

# Cours d'acoustique (du Bâtiment) - Introduction -

**François-Xavier Bécot**

fxb@matelys.com

Année scolaire 2012/2013

Ce cours est principalement basé sur les supports des autres intervenants  
(L. Jaouen, F. Chevillotte, X. Olny, O. Chiello)

Moving Acoustics (Univ. Chalmers), Paul Falstad (Applets Java)

# Organisation du cours

10 séances de 2 heures.

Organisation du cours :

- Acoustique dans le contexte du Bâtiment
- Éléments de psycho-acoustique
- Equations principales de l'acoustique physique
- Propagation en champs infini et fini
- Correction des salles
- Isolation des salles (étude des parois simples et multiples)
- Etude de cas **évaluée**
- **Test** (2 heures, **calculatrice**, 1 A4 ro-vo **manuscrit** accepté)

# Calcul de la note finale

- 50% sur le test
- 25% sur l'étude de cas
- 25% sur les 2 TPs

UE validé si  $>10/20$ , rattrapé si  $\in[8-10]/20$ , éliminé si  $<8$

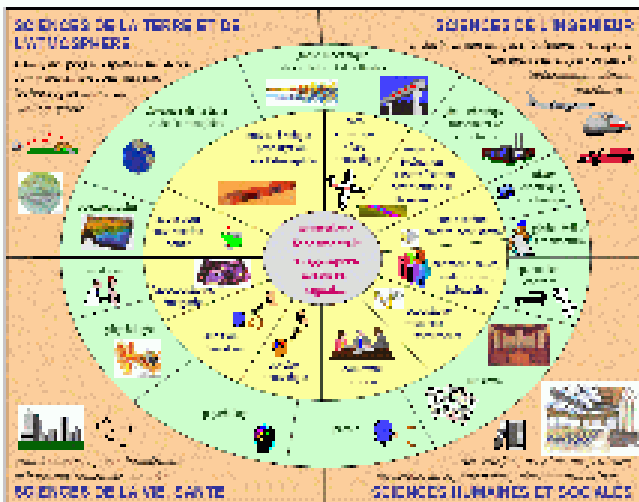
Responsable de cours : Emmanuel Gourdon

# Ouvrages de référence et autres liens utiles

- Acoustique & vibration en général :
  - Ondes acoustiques, Antoine Chaigne, Ecole Polytechnique, 2002
  - Manuel d'acoustique fondamentale, Michel Bruneau, Ed. Hermes Sciences, 1998
  - Engineering noise control, David Alan Bies, Spon Press/ Taylor & Francis Group, 2004
  - Physics of musical instruments, T. Fletcher & D. Rossing, Ed. (anglais)
- Thématiques du ministère :
  - Guide du bruit des transports terrestres, CETUR, ed. CETUR, 1980
  - Mémento technique du bâtiment – le confort acoustique, CERTU, 2003
- Sites utiles internet :
  - SFA (Société Française d'Acoustique) : <http://sfa.asso.fr/>
  - CIDB (Centre d'information et de Documentation sur le Bruit) : <http://www.bruit.fr/>
  - <http://www.dbstop.com/> : site complet de solutions pratiques, législation

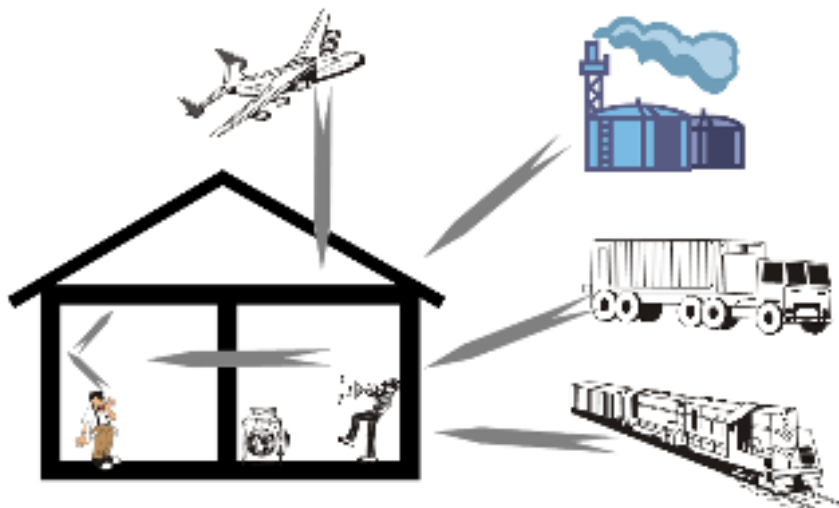
# L'Acoustique au sens large

## LES GRANDS DOMAIENES DE L'ACOUSTIQUE



Le langage acoustique des villes de France : une étude pour l'évaluation et la réduction des nuisances sonores en ville. <https://www.researchgate.net/publication/312512512>

