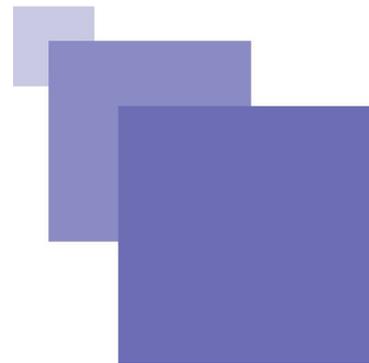




Couplage et transduction

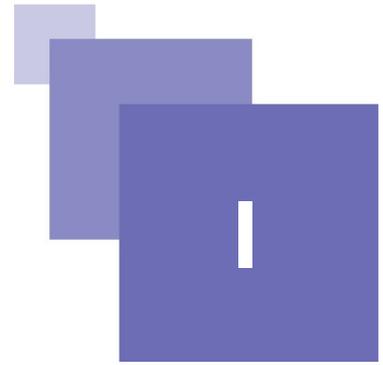
PIERRICK LOTTON ET MANUEL MELON

Table des matières



| | |
|---|-----------|
| I - Transduction électrostatique | 3 |
| A. Je teste mes connaissances..... | 3 |
| B. Généralités et rappels..... | 4 |
| 1. Rappels sur le condensateur..... | 4 |
| 2. Principe général de la transduction électrostatique..... | 6 |
| C. Équations de couplage électrostatique..... | 7 |
| 1. Objectif..... | 7 |
| 2. Actionneur : Couplage électro-mécanique..... | 7 |
| 3. Capteur : Couplage mécano-acoustique..... | 12 |
| 4. Représentation électrique équivalente du couplage électrostatique..... | 13 |
| D. J'évalue mes connaissances..... | 14 |
| E. Télécharger la synthèse du cours..... | 15 |
| Solution des exercices | 16 |

Transduction électrostatique



A. Je teste mes connaissances

Exercice 1 : Question 1

[Solution n°1 p 17]

La loi d'Ohm stipule que :

- La tension électrique aux bornes d'un dipôle passif résistif est directement proportionnelle au courant qui traverse ce dipôle
- La résistance d'un dipôle passif résistif est d'autant plus élevée que la tension aux bornes de ce dipôle est élevée.
- La résistance d'un dipôle passif résistif est proportionnelle au produit de la tension électrique aux bornes de ce dipôle et du courant électrique qui le traverse
- La tension électrique aux bornes d'un composant passif résistif est indépendante du courant qui traverse ce dipôle

Exercice 2 : Question 2

[Solution n°2 p 17]

La résistance R_{eq} équivalente à celle de deux dipôles résistifs, de résistance respectives R_1 et R_2 et câblés en parallèle, s'écrit

- $R_1 + R_2$
- $R_1 R_2$
- $R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$
- $R_1 / (R_2 - R_1)$

Exercice 3 : Question 3

[Solution n°3 p 17]

Soit un signal de tension électrique sinusoïdal $u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \phi)$, avec U_0 la valeur maximale de la tension, t le temps, ω_0 la pulsation et ϕ la phase. Que vaut la valeur efficace de cette tension électrique?

- U_0/ϕ
- $U_0/2$
- $U_0/\sqrt{2}$
- $U_0 \cos(\omega_0 t)$

Exercice 4 : Question 4

[Solution n°4 p 18]

En régime harmonique (ou régime sinusoïdal), comment s'exprime l'impédance d'une bobine électrique dont l'inductance vaut L ?

- L
- $jL\omega$
- $1/jL\omega$
- $L\omega$

Exercice 5 : Question 5

[Solution n°5 p 18]

Un circuit électrique composé d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine électrique en série est :

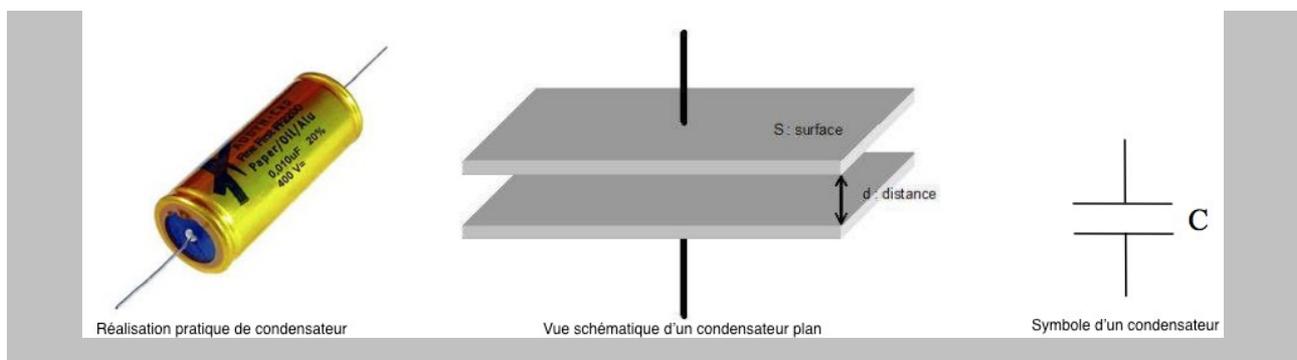
- un circuit actif
- un circuit sans pertes
- un circuit fonctionnant avec une période de 24 heures
- un circuit résonant

B. Généralités et rappels

1. Rappels sur le condensateur

a) Structure du condensateur plan

Un condensateur plan est constitué de deux électrodes fixes de surface S séparées par un isolant électrique (encore appelé diélectrique) d'épaisseur d_0 .



b) Circuit électrique de charge d'un condensateur

Le condensateur est connecté à une source de tension électrique continue générant une différence de potentiel U_0 . La résistance R_c apparaissant sur le schéma représente la résistance totale du circuit (résistance interne de la source de tension, résistance des connexions électriques et, le cas échéant, résistance de charge insérée dans le circuit).

anim3-visual.swf

c) Charge d'un condensateur

anim3.swf

d) Capacité d'un condensateur

Le rapport entre la quantité de charge Q accumulée sur l'électrode positive et la différence de potentiel U_0 entre les deux électrodes du condensateur s'appelle la capacité électrique C_0 du condensateur :

$$C_0 = \frac{Q}{U_0}$$

La capacité est une grandeur toujours positive et exprimée en Farad.

