

MP19 – effets capacitifs

May 7, 2019

- 2017 : La connaissance du principe d'un RLC mètre est essentielle dans ce montage.
- 2015,2016 : : Les modèles de condensateurs et les effets capacitifs sont nombreux et aisément accessibles à l'expérimentation. Le jury constate que l'étude de la propagation d'une impulsion dans un câble coaxial est, à juste titre, souvent proposée dans ce montage, mais que les propriétés physiques de ce phénomène sont souvent mal maîtrisées.
- 2013 : : Les modèles de condensateurs et les effets capacitifs sont nombreux et aisément accessibles à l'expérimentation. Il est dommage que les candidats se limitent le plus souvent à l'étude du condensateur d'Aepinus et à celle d'un circuit RC.
- 2006 : Pour mesurer des capacités de petite valeur, on ne peut pas négliger la capacité d'entrée de l'oscilloscope ou celle des câbles.
- 2000 : Même si les capacimètres commerciaux fonctionnent souvent à cette fréquence, l'étude ne peut pas être limitée à 1000 Hz. En outre la capacité d'un condensateur est en général plus aisée à déterminer avec précision que l'inductance d'une bobine (qui par ailleurs dépend de la fréquence) : cela rend peu convaincant l'usage de la résonance RLC série pour accéder à C !

Références :

- *Expériences d'électronique à l'agrégation de physique*, R. Duffait et J-P Lièvre pour le multivibrateur astable et le filtre RC. b Dictionnaire de physique expérimentale
- *Dictionnaire de physique expérimentale - TOME IV Electricité et Applications*, Donnini et Quaranta pp 118 à 138 : beaucoup d'expériences quantitatives et qualitatives sur les condensateurs.
- *Théorie du signal et composants*, Manneville et Esquieupp 140 à 158 : beaucoup d'expériences quantitatives et qualitatives sur les condensateurs.

Contents

1	Condensateur d'Aepinius	2
2	détecteur de niveau d'eau	3
2.1	Expérience : Étalonnage	4
2.2	Expérience : ajout d'un comparateur+ interrupteur	5

3 Multivibrateur instable :	5
3.1 Expérience : réponse du multivibrateur instable : $f(C)$	6
3.2 Expérience : capacité linéique du câble coaxial	7
3.3 Qualitatif : le théremine	7
4 Annexe	8
4.1 Principe du RLC-mètre	8
4.2 Détecteur de présence	8

Introduction

Un condensateur est un ensemble de conducteurs (les armatures) séparés par un isolant diélectrique, permettant d'accumuler des charges électriques sur ceux-ci si une différence de potentiel leur est imposée.

1 Condensateur d'Aepinius

Il est constitué de deux armatures conductrices parallèles en regard, séparées par de l'air (qui joue le rôle de diélectrique). Sa capacité¹ est :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} \quad (1)$$

où e est l'espacement entre les plaques, S leur surface, ϵ_r la permittivité diélectrique relative du matériau.

Cette formule est valable à condition de négliger les effets de bords, c'est-à-dire si $S \gg e^2$.



Expérience : mesure de la permittivité de l'air

Pour minimiser les capacités parasites, éloigner les fils le plus possible du condensateur, et les fixer avec du ruban adhésif au plan de travail.

Mesurer à l'aide d'un RLC-mètre (Volcraft LCR4080 P69.33), réglé en capacimètre à 1 kHz, la capacité pour différentes valeurs d'écartement e mesurées au pied à coulisse.

Tracer C en fonction^a de $1/e$.

On attend une pente de valeur $\epsilon_0 \epsilon_r S$, avec $S = \pi d^2 / 4$.

Mesurer D et en déduire la permittivité relative de l'air (on attend $\epsilon_r = 1,00$).

^aLes fils induisent des capacités parasites, les attacher permet d'assurer que leur valeur est constante : c'est l'ordonnée à l'origine de la courbe.

¹pour obtenir cette formule, il faut partir de l'équation de Maxwell-Gauss. On relie alors le champ \vec{E} à une différence de potentiel en calculant la circulation du champ entre 0 et e .



