

MP19 – EFFETS CAPACITIFS

2 février 2017

*Ne sous-estimez jamais la capacité lacrymogène
d'un oignon.*

Balkis DOHNI & Amélie CHARDAC

LOI DE MURPHY

Commentaires du jury

Bibliographie

- ⚡ *Quaranta IV*, p.122 → Définition, condensateur d'Aepinus et diélectrique
- ⚡ *Expériences d'électronique*, Duffait, p.95 et p.187 → Multivibrateur astable
- ⚡ *Notice ENS Lyon*, P 68.14 → Conditionnement du détecteur de niveau d'eau

Expériences

- ☞ Condensateur d'Aepinus (air + diélectrique)
- ☞ Multivibrateur astable et application au câble coaxial
- ☞ Capteur capacimétrique : détecteur de niveau d'eau

Table des matières

1	Caractérisation d'un condensateur et paramètres d'influence	2
1.1	Etude d'un condensateur modèle : le condensateur d'Aepinus	2
1.2	Condensateur à vide	3
1.3	Condensateur avec un diélectrique	4
1.4	Discussion sur l'influence des fils	5
2	Mesure d'une capacité	6
2.1	Le multivibrateur astable : étalonnage	6
2.2	Mesure d'une capacité linéique : le câble coaxial	8
3	Application des effets capacitifs : le détecteur de niveau d'eau	9
3.1	Etalonnage	9
3.2	Détection d'un niveau d'eau par allumage d'une LED	9

Introduction

Un condensateur est un composant électronique constitué de deux armatures conductrices, séparées par un milieu isolant polarisable (diélectrique). Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre ces armatures, elles sont le siège d'une accumulation de charges. Les armatures portent alors une charge Q , de signes opposés. La tension aux bornes du condensateur est proportionnelle à la charge Q et l'on appelle capacité C (en F) le coefficient de proportionnalité : $Q = CU$.

On appelle effets capacitifs, des phénomènes qui sont dus à la présence d'un condensateur et quantifiable par la mesure d'une capacité.

On retrouve des effets capacitifs, parasites ou non, dans différentes situations :

- Filtrage de signaux périodiques (RC...)
- Séparation d'un courant alternatif du courant continu (ce dernier étant bloqué par le condensateur)
- Accumulation de charges sur deux lignes parallèles

Les objectifs pour ce montage sont :

- Caractériser les paramètres d'influence sur la capacité d'un condensateur.
- Montrer comment on peut quantifier des effets capacitifs
- Montrer des applications aux effets capacitifs

1 Caractérisation d'un condensateur et paramètres d'influence

Dans un premier temps, on se propose de voir comment on peut caractériser la capacité d'un condensateur, à partir d'un modèle simple.

1.1 Etude d'un condensateur modèle : le condensateur d'Aepinus

Le conducteur modèle est composé de deux plaques métalliques conductrices, séparées d'une certaine distance e par un isolant diélectrique. Les plaques sont alors chargées, de signe opposé, d'une charge Q . On parle alors de condensateur plan (cf Figure 1).

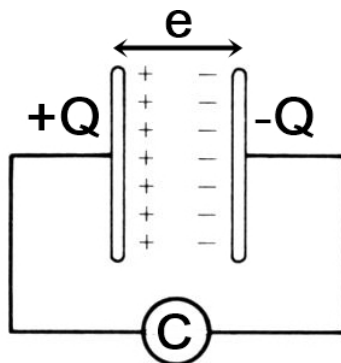


FIGURE 1 – Schéma du condensateur d'Aepinus, le dipôle appelé "C" est le capacimètre.

Un condensateur idéal vérifie la relation :

$$i = C \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

où i est l'intensité qui traverse le condensateur, C est la capacité du condensateur et U est la tension aux bornes du condensateur.

Cela revient à écrire que la capacité est donnée par :

$$Q = CU \quad (2)$$

où Q est la charge aux bornes des plaques conductrices.

Le condensateur dit d'Aepinus est composé de deux disques conducteurs, de surface S et écartés d'une distance e .

Sous les hypothèses suivantes :

- ARQS
- On néglige les effets de bord : $\sqrt{S} \gg e$
- Pas d'effets capacitifs "parasites"

on peut établir une expression de la capacité de ce condensateur :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} \quad (3)$$

où S est la surface des deux plaques conductrices, e est l'écart entre les deux plaques, ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative du diélectrique entre les deux plaques.

