

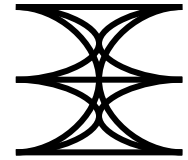
# **M2-Mitic-GL-Master Recherche** **option VIS**

Notions sur le son

Notions on sound

**Kadi Bouatouch**

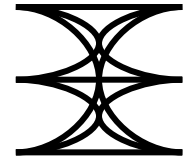
[kadi.bouatouch@irisa.fr](mailto:kadi.bouatouch@irisa.fr)



# Plan

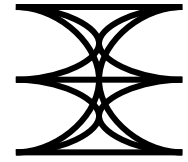
- Son
  - Le phénomène son
  - Les microphones
  - Enregistrement
  - Synthèse sonore
    - Éléments d'acoustique
    - Simulation de propagation
  - Restitution
  - Bibliographie

# Le phénomène son



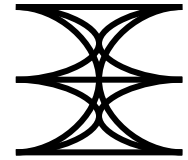
- Dans un milieu compressible, le plus souvent dans l'air, le son se propage sous forme d'une variation de pression créée par la source sonore (*sound source*).
- Seule la compression se déplace et non les molécules d'air, si ce n'est de quelques micromètres.

# Le phénomène son



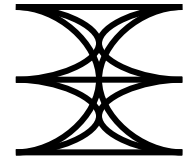
- Source en vibration génère une onde (*wave*) dont la pression s'additionne et se retranche alternativement à la pression atmosphérique (*air pressure*)
- Cette pression acoustique excite le tympan (*eardrum, tympanum*): se mesure en Pascal (Pa)
- Fréquence : périodicité
- Amplitude : valeur du niveau sonore

# Le phénomène son



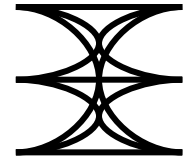
- Longueur d' onde :  $\lambda$
- Période :  $T$
- Vitesse :  $\lambda / T$  (m/s), 340 m/s dans l' air
- Fréquence :  $F = 1 / T$
- Fréquences audibles (audible frequencies) :  
20 à 20 khz

# Le phénomène son



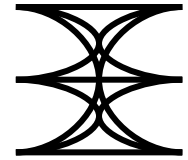
- La puissance acoustique (*sound power*)  $W$  d'une source se répartit sur des sphères de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'onde progresse
- Niveau sonore (*sound level*) perçu sur ces sphères : intensité acoustique  $I$  (*sound intensity*)
- $I = W / (4\pi r^2)$ , puissance moyenne (*mean power*) par unité de surface ( $W/m^2$ )

# Le phénomène son



- Hauteur (*Pitch*)
  - Échelle (*range*) du grave-aiguë du son (*low-pitched, high-pitched sounds*), liée à la fréquence fondamentale
  - Hauteur : qualité qui fait distinguer un son grave d'un son aigu. On considère que la hauteur dépend de façon primordiale de la fréquence physique du signal sonore
  - Lorsqu'on multiplie (ou divise) une fréquence par deux, on définit un intervalle appelé octave
  - Différence de hauteur perçue entre 200 Hz et 400 Hz est la même qu'entre 400 Hz et 800 Hz
  - Ce n'est pas la différence fréquentielle qui importe en perception sonore mais le rapport fréquentiel

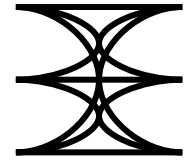
# Le phénomène son



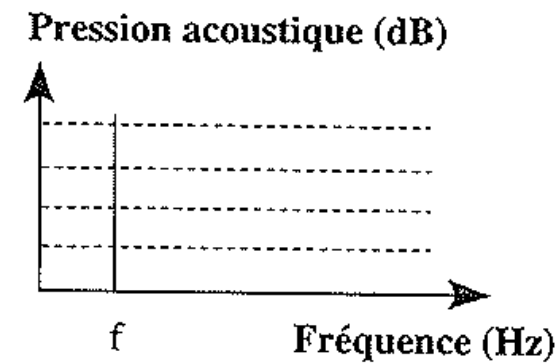
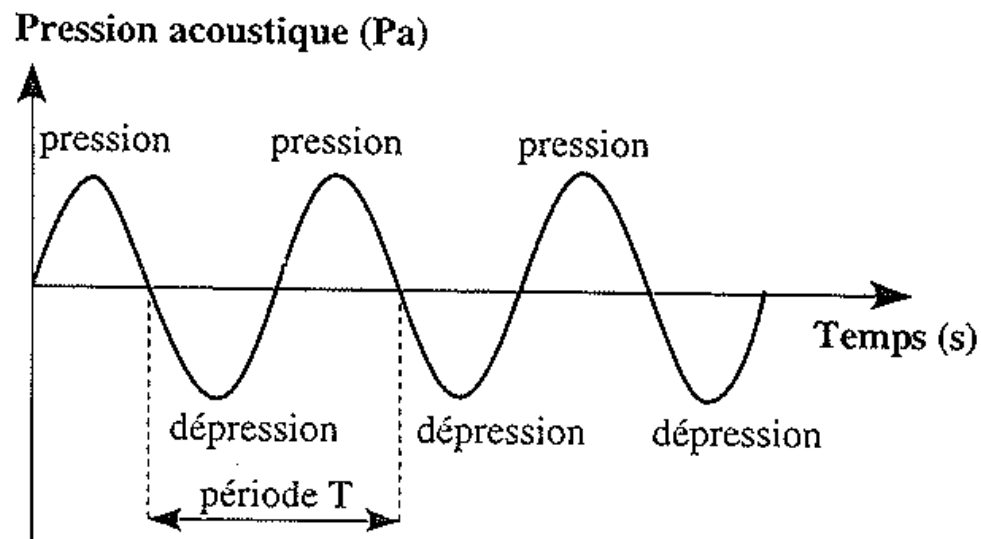
- Sons purs et sons complexes
  - A chaque signal sonore correspond une forme d'onde particulière
  - Un diapason, frappé doucement, génère un son pur sinusoïdal composé d'une seule fréquence
  - Son complexe : décomposée en une somme de sons purs dont les fréquences sont des multiples de la fréquence basse.
  - Fréquence basse : fondamentale ou harmonique 1
  - Fréquences multiples : harmoniques



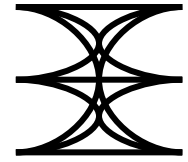
# Le phénomène son



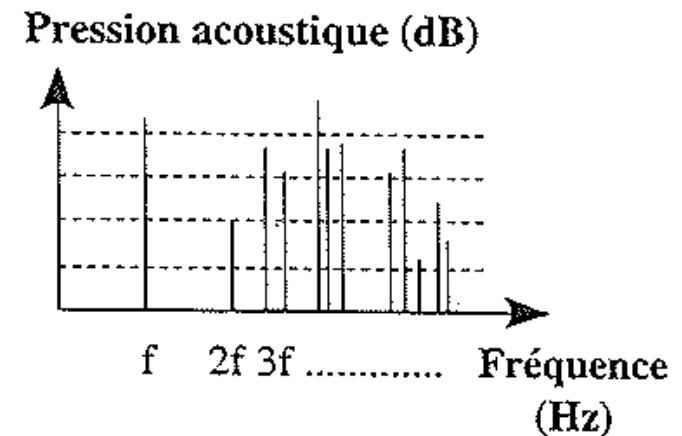
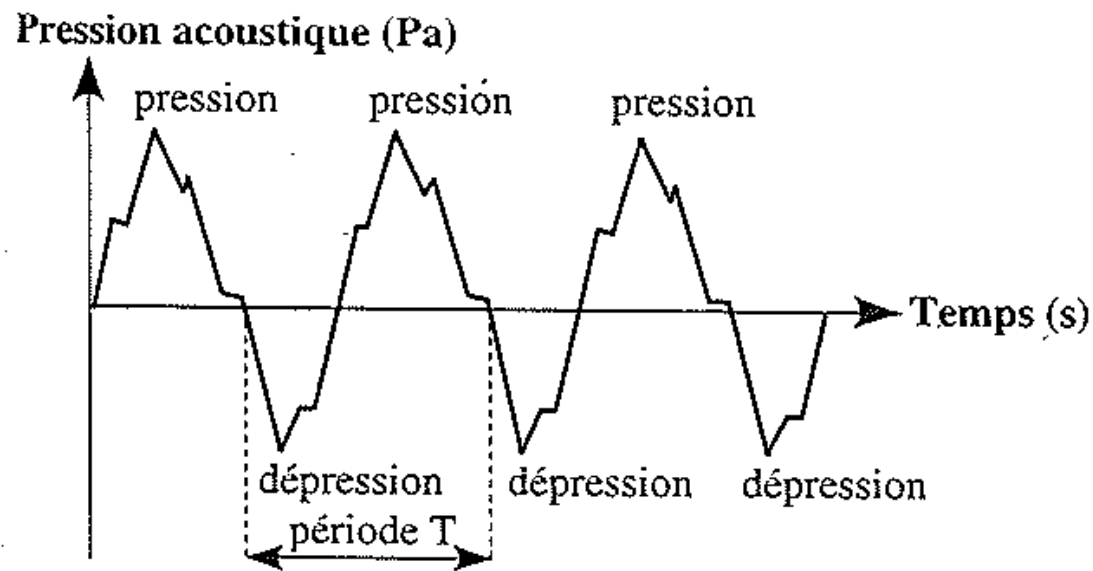
- Sons purs



# Le phénomène son

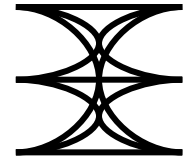


- Sons complexes



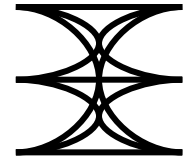
Son de 440 Hz joué au violon

# Le phénomène son

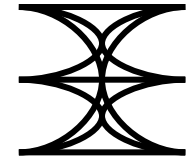


- Niveau sonore (*sound level*)
  - Plus faible niveau d'un signal de 1000 Hz perceptible correspond à une intensité acoustique de  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>
  - C'est le seuil d'audition (*hearing threshold*)
  - Le plus fort admissible (*highest audible intensity*) d'un même signal est 1 W/m<sup>2</sup>
  - Rapport entre niveau le plus fort et le niveau le plus faible = dynamique
  - A chaque fois que l'on multiplie l'intensité sonore d'un facteur 10, on perçoit globalement un doublement de la sensation
  - Donc propagation logarithmique à base 10 (*logarithm to the base 10*)

# Le phénomène son



- Niveau sonore (*sound level*)
  - L'intensité du seuil d'audibilité est  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
  - Niveau =  $10 \log (I / I_0)$  (décibel)
  - L'intensité acoustique étant proportionnelle au carré de la pression (*pressure*) :  $I \approx p^2 / 400$
  - Donc :  $I / I_0 = (p / p_0)^2$  et  
Niveau =  $20 \log (p / p_0)$  (décibel)
  - où  $p_0^2 = 4 \times 10^{-10}$  (exprimé en Pascal) est la pression acoustique du seuil d'audibilité

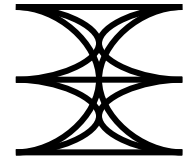


# Le phénomène son

- Niveau sonore (*sound level*)

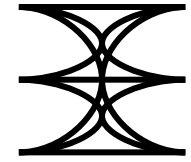
Pression acoustique (Pa)	Intensité acoustique (W/m <sup>2</sup> )	Niveau (bel)	Niveau (dB)		
20	1	12	120	intérieur d'une grosse caisse	insupportable
2	10 <sup>-2</sup>	10	100	tutti d'orchestre cloche à 10 cm saxophone à 40 cm	
2 × 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	8	80	piano joué pp à 1m	fort
2 × 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	6	60	conversation à 1 m	
2 × 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup>	4	40	appartement calme	très faible
2 × 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-10</sup>	2	20	studio d'enregistrement	
2 × 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-12</sup>	0	0	seuil d'audition	

# Le phénomène son



- Niveau sonore : sensation en fonction de la fréquence
  - Sensibilité de l'oreille varie en fonction de la fréquence
  - Courbes d'égale sensation sonore : pour avoir la même sensation sonore qu'un son de 1000 Hz à 40 dB, un signal de 50 Hz doit être augmenté à 70 dB.
  - La sensibilité de l'oreille, bonne entre 500 et 5000 Hz, s'atténue donc aux fréquences basses

# Le phénomène son



- Niveau sonore : sensation en fonction de la fréq

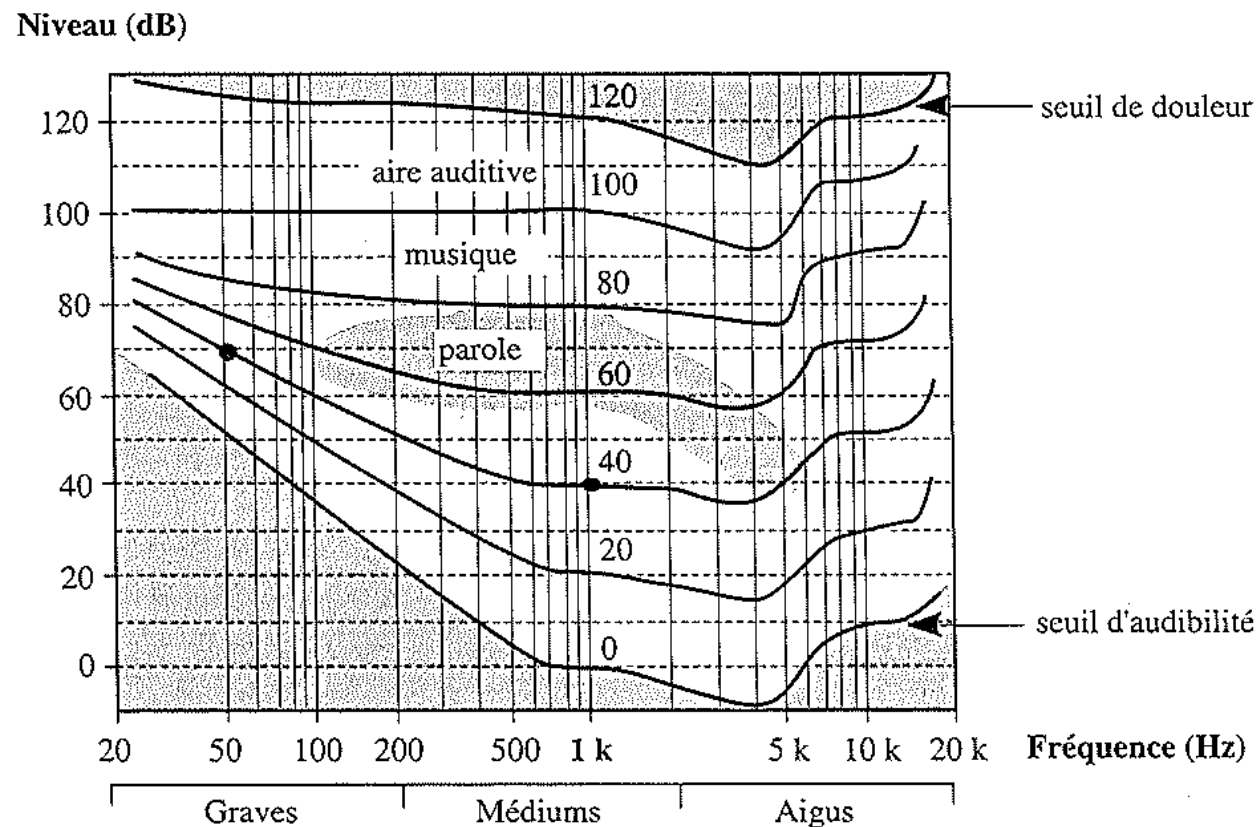
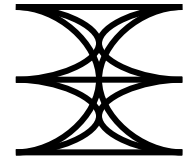


Figure 3.11 – Courbes d'égal sensation sonore (d'après Fletcher et Munson)

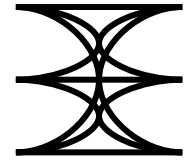
# Le phénomène son



- Le TIMBRE
  - Mélange de diverses fréquences à des intensités différentes
  - Attribut qui permet de reconnaître l'origine du son, et en particulier de distinguer des sons émis par des instruments de musique différents
  - Dépend autant des composantes spectrales que de l'évolution du signal dans le temps
  - Dépend de :
    - l'intensité du fondamental et des harmoniques
    - L'absence ou la présence de certains harmoniques
    - Exemple : la clarinette, l'accordéon, l'harmonica, certains jeux d'orgue (*organ*) favorisent les harmoniques impaires, alors que le hautbois (*oboe*) les harmoniques paires.