# Contexte bâtiment, transport et environnement



# Contexte dans le cadre du Bâtiment

- **Confort**

- ▶ L'isolation acoustique est un critère de choix du logement (source INSEE, 2001-2002)

- **Le bruit** (forme d'acoustique) : **cause de nuisance**

- ▶ 1ère cause de nuisance pour + de 50% des ménages
- ▶ 1/3 des salariés subit des niveaux de bruits importants (INSEE IFEN, 1998)

# Contexte dans le cadre du Bâtiment

- **Confort**

- ▶ L'isolation acoustique est un critère de choix du logement (source INSEE, 2001-2002)

- **Le bruit** (forme d'acoustique) : **cause de nuisance**

- ▶ 1ère cause de nuisance pour + de 50% des ménages
- ▶ 1/3 des salariés subit des niveaux de bruits importants (INSEE IFEN, 1998)



# Effets du bruit sur l'homme

- **Effets psychologiques et sociologiques :**

- ▶ gène, perte d'efficacité,
- ▶ défaut de communication.

- **Effets physiologiques :**

- ▶ troubles du sommeil,
- ▶ troubles nerveux (stress),
- ▶ diminution momentanée ou permanente de l'audition.

Le bruit a un coût social : ~ 1 milliard d'euros / an

# Effets du bruit sur l'homme

- **Effets psychologiques et sociologiques :**

- ▶ gène, perte d'efficacité,
- ▶ défaut de communication.

- **Effets physiologiques :**

- ▶ troubles du sommeil,
- ▶ troubles nerveux (stress),
- ▶ diminution momentanée ou permanente de l'audition.

**Le bruit a un coût social : ~ 1 milliard d'euros / an**

# Réglementations française et européenne

1992	Loi cadre bruit
1994	Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA)
1995/96	Textes sur le bruit routier
1999	Politique européenne de réduction des nuisances sonores
2000	Règlement acoustique européenne (Bâtiment)
2002	Nouvelle directive européenne (Environnement)
2003	Arrêtés limitant les bruits dans certains établissements
Depuis	Quelques arrêtés spécifiques ; le Grenelle environnement ne pointe pas les pbs.

# Quelques définitions

- **Son** : sensation auditive causée par les **perturbations** d'un **milieu matériel élastique** et engendrée par la stimulation des éléments sensoriels de **l'oreille** interne  
→ **Définition objective**
- **Bruit** : ce qui, dans ce qui est perçu par l'**ouïe**, n'est pas **senti** comme un **son musical**  
→ **Définition (très) subjective**

# Quelques définitions

- **Son** : sensation auditive causée par les **perturbations** d'un **milieu matériel élastique** et engendrée par la stimulation des éléments sensoriels de **l'oreille** interne  
→ **Définition objective**
  
- **Bruit** : ce qui, dans ce qui est perçu par **l'ouïe**, n'est pas **senti** comme un **son musical**  
→ **Définition (très) subjective**

# Quelques définitions

- **Acoustique** : science des *sons*.
- **Oreille** : capteur de pression dynamique (ou microphone).
- **Capteur** : Système convertissant grandeur physique en grandeur électrique.
- **Pression** : Force par unité de surface exercée par un gaz sur une surface. Dimension : le Pascal Pa ( $\Leftrightarrow \text{N.m}^{-2}$ ), anciennement le bar :  $10^5 \text{ Pa}$ .
- **Dynamique** : par opp. à statique (un baromètre mesure la pression statique ou pression atmosphérique).  
Un microphone détecte des fluctuations de pression.

# Rôle de l'acousticien

- Identifier/modéliser les **sources** de bruit,
- Etudier prédire la **propagation** du bruit,
- Evaluer/contrôler les **effets du bruit sur l'homme**.

## Actions possibles :

- ◇ la source,
- ◇ le chemin de transmission,
- ◇ le récepteur.