1.2 Condensateur à vide

But : vérifier la validité de la loi précédente et mesurer la permittivité relative ϵ_r de l'air.



Condensateur d'Aepinus et mesure de ϵ_r de l'air

🔧 Quaranta IV

⌚ 5 minutes

Méthode : on réalise le montage Figure ?? et on mesure la capacité C du condensateur d'Aepinus au RLC-mètre, en fonction de l'écart e entre les deux plaques. En traçant, C en fonction de l'inverse de e et connaissant S et ϵ_0 on pourra alors déduire ϵ_r de l'air.

Matériel :

- Condensateur d'Aepinus - P 68.4
- RLC-mètre Voltcraft - P 69.33
- Palmer
- 2 cables

Attention : il est nécessaire de fixer les fils avec du scotch, sur le plan de travail pour éviter les variations des effets capacitifs dus à ceux-ci (erreur systématique à discuter).

Remarque : on effectue les mesures au RLC-mètre à une fréquence $f = 1\text{kHz}$

Incertitudes :

- Mesure de e au Palmer : $\Delta e = 0.02\text{mm}$
- Mesure de C au RLC-mètre : $1\% \pm 5$ digits, ie $\Delta C = \dots$
- Mesure de S : $\Delta S = 2\pi R \Delta R = 10\text{cm}^2$

Remarques :

pour mesurer S , nous avons simplement mesurer le diamètre des plaques au mètre-ruban. Il est également possible de passer par la mesure du périmètre avec une ficelle et un mètre. On prend des mesures pour des valeurs de e jusqu'à 4cm pour rester dans l'hypothèses des plaques infinies ($\sqrt{S} = 13\text{cm}$).

Modélisation : on trace la droite $C = \frac{a}{e} + b$, on attend $a = \epsilon_0 \epsilon_r(\text{air}) S$ et $b = 0F$.

On obtient :

$$a(\dots \pm \dots) F.m^{-1} \quad \text{et} \quad b = (\dots \pm \dots) F \quad (4)$$

Or $S = (172 \pm 10) \text{ cm}^2$ et $\epsilon_0 = 8.8610^{-12} \text{ F.m}$

Ce qui donne :

$$\epsilon_r(\text{air}) = \dots \pm \dots \quad (5)$$

avec l'incertitude donnée par la propagation des incertitudes :

$$\Delta \epsilon_r = \epsilon_r \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad (6)$$

Valeur théorique : $\epsilon_r(\text{air}) = 1.00576$

Conclusion : on trouve une valeur de $\epsilon_r(\text{air})$ du bon ordre de grandeur (on l'espère!), ce qui permet de valider la relation proposée, dans le cadre des hypothèses introduites. Pour expliquer les possibles écarts à la valeur théorique, on peut invoquer l'humidité de l'air (s'il fait très chaud par exemple!), la petite inclinaison des plaques ou encore la maladresse de l'expérimentatrice...

Transition : Nous venons de voir que la capacité du condensateur plan varie comme l'inverse de l'écartement entre les deux plaques. Nous allons à présent essayer de quantifier l'influence du diélectrique sur la capacité du condensateur.

1.3 Condensateur avec un diélectrique

Nous l'avons dit, un condensateur est composé de deux plaques conductrices et d'un isolant diélectrique entre elles. Nous nous proposons de vérifier la dépendance de la capacité avec la nature de ce diélectrique.

But : mesure de la permittivité relative ϵ_r d'un isolant (ici une plaque de plexiglas).



Condensateur d'Aepinus et mesure de ϵ_r du plexiglas

🔗 Quaranta IV

⌚ 5 minutes

Méthode : on repart du montage utilisé jusqu'à maintenant. On se place à un e fixé (en pratique la largeur de la plaque de diélectrique). On mesure la capacité au RLC-mètre avec et sans le diélectrique.

Observation : de manière qualitative on peut déjà voir que la capacité augmente quand on ajoute la plaque de PVC par rapport à l'air, ce qui est ce qu'on attend au vue du modèle proposé précédemment.