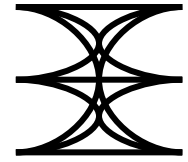


# Le phénomène son



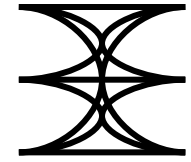
- Champ direct, champ réverbéré (*reverberant*)
  - Une source S émet une impulsion sonore, un auditeur (*listener*) ou microphone situé à une certaine distance reçoit successivement
    - L'onde directe
    - La première réflexion 1 qui a suivi le plus court chemin
    - Les réflexions 2,3,... de plus en plus rapprochées entre elles avec une énergie qui diminuent avec la distance parcourue, le nombre de réflexions et la nature des matériaux rencontrés
    - Les innombrables réflexions qui deviennent indissociables et qui forment le champ diffus

# Le phénomène son



- Champ direct, champ réverbéré
  - Deux champs sonores se superposent :
    - Le champ direct ou son direct comprenant l'onde directe
    - Le champ réverbéré comprenant les premières réflexions et le champ diffus
  - Pour former le champ global

# Le phénomène son



- Champ direct, champ réverbéré

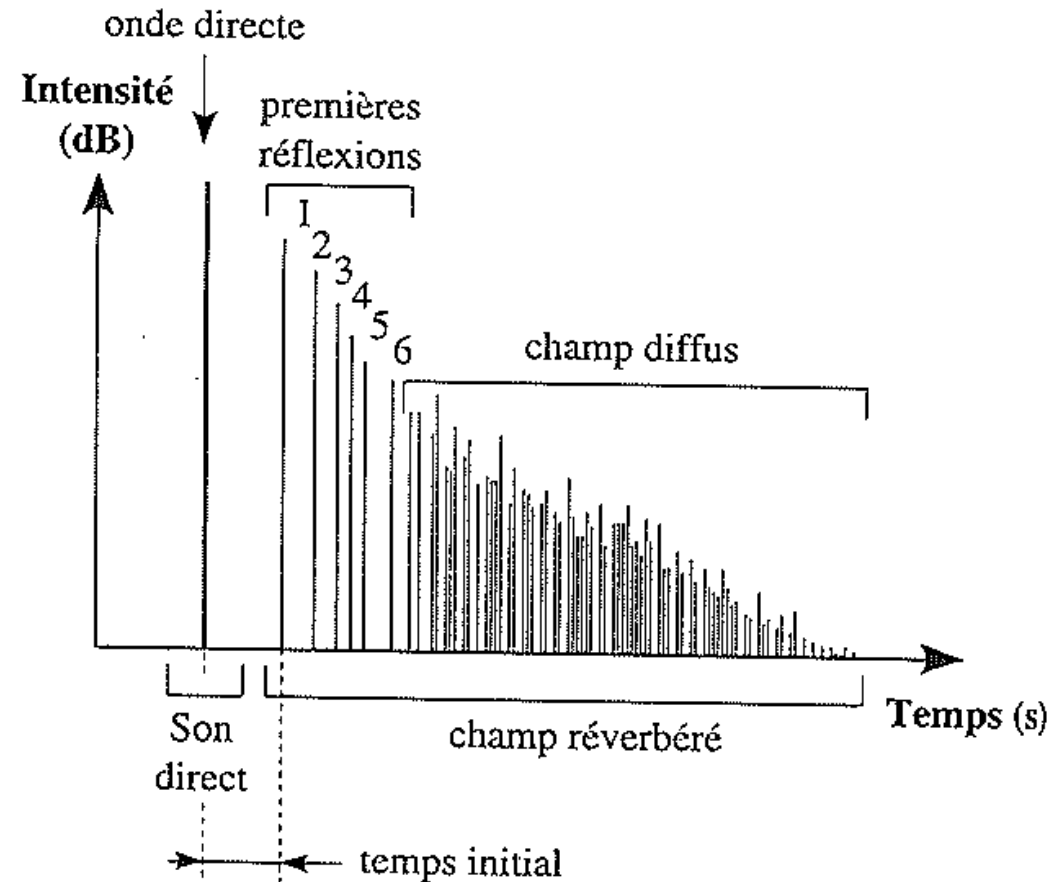
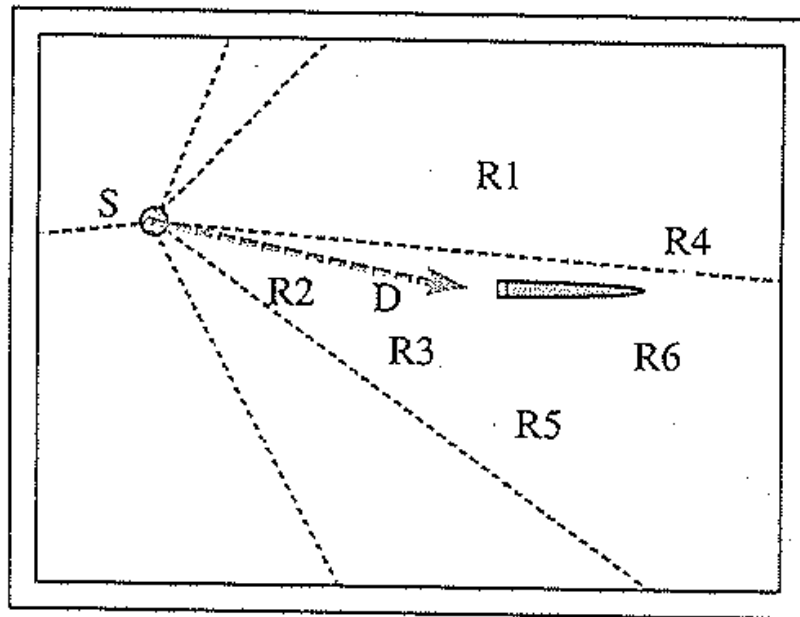
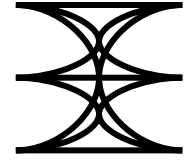


Figure 3.36 – Mode de propagation de l'impulsion sonore

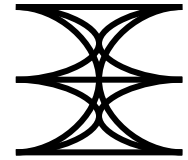
Distribution temporelle d'une impulsion

# Le phénomène son



- **Champ direct, champ réverbéré :**
  - Courbe Intensité du champ sonore global en fonction des distances de la source
  - Diminution du niveau sonore jusqu'à la « Distance critique »
    - près de la source sonore, le niveau diminue presque comme en espace libre (loi log 6 dB par doublement de la distance)
    - loin de la source, le niveau tend vers une valeur constante.
  - On peut simplifier et considérer 2 zones :
    - décroissance dans le « champ direct »
    - niveau constant dans le « champ réverbéré »
    - Distance critique = limite entre ces 2 zones.

# Le phénomène son



- Champ direct, champ réverbéré :
  - Courbe Intensité du champ sonore global en fonction des distances de la source
  - Distance critique

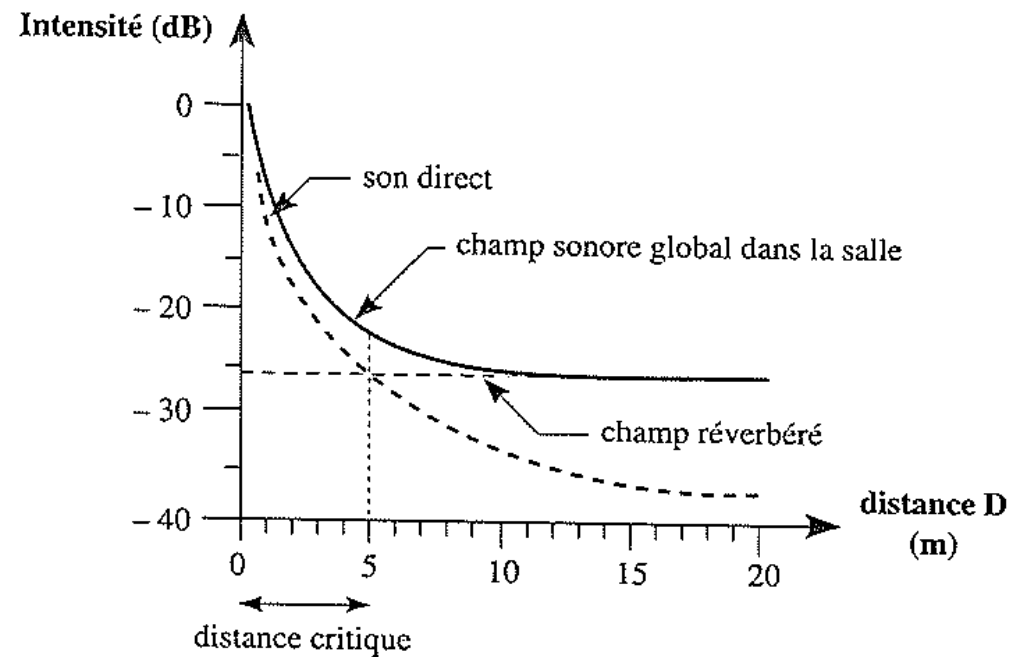
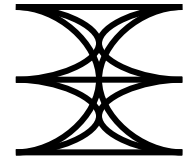
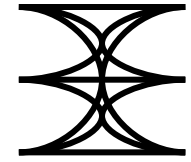


Figure 3.37 – Allure du champ sonore global en milieu réverbérant en fonction de l'éloignement de la source

# Le phénomène son

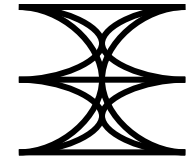


- Aspect perceptif
  - L'onde directe : nous renseigne sur la localisation, les dimensions et le timbre de la source sonore
  - Retard de la première réflexion : donne des informations sur la dimension de la salle. Plus la salle est grande, plus le temps initial est élevé
  - Premières réflexions : suivent l'onde directe à moins de 50 ms et enrichissent le timbre de la source sonore
  - Champs diffus : apporte ampleur et volume sonore
  - Rapport son direct / champ réverbéré, les plans sonores : permet d'apprécier l'éloignement d'une source sonore. Ce rapport est appelé grossissement et définit les plans sonores



# Microphones

- Microphone = transducteur qui transforme une variation de pression acoustique en une variation de tension électrique
  - Variations de pression acoustique dues aux ondes sonores => vibration mécanique de la membrane du microphone
  - Vibrations de la membrane utilisées pour générer une tension électrique
- Différents micros : mécaniques et électriques
  - Acoustique -> mécanique : classification acoustique
  - Mécanique -> électrique : classification électrique



# Microphones

- Classification acoustique
  - Microphone à pression

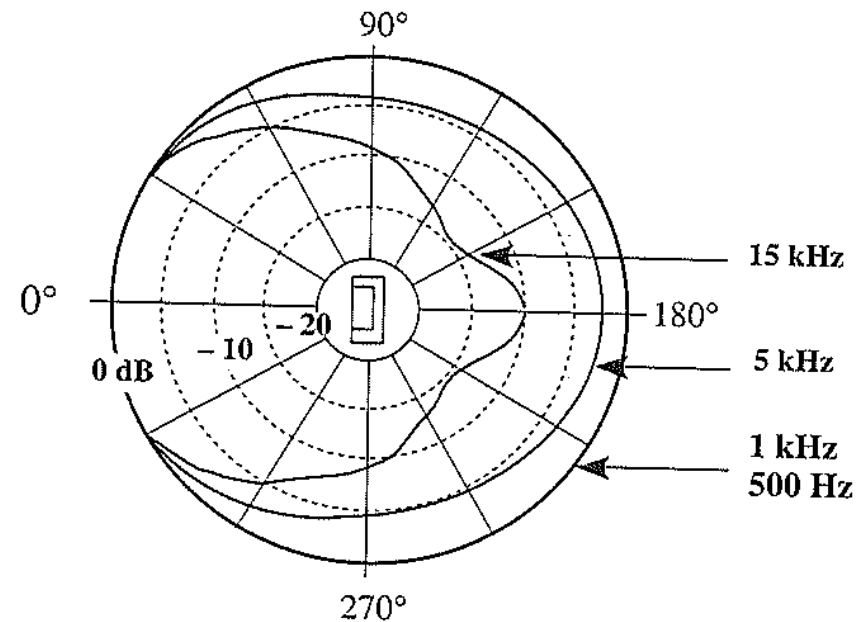
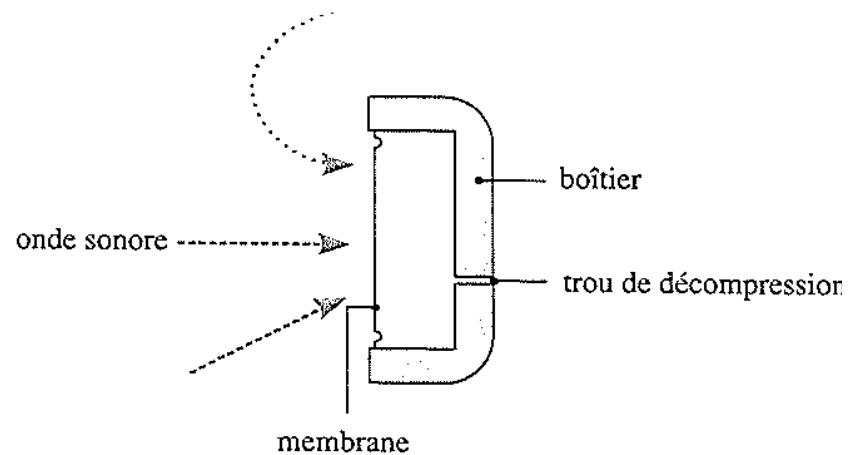
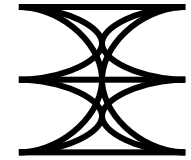


