

Du son au modèle sonore

HMIN 316 Son et musique

Sylvain Daudé <sylvain.daude@umontpellier.fr>

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac

- ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI

- ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac

- ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI

- ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre

- ▶ Le son

- ★ Aspects physiques et perceptifs
 - ★ Représentation numérique
 - ★ Algorithmes incontournables : FFT, filtrage
 - ★ Algorithmes de synthèse : grandes familles

- ▶ La musique

- ★ Principes
 - ★ Représentations numériques

- ▶ Conception sonore paramétrée haut-niveau

- ▶ Musique assistée par ordinateur (MAO)

- ▶ Intégration dans un projet

- Logiciels

- ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore

- Matériel disponible

- ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre
- Logiciels
 - ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore
- Matériel disponible
 - ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son
 - ▶ Casques, casques+micros, doubleurs
 - ▶ Remarques :
 - ▶ Utilisés uniquement au lab IT
 - ▶ Si vous avez un bon casque, amène-le

Présentation de l'UE

- Thèmes du semestre
- Logiciels
 - ▶ tous gratuits mais certains fonctionnent uniquement sur Windows ou Mac
 - ▶ à installer sur votre machine : FMod Studio, LMMS, Unity3D, Audacity, MuseScore
- Matériel disponible
 - ▶ Claviers, pads, contrôleurs MIDI
 - ▶ Enregistreur, microphone, carte son
 - ▶ Casques, casques+micros, doubleurs
 - ▶ Remarques :
 - ★ Utilisables uniquement au bât 16
 - ★ Si vous avez un bon casque, prenez-le.

Evaluation

- 1 évaluation par contrôle de connaissance (coef 2)
- 1 évaluation par rendu de TP (coef 3)
 - ▶ par groupe de 2
 - ▶ rendu = vidéo
 - ▶ on note le TP + initiatives personnelles, pas la qualité vidéo
- 1 évaluation par projet (coef 5)
 - ▶ par groupe de 2 ou 3
 - ▶ projet mutualisable avec les autres UEs
 - ▶ barème : musique 5 / bruitages 5 / intégration 5 / transversal (rapport, soutenance, travail d'équipe...) 5
 - ▶ rendu = (1) vidéo dont démo ou (2) rapport + démo
 - ▶ points importants : sons et musiques dynamiques, adaptés à l'ambiance du projet, conçus soigneusement.

Evaluation

- 1 évaluation par contrôle de connaissance (coef 2)
- 1 évaluation par rendu de TP (coef 3)
 - ▶ par groupe de 2
 - ▶ rendu = vidéo
 - ▶ on note le TP + initiatives personnelles, pas la qualité vidéo
- 1 évaluation par projet (coef 5)
 - ▶ par groupe de 2 ou 3
 - ▶ projet mutualisable avec les autres UEs
 - ▶ barème : musique 5 / bruitages 5 / intégration 5 / transversal (rapport, soutenance, travail d'équipe...) 5
 - ▶ rendu = (1) vidéo dont démo ou (2) rapport + démo
 - ▶ points importants : sons et musiques dynamiques, adaptés à l'ambiance du projet, conçus soigneusement.

Evaluation

- 1 évaluation par contrôle de connaissance (coef 2)
- 1 évaluation par rendu de TP (coef 3)
 - ▶ par groupe de 2
 - ▶ rendu = vidéo
 - ▶ on note le TP + initiatives personnelles, pas la qualité vidéo
- 1 évaluation par projet (coef 5)
 - ▶ par groupe de 2 ou 3
 - ▶ projet mutualisable avec les autres UEs
 - ▶ barème : musique 5 / bruitages 5 / intégration 5 / transversal (rapport, soutenance, travail d'équipe...) 5
 - ▶ rendu = (1) vidéo dont démo ou (2) rapport + démo
 - ▶ points importants : sons et musiques dynamiques, adaptés à l'ambiance du projet, conçus soigneusement.

Exemples de projets

- Deep Sea
- Wizard VR
- Garbage Soul Reaper
- The Last Room
- Le loup-garou de Thiercelieu : Cupidon Voyante Légende
- Museum
- You can not escape (2'18)
- Jolly Roger
- Don't be blind anymore

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Définition

- Son = sensation auditive engendrée par une vibration acoustique
- pour qu'il y ait un son, il faut :
 - ▶ une source sonore qui crée la vibration
 - ▶ un media acoustique capable de la transmettre
 - ▶ un auditeur capable de l'entendre
- vitesse dans l'air : 340 m/s

Définition

- Son = sensation auditive engendrée par une vibration acoustique
- pour qu'il y ait un son, il faut :
 - ▶ une source sonore qui crée la vibration
 - ▶ un media acoustique capable de la transmettre
 - ▶ un auditeur capable de l'entendre
- vitesse dans l'air : 340 m/s

Définition

- Son = sensation auditive engendrée par une vibration acoustique
- pour qu'il y ait un son, il faut :
 - ▶ une source sonore qui crée la vibration
 - ▶ un media acoustique capable de la transmettre
 - ▶ un auditeur capable de l'entendre
- vitesse dans l'air : 340 m/s

Petits calculs

- On entend un éclair 3 secondes après l'avoir vu, à quelle distance était-il ?
 - ▶ réponse (avec l'approximation que la lumière est instantanée) :
 $d = v \times t = 340 \times 3 = 1020 \text{ m}.$
- Une molécule d'air est située devant un haut-parleur. A quelle distance est-elle du haut-parleur après 10 secondes de musique ?
 - ▶ réponse : elle n'a (quasiment) pas bougé !

Petits calculs

- On entend un éclair 3 secondes après l'avoir vu, à quelle distance était-il ?
 - ▶ réponse (avec l'approximation que la lumière est instantanée) :
$$d = v \times t = 340 \times 3 = 1020 \text{ m.}$$
- Une molécule d'air est située devant un haut-parleur. A quelle distance est-elle du haut-parleur après 10 secondes de musique ?
 - ▶ réponse : elle n'a (quasiment) pas bougé !

Petits calculs

- On entend un éclair 3 secondes après l'avoir vu, à quelle distance était-il ?
 - ▶ réponse (avec l'approximation que la lumière est instantanée) :
$$d = v \times t = 340 \times 3 = 1020 \text{ m.}$$
- Une molécule d'air est située devant un haut-parleur. A quelle distance est-elle du haut-parleur après 10 secondes de musique ?
 - ▶ réponse : elle n'a (quasiment) pas bougé !

Onde acoustique

./Media/thumbnail_ondesonore.png

- dans l'air, la propagation de l'onde sonore se fait par compression et décompression de couches d'air successives (l'air est élastique)

Onde acoustique

./Media/thumbnail_ondesonore.png

- dans l'air, la propagation de l'onde sonore se fait par compression et décompression de couches d'air successives (l'air est élastique)

Onde acoustique

./Media/thumbnail_ondesonore.png

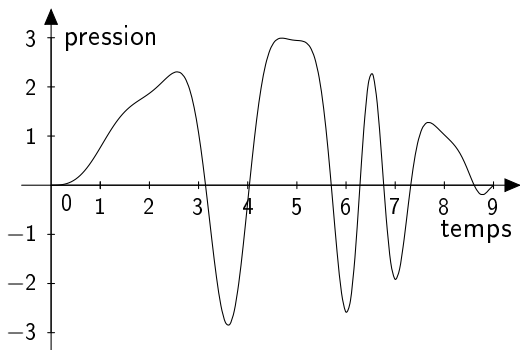
- dans l'air, la propagation de l'onde sonore se fait par compression et décompression de couches d'air successives (l'air est élastique)

Onde acoustique

./Media/thumbnail_ondesonore.png

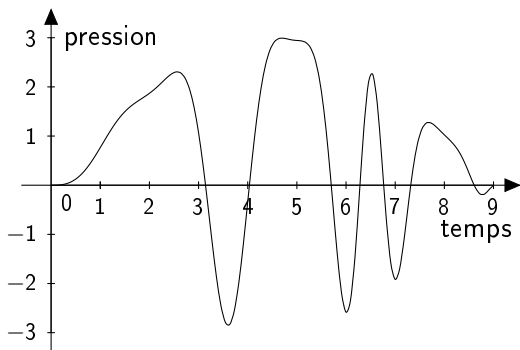
- dans l'air, la propagation de l'onde sonore se fait par compression et décompression de couches d'air successives (l'air est élastique)

Signal sonore



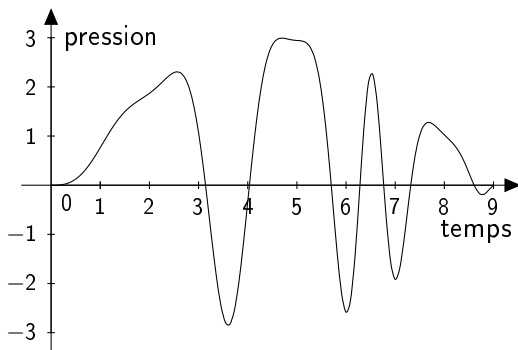
- Crête = pression, creux = dépression
- Pour pouvoir stocker ce signal en machine, on le transforme en suite de valeurs (= **discrétisation** ou **numérisation**).

