

# Transduction électrodynamiqu e

ERIC BAVU, MARC PACHEBAT ET GUILLAUME PENELET



# Table des matières

<b>Objectifs</b>	<b>5</b>
<b>I - Phénomènes élémentaires</b>	<b>7</b>
A. Une expérience académique.....	7
B. Force de Laplace.....	8
1. Le phénomène.....	8
2. Direction et sens de la force de Laplace.....	8
C. Loi de Lenz : le phénomène.....	10
D. Couplages et régime oscillant.....	10
1. Force électromotrice vs force contreélectromotrice ?.....	10
2. Régime oscillant (1/2).....	11
3. Régime oscillant (2/2).....	11
E. Et si l'on remplace le barreau par une membrane ? Le haut-parleur électrodynamique à ruban.....	11
<b>II - Géométrie axisymétrique</b>	<b>13</b>
A. Comment faire un transducteur plus compact ?.....	13
B. Le haut-parleur électrodynamique à bobine mobile.....	14
1. Structure d'un haut-parleur à bobine mobile.....	14
2. Le haut-parleur en mode actionneur (1/2).....	17
3. Le haut-parleur en mode actionneur (2/2).....	17
4. Le haut-parleur en mode capteur.....	18
C. Equations de couplage d'un transducteur électrodynamique.....	18
<b>III - Représentation électrique équivalente</b>	<b>19</b>
A. Représentation via un transformateur.....	19
B. Représentation via un gyrateur.....	20
<b>IV - Bibliographie</b>	<b>21</b>
<b>V - Test de sortie : testez vos connaissances</b>	<b>23</b>
<b>VI - Test de sortie (réponses)</b>	<b>25</b>



# Objectifs

L'objectif de ce grain est :

- de présenter les **phénomènes physiques** responsables de la transduction électrodynamique, sans entrer toutefois dans les fondements de l'électromagnétisme sur lesquels repose ce principe de transduction ;
- de décrire ces phénomènes au moyen des **équations de couplage** reliant les grandeurs électriques ( $U, i$ ) et mécaniques ( $F, v$ ) ;
- de traduire ces équations de couplage sous forme de **schémas électriques équivalents**.

Les prérequis relatifs à ce grain concernent :

- quelques notions de base d'électromagnétisme (une maîtrise fine de ce large champ de la physique n'étant toutefois pas requise),
- les modules 1 et 2 de ce cours.

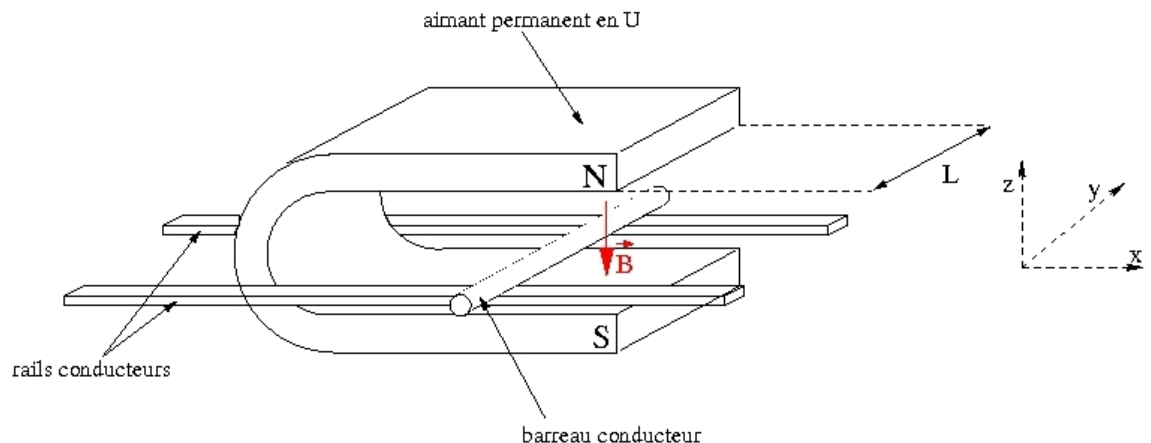


# Phénomènes élémentaires

Une expérience académique	7
Force de Laplace	8
Loi de Lenz : le phénomène	10
Couplages et régime oscillant	10
Et si l'on remplace le barreau par une membrane ? Le haut-parleur électrodynamique à ruban	11

