

Son musical (Φ 212)

Reproduction du son

Licence 2
Université Pierre & Marie Curie

Richard Wilson

(richard.wilson@aero.jussieu.fr)

May 30, 2006

()

May 30, 2006 1 / 52

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Reproduire les sons
- 3 Induction magnétique
- 4 Transducteurs
 - Microphones
 - Enceintes acoustiques
- 5 Enregistrement
- 6 Transmission

()

May 30, 2006 2 / 52

Conversion

La reproduction des sons

- Conserver, diffuser, amplifier, transmettre.
- Impératif : convertir les sons,
 - ▶ acoustique \Leftrightarrow mécanique (phonographe, gramophones).
 - ▶ acoustique \Leftrightarrow mécanique \Leftrightarrow électrique (microphones, haut-parleurs).

()

May 30, 2006 3 / 52

Un peu d'histoire...

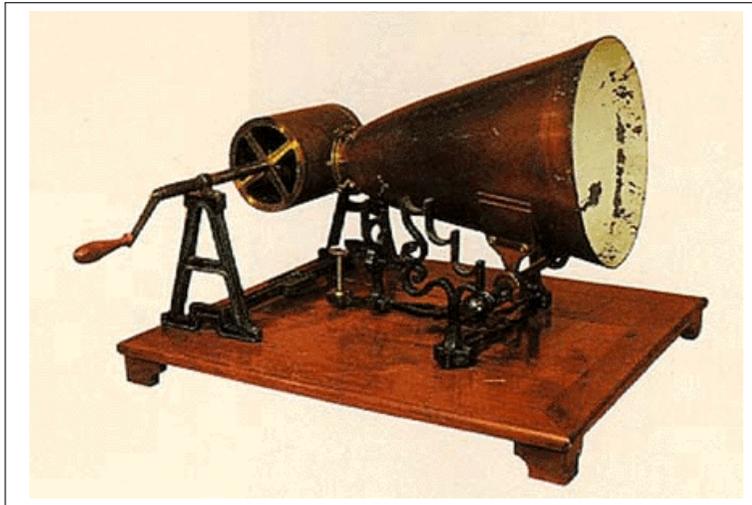
Les premiers pas : le phonographe

- La première machine qui a enregistré les ondes acoustiques était le phonographe du Français Léon Scott de Martinville, en 1857.
- L'appareil était composé d'un diaphragme et d'une soie de sanglier qui traçaient une ligne sinuée latérale sur un cylindre actionné manuellement et enrobé de noir de lampe.
- Le phonographe créait un analogue visuel des ondes acoustiques \Rightarrow **enregistrement**.
- La machine ne pouvait reproduire ces sons.

()

May 30, 2006 4 / 52

Le Phonautographe



()

May 30, 2006 5 / 52

Le Phonographe

Edison

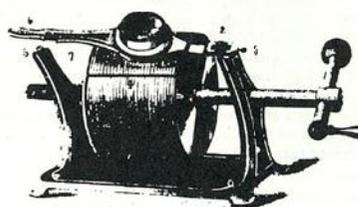
- Vingt ans plus tard, Thomas Edison a inventé le phonographe alors qu'il travaillait sur le télégraphe à répétition.
- Le premier phonographe était doté d'un cylindre recouvert d'une feuille d'étain et monté sur une vis à manivelle. Il possédait un stylet rigide qui gravait le sillon à la verticale.
- Edison a breveté son invention en 1878 et, assuré de sa protection, l'a abandonné pour se consacrer à l'invention de l'ampoule à incandescence.

()

May 30, 2006 6 / 52

Pub...

**EDISON'S
PARLOR SPEAKING
PHONOGRAPH.**



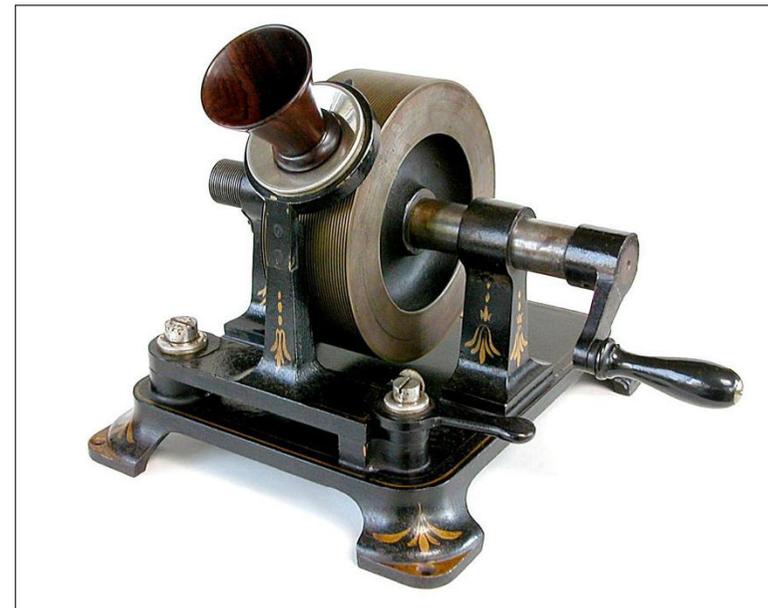
THE MIRACLE OF THE 19th CENTURY.
It Talks. It Whispers. It Sings. It Laughs. It Cries.
It Coughs. It Whistles. It Records and
Reproduces at Pleasure all
Musical Sounds.