# Rôle de l'acousticien

- Identifier/modéliser les **sources** de bruit,
- Etudier prédire la **propagation** du bruit,
- Evaluer/contrôler les **effets du bruit sur l'homme**.

## **Actions possibles :**

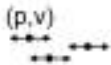
- ◇ la source,
- ◇ le chemin de transmission,
- ◇ le récepteur.



# Propagation dans l'air



Source



Propagation  
mise en mouvement des particules



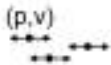
Récepteur

- La propagation du son est induite par la vibration des particules d'air qui se propage de proche en proche.
- Ne pas confondre la **vitesse particulaire  $v$**  (vitesse vibratoire des particules) et la **célérité  $c$**  (vitesse de propagation de l'information, le son -  $c \approx 340m.s^{-1}$ )

# Propagation dans l'air



Source



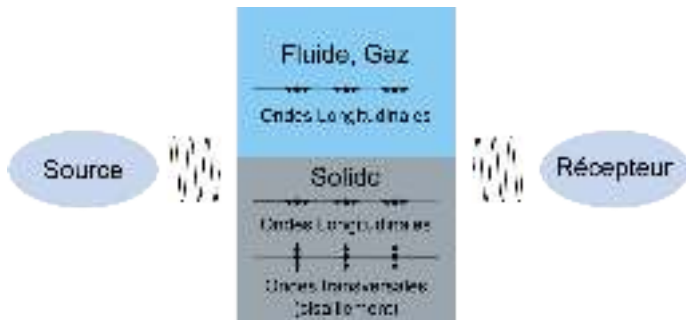
Propagation  
mise en mouvement des particules



Récepteur

- La propagation du son est induite par la vibration des particules d'air qui se propage de proche en proche.
- Ne pas confondre la **vitesse particulaire  $v$**  (vitesse vibratoire des particules) et la **célérité  $c$**  (vitesse de propagation de l'information, le son -  $c \approx 340m.s^{-1}$ )

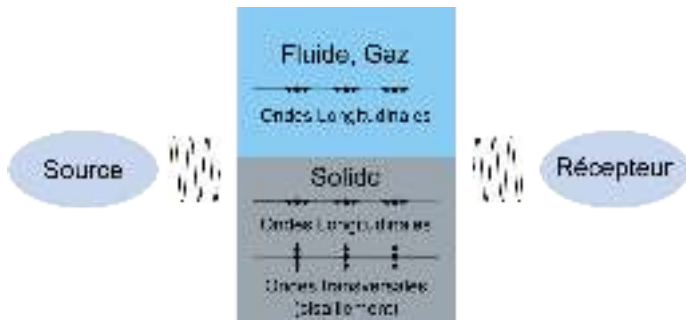
# La propagation en général <sup>1</sup>



- Le son peut se propager dans un fluide, un gaz ou dans un solide
- Les particules du milieu de transmission sont entraînées grâce aux forces de liaisons élastiques
- Pas de propagation dans le vide

<sup>1</sup>. MovingAcoustics»Student»Plane waves

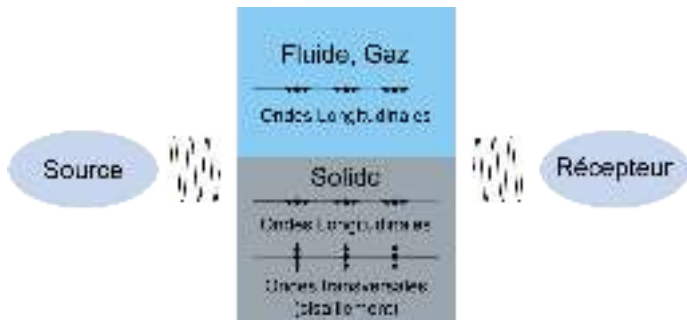
# La propagation en général <sup>1</sup>



- Le son peut se propager dans un fluide, un gaz ou dans un solide
- Les particules du milieu de transmission sont entraînées grâce aux forces de liaisons élastiques
- Pas de propagation dans le vide

<sup>1</sup>. MovingAcoustics»Student»Plane waves

# La propagation en général <sup>1</sup>



- Le son peut se propager dans un fluide, un gaz ou dans un solide
- Les particules du milieu de transmission sont entraînées grâce aux forces de liaisons élastiques
- Pas de propagation dans le vide