Incertitude :

- Mesure de C au RLC-mètre : $1\% \pm 5$ digits, ie $\Delta C = \dots$

Exploitation des données : on a $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} + b$ d'où $\frac{C_{plexiglas} - b}{C_{air} - b} = \frac{\epsilon_r(plexiglas)}{\epsilon_r(air)}$, ie

$$\epsilon_r(plexiglas) = \epsilon_r(air) \cdot \frac{C_{plexiglas} - b}{C_{air} - b} \simeq \frac{C_{plexiglas} - b}{C_{air} - b} \quad (7)$$

avec

$$\Delta \epsilon_r(plexiglas) = \epsilon_r(plexiglas) \sqrt{\left(\frac{\Delta C_{plexiglas}}{C_{plexiglas}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{air}}{C_{air}}\right)^2} \quad (8)$$

On obtient donc :

$$\epsilon_r^{exp}(plexiglas) = \dots \pm \dots \quad (9)$$

Or : $\epsilon_r^{tab}(plexiglas) = 2 - 3.5$

Conclusion :

Remarque :

On aurait pu faire varier les écarts e pour un même isolant en prenant des plaques d'épaisseurs différentes. Ici pour un soucis de temps, de matériel disponible et parce que nous avons déjà étudié l'influence de l'écartement, nous avons choisi de faire une mesure unique et d'utiliser le modèle un peu différemment, ce qui permet d'accentuer le propos sur l'influence du diélectrique (et varier un peu le plaisir du public).

Nous venons de voir que la nature du diélectrique modifie la capacité du condensateur et nous avons pu mesurer la permittivité d'un isolant en utilisant le modèle de condensateur plan que nous avons introduit.

Revenons un instant sur cette capacité b que nous avons introduite dans notre modèle.

1.4 Discussion sur l'influence des fils

On a constaté que l'ordonnée à l'origine de notre modélisation linéaire n'est pas nulle, ce qui est attendu par le modèle. Cela s'explique par les effets capacitifs des cables que l'on utilise pour relier le RC-mètre au condensateur. Il s'agit d'un erreur systématique puisque nous avons fixé les fils avec du scotch. La valeur de b nous renseigne donc sur l'importance de ces effets capacitifs, à une position donnée.

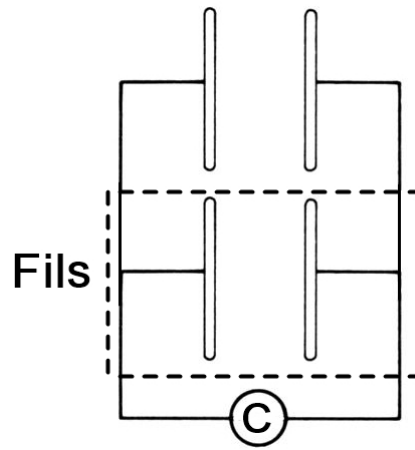


FIGURE 2 – Schéma équivalent des fils

En effet, lorsque les câbles sont espacés et plus ou moins parallèles, ils forment un condensateur. On mesure alors leur capacité en plus de la capacité du condensateur d'Aepinus (les capacités s'ajoutent en parallèle, voir schéma 2).

Ici on estime la contribution des fils à $C_{fils} = b = (\dots \pm \dots) \text{ F}$

Nous avons, au moyen d'un modèle simple, quantifié l'influence de l'écartement des plaques, et de la nature de l'isolant électrique sur la capacité d'un condensateur. Cela nous a permis de mesurer les permittivités relatives de l'isolant.

Nous aurions pu également faire varier la surface des plaques du condensateur afin d'en quantifier l'influence.

Nous proposons désormais de voir comment on peut effectuer une mesure de capacité.

2 Mesure d'une capacité

Jusque là, nous avons utilisé un outil commercial, le RLC-mètre pour mesurer la capacité de notre condensateur. Cet outil fonctionne sur le principe de la recherche d'une fréquence de résonance (détection synchrone).

Nous allons voir que nous pouvons mesurer des capacités par d'autres moyens.

2.1 Le multivibrateur astable : étalonnage

But : construire un appareil de mesure de capacité (capacimètre en français).



