

Effets capacitifs

Matériel

- plaque condensateur d'Aepinus
- RLC-mètre
- plaquette électronique + ALI + alimentation
- résistances de 10 kΩ, 100 kΩ et 200 Ω
- capacité de 20 nF
- GBF
- oscilloscope
- câble coaxial de 100 m + résistance variable
- photodiode PIN10-DP
- DEL
- voltmètre

Introduction

Lorsqu'il existe une différence de tension entre deux conducteurs en regard, il apparaît une charge surfacique sur chacun d'eux, par effet électrostatique. C'est l'effet capacitif. Nous allons tenter de caractériser la grandeur qui quantifie la relation entre charge et tension : la capacité C .

I Le condensateur d'Aepinus

Dans un premier temps on va s'attacher à mieux comprendre la formule qui donne la capacité en fonction des grandeurs géométriques du système.

Que ce passe-t-il ? Si on applique une tension, alors on applique un champ élec, donc on va attirer les électrons vers le bord pour une plaque; les en éloigner pour l'autre plaque. Qualitativement :

- $C \propto 1/e$ car si très éloignés, à U fixé, $E \sim$ décroît en $1/e$ donc plus d'influence.
- $C \propto S$ car charge localisée en surface
- $C \propto \epsilon_r$ car quantifie réponse du milieu inter-plaque (plus il est fort, plus les charges se réarrangent au sein du diélectrique, donc plus Q est grand).

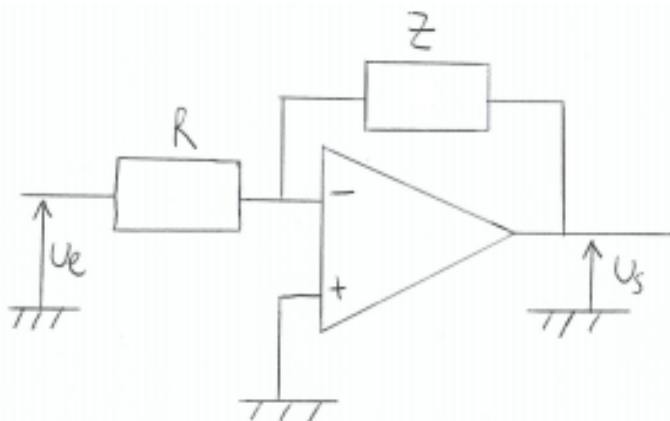
On peut montrer que pour un condensateur plan infini : $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e}$

On va vérifier la dépendance en $1/e$ à travers l'exemple du condensateur d'Aepinus. Principe : on fait varier e et on mesure C . On trace $C = f(1/e)$ en ajustant la permittivité. La mesure se fait avec un RLC-mètre.

La mesure de la capacité du condensateur d'Aepinus se fait avec un RLC-mètre avec un branchement aux différentes armatures (et à la garde). On cherche à mesurer une capacité très faible (quelques pF) il faut donc faire attention pour s'affranchir de toutes les capacités parasites.



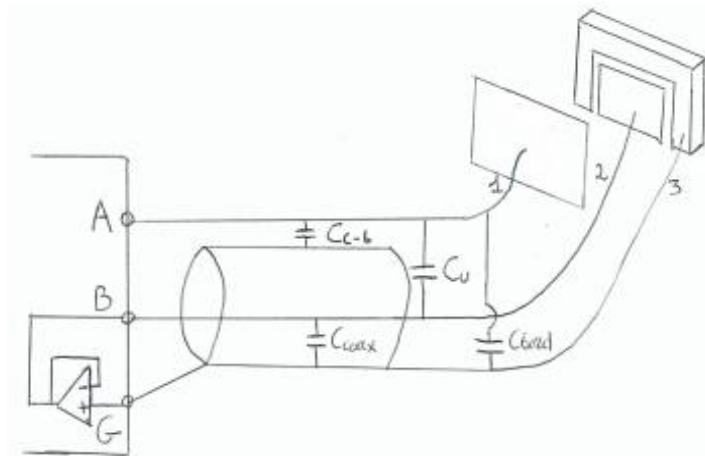
L'objectif est de vérifier la loi (1) en ajustant la permittivité entre les deux plaques du condensateur. Pour cela on mesure la capacité à l'aide d'un RLC-mètre à haute fréquence (100 kHz) pour limiter les incertitudes et on se place sur la mesure de « C ». Un RLC-mètre fonctionne sur la base du montage à AO suivant :