<sup>1</sup>. MovingAcoustics»Student»Plane waves

# Grandeurs fondamentales

- **Pression acoustique instantanée**  $p(t)$

Perturbation infiniment petite de la pression atmosphérique  $P$  autour de sa valeur d'équilibre  $P_0$

$$P(M, t) = P_0 + p(M, t) \text{ avec } p \ll P_0$$

- **Vitesse particulaire**  $\vec{v}(t)$

Perturbation infiniment petite de la vitesse du fluide autour de sa valeur d'équilibre  $V_0 = 0$

$$|\vec{v}| \ll c$$

Exemple une personne parlant normalement produit une variation de pression  $p$  de 0.01 Pa à un mètre de distance ( $p \ll P_0 = 101\,300$  Pa). La vitesse particulaire  $v$  est de l'ordre de  $2.5 \times 10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup> ( $v \ll c = 340$  m.s<sup>-1</sup>).

# Grandeurs fondamentales

- **Pression acoustique instantanée**  $p(t)$

Perturbation infiniment petite de la pression atmosphérique  $P$  autour de sa valeur d'équilibre  $P_0$

$$P(M, t) = P_0 + p(M, t) \text{ avec } p \ll P_0$$

- **Vitesse particulaire**  $\vec{v}(t)$

Perturbation infiniment petite de la vitesse du fluide autour de sa valeur d'équilibre  $V_0 = 0$

$$|\vec{v}| \ll c$$

Exemple une personne parlant normalement produit une variation de pression  $p$  de 0.01 Pa à un mètre de distance ( $p \ll P_0 = 101\,300$  Pa). La vitesse particulaire  $v$  est de l'ordre de  $2.5 \times 10^{-5}$  m.s<sup>-1</sup> ( $v \ll c = 340$  m.s<sup>-1</sup>).

# Grandeurs fondamentales

- **Pression acoustique instantanée**  $p(t)$

Perturbation infiniment petite de la pression atmosphérique  $P$  autour de sa valeur d'équilibre  $P_0$

$$P(M, t) = P_0 + p(M, t) \text{ avec } p \ll P_0$$

- **Vitesse particulaire**  $\vec{v}(t)$

Perturbation infiniment petite de la vitesse du fluide autour de sa valeur d'équilibre  $V_0 = 0$

$$|\vec{v}| \ll c$$

Exemple une personne parlant normalement produit une variation de pression  $p$  de 0.01 Pa à un mètre de distance ( $p \ll P_0 = 101\,300$  Pa). La vitesse particulaire  $v$  est de l'ordre de  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$  ( $v \ll c = 340 \text{ m.s}^{-1}$ ).



# Ordres de grandeur dans l'air

	Seuil de perception		Seuil de la douleur
Niveau de pression	0	60	120 dB
Pression	$2 \cdot 10^{-5}$	0.02	20 Pa
Vitesse particulaire	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Déplacement	$10^{-11}$	$10^{-8}$	$10^{-6} \text{ m}$
à 1000 Hz dans l'air			
$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot f$			

Avec :

pression atmosphérique :  $P_0 \approx 1013.25 \text{ hPa}$

masse volumique de l'air (au repos) :  $\rho_0 \approx 1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

# Pression acoustique, Niveau de pression

- **Pression acoustique efficace**

$$p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

- **Niveau de pression  $L_p$  (dB)**

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{ref}}} \right) \text{ [dB]}$$

$$p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

# Pression acoustique, Niveau de pression

- **Pression acoustique efficace**

$$p_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

- **Niveau de pression  $L_p$  (dB)**

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{ref}}} \right) \text{ [dB]}$$

$$p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

# Echelle des décibels



# Représentations temporelle et fréquentielle

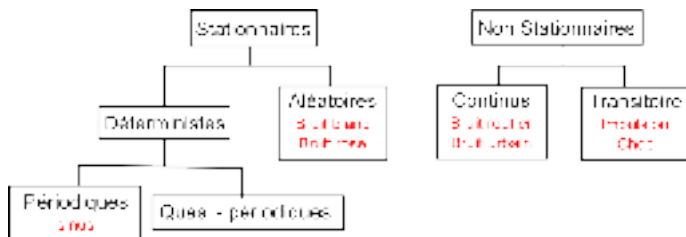
- **Évolution temporelle** : évolution de la pression instantanée en un point fixe de l'espace (mesure au microphone)
- **Notion de fréquence** : liée à la répétition du mouvement (sinusoïdal ou non). Unité = Hz ( $s^{-1}$ )
- **Types de signaux** :