Signal sonore



- Crête = pression, creux = dépression
- Pour pouvoir stocker ce signal en machine, on le transforme en suite de valeurs (= **discrétisation** ou **numérisation**).

Signal sonore



- Crête = pression, creux = dépression
- Pour pouvoir stocker ce signal en machine, on le transforme en suite de valeurs (= **discrétisation** ou **numérisation**).

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

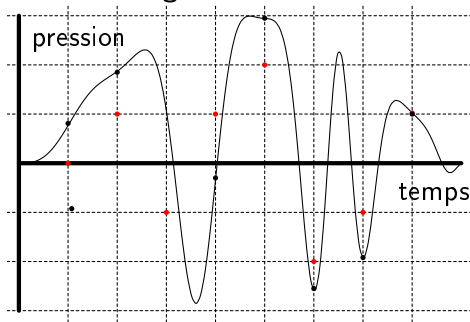
- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**



- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**
- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de mesures du signal par seconde
 - ▶ plus F_e est élevée, meilleure est la qualité audio mais plus les données sont volumineuses : le choix de F_e résulte d'un **compromis** entre ces deux critères
 - ▶ concrètement, comment la choisir ?

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**
- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de mesures du signal par seconde
 - ▶ plus F_e est élevée, meilleure est la qualité audio mais plus les données sont volumineuses : le choix de F_e résulte d'un **compromis** entre ces deux critères
 - ▶ concrètement, comment la choisir ?

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**
- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de mesures du signal par seconde
 - ▶ plus F_e est élevée, meilleure est la qualité audio mais plus les données sont volumineuses : le choix de F_e résulte d'un **compromis entre ces deux critères**
 - ▶ concrètement, comment la choisir ?

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**
- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de mesures du signal par seconde
 - ▶ plus F_e est élevée, meilleure est la qualité audio mais plus les données sont volumineuses : le choix de F_e résulte d'un **compromis entre ces deux critères**
 - ▶ concrètement, comment la choisir ?

Deux dimensions de numérisation

- discrétisation en temps et en intensité :
 - ▶ évaluation du signal à intervalles de temps réguliers = **échantillonnage**
 - ▶ troncature de cette valeur selon le nombre de bits alloué = **quantification** et **encodage**
- la **profondeur** de l'encodage (en bits) est le nombre de bits par échantillon
 - ▶ faible profondeur = peu de contraste entre les sons forts et faibles
 - ▶ CD = 16 bits, DVD = 16/24 bits, studio = 24/32 bits
- la **fréquence d'échantillonnage** F_e (en Hertz) est le nombre de mesures du signal par seconde
 - ▶ plus F_e est élevée, meilleure est la qualité audio mais plus les données sont volumineuses : le choix de F_e résulte d'un **compromis entre ces deux critères**
 - ▶ concrètement, comment la choisir ?

Premier élément : théorème de Shannon

- Théorème de Shannon : « Un échantillonnage à la fréquence F_e restitue fidèlement les fréquences entre $-\frac{F_e}{2}$ et $\frac{F_e}{2}$ » (fréquences négatives générées par l'analyse de signaux finis en temps)
- Choisir une fréquence maximale à restituer F_{max} revient à choisir F_e ($= 2 \times F_{max}$)
- En termes d'audition, à quoi correspond F_{max} ?

Premier élément : théorème de Shannon

- Théorème de Shannon : « Un échantillonnage à la fréquence F_e restitue fidèlement les fréquences entre $-\frac{F_e}{2}$ et $\frac{F_e}{2}$ » (fréquences négatives générées par l'analyse de signaux finis en temps)
- Choisir une fréquence maximale à restituer F_{max} revient à choisir F_e ($= 2 \times F_{max}$)
- En termes d'audition, à quoi correspond F_{max} ?

Premier élément : théorème de Shannon

- Théorème de Shannon : « Un échantillonnage à la fréquence F_e restitue fidèlement les fréquences entre $-\frac{F_e}{2}$ et $\frac{F_e}{2}$ » (fréquences négatives générées par l'analyse de signaux finis en temps)
- Choisir une fréquence maximale à restituer F_{max} revient à choisir F_e ($= 2 \times F_{max}$)
- En termes d'audition, à quoi correspond F_{max} ?

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Deuxième élément : fréquence et hauteur

- Expérience : frottement d'une ligne striée
 - ▶ Conclusion : dans une certaine étendue, l'oreille ressent la fréquence des vibrations du signal sonore, sous forme de hauteur.
- Expérience : écoute d'un son à différentes fréquences
 - ▶ Conclusion : au maximum, on entend les fréquences dans l'intervalle [16Hz-20kHz]
 - ▶ Pour restituer tous les sons, il faudrait donc $F_e = 40 \text{ kHz}$
- Expérience : écoute de deux sons proches en fréquence
 - ▶ Conclusion : deux sons proches en fréquence émettent des battements audibles même si ces deux sons dépassent 20 kHz
 - ▶ Pour restituer ces battements, on augmente F_e : 44,1 kHz pour les CD, 48 kHz pour les DAT/DVD
- Expérience : écoute de sons parlés sans les hautes fréquences
 - ▶ aucune différence jusqu'à 6000Hz → large bande : $F_e = 16000 \text{ Hz}$
 - ▶ compréhensible jusqu'à 4000Hz → téléphone traditionnel : $F_e = 8000 \text{ Hz}$

Quelques calculs

- Quelle durée de musique “brute” peut-on mettre sur un CD stéréo de 700 Mo ?
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (44100 \times 16/8 \times 2) = 3968 \text{ s} = 1 \text{ h } 06 \text{ m } 08 \text{ s}$
- Quelle durée en MP3-64kbps ? (avec suppression de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (64000/8) = 87500 \text{ s} = 24 \text{ h } 18 \text{ m } 20 \text{ s}$.
 - ▶ Problème : fréquences coupées au delà de 11kHz.
- Quelle durée en MP3-192kbps ? (avec conservation de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (192000/8 \times 2) = 14853 \text{ s} = 4 \text{ h } 03 \text{ m } 03 \text{ s}$.

Quelques calculs

- Quelle durée de musique “brute” peut-on mettre sur un CD stéréo de 700 Mo ?
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (44100 \times 16/8 \times 2) = 3968 \text{ s} = 1 \text{ h } 06 \text{ m } 08 \text{ s}$
- Quelle durée en MP3-64kbps ? (avec suppression de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (64000/8) = 87500 \text{ s} = 24 \text{ h } 18 \text{ m } 20 \text{ s}$.
 - ▶ Problème : fréquences coupées au delà de 11kHz.
- Quelle durée en MP3-192kbps ? (avec conservation de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (192000/8 \times 2) = 14853 \text{ s} = 4 \text{ h } 03 \text{ m } 03 \text{ s}$.

Quelques calculs

- Quelle durée de musique “brute” peut-on mettre sur un CD stéréo de 700 Mo ?
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (44100 \times 16/8 \times 2) = 3968 \text{ s} = 1 \text{ h } 06 \text{ m } 08 \text{ s}$
- Quelle durée en MP3-64kbps ? (avec suppression de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (64000/8) = 87500 \text{ s} = 24 \text{ h } 18 \text{ m } 20 \text{ s}$.
 - ▶ Problème : fréquences coupées au delà de 11kHz.
- Quelle durée en MP3-192kbps ? (avec conservation de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (192000/8 \times 2) = 14853 \text{ s} = 4 \text{ h } 03 \text{ m } 03 \text{ s}$.

