

Tri de matériaux par mesure de permittivité diélectrique grâce à notre condensateur

L'objectif de ce projet est de permettre de différencier plusieurs matériaux en exploitant leur permittivité. Pour cela, nous devons regarder l'évolution de la capacité d'un condensateur lorsqu'un échantillon est placé entre ses deux plaques. Il est nécessaire d'en avoir une mesure précise car nous voulons être capable de différencier de manière sûre et efficace plusieurs matériaux.

La mesure: Nous mesurons la valeur de la capacité C de notre condensateur plan qui contient notre échantillon

Le montage : Un circuit RC auquel est ajouté un Arduino qui relève les mesures utiles.

Pour avoir une mesure précise, deux méthodes s'offrent à nous.

En effet, plus les matériaux sont épais (plus épais que de l'ordre de quelques millimètres), plus la valeur de la capacité diminue car elle suit la formule $C \propto \frac{1}{e}$ avec e l'épaisseur entre les 2 plaques. Or, la constante de tau vérifie $\tau = RC$. Ainsi, des matériaux trop épais donnent des valeurs de tau trop faibles, qui rend la première méthode obsolète au vu de la fréquence d'échantillonnage des cartes arduino insuffisantes mises à notre disposition.

Méthode 1: Mesure du temps de charge tau à 63%

Une méthode efficace pour les matériaux fins car elle permet une mesure de tau assez élevée grâce à l'acquisition avec la carte arduino. Dans un premier temps, nous pouvons donc mesurer le temps de charge du condensateur ce qui va nous permettre de remonter à τ qui correspond à 63,2% du temps de charge total.

Comme on sait que $\tau = RC$ et que C dépend en partie de la permittivité du matériau entre les plaques, on sera donc capable de retrouver l'élément qui se trouve entre les 2 plaques grâce à la formule suivante:

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{S}{e}$$

S: surface effective des plaques

e: épaisseur de l'échantillon

ϵ_0 : permittivité du vide

ϵ_r : permittivité relative du matériau

Méthode 2: Utilisation oscilloscope et signal carré

Pour les échantillons plus épais, nous pouvons utiliser un signal carré et l'oscilloscope. À chaque transition, le condensateur se charge ou se décharge selon une loi exponentielle caractérisée par la constante de temps τ . Cependant la caractéristique du signal carré fait que si on est à assez haute fréquence le condensateur n'a pas le temps de se charger complètement. Par conséquent, on peut mesurer une valeur moyenne de tension dont on peut déduire la capacité selon la loi:

$U_c = \frac{V_0 \times R}{1 + jRC\omega}$ avec U_c la tension aux bornes du condensateur et V_0 la tension délivrée par le générateur.

La tension est observée à l'oscilloscope puis en moyennant plusieurs cycles afin de réduire le bruit, on détermine la tension moyenne.

Cette méthode nous permet donc de placer des échantillons plus épais: l'utilisation d'un signal rapide et d'un oscilloscope permet d'obtenir une meilleure résolution temporelle et donc une détermination plus précise de la capacité C.

Interrogation sur les effets de bord :

Dans un condensateur plan idéal, on suppose que le champ électrique est parfaitement uniforme et donc confiné entre les plaques. En pratique, notre condensateur ne sera pas idéal et infini donc aux extrémités des plaques, les lignes de champ se courbent vers l'extérieur et des champs de fuite apparaissent.

—> La capacité qu'on mesurera sera supérieure à la capacité calculée par la formule théorique

—> On surestimera la valeur de la permittivité relative du matériau testé

Pour pouvoir négliger ces effets, il faut que la surface des plaques soit très supérieure à l'épaisseur de nos échantillons.

Il existe plusieurs formules pour calculer la capacité d'un condensateur à plaques finies qui incluent un terme correctif pour les bords de la forme (Kirchhoff est auteur d'une des formules de correction impliquant des disques et non des rectangles) :

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S/e + P \Delta / \epsilon_0 \quad (\text{https://www.alucasphys.com/problemfiles/es6.pdf})$$

P : périmètre des plaques

Delta : terme dépendant de la surface des plaques et de la distance entre elles

H.B. Palmer démontre également dans "*The Capacitance of a Parallel Plate Capacitor*", *Electrical Engineering*, vol. 56, 1937 que si le rapport $\frac{\sqrt{S}}{e} > 10$ alors l'erreur de capacité est de 10 à 15%, pour descendre en dessous de 1%, il faut un rapport d'au moins 50.

Formule que l'on a trouvé dans ce document à la page 7:

http://pt.jfversailles.free.fr/physique/PT/Condensateurs_Electrostatique.pdf#page7)

Avec nos plaques de 15x20cm et des échantillons entre 0,2 et 5 mm, nous atteignons des facteurs situés entre 30 (pour une épaisseur de 5mm) et environ 850 (pour une épaisseur de 0,2mm).

Nous allons encore essayer de plus nous documenter dessus mais d'après ces premières recherches, il est fort probable que nous négligerons les effets de bords.

Matériel nécessaire

Pour réaliser le projet nous aurons besoin de nous procurer 2 plaques en cuivre de type PCB qui joueront le rôle des plaques du condensateur ainsi que les échantillons que nous analyserons. La difficulté réside au niveau des échantillons puisqu'ils doivent être totalement plats et avoir une épaisseur la plus fine possible (idéalement pas plus épais que quelques millimètres) pour nous permettre une acquisition plus précise.

