

# Enceintes électroacoustiques

## Le haut parleur

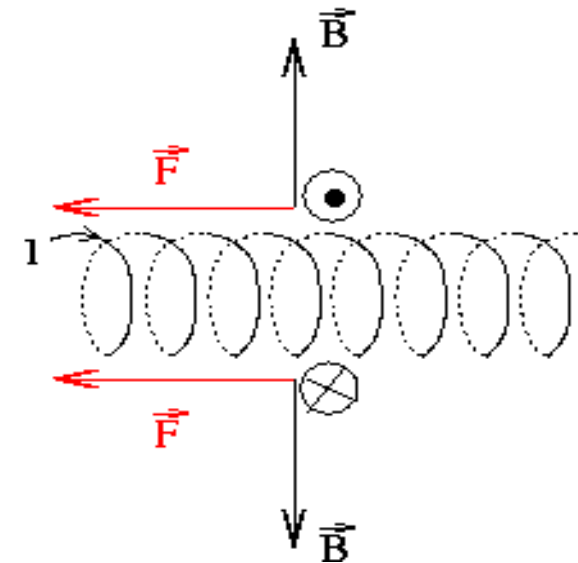
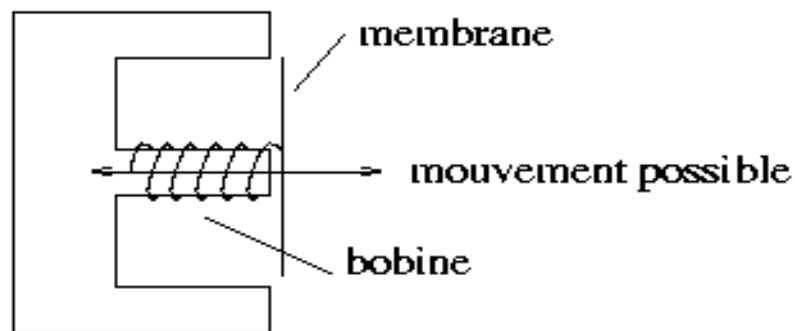
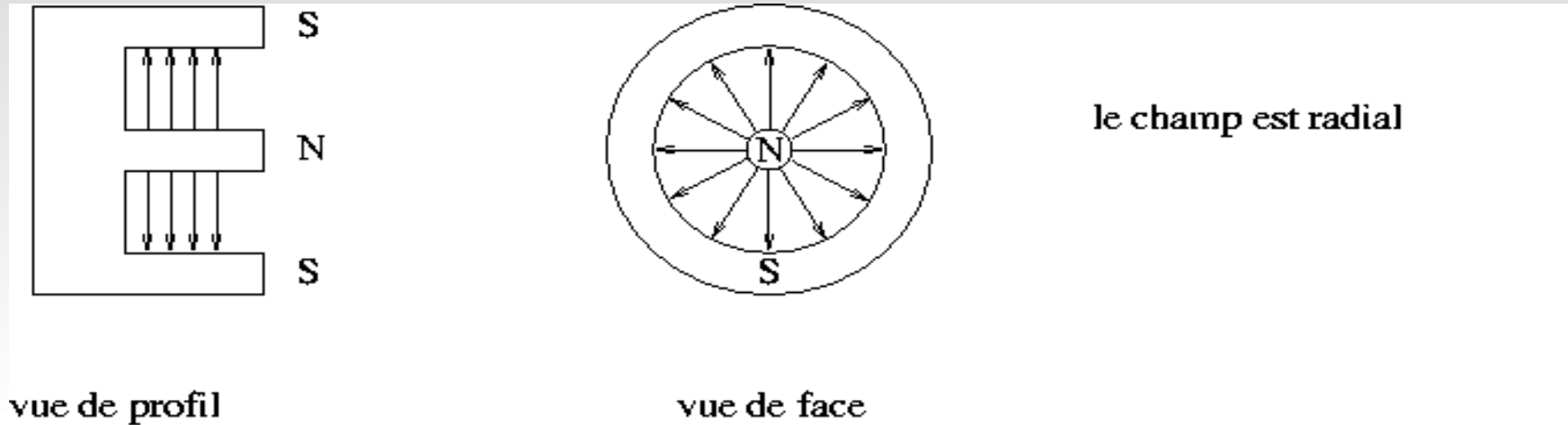
Bruno GAZENGEL

# Les haut-parleurs

- Différentes familles de haut-parleur
  - Electrodynamique
  - Electrostatique
  - Piézoélectrique

