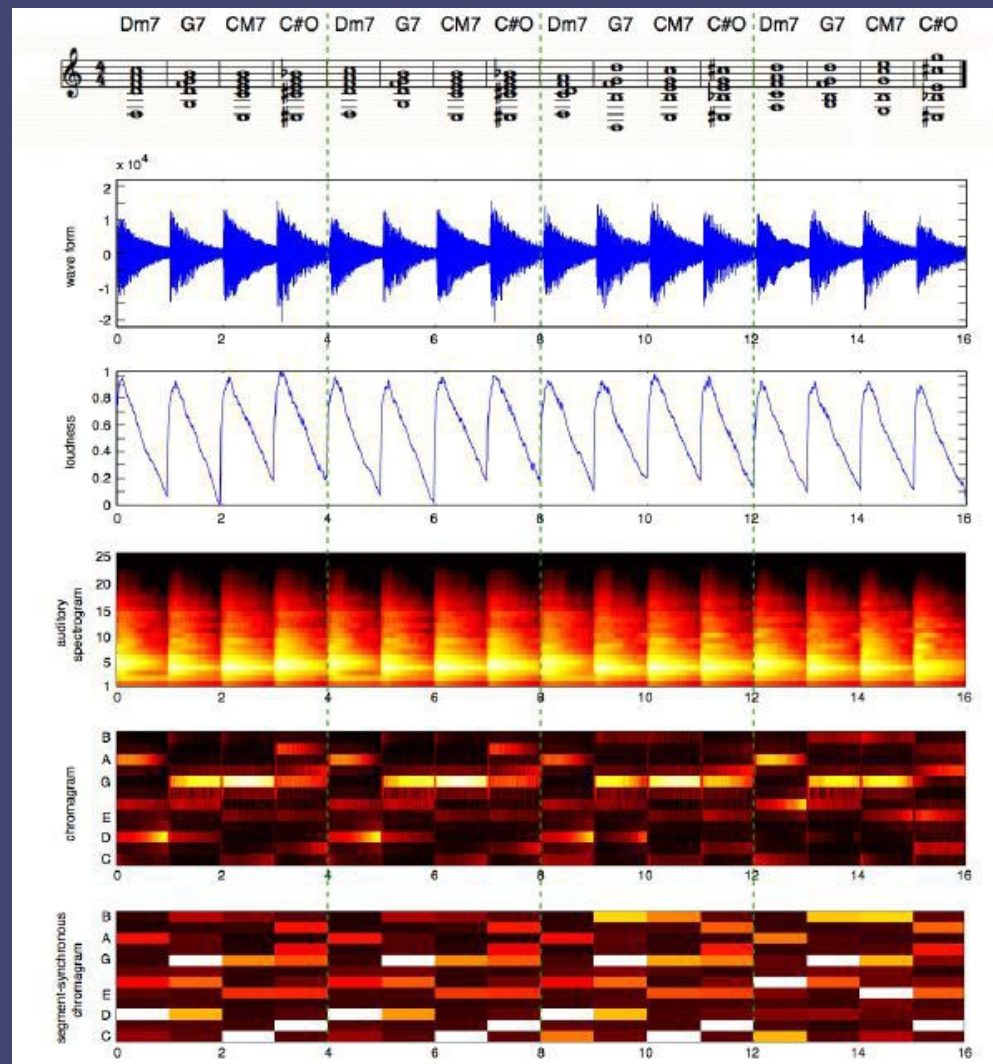
On remarque que les zones de basse fréquence sont composées de moins d'informations que les zones de haute fréquence, lorsque l'on bascule dans une échelle logarithmique. (un octave aigue possède un plus large spectre de fréquences à analyser qu'un octave grave). Une approche appelée « Constant Q Transform » consiste à analyser les fréquences avec une résolution répartie géométriquement, c'est-à-dire que chaque octave, découpée par bandes de fréquences sera analysée avec une résolution constante.

Cette technique analyse chaque domaine de fréquences à l'aide d'une fenêtre qui lui permet d'adapter la résolution ; ainsi, les zones à basse fréquence auront sur une échelle logarithmique autant d'informations que les zones à haute fréquence. Elle sera plus coûteuse qu'une FFT classique, mais permet d'obtenir des informations beaucoup plus précises pour l'analyse musicale d'un signal. On peut alors étudier l'intensité des fréquences des différentes notes en étudiant le son par demi-tons. Les fréquences correspondant à une note, indépendamment de l'octave, vont être ajoutées entre elles pour obtenir une quantité de fréquences pour chaque demi-ton. Les fréquences peuvent être relativisées entre elles, en considérant plus fortement les fréquences qui ressortent fortement et en atténuant les fréquences plus éloignées de la mélodie principale. On aura ainsi la répartition chromatique de ces fréquences du do au si (avec les différents bémols) que l'on appelle un chromagramme. La lecture de ce spectre chromatique permet de faire ressortir les accords et une mélodie.

