

Constante diélectrique de différents matériaux



Phy

Physique

Électricité et magnétisme

Circuits simples, Résistances, Condensateurs

science appliquée

Ingénierie

Électrotechnique

Propriétés de composants électriques

science appliquée

Ingénierie

Énergies renouvelables

Principes fondamentaux



Niveau de difficulté

dur



Taille du groupe

-



Temps de préparation

10 minutes



Temps d'exécution

20 minutes



Informations générales

Application



Fig.1 : Dispositif expérimental

Connaître la constante diélectrique de différents matériaux est très important pour comprendre le comportement des champs électriques dans la matière, ce qui a de nombreuses applications partout où les champs électriques sont utilisés.

Autres informations (1/2)

PHYWE
excellence in science

Priorité

connaissances



Principal

principe

Les connaissances préalables requises pour cette expérience se trouvent dans la partie théorique.

La constante électrique ϵ_0 est déterminée en mesurant la charge d'un condensateur à plaques auquel on applique une tension. La constante diélectrique ϵ_0 est déterminée de la même manière, le plastique ou le verre remplissant l'espace entre les plaques.

Autres informations (2/2)

PHYWE
excellence in science

Apprentissage

objectif



Tâches

Le but de cette expérience est d'étudier la constante diélectrique de différents matériaux.

1. La relation entre la charge Q et la tension U doit être mesurée à l'aide d'un condensateur à plaque.
2. La constante électrique ϵ_0 est à déterminer à partir de la relation mesurée au point 1.
3. La charge d'un condensateur à plaques doit être mesurée en fonction de l'inverse de la distance entre les plaques, sous une tension constante.
4. La relation entre la charge Q et la tension U doit être mesurée au moyen d'un condensateur à plaques, entre les plaques duquel différents milieux diélectriques solides sont introduits.

Théorie (1/12)



Les processus électrostatiques dans le vide (et avec un bon degré d'approximation dans l'air) sont décrits par la forme intégrale suivante des équations de Maxwell :

$$\iint \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\iint \vec{E} d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

où \vec{E} est l'intensité du champ électrique, Q la charge enfermée dans la surface fermée A , ϵ_0 la constante électrique et S un chemin fermé.

Si une tension U est appliqué entre deux plaques de condensateur, un champ électrique \vec{E} prévaudra entre les plaques, ce qui est défini par :

$$U_c = \int_1^2 \vec{E} d\vec{r}$$

Théorie (2/12)

Sous l'effet du champ électrique, les charges électrostatiques de signe opposé sont attirées vers les surfaces du condensateur. Comme les sources de tension ne génèrent pas de charges, mais peuvent seulement les séparer, les valeurs absolues des charges d'induction électrostatique opposées doivent être égales. En supposant que les lignes de champ du champ électrique sont toujours perpendiculaires aux surfaces du condensateur de surface A . En raison de la symétrie, qui peut être vérifiée expérimentalement pour de petites distances d entre les plaques du condensateur, on obtient l'équation (1) :

$$C = \epsilon \cdot C_{\text{vac}} \quad (3)$$

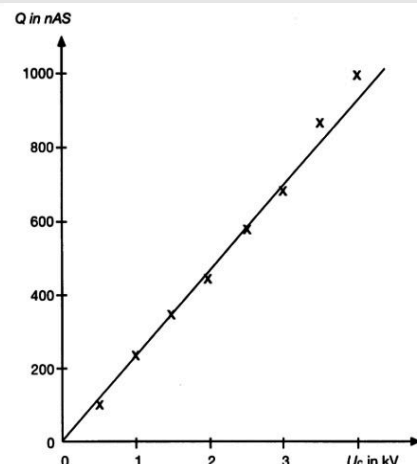


Fig 2 : Charge électrostatique Q d'un condensateur à plaques en fonction de la tension appliquée U_c ($d = 0.2\text{cm}$).