Quelques calculs

- Quelle durée de musique “brute” peut-on mettre sur un CD stéréo de 700 Mo ?
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (44100 \times 16/8 \times 2) = 3968 \text{ s} = 1 \text{ h } 06 \text{ m } 08 \text{ s}$
- Quelle durée en MP3-64kbps ? (avec suppression de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (64000/8) = 87500 \text{ s} = 24 \text{ h } 18 \text{ m } 20 \text{ s}$.
 - ▶ Problème : fréquences coupées au delà de 11kHz.
- Quelle durée en MP3-192kbps ? (avec conservation de la stéréo)
 - ▶ Réponse : $700.000.000 / (192000/8 \times 2) = 14853 \text{ s} = 4 \text{ h } 03 \text{ m } 03 \text{ s}$.

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - fréquence $\times 2 \Rightarrow +1$ octave
 - intensité $\times 10 \Rightarrow +10$ dB (fortement)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - fréquence $\times 2 \Rightarrow +1$ octave
 - intensité $\times 10 \Rightarrow +10$ dB (référence)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : "la sensation varie comme le logarithme de l'excitation"
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - la fréquence $\times 2$ est ± 1 octave
 - l'intensité $\times 10$ est ± 10 dB (niveau)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”

▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties

▶ commun à la plupart des perceptions

▶ loi déviée aux extrêmes

▶ exemples :

▶ la fréquence $\propto 2$ et $\propto \frac{1}{2}$ l'octave

▶ l'intensité $\propto 10$ et $\propto \frac{1}{10}$ le décibel

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”

- ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
- ▶ commun à la plupart des perceptions
- ▶ loi déviée aux extrêmes
- ▶ exemples :
 - ★ fréquence $\times 2 = +1$ octave
 - ★ intensité $\times 10 = +10$ dB (décibels)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”

- ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
- ▶ commun à la plupart des perceptions
- ▶ loi déviée aux extrêmes
- ▶ exemples :
 - ★ fréquence $\times 2 = +1$ octave
 - ★ intensité $\times 10 = +10$ dB (décibels)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - ★ fréquence $\times 2 = +1$ octave
 - ★ intensité $\times 10 = +10$ dB (décibels)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - ★ fréquence $\times 2 = +1$ octave
 - ★ intensité $\times 10 = +10$ dB (décibels)

Annexe : autres aspects perceptifs

- la fréquence est perçue comme la **hauteur** du son
- l'amplitude des vibrations est perçue comme l'**intensité** (ou **volume**) du son
- le spectre est perçu comme la **texture** (ou **couleur**) du son
- la texture et l'enveloppe dynamique forment le **timbre** du son
- loi de Weber-Fechner ou de Bouguer-Weber : “la sensation varie comme le logarithme de l'excitation”
 - ▶ $dS = \lambda \frac{dE}{E}$: plus l'excitation est élevée, moins ses variations sont ressenties
 - ▶ commun à la plupart des perceptions
 - ▶ loi déviée aux extrêmes
 - ▶ exemples :
 - ★ fréquence $\times 2 = +1$ octave
 - ★ intensité $\times 10 = +10$ dB (décibels)

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = analyse en ondelettes

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = **analyse en ondelettes**

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = **analyse en ondelettes**

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = **analyse en ondelettes**

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = **analyse en ondelettes**

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = **analyse en ondelettes**

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = analyse en ondelettes

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = analyse en ondelettes

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = analyse en ondelettes

Fondamentale et harmoniques

- Les sources sonores “naturelles” vibrent selon **plusieurs modes superposés**
 - ▶ exemple sur une corde, une membrane, un tuyau
 - ▶ mode principal : vibration de plus basse fréquence = **fondamentale**
 - ▶ modes secondaires : fréquences multiples de la fondamentale = **harmoniques**
 - ▶ autres modes vibratoires non harmoniques (non fusionnés) = **partiels**
- l'oreille **fusionne** fondamentale et harmoniques (commodité évolutive permettant une meilleure identification de la source sonore : expérimentez !)
- réciproquement, on peut **extraire** fondamentale et harmoniques d'un son périodique (voyelle, bruit de moteur, corde frottée...)
 - ▶ cela suppose de choisir un son de référence
 - ▶ signal sinusoïdal en référence = **analyse de Fourier**
 - ▶ autre signal = analyse en ondelettes

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :

- ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
- ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
- ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
- ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (=spectre) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de systèmes linéaires par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
- ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (=spectre) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de systèmes linéaires par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :

- ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
- ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal

Media/serieFourier.jpg

- ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
- ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (=spectre) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
- ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :

- ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
- ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal

Media/serieFourier.jpg

- ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
- ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (=spectre) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de systèmes linéaires par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
- ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :

- ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
- ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
- ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
- ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (=spectre) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
- ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Analyse de Fourier : un mal nécessaire ?

- avantages de l'analyse de Fourier :
 - ▶ pertinente en termes de **perception** : reconstitution des modes vibratoires
 - ▶ pertinente en termes d'**analyse** : description fréquentielle du signal
 - ▶ représentation **économique** du son : son périodique → suite numérique
 - ▶ **réversible** : suite numérique → son périodique
 - ★ synthèse sonore : synthèse additive
 - ★ modification du profil fréquentiel (= **spectre**) du son : filtrage, égalisation...
 - ★ évaluation de **systèmes linéaires** par leur réponse aux signaux sinusoïdaux
 - ▶ algorithmiquement **efficace** : transformation de Fourier rapide (FFT)
 - ★ Pour un signal quelconque, la TFD à fenêtre glissante (= répétée sur plusieurs parties du signal) fournit l'évolution des fréquences en fonction du temps (ex : vumètre, sonagramme).
 - ★ Remarque : il existe une transformation de Fourier continue mais sa réciproque pose des problèmes de sensibilité aux conditions initiales.

Représentations en temps et en fréquence

- représentation amplitude/temps = signal sonore

Media/signauxSonoresReference.jpg

- représentation amplitude/fréquence = **spectre** du son
- représentation fréquence/temps = **sonagramme** du son
 - ▶ bruit blanc : toutes les fréquences sont présentes à parts égales
 - ▶ clarinette : fondamentale, harmonique et un peu de bruit
 - ▶ voyelles et consonnes

Représentations en temps et en fréquence

- représentation amplitude/temps = signal sonore
- représentation amplitude/fréquence = **spectre** du son

Media/spectre.jpg

- représentation fréquence/temps = **sonagramme** du son
 - ▶ bruit blanc : toutes les fréquences sont présentes à parts égales
 - ▶ clarinette : fondamentale, harmonique et un peu de bruit
 - ▶ voyelles et consonnes

Représentations en temps et en fréquence

- représentation amplitude/temps = signal sonore
- représentation amplitude/fréquence = **spectre** du son
- représentation fréquence/temps = **sonagramme** du son
 - ▶ bruit blanc : toutes les fréquences sont présentes à parts égales

Media/sonagrammeBruitBlanc.jpg

un bruit est défini par son aspect aléatoire et par la répartition statistique de ses fréquences

- ▶ clarinette : fondamentale, harmonique et un peu de bruit
- ▶ voyelles et consonnes

Représentations en temps et en fréquence

- représentation amplitude/temps = signal sonore
- représentation amplitude/fréquence = **spectre** du son
- représentation fréquence/temps = **sonagramme** du son
 - ▶ bruit blanc : toutes les fréquences sont présentes à parts égales
 - ▶ clarinette : fondamentale, harmonique et un peu de bruit

Media/sonagrammeClarinette.jpg

- ▶ voyelles et consonnes

Représentations en temps et en fréquence

- représentation amplitude/temps = signal sonore
- représentation amplitude/fréquence = **spectre** du son
- représentation fréquence/temps = **sonagramme** du son
 - ▶ bruit blanc : toutes les fréquences sont présentes à parts égales
 - ▶ clarinette : fondamentale, harmonique et un peu de bruit
 - ▶ voyelles et consonnes

Media/sonagramme/sonagrammeVoyellesConsonnes.jpg

- ★ les consonnes commencent par un bruit
- ★ les bandes de fréquences non harmoniques des voyelles s'appellent les **formants**
- ★ une voyelle contient deux hauteurs : celle de la fondamentale + harmoniques et celle des formants. C'est l'origine des chants diphoniques .