Plus la capacité d'un condensateur est grande, plus la quantité de charges Q emmagasinée sur l'électrode positive de ce condensateur est importante pour une tension de polarisation U_0 donnée.

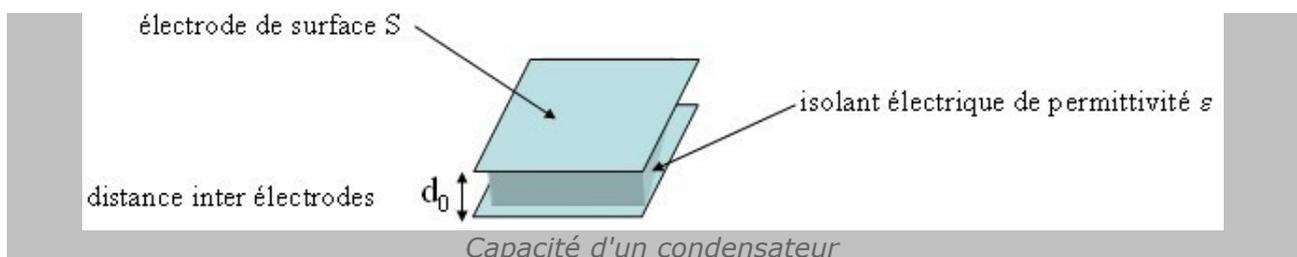
Remarque

Plus la capacité d'un condensateur est grande, plus la tension électrique obtenue à ses bornes est petite pour une quantité de charges accumulées données.

e) Expression de la capacité

La capacité d'un condensateur dépend des caractéristiques géométriques du condensateur (surface des électrodes et distance inter-électrodes) ainsi que des propriétés de l'isolant électrique caractérisé par sa constante diélectrique (ou permittivité) ε , suivant la loi :

$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{d_0}$$



Remarque

On note que la capacité d'un condensateur varie lorsque la distance inter électrode d_0 varie. C'est cet effet qui est mis à profit dans la transduction électrostatique.

f) Force électrostatique

Les deux électrodes d'un condensateur chargé portent chacune une quantité égale de charges électriques de signes opposés. Elles sont alors soumises à une force électrostatique F_e et s'attirent mutuellement.

La force électrostatique F_e qui s'exerce entre les deux électrodes du condensateur plan s'écrit :

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

Complément : Pour aller plus loin

http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_S_M07_G01_01/co/NLP_S_M07_G01_01_web.html¹

2. Principe général de la transduction électrostatique

a) Description d'un transducteur électrostatique

La transduction électrostatique est classiquement mise en œuvre grâce à l'utilisation d'un **condensateur à capacité variable**.

Dans sa version la plus simple, ce condensateur est constitué de deux électrodes planes. Une de ces électrodes est mobile et peut s'approcher ou s'éloigner de la seconde électrode qui, elle, reste fixe.

Exemple

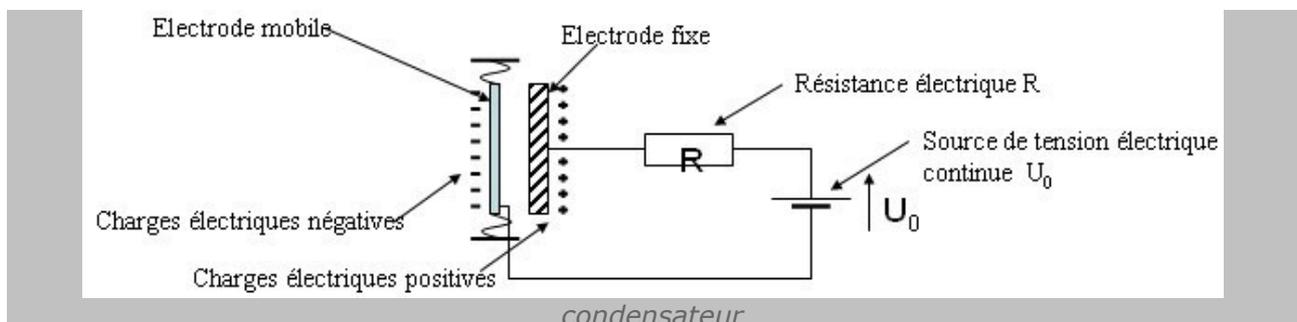


Cette photo représente deux capsules microphoniques électrostatiques. Ici, la membrane du microphone constitue l'électrode mobile du transducteur électrostatique (visible sur la capsule de gauche). Une électrode arrière perforée est visible sur la capsule de droite sont la

membrane a été ôtée. Cette électrode arrière constitue l'électrode fixe du transducteur électrostatique.

b) Polarisation d'un transducteur électrostatique

Une fois ce condensateur inséré dans un circuit électrique, ses deux électrodes sont porteuses de charges électriques de signes opposés. Il en résulte, d'une part, l'existence d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes et, d'autre part, l'existence d'une force électrostatique qui attire les deux électrodes l'une vers l'autre.



1 - http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_S_M07_G01_01/co/NLP_S_M07_G01_01_web.html

c) Principe du capteur électrostatique

recomposition.swf

d) Principe de l'actionneur électrostatique

Animation2.swf

C. Équations de couplage électrostatique

1. Objectif

Cette partie est dédiée à l'établissement des équations de couplage qui décrivent la transduction électrostatique, dans le cas d'un **actionneur** (cas où une excitation électrique met en mouvement l'électrode mobile du transducteur) et dans le cas d'un **capteur** (cas où un mouvement de l'électrode mobile génère un signal électrique).

