

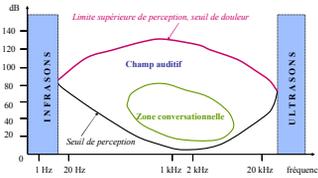
Chapitre 2

L'acoustique physiologique, le décibel

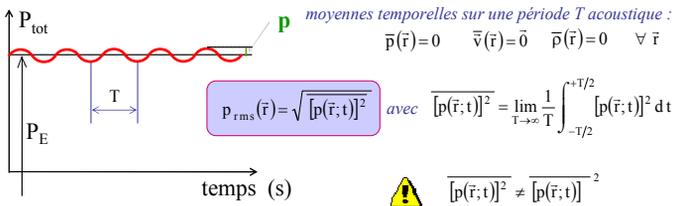
NIVEAUX SONORES (1/2)

- ✓ La sensibilité de l'oreille humaine dépend de la fréquence
- ✓ La sensation auditive évolue comme le **logarithme de l'intensité acoustique** I de l'onde

$$L = 10 \log_{10} (I/I_s) \text{ avec } I_s = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$



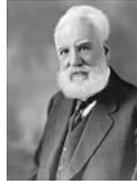
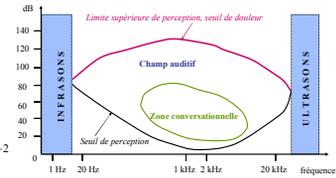
$$I \propto p_{rms}^2 \implies L = 20 \log_{10} (p_{rms}/p_s) \quad p_s = \sqrt{\rho_0 c_0 I_s} = \sqrt{400 \cdot 10^{-12}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$



LE DECIBEL (1/2)

- ✓ La sensibilité de l'oreille humaine dépend de la fréquence
- ✓ La sensation auditive évolue comme le **logarithme de l'intensité acoustique** I de l'onde

$$L = 10 \log_{10} (I/I_s) \text{ avec } I_s = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$



Alexandre Graham Bell (1847-1922, inventeur américain d'origine anglaise)

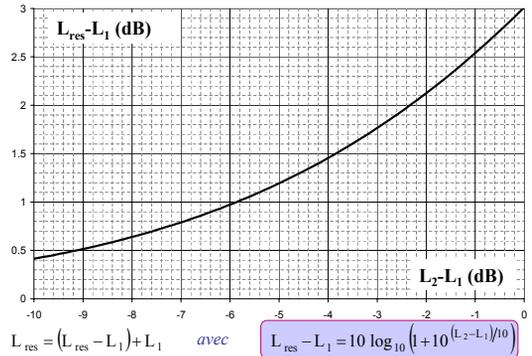
http://fr.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Graham_Bell

L'unité retenue pour le **niveau sonore** est le **décibel (dB)**, sous multiple du bel, ainsi nommé en l'honneur du physicien Alexandre Graham Bell. Cette unité présente l'avantage de bien se calquer sur la sensibilité différentielle de l'ouïe, puisqu'un écart de 1 décibel entre deux niveaux de bruit correspond sensiblement à la plus petite différence de niveau sonore décelable par l'oreille humaine.

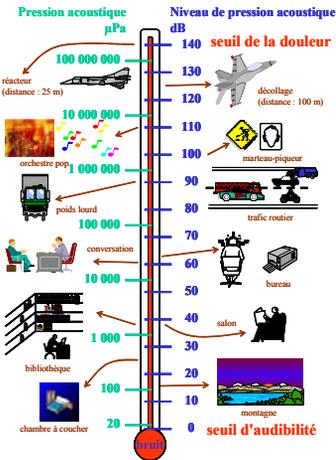
NIVEAUX SONORES (2/2)

- Niveau sonore résultant de deux sources décorrélées

$$L_{res} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_1 + I_2}{I_s} \right) = 10 \log_{10} \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$