## A. Une expérience académique

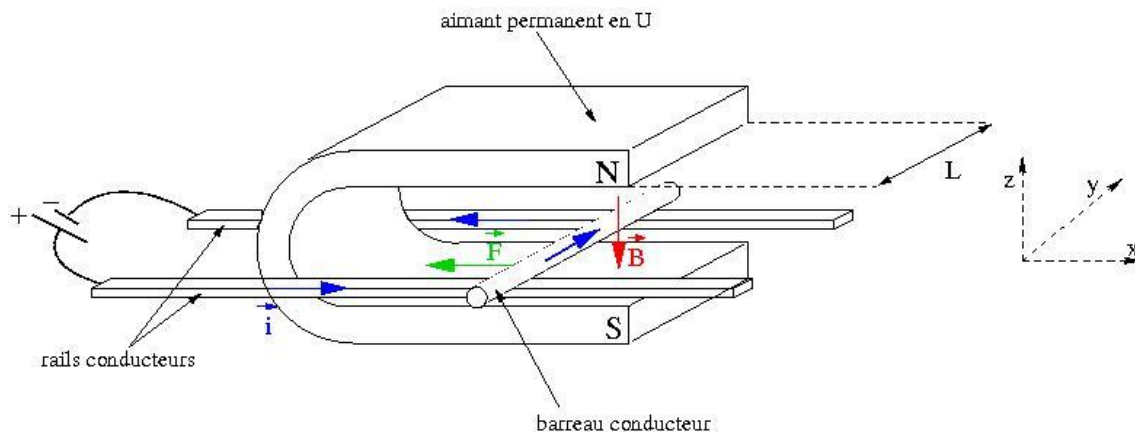
Considérons le dispositif simple de la figure qui suit, constituée d'un barreau conducteur susceptible de rouler sur deux rails conducteurs, le long de l'axe  $\vec{x}$ . Un aimant en U est placé entre les deux rails, de sorte que le barreau conducteur est baigné dans un champ magnétique constant  $\vec{B}$  de direction  $-\vec{z}$ .



Ce système constitue un dispositif de transduction électromagnétique, pouvant fonctionner en mode actionneur (le barreau étant mis en mouvement lorsqu'un courant électrique le traverse), ou bien en mode capteur (la mise en mouvement du barreau induisant une tension électrique à ses bornes).

## B. Force de Laplace

### 1. Le phénomène



- Considérons tout d'abord que le barreau conducteur est traversé par un courant électrique  $\vec{i}$ . Sous l'effet conjoint du champ magnétique  $\vec{B}$  et du courant  $\vec{i}$ , une force électromotrice  $\vec{F}_{em}$  s'applique sur le barreau.
- L'amplitude de cette force est proportionnelle à celles du courant  $\vec{i}$ , du champ magnétique  $\vec{B}$ , ainsi qu'à la longueur  $\ell$  du barreau conducteur, et  $\vec{F}_{em}$  est orientée de telle sorte que le jeu de trois vecteurs  $\vec{i}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{F}_{em}$  constitue une base orthogonale directe :

$$\vec{F}_{em} = \ell \vec{i} \times \vec{B},$$

où  $\times$  représente le produit vectoriel.

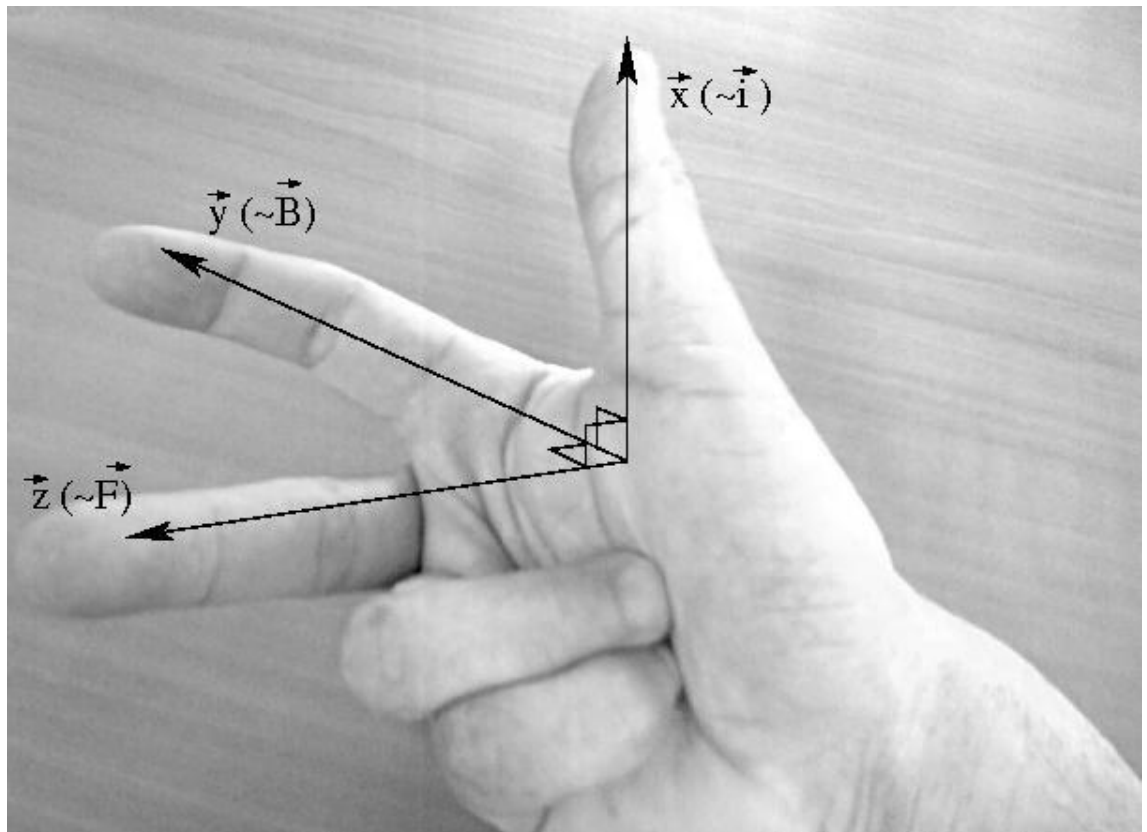
- Par suite, la force de Laplace aura pour effet de mettre en mouvement le barreau, mouvement qui sera également contrôlé par les autres forces (frottement, élasticité, inertie) appliquées au barreau.