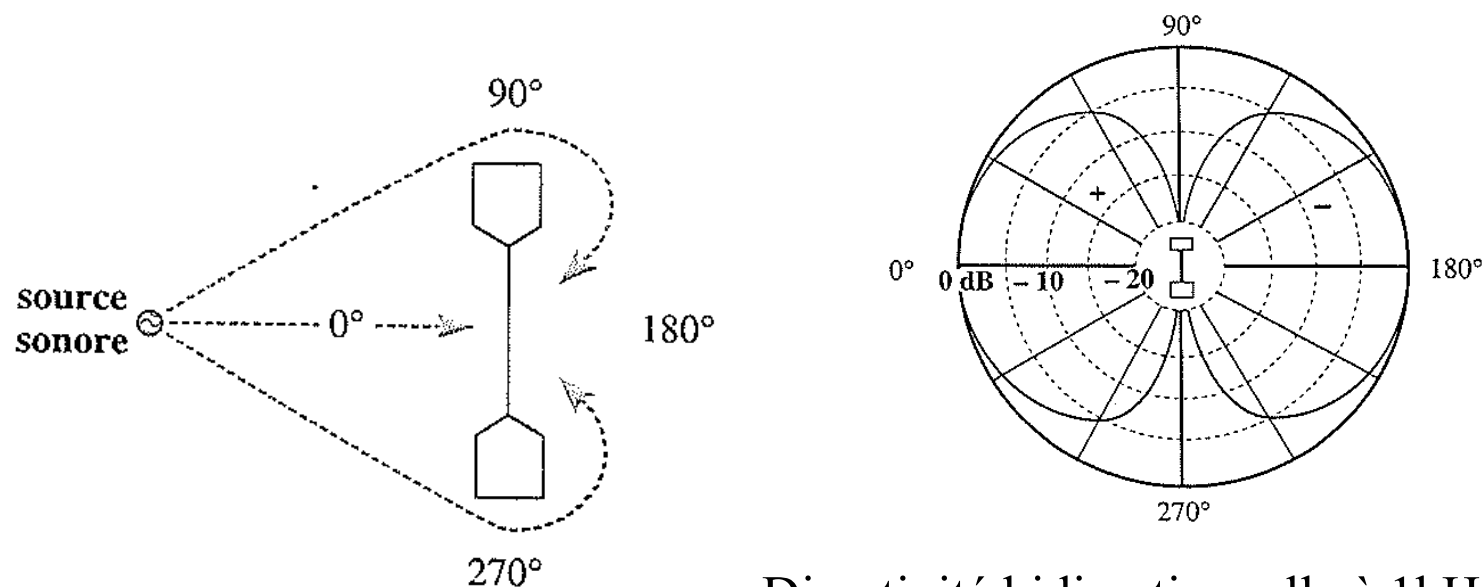
Figure 6.3 — Diagramme polaire typique d'un microphone à pression (différentes fréquences) : microphone omnidirectionnel





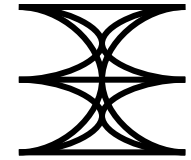
# Microphones

- Classification acoustique
  - Microphone à gradient de pression



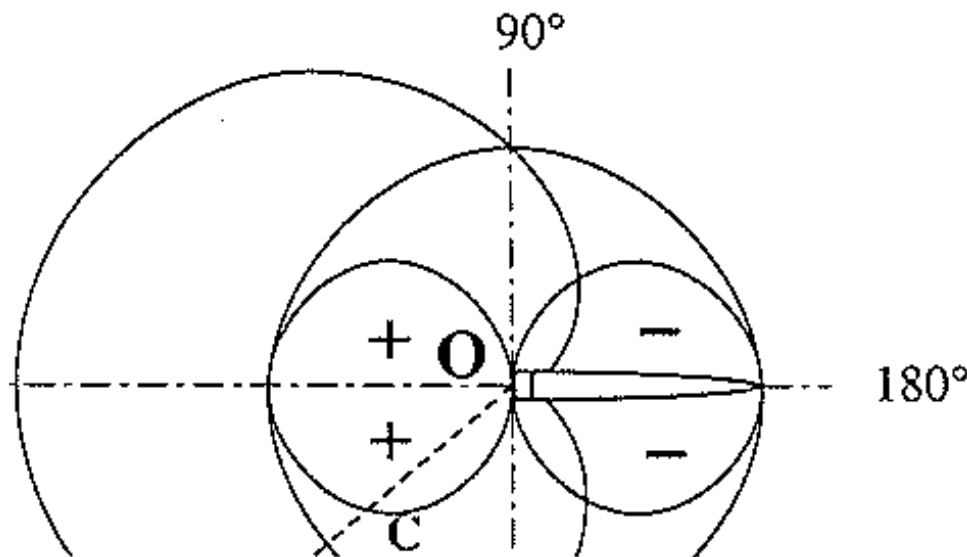
Directivité bidirectionnelle à 1kHz avec un lobe positif et un lobe négatif

# Microphones



- Classification acoustique

- Microphone mixte
- Association d'une directivité omnidirectionnelle et d'une directivité bidirectionnelle => sensibilité maximale pour une direction déterminée et minimale pour la direction opposée
- Courbe en forme de cœur nommée **cardioïde**

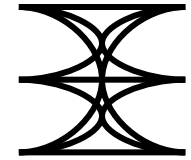


$$OA = OB + OC$$

OC est positif entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$

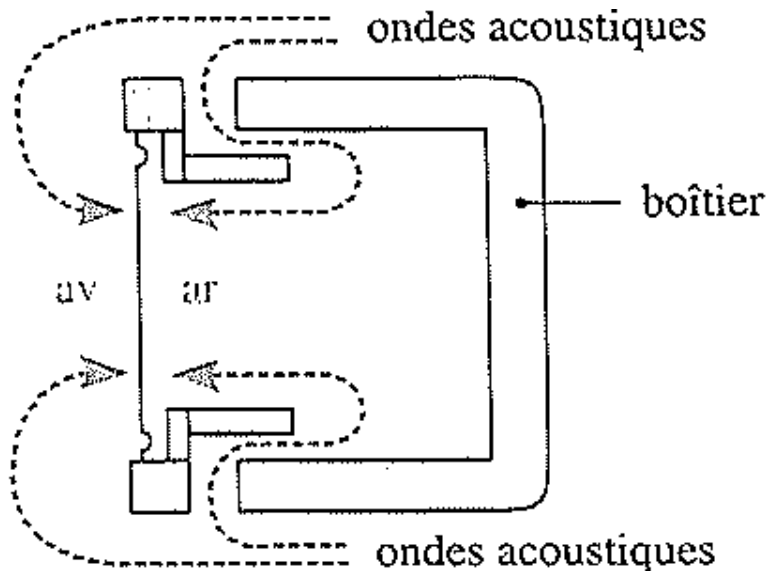
OC est négatif entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$

# Microphones



- Classification acoustique

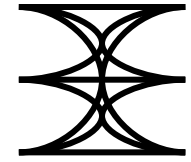
- Microphone mixte
- Association d'une directivité omnidirectionnelle et d'une directivité bidirectionnelle => sensibilité maximale pour une direction déterminée et minimale pour la direction opposée
- Courbe en forme de cœur nommée **cardioïde**



Dans le cas d'une source sonore située à l'arrière du microphone, le parcours supplémentaire dû au labyrinthe permet à l'onde acoustique d'arriver en même temps sur les faces avant et arrière de la membrane.

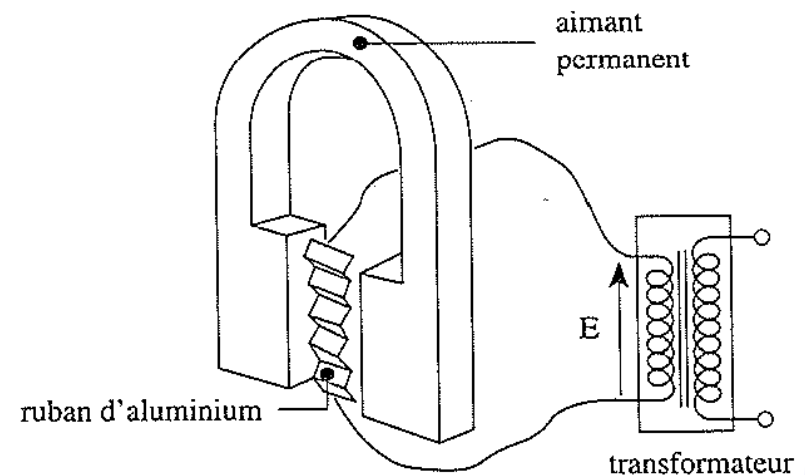
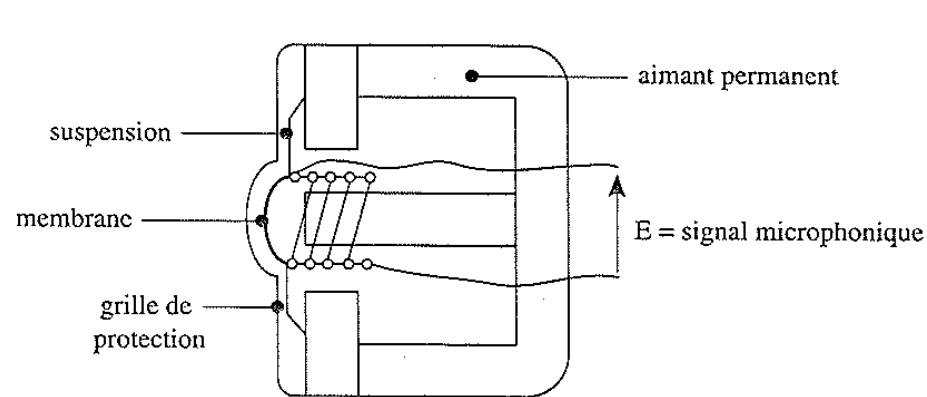
$$\text{D'où } p_{av} - p_{ar} = 0$$

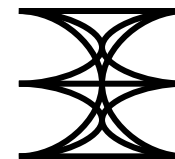
Figure 6.10 — Microphone cardioïde muni d'un "labyrinthe" acoustique



# Microphones

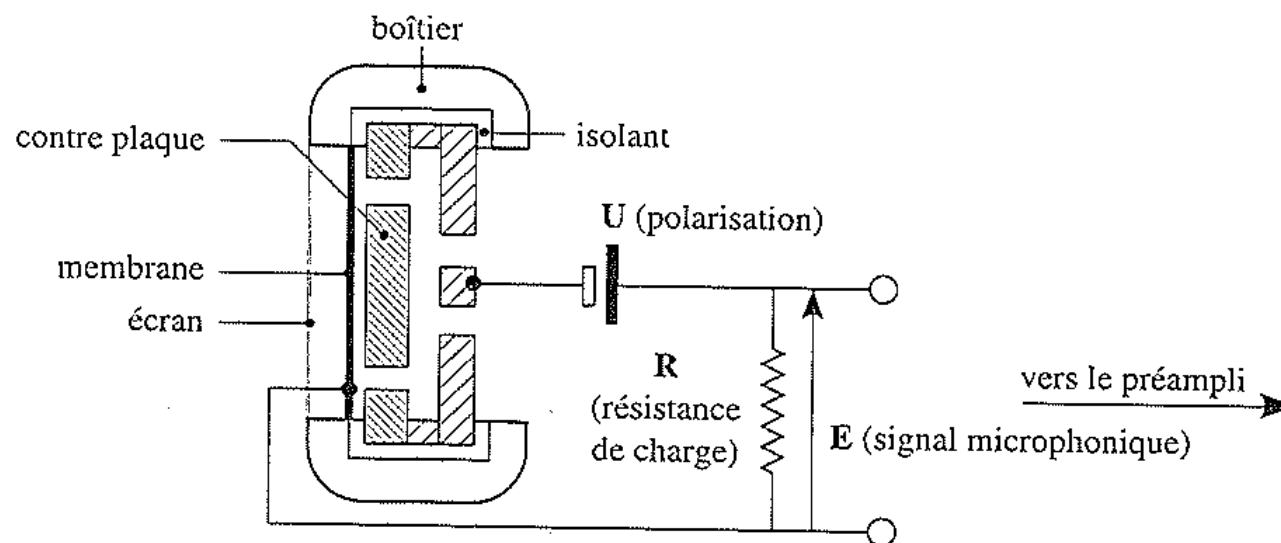
- Classification électrique
  - Microphone électrodynamique à bobine mobile et à membrane
  - Aimant : Magnet,
  - Bobine : Coil
  - Transformateur : Transformer. Ruban : Tape

