

MP34 – CAPTEURS À EFFETS CAPACITIFS

11/05/2022

Jean-Maxime Schlachter & Léa Bessonart

Commentaires du jury

Bibliographie

- ⚡ *Notice RLC-mètre P69.33* → Tolérance sur la mesure d'une capacité p63.
- ⚡ *Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV : L'électricité, Quaranta* → Ponts pour mesurer une capacité.
- ⚡ *Les capteurs en instrumentation industrielle, Ash* → Condensateur à écartement variable, piézoélectricité, électrets, microphones en général, techniques de mesure de capacités.
- ⚡ *Expériences d'électronique, Duffait* → Piézoélectricité.
- ⚡ *BUP647, Transducteur électrostatique, Sellier* → Microphones électrostatique et à électret.
- ⚡ *Jolidon* → Détermination du module d'Young d'une poutre.

Expériences

- 👤 Condensateur d'Aepinus
- 👤 Capteur de force piézoélectrique
- 👤 Capteur de niveau d'eau
- 👤 Détermination du module d'Young d'une poutre

Introduction

Les capteurs sont des outils extrêmement courants en physique puisqu'ils permettent de convertir une grandeur en un signal électrique. Si le circuit électrique du capteur possède un condensateur, alors des charges vont s'accumuler sur ses armatures, c'est ce qu'on appelle *l'effet capacitif*. Nous allons voir sur quels principes un tel capteur fonctionne, ce qu'il permet de mesurer et terminerons par une application avec un capteur de la vie quotidienne : le microphone.

I Condensateur d'Aepinus

Ash p368

Le condensateur d'Aepinus est constitué d'une armature fixe et d'une armature mobile servant à régler la distance e entre les armatures. Il est alors possible de modifier la capacité du condensateur et d'en déterminer la permittivité relative ε_r du diélectrique entre les armatures en traçant $C = f(1/e)$, de pente $\varepsilon_0 \varepsilon_r S$:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{e}$$

L'épaisseur e entre les plaques est lue grâce à un vernier placé sur la condensateur. L'incertitude liée à la lecture de l'épaisseur est de 0.3 mm. Le condensateur utilisé a une surface $(5.19 \pm 0.08) \times 10^{-2} \text{m}^2$.

La capacité est mesurée à l'aide d'un RLC-mètre à 1 kHz. La précision du RLC-mètre dépend (peu) de la valeur mesurée, nous adoptons l'incertitude maximale pour des capacités de moins de 2 mF qui est de $\pm 1\%$ de la valeur lue +5dgts.

La capacité mesurée du condensateur d'Aepinus est entachée d'une erreur systématique due aux fils qui relient le condensateur au RLC-mètre¹. Cette capacité est à l'origine d'une ordonnée à l'origine dans la loi $C = f(1/e)$ et ne joue donc aucun rôle sur la détermination de ε_r .

L'expérience conduit à

$$\varepsilon_r^{\text{air}} = 1.05 \pm 0.05$$

ce qui correspond à la valeur attendue de 1.00.

On place maintenant une plaque de verre entre les armatures du diélectrique ; on prend soin de rapprocher autant que

1. On néglige la variation de capacité du circuit lorsque les fils s'écartent en variant e .

possible les armatures de la plaque pour éviter qu'il y ait de l'air entre les armatures et la plaque, ce qui perturberait la détermination de $\varepsilon_r^{\text{verre}}$. Une seule mesure est donc réalisée, pour $e^{\text{verre}} = (7.0 \pm 0.3)$ mm. La mesure de la capacité donne

$$\varepsilon_r^{\text{verre}} = \frac{C^{\text{verre}} - b}{\epsilon_0 S} e^{\text{verre}} = 6.5 \pm 0.4$$

ce qui correspond à un indice optique $n^{\text{verre}} = 2.55 \pm 0.06$. Il faut faire attention ici au fait que le champ étant statique, la longueur d'onde de travail est infinie donc on ne peut pas comparer aux valeurs usuelles de l'indice d'un verre dans le domaine visible. Sur la page Wikipédia de la permittivité, la permittivité des verres se situe entre 3.8 et 14.5 : la valeur obtenue entre dans cette plage.