LE DECIBEL

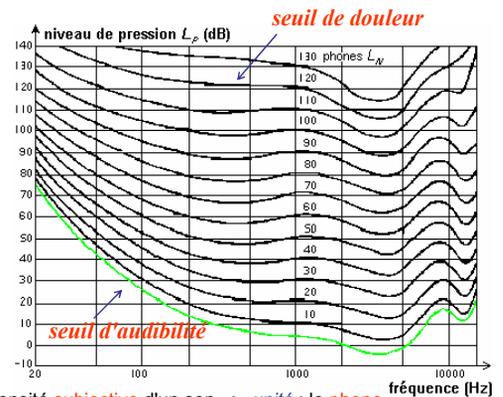


Pa	dB
200	140
20	120
2	100
0,2	80
0,02	60
0,002	40
0,0002	20
0,00002	0

$$40 \text{ dB} + 40 \text{ dB} = 2 \times 40 \text{ dB} = 43 \text{ dB}$$

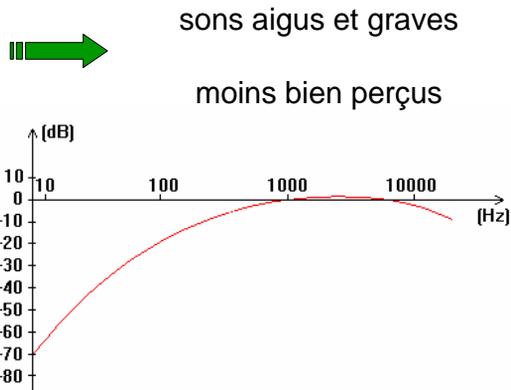
$$40 \text{ dB} + 140 \text{ dB} = 140 \text{ dB}$$

COURBES ISONIQUES

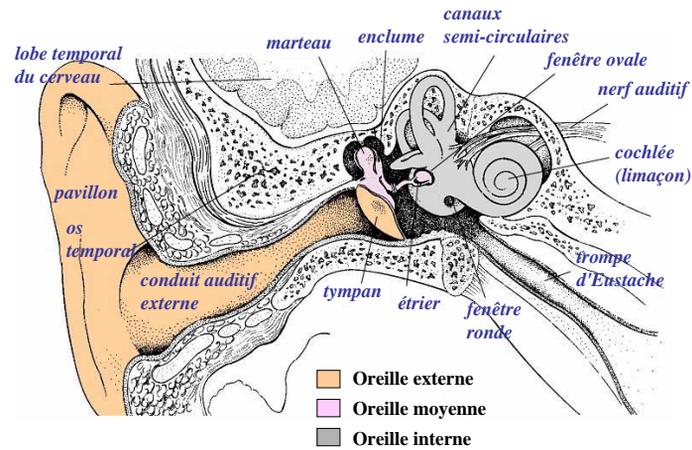


sonie : intensité subjective d'un son ; unité : le phone
 Exemple : Un son de 70 phones provoque la même sensation auditive qu'un son de fréquence 1000 Hz dont le niveau physique est de 70 dB

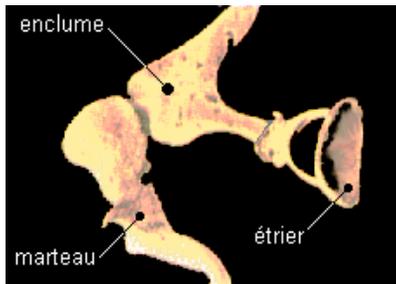
COURBES DE PONDERATION : dB(A)



STRUCTURE DE L'OREILLE



CHAINE DES OSSELETS

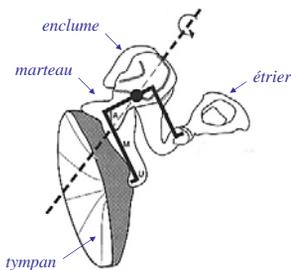


LE TYMPAN

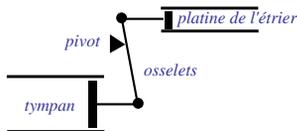


D'après Robier

Transfert des pressions acoustiques (ondes sonores) du milieu aérien aux fluides et aux structures de l'oreille interne (cochlée)