# Représentations temporelle et fréquentielle

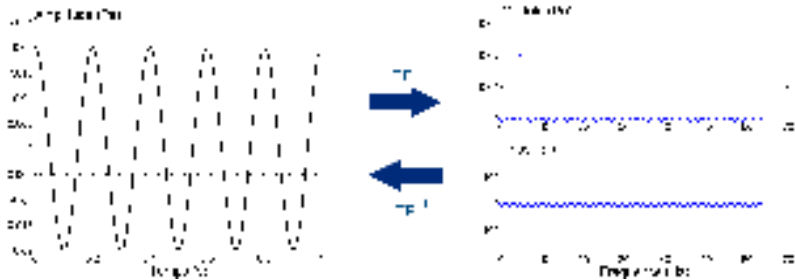
- **Évolution temporelle** : évolution de la pression instantanée en un point fixe de l'espace (mesure au microphone)
- **Notion de fréquence** : liée à la répétition du mouvement (sinusoïdal ou non). Unité = Hz ( $s^{-1}$ )
- **Types de signaux** :

# Représentations temporelle et fréquentielle

- **Évolution temporelle** : évolution de la pression instantanée en un point fixe de l'espace (mesure au microphone)
- **Notion de fréquence** : liée à la répétition du mouvement (sinusoïdal ou non). Unité = Hz ( $s^{-1}$ )
- **Types de signaux** :



# Son Pur



$$p(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

$\iff$

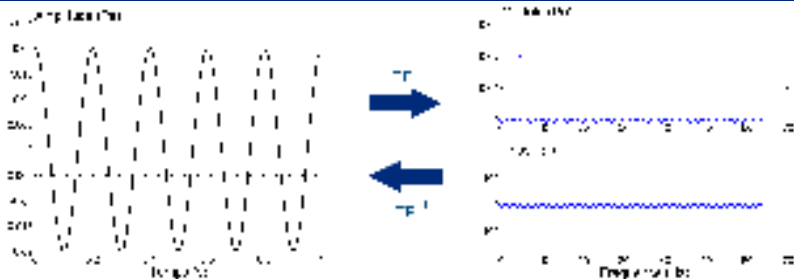
$$\tilde{P}(\omega) = A e^{j\phi}$$

avec  $p(t)$  la pression instantanée,  $\omega = 2\pi f$  la pulsation,  $f$  la fréquence,  $A$  l'amplitude et  $\phi$  la phase initiale.

- Un son est défini dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel
- La transformée de Fourier (TF) permet de passer de la représentation temporelle à la représentation fréquentielle. L'opération inverse est l'TF<sup>-1</sup>.



# Son Pur



$$p(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

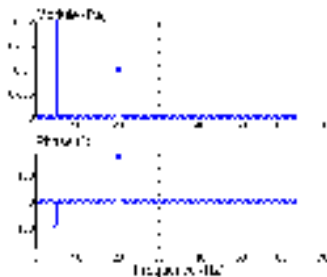
$\iff$

$$\tilde{P}(\omega) = A e^{j\phi}$$

avec  $p(t)$  la pression instantanée,  $\omega = 2\pi f$  la pulsation,  $f$  la fréquence,  $A$  l'amplitude et  $\phi$  la phase initiale.

- Un son est défini dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel
- La transformée de Fourier (TF) permet de passer de la représentation temporelle à la représentation fréquentielle. L'opération inverse est l'TF<sup>-1</sup>.

# Superposition de sons purs



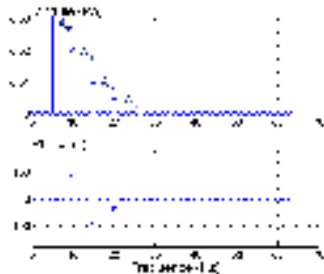
$$p(t) = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

$\iff$

$$\tilde{P}(\omega) = \sum_i A_i e^{j\phi_i}$$

- La représentation fréquentielle est un spectre de raies (discontinu)