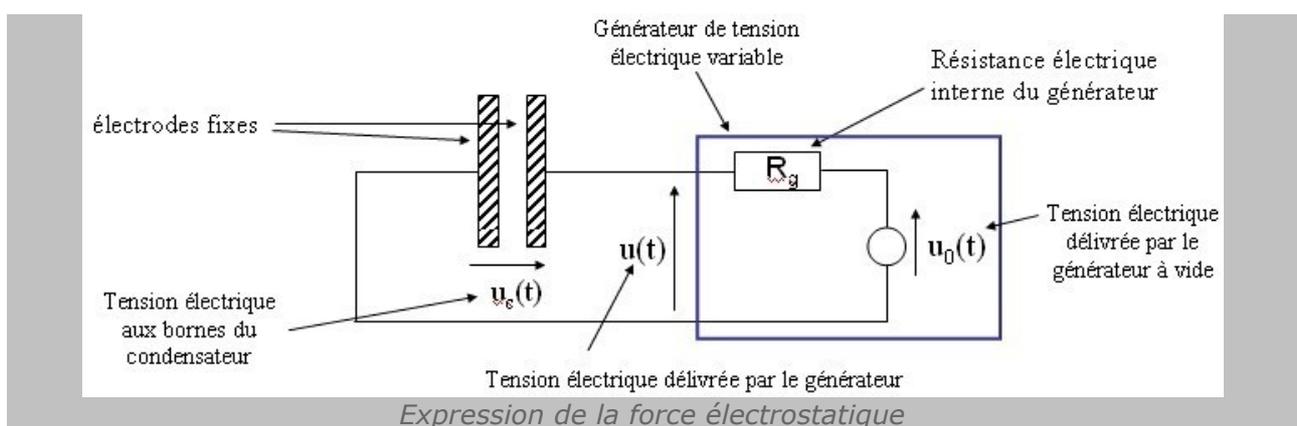
2. Actionneur : Couplage électro-mécanique

a) Force électrostatique

i Force électrostatique s'exerçant entre deux électrodes

Pour introduire l'équation de couplage électro-mécanique, les deux électrodes du transducteur électrostatique sont considérées fixes dans un premier temps. Le transducteur électrostatique est alors un simple condensateur. Ce condensateur est connecté à un générateur de tension variable, de résistance interne R_g et de tension à vide $u_0(t)$.

La tension électrique variable issue du générateur provoque une variation de l'état électrique du système qui se traduit par une variation de la quantité de charges emmagasinée sur les électrodes et, donc, par une variation de la force électrostatique qui s'exerce entre les deux électrodes. Ainsi, les deux électrodes sont plus ou moins attirées l'une vers l'autre.



ii Expression de la force électrostatique

La quantité de charges variable emmagasinée sur les électrodes est notée $q(t) = C_0 u_c(t)$.
La force électrostatique qui en résulte s'écrit alors

$$F_e(t) = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C_0}$$

Cette expression traduit bien un **couplage électro-mécanique**, puisqu'un signal électrique variable génère une force qui est susceptible de mettre en mouvement l'électrode mobile d'un transducteur électrostatique.

Cette transduction électro-mécanique est **intrinsèquement non linéaire** car la force résultante est proportionnelle au carré de l'excitation électrique : quel que soit le signe de la quantité de charges $q(t)$, la force électrostatique se traduit toujours par une attraction mutuelle des électrodes.

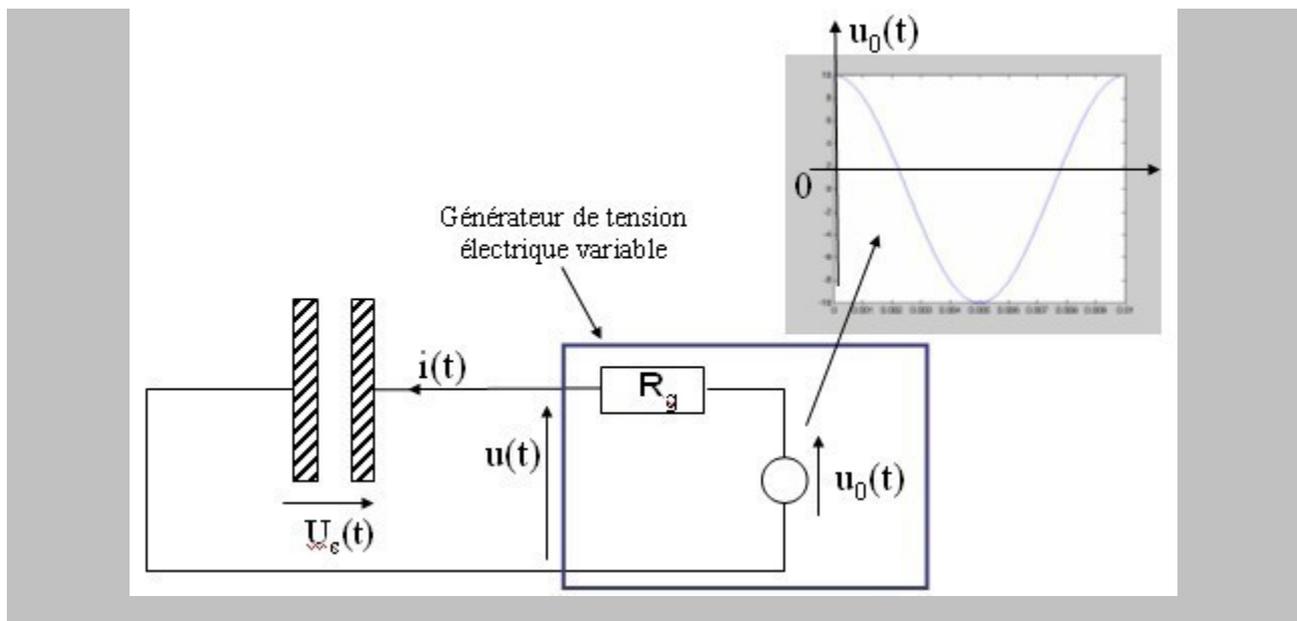
b) Comportement non linéaire du couplage électro-mécanique

i Tension d'excitation

Considérons la tension électrique excitatrice sinusoïdale $u_0(t)$ de fréquence f_0 délivrée par le générateur à vide,

$$u_0(t) = U_M \cos$$

où U_M est la valeur crête de cette tension électrique et où $\omega_0 = 2\pi f_0$ est la pulsation correspondant à la fréquence f_0 .