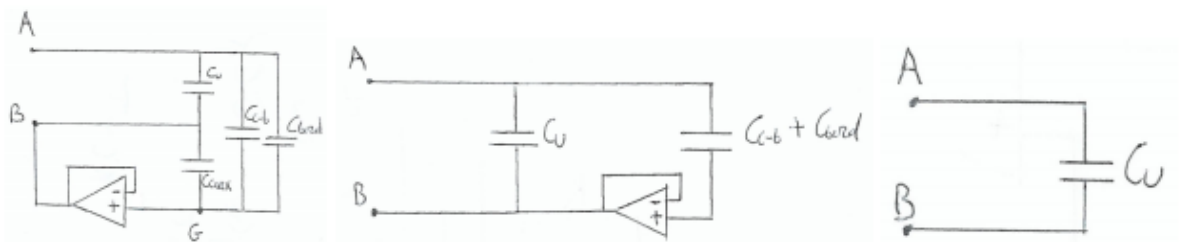
En mesurant la phase et l'amplitude de U_e on peut remonter à l'impédance car $U_s/U_e = -R/Z$. L'angle donné en haut à droite de l'écran du RLC-mètre est le déphasage entre U_s et U_e , c'est donc une mesure directe de la phase de Z et donc du caractère capacitif/résistif/inductif du composant testé. On a intérêt à avoir Z « ni trop grand ni trop petit » → si on veut mesurer de faibles capacités on travaille à haute fréquence ($Z = 1/jC\omega$). Au départ on envoie un signal d'amplitude 1Vpp à $f = 1$ kHz (on fait varier la fréquence de 1 kHz à 7 kHz). On mesure le gain, on en déduit C : $G = RC\omega$.

On doit effectuer un étalonnage préalable de la vis micrométrique, en effet un déplacement nul de celle-ci ne correspond pas au cas où les deux plaques se touchent. Pour cela on utilise une bille prévue à cette effet (10 mm, à mesurer au pied à coulisse). On peut également avec celle-ci évaluer le parallélisme des deux plaques, en mesurant l'espacement à différent endroits de la plaque. Pour calculer la valeur de « l'offset » (espacement entre les plaques lorsque le vernier indique 0), on fait la moyenne des écarts entre l'espacement mesuré et le rayon de la bille.

Enfin la surface S en regard est donnée dans la notice. Pour tenir compte de l'effet des capacités parasites résiduelles on ajuste une droite affine où l'ordonnée à l'origine prend en compte ces effets.



Dans le RLC-mètre on a un AO placé en suiveur entre les bornes 2 et 3, ce qui impose le même potentiel aux bornes 2 et 3, et élimine donc la capacité du câble coaxial ($C = U/Q = 0$). Il ne nous reste plus que des capacités en parallèle de C_u . Or elles sont toutes les deux en série avec l'AO qui a une très grande impédance, donc leur effet est négligeable, du moins tant qu'on est à suffisamment haute fréquence (résistance entrée de l'AO $\sim 10^{12} \Omega$, on a de la marge...). Puisqu'on a imposé $V_B = V_G$ avec le suiveur, elles sont en parallèle de C_u , on a alors le montage électrique équivalent suivant :