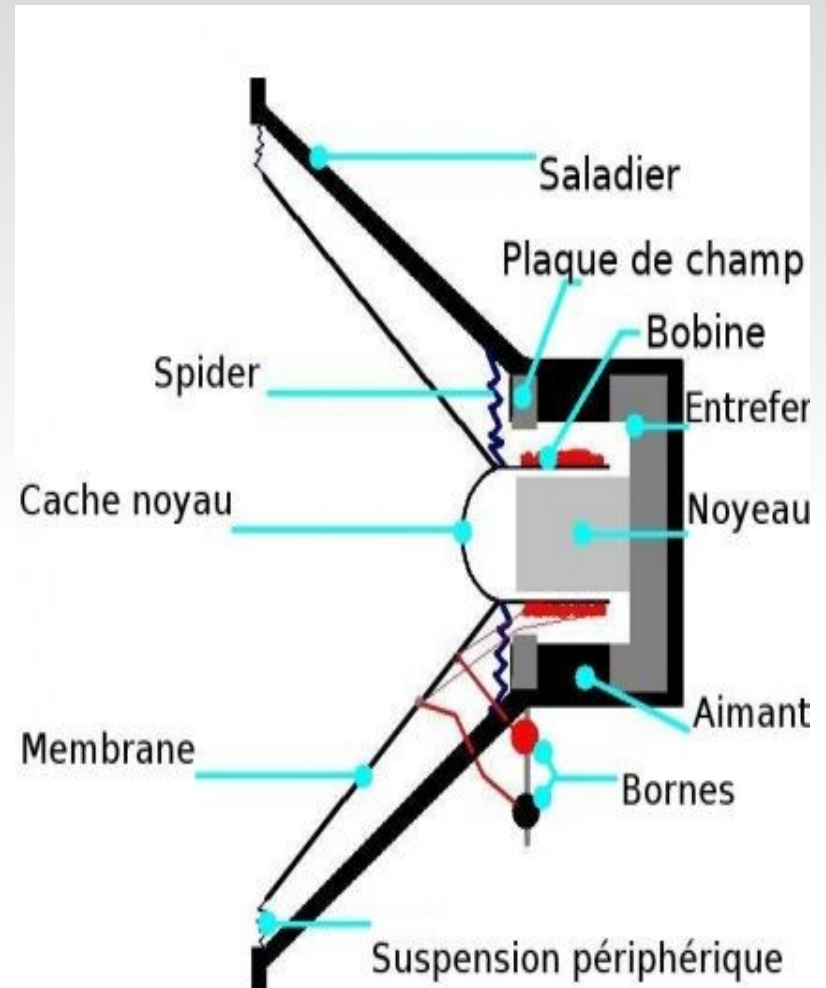
# Haut parleur électrodynamique

- Principe général



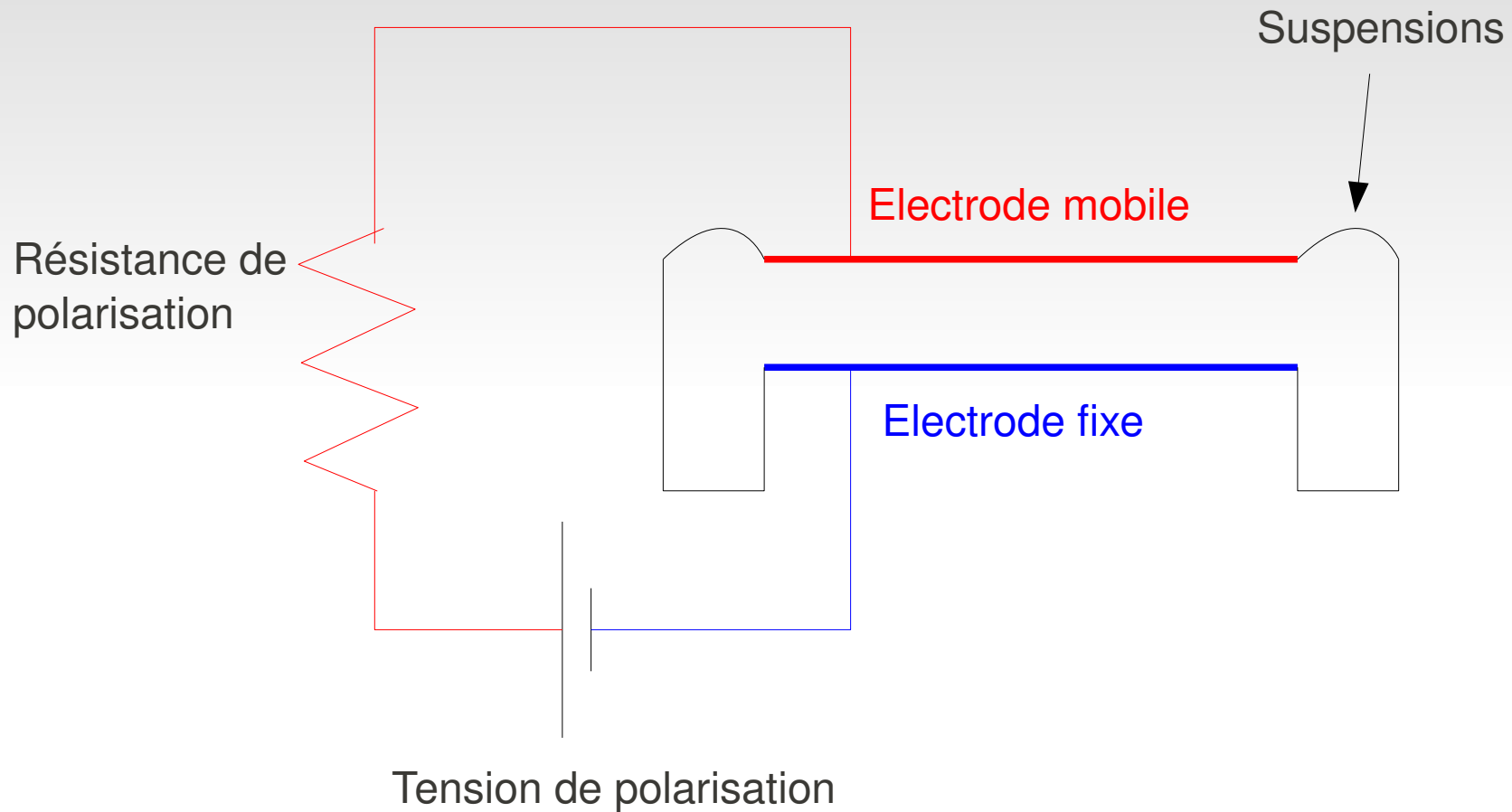
# Haut parleur électrodynamique

- Haut-parleurs



# haut-parleur électrostatique

- Principe général