# Son harmonique



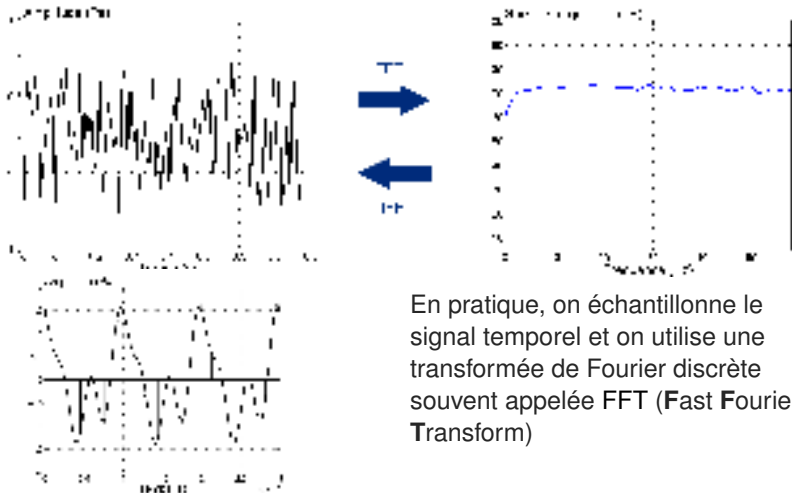
$$p(t) = \sum_i A_i \sin(n\omega_0 t + \phi_i)$$

 $\iff$ 

$$\tilde{P}(\omega) = \sum_i A_i e^{j\phi_i}$$

- Les harmoniques sont des fréquences multiples de la fréquence fondamentale  $f_0$
- Un son d'instrument n'est jamais pur. Il présente toujours une fréquence fondamentale et ses harmoniques.

# Signal non-périodique



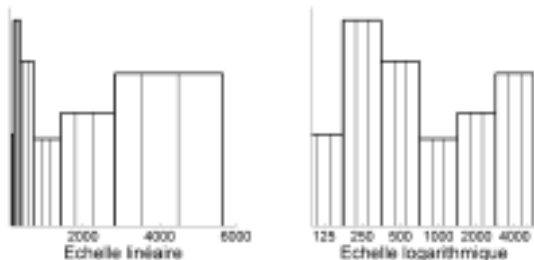
En pratique, on échantillonne le signal temporel et on utilise une transformée de Fourier discrète souvent appelée FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransform)

# Quelques sons quotidiens

MovingAcoustics»Student»Fourier Series / Daily noise

# Octave, tiers d'octave

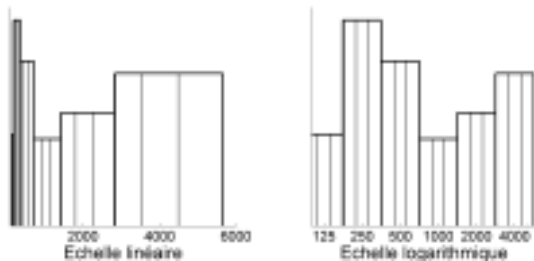
## Bandes d'octaves



- Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'une vaut le double de l'autre.  
Exemple : Le **LA** (440 Hz) et le **LA** (880 Hz)
- La fréquence centrale d'une bande d'octave double d'une octave à l'autre (125, 250, 500, 1000, ... Hz)
- La largeur de bande (en Hz) d'une octave double également d'une octave à l'autre

# Octave, tiers d'octave

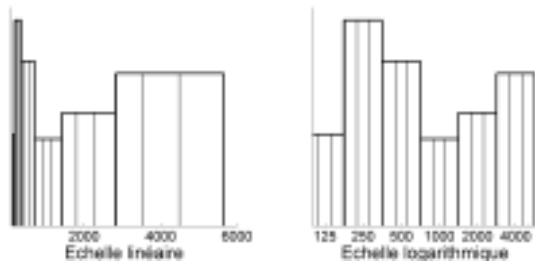
## Bandes d'octaves



- Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'une vaut le double de l'autre.  
Exemple : Le **LA** (440 Hz) et le **LA** (880 Hz)
- La fréquence centrale d'une bande d'octave double d'une octave à l'autre (125, 250, 500, 1000, ... Hz)
- La largeur de bande (en Hz) d'une octave double également d'une octave à l'autre