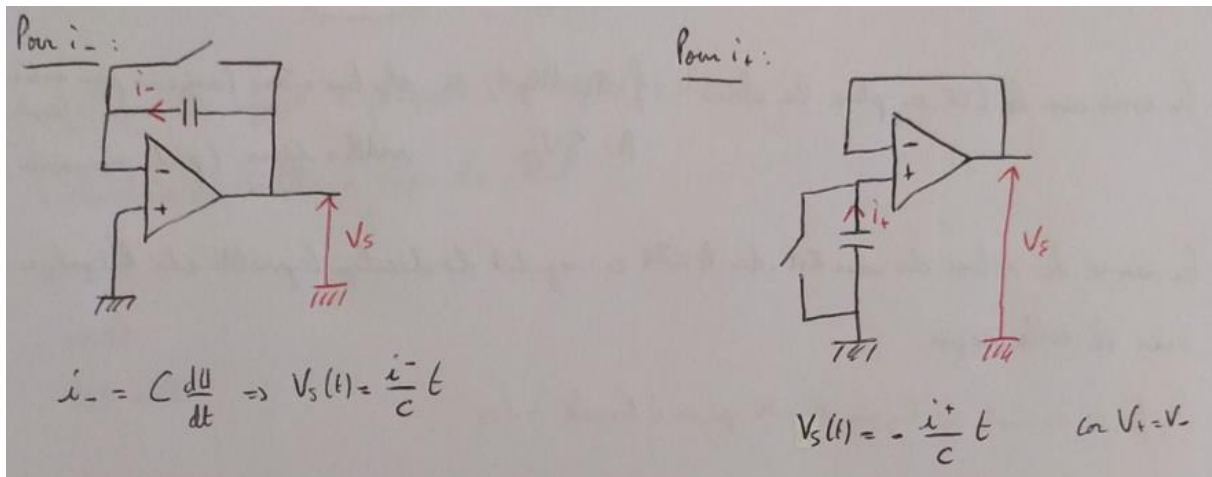


Donc avec ce montage, on s'affranchit à la fois des effets de bord et des capacités parasites du branchement

Maintenant qu'on a mis en évidence le phénomène, on va examiner le comportement d'une bobine à haute fréquence.

II Mesure des courants d'un ALI

Pour un ALI idéal, $i_+ = i_- = 0$. En pratique ce n'est pas tout à fait le cas. Pour les mesurer on utilise le montage suivant :

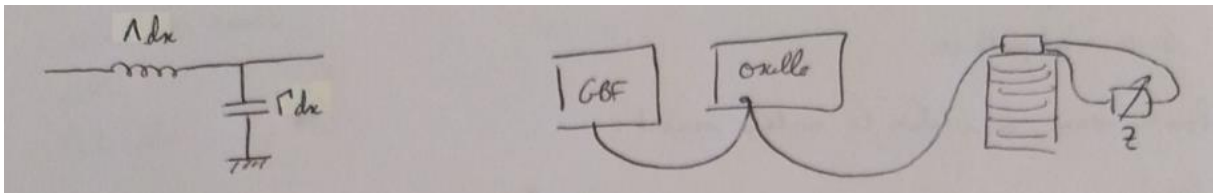


Ne pas prendre C trop grande (sinon pente trop faible) ni trop petite (sinon les capacités parasites ne sont pas négligeables). C = 10 nF est un bon compromis.

On ferme l'interrupteur au départ. On ouvre l'interrupteur : le condensateur se charge et on observe V_s . On trace V_s en fonction de t. En ayant mesuré C avec un RLC-mètre, on remonte au courant (de l'ordre du pA).

III Effets capacitifs dans le câble coaxial

Le but est de montrer l'effet capacitif entre les deux conducteurs du câble.