Analyse de Fourier dans le détail

- **Séries de Fourier** : tout signal s , périodique de fréquence f et continu par morceaux, est la somme de signaux sinusoïdaux (“sons purs”) de fréquences multiples de f :

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{2\pi i(nf)t} \text{ avec } c_n = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi ift})^n dt}{T}$$

- Remarque :
 - ▶ le passage de s aux c_n est appelé **transformation de Fourier discrète (TFD)**. Elle est réversible.
 - ▶ f correspond à la **fondamentale** de s
 - ▶ $2f, 3f, \dots$ correspond aux **harmoniques** de s
 - ▶ les c_n , **coefficients de Fourier** de s , mesurent l'importance des harmoniques $n \times f$ dans le signal

Analyse de Fourier dans le détail

- **Séries de Fourier** : tout signal s , périodique de fréquence f et continu par morceaux, est la somme de signaux sinusoïdaux (“sons purs”) de fréquences multiples de f :

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{2\pi i(nf)t} \text{ avec } c_n = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi ift})^n dt}{T}$$

- Remarque :
 - ▶ le passage de s aux c_n est appelé **transformation de Fourier discrète (TFD)**. Elle est réversible.
 - ▶ f correspond à la **fondamentale** de s
 - ▶ $2f, 3f, \dots$ correspond aux **harmoniques** de s
 - ▶ les c_n , **coefficients de Fourier** de s , mesurent l'importance des harmoniques $n \times f$ dans le signal

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$

- intégrales deviennent des sommes finies (méthode des rectangles) :

$$c_j = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi i f t})^j dt}{T} \text{ devient } c_j = \sum_{k=0}^{n-1} s_k \left(e^{\frac{-2\pi i k}{n}} \right)^j$$

- coefficients de Fourier tous nuls sauf $c_0 \dots c_{n-1}$ (cohérent avec Shannon)
- réversible : on passe des c_n aux s_n par la même opération que des s_n aux c_n (à peu près)

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$

- intégrales deviennent des sommes finies (méthode des rectangles) :

$$c_j = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi i f t})^j dt}{T} \text{ devient } c_j = \sum_{k=0}^{n-1} s_i \left(e^{\frac{-2\pi i k}{n}} \right)^j$$

- coefficients de Fourier tous nuls sauf $c_0 \dots c_{n-1}$ (cohérent avec Shannon)
- réversible : on passe des c_n aux s_n par la même opération que des s_n aux c_n (à peu près)

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$

- intégrales deviennent des sommes finies (méthode des rectangles) :

$$c_j = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi i f t})^j dt}{T} \text{ devient } c_j = \sum_{k=0}^{n-1} s_i \left(e^{\frac{-2\pi i k}{n}} \right)^j$$

- coefficients de Fourier tous nuls sauf $c_0 \dots c_{n-1}$ (cohérent avec Shannon)
- réversible : on passe des c_n aux s_n par la même opération que des s_n aux c_n (à peu près)

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$

- intégrales deviennent des sommes finies (méthode des rectangles) :

$$c_j = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} s(t)(e^{-2\pi i f t})^j dt}{T} \text{ devient } c_j = \sum_{k=0}^{n-1} s_i \left(e^{\frac{-2\pi i k}{n}} \right)^j$$

- coefficients de Fourier tous nuls sauf $c_0 \dots c_{n-1}$ (cohérent avec Shannon)
- réversible : on passe des c_n aux s_n par la même opération que des s_n aux c_n (à peu près)

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

- Algorithme de Cooley-Tukey (1965) - en fait, Gauss (1805) :

- ▶ matrice de Van der Monde très redondante
- ▶ algorithme de "diviser pour mieux régner"
- ▶ complexité $n \log(n)$
- ▶ généralement, n est une puissance de 2

FFT : l'algorithme

- soit s un signal périodique discrétisé en n valeurs par période

$$s_0 s_1 \dots s_{n-1}$$

- calcul des coefficients

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} \text{ avec}$$

$$w = e^{\frac{-2i\pi}{n}}$$

- Algorithme de Cooley-Tukey (1965) - en fait, Gauss (1805) :
 - ▶ matrice de Van der Monde très redondante
 - ▶ algorithme de "diviser pour mieux régner"
 - ▶ complexité $n \log(n)$
 - ▶ généralement, n est une puissance de 2

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)
 - ▶ Algorithme très simple si x et y en tableaux ou files
 - ▶ N : ordre du filtre. N grand ? délai dans la chaîne sonore
 - ▶ retard z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
 - ▶ y sans retard ? filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF ou FIR)
sinon infinie (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
 - ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
 - ▶ élimination de fréquences : filtre coupe-haut, coupe-bas, coupe-bande

Media/coupebande.png

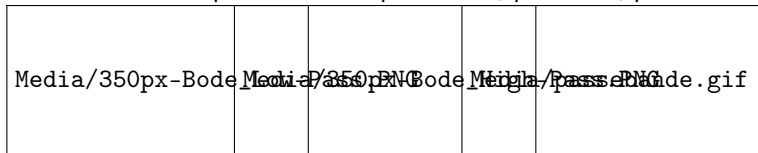
- ▶ favorisation de fréquences : filtre passe-haut, passe-bas, passe-bande
 - ▶ autres : filtre en peigne, filtre multibande ...
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

- ▶ Algorithme très simple si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : ordre du filtre. N grand ? délai dans la chaîne sonore
- ▶ retard z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF ou FIR)
sinon infinie (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par

$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

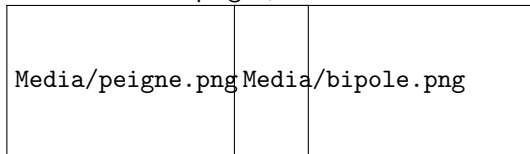
- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
 - ▶ élimination de fréquences : filtre coupe-haut, coupe-bas, coupe-bande
 - ▶ favorisation de fréquences : filtre passe-haut, passe-bas, passe-bande



- ▶ autres : filtre en peigne, filtre multibande ...
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)
 - ▶ Algorithme très simple si x et y en tableaux ou files
 - ▶ N : ordre du filtre. N grand ? délai dans la chaîne sonore
 - ▶ retard z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
 - ▶ y sans retard ? filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF ou FIR)
sinon infinie (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
 - ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
 - ▶ élimination de fréquences : filtre coupe-haut, coupe-bas, coupe-bande
 - ▶ favorisation de fréquences : filtre passe-haut, passe-bas, passe-bande
 - ▶ autres : filtre en peigne, filtre multibande ...



- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)
 - ▶ Algorithme très simple si x et y en tableaux ou files
 - ▶ N : ordre du filtre. N grand ? délai dans la chaîne sonore
 - ▶ retard z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
 - ▶ y sans retard ? filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF ou FIR)
sinon infinie (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
 - ▶ entrée et sortie reliées par

$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

La révolution du numérique : le filtrage

- en combinant un signal discret avec des copies décalées dans le passé, on modifie son spectre
- Schéma général d'un filtre (source : Wikipedia)

Media/IIR_Filter_Direct_Form_1.svg.png

- ▶ **Algorithme très simple** si x et y en tableaux ou files
- ▶ N : **ordre** du filtre. N grand ? **délai** dans la chaîne sonore
- ▶ **retard** z^{-1} : décalage d'une période d'échantillonnage dans le passé
- ▶ y sans retard ? filtre à **réponse impulsionnelle finie** (RIF ou FIR)
sinon **infinie** (RII ou IIR ; sélectif mais possiblement instable)
- ▶ entrée et sortie reliées par
$$y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_M y[n-M] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_N x[n-N]$$

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :

- ▶ on transforme $y[n - k]$ en $Y(z).z^{-k}$ avec $z = e^{i\theta} = e^{i2\pi fT}$
- ▶ de même pour x

- fonction de transfert $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Nz^{-N}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_Mz^{-M}}$

- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :

- ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)

Exemple : le diagramme de Bode d'un filtre passe-bas. La fréquence f_c détermine la bande passante du filtre. On observe une atténuation de moitié (-3dB). Sur Bode, l'intersection des asymptotes se situe à f_c pour une pente en dB/décade. On caractérise la "puissance" du filtrage par le gain en dB. Le gain est le rapport du module du numérateur de $H(z)$ sur le module du dénominateur de $H(z)$. On parle de "gain" lorsque le filtre est en résonance, c'est-à-dire lorsque la fréquence du signal est égale ou non à la fréquence de coupure.

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :

- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$

- ▶ Ex : $H(z) = \frac{1 + z^{-1}}{2}$, $H(z) = \frac{1}{2 - z^{-1}}$: filtres passe-bas

- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :

- ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)

- ▶ la **fréquence de coupure** f_c : fréquence à laquelle la puissance du signal passe de moitié (-3dB). Sur Bode, c'est l'intersection des asymptotes.
 - ▶ la **bande passante** en dB/décade : caractérise le "raffinement" du filtre.
 - ▶ la **latence** : valeur de f qui minimise le décalage entre $|H(z)|$ et $\angle H(z)$.
 - ▶ la **latence de groupe** : dérivée de la latence, elle minimise la déformation des transients par rapport au ton.