On a manipulé un capteur à effet capacitif élémentaire qui permet de mettre en avant la quasi-totalité des domaines d'utilisation de capteurs à effets capacitifs :

- suivi d'une variation d'épaisseur entre deux armatures, principe sur lequel le microphone électrostatique fonctionne ;
- variation de la permittivité diélectrique d'un matériau ou de sa polarisation, chose qui peut être mise à profit dans des capteurs de niveau d'eau ou les microphones à électret qui seront l'objet de la suite de ce montage ;

On va maintenant étudier un capteur dont l'effet capacitif repose sur la modification de sa surface : une variation d'un niveau d'eau peut être détectée grâce à un condensateur. Pour cela, on ne va plus utiliser un RLC-mètre commercial mais un C-mètre maison qui utilise un condensateur pour mesurer une capacité.

II Capteur de niveau d'eau

II.A Mesure d'une capacité

Ash pp372-373

Une capacité peut être mesurée de plusieurs méthodes², on a choisi le montage à amplificateur opérationnel du Ash. On utilise un GBF de fréquence 1 kHz, deux résistances R_1 et R_2 , une capacité variable C_1 , une capacité fixe pour tout le montage C_2 , un oscilloscope pour visualiser la tension en sortie de l'A.O. Le circuit lui-même peut être vu comme un capteur à effet capacitif puisque son fonctionnement repose sur la charge et décharge d'un condensateur.

Pour établir l'équation reliant la tension d'entrée v_e à la tension de sortie de l'A.O. v_0 , on regroupe les dipôles par paires et on raisonne en termes d'impédances équivalentes. On reconnaît alors un montage amplificateur inverseur, donc, si l'A.O. est idéal et en régime linéaire :

$$v_s = -\frac{Z_2}{Z_1} v_g = \frac{-jR_2 C_1 \omega}{(1 + jR_1 C_1 \omega)(1 + jR_2 C_2 \omega)} v_g$$

Si $R_1 C_1 \omega \ll 1 \ll R_2 C_2 \omega$, alors on peut simplifier l'expression de la fonction de transfert

$$v_s = -\frac{C_1}{C_2} v_g$$

Le montage fournit donc une tension linéaire avec C_1 qui joue le rôle de la capacité inconnue.

Ici, on vérifie l'équation de fonctionnement du circuit. On a utilisé :

- $V_{g,0} = 1$ V, $f = 1$ kHz ;
- $R_1 = 1$ k Ω , $R_2 = 1$ M Ω ;
- $C_2 = 1$ nF, $C_1 \sim 1$ nF variable.

2. Voir Quaranta

On calcule donc $R_1 C_1 \omega \sim 6 \times 10^{-3} \ll 1$ et $R_2 C_2 \omega = 6.3$. Les conditions sont donc plutôt bien respectées.

En pratique, le signal de sortie est modulé par un signal à 50 Hz de grande amplitude, plus élevée que celle due à la capacité C_1 calculée auparavant et variant à 1 kHz. On effectue alors une transformée de Fourier du signal pour obtenir l'amplitude du signal qui nous intéresse à 1 kHz.

En variant la valeur de la capacité C_1 , on relève l'amplitude $V_{s,0}$ des oscillations donnée par la valeur du pic de la transformée de Fourier correspondant. On trace $V_{s,0} = f(C_1)$; on remarque que la relation est linéaire comme attendu. De la valeur de la pente a , on déduit la valeur de la capacité C_2 utilisée :

$$C_2 = \frac{V_{s,0}}{a} = (1.114 \pm 0.002) \text{ nF}$$

Cette valeur est en accord avec celle mesurée au RLC-mètre, qui est de 1.1 nF et celle indiquée sur la capacité.

II.B Mesure d'un niveau d'eau

Ash p605

Nous allons utiliser le montage précédent pour mesurer la variation d'une capacité due à une modification d'un niveau d'eau. Concrètement, la donnée du niveau d'un liquide dans un réservoir permet d'ajuster l'ajout de liquide pour qu'un réservoir ne déborde pas ou qu'il ne soit pas vide. La connaissance du niveau permet également de quantifier le volume du liquide restant dans le réservoir.