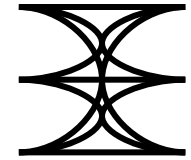




# Microphones

- Classification électrique
  - Microphone électrostatique

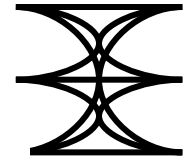




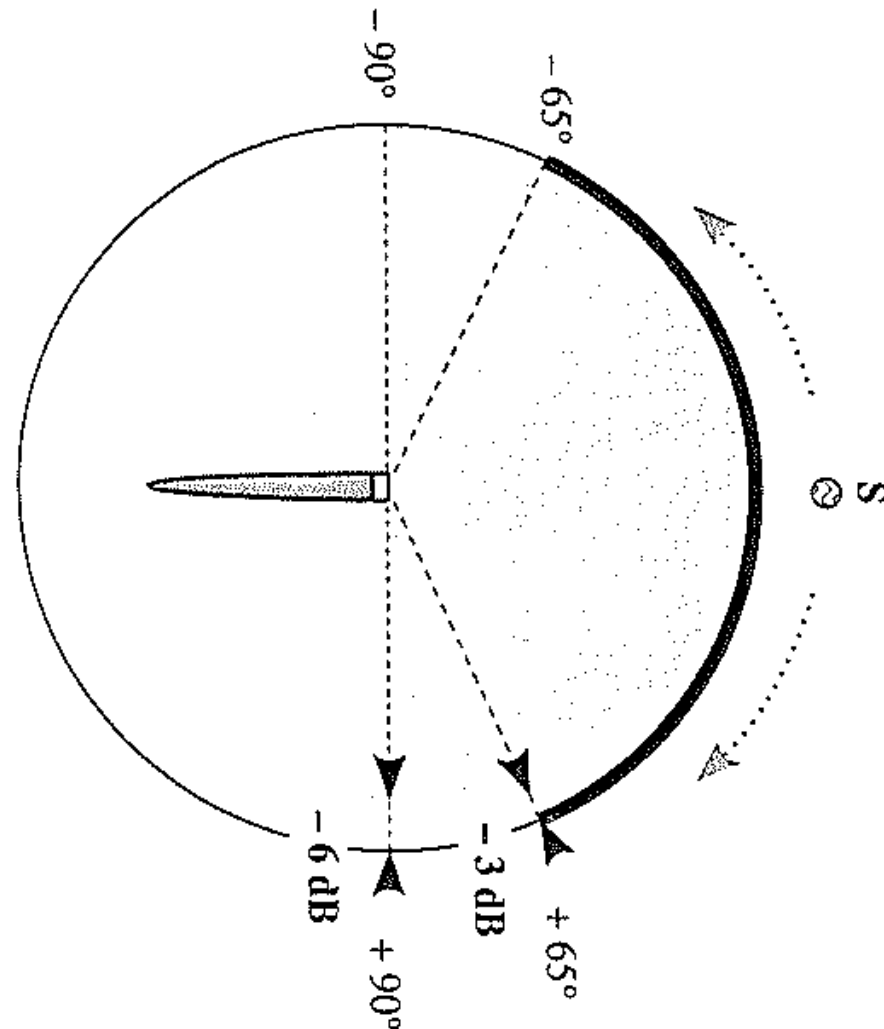
# Microphones

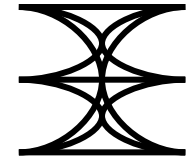
- Angle de captation
  - Si déplacement sur un cercle d'une source sonore autour d'un micro directionnel => diminution, au fur et à mesure du déplacement, de l'intensité directe captée par le microphone
  - (intensité du son direct) / (intensité du champ réverbéré) décroît, différence d'environ 3 dB
  - Cas d'un micro cardioïde : 3dB obtenus pour un angle de 65°
  - L'angle de captation est donc égal au double, donc à 130°
  - Les sources sonores doivent se trouver par conséquent à l'intérieur de cet angle pour être restituées (*reproduced*) sur un même plan sonore

# Microphones



- Angle de captation

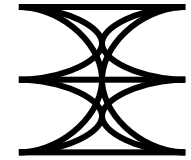




# Microphones

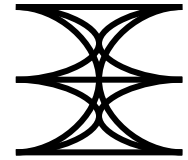
- **Caractéristiques générales**
  - Sensibilité : rapport entre le niveau électrique de sortie du microphone et la pression sonore incidente, (en mV / Pa)
  - Exemple: pour un micro électrostatique qui délivre 10 mV pour une pression incidente de 1 Pa aura une sensibilité de 10 mV/Pa ou -40 dB
  - Ce rapport doit être élevé afin que le signal utile soit grand vis-à-vis du bruit de fond
  - Les microphones électrostatiques ont une sensibilité supérieure à celle des microphones électrodynamiques



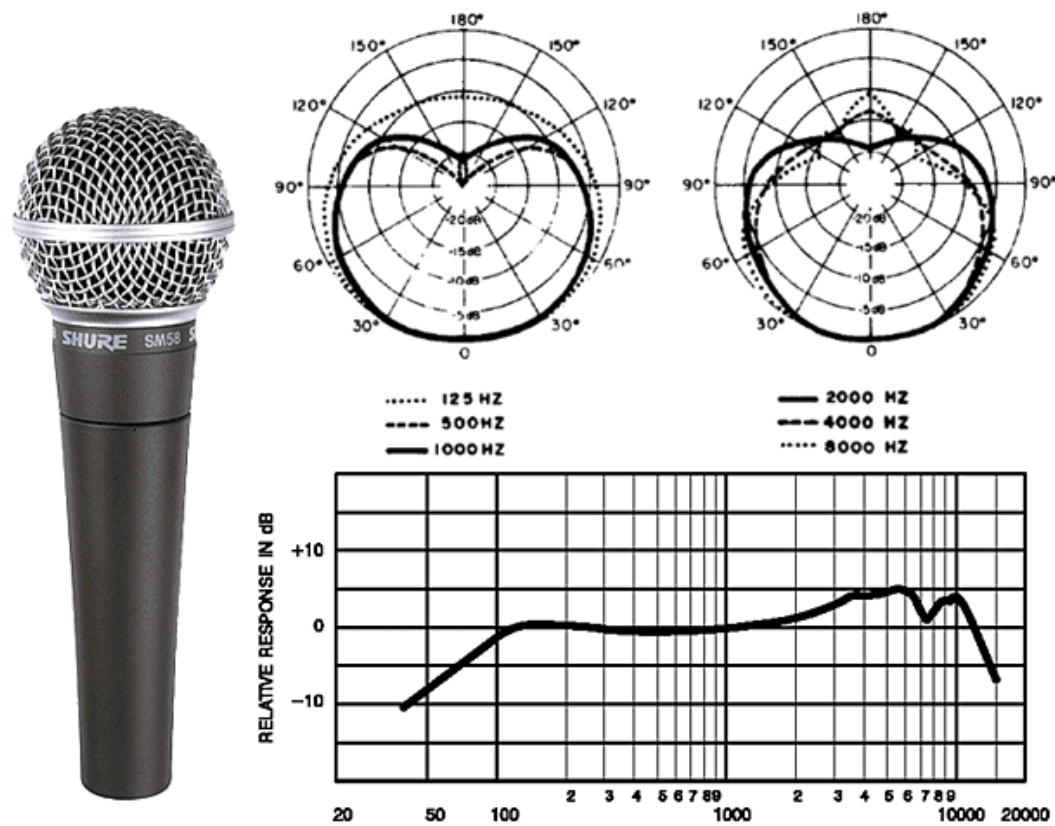


# Microphones

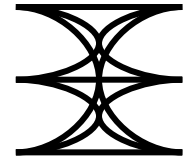
- Facteur de directivité
  - Rapport de l'intensité sonore du son direct capté dans l'axe du microphone et de celle du champ réverbéré capté selon toutes les directions
  - Microphone omnidirectionnel : son direct et champ réverbéré captés de manière égale, ce rapport est donc de 1, soit 0 dB
  - Microphone cardioïde : son direct capté avec une sensibilité 3 fois plus grande que celle du champ réverbéré, ce rapport est donc de 3, soit 4,8 dB



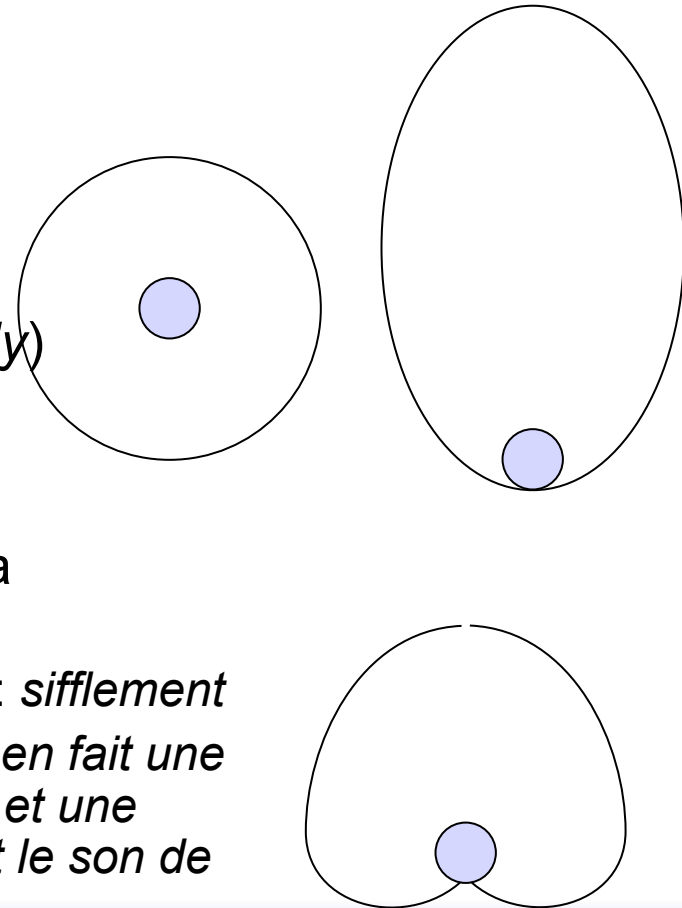
# Enregistrement



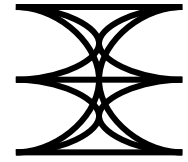
# Enregistrement



- Caractéristique spatiale des micros
  - Omnidirectionnel
    - Reportage vidéo
    - Musique classique
  - Directionnel
    - Prise de son à distance (*remotely*)
    - Vidéo
  - Cardioïde
    - Chant (pas d'accrochage avec la sonorisation),
      - Accrochage dû à l'effet Larsen : *sifflement* (*whistling*), désagréable, qui est en fait une boucle acoustique entre un micro et une enceinte (*loudspeaker*), amplifiant le son de ce micro.



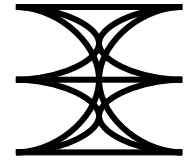
# Enregistrement stéréo



- Stéréo
  - Voie gauche
  - Voie droite

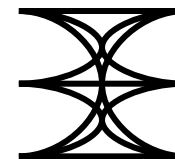


# Enregistrement stéréo



- Stéréo
  - Voie gauche
  - Voie droite
- 2 microphones
  - 1 micro par oreille

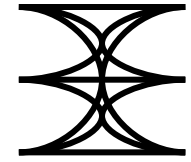




# Enregistrement stéréo

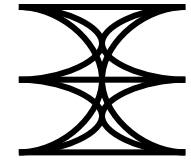
- Plusieurs technologies
  - Couple de microphones + obstacle acoustique
  - Couple de microphones
  - Microphone stéréo intégré
    - 2 en 1





# Enregistrement stéréo

- Systèmes de prise de son développés à partir des paramètres de perception de l'espace sonore : différence d'intensité et différence de temps
- Procédés de captation :
  - Différence d'intensité
  - Différence de temps
  - Différence d'intensité et de temps

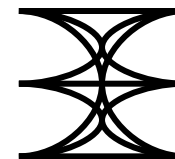


# Enregistrement stéréo

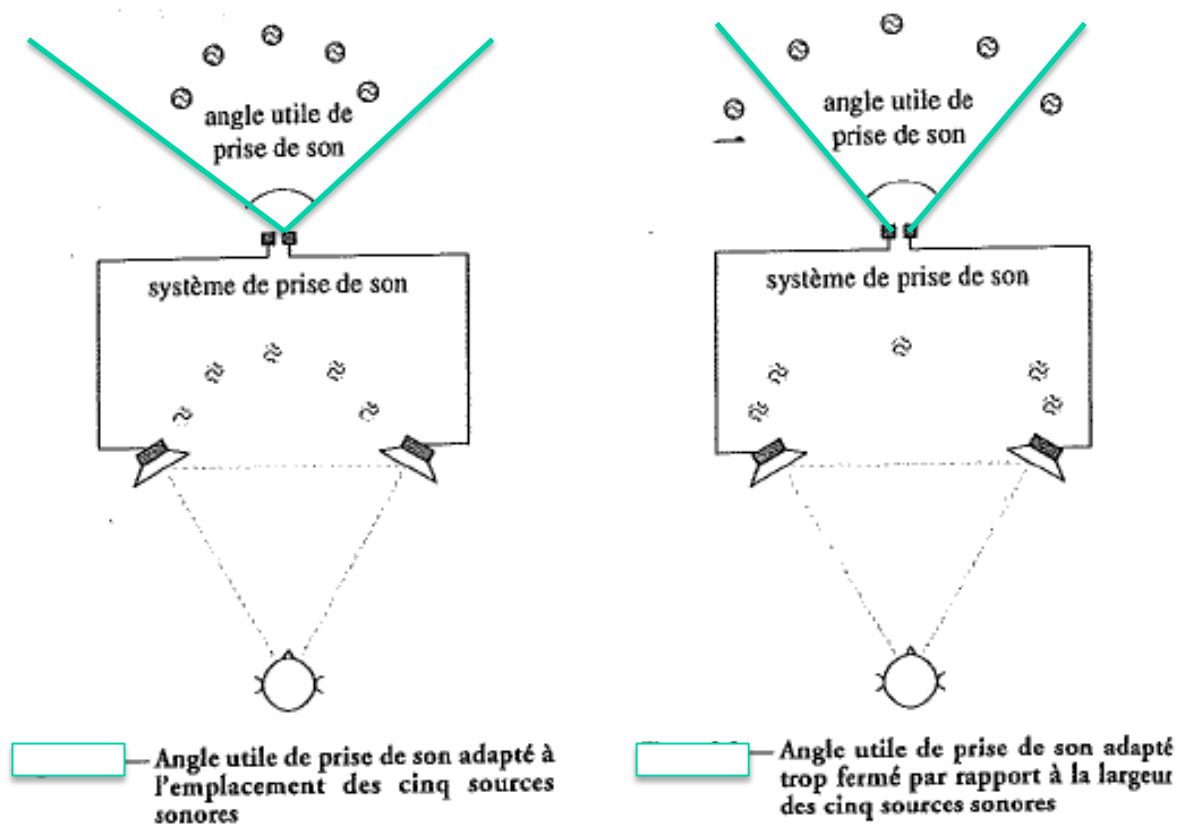
- Angle utile de prise de son : angle à l'intérieur duquel doivent se trouver les sources sonores pour être reproduites entre et à l'arrière des haut-parleurs, donc à l'intérieur de l'espace stéréophonique
- Chaque procédé de prise de son possède un angle utile qui lui est propre et qui dépend de l'ouverture angulaire et l'espacement des deux microphones