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)
 - ★ fréquence de coupure F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
 - ★ pente en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage
 - ★ pôle : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
 - ★ facteur de qualité Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)

Media/bode.png

- ★ **fréquence de coupure** F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
- ★ **pente** en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage
- ★ **pôle** : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
- ★ **facteur de qualité** Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)
 - ★ **fréquence de coupure** F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
 - ★ **pente** en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage
 - ★ **pôle** : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
 - ★ **facteur de qualité** Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)
 - ★ **fréquence de coupure** F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
 - ★ **pente** en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage

Media/Butterworth_orders.png

- ★ **pôle** : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
- ★ **facteur de qualité** Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)
 - ★ **fréquence de coupure** F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
 - ★ **pente** en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage
 - ★ **pôle** : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
 - ★ **facteur de qualité** Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Filtrage numérique : suite

- “Transformée en z ” :
- **fonction de transfert** $H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}$
- L'étude de $|H(z)|$ en fonction de f donne les caractéristiques du filtre :
 - ▶ **diagramme de Bode** : représentation des asymptotes (source : Wikipedia)
 - ★ **fréquence de coupure** F_c : fréquence à laquelle la puissance du signal est réduite de moitié (-3dB). Sur Bode : intersection des asymptotes
 - ★ **pente** en dB/decade : caractérise la “puissance” du filtrage
 - ★ **pôle** : valeur de f qui minimise le dénominateur de $|H(z)|$
 - ★ **facteur de qualité** Q : lorsque le filtre entre en résonance, détermine si la résonance est aigüe ou non

Media/fact_qualite.gif

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Nécessité d'un modèle

- un son peut être vu d'une infinité de manières différentes
- un modèle du son, c'est une manière de voir le son
- chaque modèle permet de représenter, de traiter, de synthétiser le son d'une manière qui lui est propre
- chaque modèle a un certain rayon d'action (ce qu'il peut faire) et des limites (ce qu'il ne peut pas faire)

Nécessité d'un modèle

- un son peut être vu d'une infinité de manières différentes
- un modèle du son, c'est une manière de voir le son
- chaque modèle permet de représenter, de traiter, de synthétiser le son d'une manière qui lui est propre
- chaque modèle a un certain rayon d'action (ce qu'il peut faire) et des limites (ce qu'il ne peut pas faire)

Nécessité d'un modèle

- un son peut être vu d'une infinité de manières différentes
- un modèle du son, c'est une manière de voir le son
- chaque modèle permet de représenter, de traiter, de synthétiser le son d'une manière qui lui est propre
- chaque modèle a un certain rayon d'action (ce qu'il peut faire) et des limites (ce qu'il ne peut pas faire)

Nécessité d'un modèle

- un son peut être vu d'une infinité de manières différentes
- un modèle du son, c'est une manière de voir le son
- chaque modèle permet de représenter, de traiter, de synthétiser le son d'une manière qui lui est propre
- chaque modèle a un certain rayon d'action (ce qu'il peut faire) et des limites (ce qu'il ne peut pas faire)

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- Modèles musicaux

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Description

- **Idée générale** : son = vibration + enveloppe
- **représentations** : en temps et en fréquence (signal, spectre, sonagramme)
- **traitements possibles** : changement de vitesse ou de hauteur, augmentation de volume, ajout de réverbération, filtrage de fréquences, nettoyage de son...
- **synthèse** : un buffer sonore est rempli à l'aide de signaux existants et d'opérations mathématiques (oscillations pour le son, nombres générés aléatoirement pour le bruit)
- **intérêts** : adapté à la manipulation de signaux existants, synthèse peu coûteuse
- **limites** : pas de paramètre naturel ou intuitif pour manipuler la source sonore, aspect artificiel et pauvre de la synthèse
- **conclusion** : plus souvent utilisé pour traiter des sons existants que pour la synthèse

Modélisation de l'enveloppe dynamique

- enveloppe dynamique = évolution du son dans le temps (granularité : 0,1s)
- modèle de référence : ADSR (Attack Decay Sustain Release)
 - ▶ Attack = amplification du volume lors de l'excitation de la source sonore
 - ▶ Decay = première décroissance du volume, entre l'attaque et le régime permanent
 - ▶ Sustain = volume constant lors du régime permanent : la source est entretenue (ex : violon, orgue...)
 - ▶ Release = décroissance du volume jusqu'à 0 : fin du son
- illustration, exemple
- modèle vs son réel (écouter guitare, violon, trompette)

Modélisation de l'enveloppe dynamique

- enveloppe dynamique = évolution du son dans le temps (granularité : 0,1s)
- modèle de référence : ADSR (Attack Decay Sustain Release)
 - ▶ Attack = amplification du volume lors de l'excitation de la source sonore
 - ▶ Decay = première décroissance du volume, entre l'attaque et le régime permanent
 - ▶ Sustain = volume constant lors du régime permanent : la source est entretenue (ex : violon, orgue...)
 - ▶ Release = décroissance du volume jusqu'à 0 : fin du son
- illustration, exemple
- modèle vs son réel (écouter guitare, violon, trompette)

Modélisation de l'enveloppe dynamique

- enveloppe dynamique = évolution du son dans le temps (granularité : 0,1s)
- modèle de référence : ADSR (Attack Decay Sustain Release)
 - ▶ Attack = amplification du volume lors de l'excitation de la source sonore
 - ▶ Decay = première décroissance du volume, entre l'attaque et le régime permanent
 - ▶ Sustain = volume constant lors du régime permanent : la source est entretenue (ex : violon, orgue...)
 - ▶ Release = décroissance du volume jusqu'à 0 : fin du son
- illustration, exemple
- modèle vs son réel (écouter guitare, violon, trompette)

Modélisation de l'enveloppe dynamique

- enveloppe dynamique = évolution du son dans le temps (granularité : 0,1s)
- modèle de référence : ADSR (Attack Decay Sustain Release)
 - ▶ Attack = amplification du volume lors de l'excitation de la source sonore
 - ▶ Decay = première décroissance du volume, entre l'attaque et le régime permanent
 - ▶ Sustain = volume constant lors du régime permanent : la source est entretenue (ex : violon, orgue...)
 - ▶ Release = décroissance du volume jusqu'à 0 : fin du son
- illustration, exemple
- modèle vs son réel (écouter guitare, violon, trompette)

Media/adsr.jpg

Media/enveloppes.jpg

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**

- ▶ son = transformation d'un son de référence (= *échantillon*) pris dans un dictionnaire

- représentations

- traitements possibles

- historiquement

- variantes

- ▶ table d'ondes fixe (Roads, 1966)
- ▶ table d'ondes variable
- ▶ table d'ondes continue

- **synthèse** : Ensoniq, Korg...

- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
 - ▶ son = un numéro d'échantillon et un ensemble de transformations sur une ligne temporelle (ex : fichiers mod)
- traitements possibles
- historiquement
- variantes
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
 - ▶ modification de hauteur, de durée, de volume, application d'une enveloppe dynamique, bouclage, inversion (principalement)
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe (Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
 - ▶ musique concrète : manipulation de bandes magnétiques (Schaeffer 1948, Henry 1963)
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe (Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ★ son = lecture circulaire d'une période échantillonnée puis application d'effets.

Media/tabledondes.png

- ★ lecture rapide = son aigu.
 - ★ décalage entre fréquences de lecture et d'échantillonnage ⇒ craquements et sons parasites (aliasing, rupture de phase, quantification)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ★ idem, mais échantillon différent selon la hauteur et le volume (exemple)
 - ★ interpolation et transitions permettent une continuité sonore
 - ★ sound fonts : attaque, partie continue et extinction traitées séparément
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
 - ★ période calculée au fur et à mesure (non stockée).
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture modélisée par un échantillon

- **Idée générale**
- **représentations**
- **traitements possibles**
- **historiquement**
- **variantes**
 - ▶ table d'ondes fixe(Roads, 1966)
 - ▶ table d'ondes variable
 - ▶ table d'ondes continue
- **synthèse** : Ensoniq, Korg...
- **TP** : isoler une période d'un son pur puis la jouer en boucle à différentes hauteurs. Regarder le spectre obtenu.

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d'un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L'utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d'oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

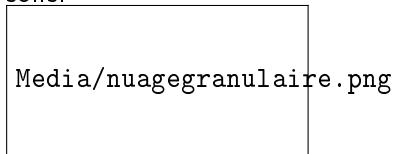
- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.



- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture granulaire

- **Idée générale** : son = “nuage sonore” = répétition d’un échantillon court (= grain, entre 1 et 50 ms, fenêtré) à différentes hauteurs et intensités. L’utilisateur caractérise le nuage, le système y dispose les sons.

Media/nuagegranulaire.png

- **Historiquement** : Xenakis “ConcretePh” {} 1958
- **Représentation** : grain utilisé + enveloppe temps/fréquence et densité du nuage.
- **Intérêts** : sources ou environnements sonores redondants (pluie, son de rivière, chants d’oiseaux)
- **Limites** : type de sons très caractéristique
- **Exemple** : sonore, musical
- **TP** : bruit de foule et de forêt par synthèse granulaire

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)

Media/convolution.jpg

- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture hybride

- **Idée générale** : source sonore = système linéaire : réponse proportionnelle à la stimulation
 - ▶ 2 sons : un excitateur (1) et une réponse impulsionnelle (2)
 - ▶ réponse impulsionnelle = son émis par un système sonore suite à un bruit court
 - ▶ à chaque valeur V du signal (1), on joue (2) avec une force proportionnelle à V (convolution)
- **Applications** : réverbération artificielle, voix robotique, instrument hybride
- **Avantages** : réversible ; résultat crédible : hauteur du son (2) accordée à hauteur du son (1)
- **Limitations** : latence de calcul = durée de (2) : pour du temps réel, $(2) < 15\text{ms}$
- Exemple

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ▶ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) = signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- **synthèse additive**
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ▶ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) = signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- **synthèse additive**
 - ▶ addition de sons purs aux fréquences de la fondamentale et des harmoniques (reconstruction de Fourier)
 - ▶ une enveloppe ADSR par harmonique (avec couplage d'harmoniques)
 - ▶ exemples : harmonique, non harmonique
 - ▶ quelques timbres de base (à tester !) :
- **synthèses à distorsion** : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - Cas particuliers : Pulse Width Modulation (PWM) et Square Wave (impulsions (exemple))

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
 - ▶ addition de sons purs aux fréquences de la fondamentale et des harmoniques (reconstruction de Fourier)
 - ▶ une enveloppe ADSR par harmonique (avec couplage d'harmoniques)

Media/syntheseadditive.png

- ▶ exemples : harmonique, non harmonique
- ▶ quelques timbres de base (à tester !) :
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ▶ Modulation de phase (Phase Modulation (PM))

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- **synthèse additive**
 - ▶ addition de sons purs aux fréquences de la fondamentale et des harmoniques (reconstruction de Fourier)
 - ▶ une enveloppe ADSR par harmonique (avec couplage d'harmoniques)
 - ▶ exemples : harmonique, non harmonique
 - ▶ quelques timbres de base (à tester !) :
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - Cas particuliers : Pulse Width Modulation (PWM), Pulse Amplitude Modulation (PAM)
 - Impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
 - ▶ addition de sons purs aux fréquences de la fondamentale et des harmoniques (reconstruction de Fourier)
 - ▶ une enveloppe ADSR par harmonique (avec couplage d'harmoniques)
 - ▶ exemples : harmonique, non harmonique
 - ▶ quelques timbres de base (à tester !) :

Media/timbresbase.jpg

- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ▶ Frequency Modulation (FM) (Chowning 1973)
 - ▶ Phase Modulation (PM) (Casio, 1984)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer
 - ★ racheté par Yamaha pour son DX7 (6 oscillateurs combinés en 16 puis 32 combinaisons)
 - ▶ Phase modulation(Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer
 - ★ racheté par Yamaha pour son DX7 (6 oscillateurs combinés en 16 puis 32 combinaisons)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer
 - ★ racheté par Yamaha pour son DX7 (6 oscillateurs combinés en 16 puis 32 combinaisons)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer
 - ★ racheté par Yamaha pour son DX7 (6 oscillateurs combinés en 16 puis 32 combinaisons)
 - ▶ Phase modulation(Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer

Media/signalfm.png

Media/spectrefm.png

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ★ $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + I_m \sin(\omega_m t))$ et Ring Modulateur :
 $y(t) = A \times \sin(\omega_p t + y(t))$
 - ★ A = volume, ω_p = hauteur, $I_m + \omega_m$ = texture sonore
 - ★ exemple FM et ring modulateur
 - ★ sons riches en harmoniques, faciles à fabriquer
 - ★ racheté par Yamaha pour son DX7 (6 oscillateurs combinés en 16 puis 32 combinaisons)

Media/dx7-1.png

Media/dx7-2.png

- ▶ Phase modulation(Casio, 1984)
- ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)

Media/phasemodulation.png

- ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)

★ idée : multiplier un signal par une enveloppe dynamique

Media/syntheseam.png

★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ idée : multiplier un signal par une enveloppe dynamique

Media/syntheseam.png

- ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)

Texture générée par oscillateurs

- **Idée générale** : texture = vibration ou superposition de vibrations
- synthèse additive
- synthèses à distorsion : vibration pure (“porteuse”) appliquée à une fonction non linéaire en temps (“modulation”)
 - ▶ Frequency Modulation (Chowning 1973)
 - ▶ Phase modulation (Casio, 1984)
 - ▶ synthèse Amplitude Modulation (AM)
 - ★ Cas particulier : Pulse Width Modulation (PWM) : signal converti en impulsions (exemple)



Media/pwm.png

Texture générée par du bruit : synthèse soustractive

- **Idée générale** : son = bruit filtré en fréquence par l'environnement
- **Applications** : sons bruités : voix, vent ; complément aux sons instrumentaux
- **Modélisation** : type de bruit (blanc, rose) + paramètres des filtres
- **Avantages** : sons riches en partiels, faciles à fabriquer
- A tester!

Texture générée par du bruit : synthèse soustractive

- **Idée générale** : son = bruit filtré en fréquence par l'environnement
- **Applications** : sons bruités : voix, vent ; complément aux sons instrumentaux
- **Modélisation** : type de bruit (blanc, rose) + paramètres des filtres
- **Avantages** : sons riches en partiels, faciles à fabriquer
- A tester!

Texture générée par du bruit : synthèse soustractive

- **Idée générale** : son = bruit filtré en fréquence par l'environnement
- **Applications** : sons bruités : voix, vent ; complément aux sons instrumentaux
- **Modélisation** : type de bruit (blanc, rose) + paramètres des filtres
- **Avantages** : sons riches en partiels, faciles à fabriquer
- A tester!

Texture générée par du bruit : synthèse soustractive

- **Idée générale** : son = bruit filtré en fréquence par l'environnement
- **Applications** : sons bruités : voix, vent ; complément aux sons instrumentaux
- **Modélisation** : type de bruit (blanc, rose) + paramètres des filtres
- **Avantages** : sons riches en partiels, faciles à fabriquer
- A tester!

Texture générée par du bruit : synthèse soustractive

- **Idée générale** : son = bruit filtré en fréquence par l'environnement
- **Applications** : sons bruités : voix, vent ; complément aux sons instrumentaux
- **Modélisation** : type de bruit (blanc, rose) + paramètres des filtres
- **Avantages** : sons riches en partiels, faciles à fabriquer
- A tester!