An advertisement for Edison's Parlor Speaking Phonograph. The text is in a bold, serif font. Below the text is a detailed illustration of the phonograph, showing its wooden base, metal frame, and large horn. The illustration is in black and white.

()

May 30, 2006 7 / 52

Le Phonographe



()

May 30, 2006 8 / 52

Pub...



EDISON'S"
Phonograph Doll,
THE GREATEST WONDER OF
THE AGE.
A FRENCH JOINTED DOLL, RECITING IN A
CHILDISH VOICE ONE OF A NUMBER OF
WELL-KNOWN NURSERY RHYMES.
Size, 22 Inches. Price, \$10.00.
Now for sale at
SCHWARZ' TOY BAZAAR,
42 East 14th St., Union Square, N. Y.
Sent by Ex. C. O. D. or on receipt of price.

()

May 30, 2006 9 / 52

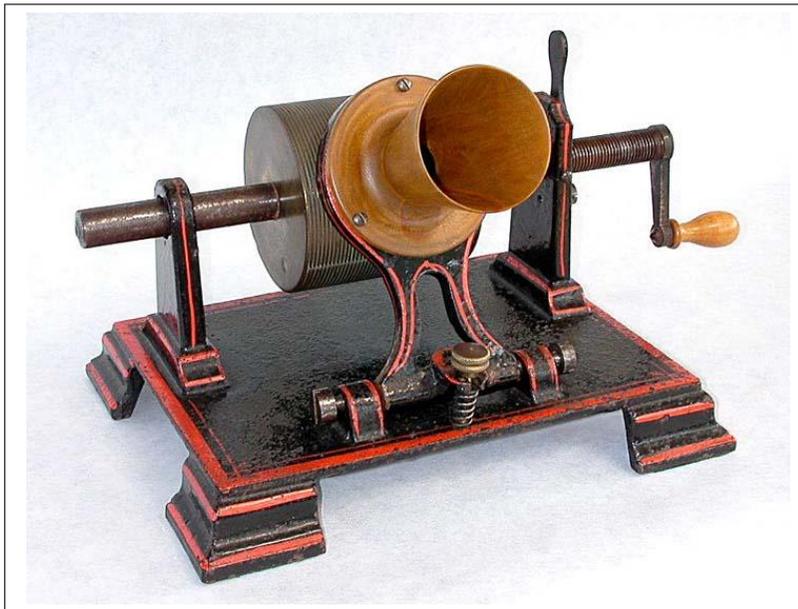
La poupée qui parle



()

May 30, 2006 10 / 52

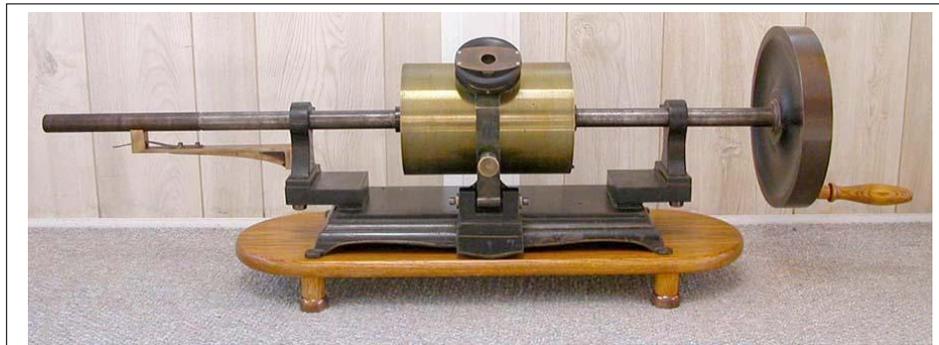
Le petit phonographe



()

May 30, 2006 11 / 52

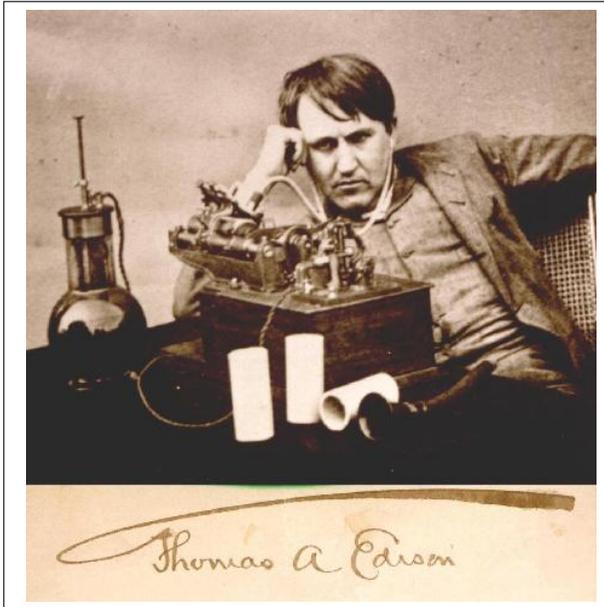
Le phonographe géant



()