**Remarque :** la longueur  $\ell$  de barreau à considérer ici est celle qui est baignée dans le champ magnétique. Le barreau pourrait être deux fois plus long que la force resterait inchangée si la largeur de l'aimant devait rester inchangée.

### 2. Direction et sens de la force de Laplace

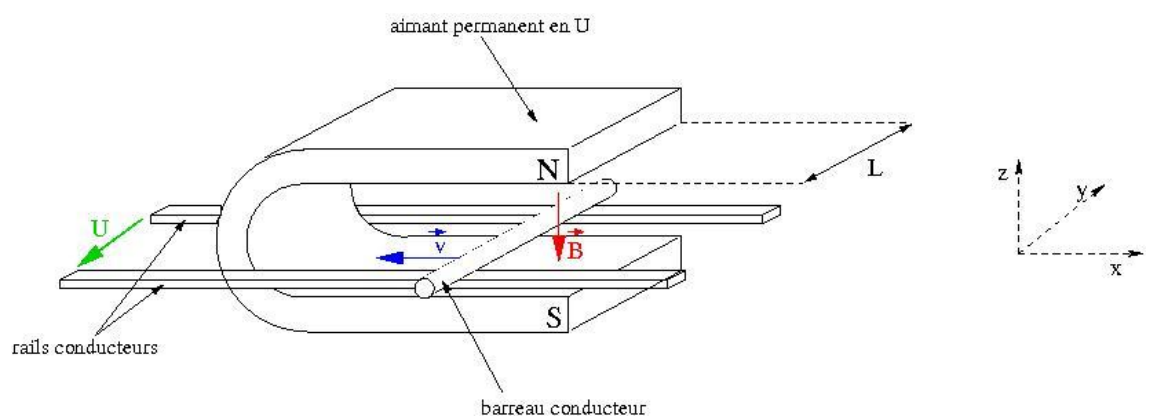
Il existe différentes méthodes permettant de retrouver facilement la direction et le sens de la force de Laplace  $\vec{F}_{em} = \ell \vec{i} \times \vec{B}$ , et notamment la règle dite "de la main droite".





Les trois premiers doigts de la main droite, une fois (naturellement) agencés pour être orthogonaux deux à deux, constituent un repère orthogonal direct.

### C. Loi de Lenz : le phénomène



- Considérons à présent que le barreau est mis en mouvement suivant l'axe  $\vec{x}$  sous l'effet d'une force extérieure. Sous l'effet conjoint du champ magnétique  $\vec{B}$  et du mouvement à la vitesse  $\vec{v}$  du barreau, une tension contreélectromotrice  $U_{cem}$  s'établit aux bornes du barreau.
- Cette tension contreélectromotrice est liée à la variation de flux  $\phi$  du champ

magnétique défini par  $\phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S}$ . Elle s'écrit  $U_{cem} = -\frac{\partial\phi}{\partial t}$ . Sachant que le champ  $\vec{B}$  ne varie pas dans le temps, c'est la surface traversée par le champ  $\vec{B}$  qui varie au cours du temps sous la forme  $dS = \ell dx = \ell v dt$ .

- Cette différence de potentiel est proportionnelle à la longueur  $\ell$  du conducteur en mouvement et aux amplitudes de la vitesse et du champ magnétique.

$$U_{cem} = B\ell v$$

## D. Couplages et régime oscillant

### 1. Force électromotrice vs force contreélectromotrice ?

- Un point fondamental relatif aux phénomènes discutés auparavant, est qu'ils sont, par nature, **indissociables**. Lorsqu'une portion de conducteur électrique, baignée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  et parcourue par un courant  $\vec{i}$ , subit de ce fait une force électromotrice (d'amplitude  $F_{em} = B\ell i$ ) qui la met en mouvement, ce mouvement génère alors une tension (dite "force contreélectromotrice")  $U_{cem} = B\ell v$  aux bornes du barreau **qui aura pour effet de contrecarrer le courant qui est la cause de son mouvement**.
- Les deux phénomènes sont donc très clairement **couplés** et sont responsables de la nature **réversible** des transducteurs électrodynamiques.

### 2. Régime oscillant (1/2)

- **Quid si le barreau est soumis à un courant sinusoïdal ?**

**L'expérience "du barreau" en régime sinusoïdal** : le montage est ici réalisé avec un minimum de matériel. Le dispositif est constitué de deux tiges en inox jouant le rôle de rails, et d'un "barreau" en cuivre (câble électrique,  $\varnothing = 2.5$  mm). Le champ magnétique est assuré par un petit aimant en U du commerce (par exemple ici le modèle M4181ANK de la marque Eclipse). Les deux rails sont connectés à la sortie d'un amplificateur audio, lui même connecté à un générateur basses-fréquences, délivrant un signal sinusoïdal de fréquence 4 Hz.