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- **Modèles physiques**
- Modèles musicaux

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Description

- **Idée générale** : son = réponse d'un ensemble de mécanismes à une excitation
- **représentation** : description des mécanismes en interaction
- **traitements possibles** : interaction utilisateur, mise en relation de dispositifs (couplage, imbrication), couplage avec d'autres modalités
- **synthèse** : signal sonore = solution d'équations différentielles
- **intérêts** : sons inventés réalistes, interaction naturelle avec l'environnement, paramétrables intuitivement, couplage visuel et tactile
- **limites** : calculs vite lourds, nécessité de modèles simples pour du temps réel

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments simples

- **Ruiz (1968)** : corde vibrante = succession de masses – ressorts
 - ▶ difficultés : équations différentielles nécessitent d'introduire une solution approchée, problème d'imprécision (transitoires)
 - ▶ complété ensuite par Navier Stokes (fluides), éléments finis...
 - ▶ exemple : simulation de fluides, percussions d'objets
- **Cordis-Anima (1978)** : structure vibrante = points matériels reliés entre eux
 - ▶ système linéaire permettant de modéliser tout son percussif
 - ▶ algorithmes de calcul intrinsèques aux éléments
 - ▶ couplage avec des interfaces visuelles ou tactiles (exemple)
 - ▶ gourmand en calcul : méthodes numériques simplifiées
 - ▶ exemple : pièces musicales

Modélisation par éléments de haut niveau d'abstraction

- **Mosaïc-Modalys (1985) :**

- ▶ « Briques » de base dont les caractéristiques des partiels sont connues : barre, membrane, corde
- ▶ Connexion des briques par collage, frottement, perforation etc.
- ▶ exemple : saxophone

Modélisation par éléments de haut niveau d'abstraction

- **Mosaïc-Modalys (1985) :**

- ▶ « Briques » de base dont les caractéristiques des partiels sont connues : barre, membrane, corde
- ▶ Connexion des briques par collage, frottement, perforation etc.
- ▶ exemple : saxophone

Modélisation par éléments de haut niveau d'abstraction

- **Mosaïc-Modalys (1985) :**

- ▶ « Briques » de base dont les caractéristiques des partiels sont connues : barre, membrane, corde
- ▶ Connexion des briques par collage, frottement, perforation etc.
- ▶ exemple : saxophone

Modélisation par éléments de haut niveau d'abstraction

- **Mosaïc-Modalys (1985) :**

- ▶ « Briques » de base dont les caractéristiques des partiels sont connues : barre, membrane, corde
- ▶ Connexion des briques par collage, frottement, perforation etc.
- ▶ exemple : saxophone

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Modélisation par guide d'ondes

- **Karplus-Strong (1983+)**

- ▶ Table d'onde remplie de manière aléatoire
- ▶ Moyenne entre un échantillon et le précédent → son de corde pincée
- ▶ Introduction de probabilités → son percussif
- ▶ Filtrage → suppression des artefacts
- ▶ rapide, convaincant mais manque de généralité
- ▶ exemple : en temps réel, avec sons percussifs

Plan du cours

1 Introduction

2 Son physique, son perçu, son numérique

- Du son au signal sonore
- Numérisation du son
- Tranches de signal

3 Modèles et synthèses sonores

- Modèles de bas niveau (proches du signal)
- Modèles physiques
- **Modèles musicaux**

Notation du son

- idée générale : durée et hauteur d'un son limitées à un nombre fini de possibilités
- note = représentation graphique d'un son
 - ▶ forme de la note = durée
 - ▶ position de la note sur une échelle verticale = hauteur (plus haut = plus aigu)
- partition = ensemble des notes d'une musique
 - ▶ représentation temps/fréquence : horizontal = temps, vertical = hauteur
 - ▶ autres indications : tempo, timbre, intensité, doigtés, nuances, paroles...
- autres représentations
 - ▶ tablatures (position à reproduire sur l'instrument pour produire une note ou un accord)
 - ▶ représentations graphiques, surtout pour la musique "contemporaine"

Notation du son

- idée générale : durée et hauteur d'un son limitées à un nombre fini de possibilités
- note = représentation graphique d'un son
 - ▶ forme de la note = durée
 - ▶ position de la note sur une échelle verticale = hauteur (plus haut = plus aigu)
- partition = ensemble des notes d'une musique
 - ▶ représentation temps/fréquence : horizontal = temps, vertical = hauteur
 - ▶ autres indications : tempo, timbre, intensité, doigtés, nuances, paroles...
- autres représentations
 - ▶ tablatures (position à reproduire sur l'instrument pour produire une note ou un accord)
 - ▶ représentations graphiques, surtout pour la musique "contemporaine"

Notation du son

- idée générale : durée et hauteur d'un son limitées à un nombre fini de possibilités
- note = représentation graphique d'un son
 - ▶ forme de la note = durée
 - ▶ position de la note sur une échelle verticale = hauteur (plus haut = plus aigu)
- partition = ensemble des notes d'une musique
 - ▶ représentation temps/fréquence : horizontal = temps, vertical = hauteur
 - ▶ autres indications : tempo, timbre, intensité, doigtés, nuances, paroles...
- autres représentations
 - ▶ tablatures (position à reproduire sur l'instrument pour produire une note ou un accord)
 - ▶ représentations graphiques, surtout pour la musique "contemporaine"

Notation du son

- idée générale : durée et hauteur d'un son limitées à un nombre fini de possibilités
- note = représentation graphique d'un son
 - ▶ forme de la note = durée
 - ▶ position de la note sur une échelle verticale = hauteur (plus haut = plus aigu)
- partition = ensemble des notes d'une musique
 - ▶ représentation temps/fréquence : horizontal = temps, vertical = hauteur
 - ▶ autres indications : tempo, timbre, intensité, doigtés, nuances, paroles...
- autres représentations
 - ▶ tablatures (position à reproduire sur l'instrument pour produire une note ou un accord)
 - ▶ représentations graphiques, surtout pour la musique "contemporaine"

Exemples de notations

Media/partition.jpg

Media/partitionmanuscrite.jpg

Media/tablature.png

Media/partitioncontemp

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
 - ▶ pulsations perçues dès l'embryon (rythme cardiaque et respiratoire de la mère, marche)
- Pulsation
- Rythme
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
 - ▶ TP : trouver la pulsation des musiques jouées 1 2 3 4 5 6
 - ▶ pulsations plus ou moins rapides
 - ★ tempo = vitesse de la musique = nombre de pulsations par minute (bpm)
 - ★ musiques basées sur rythme cardiaque : 80 bpm, musiques de transe : 160 à 200 bpm
 - ★ musiques basées sur rythme respiratoire : 12 à 20 cycles par minute
 - ★ musiques basées sur pas : 120 bpm, running : 180 bpm
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
 - ▶ TP : trouver la pulsation des musiques jouées 1 2 3 4 5 6
 - ▶ pulsations plus ou moins rapides
 - ★ tempo = vitesse de la musique = nombre de pulsations par minute (bpm)
 - ★ musiques basées sur rythme cardiaque : 80 bpm, musiques de transe : 160 à 200 bpm
 - ★ musiques basées sur rythme respiratoire : 12 à 20 cycles par minute
 - ★ musiques basées sur pas : 120 bpm, running : 180 bpm
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
 - ▶ TP : trouver la pulsation des musiques jouées 1 2 3 4 5 6
 - ▶ pulsations plus ou moins rapides
 - ★ tempo = vitesse de la musique = nombre de pulsations par minute (bpm)
 - ★ musiques basées sur rythme cardiaque : 80 bpm, musiques de transe : 160 à 200 bpm
 - ★ musiques basées sur rythme respiratoire : 12 à 20 cycles par minute
 - ★ musiques basées sur pas : 120 bpm, running : 180 bpm
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
 - ▶ rythme = regroupement de pulsations et sous-pulsations en motifs répétés, avec accentuation sur certaines pulsations
 - ▶ mesure = durée d'un motif rythmique
 - ▶ rythmes binaires (polka), ternaires (valse), quaternaires (sous-famille des binaires, pop), à 6 temps (rock)
 - ▶ première pulsation du motif accentuée : "on-beat" (valse, rock, techno, pop)
 - ▶ deuxième pulsation accentuée : "off-beat" ou "chaloupé" (reggae)
 - ▶ pour trouver le rythme, écouter les percussions et la voix basse (guitare basse, grosse caisse...)
 - ▶ TP : les musiques suivantes sont-elles on-beat ou off-beat ?
- "Pensée par 4"
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
 - ▶ musique = suite de paquets de 4 mesures
 - ▶ mesure = 4 pulsations
 - ▶ pulsation = 4 sous-pulsations
 - ▶ omniprésente dans la musique populaire actuelle
- Notation

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation
 - ▶ unité de durée = “noire” (souvent la pulsation mais pas toujours)

Nb unités	Note	Silence
4	ronde	pause
2	blanche	demi-pause
1	noire	soupir
1/2	croche	demi-soupir
1/4	double-croche	quart de soupir

- ▶ mesures séparées par des barres verticales
- ▶ structure des mesures = 2 nombres au début de la partition (“armure”)
 - * nombre de “temps” par mesure et unité de durée (1=ronde, 2=blanche, 4=noire etc.)
 - * ex : valse 3/4 : 3 noires par mesure, rock 6/8 : 6 croches par mesure, pop 4/4 : 4 noires par mesure.