On envoie avec le GBF une impulsion d'amplitude 5V et de fréquence 500 kHz, edge time : 5 ms (assez court pour avoir une montée franche), width : 100 ms (pas de superposition). On mesure la célérité des ondes électromagnétiques dans le câble en regardant le décalage temporel entre l'impulsion émise et celle reçue, $c = \frac{1}{\sqrt{L\Gamma}}$. L'impédance du câble est : $Z_c = \sqrt{\frac{L}{\Gamma}}$. Avec une résistance Z en sortie, le

coefficient de réflexion en tension vaut : $R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c}$, soit : $Z = Z_c \frac{1+R}{1-R}$

Il faut prendre en compte l'atténuation dans le câble lors des mesures de R : on divise toutes les valeurs par R_0 , en théorie cette valeur est -1 ($Z = 0$), pas dans la pratique. On trace $\ln(Z)$ en fonction de $\ln(\frac{1+R}{1-R})$, on en déduit Z_c , puis la capacité linéique Γ : $\Gamma = \frac{1}{cZ_c}$.

IV Mesure de la capacité de jonction d'une photodiode

Une photodiode est constituée d'une jonction PN. Le côté P possède un excédent de trous libres et des porteurs de charge fixes négatifs. Le côté N possède un excédent d'électrons libres et des porteurs de charge fixes positifs. Lorsqu'on les approche, les électrons et les trous vont diffuser (trou vers N et

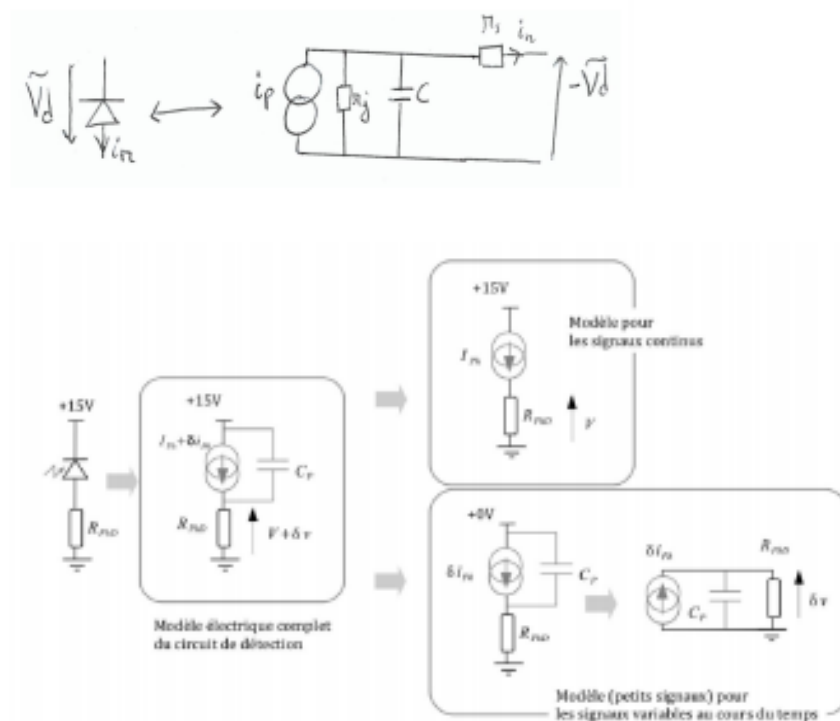
électrons vers P), créant une zone de charge d'espace (là où les porteurs de charge fixe n'ont plus un électron/trou pour les neutraliser) créant un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des électrons/trous. On a donc un champ électrique entre deux conducteurs portant des charges surfaciques : effet capacitif.

Avec un modèle d'une jonction PN abrupte 2D plan-plan polarisée en inverse on montre que :

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + \frac{V_d}{V_0}}}$$

est la différence d'énergie de part et d'autre de la zone de charge libre. On cherche à vérifier cette loi en ajustant C_0 et V_0 .

On envoie une tension continue sur la photodiode (quelques volts, potentiomètre V_0) avec une légère modulation (environ 100 mV) à 500 Hz environ. On choisit une fréquence suffisamment faible pour que le régime permanent soit atteint et suffisamment grande pour la rapidité de la mesure. Il faut placer une résistance (200 Ω) en série de la DEL pour la protéger. On place une forte résistance en série avec la photodiode pour convertir le courant produit en une tension importante (typiquement $R_m = 100 \text{ k}\Omega$). On place également un voltmètre aux bornes de la photodiode pour relever sa tension (on le retire lors de la mesure du temps de montée, ça perturbe le signal). Puis on mesure le temps de montée à 63% de la tension aux bornes de la résistance pour en déduire $\tau = R_m C$ et donc C .