### 3. Régime oscillant (2/2)

**Remarque** : On peut noter sur la vidéo les oscillations de l'indicateur de niveau (diodes électroluminescentes vertes et rouges) de l'amplificateur de puissance. Pour comprendre d'où viennent ces variations, il faudrait savoir ce que représentent exactement ces diodes électroluminescentes (i.e. l'amplitude d'une tension, d'un courant, d'une puissance électrique ?) et comment est réellement conçu cet amplificateur audio. Néanmoins, on peut subodorer que ces oscillations sont dues à une variation de la charge électrique "vue" par l'amplificateur audio, elle-même liée à une variation de la longueur effective des rails en inox lors du déplacement du barreau ainsi qu'à la force contreélectromotrice oscillante générée par le mouvement du barreau.

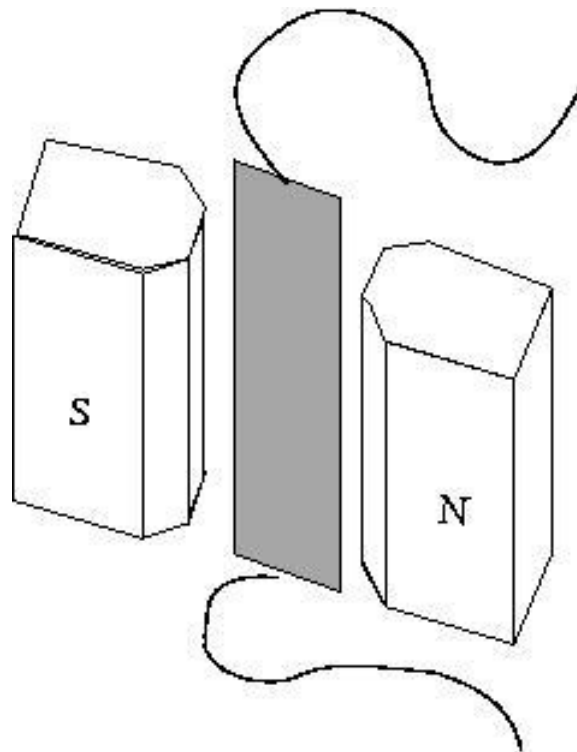
Les propos tenus précédemment valent donc également dans le cas où les couples de variables mécaniques ( $F, v$ ) et électriques ( $U, i$ ) sont des quantités fluctuantes dans le temps, et les équations de couplages s'écrivent, en toute généralité (mais en laissant toutefois de côté le caractère vectoriel des grandeurs) :

$$F_{em}(t) = Bli(t)$$

$$U_{cem}(t) = Blv(t)$$

## E. Et si l'on remplace le barreau par une membrane ? Le haut-parleur électrodynamique à ruban

- En remplaçant le barreau par une membrane conductrice (en régime oscillant), le couplage mécano-acoustique prend de l'importance du fait de la grande surface de l'élément mécanique (voir le grain couplage mécano-acoustique) et on crée alors un haut-parleur.
- Ce type de haut-parleur (ou de microphone) porte le nom de haut-parleur à ruban. Son utilisation est néanmoins très peu répandue. En effet, le développement des transducteurs électrodynamiques a mené à la définition de géométries différentes permettant une transduction plus efficace (à compacité équivalente), plus robuste et moins coûteuse, mais reposant toutefois sur les mêmes principes. De nos jours, la grande majorité des transducteurs électrodynamiques sont basés sur une géométrie axisymétrique...