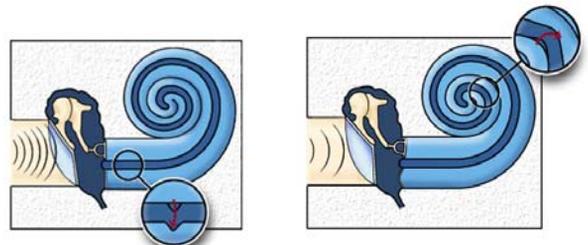
"petit" déplacement (liquide peu compressible)
force plus "élevée" et S plus petite
==> pression plus grande



"grand" déplacement (gaz compressible)
force moins "grande" et S plus grande
==> pression plus petite

Transfert des pressions acoustiques (ondes sonores) du milieu aérien aux fluides et aux structures de l'oreille interne (cochlée)

Les vibrations sont transmises par le tympan et la chaîne des osselets. L'étrier, plaqué sur la fenêtré ovale transfère la vibration au compartiment périlymphatique de la rampe vestibulaire et aux structures de l'oreille interne. En fonction de sa fréquence, la vibration a un effet maximal en un point différent de la membrane basilaire : c'est la tonotopie passive.



un son de fréquence élevée affecte une portion basale de la cochlée

un son de fréquence grave affecte une portion plus apicale de la cochlée

Texte et images extraits du site pédagogique "Promenade autour de la cochlée" (<http://www.cochlee.info>) par R Pujol et al., Université Montpellier 1 et INSERM <http://www.iurc.montp.inserm.fr/cric51/audition/fran%7Eais/ear/fear.htm>

TRANSPORTS TERRESTRES

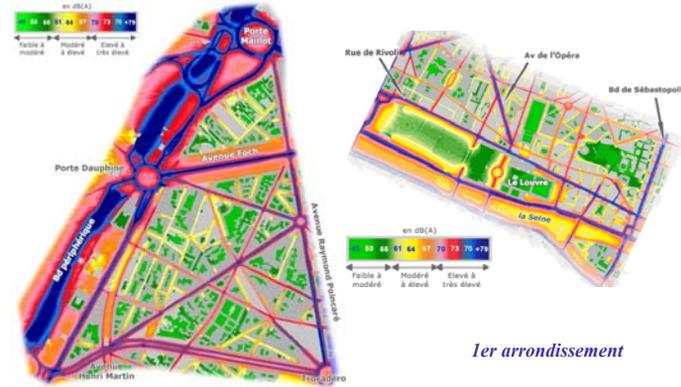
Exposition des populations au bruit :
nombre de points noirs routiers



$Leq \geq 70 \text{ dB(A)}$ entre 8 h -20 h

Extrait de la Banque de données
informatisée du LRPC Strasbourg
(bilan 1998)

CARTES DE BRUIT (PARIS)



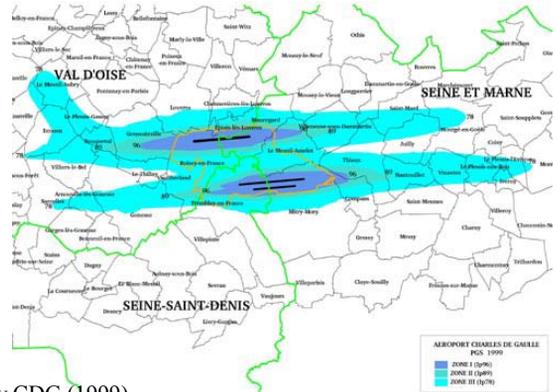
16ème arrondissement

www.paris.fr/FR/Environnement/bruit/carto_bruit/default.ASP

PLAN DE GENE SONORE (PGS)

document prévu par la loi 92-1444 du 31 décembre 1992
(Article 19) permettant de définir les zones dans
lesquelles les riverains peuvent prétendre à l'aide à
l'insonorisation

PLAN DE GENE SONORE (PGS)



Roissy CDG (1999)

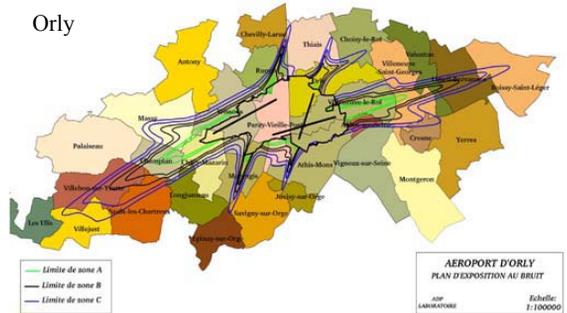
<http://www.adp.fr/labo/web/surenv/bruit/index.html>