Le capteur de mesure d'un niveau d'eau consiste en une burette sur laquelle sont scotchées deux portions de cylindre en aluminium jouant le rôle d'armatures. On peut remplir la burette avec de l'eau et jouer sur la hauteur d'eau pour faire varier la capacité. En effet, les armatures voient un diélectrique (l'eau) sur une hauteur h et de l'air sur une hauteur $H - h$, les capacités s'additionnent donc pour donner la capacité totale $C = C^{\text{eau}} + C^{\text{air}}$. Comme la surface des condensateurs est proportionnelle à la hauteur d'eau, il vient

$$C \propto h \varepsilon^{\text{eau}} + (H - h) \varepsilon^{\text{air}} = h(\varepsilon^{\text{eau}} - \varepsilon^{\text{air}}) + H \varepsilon^{\text{air}}$$

Le graphe $C = g(h)$ est une droite et, par conséquent, $V_{s,0} = \tilde{g}(h)$ également. On peut donc suivre facilement l'évolution de la hauteur d'eau. Le caractère bijectif de cette relation permet le contrôle du niveau d'eau dans un réservoir.

Pour les mesures, on a pris une incertitude sur le niveau d'eau à 3 mm et une incertitude sur $V_{s,0}$ de 1 mV.

Durant la préparation, l'étalonnage du capteur a été fait, ce qui permet de mesurer un niveau à partir de cette droite d'étalonnage. On compare avec la hauteur mesurée à la règle.

Ce capteur permet en outre de remonter à la valeur de la permittivité diélectrique de l'eau. En effet,

$$\frac{C^{\text{plein}}}{C^{\text{vide}}} = \frac{\varepsilon_r^{\text{eau}}}{\varepsilon_r^{\text{air}}} \implies \varepsilon_r^{\text{eau}} = \frac{\varepsilon_r^{\text{air}} C^{\text{plein}}}{C^{\text{vide}}} = \frac{\varepsilon_r^{\text{air}} V_{s,0}^{\text{plein}}}{V_{s,0}^{\text{vide}}}$$

En utilisant la formule de propagation des incertitudes

$$u(\varepsilon_r^{\text{eau}}) = \sqrt{\left(u\left(V_{s,0}^{\text{plein}}\right)\right)^2 + \left(u\left(V_{s,0}^{\text{vide}}\right)\right)^2}$$

on obtient

$$\varepsilon_r^{\text{eau}} = 1.57 \pm 0.03$$

La valeur obtenue est loin de la valeur tabulée à 78.5...

Nous avons utilisé des condensateurs simples pour fabriquer des capteurs. Les effets capacitifs ne se limitent pas à l'emploi de condensateurs purs et durs comme ceux utilisés jusqu'à présent avec deux armatures bien visibles autour d'un diélectrique. Certains matériaux, tels que les piézoélectriques, ont un comportement électro-mécanique qui leur permet d'être utilisés comme capteurs capacitifs.



III Capteur de force piézoélectrique

Duffait chapitre V.3.1 pp101-102 et IV.5.4.3 pp82-82, Ash pp462-484

Un matériau piézoélectrique développe une polarisation électrique lorsqu'il est soumis à une contrainte, qui déforme le réseau cristallin. Cette polarisation d'espace résulte en la polarisation électrique de sa surface : si F est la force appliquée au matériau, il développe une charge $\pm q$ sur ses surfaces telles que

$$q = \alpha F$$

Il apparaît alors un champ électrique / une tension et cette charge q qu'on peut collecter en liant la surface du matériau piézoélectrique à deux conducteurs. On obtient ainsi un capteur de force capacitif actif (qui n'a pas besoin d'être alimenté par une source de tension). Le schéma électrique équivalent d'un tel capteur est donné dans Duffait p101 et Ash p479 ; il s'agit d'un condensateur C_p en parallèle avec une résistance d'isolement R_p . On note V_p la tension aux bornes du condensateur. Si $V_p/R_d \ll C_p \dot{V}_p$, tout le courant issu du générateur de courant traverse le condensateur C_p d'où

$$V_p = \frac{q}{C_p} = \frac{\alpha F}{C_p}$$

Cette tension est en pratique extrêmement faible et ne peut pas être mesurée directement. On va plutôt mesurer une tension en sortie d'un amplificateur. On monte donc le montage à amplificateur de charge (Duffait p101, Ash pp481-484), dont la tension en sortie est proportionnelle à la charge q pour un A.O. idéal :

$$V_s = \frac{\alpha F}{C}$$

On a pris $C = 1 \mu\text{F}$.