*Schéma de principe d'un transducteur électrodynamique à ruban*



# Géométrie axisymétrique

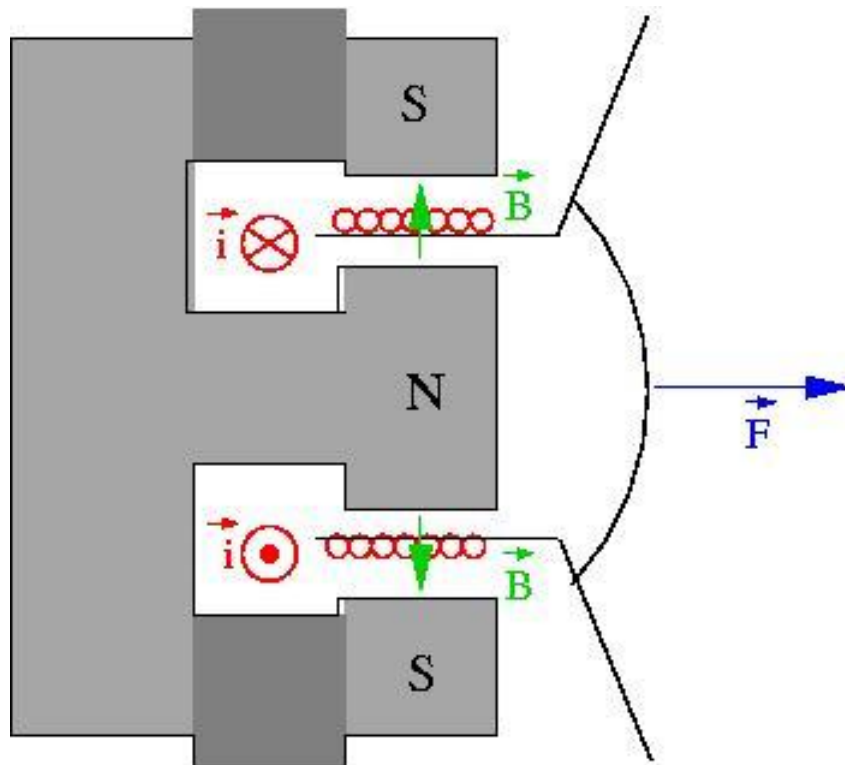


Comment faire un transducteur plus compact ?	13
Le haut-parleur électrodynamique à bobine mobile	14
Equations de couplage d'un transducteur électrodynamique	18

## A. Comment faire un transducteur plus compact ?

### *Champ radial et conducteur bobiné*

Un moyen d'augmenter l'efficacité de la transduction est d'augmenter la longueur  $\ell$  de conducteur baigné dans le champ magnétique  $\vec{B}$ . Pour maintenir une certaine compacité de l'objet, une solution consiste à enrouler le conducteur sous forme d'une bobine, ce qui impose de repenser la distribution spatiale du champ magnétique  $\vec{B}$ , qui doit alors présenter une structure radiale centrée sur l'axe de la bobine.

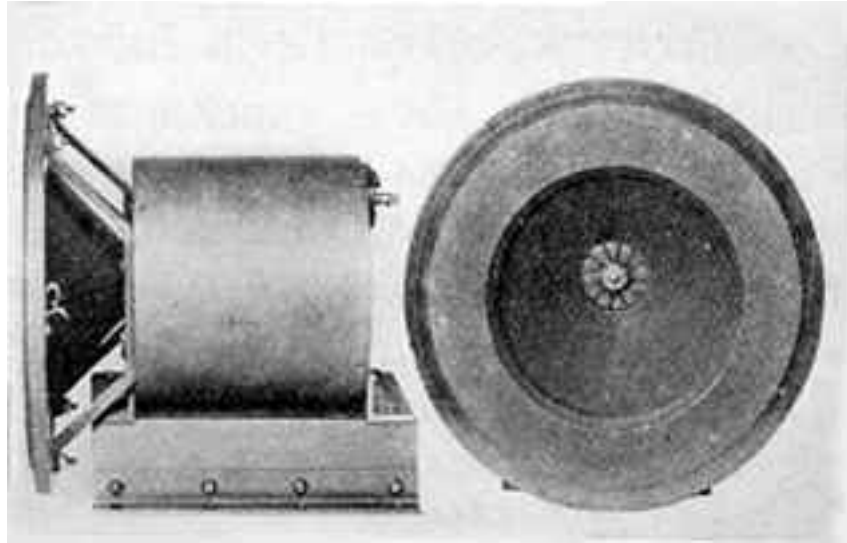


**Petit exercice** : Vérifier, à l'aide des trois doigts de la main droite, que la direction et le sens de la force de Laplace présentées sur la figure ci-dessus sont conformes à la loi  $\vec{F}_{em} = \ell \vec{i} \times \vec{B}$  (attention de ne pas vous tordre le poignet...)