May 30, 2006 12 / 52

Le phonographe à moteur



()

May 30, 2006 13 / 52

Le graphophone

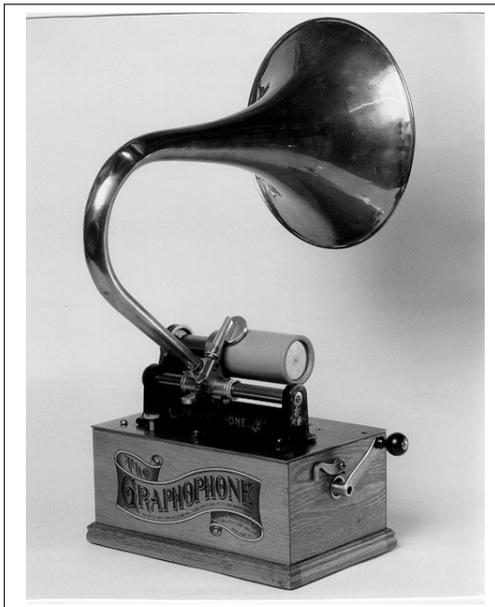
Bell et La Volta associates

- En 1880, Alexander Graham Bell crée un établissement de recherche en électro-acoustique à Washington, D.C. (la Volta Laboratory Association) avec l'argent qu'il avait reçu de l'académie des sciences Française en reconnaissance de l'invention du téléphone.
- Il engage son cousin, Chichester Bell, ainsi qu'un scientifique anglais, Charles Tainter. Ils se consacrent à l'amélioration du phonographe.
- En 1885 ils brevettent une machine, qu'il baptisent **graphophone**.
 - Cylindre de cire (meilleure reproduction, plus facile à conserver),
 - Mécanisme d'horlogerie.
 - Mégaphone : amplification et filtre passe bas (suppression du bruit haute fréquence).

()

May 30, 2006 14 / 52

Le graphophone



()

May 30, 2006 15 / 52

Le gramophone

Le gramophone

- Emile Berliner est né à Hanovre en 1851 et a immigré aux États-Unis en 1870. Il travaillait comme commis dans une mercerie. C'est durant cette période qu'il commence à s'intéresser à la technologie du téléphone nouvellement inventé.
- Il conçoit un émetteur (transducteur) avec pastille de carbone en 1877, qui a été utilisé par Bell (téléphone). Cet argent permet à Berliner de se consacrer exclusivement à la création du gramophone.

()

May 30, 2006 16 / 52

Le gramophone

- Edison et Volta Associates percevaient la machine parlante principalement comme un outil de travail, une machine à dicter.
- Berliner décide d'approcher la technologie d'un point de vue différent: la reproduction musicale.
- Il conçoit une machine qui utilise des disques au lieu de cylindres.
 - ▶ Enregistrement latéral au lieu de vertical.
 - ▶ Nouveau matériau pour les disques: le shellac (cire d'origine animale - insecte d'Asie du sud).
 - ▶ La durée d'un disque de 30 cm (modèle "géant") était de 4 min.

Le gramophone

- Il invente également un procédé de copie permettant de reproduire à l'infini un enregistrement.
 - ▶ Le tracé sonore était tout d'abord dessiné côte-à-côte, en spirale, sur un disque de zinc,
 - ▶ Ce disque original était plaqué par galvanoplastie afin de créer un négatif qui servait ensuite à graver des copies dans un caoutchouc vulcanisé (et plus tard le shellac).
- C'est le principe encore employé pour les disques vinyles, voire les CDs.

Gramophone Victor (Monarch, 1901)



Gramophone cristal (1995)



L'induction magnétique

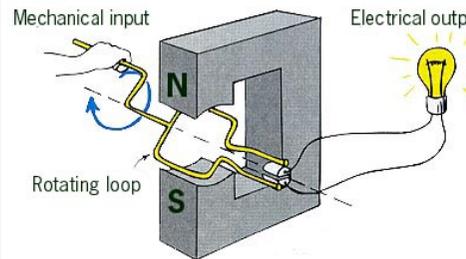
Induction

- Découverte par Michael Faraday (1831)
- Quand un fil conducteur de longueur L est déplacé avec une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} , un courant I est induit.

$$I(t) = L \frac{\vec{v} \wedge \vec{B}}{R}$$

où R est la résistance du fil.

- Si l'on change le sens du déplacement, le courant est inversé.