# Octave, tiers d'octave

## Bandes d'octaves



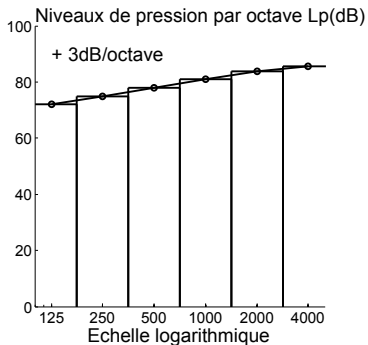
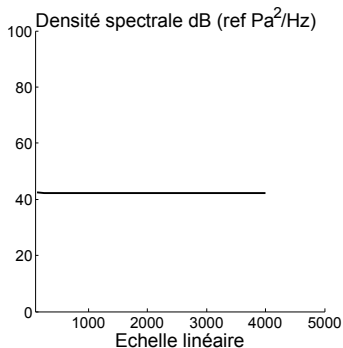
- Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'une vaut le double de l'autre.  
Exemple : Le **LA** (440 Hz) et le **LA** (880 Hz)
- La fréquence centrale d'une bande d'octave double d'une octave à l'autre (125, 250, 500, 1000, ... Hz)
- La largeur de bande (en Hz) d'une octave double également d'une octave à l'autre



# Illustration des bandes d'Octave

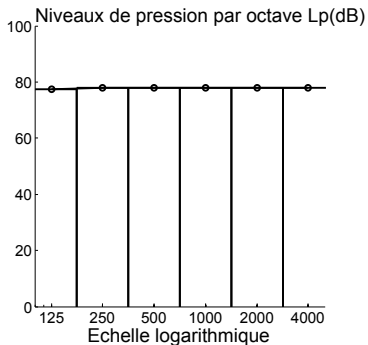
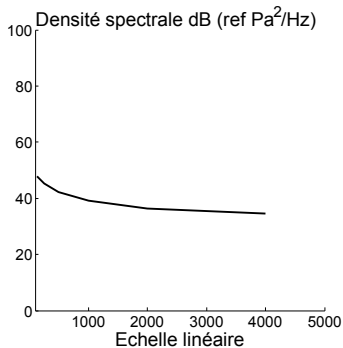
MovingAcoustics»Student»Octave Bands

# Bruit blanc



- Son aléatoire
- Densité spectrale constante
- Augmentation du niveau de pression de 3 dB par octave

# Bruit rose

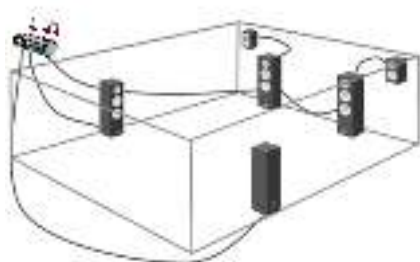


- Son aléatoire
- Le niveau de pression par bande d'octave est constant

# Illustration des bandes d'Octave

MovingAcoustics»Student»White noise and Pink Noise

# Addition de bruits



Sources corrélées

$$\tilde{p}_{tot} = \sum_n \tilde{p}_n$$

- Somme de pressions complexes
- Phénomène d'interférence
- La somme de 2 signaux peut s'annuler (Ex : contrôle actif)

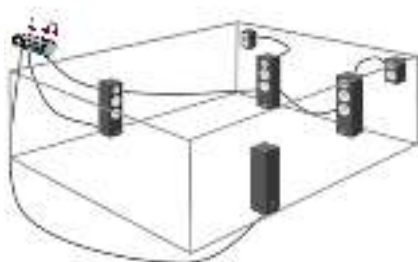


Sources d'incorrélées

$$P_{rms_{tot}}^2 = \sum_n P_{rms_n}^2$$

- Pas d'interférence
- La somme ne peut pas s'annuler

# Addition de bruits



Sources corrélées

$$\tilde{p}_{tot} = \sum_n \tilde{p}_n$$

- Somme de pressions complexes
- Phénomène d'interférence
- La somme de 2 signaux peut s'annuler (Ex : contrôle actif)



Sources d'incorrélées

$$P_{rms_{tot}}^2 = \sum_n P_{rms_n}^2$$

- Pas d'interférence
- La somme ne peut pas s'annuler

# Addition de bruits

On ne somme jamais les niveaux de pression  $L_p$  en décibels (dB)

- Sons non cohérents :

$$L_{p_{tot}} = 10 \log_{10} \left( \sum_i 10^{\left(\frac{L_{p_i}}{10}\right)} \right)$$

Rappel :  $10 \log_{10} \left( 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \right) = \frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2}$

$$2 \times P_{rms}^2 \Leftrightarrow L_p + 3 \text{ dB}$$



# Mesures des niveaux de pression



- Mesure du niveau global (attention à la calibration du micro)
- Analyse fréquentielle (bandes fines, bandes d'octaves, ...)