PLAN D'EXPOSITION AU BRUIT (PEB)

document prévu par la loi 85-696 du 11 juillet 1985 qui
réglemente l'urbanisme au voisinage des aéroports de
façon à ne pas exposer de nouvelles populations aux
nuisances de bruit. Des mesures spécifiques permettent
de prendre en compte les spécificités du contexte pré-
existant.

➔ principe de précaution

PLAN D'EXPOSITION AU BRUIT (PEB)



<http://www.adp.fr/labo/web/surenv/bruit/index.html>

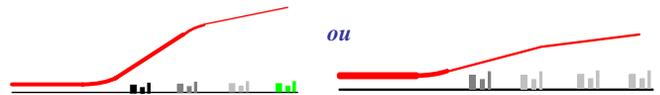
PEB - PGS : FUSION ?

Un groupe de travail interministériel s'est penché sur la question du rapprochement entre les procédures relatives aux plans d'exposition au bruit et aux plans de gêne sonore. Un rapport rendu public en décembre 2007 pèse les avantages et inconvénients propres à une fusion totale des deux zonages et fait des propositions.

Rapport du groupe de travail « Rapprochement des procédures PEB et PGS » - Rapport n°004577-01 - juin 2007 (format pdf - 784,9 Ko) - Auteurs : Gilles Rouques (CGPC) et Annick Helias (IGE)
http://publications.ecologie.gouv.fr/publications/IMG/pdf/Rapport_GT_Rapprochement_PEB_et_PGS.pdf

EXEMPLE DE SOLUTION : LA GESTION DU TRAFIC

- nombre maximum des mouvements d'avions (ORLY : 200.000 par an)
- limitation des horaires (ORLY : 7 h à 23 h)
- choix des couloirs aériens
- optimisation des trajectoires de décollage



Perception et acoustique des salles (1/10)

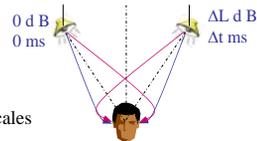
• Les sons

- ✓ le bruit (gêne, fonction d'alerte)
- ✓ la parole (intelligibilité)
- ✓ la musique (esthétique)
- ↳ **organisation des sons**
 - temporelle (rythme, mélodie)
 - spatiale (remplir l'espace)
 - ↳ espace perçu
 - visuellement
 - auditivement
- ✓ spectre
- ✓ intensité
- ✓ durée

Perception et acoustique des salles (2/10)

• La perception

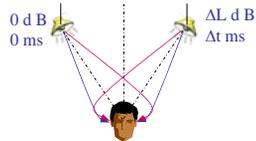
- ✓ Localisation : comparaison par le cerveau des
 - intensités
 - temps d'arrivée } aux deux oreilles
- ✓ Attributs :
 - écoute monaurale ⇒ sonie, tonie, timbre
 - écoute binaurale ⇒ (timbre), espace sonore
- ✓ Continus : formants pour la voix
- ✓ Transitoires : consonnes, attaques musicales



Perception et acoustique des salles (3/10)

• L'espace sonore

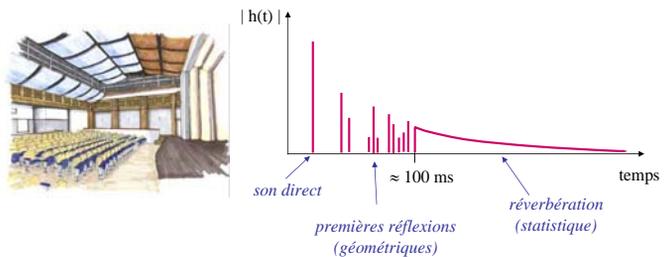
- ✓ Repérage d'une source
 - binaurale
 - pavillon
 - diffraction
- ✓ Repérage deux sources
 - sources cohérentes : impossible
 - sources incohérentes : distinctes
- ✓ Retard entre deux sources cohérentes
 - effet de sommation (~ 1ms)
 - effet d'antériorité (sonie + effet d'espace)
 - effet d'espace (3D)
- ✓ Les trois effets peuvent être perçus simultanément (réflexions dans une salle)
- ✓ grand nombre de réflexions, effets tardifs : réverbération