Dans les faits, l'impédance d'entrée de l'A.O. n'est pas infinie et il y a un courant de polarisation non nul qui ne parcourt pas la branche du condensateur mais entre dans la borne $-$ de l'A.O. (Duffait IV.5.4.3). Ce courant provoque une dérive de la tension mesurée, qui dans les faits est d'amplitude suffisamment faible pour être négligée devant la variation de tension lorsqu'on applique une force sur le capteur³. On acquiert donc la tension de sortie de l'amplificateur sur un oscilloscope puis on lit la variation de la tension de sortie lorsqu'on pose une masse sur le capteur piézoélectrique. Comme c'est une variation de tension qui nous intéresse et que la dérive de la tension sur plusieurs secondes n'est pas négligeable devant la valeur de la tension mesurée (qq mV), on peut ne pas mettre l'interrupteur K qui décharge le condensateur et de remet la tension à ses bornes à zéro (la dérive annule instantanément cette action).

Le piézoélectrique utilisé est un cristal de sel de Seignette. Il est à la fois piézoélectrique et ferro-électrique, c'est-à-dire qu'il peut posséder une polarisation électrique non nulle à champ électrique nul⁴. Cette deuxième propriété n'est pas celle qui nous intéresse ici. On vérifie que la tension en sortie de l'amplificateur est linéaire avec la force appliquée en posant différentes masses sur le support du capteur. Il faut faire attention de poser la masse uniquement sur la pastille noire au-dessus du piézoélectrique, sinon la contrainte risque d'être répartie entre le piézoélectrique et le support. On trouve la valeur du coefficient α

$$\alpha = (3.94 \pm 0.07) \times 10^{-10} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$$

Nous avons vu comment fonctionne un capteur à effet capacitif. Nous allons faire une application d'un capteur à effet capacitif pour déterminer le module d'Young d'une poutre.

3. Le capteur a donc un temps de réponse faible et une sensibilité élevée.

4. Découverte de cette propriété pour ce sel en 1921.



IV Microphone à électret

Ash pp634-638 et pp686-708, BUP 647, Jolidon

Le capteur à effet capacitif utilisé dans cette expérience est un microphone à électret⁵. Un électret est un matériau ferro-électrique qui possède une polarisation électrique rémanente \vec{P}_r . C'est le cas par exemple du sel de Seignette (mais celui-ci ne conserverait cette propriété qu'entre -18°C et 24°C), du Teflon ou encore du Mylar. Cette polarisation \vec{P}_r est à l'origine d'un champ électrique permanent $\vec{E}^{\text{el}} \propto \vec{P}^{\text{el}}$ et d'une charge surfacique σ^{el} . On vient donc placer un conducteur sur une face de l'électret et un second relié à une membrane en retrait pour constituer un condensateur dont on peut faire varier l'épaisseur (voir Ash, figure 15.19). Le couplage entre la surpression extérieure et le condensateur par le biais de la membrane fait osciller la tension aux bornes du condensateur, ce qui constitue le signal qu'on acquiert.

D'un point de vue plus quantitatif, on peut caractériser le fonctionnement de ce microphone en considérant que l'électret est placé sur l'armature fixe, et on adopte les conventions de la figure 15.19 du Ash. La relation de passage électret→air pour le champ électrique s'écrit

$$-E - \varepsilon_r^{\text{el}} E^{\text{el}} = \frac{\sigma^{\text{el}}}{\varepsilon_0}$$

où "el" fait référence à l'électret. Il en résulte une tension

$$V = e^{\text{el}} E^{\text{el}} - xE$$

L'épaisseur e^{el} est fixe, c'est x (épaisseur de la couche d'air) qui varie. On élimine donc le champ E^{el} des équations et, en négligeant la tension V qui apparaît devant $\sigma^{\text{el}} e^{\text{el}} / \varepsilon_0 \varepsilon_r^{\text{el}} \sim 100\text{ V}$, on aboutit à

$$E \approx -\frac{\sigma^{\text{el}} e^{\text{el}}}{\varepsilon_0 (e^{\text{el}} + \varepsilon_r^{\text{el}} x)}$$

Soit x_0 l'épaisseur de la couche d'air au repos. Un faible écart dx de l'épaisseur par rapport à x_0 se traduit en une modification de la tension⁶

$$dV = -Edx \approx -\frac{\sigma^{\text{el}}}{\varepsilon_0 (e^{\text{el}} + \varepsilon_r^{\text{el}} x_0)} dx$$

Du point de vue mécanique, il y a un effets de capacitifs acoustiques supplémentaires, dus à l'élasticité de la membrane et de la compressibilité de l'air dans les cavités avant et arrière à l'électrode fixe. Le schéma équivalent du microphone à électret est en figure 15.20 du Ash.