Expérience : mesure de la permittivité du verre

Serrer une plaque de verre *P68* entre les armatures et mesurer la nouvelle valeur de capacité. Superposer plusieurs plaques de verre pour faire varier l'épaisseur et recommencer la mesure. Mesurer l'épaisseur des plaques de verre au pied à coulisse. De la même manière que précédemment, tracer C en fonction de $1/e$ et en déduire la permittivité diélectrique relative du verre (à 1 kHz)

2 détecteur de niveau d'eau

On veut construire un capteur² de niveau h d'eau dans une éprouvette. Pour cela, on met deux plaques d'aluminium autour de l'éprouvette de hauteur totale L qui devient un condensateur équivalent : Sa capacité est

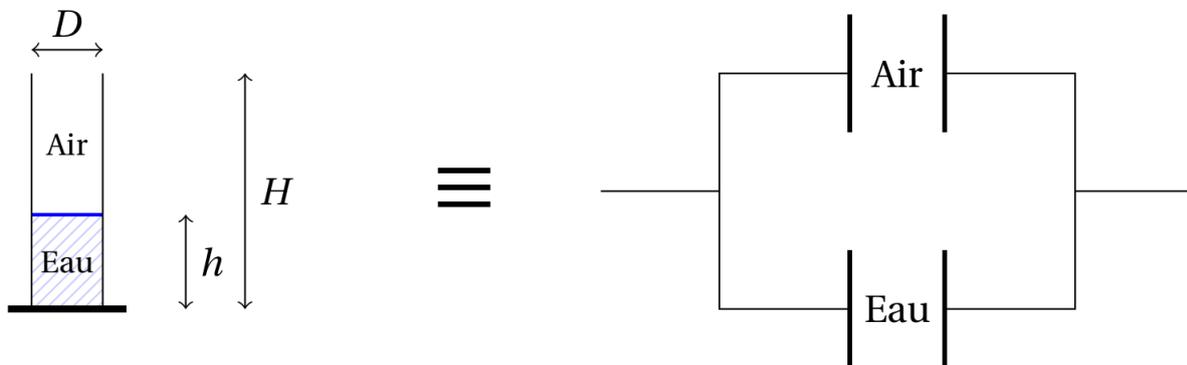


Figure 1: Modèle pour notre éprouvette (extrait du poly de Jérémy Ferrand)

$$C \propto C_{eau} // C_{air} \propto h\epsilon_{eau} + (L - h)\epsilon_{air}^3 \quad (2)$$

En préparation, Mesurer la capacité de l'éprouvette vide *P68.14/2*, puis de l'éprouvette pleine, au RLC-mètre *P69.33*.

Étudions maintenant une façon de réaliser le conditionnement de ce capteur⁴.

Nous proposons le circuit suivant :

D'abord, on alimente le début du circuit avec une tension sinusoïdale à 10 V à 1 kHz . On place ensuite un pont diviseur de tension duquel va sortir une tension v_1 proportionnelle à C (ω est fixée) la capacité de l'éprouvette :

$$v_1 = \frac{R}{R + \frac{1}{jC\omega}} v_e = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} v_e \quad (3)$$

²Le capteur que nous avons ici traduit la hauteur d'eau (mesurande) en une valeur de capacité. C'est donc un capteur passif.

³impédance en parallèle : $\frac{1}{Z_{tot}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \rightarrow jC_{tot}\omega = jC_{air}\omega + jC_{eau}\omega$

⁴Pour obtenir une tension traduisant la valeur de la capacité, on peut utiliser un circuit qui délivrera une tension continue proportionnelle à la capacité. On peut également constituer un multivibrateur astable dont la fréquence sera proportionnelle à la capacité, ou réaliser un pont d'impédances. Plusieurs exemples de conditionnement des capteurs capacitifs sont exposés dans [Asch], p.365.