Nous utiliserons également plusieurs résistances sur le même échantillon afin d'améliorer la précision de tau. En effet, si R est trop petite, la charge est trop rapide et il se peut que l'arduino n'ait pas assez de points de mesure, il pourrait y avoir une grande erreur sur la mesure. Tandis que si R est grande, la charge est ralentie, la valeur de tau sera plus grande et nous aurons une meilleure précision. Différentes résistances nous permettront aussi de valider le modèle théorique car si R double, tau double également, nous pourrons donc tracer une courbe de régression et vérifier la linéarité du système pour un même échantillon.

Nous aurons également besoin de plexiglass afin de réaliser 2 "coins" qui nous serviront de guides pour assurer un bon parallélisme entre les plaques, placés sur deux coins opposés de nos plaques en cuivre. En effet, pour éviter une mesure faussée de la capacité, nous devons justifier que les plaques du condensateur soient le plus alignées possible entre elles, en limitant donc le jeu latéral entre les deux plaques. Des poids de quelques dizaines à centaines de grammes seront ensuite posés sur le dessus de notre condensateur pour permettre cette fois-ci d'éviter que de l'air puisse rester entre les plaques et ainsi créer des lames d'air indésirables.

Déjà possédé par l'université :

- arduino (plaque, logiciel et cable usb)
- oscilloscope
- GBF
- fils conducteurs

- poste à souder
- plaque à trous
- plusieurs résistances (1Mohm et plus)
- poids à poser sur la plaque
- pied à coulisse
- plaque en plexiglass (4 petits rectangles de 3cm par 6cm pour faire des cales,)
- colle pour plexiglass

À acheter :

Plaques PCB en cuivre 20x30cm (x2):

<https://fr.rs-online.com/web/p/plaques-de-cuivre-pour-circuits-imprimes/7450821>

prix total pour les 2 → 20,24€ TTC

Plaque de verre (x1):

<https://www.kdvisual.it/fr/segnaletica/da-parete/clamper-glass>

prix → 12,90€ TTC

Plaque de PVC (x1):

<https://www.mccover.com/plaques-pvc-interieur/143-plaque-pvc-expanse-blanc-3068752131011.html>

prix → 6,93€ TTC

Plaque de polystyrène (x1):

<https://www.leroymerlin.fr/produits/panneau-polystyrene-expanse-sol-sous-chape-resi-l-0-5-mxl-1-2-mxep-20-mm-r0-5-69240556.html>

prix → 3,82€ TTC

Tâches:

Étude théorique

voir si nos plaques ont besoin d'anneau de garde ou non
sont-ils négligeables, surtout si nos échantillons ne sont pas parfaitement à la taille de nos plaques?

Conception de notre condensateur

découpe de la plaque pcb pour obtenir 2 plaques 15x20cm
soudure des fils sur la plaque
fabrication de cales pour assurer parallélisme des plaques
possible gravure d'un anneau de garde

Développement du code pour Arduino

Montage du circuit

Calibration

Vérification de la permittivité de l'air/vide avec notre condensateur pour quantifier nos erreurs de mesure de capacité

Préparation de nos échantillons

mesurer avec le pied à coulisse si les échantillons font les tailles mentionnées
découpe à la taille adéquate

Série de mesures

tests et mesures des différents échantillons
peut-être alterner entre arduino et oscillo suivant l'épaisseur de nos échantillons

Étalonnage

réaliser des mesures de tau avec différentes résistances mais même échantillon pour tracer des courbes de régression

Analyse incertitudes

étude de l'impact de la planéité de nos plaques (lame d'air = beaucoup d'erreur?), de l'épaisseur des échantillons etc sur le résultat de la permittivité finale

Organisation :

Nous souhaitons nous organiser comme suit:

La première partie du projet réside dans la conception mécanique et la fabrication du condensateur. Ce rôle, attribué à Chloé, comprend le dimensionnement des plaques en cuivre du condensateur, la mise en place du système de maintien (guides en coin fait en plexiglass), ainsi que la mesure précise de l'épaisseur des matériaux et l'analyse des incertitudes liées à la géométrie de notre montage.

Le second rôle, qui sera réalisé par Brice, est la réalisation du circuit électronique et l'acquisition de la capacité. Ses missions incluent donc, en fonction de la méthode choisie (1 ou 2), le choix de la valeur de la résistance, le câblage du circuit ainsi que le paramétrage de l'oscilloscope/ l'utilisation de la carte arduino. Également, ce rôle consiste en la mesure de la constante de temps tau, la vérification de la stabilité des mesures et l'identification de capacités parasites (air).

Enfin, une troisième personne, Léa, est responsable de l'exploitation et de l'analyse des résultats. Ce rôle comprend, après avoir vérifié que le cadre théorique a été respecté et après avoir estimé les incertitudes totales sur nos mesures, vérifier que les mesures sont acceptables. Ensuite, via la formule liant constante de temps et capacité, puis capacité et permittivité, remonter à des valeurs de permittivité relative des matériaux, permettant ainsi un tri entre les matériaux.

Cette répartition entre les tâches et chaque participant au projet reste indicative et a pour but principal de structurer le projet. Nous souhaitons que chaque membre puisse, au minimum, participer aux trois pôles du projet.

Dans l'idéal, nous souhaiterions pouvoir identifier les matériaux grâce à notre système. C'est à dire qu'en comparant les valeurs de permittivité obtenue avec les valeurs théoriques nous voudrions être capable de retrouver des valeurs similaires. Si cela n'est pas possible à cause d'un manque de précision du système nous voudrions au moins être capable de différencier différents matériaux ce qui est essentiel dans le cadre d'une station de tri par exemple.