Perception et acoustique des salles (4/10)

• Paysage sonore : intelligibilité et bruit

- ✓ Bruit masquant la parole
 - Exemple : effet pernicieux de la réverbération
- ✓ Réverbération permettant au locuteur de s'entendre
- ✓ Réverbération trop élevée : fatigue



Perception et acoustique des salles (5/10)

- Paysages sonores, acoustique des salles (1/6)
 - Attente de l'auditeur → épanouissement, plaisir esthétique
 - Attente de l'exécutant → interprétation de la musique
- ➡ L'auditeur cherche à :
 - ✓ bénéficier d'un son ample (éviter la fatigue)
 - ✓ profiter de ses deux oreilles (effet d'espace)
 - ✓ bien comprendre la musique (mais petit "flou")
 - ✓ avoir un bon réglage de la sonorité (équilibre instrumental, équilibre tonal, ...)
- ➡ Le musicien cherche de surcroît à :
 - ✓ bien entendre ce qu'il joue
 - ✓ un bon contact avec les autres musiciens

Perception et acoustique des salles (6/10)

- Paysages sonores, acoustique des salles (2/6)
 - Les auditeurs
 - ➡ Son ample
 - Orchestre : 10 à 100 W (dans les faits < 110 dB)
 - ✓ bonne répartition de l'énergie sonore
 - ✓ augmenter le nombre de réflexions
 - ↳ augmenter le volume de la salle (6 à 11 m³ par auditeur)
 - ➡ Usage des deux oreilles
 - ✓ réflexions latérales initiales (proche de l'auditeur)
 - ↳ améliorer la netteté
 - ➡ Bonne compréhension
 - ✓ réverbération limitée (compromis avec l'ampleur)
 - ↳ favoriser le léger "flou"
 - ➡ Bon réglage de la sonorité (délicat)
 - ✓ éviter les réflecteurs frontaux (au-dessus et derrière l'orchestre), car → coloration
 - ↳ si les réflecteurs existent, les fractionner

Perception et acoustique des salles (7/10)

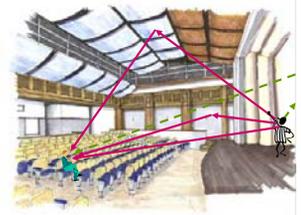
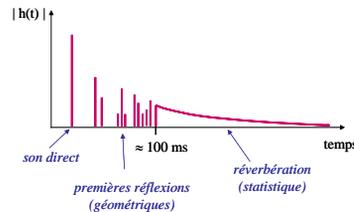
- Paysages sonores, acoustique des salles (3/6)
 - Les Musiciens
 - ➡ entendre ce qu'ils jouent
 - ✓ renvoi du son vers la scène
 - ✓ bon couplage scène/salle
 - ➡ bon contact entre eux
 - ✓ réflecteurs au-dessus de l'orchestre
 - La salle
 - ➡ Acoustique des salles ≡ affaire de géométrie
 - ✓ agencement des volumes
 - ✓ agencement des parois
 - ↳ contact auditeurs / musiciens
 - couplage scène / salle
 - ➡ Traitement acoustique absorbant n'améliore rien
 - ✓ (permet éventuellement de remédier à échos voire coloration)

Perception et acoustique des salles (8/10)

- Paysages sonores, acoustique des salles (4/6)

➢ Réponse impulsionnelle

$$p_r(t) = h(t) * p_{\text{anéchoïque}}(t)$$



Perception et acoustique des salles (9/10)

- Paysages sonores, acoustique des salles (5/6)

- Caractérisation subjective
 - ✓ clarté (précision)
 - ✓ réverbérance (réverbération)
 - ✓ enveloppement (effet d'espace)
 - ✓ intimité
 - ✓ amplitude (niveau)
 - ✓ balance tonale (timbre)
 - ✓ bruit de fond