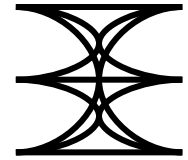
# Enregistrement stéréo



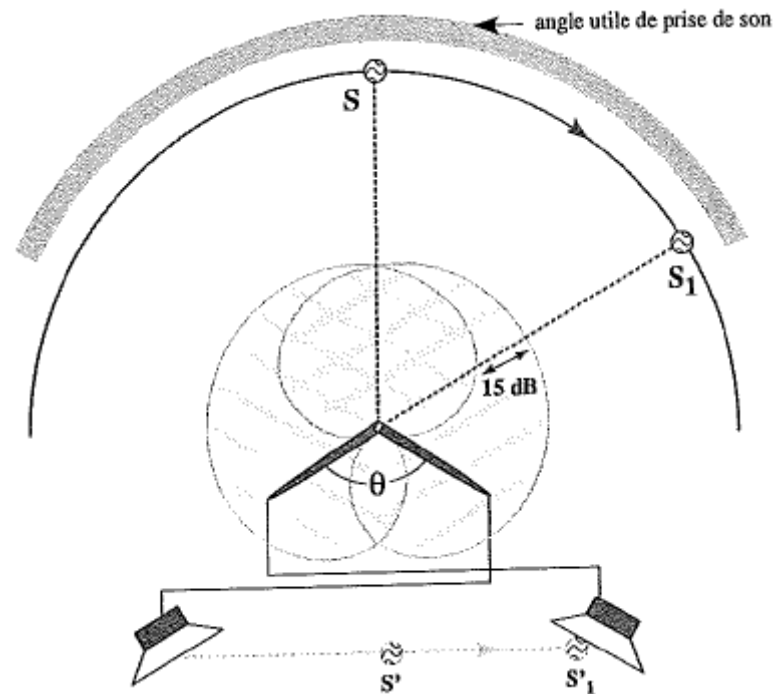
- Angle utile de prise de son



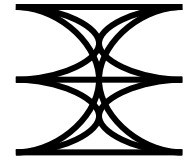
# Enregistrement stéréo



- Angle utile de prise de son

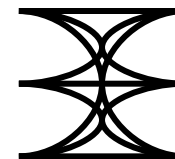


- Principe de la prise de son stéréophonique d'intensité



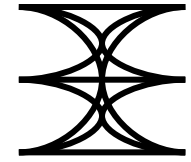
# Enregistrement stéréo

- Lorsque l'on diminue l'angle physique des microphones, on augmente l'angle utile de prise de son et inversement



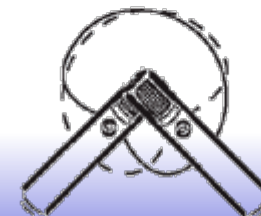
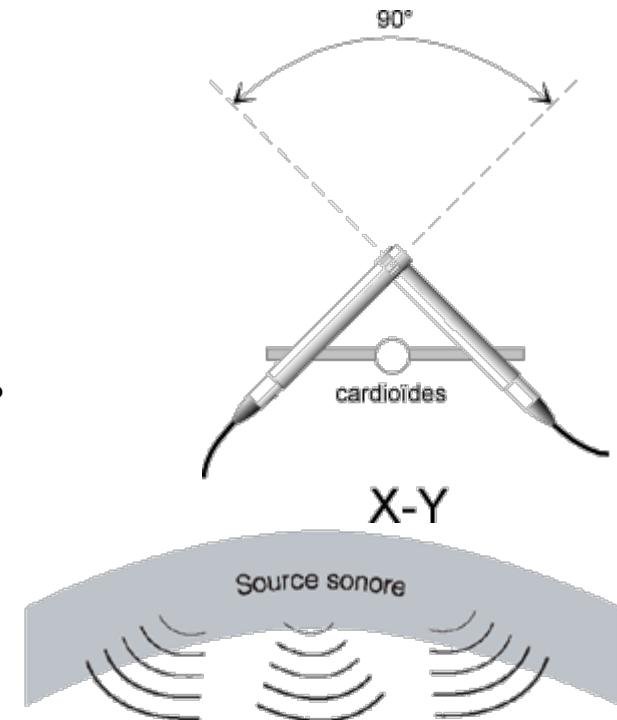
# Enregistrement stéréo

- Normalisation des prises de sons stéréophoniques
  - Placement, orientation, type des micro
- Norme ou appellation classique
  - Couple AB
  - Couple XY
  - Couple ORTF
  - Microphone MS
  - Tête artificielle

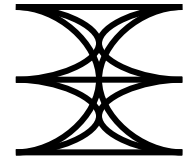


# Enregistrement stéréo

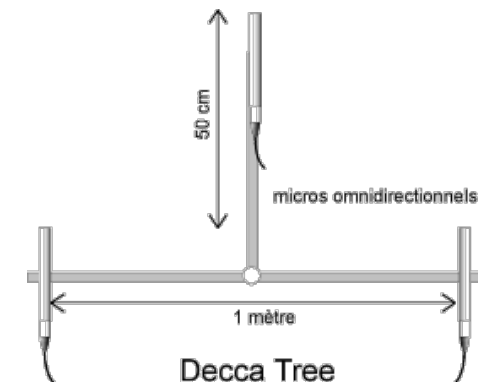
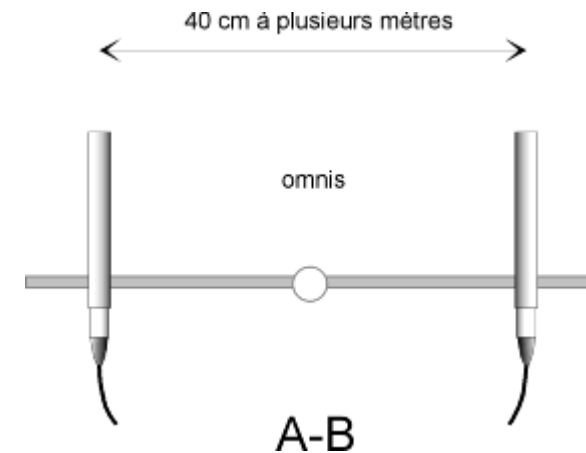
- Couple XY
  - 2 micros cardioïdes
  - Position et orientation
    - Angle entre  $90^\circ$  et  $120^\circ$
    - Donc angle de prise de son entre  $170^\circ$  et  $140^\circ$
    - Entrée coïncident
  - Stéréo
    - Intensité
  - Problème
    - Absence de reproduction de la différence de temps
  - Avantage
    - Mixage mono (pas de problème de phase)

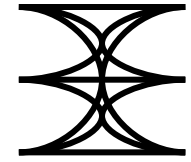


# Enregistrement stéréo



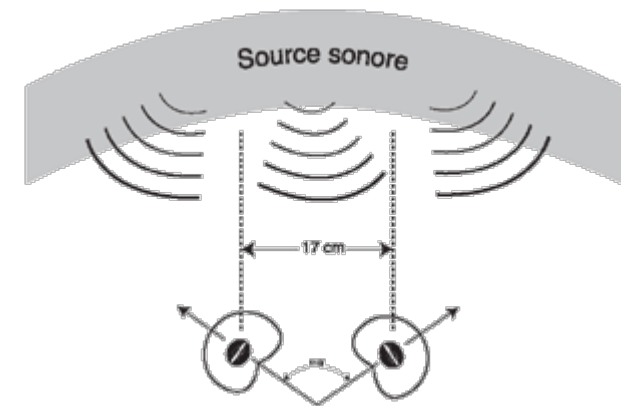
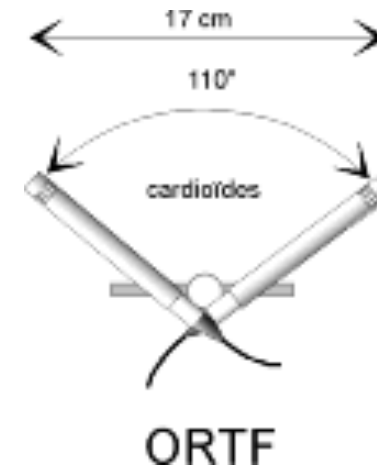
- Couple AB
  - 2 micros omnidirectionnels
  - Position et orientation
    - placés en parallèle
    - séparés d'une distance de 40 à 60 cm
  - Stéréo
    - phase
  - Problème
    - « Trou » central
  - Solution : « Decca tree »
    - Pour le mélange en stéréo, le micro du centre est réparti à la fois sur les canaux gauche et droit.

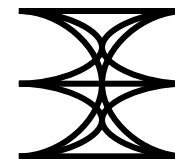




# Enregistrement stéréo

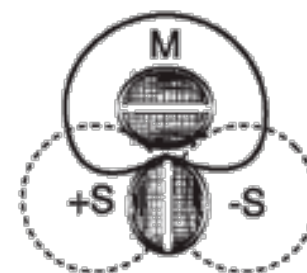
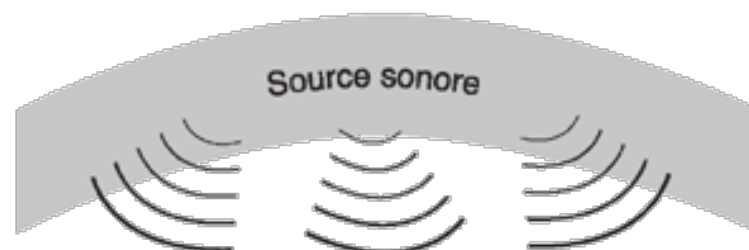
- Couple AB-ORTF
  - 2 micros cardioïdes
  - Position et orientation
    - Angle  $110^\circ$
    - séparés d'une distance de 17 cm
  - Stéréo
    - Intensité et phase
  - Avantage
    - Bonne spatialisation



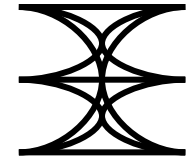


# Enregistrement stéréo

- Microphone MS
  - 1 micro cardioïde (M)
  - 1 micro bidirectionnel (S)
  - Position et orientation
  - Stéréo
    - $G = M + S$
    - $D = M - S$
  - Avantage
    - Bonne spatialisation
    - Mixage mono

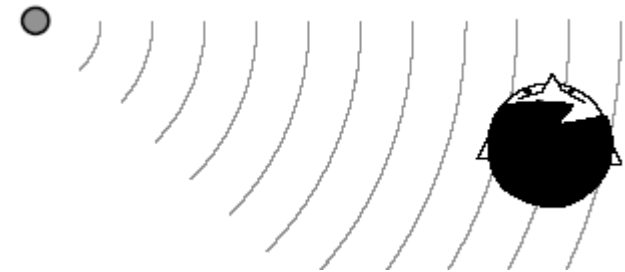


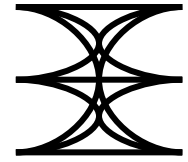




# Synthèse sonore

- Éléments d'acoustique
  - propagation dans l'air, sans obstacle
  - La direction est perçue grâce aux différences entre les deux oreilles :
    - différence de temps (ITD)
    - différence de niveau (ILD)
  - différences spectrales liées à l'influence du torse, de la tête et des pavillons

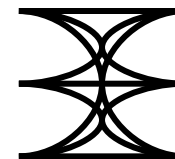




# Synthèse sonore

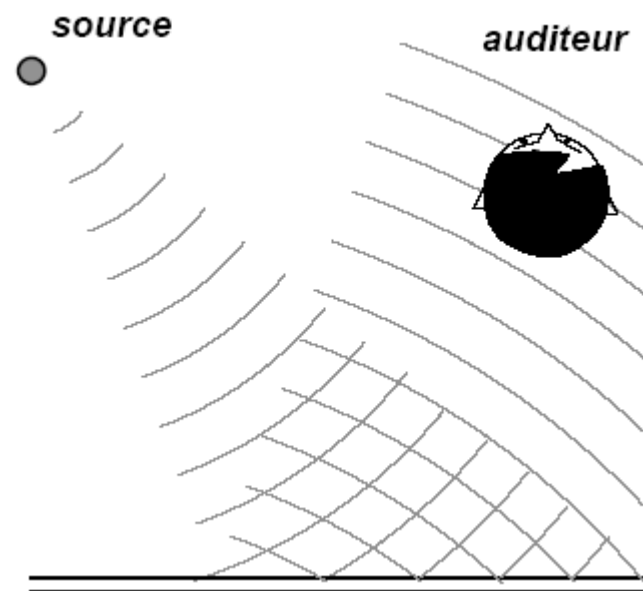
- Son direct
  - Différence de temps : phase
  - Différence de niveau : intensité

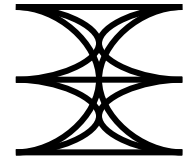




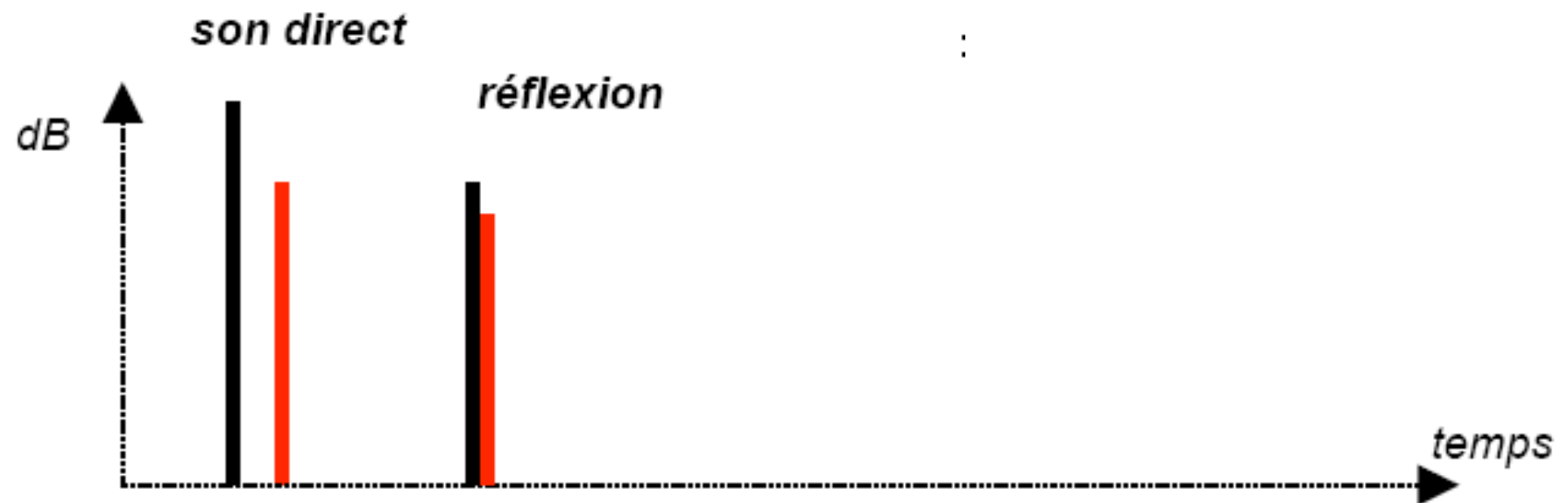
# Synthèse sonore

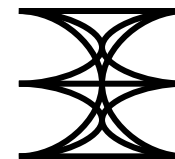
- **Réflexion**
  - Ces réflexions proviennent de directions bien définies, contrairement à la réverbération qui provient de toutes les directions à la fois
  - **Absorption**
    - atténuation par la surface (dépend de la fréquence)
  - type de réflexion
    - spéculaire (miroir) : surface lisse
    - diffuse : surface irrégulière