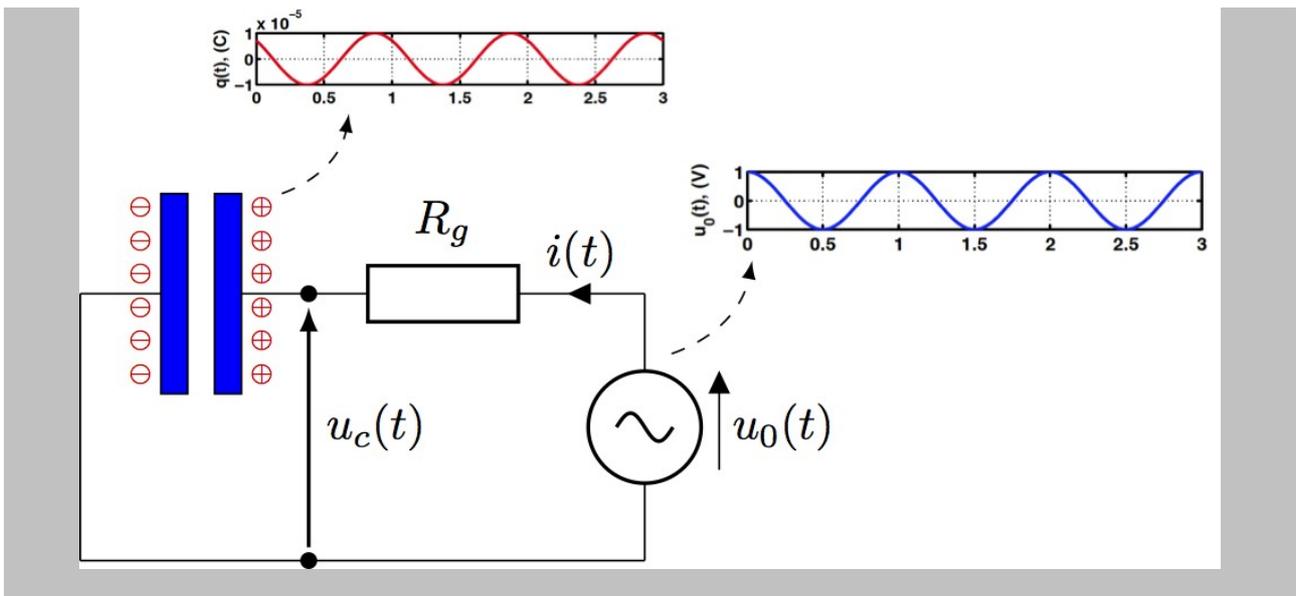


ii Charge électrique

En régime établi, la charge électrique $q(t)$ du condensateur varie elle aussi de manière sinusoïdale à la fréquence f_0 suivant la loi :

$$q(t) = C_0 U_M \cos$$

où $\varphi_0 = \text{Arctg}(R_g C_0 \omega_0)$ représente le déphasage entre la charge du condensateur $q(t)$ et la tension excitatrice $u_0(t)$.



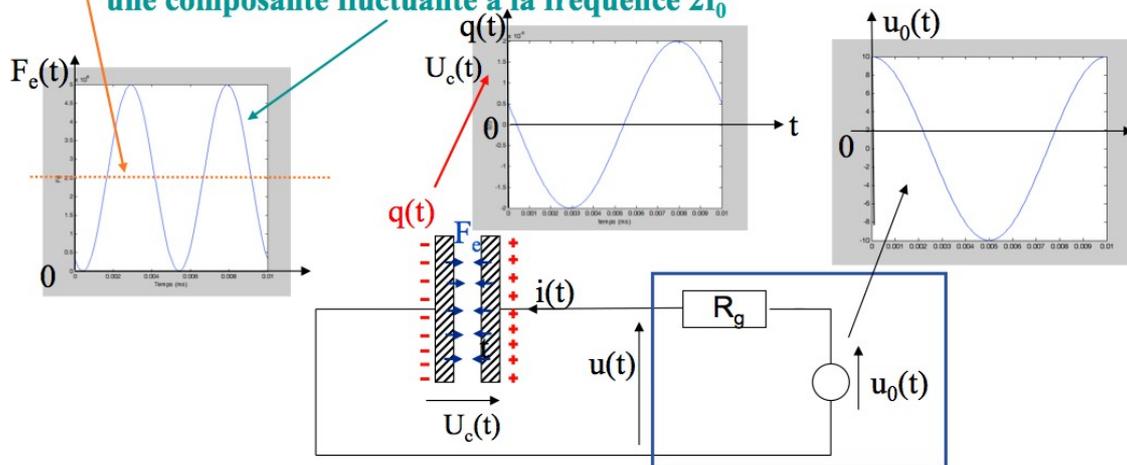
iii Force électrostatique

La force électrostatique F_e qui s'exerce sur les deux électrodes s'écrit alors

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{q^2(t)}{C_0 d_0} = \frac{1}{2} \frac{U_M^2}{d_0} \cos^2(\omega_0 t + \phi_0) = \frac{1}{4} \frac{U_M^2}{d_0} + \frac{1}{4} \frac{U_M^2}{d_0} \cos[2(\omega_0 t + \phi_0)]$$