Etalonnage d'un capacimètre par multivibrateur astable

✍ Duffait

⌚ 10 minutes

Montage : montage à 2 AO. Un intégrateur inverseur en série avec un comparateur à hystérésis (cf Figure 3. La tension à la sortie du 1er AO et celle à la sortie du 2ème sont respectivement un signal triangulaire (intégrateur) et un signal créneau (comparateur). C'est un système bouclé et auto-entretenu.

Matériel :

- $R = 39k\Omega$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$
- Boîte à décade de capacités
- 2 AO
- Latis-Pro

Pour mesurer avec plus de précision que sur l'oscilloscope on acquière le signal sur Latis-Pro.

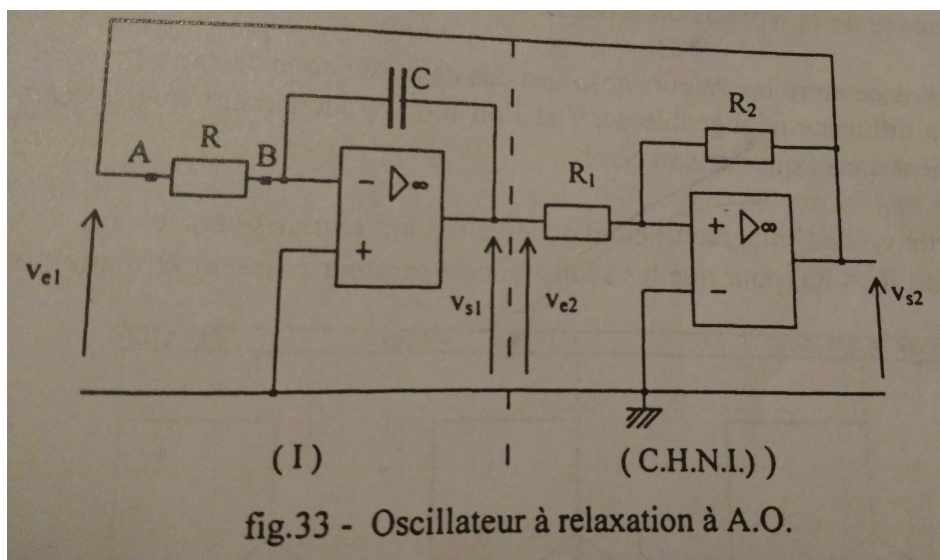


FIGURE 3 – Schéma du montage du multivibrateur astable.

Modèle : on peut montrer (cf Duffait p.187) que la période T des oscillations de ces deux signaux est identique et liée à la capacité du condensateur du montage intégrateur par la relation :

$$T = \frac{4R_1R}{R_2}C \quad (10)$$

On étalonne ce capacimètre en mesurant la période de la tension de sortie v_s en fonction de la capacité du condensateur du circuit, supposé connue avec précision. De la droite $T = f(C)$, on pourra ensuite facilement déduire la valeur d'une capacité inconnue en l'insérant dans le montage à la place de la boîte à décades et en mesurant la période T du signal associé.

Incertitudes :

- Mesure de C de la boîte à décades : 5% de la mesure
- Mesure des résistances : $\Delta R = \dots$

- Mesure de T sur Latis-Pro : $\Delta T = 1\mu s$

Modélisation : on trace la droite $T(C) = aC + b$, on attend $a = \frac{4R_1R}{R_2}$ et $b = 0s$.

On obtient :

$$a = \dots \pm \dots \quad \text{et} \quad b = \dots \pm \dots \quad (11)$$

Or : $a_{théorique} = \frac{4R_1R}{R_2} = 15.65$

Conclusion : comparaison RC-mètre et multivibrateur (mise en place, précision...).

Maintenant que nous avons étalonné ce capacimètre nous allons pouvoir l'utiliser pour mesurer une capacité inconnue.

2.2 Mesure d'une capacité linéique : le câble coaxial

On peut modéliser une portion de câble coaxial de la façon suivante :

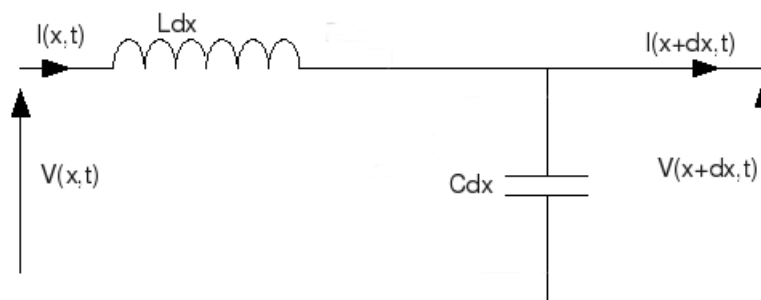


FIGURE 4 – Schéma électrique équivalent du câble coaxial

On va utiliser le multivibrateur pour mesurer la capacité linéique Γ d'un câble coaxial.