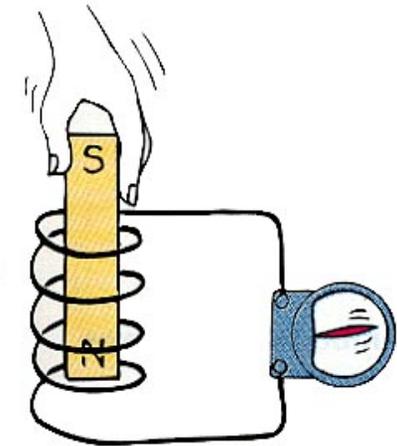
()

May 30, 2006 21 / 52

L'induction magnétique

Induction

- Il est équivalent de déplacer l'aimant (chant magnétique variable) dans un conducteur fixe.
- Cette propriété est à la base de la conversion mécanique-électrique.
- À la base du fonctionnement du microphone.



()

May 30, 2006 22 / 52

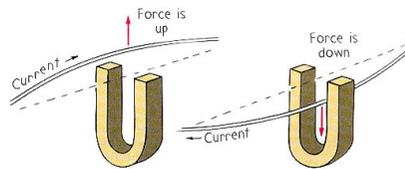
Force de Laplace

Courant dans un champ magnétique

- À l'inverse, un conducteur parcouru par un courant électrique dans un champ magnétique subit une force.

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

- Cet effet est le principe de base des moteurs électriques, et plus généralement de la conversion électrique-mécanique.
- À la base du fonctionnement du haut-parleur.



()

May 30, 2006 23 / 52

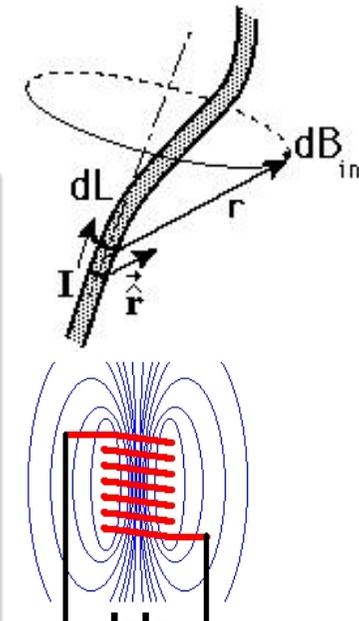
Électro-aimant

Principe

- Un conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} I d\vec{l} \times \vec{r}$$

- **L'électro-aimant** : Une bobine parcourue par un courant électrique se comporte comme un aimant.
- La position des pôles magnétiques dépend du sens du courant.



()

May 30, 2006 24 / 52

Électro-aimant

Inducteur et induit

- Une bobine alimentée par un courant variable placée dans un champ magnétique constant subit une force (de Laplace).
- Un aimant mobile placé dans une bobine crée un courant variable.

Applications de l'électro-aimant

- Applications multiples des électro-aimants: moteur, sonnettes, générateurs, disque dur...
- Utilisés comme **inducteurs** ou comme **induits** (collecteurs de courant).
- À la base de la conversion acoustique-électrique et de l'enregistrement magnétique.

()

May 30, 2006 25 / 52

Transducteurs

Définition

- Système de conversion d'une forme d'énergie en une autre forme.
- Transducteur acoustique-électrique : transformation de l'énergie acoustique en énergie (courant) électrique.



Exemples

- Microphones.

()

May 30, 2006 26 / 52

Transducteurs

Définition

- Transducteur électro-acoustique : transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.



Exemples

- Haut-parleur, moteur.

()

May 30, 2006 27 / 52

Microphones

Principes

- Un microphone est un dispositif de conversion des ondes sonores en signaux électriques variables. C'est donc un capteur analogique.
- Les fluctuations de pression acoustiques font vibrer une membrane.
- La membrane est solidaire d'un élément (bobine, aimant, condensateur, ...) dont le mouvement crée un courant.
- Selon le type d'utilisation (ambiance sonore, chant, type d'instruments) et selon les conditions d'utilisation (studio, scène, en extérieur...), on trouve des conceptions de microphones différentes (microphones dynamiques, électret ou électrostatiques).

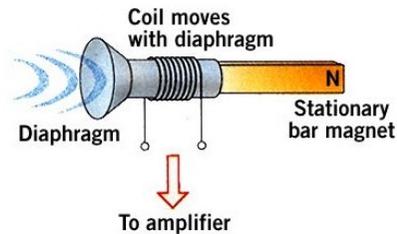
()

May 30, 2006 28 / 52

Microphones

Microphone dynamique

- Les fluctuations de pression acoustiques font vibrer la membrane.
- La membrane est solidaire d'une bobine (aimant fixe) ou d'un aimant (bobine fixe),
- Le courant induit est ensuite amplifié.
- Le microphone dynamique est généralement utilisé sur scène car il est résistant et peu sensible aux effets de Larsen.