Cette force comprend **une composante continue**

une composante fluctuante à la fréquence $2f_0$

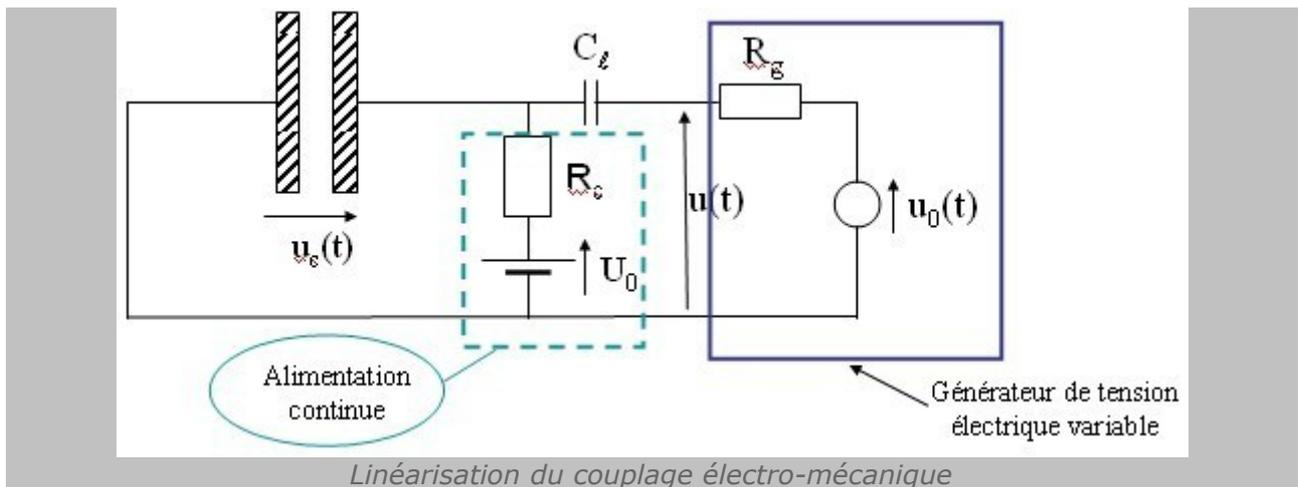


Dans le cas d'un actionneur électrostatique, la force électrostatique est responsable du déplacement de l'électrode mobile, elle-même responsable du signal acoustique émis. Ainsi, une variation de la charge électrique à la fréquence f_0 entraîne un signal acoustique à la fréquence $2 f_0$: le système est **non linéaire**.

c) Linéarisation du couplage électro-mécanique

i Linéarisation par polarisation

Il convient de linéariser le couplage électro-mécanique afin d'éviter son comportement non linéaire. Une solution classiquement mise en œuvre est l'utilisation d'une tension continue de polarisation.



En régime établi, la tension $u_c(t) = U_0 + u(t)$ aux bornes du condensateur comporte ainsi une composante continue U_0 et une composante alternative $u(t)$.

La charge $q_c(t) = C_0 u_c(t)$ du condensateur comporte également une composante continue et une composante alternative : $q_c(t) = C_0 U_0 + C_0 u(t) = Q_0 + q(t)$

ii Force électrostatique linéarisée

La force électrostatique qui s'exerce entre les électrodes en présence d'une tension de polarisation U_0 s'écrit alors :

$$F_e(t) = \frac{1}{2} \frac{q_c^2(t)}{C_0 d_0} = \frac{1}{2} \frac{(C_0 U_0 + C_0 u(t))^2}{C_0 d_0}$$

Soit encore $F_e(t) = \frac{1}{2} \frac{C_0 U_0^2}{d_0} + \frac{1}{2} \frac{C_0}{d_0} u^2(t) + \frac{U_0 C_0}{d_0} u(t)$

En pratique, la tension de polarisation est réglée de manière à ce que $U_0 \gg u(t)$

Dans ces conditions $\frac{1}{2} \frac{C_0}{d_0} u^2(t) \ll \frac{U_0 C_0}{d_0} u(t)$, et la force électrostatique devient

$$F_e(t) \approx \frac{1}{2} \frac{C_0 U_0^2}{d_0} + \frac{U_0 C_0}{d_0} u(t)$$

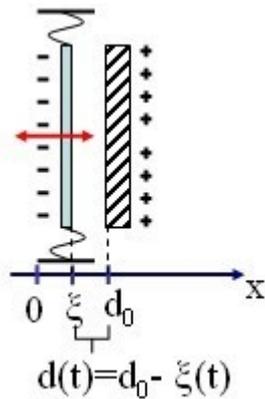


Linéarisation du couplage électro-mécanique

d) Prise en compte du déplacement de la membrane

i Effet du déplacement de la membrane sur la capacité

Jusqu'à présent, les deux électrodes du condensateur ont été considérées comme fixes. Mais dans les faits, l'électrode mobile subit un déplacement $\xi(t)$ du à la force électrostatique qui s'exerce sur elle. Il convient de prendre ce déplacement en compte.



A cause de ce déplacement $\xi(t)$, la distance inter-électrode $d(t)$ varie en fonction temps et s'écrit $d(t) = d_0 - \xi(t)$

Puisque la distance inter-électrode varie en fonction du temps, la capacité $C(t)$ du condensateur varie elle aussi en fonction du temps, et s'écrit :

$$C(t) = \frac{\epsilon S}{d(t)} = \frac{\epsilon S}{d_0 - \xi(t)} = \frac{\epsilon S}{d_0(1 - \frac{\xi(t)}{d_0})}$$

Image 1 Prise en compte du déplacement de la membrane

En général, le déplacement $\xi(t)$ est très petit devant la distance au repos d_0 , $\xi(t) \ll d_0$. Ainsi, la capacité $C(t)$ peut s'écrire :

$$C(t) \approx \frac{\epsilon S}{d_0} \left(1 + \frac{\xi(t)}{d_0}\right)$$

ii Effet du déplacement de la membrane sur la force électrostatique

La force électrostatique qui s'exerce entre les électrodes s'écrit alors

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{q_c^2(t)}{C(t)d(t)} = \frac{1}{2} \frac{C(t)U_c^2(t)}{d(t)}$$

où $u_c(t) = U_0 + u(t)$, avec U_0 la tension de polarisation et $u(t)$ la tension variable, avec $u(t) \ll U_0$

et où $d(t) = d_0 - \xi(t)$ avec $\xi(t) \ll d_0$. Dans ces conditions, la force F_e peut encore s'écrire :