Le câble coaxial a une longueur : $L = 100 \pm 0.1m$.

On mesure une période : $T = (\dots \pm \dots) s$.

D'après la courbe d'étalonnage, on en déduit :

$$C = \frac{T}{a} = (\dots \pm \dots) nF \quad (12)$$

avec une incertitude :

$$\Delta C = C \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2} \quad (13)$$

D'où :

$$\Gamma = \frac{C}{L} = (\dots \pm \dots) pF.m^{-1} \quad (14)$$

Or : $\Gamma_{constructeur} = (100 \pm 5) pF.m^{-1}$

Conclusion : on peut mesurer cette même capacité linéique au RCL-mètre et vérifier que les deux mesures sont cohérentes.

Une fois que l'on sait comment mesurer des capacités, on peut voir quelles applications il peut y avoir aux effets capacitifs. Pour le câble coaxial, la capacité apparaît comme un effet parasite mais il est aussi possible d'utiliser des condensateurs pour des applications plus concrètes et bénéfiques.

3 Application des effets capacitifs : le détecteur de niveau d'eau

Objectif : détecter le niveau d'eau dans un condensateur

3.1 Etalonnage

L'idée est ici d'utiliser les effets capacitifs pour détecter le niveau d'eau dans une éprouvette. Cette éprouvette est recouverte de feuilles d'aluminium et forme donc un condensateur, avec comme isolant de l'air et de l'eau en parallèle. Lorsque l'on remplit l'éprouvette progressivement avec de l'eau, on modifie la capacité de ce condensateur. Moyennant l'étalonnage d'un système de conditionnement électrique utilisant cette capacité on peut connaître le volume d'eau dans l'éprouvette.



Conditionnement du condensateur à niveau d'eau



⌚ 10 minutes

Matériel :

- Eprouvette - P 68.14
- Eau
- Système de conditionnement

On insère l'éprouvette dans le montage de conditionnement (cf Figure ??). En ajoutant de l'eau dans l'éprouvette on modifie la valeur de sa capacité (car on modifie la nature du diélectrique), ce qui influence le signal dans le montage. On mesure alors une tension qui est fonction de la hauteur d'eau dans l'éprouvette.

Dans un premier temps, on étalonne cette réponse capacitive au volume d'eau.

On travaille ici encore à $f = 1kHz$.

Incertitudes :

- Mesure de v_s au voltmètre : $\Delta v_s = \dots$
- Mesure de V : $\Delta V = \dots mL$

Modélisation : on trace la tension en sortie en fonction de la hauteur d'eau dans le condensateur :
 $v_s = aV + b$

On obtient :

$$a = (\dots \pm \dots)V.L^{-1} \quad \text{et} \quad b = (\dots \pm \dots)V \quad (15)$$

Conclusion : On obtient ainsi un étalonnage qui permet de choisir un volume d'eau au dessus duquel on souhaite un signal d'alerte.

3.2 Détection d'un niveau d'eau par allumage d'une LED

But : détecter un niveau d'eau limite par allumage d'une LED.

Compte-tenu de l'étalonnage que nous avons effectué précédemment, nous pouvons à présent choisir

une tension seuil représentative d'un niveau d'eau dans l'éprouvette pour que la DEL s'allume lorsque l'on a dépassé ce niveau.

Ce principe est utilisé dans les avions pour contrôler les niveaux de kérozone des réservoirs.