2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

De haut en bas : des accords, le signal audio, l'intensité du signal, l'analyse spectrale, le chromagramme et le chromagramme normalisé.

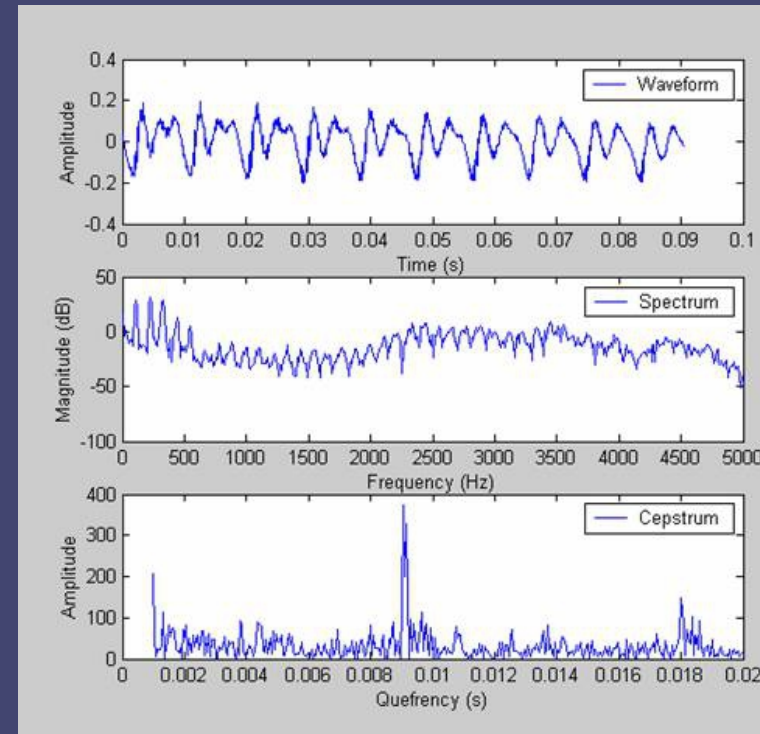


2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

Pour analyser plus finement cette harmonie et les différentes harmoniques d'un signal, on utilise aussi le « Cepstral transform » ou le « Cepstrum » (Cepstre en français). On parle de « Melfrequency cepstral coefficients » (MFCCs). Il s'agit de la transformée en cosinus discrète du logarithme du spectre d'un signal. On pourrait l'assimiler au spectre d'un spectre, cela permet de déterminer la fréquence fondamentale d'un signal en étudiant la repartition de ces fréquences. En effet, une note va influencer le spectre audio à l'aide de ses différentes harmoniques de manière périodique. Le premier pic sur ce cepstrum permet de retrouver la fréquence fondamentale du son, par analogie entre la période du signal et la note.

Cette technique permet aussi d'identifier le timbre de différents instruments. Le timbre est ce qui caractérise deux sons de la même note produits par deux instruments différents. L'analyse des fréquences d'un spectre va alors faire ressortir les différentes harmoniques et sous-harmoniques émis par un instrument et la nature de ce son. Cette approche est utilisée en reconnaissance vocale.