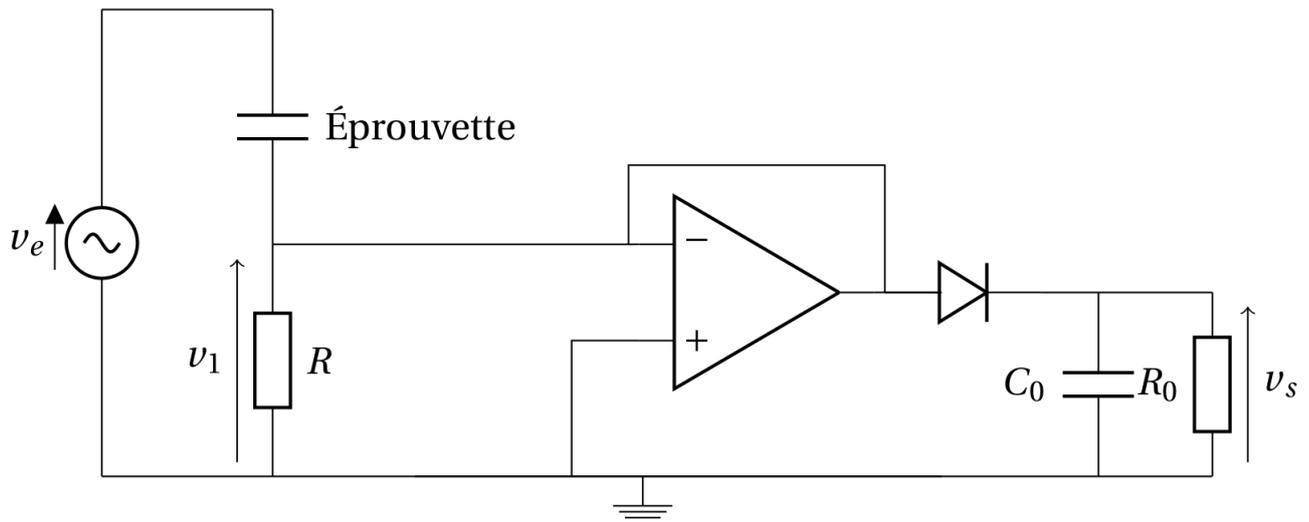


Figure 2: circuit du détecteur de niveau d'eau)

Ainsi, si $RC\omega \ll 1$, alors $v_1 = jRC\omega v_e$. C'est ce qu'on cherche.

Ensuite, on place un suiveur, et un détecteur de crête (diode suivi d'une filtre RC parallèle) qui permet d'obtenir l'amplitude de la tension alternative.

Le signal continu est donc proportionnel à la capacité d'entrée, donc à la hauteur d'eau.

2.1 Expérience : Étalonnage

Choix des composants :

- Pour les valeurs de R et de ω , un compromis est à trouver : il faut avoir $RC\omega \ll 1$ pour assurer la linéarité du conditionnement, mais $RC\omega$ doit être suffisant grand pour obtenir un signal d'amplitude significatif.
On choisira $R = 200 \text{ k}\Omega$ et $f = 1 \text{ kHz}$.
- Le produit R_0C_0 doit être choisi grand devant la période du signal⁵.
Par contre, ce temps conditionne également le temps de réponse de l'ensemble de la chaîne.
On prendra $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$ et $C_0 = 1 \mu\text{F}$.

étalonnage



Expérience : Étalonnage et mesure de sensibilité

Choisir une tension sinusoïdale d'amplitude $V_{pp} = 20\text{V}$ et de fréquence 1kHz , et comme valeurs de composants celles présentées ci-dessus. Pour différentes hauteurs d'eau h dans l'éprouvette, mesurer la tension v_s en sortie au multimètre. Vérifier la linéarité du capteur et calculer sa sensibilité^a.

^aLa sensibilité S , pour une valeur donnée de la mesurande, détermine l'évolution de la grandeur de

⁵Le filtre RC est un filtre passe-bas qui coupe donc les hautes fréquences. Ceci revient dans le domaine temporel à couper les basses périodes. Il faut donc que la période de coupure soit supérieure à celle du signal d'intérêt.