Principe : pour cela on ajoute au montage précédent une partie avec l'éprouvette-condensateur et une partie d'indication lumineuse (facultative, d'autant que les LED de la collection sont un peu faiblardes). Voici le schéma du montage :

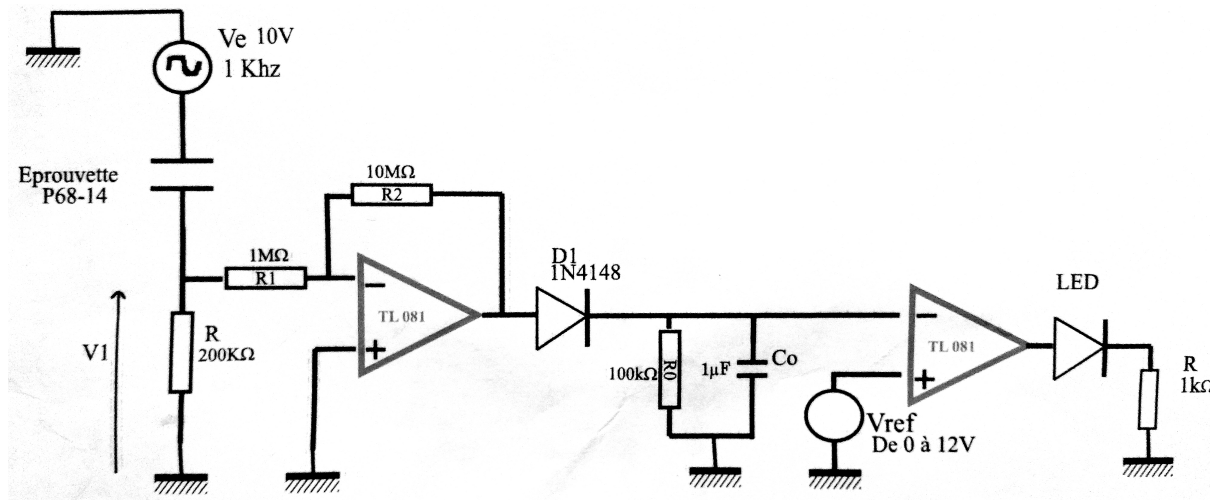


FIGURE 5 – Schéma du montage utilisé.

On choisit une hauteur d'eau limite de 10mL, cela correspond (d'après la courbe d'étalonnage) à une tension de 5V. On prend donc $V_{seuil} = 5V$. On part d'une éprouvette vide. On montre que la LED est bien éteinte. Puis on ajoute progressivement de l'eau. On arrête dès que la LED s'allume et on note la hauteur d'eau. Si tout va bien cela correspond au niveau d'eau limite que l'on s'était fixé.

Conclusion

Au cours de ce montage, nous avons illustré plusieurs aspects liés aux effets capacitifs. En particulier, nous avons vu comment fabriquer un condensateur et comment mesurer de différentes manières la capacité d'un composant.

Certains effets capacitifs sont très présents au quotidien comme nous l'avons dit par exemple pour détecter des niveaux dans des réservoirs. On peut également citer les détecteurs de proximité utilisés pour les écrans tactiles ou les interrupteurs à contact et qui sont basés sur le principe de modification des charges lorsque l'utilisateur approche.

C'est également le principe de fonctionnement de la thérémine. Thérémine : plus vieil instrument de musique électronique (1919). Imité la voix humaine. "Composé d'un boîtier électronique équipé de deux antennes, l'instrument a la particularité de produire de la musique sans être touché par l'instrumentiste. Dans sa version la plus répandue, la main droite commande la hauteur de la note, en faisant varier sa distance à l'antenne verticale. L'antenne horizontale, en forme de boucle, est utilisée pour faire varier le volume selon sa distance à la main gauche. Le son est produit à partir d'un signal électrique engendré par un oscillateur hétérodyne à tubes électroniques. Deux signaux de fréquences élevées (l'un fixe à 170 kHz, l'autre variable entre 168 et 170 kHz) se combinent pour former un battement et fournir un signal audible, entre 20 et 20 000 Hz¹. L'effet de capacité apporté par le corps de l'instrumentiste, à proximité des antennes, affecte la fréquence produite, tout comme une personne se déplaçant dans une pièce peut altérer la qualité d'une réception de radio ou de

télévision. Cette caractéristique est mise à profit dans le thérémine, et la combinaison des deux mains, l'une commandant le volume et l'autre la hauteur de la note, permet d'obtenir des effets sonores insolites."

Questions, remarques, idées, commentaires, propositions, suggestions, blagues...