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S (U_0 + u(t))^2}{(d_0)^2 \left(1 - \frac{\xi(t)}{d_0}\right)^2} \approx \frac{1}{2} \frac{\epsilon S (U_0 + u(t))^2}{d_0} \left(1 + \frac{2\xi(t)}{d_0}\right)$$

soit encore, après développement et en ne conservant que le 1^{er} ordre des variables u et ξ ($u_2(t) \ll u(t)$, $\xi_2 \ll \xi$)

$$F_e(t) \approx \frac{1}{2} \frac{C_0 U_0^2}{d_0} + \frac{C_0}{d_0} U_0 u(t) + \frac{C_0 U_0^2}{d_0^2} \xi(t)$$

iii Première équation de couplage électrostatique

$$F_e(t) \approx \frac{C_0 U_0^2}{2d_0} + \frac{C_0 U_0}{d_0} u(t) + \frac{C_0 U_0^2}{d_0^2} \xi(t)$$

Composante continue due à la polarisation

Composante alternative linéarisée

prise en compte du déplacement de la membrane

En ne conservant que la composante alternative, et en écrivant que la vitesse v de la membrane est la dérivée temporelle du déplacement ξ , $v = d\xi/dt$, l'équation de couplage électro-mécanique s'écrit en régime harmonique ($d/dt = j\omega$)

$$F_e \approx \frac{1}{2} \frac{C_0 U_0^2}{d_0} u + \frac{1}{j\omega} \left(\frac{k_b^2}{C_0} v \right)$$

soit encore $F_e \approx k_b u + \frac{k_b^2}{j\omega C_0} v$

où $k_b = C_0 U_0 / d_0$ est le **coefficient de couplage électrostatique**

3. Capteur : Couplage mécano-acoustique

a) Expression de la capacité variable du transducteur

Lorsqu'une onde acoustique met en vibration l'électrode mobile du transducteur électrostatique, l'écartement $d(t)$ entre les deux électrodes varie : $d(t) = d_0 - \xi(t)$, où ξ est le déplacement de l'électrode mobile. Il en résulte une variation de la capacité électrique du transducteur qui se traduit par une variation de l'état électrique du circuit dans lequel il est inséré.

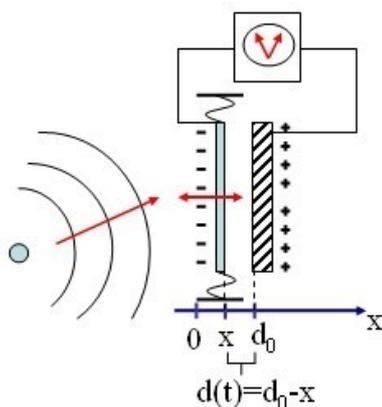


Image 2 actionneur : couplage électro-mécanique

Le déplacement ξ entraîne une variation de la capacité du transducteur suivant la loi

$$C(t) = \frac{\epsilon S}{d(t)} = \frac{\epsilon S}{d_0 - \xi(t)} = \frac{\epsilon S}{d_0 \left(1 - \frac{\xi(t)}{d_0}\right)}$$

En général, le déplacement $\xi(t)$ est très petit devant la distance au repos d_0 , $\xi(t) \ll d_0$. Ainsi, la

capacité $C(t)$ peut s'écrire :

$$C(t) \approx \frac{\epsilon S}{d_0} \left(1 + \frac{\xi(t)}{d_0}\right)$$

b) Deuxième équation de couplage électrostatique

La tension $u_c(t)$ aux bornes du transducteur électrostatique est la somme d'une tension de polarisation statique U_0 et d'une composante variable $u(t)$: $u_c(t) = U_0 + u(t)$.

La charge électrique $q_c(t) = C(t)u_c(t)$ du transducteur électrostatique s'écrit alors,

$$q_c(t) = \frac{\epsilon S}{d_0} U_0 + \frac{\epsilon S}{d_0} u(t)$$

En négligeant les termes du second ordre, cette relation s'écrit

$$q_c(t) \approx C_0 U_0 + C_0 u(t) + \frac{\epsilon S}{d_0^2} U_0 \xi$$

En ne conservant que la composante alternative de cette équation, et en remarquant que l'intensité i du courant électrique est la dérivée temporelle de la charge Q , $i = dQ/dt$ et que la

vitesse v de la membrane est la dérivée temporelle du déplacement $v = d\xi/dt$, la dérivée temporelle de l'équation de couplage mécano-électrique s'écrit