## B. Le haut-parleur électrodynamique à bobine mobile

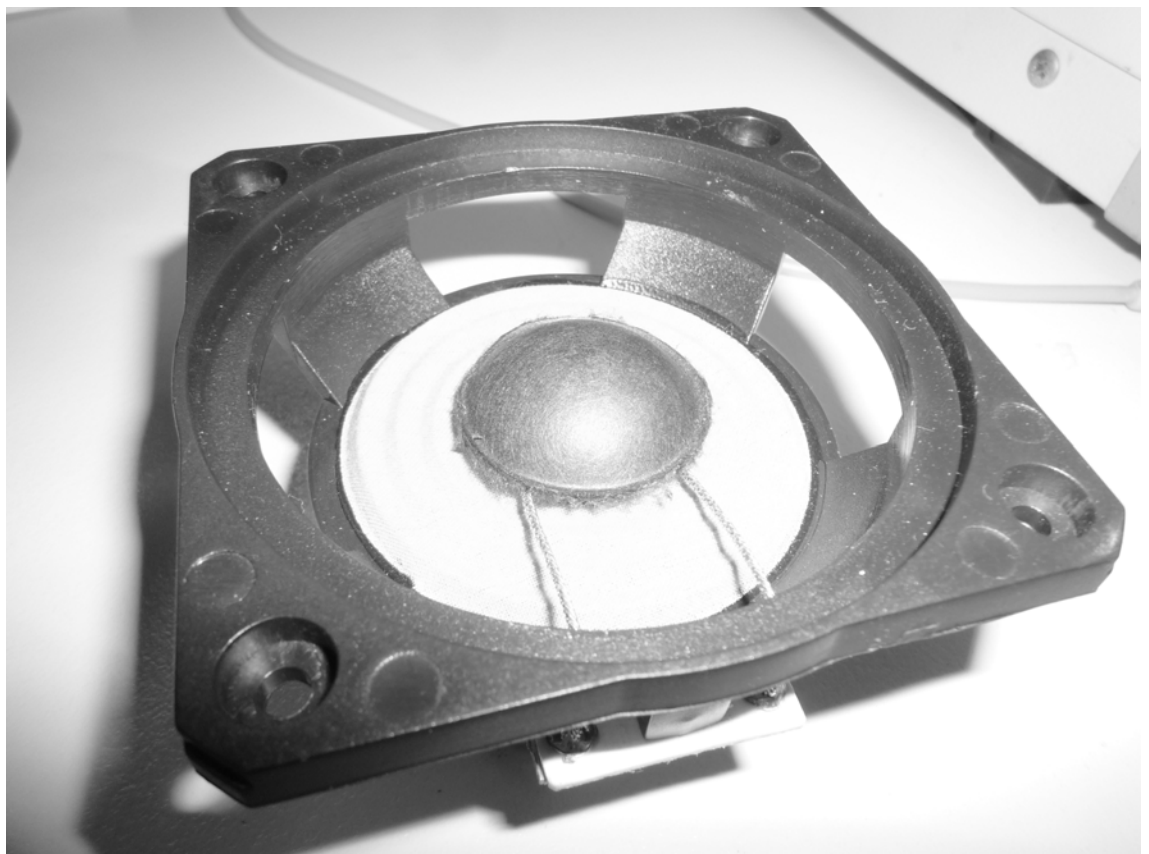
### 1. Structure d'un haut-parleur à bobine mobile

Dans son architecture conventionnelle, celle datant du brevet de Rice & Kellogg déposé en 1925, un haut-parleur électrodynamique à bobine mobile est constitué d'une bobine solidaire de la membrane et placée dans un champ magnétique radial.



*Photographie du haut-parleur électrodynamique développé et breveté par Chester W. Rice et Edward W. Kellogg (brevet No. 1,812,389)*

**Photographies d'un haut-parleur électrodynamique du commerce :**



*Haut-parleur démunie de sa membrane.*



*Haut-parleur démunie de son spider.*





*Bobine retirée de l'entrefer du moteur magnétique.*

## 2. Le haut-parleur en mode actionneur (1/2)

Sur les vidéos qui suivent, un haut-parleur électrodynamique du commerce est connecté à un amplificateur de puissance, lui-même connecté à un générateur basses-fréquences délivrant un signal sinusoïdal de fréquence variable. On peut noter d'une part que l'amplitude du mouvement de la membrane dépend de la fréquence d'excitation, et d'autre part (bien sûr) que le son émis n'est pas perceptible en basses fréquences (5 Hz et 20 Hz).

## 3. Le haut-parleur en mode actionneur (2/2)

**Remarque 1** : on peut noter, là encore, et notamment sur la vidéo montrant le haut-parleur excité à 5 Hz, de variations de l'indicateur de "niveau" (LED) de l'amplificateur de puissance. L'interprétation de ces variations est la même que pour la vidéo du barreau en mouvement oscillant.

**Remarque 2** : sur la vidéo montrant le haut-parleur excité à la fréquence de 20 Hz, il faut prendre garde au fait que la fréquence "visible" ne correspond pas à la fréquence réelle (20 Hz) du mouvement de la membrane du haut-parleur. Ainsi, en comptant le nombre d'allers-retours effectués par la membrane sur une période donnée, nous ne retrouverions pas une fréquence de 20 cycles par seconde. Ceci est dû au fait que la fréquence d'acquisition d'images de la caméra (ici un simple appareil photographique en mode vidéo) ne permet que de donner une image stroboscopique (sous-échantillonnée) du mouvement de la membrane.

#### 4. Le haut-parleur en mode capteur

Un haut-parleur électrodynamique est un transducteur réversible. Il peut donc être utilisé comme capteur (bien que son dimensionnement ne soit pas optimisé pour cette fonction). Sur la vidéo qui suit, le haut-parleur est simplement connecté à l'entrée d'un oscilloscope, et l'excitation est réalisée par un claquement de main à proximité de la membrane. On peut observer à l'oscilloscope la tension générée dans la bobine du haut-parleur. Un point intéressant concerne la présence d'une sinusoïde amortie après l'impulsion initiale, qui traduit le comportement mécanique de l'équipage mobile du haut-parleur (oscillation libre après excitation impulsionnelle).

### C. Equations de couplage d'un transducteur électrodynamique

Les équations de couplage associées au fonctionnement d'un transducteur électrodynamique sont directement déduites des lois de comportement énoncées précédemment (force électromotrice  $F = B\ell i$  et tension contreélectromotrice  $B\ell v$ ). Il convient toutefois de prendre en compte les caractéristiques électriques de la bobine (résistance et inductance) dans l'écriture des équations de couplage. On obtient donc le système d'équations suivant :

$$U - Z_e i = B\ell v$$

$$i = \frac{1}{B\ell} F$$

où

$$Z_e = R_e + jL_e\omega$$

représente l'impédance électrique de la bobine (résistance  $R_e$ , inductance  $L_e$ ),  $B\ell$  représente le "facteur de force" du transducteur ( $\ell$  représentant la longueur déroulée de la bobine, et  $B$  le champ magnétique moyen dans l'entrefer),  $U$  représente l'amplitude complexe de la tension appliquée aux bornes de la bobine (en l'absence d'un champ magnétique, la tension contreélectromotrice  $B\ell v$  s'annule et on retrouve la loi d'Ohm  $U = Z_e i$ ).