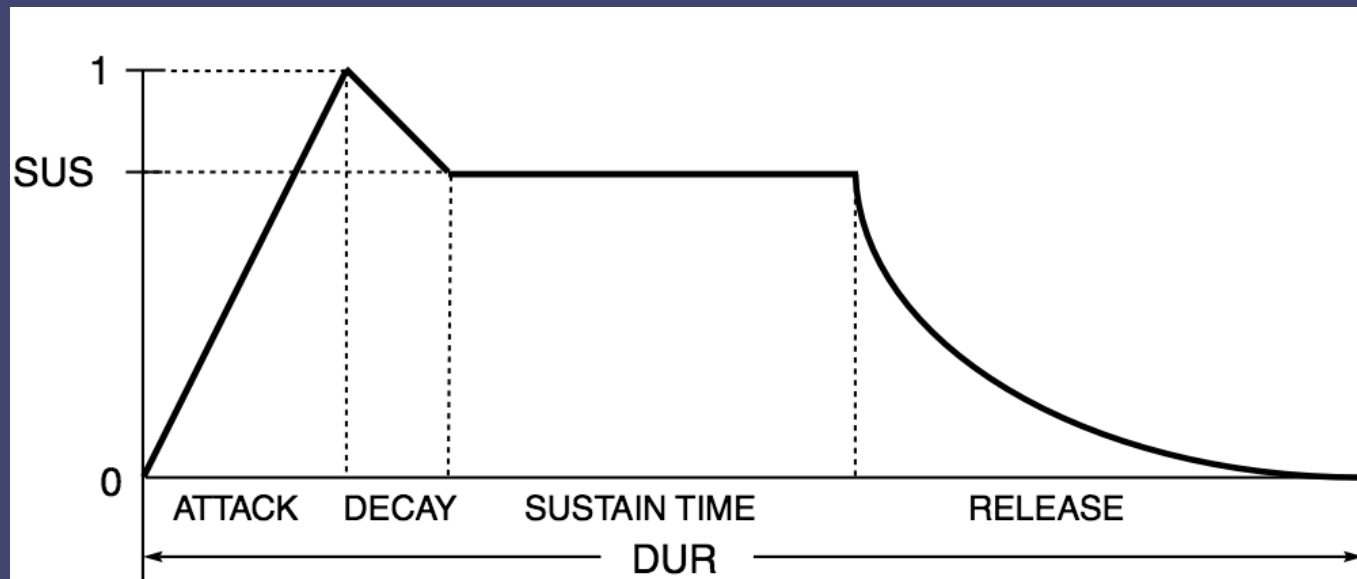


2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

On peut dans un second temps utiliser différents traitements à partir de ces informations pour en déduire des informations de structure ou de rythme. Une approche consiste à tracker les données dans le temps pour étudier leurs évolutions, détecter des ruptures et créer alors différents marqueurs.

Un son est généralement modélisé par ces différents paramètres : Attack, Decay, Sustain et Release.



2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

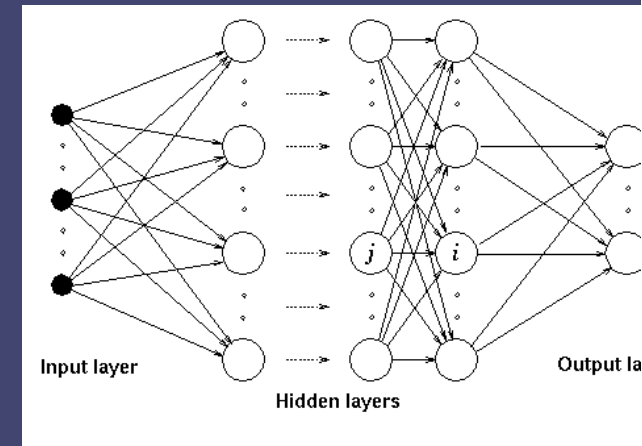
On s'intéresse plus particulièrement aux attaques, qui marquent l'arrivée d'un son que l'on identifiera comme un événement. Cela sert à segmenter la piste son et à étudier la structure d'un morceau.

L'étude du rythme d'un morceau est assez complexe, on y retrouve trois types d'approches :

« segment and classify » qui utilise des méthodes d'apprentissage (réseaux de neurones ou modèles de Markov),

« match and adapt » qui cherche à faire correspondre différents modèles de rythmes à différentes vitesses

et « separate and detect » qui traite le signal pour extraire la percussion avant d'identifier des événements.



2- Comprendre et Analyser un son, la musique

2.3 Analyse d'un son

Concrètement, on peut s'intéresser aux différents descripteurs du son, que l'on va utiliser pour animer à l'aide d'un fichier son. J'ai pu assister à la représentation de Partitura 2.0 (Ligeti) réalisé en 2012 par David Quayola à la cité de la musique à Paris. Ce projet propose une visualisation de la musique par l'intermédiaire de systèmes temps réel interactifs basés sur une captation audio lors d'un concert avec un violon ou un piano. L'interaction proposée utilise pour cela ces différents descripteurs :

amplitude : l'intensité du son ;

spread : l'étalement des différentes fréquences ;

centroid : le barycentre de ces fréquences, la fréquence moyenne ;

pitch : la fréquence fondamentale de l'onde au temps courant ;

FFT : l'analyse spectrale ;

mel : le spectre ;

constant Q : un chromagramme avec l'intensité de chaque note.

Il lie ensuite ces différents paramètres avec des systèmes visuels pour créer des règles plus ou moins complexes de réaction face à ces différentes informations. On parle alors de « *mapping* ». Le résultat est assez spectaculaire, des visuels très riches bougent en parfaite harmonie avec la musique.