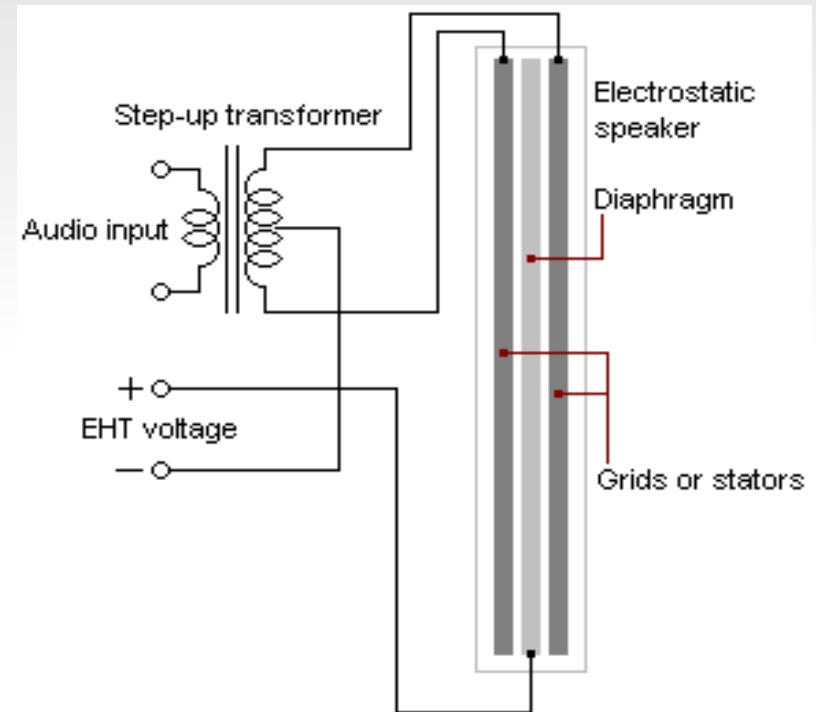
# haut-parleur électrostatique

- Haut-parleurs



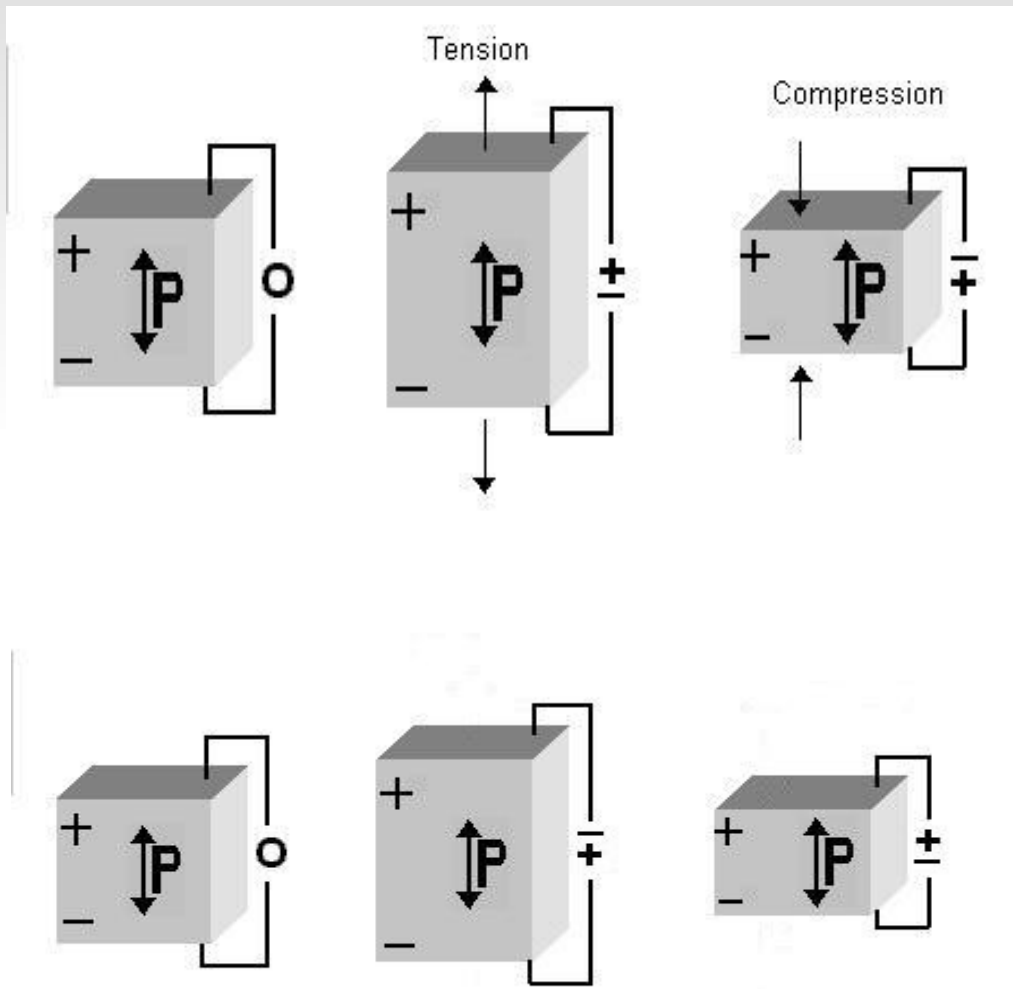
Photo: Jon T. Galle

Meadow Song Labs Hybrid Electrostatic Loudspeakers



# haut-parleur piézo-électrique

- Principe général