$$i(t) \approx C_0 \frac{d}{dt} u(t) + \frac{\epsilon S}{d_0^2}$$

En régime harmonique ($d/dt = j\omega$), cette équation s'écrit

$$i \approx j\omega C_0 u + k_b v$$

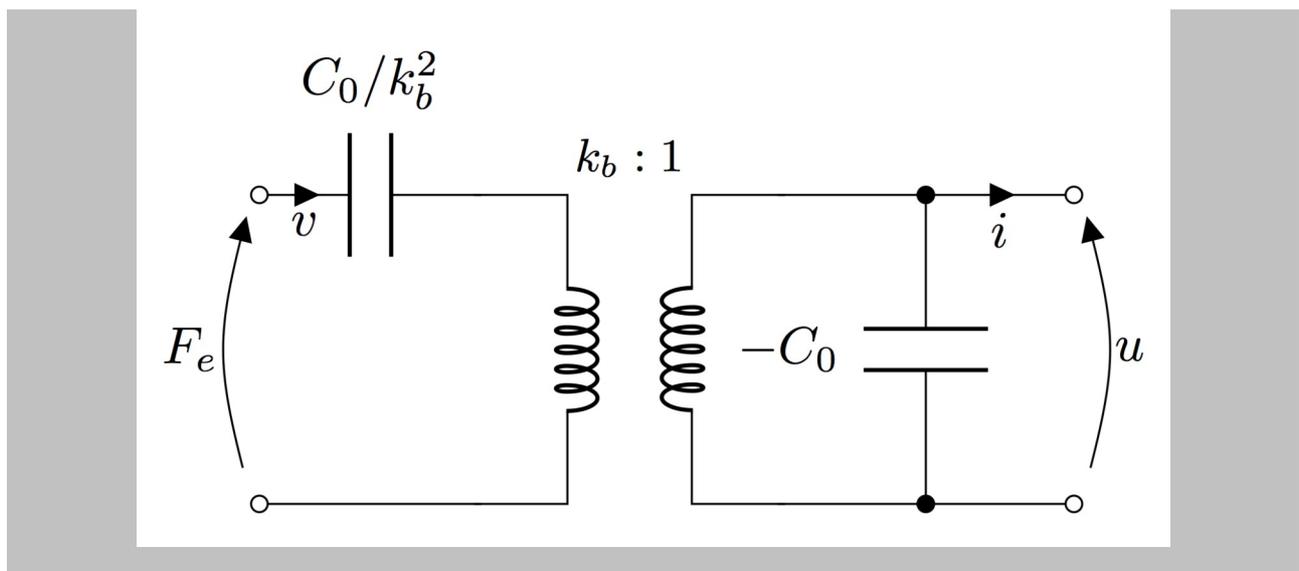
où k_b est le **coefficient de couplage électrostatique**.

4. Représentation électrique équivalente du couplage électrostatique

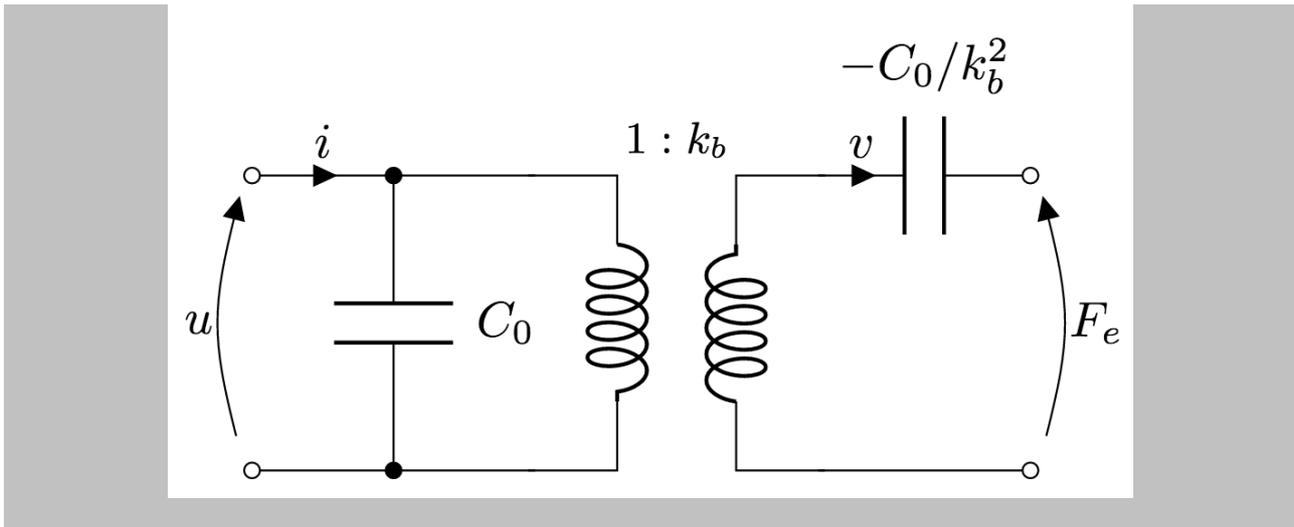
En résumé, les deux équations de couplage qui décrivent la transduction électrostatique sont les suivantes :

$$\begin{cases} F_e = k_b u + \frac{k_b^2}{j\omega C_0} v \\ i = j\omega C_0 u + k_b v \end{cases}$$

Ces équations de couplage peuvent se mettre sous la forme du circuit électrique équivalent suivant pour une utilisation de type capteur :



ou sous la forme suivante pour une utilisation de type actionneur :



D. J'évalue mes connaissances

Exercice 1

[Solution n°6 p 18]

La capacité d'un condensateur plan est d'autant plus grande que :

- la permittivité du diélectrique est faible
- la surface des électrodes est grande
- la susceptibilité magnétique du diélectrique est grande
- la distance inter-électrodes est faible

Exercice 2

[Solution n°7 p 18]

La tension électrique de polarisation d'un actionneur électrostatique à tendance à

- Augmenter la distance inter-électrode
- Linéariser le comportement de l'actionneur
- Permettre la génération d'un signal acoustique dont la fréquence est le double de celle du signal d'excitation électrique
- A modifier la constante diélectrique du milieu

Exercice 3

[Solution n°8 p 18]

Mettre un capteur électrostatique en présence d'une onde acoustique a pour effet :

- une variation de la distance inter-électrodes
- une variation de la capacité électrique du transducteur
- la génération d'une tension électrique continue aux bornes du transducteur
- l'amplification du courant électrique traversant le transducteur

Exercice 4

[Solution n°9 p 19]

La transduction électrostatique

- Peut être utilisée pour fabriquer des haut-parleurs
- Peut être utilisée pour fabriquer des microphones
- Est intrinsèquement linéaire
- Peut être facilement miniaturisée

Exercice 5

[Solution n°10 p 19]

La capacité d'un condensateur

- S'exprime en Farad
- Est proportionnelle à la distance entre les armatures
- Est proportionnelle à la surface des armatures
- Est négative lorsqu'un excès d'électrons est stocké par les armatures.