Il existe deux types de microphones à électret, suivant que c'est l'armature fixe ou mobile qui porte l'électret. Si l'électret est lié à l'armature mobile, la tension V est affectée d'un signe $-$ par rapport à l'étude ci-dessus.

Le capteur possède une armature fixe et une armature mobile, ce qui lui permet de mesurer des contraintes par le déplacement de l'armature mobile. Ce type de microphones est donc dit à *pression*. On s'attend à ce qu'un tel capteur soit unidirectionnel (le déplacement de la membrane se fait sur un seul axe). On peut caractériser la directionnalité du capteur en le tournant autour d'un haut-parleur et relever la tension délivrée à chaque angle. D'autres caractérisations possibles sont le test de la linéarité du capteur et sa réponse fréquentielle. Ces essais nécessitent de mesurer avec précision le niveau sonore au niveau du micro puis de convertir ce niveau en une pression pour chaque mesure. Dans la caractérisation fréquentielle, il faut en effet tenir compte du fait que le rendement d'un haut-parleur n'est pas constant avec la fréquence.

On montre la directionnalité du microphone puis, en admettant sa linéarité, on effectue une application d'un capteur à effet capacitif : la détermination du module d'Young d'une poutre⁷. La vibration de la poutre génère une surpression dans l'air environnant dont le spectre est composé des fréquences propres de la poutre, et proportionnelles au module d'Young. Pour le mode 1 :

$$\omega^2 = \left[\frac{(3.516)^2 e^2 E}{12 \rho} \right] \frac{1}{\ell^4}$$

5. Tout autre type de microphone aurait convenu. Soit on utilise celui qu'on nous donne, soit on demande un micro à électret pour ajouter une nouvelle catégorie de diélectriques. L'avantage d'un micro à électret est que le condensateur n'a pas besoin d'être alimenté, alors qu'un micro à condensateur "normal" nécessite une alimentation en 200 V.

6. Sur le principe, ce capteur est donc actif et ne nécessite pas d'être alimenté. En pratique, le condensateur est suivi d'une transistor qui amplifie la variation de la tension aux bornes du condensateur ; c'est ce transistor qui est alimenté par la pile du microphone.

7. On aurait aussi pu utiliser un capteur d'accélération piézoélectrique.

Une régression linéaire $\omega^2 = f(1/\ell^4)$ permet donc de remonter au module d'Young à partir du coefficient directeur. La démonstration de la directionnalité du micro impose qu'on le place perpendiculairement à la poutre pour recueillir un signal d'amplitude maximale. On acquiert le signal délivré par le micro sur un oscillo puis on effectue la TF du signal. On relève la fréquence du premier mode pour différentes valeurs de ℓ , puis on effectue la régression linéaire. Avec $e = (2.44 \times 10^{-3} \pm 0.02 \times 10^{-3})\text{m}$, $\rho = 8.73\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, on trouve :

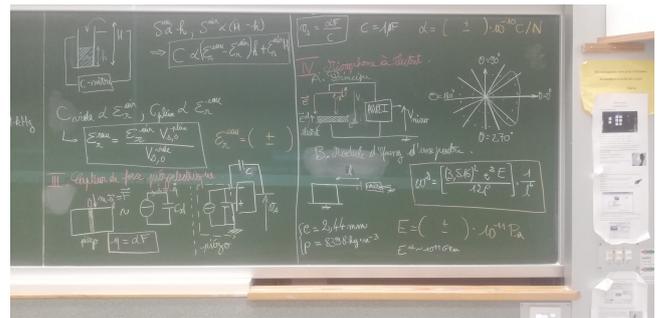
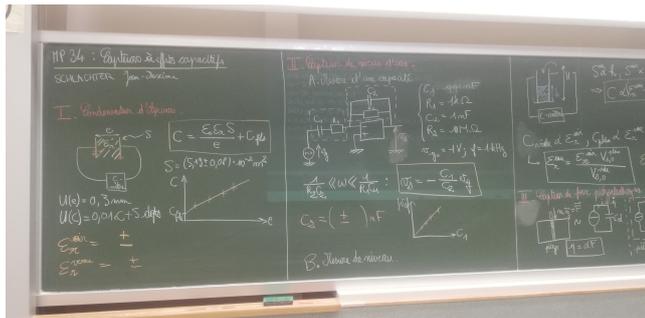
$$E = (6.4 \pm 0.1) \times 10^{10}\text{Pa}$$