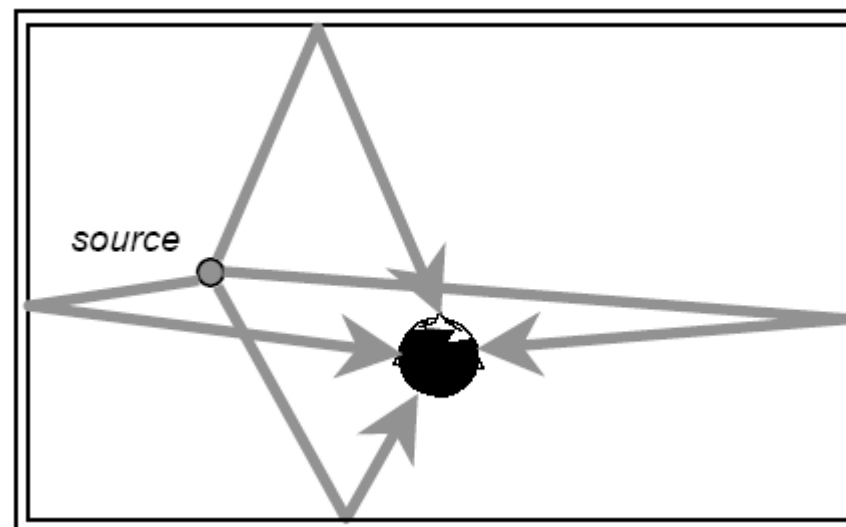
# Synthèse sonore

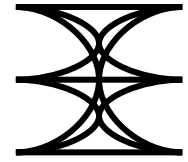




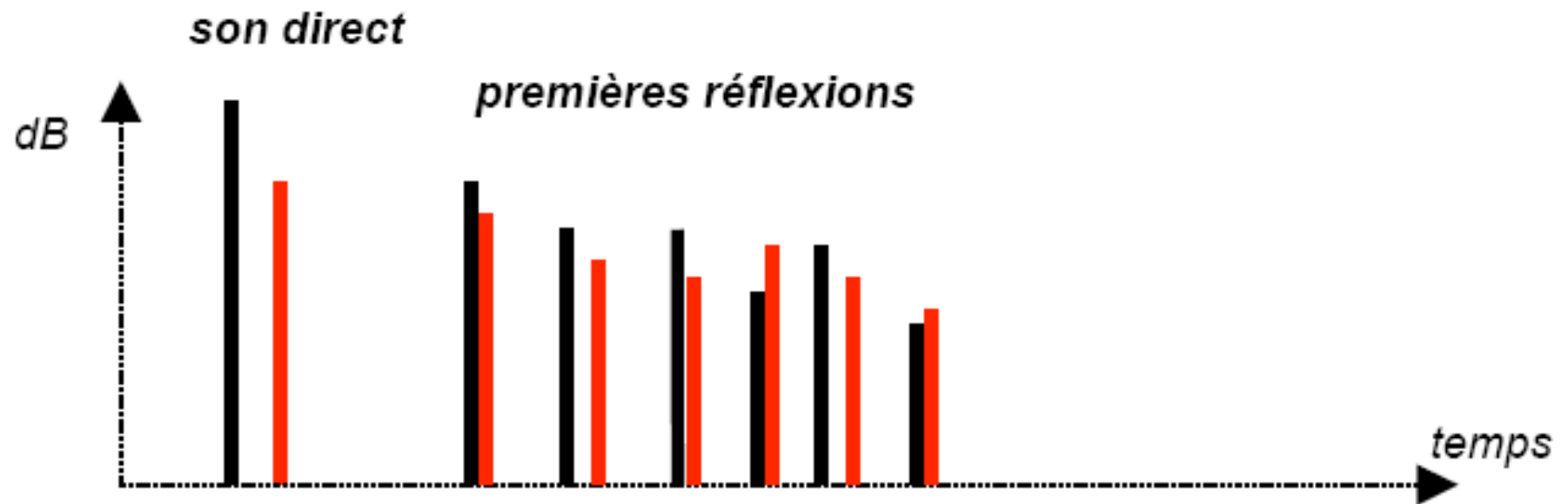
# Synthèse sonore

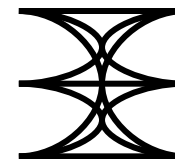
- Réflexion contre les murs
  - la direction est perçue
- Ordre de la réflexion
  - nombre de réflexions subies pour une pièce cubique
    - 6 réflexions de premier ordre





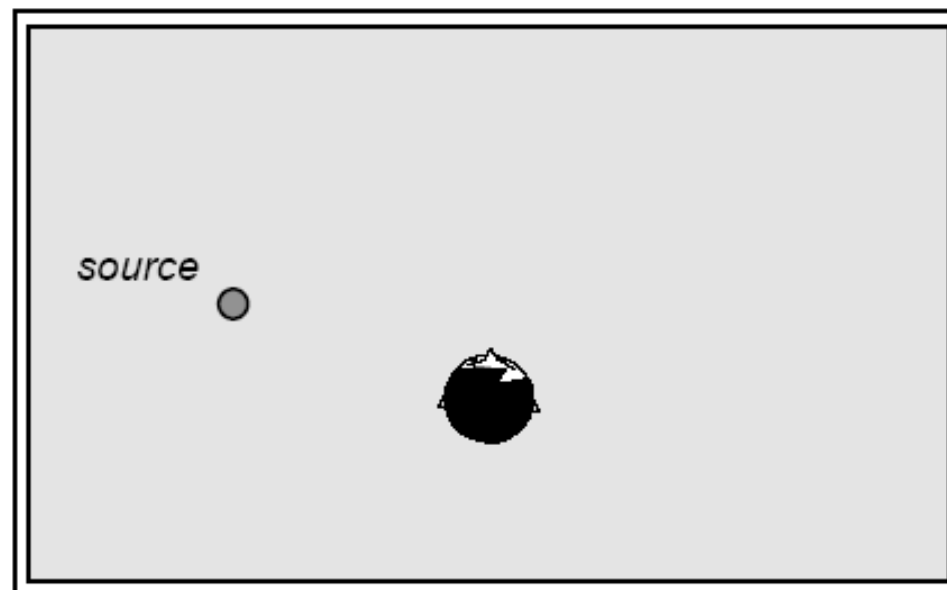
# Synthèse sonore

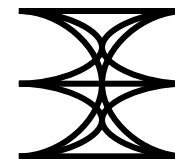




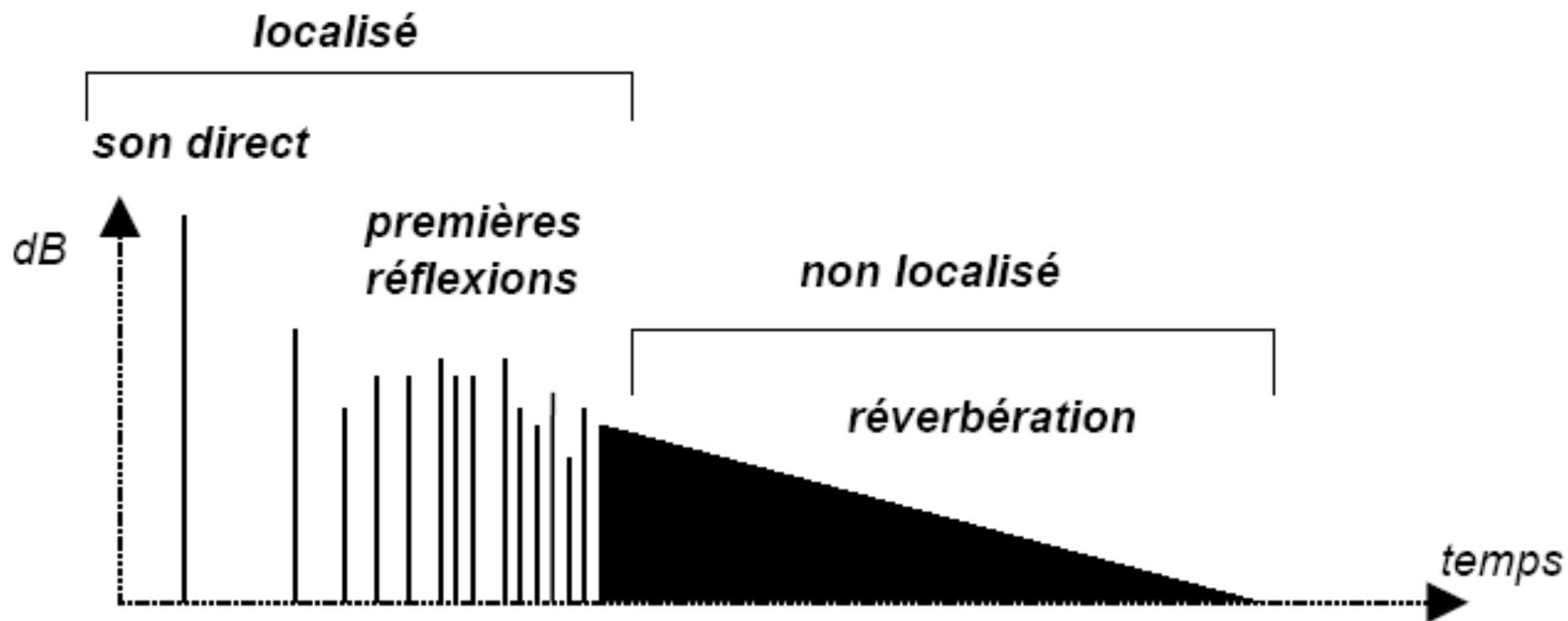
# Synthèse sonore

- Réverbération
  - On ne perçoit plus la direction
  - Champ diffus

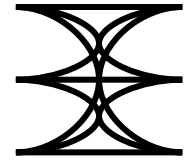




# Synthèse sonore

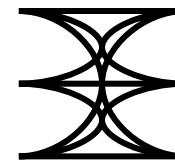






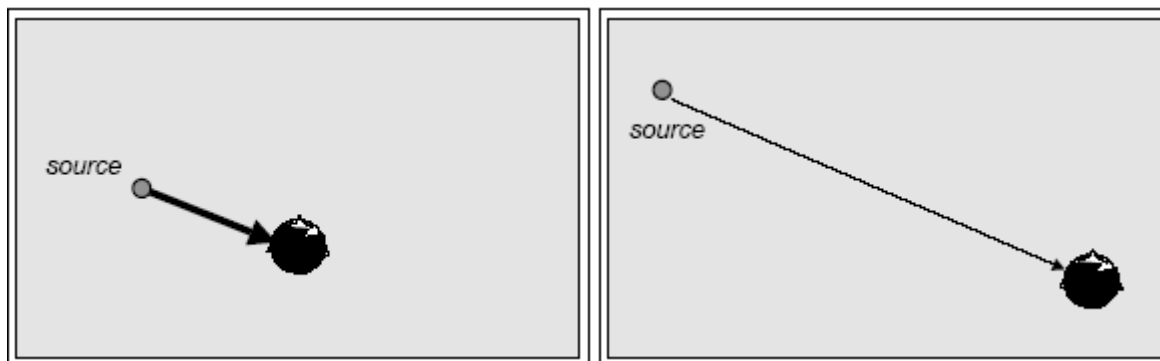
# Synthèse sonore

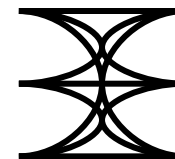
- Son direct et effet de salle
  - Son direct
    - Propagation dans l'air
    - Atténuation en fonction de la distance
  - Effet de salle
    - Première réflexion
    - Réverbération
    - Moins de variation avec la distance
  - Rapport
    - son direct / réverbération



# Synthèse sonore

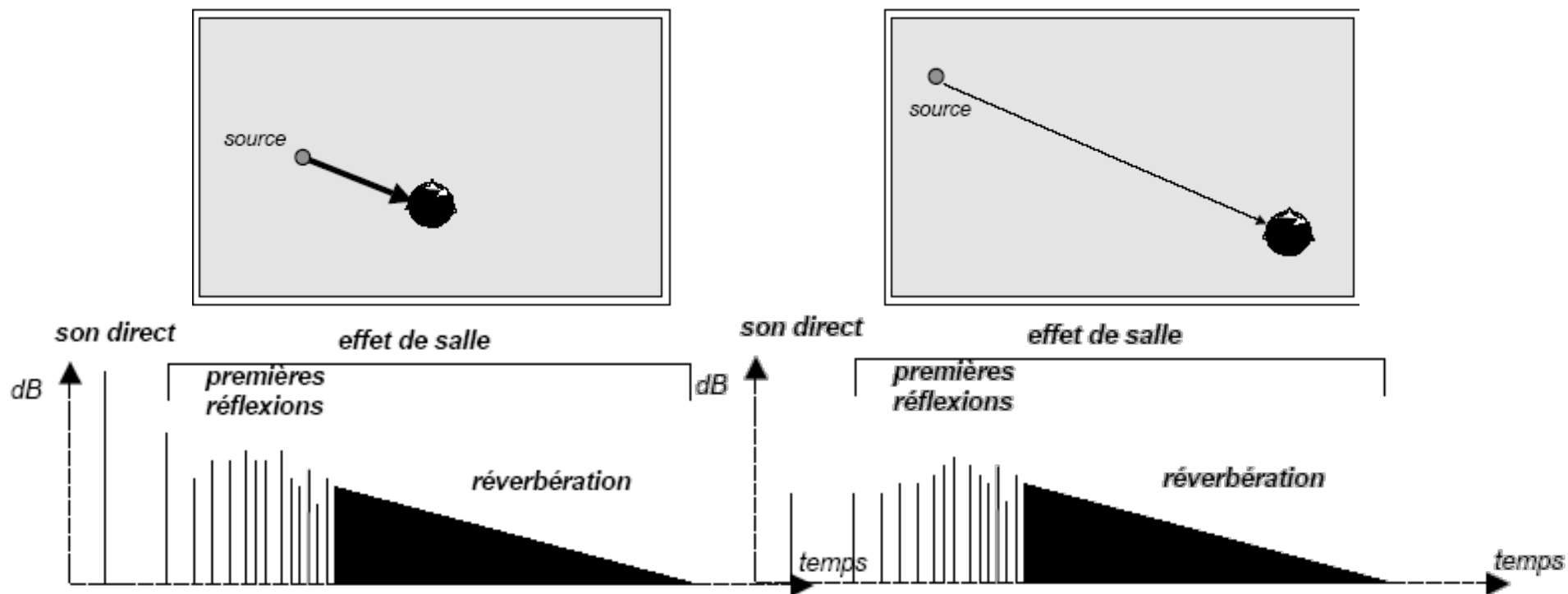
- Son direct et effet de salle
  - Influence de la distance de la source