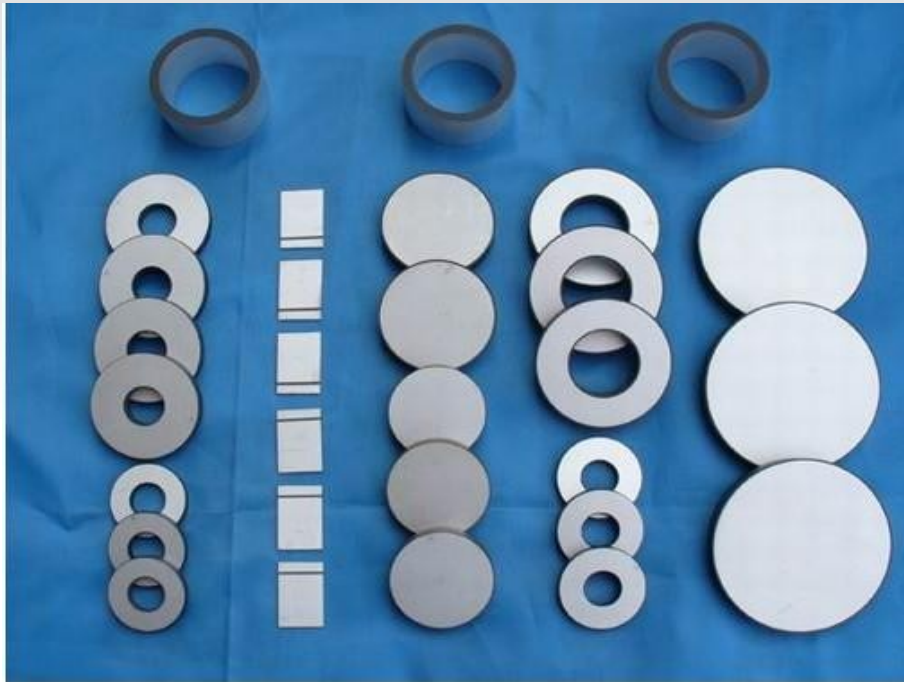


**Effet direct** : déformation mécanique => charges électriques sur les faces

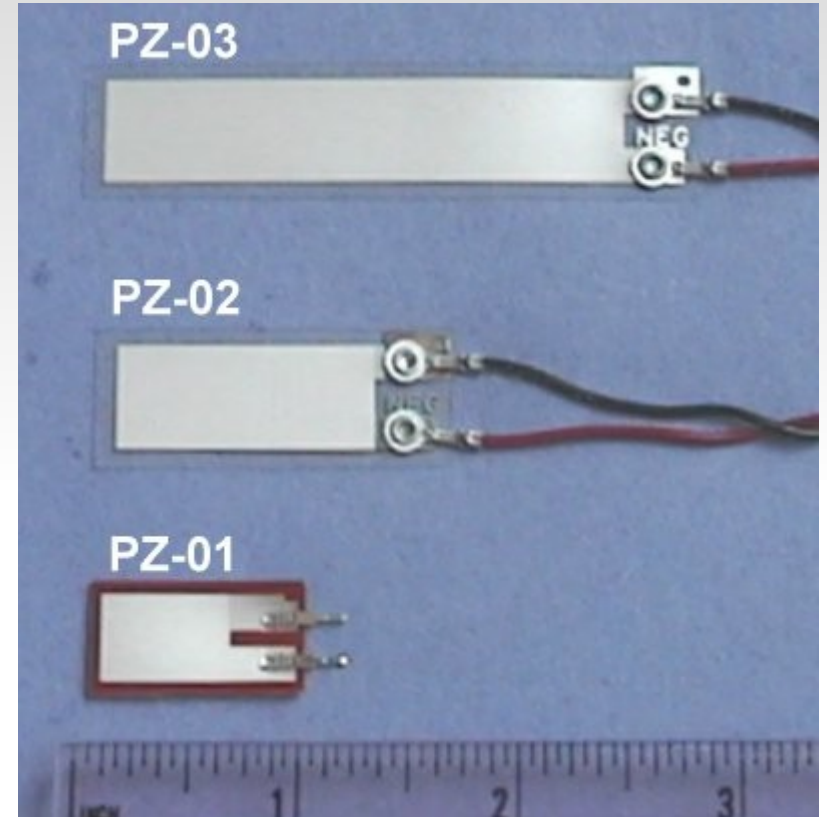
**Effet inverse** : différence de potentiel électriques sur les faces => déformation mécanique