On s'attend à $E^{\text{laiton}} = (1.0 \times 10^{11} - 1.3 \times 10^{11})\text{Pa}$. La valeur obtenue est du bon ordre de grandeur.

Conclusion

Les capteurs à effets capacitifs sont des capteurs courants qui ont une large gamme d'applications tant au niveau physique fondamentale qu'appliquée : détermination d'une permittivité diélectrique, mesure de distance, gestion d'un réservoir, capteur de force/contrainte/accélération, microphone... Leur usage n'est pas réservé à la vie courante ou un labo de TP, ils sont également employés dans la recherche fondamentale, où ils permettent par exemple la déflexion statique et dynamique de feuillets/matériaux 2D dont la déformation est liée expérimentalement à l'énergie du gap dans les feuillets semi-conducteurs de TMD (dichalcogénures de métaux de transition)⁸. Une autre application est la mesure de volume occupé par un empilement de grains⁹.

Les effets capacitifs dans les circuits électriques ne sont cependant pas toujours souhaités : par exemple, la capacité d'un câble coaxial peut perturber une mesure de capacité ou la forme d'une tension en créneaux ; la capacité de fuite d'une ligne électrique combinée à l'inductance propre de la ligne la transforme en filtre avec une certaine fréquence de résonance et diminue son rendement en puissance à cause d'un déphasage courant-tension (voir *Les transports électriques à longue distance, La houille blanche.*).



8. Voir par exemple *Dynamically-enhanced strain in atomically thin resonators*, **Xi Zhang**, 2020.
 9. Voir *Les milieux granulaires : entre fluide et solide*, **Andreotti**, encadré 3.1.

Manip surprise

Mesurer la célérité du son dans l'air. avec émetteur récepteur . soit on fait une mesure de temps de vol ($v=d/t$) (vitesse de groupe) soit mesure de nb de longueur d'onde : ($\lambda = c/f$)d ici mesure de vitesse de phase . ici les deux vitesses identique.

Matériel : Émetteur et récepteur ultrasonore, diapason avec caisse de résonance, radio, GBF, oscillo.

- Mesure du temps de vol pour différentes distances entre l'émetteur et le récepteur (GBF en mode Burst) : $v_g = d/t$ (vitesse de groupe).
- GBF en mode Sinus, normal : déplacer le récepteur et compter de combien de longueurs d'ondes on l'a déplacé. Connaissant la fréquence (oscillo), on déduit v_φ (vitesse de phase).
- La longueur de la caisse du diapason est approximativement $\lambda/4$. On acquiert le signal sur un oscilloscope pour déterminer la fréquence du diapason et on déduit v_φ .