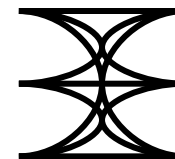




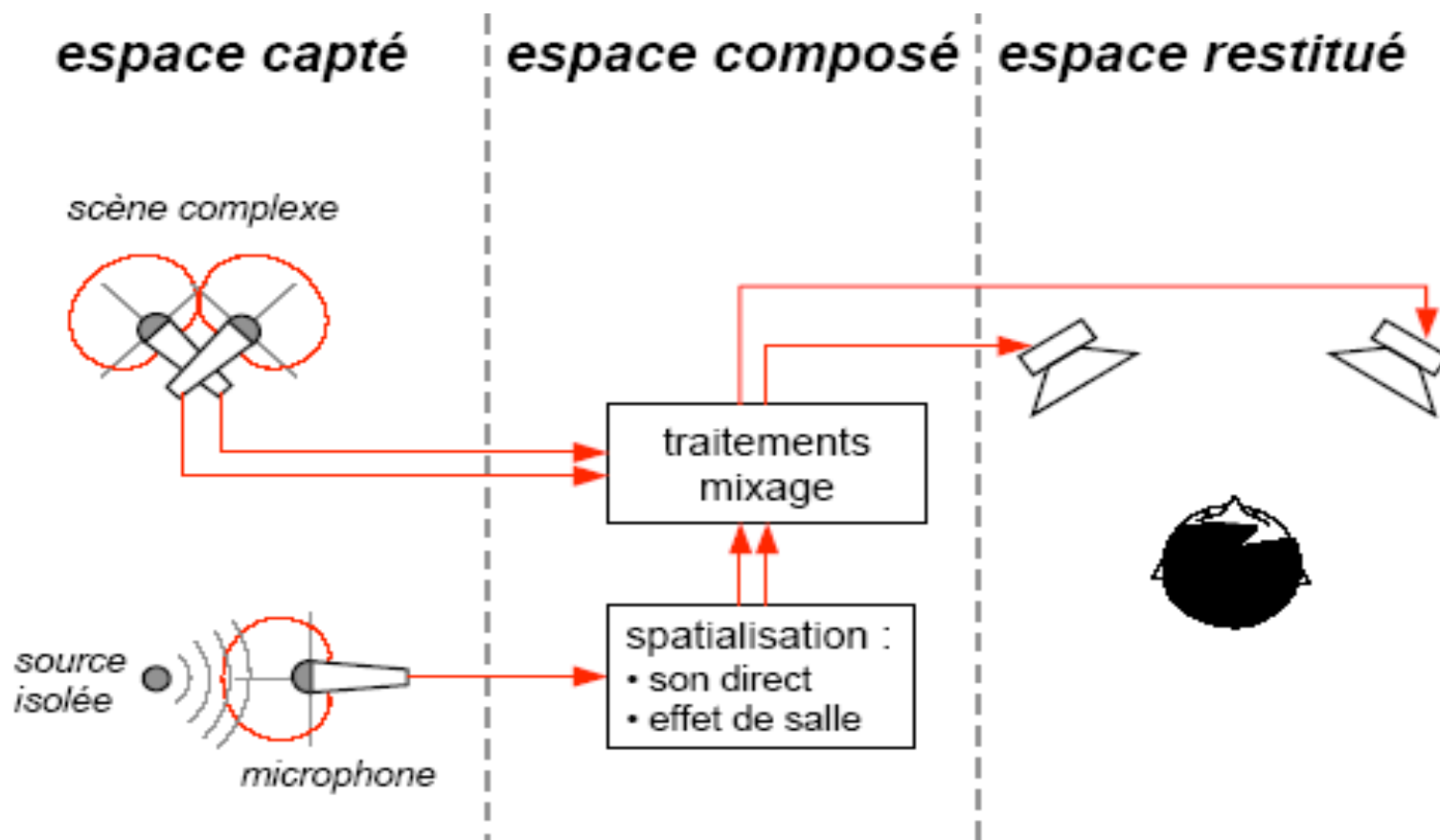
# Synthèse sonore

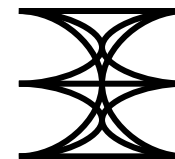
- Son direct et effet de salle





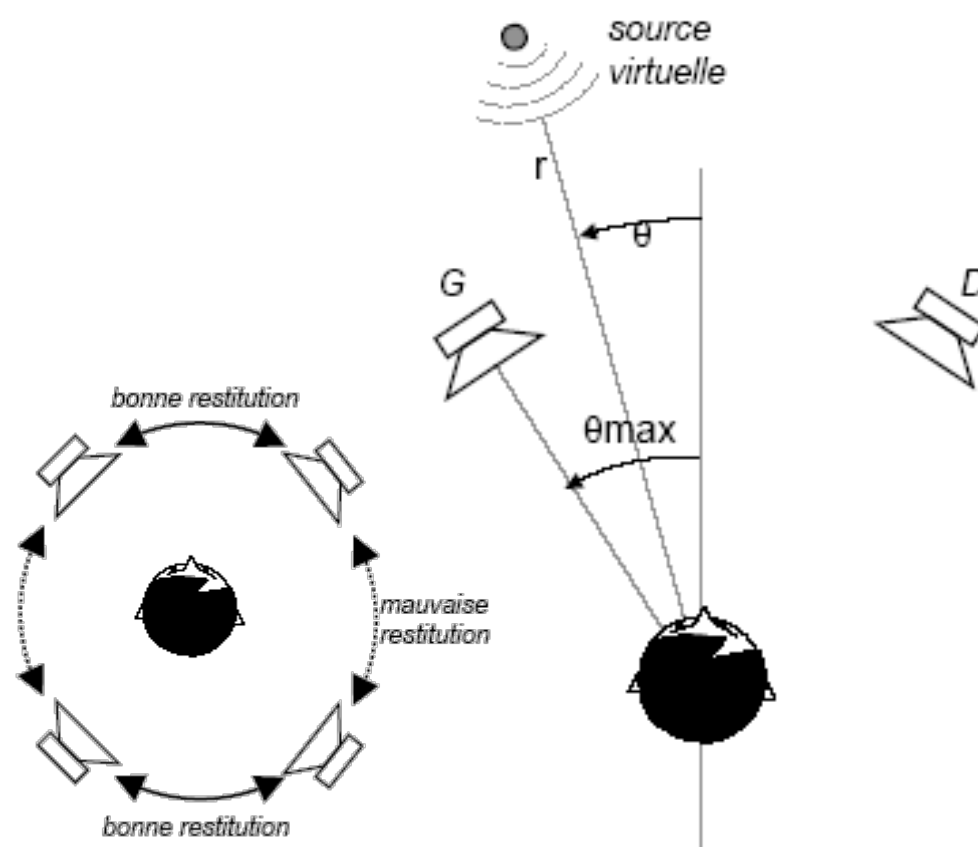
# Synthèse sonore

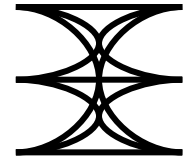




# Synthèse sonore

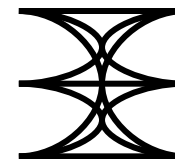
- Panoramique
  - Intensité
- Réflexion
  - Intensité
  - Ligne de retard
- Réverbération
  - Intensité
  - Ligne de retard
  - Mélange



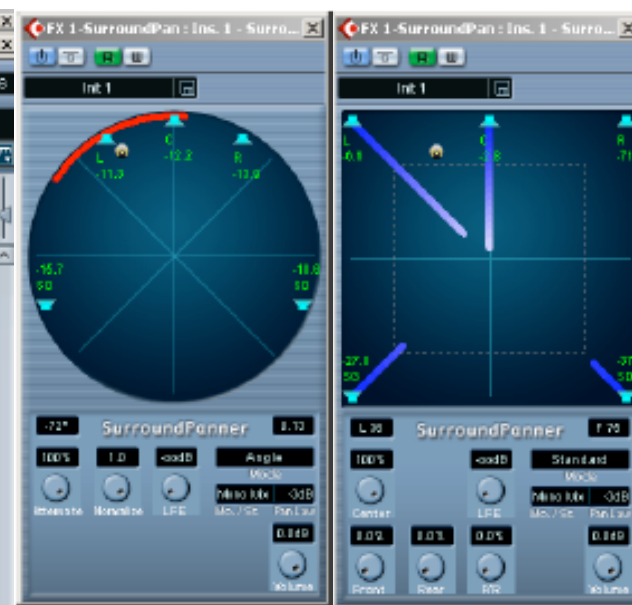
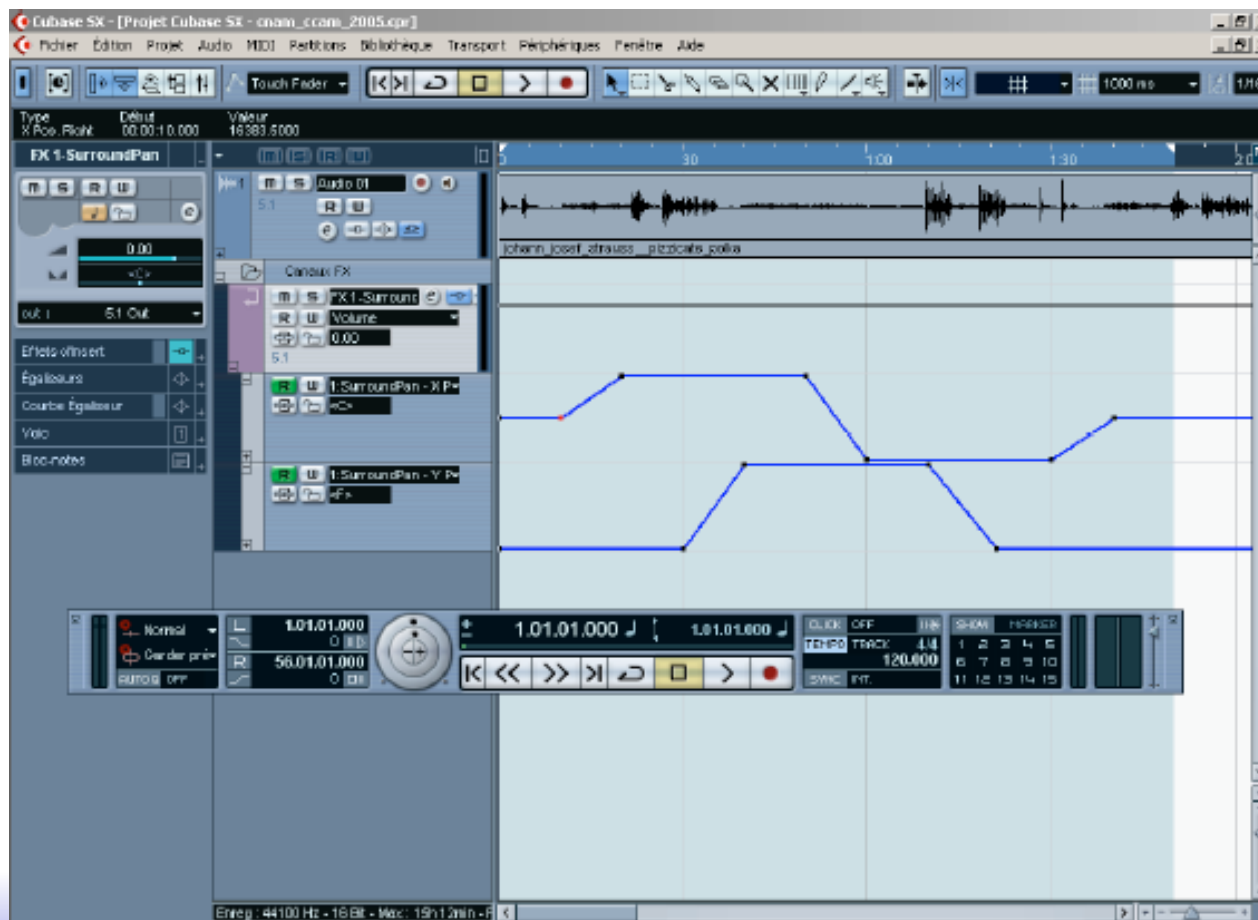


# Synthèse sonore

- Logiciels
  - Filtrage
  - Mixage
  - Spatialisation
  - Exemple
    - Protools, Cubase, MaxMSP