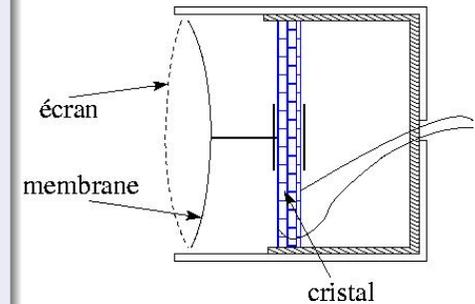
()

May 30, 2006 29 / 52

Microphones

Microphone piézo-électrique

- Certains cristaux (quartz, tourmaline, topaze, céramiques) se chargent électriquement lorsqu'on leur applique une contrainte \Rightarrow effet piézoélectrique (découvert par Pierre et Jacques Curie, 1880).
- L'effet piézoélectrique est réversible.
- Certains micros (bon marché) et haut parleurs utilisent cet effet.



()

May 30, 2006 30 / 52

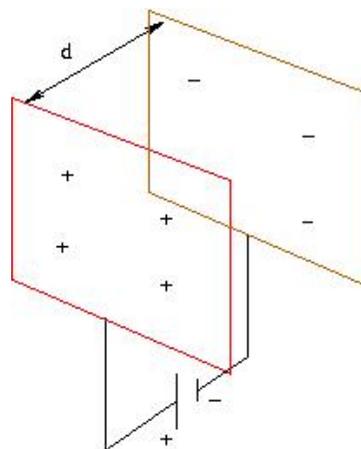
Microphones

Microphone électrostatiques

- La tension aux bornes d'un condensateur dépend de la charge Q et de la distance entre les conducteurs d .

$$V = \frac{Q}{C} \quad \text{où} \quad C = \epsilon \frac{S}{d}$$

- En faisant varier la distance d , une variation de tension est induite.



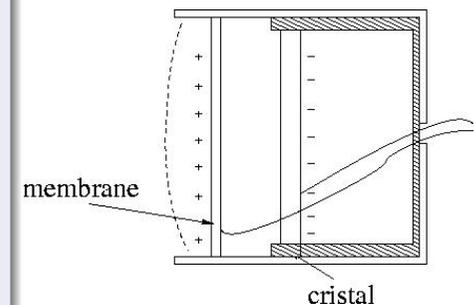
()

May 30, 2006 31 / 52

Microphones

Microphone électrostatique

- Le microphone électrostatique est plus sensible et précis que le microphone dynamique, mais aussi plus fragile. Il est utilisé pour des enregistrements en studio ou des prises de son particulière en extérieur (chant d'oiseaux, cinéma...)
- Il existe un type de micros statiques, les micros à **Electret** : même caractéristiques que le micro électrostatique mais la membrane est polarisée de façon permanente (Électret).



()

May 30, 2006 32 / 52

Caractéristiques des microphones

Sensibilité

- Par définition

$$S = \frac{V}{P_A}$$

- Échelles logarithmiques :

$$S_{dB} = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}}$$

où V est la tension exprimée en mV et P_A la pression exprimée en μBar .

- Deux échelles sont utilisées (deux niveaux de références).

$$S_{dBV} = 20 \log_{10} \frac{S}{1} \quad \text{et} \quad S_{dBm} = 20 \log_{10} \frac{S}{0.775}$$

()

May 30, 2006 33 / 52

Caractéristiques des microphones

Directivité

- Par construction, certains microphones sont plus ou moins directif.
- La directivité est la réponse à une source en fonction de la direction incidente θ .

$$h(\theta) = \frac{S(\theta)}{S_{Axe}}$$

où $S(\theta)$ est la sensibilité fonction de l'angle d'incidence.

- Exprimée en dB, la directivité s'écrit :

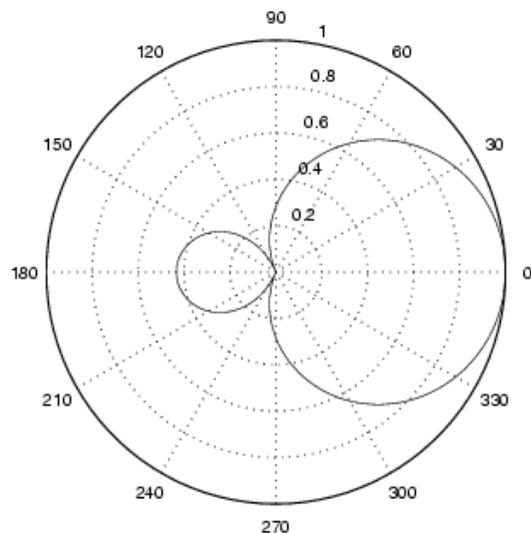
$$h_{dB}(\theta) = 20 \log_{10} \frac{S(\theta)}{S_{Axe}} = 20 \log_{10} h(\theta)$$

()

May 30, 2006 34 / 52

Directivité

Par exemple, soit $h(\theta) = (1 + \alpha \cos \theta)/(1 + \alpha)$.