Questions

- Comment fonctionne un RLC-mètre ? pourquoi tu fais la mesure à 1 kHz ? → En plus des méthodes citées dans le Ash (ponts, montage présenté), on peut faire une mesure de la réactance. On travaille avec de l'alternatif car l'impédance est complexe. Le RLC-mètre envoie un sinus à une fréquence donnée au circuit. Ensuite, le signal est multiplié par l'entrée sans déphasage ou déphasée de $\pi/2$ pour traiter la partie imaginaire du signal qui vient du circuit.
- Tu as dit que C dépend de température. Comment ça varie ? → Plus T est grand plus ϵ_r est bas car la densité diminue et il y a moins d'interactions champ/matière.
- En quoi la longueur des câbles jouent ? Lequel a la plus grande capacité entre un fil étiré et un fil enroulé ? Est-ce que la capacité des fils fait juste un offset pour les mesures ? → La capacité des fils joue surtout d'autant plus que les fils sont proches. Un fil enroulé aura une plus grande capacité car la surface du condensateur qu'ils forment est grande. Pour les mesures, la capacité parasite des fils ajoute un offset à chaque mesure. En particulier, l'ensemble des mesures du I. peut ne pas ressembler à droite si on bouge les fils ou le RLC-mètre durant la série de mesures.
- Comment on additionne des capacités ? → En parallèle on les somme, en série c'est $1/C$ qu'on somme pour obtenir $1/C_{tot}$.
- Quelle est l'incertitude sur l'épaisseur ? sur C ? → Cf tableau. Pour C , voir la notice.
- Quelle est la source systématique d'erreur de tes manip sur le capteur d'eau ? → La présence d'une couche de verre perturbe la mesure mais comme il s'agit d'une capacité en série, celle-ci a pour effet d'augmenter la permittivité totale. En fait, l'écart doit surtout provenir du fait que l'eau utilisée n'est pas de l'eau distillée.
- ODG de ϵ_r du verre ? → 3.8 à 14.5.
- Quelles sont les hypothèses de l'ALI (AO) idéale ? Réponse linéaire selon l'écart de potentiel entre les bornes + et -, faible écart entre les potentiels en + et - de sorte que $V_+ = V_-$, courants de polarisation nuls, pas d'offset en sortie, bande passante infinie. En réalité, il y a des courants de polarisation (cf III.) et l'ALI est un passe-bas.
- Quelle est la fréquence de coupure d'un ALI ? → Vers 10 Hz.
- Comment on amplifie un signal de plus haute que fréquence de coupure (1 kHz dans le II.A) ? → On diminue le gain car produit gain-bande passante est constant.
- Pour le capteur de niveau d'eau, tu as écrit que la surface est proportionnelle à h , pourquoi ? Les armatures ne sont pas planes donc il faut prendre un effet de courbure latérale. Pour le capteur de niveau d'eau ce n'est pas grave car on ne veut pas une mesure absolue de la capacité en fonction de tous les paramètres mais seulement son évolution avec h .
- Que change la taille de l'éprouvette ? → Augmentation de la hauteur totale, donc de la capacité.
- Incertitude sur la TF de l'oscillo ? → Bien zoomer sur le pic et regarder l'incrément du curseur.
- Comment enlever le 50 Hz qui module le signal du II. ? → Passe-bas simple ou démodulation d'amplitude.

- Comment on mesure un niveau d'eau concrètement au final? → On fait un étalonnage préalable pour avoir le facteur de proportionnalité et l'ordonnée à l'origine.
- Comment marche un balance? → Certaines sont équipées de capteurs piézoélectriques.
- Exemples de matériaux piézo? → Sel de Seignette, quartz.
- Expliquer ce que fait le montage du III. → Convertiseur charge-tension : la sortie est proportionnelle à la charge. Pourquoi avoir choisi de suivre la charge et pas la capacité? →
- Est-ce que la tension en sortie du montage du III. aurait pu être amplifiée? → Rien n'interdit un étage d'amplification avec un ALI. On aurait pu amplifier jusqu'à ce que l'amplitude du signal atteigne la tension de saturation de l'ALI.
- Explique le principe du micro. → Cf rapport.
- Où apparaît l'effet capacitif dans le micro? → Cf rapport.
- Avantage de ce micro par rapport à un micro avec bobine? → Pour avoir une grande sensibilité avec un microphone à bobine, il faut que la bobine plonge dans un champ magnétique très intense. Il faut donc de gros aimants pour produire ce champ (voir **Lasne**, *Électrotechnique* pour le dimensionnement d'un aimant). La sensibilité d'un microphone à électret doit être meilleure à taille et masse comparables.

Remarques

- Il manque les valeurs tabulées au tableau.
- Si la partie II.B s'appelle "Mesure de niveau", il faut mesurer la capacité puis en déduire h à partir de l'étalonnage devant le jury. En particulier, le point qui est pris devant le jury ne doit pas servir de point supplémentaire pour l'étalonnage.
- Rien ne doit bouger dans la première manip car sinon tout change à cause d'une erreur systématique qui n'est plus systématique. Ne pas effacer les mesures qui posent problème. Il vaut mieux les corriger que de passer à la suite du montage.
- Ne plus dire AO mais ALI.
- Problème majeur de $\varepsilon_r^{\text{eau}}$: la valeur tabulée vaut pour de l'eau distillée, même fraîchement distillée.