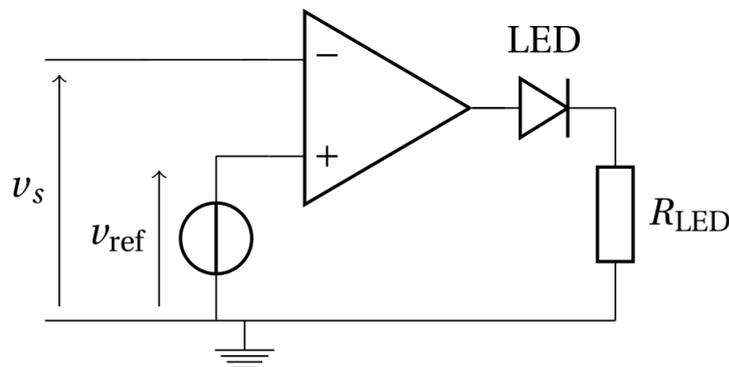
sortie du capteur en fonction de la grandeur d'entrée. Ici, il s'agit d'un rapport de tension.

ATTENTION : Les problèmes les plus fréquents sont des faux contacts entre les fils de connexion et le papier aluminium.

On réalise ici un étalonnage absolu, en se basant sur un étalon de longueur défini (les graduations de l'éprouvette ici). Il est difficile d'évaluer la rapidité du capteur, qui dépend plus des caractéristiques du conditionnement que du capteur lui-même.

2.2 Expérience : ajout d'un comparateur + interrupteur

Pour illustrer une application de ce capteur, on peut ajouter en sortie un comparateur, suivi d'une LED P29.25.



Si la tension en sortie de l'AO est $+V_{sat}$ (i.e. $v_s < v_{ref}$), elle s'allume, si c'est $-V_{sat}$ (i.e. $v_s > v_{ref}$), elle s'éteint. On détecte donc avec ce voyant lumineux le passage d'un seuil.

On pourrait assez simplement imaginer déclencher la mise en route ou l'arrêt d'une pompe avec ce type de système et un interrupteur commandé.

Expérience : Application à la détection du dépassement du niveau d'eau.

On pourra choisir $V_{sat} = 3V$ et $R_{LED} = 1k\Omega$. Vérifier son bon fonctionnement : la LED s'éteint lorsque le niveau d'eau dépasse la moitié (environ).

3 Multivibrateur astable :

Voir Duffait *Expériences d'électronique* p187

Jusqu'à maintenant nous avons utilisé un RLC-mètre pour mesurer la capacité d'un condensateur. Nous allons maintenant faire un montage capable de mesurer des capacités, pour cela nous utiliserons un multivibrateur astable⁶.

⁶Parce qu'il n'a pas d'état stable, il est obligé d'osciller.

Matériel

Oscilloscope, 2 AO, $R = 100\text{ k}\Omega$, $R_1 = 3.9\text{ k}\Omega$, $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, différentes capacités (une boîte à capacités). Montage

Montage :

On réalise le montage suivant :