Exercice 6

[Solution n°11 p 19]

La tension aux bornes d'un condensateur

- Est toujours positive
- Est proportionnelle à la charge électrique emmagasinée
- Est inversement proportionnelle à la charge électrique emmagasinée
- Est toujours proportionnelle au courant électrique circulant dans le condensateur

Exercice 7

[Solution n°12 p 19]

En négligeant les termes du second ordre, l'expression de la charge électrique aux bornes d'un capteur électrostatique polarisé, :

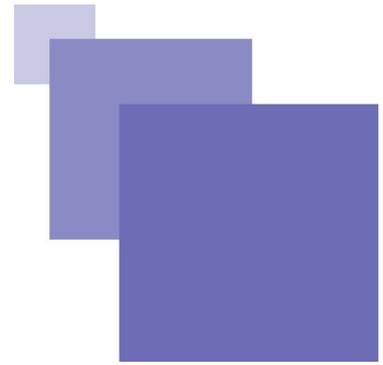
- | | |
|--------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> | possède un terme indépendant du temps |
| <input type="checkbox"/> | possède un terme proportionnel au déplacement de l'électrode mobile |
| <input type="checkbox"/> | est inversement proportionnel à la tension de polarisation |
| <input type="checkbox"/> | possède un terme inversement proportionnel au carré de la distance |

E. Télécharger la synthèse du cours

Cliquez ici pour télécharger la synthèse du cours.

(Transduction électrostatique version pdf).pdf
Document 1

Solution des exercices



> Solution n°1 (exercice p. 3)

- La tension électrique aux bornes d'un dipôle passif résistif est directement proportionnelle au courant qui traverse ce dipôle
- La résistance d'un dipôle passif résistif est d'autant plus élevée que la tension aux bornes de ce dipôle est élevée.
- La résistance d'un dipôle passif résistif est proportionnelle au produit de la tension électrique aux bornes de ce dipôle et du courant électrique qui le traverse
- La tension électrique aux bornes d'un composant passif résistif est indépendante du courant qui traverse ce dipôle

La loi d'Ohm s'écrit $U = R.I$ avec R la résistance du dipôle résistif, U la tension électrique aux bornes de ce dipôle et I l'intensité du courant traversant ce dipôle.

> Solution n°2 (exercice p. 3)

- $R_1 + R_2$
- $R_1 R_2$
- $R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$
- $R_1 / (R_2 - R_1)$

> Solution n°3 (exercice p. 3)

- U_0 / ϕ
- $U_0 / 2$
- $U_0 / \sqrt{2}$
- $U_0 \cos(\omega_0 t)$

La valeur efficace d'une grandeur variable périodique $x(t)$ s'écrit $x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$, où T est la période. Appliquée au signal de tension sinusoïdal de la question, cette formule conduit, après un calcul rapide, à la réponse c

> Solution n°4 (exercice p. 4)

- L
- $jL\omega$
- $1/jL\omega$
- $L\omega$

L'impédance électrique est une grandeur complexe qui possède un module et une phase. Le module de l'impédance d'une bobine électrique s'écrit $L\omega$ et l'information sur la phase est donnée par le nombre imaginaire pur j (correspondant à une phase de $\pi/2$)

> Solution n°5 (exercice p. 4)

- un circuit actif
- un circuit sans pertes
- un circuit fonctionnant avec une période de 24 heures
- un circuit résonant

Ce circuit est composé d'éléments passifs (il n'est donc pas actif) et possède une résistance responsable de pertes électriques. Son impédance varie avec la fréquence. Le module de cette impédance passe par un minimum. A cette fréquence correspond une résonance de courant dans le circuit. Quand au circuit des 24 heures...

> Solution n°6 (exercice p. 14)

- la permittivité du diélectrique est faible
- la surface des électrodes est grande
- la susceptibilité magnétique du diélectrique est grande
- la distance inter-électrodes est faible

> Solution n°7 (exercice p. 14)

- Augmenter la distance inter-électrode
- Linéariser le comportement de l'actionneur
- Permettre la génération d'un signal acoustique dont la fréquence est le double de celle du signal d'excitation électrique
- A modifier la constante diélectrique du milieu

> Solution n°8 (exercice p. 15)

- une variation de la distance inter-électrodes
- une variation de la capacité électrique du transducteur
- la génération d'une tension électrique continue aux bornes du transducteur
- l'amplification du courant électrique traversant le transducteur

> Solution n°9 (exercice p. 15)

| | |
|-------------------------------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Peut être utilisée pour fabriquer des haut-parleurs |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Peut être utilisée pour fabriquer des microphones |
| <input type="checkbox"/> | Est intrinsèquement linéaire |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Peut être facilement miniaturisée |

> Solution n°10 (exercice p. 15)

| | |
|-------------------------------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | S'exprime en Farad |
| <input type="checkbox"/> | Est proportionnelle à la distance entre les armatures |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Est proportionnelle à la surface des armatures |
| <input type="checkbox"/> | Est négative lorsqu'un excès d'électrons est stocké par les armatures. |

> Solution n°11 (exercice p. 15)

| | |
|----------------------------------|---|
| <input type="radio"/> | Est toujours positive |
| <input checked="" type="radio"/> | Est proportionnelle à la charge électrique emmagasinée |
| <input type="radio"/> | Est inversement proportionnelle à la charge électrique emmagasinée |
| <input type="radio"/> | Est toujours proportionnelle au courant électrique circulant dans le condensateur |

> Solution n°12 (exercice p. 16)

| | |
|-------------------------------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> | possède un terme indépendant du temps |
| <input checked="" type="checkbox"/> | possède un terme proportionnel au déplacement de l'électrode mobile |
| <input type="checkbox"/> | est inversement proportionnel à la tension de polarisation |
| <input checked="" type="checkbox"/> | possède un terme inversement proportionnel au carré de la distance |