➢ Questionnaire

➢ Ecoute binaurale

- ✓ simulation numérique
- ✓ maquette

Perception et acoustique des salles (10/10)

- Paysages sonores, acoustique des salles (6/6)

➢ Caractérisation objective (exemples)

✓ amplitude sonore → $10 \log_{10} \left[\int_0^{\infty} p^2(t) dt / p_{\text{ref}}^2 \right]$

✓ durée de réverbération à -60 dB

✓ early decay time (1ères réflexions)

$$10 \log_{10} \left[\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \right]$$

✓ timbre

$$10 \log_{10} \left[\left(\int_{500 \text{ Hz}}^{5000 \text{ Hz}} M(f) df / 4500 \right) / \left(\int_{50 \text{ Hz}}^{500 \text{ Hz}} M(f) df / 450 \right) \right]$$

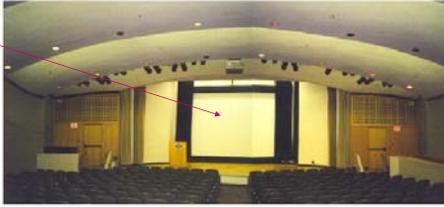
➢ Simulation numérique

➢ Maquette

Exemple d'erreur (1/2)

écran sur un mur parfaitement réfléchissant

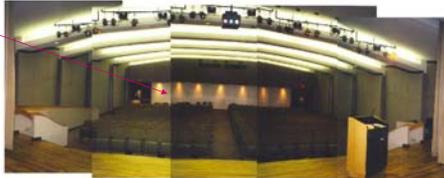
McKinnon Theater, Kettering University, Flint, MI



mur parfaitement réfléchissant



400 places



<http://www.kettering.edu/acad/scimath/physics/acoustics/McKinnon/McKinnon.html>

Exemple d'erreur (2/2)

● flutter écho



Curtain Open
(flutter echo)

échos successifs



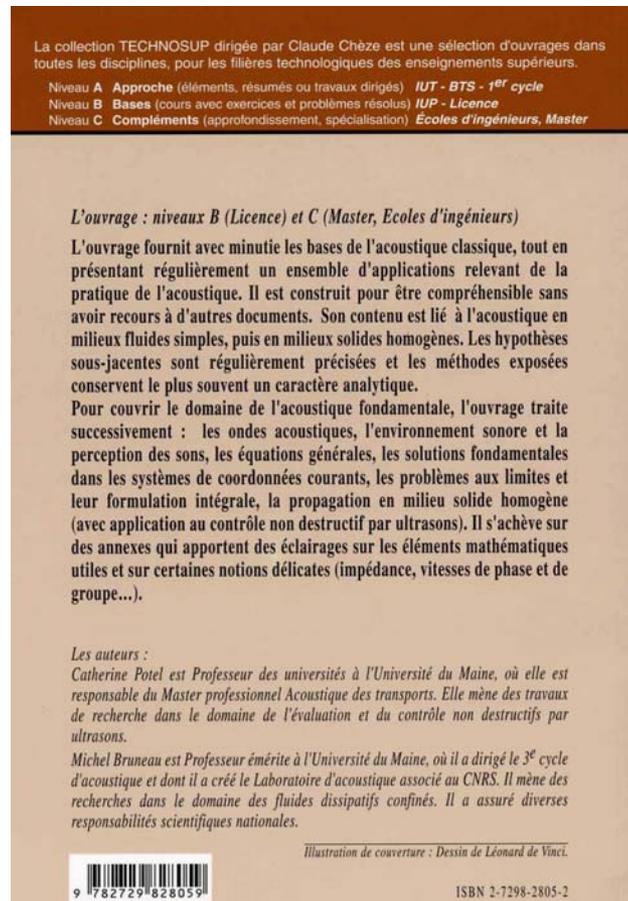
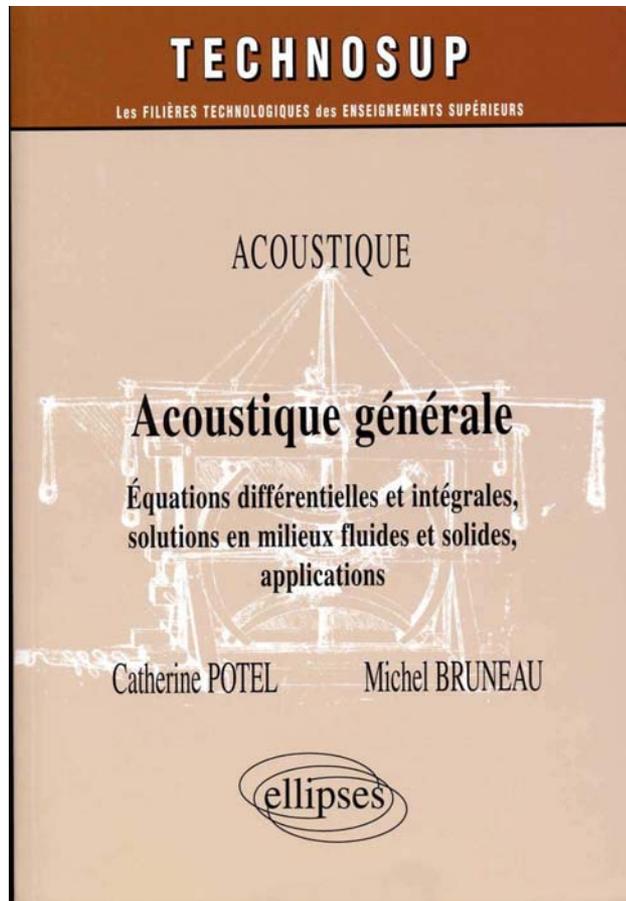
Curtain closed
(no flutter echo)