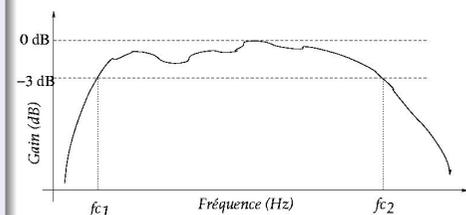
()

May 30, 2006 35 / 52

Caractéristiques des microphones

Réponse en fréquence

- Exprime le gain ($<$ ou $>$ à 1) en fonction de la fréquence.
- Le gain doit être le plus constant possible entre 20 et 20 000 Hz.
- On appelle fréquences de coupure, les fréquences pour lesquelles le gain est réduit de 3 dB par rapport au gain max.



()

May 30, 2006 36 / 52

Enceinte électro-acoustique



Éléments constitutifs

- Haut-parleurs,
- Charge (caisse, évent, parois)
- Filtres, délivrant à chaque haut-parleur le domaine de fréquence adéquat.

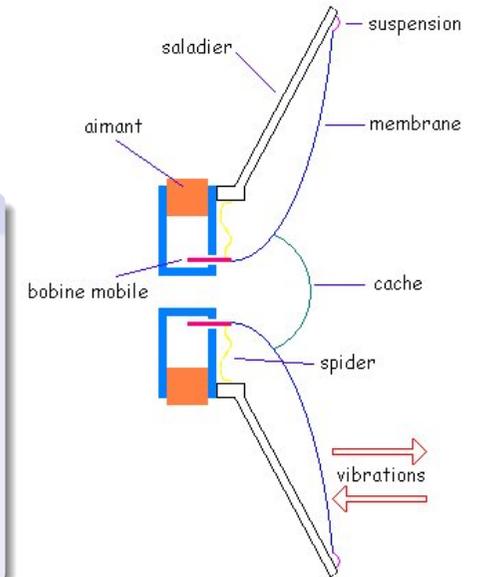
()

May 30, 2006 37 / 52

Haut-parleur

Principe

- Transducteur : énergie électrique \Rightarrow énergie acoustique.
- Une bobine, parcourue par un courant variable, est placée dans le champ magnétique d'un aimant permanent \Rightarrow force de Laplace.
- La bobine est solidaire d'une membrane en forme de cône.



()

May 30, 2006 38 / 52

Haut-parleurs

Rendement

- La puissance électrique fournie au haut-parleur est

$$\mathcal{P}_E = UI$$

- La puissance acoustique rayonnée est \mathcal{P}_A .
- Le rendement η est

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_A}{\mathcal{P}_E}$$

Ce rendement est usuellement de l'ordre de quelques %.

()

May 30, 2006 39 / 52

Haut-parleurs

Directivité

- La directivité exprime le rapport de la pression acoustique en fonction de l'angle à la pression reçue dans l'axe du haut-parleur.

$$h(\theta) = \frac{P_A(\theta)}{P_A(\text{axe})}$$

- En dB, l'atténuation en fonction de l'angle d'arrivée est :

$$L(\theta) = 20 \log_{10} \frac{P_A(\text{axe})}{P_A(\theta)} = -20 \log_{10} h(\theta)$$

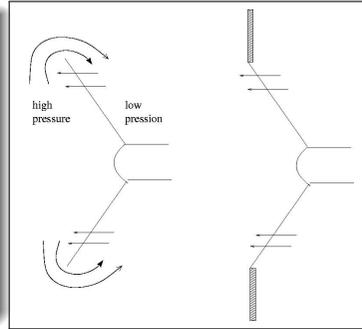
()

May 30, 2006 40 / 52

Charge d'une enceinte

Rendement

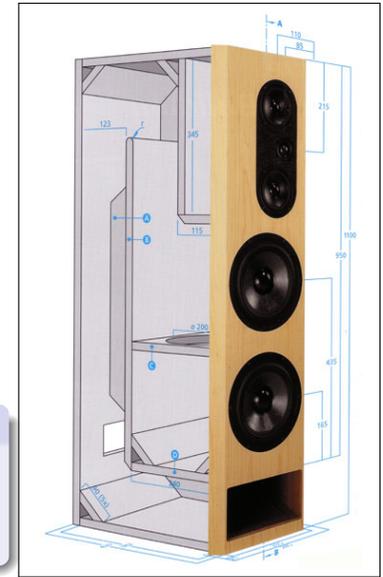
- Le rôle de la caisse (caisse, event) est de confiner les ondes sonores émises vers l'arrière du haut-parleur.
- Sans caisse, il y a un court-circuit d'air de l'avant vers l'arrière du haut-parleur.
- L'existence d'une cloison améliore grandement le rendement.



Enceinte bass-reflex

Enceinte

- Un orifice à la base de l'enceinte renforce l'émission des basses réfléchi (**bass reflex**).