# Représentation électrique équivalente



Représentation via un transformateur

19

Représentation via un gyrateur

20

## A. Représentation via un transformateur

### Matrice de couplage

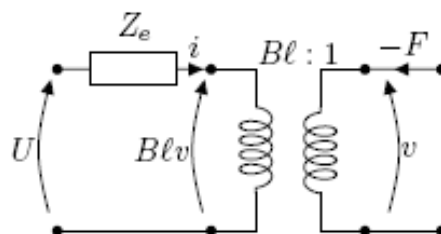
Afin de rendre compte par le formalisme des analogies électriques de la transduction électrodynamique, il convient de trouver un quadripôle électrique traduisant les équations de couplages. Si l'on réécrit ces équations sous la forme matricielle,

$$\begin{pmatrix} U - Z_e i \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B\ell & 0 \\ 0 & \frac{1}{B\ell} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ F \end{pmatrix}$$

il apparaît une matrice diagonale de couplage tout-à-fait analogue à celle mise en jeu dans la transduction mécano-acoustique, dont on a vu qu'elle pouvait être représentée par un transformateur électrique.

### Représentation par un transformateur

Une représentation électrique équivalente possible de la transduction électrodynamique est celle de la figure ci-dessous, mettant en jeu un transformateur dont le rapport de transformation vaut  $B\ell$ .

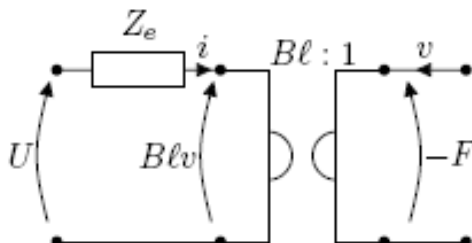


Cette représentation est cependant peu utilisée, car elle ne permet pas de conserver le même type d'analogie de part et d'autre du transformateur. En effet, le couple de variable  $F$  et  $v$  est ici représentée en analogie admittance (ou analogie inverse), la force  $F$  étant représentée par un courant, et la vitesse  $v$  par une

tension. Aussi, bien qu'il ne s'agisse là que d'un problème de représentation indépendant de la physique du problème, on préférera généralement faire usage d'un gyrateur pour représenter la transduction électrodynamique.

## B. Représentation via un gyrateur

La représentation du couplage par un gyrateur est schématisée sur la figure qui suit, où  $B\ell : 1$  représente le taux de gyration du quadripôle.



Ce gyrateur, dont la réalité physique est moins évidente que celle d'un transformateur, présente l'avantage de respecter la physique du problème en ce sens qu'à l'instar des grandeurs électriques, les grandeurs mécaniques sont représentées en analogie directe. Comme mentionnée précédemment, tout ceci n'est que convention de représentation et il convient avant tout de retenir les équations de couplages cachées derrière la représentation du gyrateur, auquel est associée une matrice antidiagonale comme suit :

$$\begin{pmatrix} U - Z_e i \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & B\ell \\ \frac{1}{B\ell} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ v \end{pmatrix}$$

# Bibliographie



IV

- M. Rossi, "Audio", chapitre 7, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007.