McKinnon Theater, Kettering University, Flint, MI

<http://www.kettering.edu/acad/scimath/physics/acoustics/McKinnon/McKinnon.html>
Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

Transparents basés sur

C. POTEL, M. BRUNEAU, *Acoustique Générale - équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications*, Ed. Ellipse collection Technosup, 352 pages, ISBN 2-7298-2805-2, 2006



La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chêze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A Approche (éléments, résumés ou travaux dirigés) IUT - BTS - 1^{er} cycle
Niveau B Bases (cours avec exercices et problèmes résolus) IUP - Licence
Niveau C Compléments (approfondissement, spécialisation) Écoles d'ingénieurs, Master

L'ouvrage : niveaux B (Licence) et C (Master, Ecoles d'ingénieurs)

L'ouvrage fournit avec minutie les bases de l'acoustique classique, tout en présentant régulièrement un ensemble d'applications relevant de la pratique de l'acoustique. Il est construit pour être compréhensible sans avoir recours à d'autres documents. Son contenu est lié à l'acoustique en milieux fluides simples, puis en milieux solides homogènes. Les hypothèses sous-jacentes sont régulièrement précisées et les méthodes exposées conservent le plus souvent un caractère analytique.

Pour couvrir le domaine de l'acoustique fondamentale, l'ouvrage traite successivement : les ondes acoustiques, l'environnement sonore et la perception des sons, les équations générales, les solutions fondamentales dans les systèmes de coordonnées courants, les problèmes aux limites et leur formulation intégrale, la propagation en milieu solide homogène (avec application au contrôle non destructif par ultrasons). Il s'achève sur des annexes qui apportent des éclairages sur les éléments mathématiques utiles et sur certaines notions délicates (impédance, vitesses de phase et de groupe...).

Les auteurs :

Catherine Potel est Professeur des universités à l'Université du Maine, où elle est responsable du Master professionnel Acoustique des transports. Elle mène des travaux de recherche dans le domaine de l'évaluation et du contrôle non destructifs par ultrasons.

Michel Bruneau est Professeur émérite à l'Université du Maine, où il a dirigé le 3^e cycle d'acoustique et dont il a créé le Laboratoire d'acoustique associé au CNRS. Il mène des recherches dans le domaine des fluides dissipatifs confinés. Il a assuré diverses responsabilités scientifiques nationales.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



ISBN 2-7298-2805-2