# haut-parleur piézo-électrique

- Matériaux



Céramiques



Films



# haut-parleur piézo-électrique

- Haut-parleurs



Buzzer à céramique

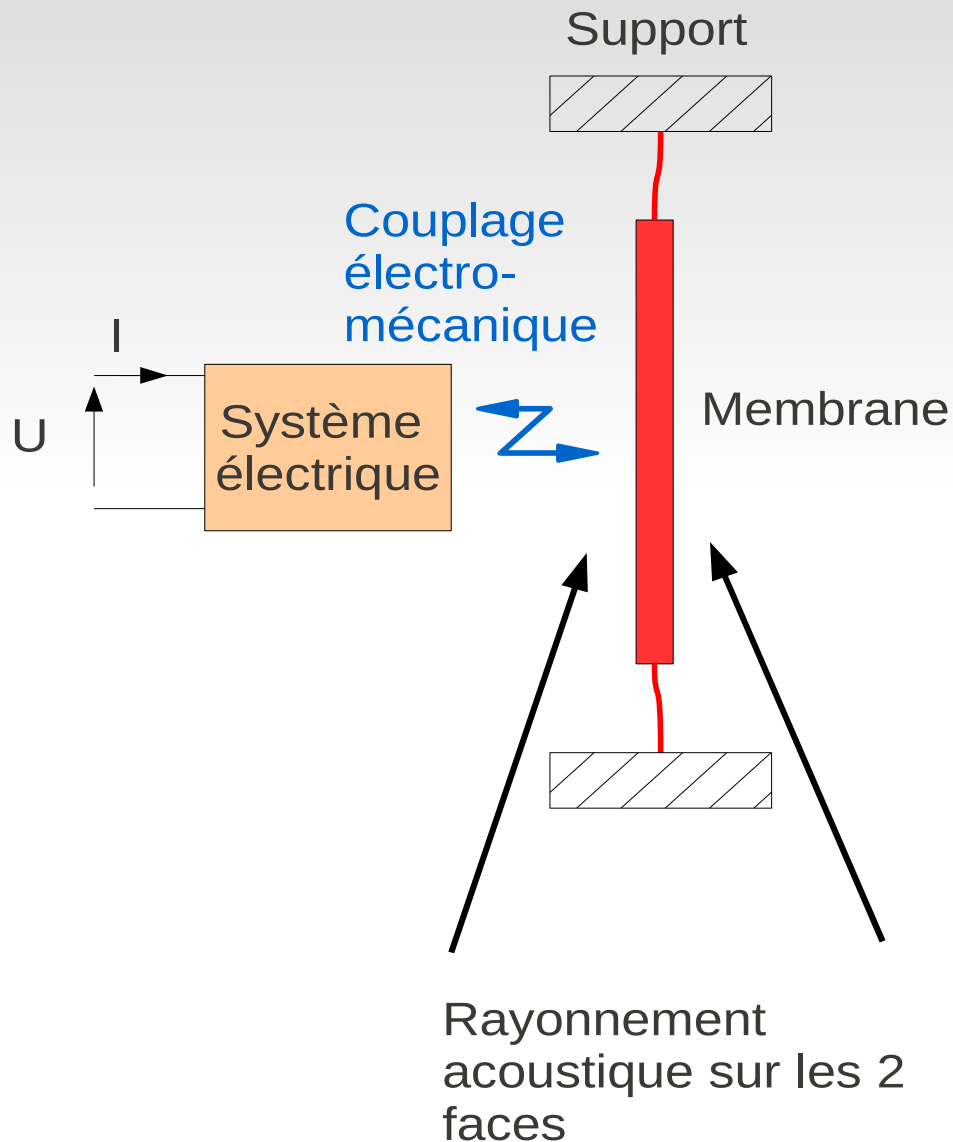


Tweeter à film PVDF



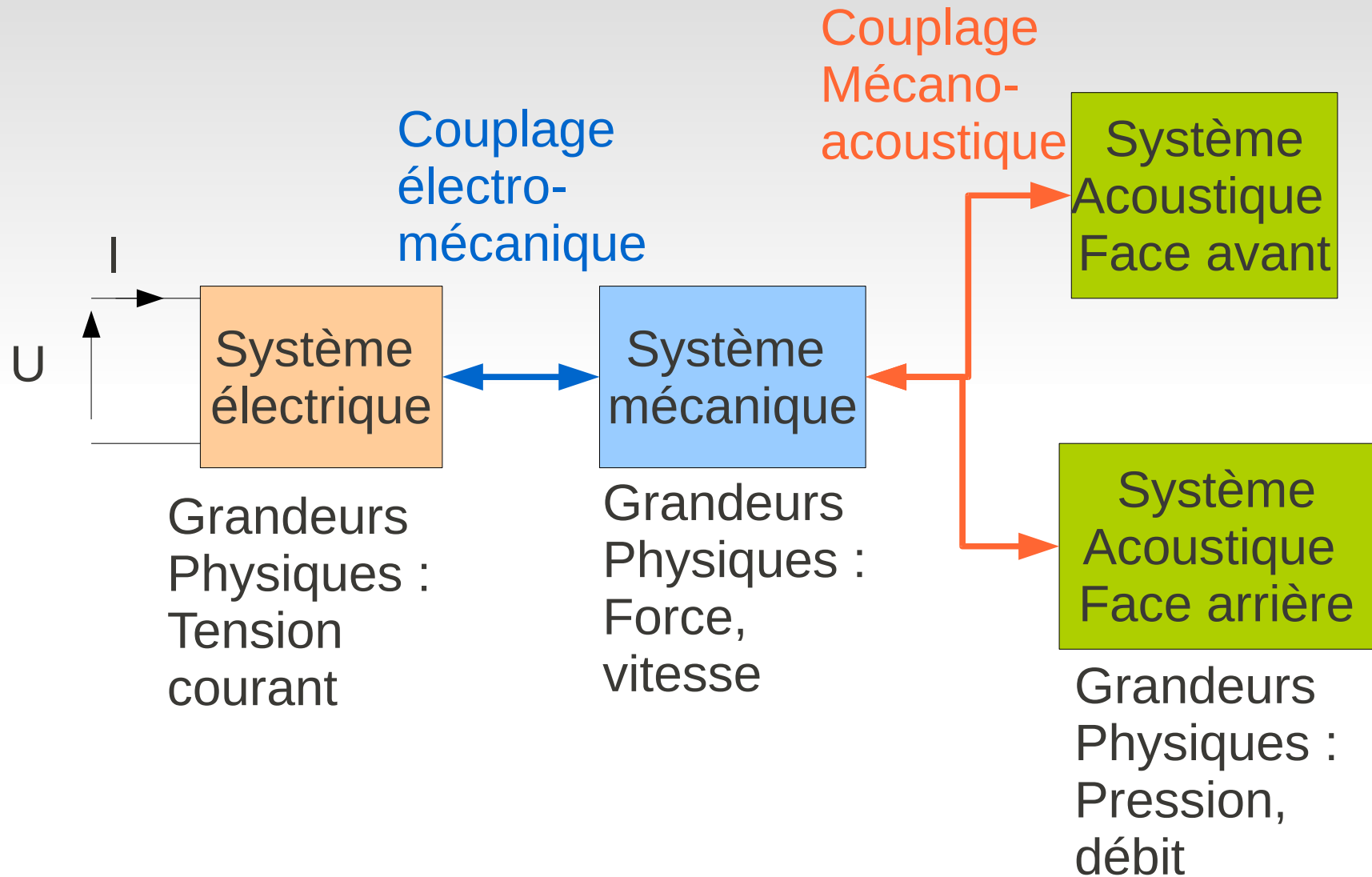
Haut-parleur ultradirectif constitué de 2372 cellules de PVDF (PolyVinylidene Fluoride) de diamètre 4 mm (LAUM)