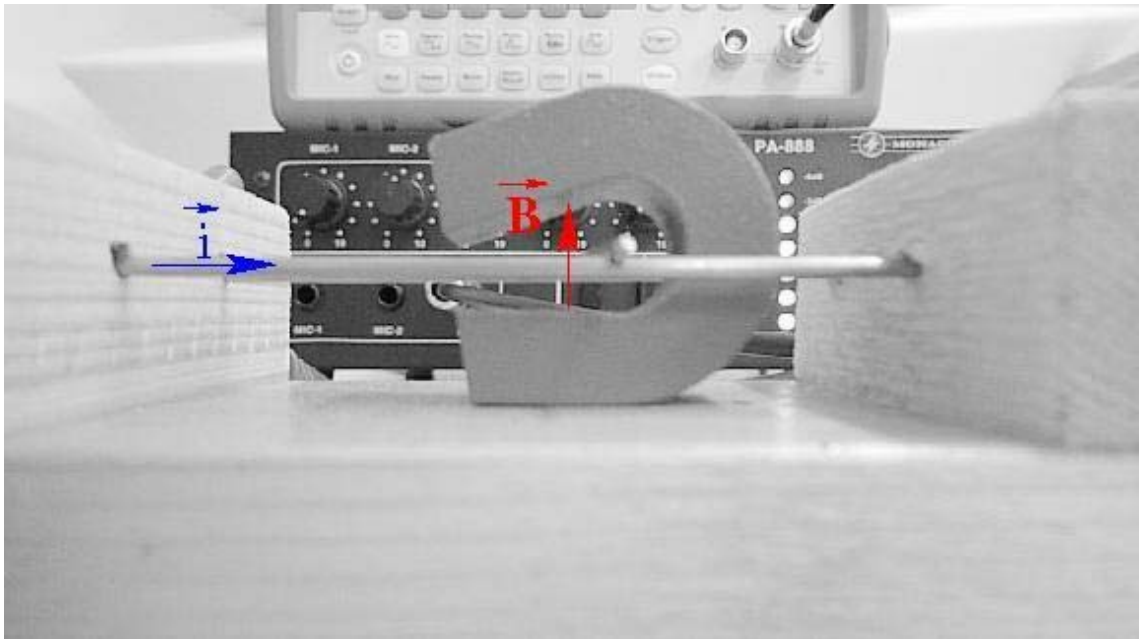


# Test de sortie : testez vos connaissances

V

## Exercice 1

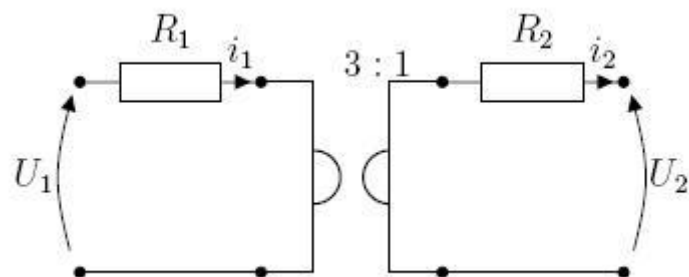
- Sur la figure qui suit, représenter la direction et le sens de la force électromotrice appliquée sur le barreau.



- On donne  $i = 1A$ ,  $B = 1N.m^{-1}.A^{-1}$  et la largeur de l'aimant est 1 cm. Quelle est l'amplitude de la force électromotrice  $F$  ?
- Le barreau en cuivre (masse volumique :  $8960 kg.m^{-3}$ ) a un diamètre de 2,5 mm et une longueur de 2 cm. A quelle accélération est soumis ce barreau sous l'effet de la force électromotrice sachant que le barreau est supposé glisser sans frottement sur les rails (tous les points du barreau possèdent la même vitesse) ?

*Exercice 2*

Soit le schéma électrique représenté ci-après. Donner les relations entre les tensions et courants de part et d'autre du quadripôle :

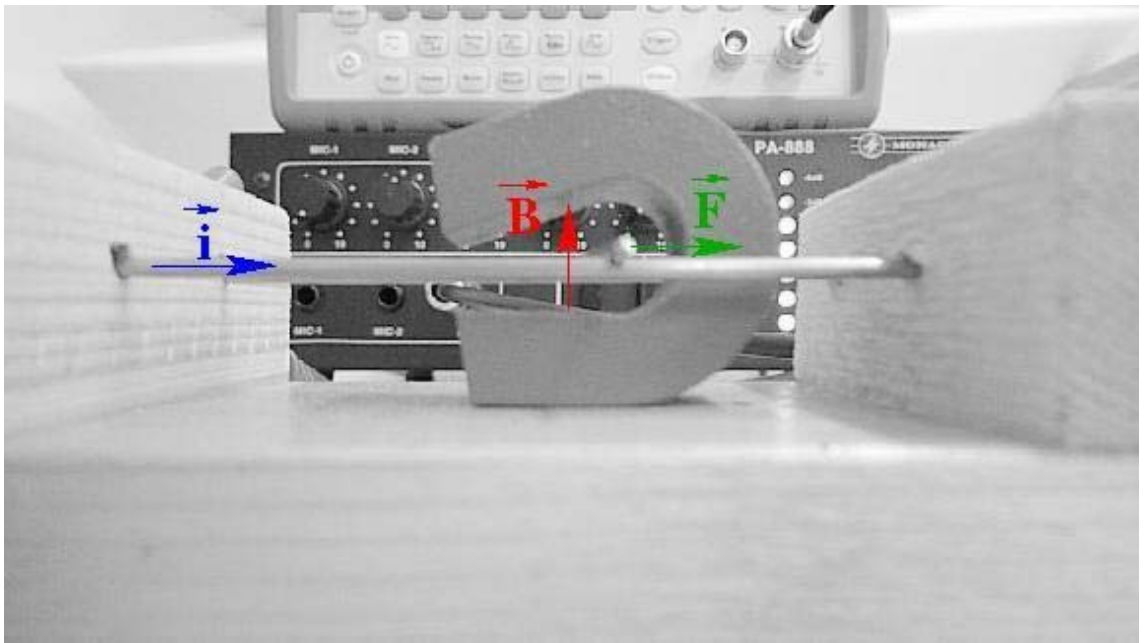




# Test de sortie (réponses)

VI

## Exercice 1



$$F = 10^{-2}N$$
$$a = 11.36m.s^{-2}$$

## Exercice 2

$$U_1 = 3i_2 + R_1i_1 \text{ et } i_1 = \frac{1}{3}(U_2 - R_2i_2)$$