()

May 30, 2006 41 / 52

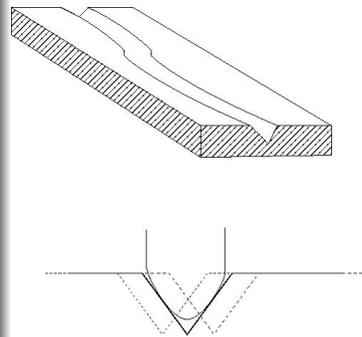
()

May 30, 2006 42 / 52

Disques vinyles

Principe

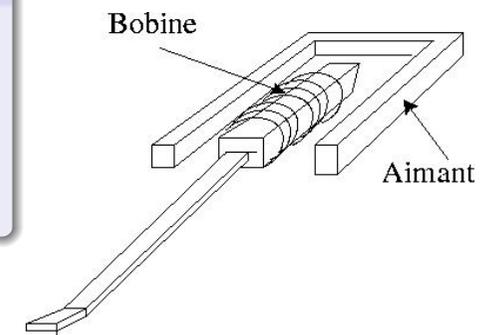
- Gravure des vibrations sonores sur un disque vinyl (plastique).
- Une centaine de piste par cm.
- vitesse angulaire constante, 33,3 ou 45 tours / minutes, lecture de l'extérieur vers l'intérieur (contraste avec le CD).
- Pour un enregistrement monophonique, le mouvement est latéral.
- Enregistrement stéréophonique : mouvement latéral et vertical (deux degrés de liberté).



Disques vinyles

Pickup (collecteur)

- Transducteur mécanique-électrique.
- Principe : un aimant mobile et une bobine fixe ou l'inverse, une bobine mobile dans un aimant fixe \Rightarrow courant variable.



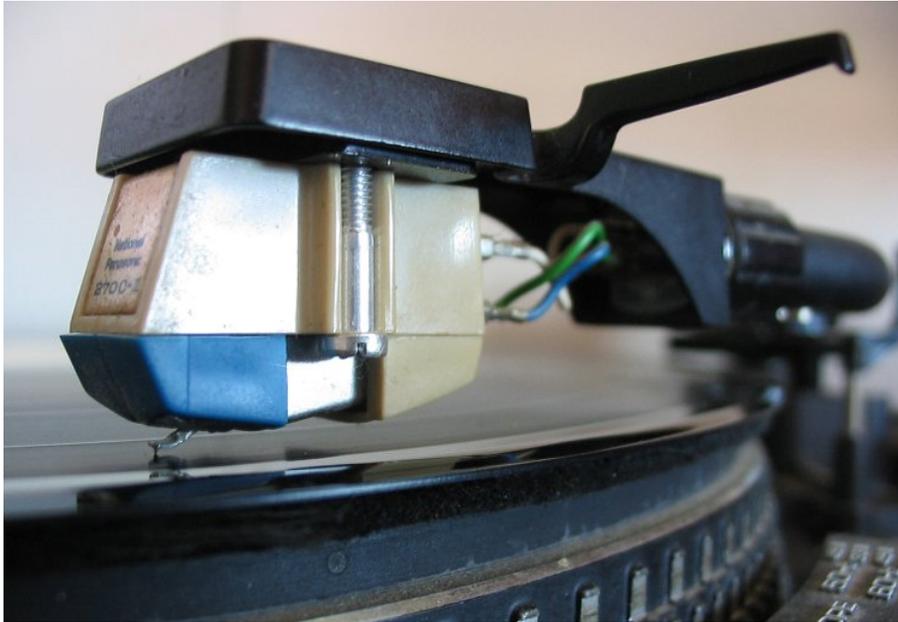
()

May 30, 2006 43 / 52

()

May 30, 2006 44 / 52

Disques vinyles



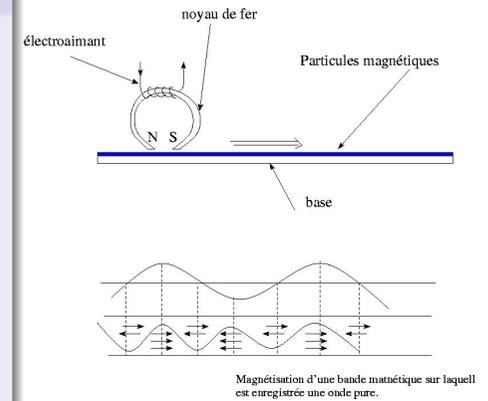
()

May 30, 2006 45 / 52

Bandes magnétiques

Principe

- Une bande magnétique est un film plastique sur lequel sont disposées de fines particules ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) magnétiques (oxyde de fer Fe_2O_3 ou dioxyde de chrome CrO_2).
- En présence d'un champ magnétique, ces particules s'aimantent et conservent leur magnétisation.
- En lecture, le champ magnétique variable induit un courant variable dans une bobine.



()

May 30, 2006 46 / 52

Bandes magnétiques

Bande passante

- Les vitesses de défilement des bandes sont 38, 19, 9,5 ou 4,8 cm/s.
- Le choix d'une vitesse est un compromis : plus grande est la vitesse, meilleure sont les performances (du Nagra à la cassette).
- En effet la limite haute fréquence qu'une bande puisse enregistrer dépend de la vitesse :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

L'espace de la tête de lecture étant de l'ordre de $10 \mu\text{m}$, ceci fixe une limite supérieure à la fréquence maximum.