# Principe général des haut-parleurs



- Hypothèses : système travaillant le long d'une seule dimension (axe x)
- Membrane : système mécanique à 1 degré de liberté (présente une fréquence de résonance)

# Principe général des haut-parleurs



# Paramètres des haut-parleurs

- Système électrique
  - Physiquement : c'est une bobine
  - Paramètres équivalents :
    - Résistance électrique  $R_b$  (Ohms),
    - Inductance  $L_b$  (Henry)
  - Impédance électrique de la bobine  $Z_b = R_b + j \omega L_b$
  - Contrôlé par **2 paramètres, 1 seul en basses fréquences** (lorsque  $\omega L_b \ll R_b$  )

# Paramètres des haut-parleurs

- Système mécanique
  - Physiquement : équivalent à un système masse-ressort-amortissement (1 degré de liberté)
  - Paramètres équivalents :
    - Masse mécanique de l'équipage mobile  $M_{ms}$
    - Souplesse (inverse de la raideur) mécanique de l'équipage mobile  $C_{ms}$
    - Résistance mécanique (amortissement)  $R_{ms}$
  - Impédance mécanique de l'équipage mobile
$$Z_{ms} = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}}$$
    - Contrôlé par 3 paramètres

# Paramètres des haut-parleurs

- Système acoustique
  - N'intervient pas dans les paramètres intrinsèques au haut-parleur
  - Contrôle néanmoins le comportement du haut-parleur en fonctionnement normal (dans l'air)
  - Les systèmes acoustiques (avant et arrière) sont décrits par leurs impédances acoustiques notées
    - $Z_{av}$  : pour l'avant
    - $Z_{ar}$  : pour l'arrière

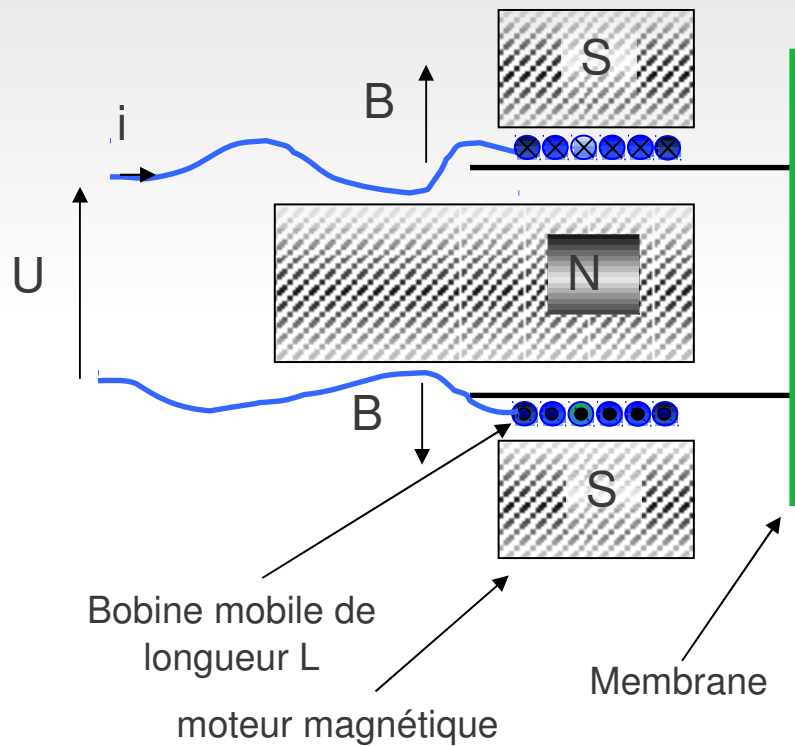
# Paramètres des haut-parleurs

- Paramètres de couplage
  - Couplage
    - Se traduit par une relation entre 2 grandeurs dans un domaine (électrique, mécanique, ...) et deux autres grandeurs dans un autre domaine (mécanique, acoustique).
    - S'écrit de façon générale sous forme matricielle, ce qui nécessite 4 paramètres pour décrire le couplage.
    - Exemple : couplage électromécanique
      - Paramètres de couplage : A, B, C, D

$$\begin{pmatrix} U_{em}(\omega) \\ I(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{em}(\omega) \\ v(\omega) \end{pmatrix}$$

# Paramètres des haut-parleurs

- Couplage électro-mécanique



## Equations du mouvement

$$F = BLi$$

(force électromotrice)

$$U' = BLV$$

(tension contreélectromotrice)