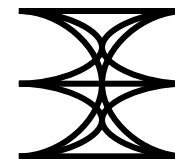


# Synthèse sonore



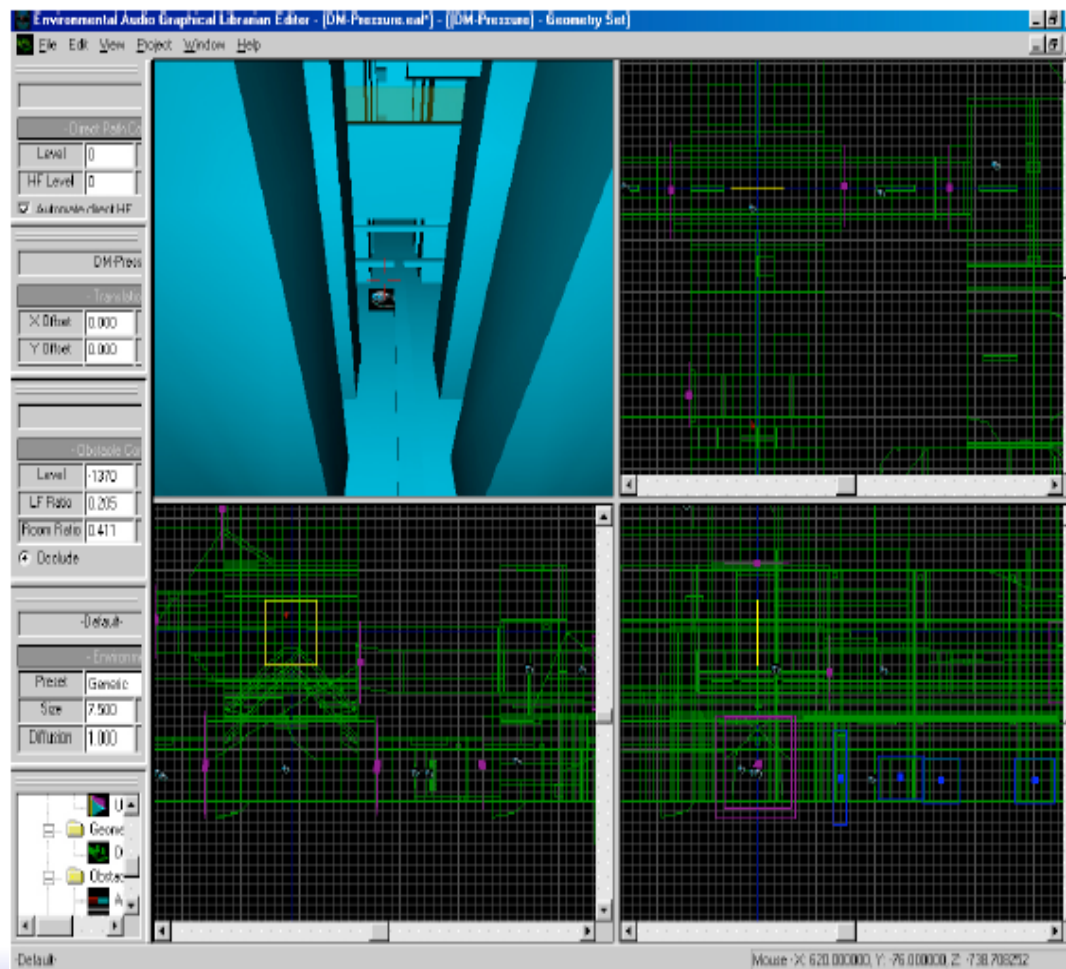
spatialisation

séquenceur

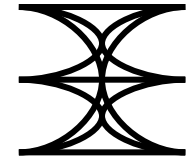


# Synthèse sonore

- Logiciel
  - Avec prise en compte de la 3D
  - EAGLE
    - Environmental Audio Graphical Librarian Editor





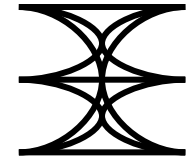
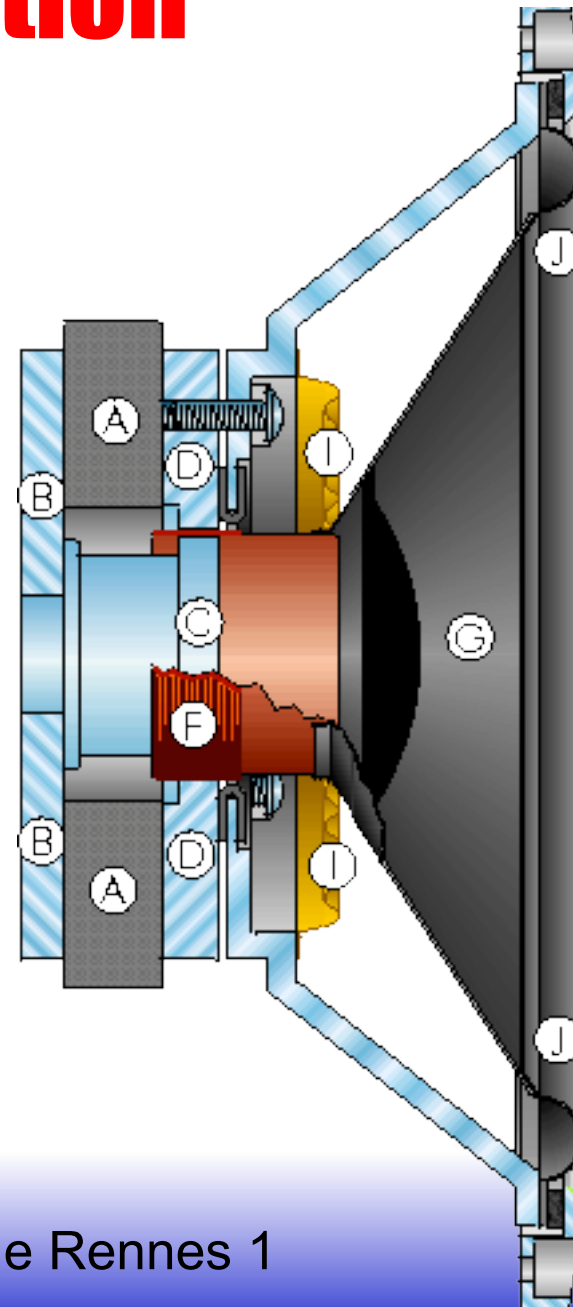


# Restitution

- Un haut-parleur (HP) fonctionne selon le principe suivant :
  - Un moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ;
  - ce moteur transmet cette énergie mécanique à la membrane ;
  - la membrane transmet l'énergie mécanique à l'air ambiant – d'où le son.

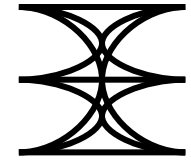
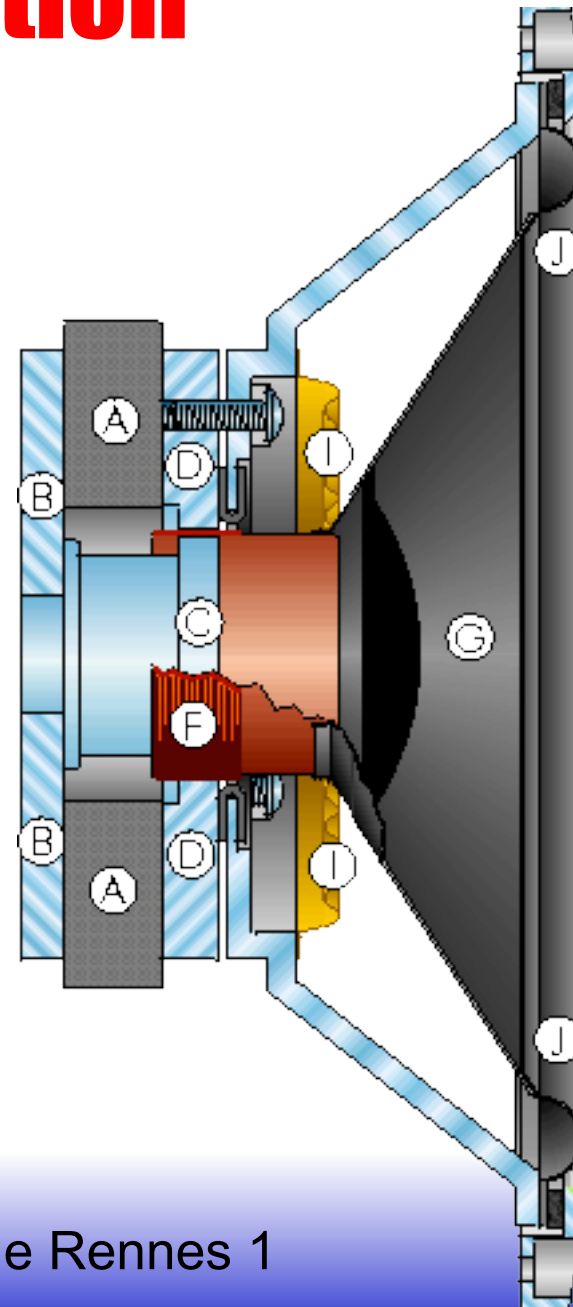
# Restitution

- Le circuit magnétique, constitué de l'aimant ferrite circulaire A, de la pièce polaire arrière B, du noyau central C et de la pièce avant D, crée un champ magnétique très intense dans l'étroite fente circulaire, située entre D et C, appelée entrefer.



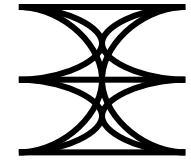
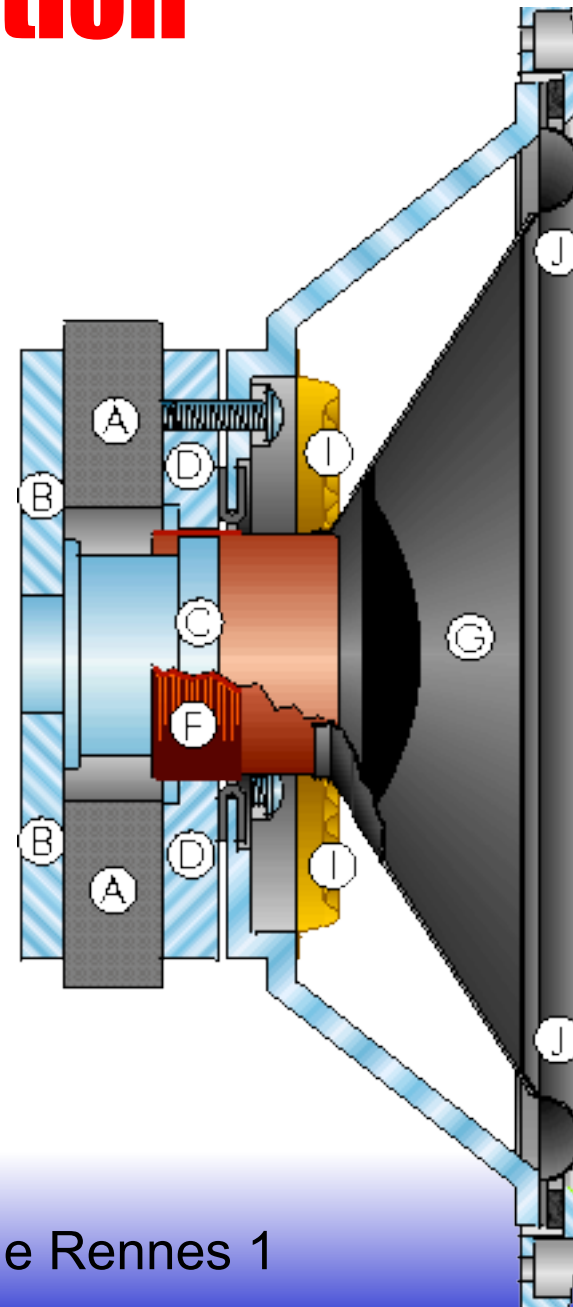
# Restitution

- La bobine mobile F et la membrane conique G sont suspendues, par les suspensions I et J, de telle sorte que cette bobine est centrée dans l'entrefer, sans le toucher.



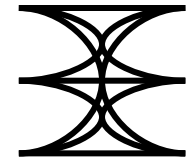
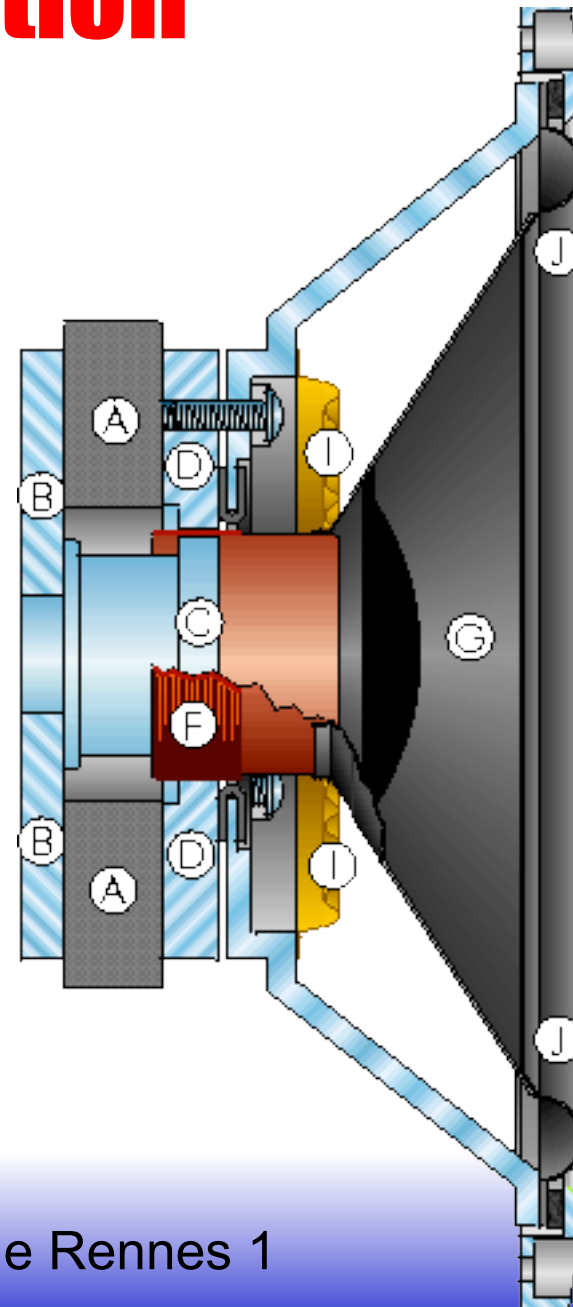
# Restitution

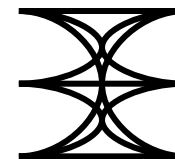
- Le courant électrique venant de l'amplificateur traverse la bobine mobile et, sous l'action du champ magnétique intense de l'entrefer, va pousser en avant la membrane ou la tirer en arrière suivant la polarité de cette tension électrique.



# Restitution

- En se déplaçant ainsi d'avant en arrière au rythme du signal électrique, image du son captée sous forme électrique par le microphone à la prise de son, la musique est recréée avec plus ou moins de fidélité.





# Bibliographie



**Guide pratique de la prise de son  
d'instruments et d'orchestres de  
Lionel Haidant**

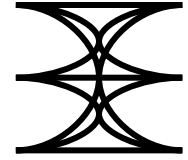
109 pages (31 mars 1994)  
Dunod (Audio-Vidéo); ISBN :  
2100052713

**Théorie et pratique de la  
prise de son  
stéréophonique**  
par Christian Hugonnet et  
Pierre Walder - ed Eyrolles

251 pages (1998) / 2e éd  
Eyrolles ; ISBN : 2212098138



# Le phénomène son



- Champ direct, champ réverbéré :
  - Courbe Intensité du champ sonore global en fonction des distances de la source
  - Distance critique : intensité du champ direct identique à celle du champ réverbéré