- Exemple : Une onde pure de 10 kHz sur une bande défilant à 9,5 cm/s aura une longueur d'onde

$$\lambda = \frac{9,5}{10^4} = 9,5 \mu\text{m}$$

()

May 30, 2006 47 / 52

La transmission du son

Modulation d'amplitude

- On utilise des ondes électromagnétiques pour transmettre des signaux sonores.
- La longueur d'onde des ondes électromagnétiques associées aux fréquences sonores est gigantesque. Exemple :

$$f_A = 300 \text{ Hz}, \quad \lambda_E = \frac{c}{f_A} = \frac{3 \times 10^8}{300} = 1000 \text{ km}$$

impossible de transmettre de telles fréquences.

- On utilise une fréquence **porteuse** f_P ($f_P \gg f_A$). Le signal transmis est :

$$\begin{aligned} s(t) &= \cos 2\pi f_A t \times \cos 2\pi f_P t \\ &= \frac{1}{2} (\cos(2\pi(f_P + f_A)t) + \cos(2\pi(f_P - f_A)t)) \end{aligned}$$

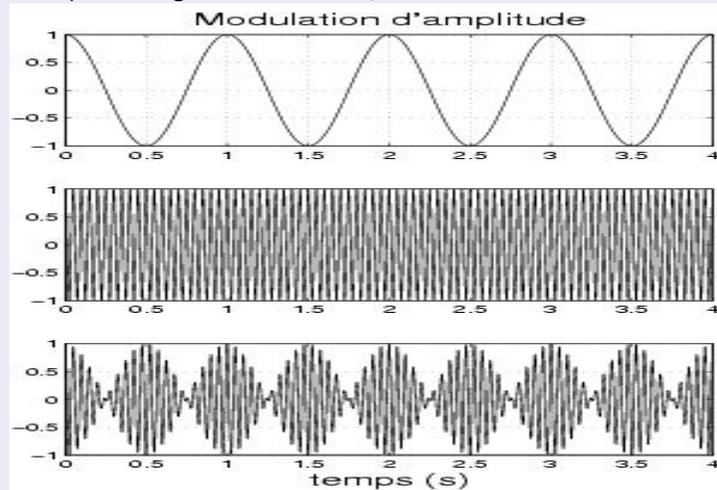
()

May 30, 2006 48 / 52

La transmission du son

Modulation d'amplitude

- Exemple : en grandes ondes, $f_p \sim 150$ kHz.



()

May 30, 2006 49 / 52

La transmission du son

Démodulation d'amplitude

- À la réception, le signal HF est multiplié par la fréquence de la porteuse,
- Le signal reçu est :

$$\begin{aligned} r(t) &= \frac{1}{2} \{ \cos(2\pi(f_A + f_p)t) + \cos(2\pi(f_A - f_p)t) \} \times \cos 2\pi f_p t \\ &= \frac{1}{2} \cos 2\pi f_A t + \frac{1}{2} (\cos 2\pi(2f_p \pm 2f_A)t) \end{aligned}$$

- Le signal reçu est constitué de la fréquence f_A et de hautes fréquences $2f_p \pm f_A$. Il suffit de filtrer (passe bas) le signal reçu pour restituer l'information (c.à.d. les fréquences sonores).

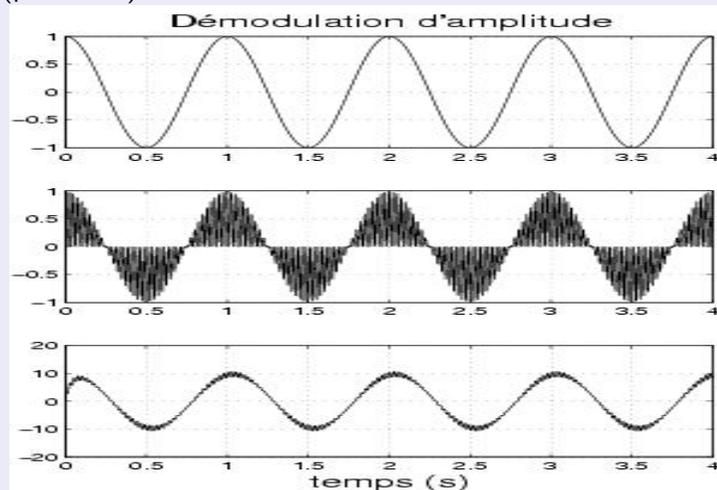
()

May 30, 2006 50 / 52

La transmission du son

Démodulation d'amplitude

- Le signal reçu est multiplié par la fréquence de la porteuse puis filtré (passe-bas).



()

May 30, 2006 51 / 52

Conclusion

La reproduction du son

- Par principe : conversion mécanique (onde de pression) \Rightarrow électrique (disque vinyl, microphone);
- où conversion électrique \Rightarrow mécanique (haut-parleur);
- Cette conversion est assurée par un **transducteur** : conversion **mécanique** \Leftrightarrow **électrique**.
- L'amplification, l'enregistrement, la transmission est réalisée à partir de signaux électriques.

()

May 30, 2006 52 / 52