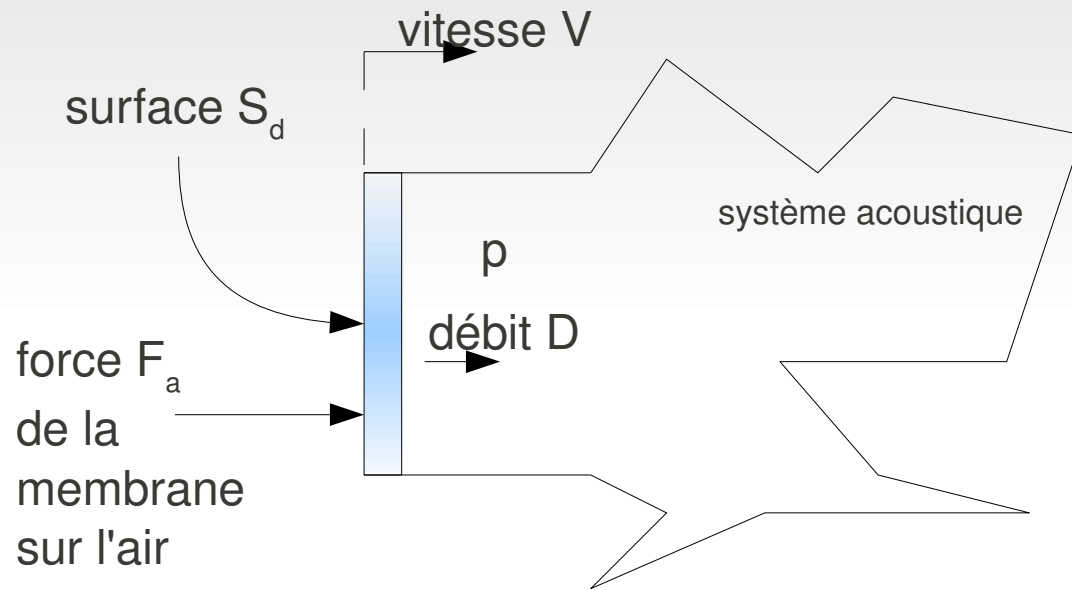
$$\begin{pmatrix} U_{em}(\omega) \\ I(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Bl \\ \frac{1}{Bl} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F(\omega) \\ v(\omega) \end{pmatrix}$$

1 seul paramètre de couplage  $Bl$   
(facteur de force)



# Paramètres des haut-parleurs

- Couplage mécano-acoustique



$$F = p S_d$$

Relation pression-force

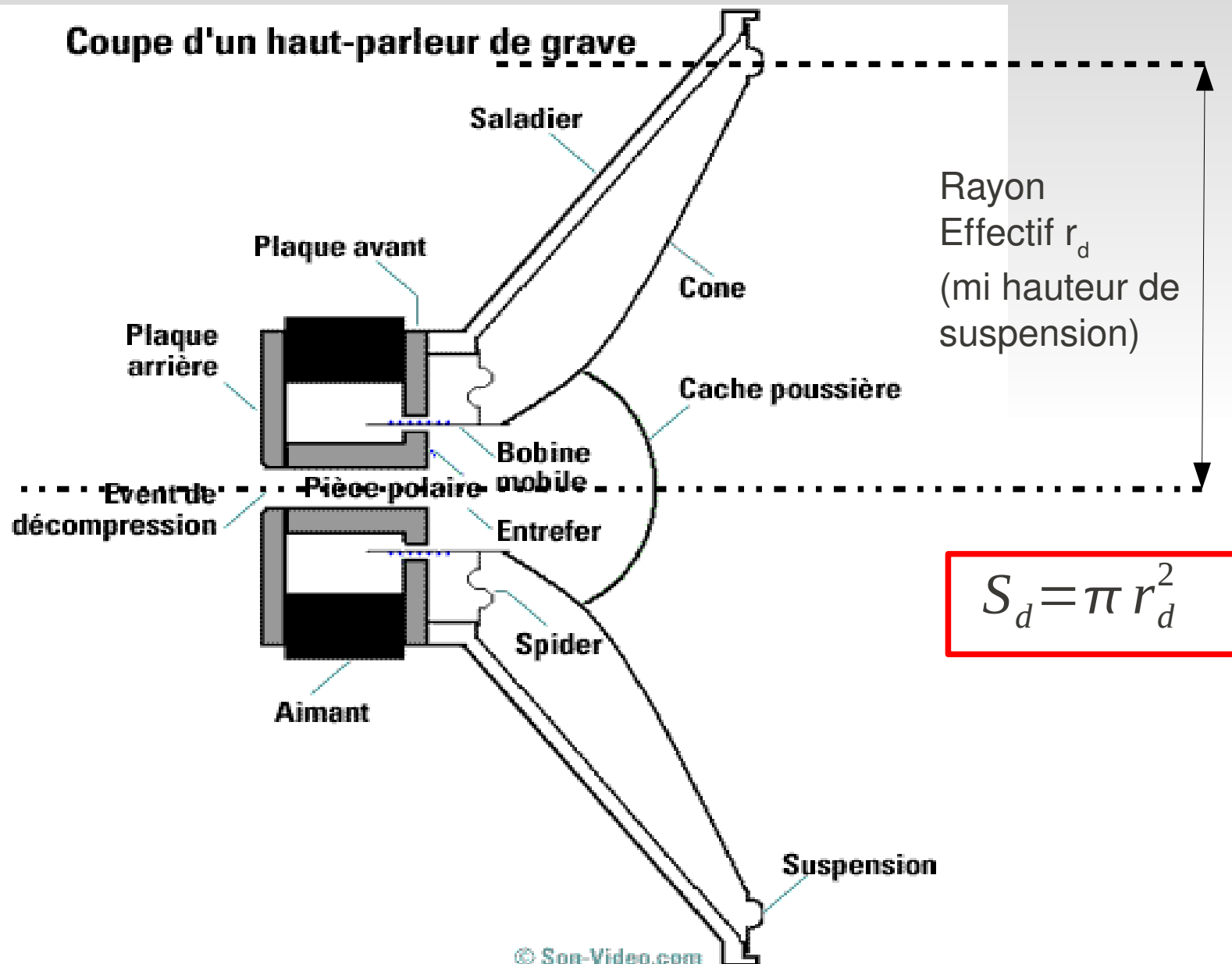
$$v = \frac{D}{S_d}$$

Relation Débit-vitesse

$$\begin{pmatrix} F_a(\omega) \\ v(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_d & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p(\omega) \\ D(\omega) \end{pmatrix}$$

1 seul paramètre de couplage  $S_d$   
(surface effective du diaphragme)

# Surface effective du diaphragme



# Paramètres du haut-parleur

- Bilan
  - Système électrique : 2 paramètres (1 seul aux basses fréquences)
  - Système mécanique : 3 paramètres
  - Couplages : 2 paramètres
  - **Au total : 6 paramètres aux basses fréquences**
- Paramètres acoustiques indépendants du haut-parleur
  - Impédances acoustiques des charges avant et arrière

# Changements de domaines

- Principe général

- Du fait des couplages entre différents types d'énergies, les comportements observés dans un domaine (mécanique par exemple) sont aussi observés dans un autre domaine (électrique par exemple).
- Un paramètre mécanique (masse par exemple) peut ainsi être traduit par un paramètre équivalent dans un autre domaine.