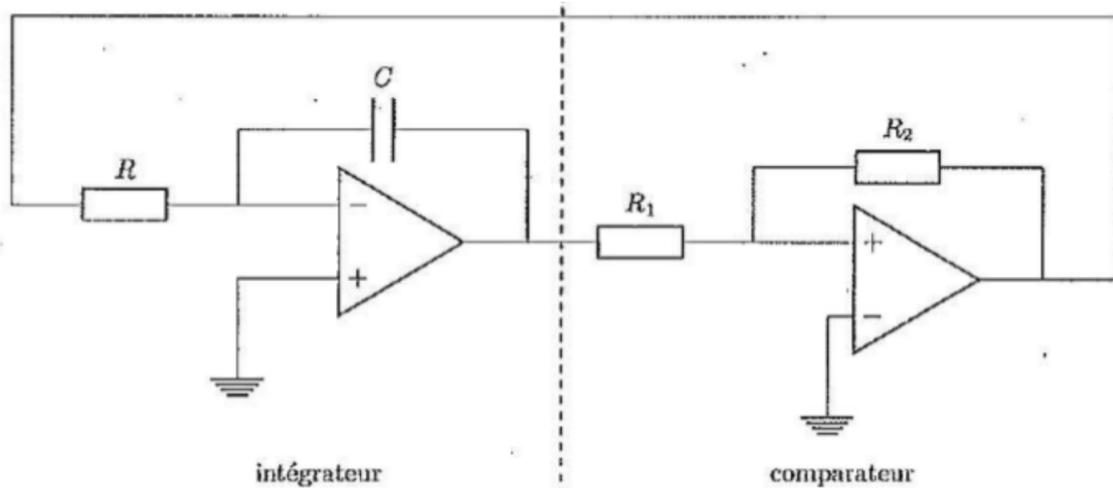


Figure 3: Multivibrateur astable

Ce dernier est composé d'un **intégrateur inverseur** en série avec un **comparateur**. Notons, qu'ici il n'y a pas de source de tension en entrée du montage contrairement à la plupart des montages que nous réalisons.

3.1 Expérience : réponse du multivibrateur instable : $f(C)$

Quand on commence ça en préparation, il faut fixer tous les câbles à la table et ne plus y toucher Sur l'oscilloscope on observe alors deux signaux périodiques, un triangulaire (sortie de l'intégrateur) et un en créneau (en sortie du comparateur). La période T de ces signaux est directement reliée à la capacité C qui se trouve au niveau de l'intégrateur par la relation suivante :

$$T = 4 \frac{R_1}{R_2} RC \quad (4)$$

Expérience : Étalonnage du multivibrateur instable

On étalonne le multivibrateur en mesurant la période correspondante à différentes capacités. La capacité caractéristique de notre câble coaxial est d'environ 20nF. Nous allons donc prendre des valeurs de T pour $C = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, \text{ et } 40\text{ nF}$. Nous obtenons la droite $T(C)$.

On peut à présent brancher n'importe quelle capacité au circuit, mesurer T puis remonter à C .

Incertitudes :

- Pour les capacités supposés connus on utilise une boîte à décade. Il faut regarder cela au RLC-mètre dont l'incertitude est celle donnée par le constructeur.
- Pour la mesure de la période T on utilise un fréquencemètre dont l'incertitude doit aussi être donnée dans sa notice.
- Les résistances ont été mesurées à l'ohmmètre et leur incertitude est donnée ici encore par les données constructeurs.

On va tout de suite s'en servir pour voir les effets capacitifs dans un câble coaxial.

3.2 Expérience : capacité linéique du câble coaxial

A la place de la capacité, on branche la bobine de câble coaxial (on laisse l'autre extrémité ouverte)

Si on néglige les effets résistifs, une tranche dx e câble coaxial est modélisé par une inductance Λdx et une capacité Γdx .

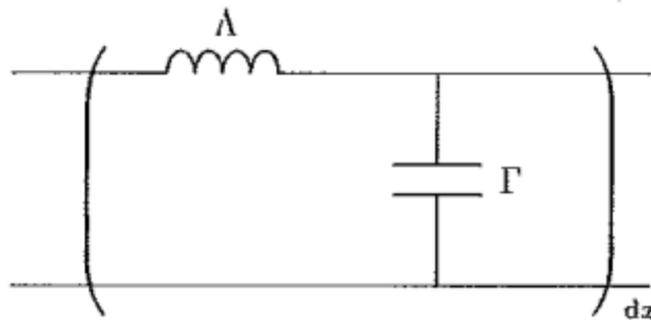


Figure 4: une tranche decable coaxial, modèle



Expérience : Mesure de la capacité d'un câble coaxial

On mesure T après avoir branché le coax, on calcule alors la capacité C correspondante :

3.3 Qualitatif : le thérémine

Inventé en 1920 par Léon Theremin un russe. Cet instrument⁷ est encore très utilisé dans les films de Science-fiction, aussi bien en bruitage qu'en musique.

Afin de simuler ce belle instrument, nous plaçons en sortie du multivibrateur un amplificateur. puis nous alimentons en sortie un haut parleur.

⁷Dans un vrai thérémine, le condensateur est relié à la terre et le corps du musicien joue le rôle d'une capacité en parallèle (entre le circuit et la Terre) mais avec notre montage, ce n'est pas possible ici car C n'est pas à la masse.



Expérience :

À la place de la capacité, mettre deux plaques métalliques en regard reliées avec des pinces crocodile. Les en prendre une à la main et les éloigner l'une de l'autre : la capacité du circuit change ce qui change la fréquence et donc la hauteur du son émis.