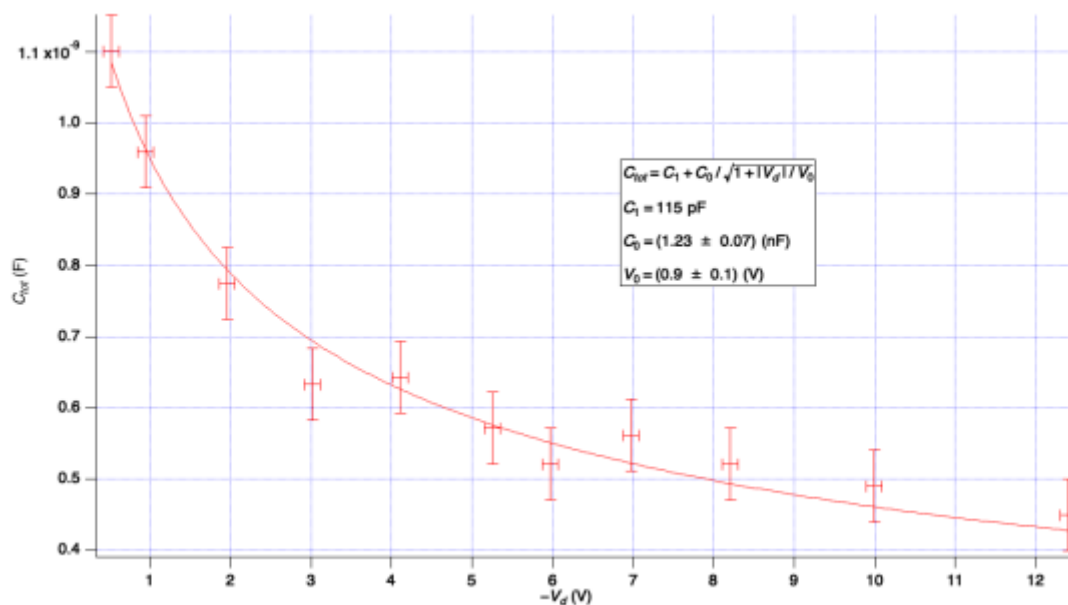
Dans la suite on néglige r_s devant R_m et on suppose que r_j est infinie, il ne reste donc plus qu'une source de courant en parallèle avec une capacité.

La puissance optique reçue a une composante continue (la tension continue dans la photodiode) et une petite modulation (celle à 500 Hz). Or on veut mesurer le temps de réponse à V_d fixée, c'est pourquoi il faut prendre une composante continue importante, pour pouvoir négliger les modulations.

$$V_{pol} = \langle V_d \rangle + R_m \langle i \rangle = \langle V_{pol} \rangle \quad R_m \tilde{i} = -\tilde{V}_d$$

Or pour des petites variations, la photodiode se modélise comme une source de courant en parallèle avec une capacité de jonction C (celle qu'on a modélisé juste au-dessus). En regardant la seconde équation, on a donc un circuit RC avec une source de courant alternative, d'où un modèle du premier ordre et un temps de réponse à 63%.

On fixe une capacité parasite à 115pF, capacité du câble coaxial reliant la photodiode à la carte mesuré au RLC-mètre. On obtient la courbe suivante :



On a intérêt à prendre $|V_d|$ le plus grand possible pour que la diode soit la plus rapide possible, attention tout de même à ne pas dépasser la tension de claquage.

Remarque : Ne pas utiliser la photodiode de la carte fibre optique plastique

Conclusion

Dans ce montage, nous avons mis en évidence les effets capacitifs de différents systèmes.

Questions

- Électrode garde ?
- ➔ Évite les effets de bord et minimise l'effet des capacités parasites