- Equations

- Couplage électromécanique

$$Z_e = \frac{U}{i} = (Bl)^2 \frac{v}{F} = \frac{(Bl)^2}{Z_m}$$

- Couplage mécano-acoustique

$$Z_m = \frac{F}{v} = (S_d)^2 \frac{p}{D} = (S_d)^2 Z_a$$

# Notations en électroacoustique

- Principe général
  - Chaque élément du haut-parleur sera noté  $X_{ij}$
  - X désigne l'élément
    - L : inductance
    - C : souplesse ou capacitance
    - M : masse
    - R : résistance
  - i désigne le domaine dans lequel est exprimée la grandeur
    - e : électrique
    - m : mécanique
    - a : acoustique
  - J désigne l'élément physique observé
    - b : bobine
    - s : équipage mobile
    - r : rayonnement acoustique
    - c : charge acoustique

# Notations en électroacoustique

## ■ Exemples

- $L_{eb}$  : inductance exprimée dans le domaine électrique pour la bobine. Unité : Henry.
- $M_{ms}$  : masse exprimée dans le domaine mécanique pour l'équipage mobile. Unité : kg.
- $M_{as}$  : masse exprimée dans le domaine acoustique pour l'équipage mobile. Unité : kg m<sup>-4</sup>.
- $C_{ms}$  : souplesse exprimée dans le domaine mécanique pour l'équipage mobile. Unité : m.N<sup>-1</sup>
- $M_{ar}$  : masse exprimée dans le domaine acoustique pour l'air environnant (masse de rayonnement)

# Changements de domaines

- Impédance mécanique vue dans le domaine acoustique

- Pour la masse

- Une masse d'impédance  $Z_{mM} = j\omega M_{ms}$  présente une impédance acoustique équivalente  $Z_{aM} = \frac{Z_{mM}}{(S_d)^2} = \frac{j\omega M_{ms}}{(S_d)^2}$

- Elle est vue comme une masse acoustique  $M_{as} = \frac{M_{ms}}{(S_d)^2}$

- Pour la souplesse

- Une souplesse d'impédance  $Z_{mC} = \frac{1}{j\omega C_{ms}}$  présente une impédance acoustique équivalente  $Z_{aC} = \frac{Z_{mC}}{(S_d)^2} = \frac{1}{j\omega (S_d)^2 C_{ms}}$

- Elle est vue comme une souplesse acoustique

$$C_{as} = C_{ms} (S_d)^2$$

# Changements de domaines

- Impédance mécanique vue dans le domaine électrique

- Pour la masse

- Une masse d'impédance  $Z_{mM} = j\omega M_{ms}$  présente une impédance électrique équivalente  $Z_{eM} = \frac{(Bl)^2}{Z_{mM}} = \frac{(Bl)^2}{j\omega M_{ms}}$

- Elle est vue comme une capacitance  $C_{es} = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2}$

- Pour la souplesse

- Une souplesse d'impédance  $Z_{mC} = \frac{1}{j\omega C_{ms}}$  présente une impédance électrique équivalente

- $Z_{eC} = \frac{(Bl)^2}{Z_{mC}} = j\omega C_{ms} (Bl)^2$

- Elle est vue comme une inductance  $L_{es} = C_{ms} (Bl)^2$



# Paramètres du haut-parleur

- Pour la partie électrique
  - Resistance DC :  $R_{eb}$
  - Inductance bobine  $L_{eb}$
  - Facteur de qualité électrique  $Q_{es}$
- Pour le couplage électromécanique
  - Facteur de force  $Bl$
- Pour la partie mécanique
  - Fréquence de résonance  $f_s$
  - Souplesse mécanique des suspensions  $C_{ms}$
  - Masse mécanique de l'équipage mobile :  $M_{ms}$
  - Facteur de qualité mécanique  $Q_{ms}$
  - Volume d'air équivalent à la souplesse  $C_{ms}$  :  $V_{as}$

# Paramètres du haut-parleur

- Paramètres présentés usuellement
  - Pour le couplage mécano-acoustique
    - Surface  $S_d$
  - Pour l'ensemble du haut-parleur
    - Facteur de qualité total  $Q_{ts}$

# Paramètres du haut-parleur

- Relations utiles
  - $\rho$  : masse volumique de l'air 1,2 kg/m<sup>3</sup> à 20° C
  - $c$  : célérité du son dans l'air au repos 344 m/s à 20 °C
  - Relations entre grandeurs usuelles

$$Q_{ms} = \frac{1}{2\pi f_s R_{ms} C_{ms}} \quad Q_{es} = \frac{R_{eb}}{2\pi f_s C_{ms} (Bl)^2} \quad \frac{1}{Q_{ts}} = \frac{1}{Q_{es}} + \frac{1}{Q_{ms}}$$

$$V_{as} = \rho c^2 S_d^2 C_{ms}$$

# Fiche technique de haut-parleur

- Exercice
  - Partant de la fiche technique suivante (cliquer sur le lien)
    - [Haut-parleur Monacor Blue Components SP-25A/250PAM](#)
  - Vérifier les valeurs des paramètres  $Q_{ms}$ ,  $Q_{es}$  et  $Q_{ts}$  partant des valeurs numériques d'autres paramètres
  - Vérifier la valeur du  $V_{as}$  partant des valeurs numériques d'autres paramètres