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation
 - ▶ unité de durée = “noire” (souvent la pulsation mais pas toujours)
 - ▶ mesures séparées par des barres verticales
 - ▶ structure des mesures = 2 nombres au début de la partition (“armure”)
 - * nombre de “temps” par mesure et unité de durée (1=ronde, 2=blanche, 4=noire etc.)
 - * ex : valse 3/4 : 3 noires par mesure, rock 6/8 : 6 croches par mesure, pop 4/4 : 4 noires par mesure.
 - ▶ TP : déterminer le rythme des partitions suivantes

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation
 - ▶ unité de durée = “noire” (souvent la pulsation mais pas toujours)
 - ▶ mesures séparées par des barres verticales
 - ▶ structure des mesures = 2 nombres au début de la partition (“armure”)
 - ★ nombre de “temps” par mesure et unité de durée (1=ronde, 2=blanche, 4=noire etc.)
 - ★ ex : valse 3/4 : 3 noires par mesure, rock 6/8 : 6 croches par mesure, pop 4/4 : 4 noires par mesure.
 - ▶ TP : déterminer le rythme des partitions suivantes

Modèles de durée

- Idée : (presque) toute musique possède une certaine pulsation.
- Origine
- Pulsation
- Rythme
- “Pensée par 4”
- Notation
 - ▶ unité de durée = “noire” (souvent la pulsation mais pas toujours)
 - ▶ mesures séparées par des barres verticales
 - ▶ structure des mesures = 2 nombres au début de la partition (“armure”)
 - ★ nombre de “temps” par mesure et unité de durée (1=ronde, 2=blanche, 4=noire etc.)
 - ★ ex : valse 3/4 : 3 noires par mesure, rock 6/8 : 6 croches par mesure, pop 4/4 : 4 noires par mesure.
 - ▶ TP : déterminer le rythme des partitions suivantes

Rythmes et durées

Media/partitiongigue.png

Media/partitionmadness.png

Media/partitionva

Media/dureenotes.png

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”
 - clé de fa (notes basses) : mi, ré, si
 - clé de sol (notes hautes) : do, ré, mi, fa, sol

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”
 - ▶ clé de sol (notes basses) : $\text{do} \rightarrow \text{ré} \rightarrow \text{mi} \rightarrow \text{fa} \rightarrow \text{sol} \rightarrow \text{la} \rightarrow \text{si}$
 - ▶ clé de fa (notes médiales) : $\text{do} \rightarrow \text{ré} \rightarrow \text{mi} \rightarrow \text{fa} \rightarrow \text{sol} \rightarrow \text{la} \rightarrow \text{si}$

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
 - ▶ unisson (même fréquence)
 - ▶ octave (fréquence $\times 2$)
 - ▶ quinte (fréquence $\times 3/2$)
 - ▶ quarte (fréquence $\times 4/3$)
 - ▶ tierce majeure (fréquence $\times 5/4$)
 - ▶ tierce mineure (fréquence $\times 6/5$)
 - ▶ remarque : quinte+quarte=octave ($3/2 \times 4/3 = 2$)
- système tempéré
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
 - ▶ hauteur de référence (actuellement : 440 Hz = la_3)
 - ▶ division de l'octave en 12 “demi-tons” égaux
 - ★ progresser d'un demi-ton = multiplier la fréquence par un nombre constant.
 - ▶ exercice : que vaut ce nombre ?
 - ▶ reproduction approximative des principaux intervalles harmonieux
 - ★ octave = 12 demi-tons, quinte = 7, quarte = 5, tierce majeure = 4, tierce mineure = 3
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
 - ▶ hauteur de référence (actuellement : 440 Hz = la_3)
 - ▶ division de l'octave en 12 “demi-tons” égaux
 - ★ progresser d'un demi-ton = multiplier la fréquence par un nombre constant.
 - ▶ exercice : que vaut ce nombre ?
 - ▶ reproduction approximative des principaux intervalles harmonieux
 - ★ octave = 12 demi-tons, quinte = 7, quarte = 5, tierce majeure = 4, tierce mineure = 3
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
 - ▶ hauteur de référence (actuellement : 440 Hz = la_3)
 - ▶ division de l'octave en 12 “demi-tons” égaux
 - ★ progresser d'un demi-ton = multiplier la fréquence par un nombre constant.
 - ▶ exercice : que vaut ce nombre ?
 - ▶ reproduction approximative des principaux intervalles harmonieux
 - ★ octave = 12 demi-tons, quinte = 7, quarte = 5, tierce majeure = 4, tierce mineure = 3
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
 - ▶ hauteur de référence (actuellement : 440 Hz = la_3)
 - ▶ division de l'octave en 12 “demi-tons” égaux
 - ★ progresser d'un demi-ton = multiplier la fréquence par un nombre constant.
 - ▶ exercice : que vaut ce nombre ?
 - ▶ reproduction approximative des principaux intervalles harmonieux
 - ★ octave = 12 demi-tons, quinte = 7, quarte = 5, tierce majeure = 4, tierce mineure = 3
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
- nomenclature
 - ▶ noms identiques d'une octave à l'autre, octave repérée par un numéro
 - ★ ex : $la_4 = la_3 + \text{une octave}$
 - ▶ 12 demi-tons ou “notes” de chaque octave
 - ★ do-do#-ré-ré#-mi-fa-fa#-sol-la-la # -si
 - ★ système anglo-saxon : C-C#-D-D#-E-F-F#-G-G#-A-A#-B
 - ★ # (dièze) ajoute un demi-ton, b (bémol) enlève un demi-ton : do # = ré b, mi # = fa
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”
 - ★ clé de fa (notes basses) : mi_1 au si_2
 - ★ clé de sol (mélodie) : du mi_3 au sol_4 .

Modèles de hauteur

- idée générale : “découper” l'échelle de hauteur pour que les sons harmonieux s'y placent naturellement
- 2 sons sont d'autant plus harmonieux qu'ils ont d'harmoniques communes.
- intervalles harmonieux par ordre décroissant
- système tempéré
- nomenclature
- représentation graphique
 - ▶ hauteur repérée par une position sur 5 lignes horizontales : la “portée”
 - ▶ lecture de la hauteur selon la “clé”
 - ★ clé de fa (notes basses) : mi_1 au si_2
 - ★ clé de sol (mélodie): du mi_3 au sol_4 .

Un exemple d'armure

Media/armure.jpg

Modèles de gamme

- Plupart des musiques construites avec :
 - ▶ une note principale (ou “tonique”) à octave près
 - ▶ un choix de notes à favoriser dans l’octave : la “gamme”
 - ★ point commun à quasiment toutes les gammes : la quinte au dessus de la tonique (ou “dominante”)
 - ★ organisation de nombreuses musiques autour d’allers-retours entre tonique et dominante
- dans les musiques occidentales :
 - ▶ mode majeur : do ré mi fa sol la si do (ou transposition)
 - ▶ mode mineur : la si do ré mi fa sol la (ou transposition)

Modèles de gamme

- Plupart des musiques construites avec :
 - ▶ une note principale (ou “tonique”) à octave près
 - ▶ un choix de notes à favoriser dans l’octave : la “gamme”
 - ★ point commun à quasiment toutes les gammes : la quinte au dessus de la tonique (ou “dominante”)
 - ★ organisation de nombreuses musiques autour d’allers-retours entre tonique et dominante
- dans les musiques occidentales :
 - ▶ mode majeur : do ré mi fa sol la si do (ou transposition)
 - ▶ mode mineur : la si do ré mi fa sol la (ou transposition)

Modèles de gamme

- Plupart des musiques construites avec :
 - ▶ une note principale (ou “tonique”) à octave près
 - ▶ un choix de notes à favoriser dans l’octave : la “gamme”
 - ★ point commun à quasiment toutes les gammes : la quinte au dessus de la tonique (ou “dominante”)
 - ★ organisation de nombreuses musiques autour d’allers-retours entre tonique et dominante
- dans les musiques occidentales :
 - ▶ mode majeur : do ré mi fa sol la si do (ou transposition)
 - ▶ mode mineur : la si do ré mi fa sol la (ou transposition)

Modèles de gamme

- Plupart des musiques construites avec :
 - ▶ une note principale (ou “tonique”) à octave près
 - ▶ un choix de notes à favoriser dans l’octave : la “gamme”
 - ★ point commun à quasiment toutes les gammes : la quinte au dessus de la tonique (ou “dominante”)
 - ★ organisation de nombreuses musiques autour d’allers-retours entre tonique et dominante
- dans les musiques occidentales :
 - ▶ mode majeur : do ré mi fa sol la si do (ou transposition)
 - ▶ mode mineur : la si do ré mi fa sol la (ou transposition)

Merci pour votre attention