Jouer alors au Jury la musique de mario ou téttris, selon ses préférences...

Conclusion

On a identifié et mis en évidence l'effet capacitif. Puis, on a montré un moyen de créer deux capteurs de capacité qui ont leur utilité dans la vie réelle, économique ou artistique.

On pourrait aussi citer le détecteur de présence capacitif (voir en annexes).

4 Annexe

4.1 Principe du RLC-mètre

On injecte un courant alternatif connu et on mesure la tension aux bornes du composant. On mesure la composante de la tension en phase avec le courant, ce qui permet de calculer la partie résistive, et on mesure la composante de la tension en quadrature (déphasée de $\pm 90^\circ$) avec le courant, ce qui donne la partie réactive (Capacitive ou inductive selon le signe).

La mesure se fait simultanément avec une "détection synchrone". La détection synchrone sert à mesurer le signal en phase avec la référence et le signal déphasé de $\pm \pi/2$. Cela permet de calculer le déphasage du signal par rapport à la référence (le signal appliqué au dipôle que l'on mesure). Par exemple, pour une tension $V_0 \cos(\omega t)$ appliquée au dipôle, le courant sera de la forme $I_0 \cos(\omega t + \phi)$.

Si on multiplie ce signal par $\cos(\omega t)$, On obtient une valeur moyenne proportionnelle à $\cos(\phi)$. Si on multiplie par $\sin(\omega t)$ on obtient une valeur moyenne proportionnelle à $\sin(\phi)$.

La connaissance de $\tan(\phi)$ ainsi que du module permet de remonter aux parties réelles et imaginaires de l'impédance.

4.2 Détecteur de présence

On relie un condensateur à un RLC-mètre, de plus une des bornes du condensateur est relié à la terre. Le principe de l'expérience est de créer un deuxième condensateur en reliant une plaque en métal (qui va jouer le rôle d'une armature d'un condensateur) au RLC-mètre. Lorsque nous approchons notre main de cette plaque, il va alors se former un condensateur en parallèle avec celui déjà présent. La capacité mesurée par le RLC-mètre va alors changer, et sur le même principe que le détecteur d'eau on a un circuit qui va détecter ce changement de capacité. (Dans notre cas de détecteur nous avons choisi de faire un oscillateur dont la période est proportionnelle à la capacité)

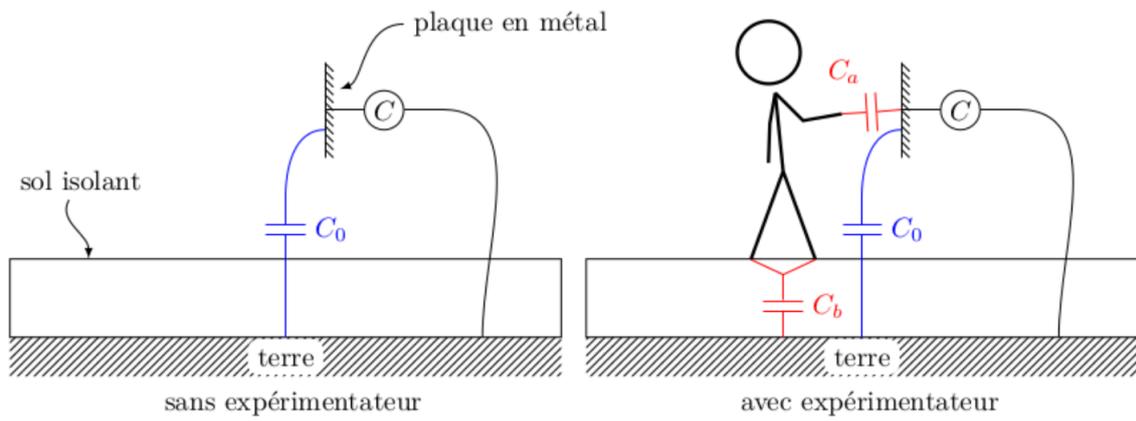


Figure 5: principe du détecteur de présence. Le (C) représente un capteur de capacité.