Théorie (3/12)

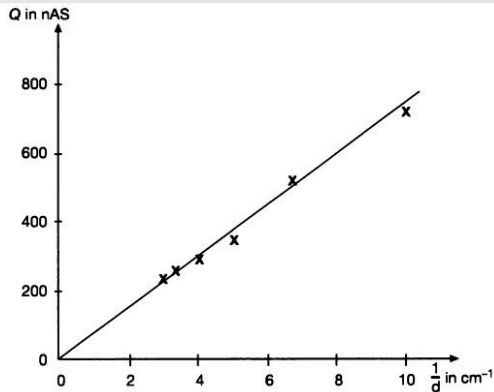


Fig 3 : Charge électrostatique Q d'un condensateur à plaques en fonction de l'inverse de la distance entre les plaques du condensateur $1/d$ ($U_c = 1,5$ kV).

Le volume indiqué dans la figure 7, qui ne contient qu'une seule plaque de condensateur, a été pris comme volume d'intégration. Comme la surface à l'intérieur du condensateur peut être déplacée sans modifier le flux, le champ du condensateur est homogène. Le flux et le champ électrique \vec{E} à l'extérieur du condensateur sont nulles, car pour des volumes arbitraires qui enferment les deux plaques du condensateur, la charge totale enfermée est nulle.

La charge Q du condensateur est donc proportionnelle à la tension ; la constante de proportionnalité C est appelée capacité du condensateur.

$$Q = CU_c = \epsilon_0 \frac{A}{d} \cdot U_C \quad (4)$$

Théorie (4/12)



La relation linéaire entre la charge Q et la tension U appliquée au condensateur par ailleurs inchangé est représentée à la figure 2. L'équation (4) montre en outre que la capacité C du condensateur est inversement proportionnelle à la distance d entre les plaques :

$$Q = \epsilon \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d} \cdot U_C \quad (5)$$

Pour une tension constante, la distance inverse entre les plaques, et donc la capacité, est une mesure de la quantité de charge qu'un condensateur peut absorber (cf. fig. 5). Si l'inverse de la distance entre les plaques U , Q , d et A ont été mesurées, ces données de mesure permettent de calculer la constante électrique ϵ_0 :

$$\epsilon_0 = \frac{d}{A} \cdot \frac{Q}{U_c} \quad (6)$$

Dans cet exemple de mesure, on obtient $\epsilon_0 = 8.8 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm), par rapport à la valeur exacte de $\epsilon_0 = 8.85420 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm)

Théorie (5/12)

Les équations (4), (5) et (6) ne sont valables qu'approximativement, en raison de l'hypothèse selon laquelle les lignes de champ sont parallèles. Lorsque les distances sont trop grandes, l'approximation du champ homogène ne fonctionne plus suffisamment, ce qui donne systématiquement une constante électrique trop grande à partir de l'équation (6). C'est pourquoi la valeur de la constante électrique doit être déterminée pour une distance faible et constante entre les plaques (cf. fig. 2).

Les choses changent lorsque des matériaux isolants (diélectriques) sont insérés entre les plaques. Les diélectriques n'ont pas de porteurs de charge en mouvement libre, comme les métaux, mais ils ont des noyaux positifs et des électrons négatifs.

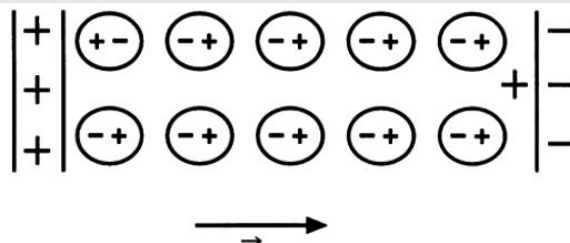


Fig. 4 : Génération de charges libres dans un diélectrique par polarisation des molécules dans le champ électrique d'un condensateur à plaques.

Théorie (6/12)



Ceux-ci peuvent être disposés le long des lignes d'un champ électrique. Des molécules auparavant non polaires se comportent ainsi comme des dipôles localement stationnaires. Comme le montre la figure 4, les effets des dipôles individuels s'annulent macroscopiquement à l'intérieur du diélectrique. Cependant, aucun partenaire de charge opposée n'est présent sur les surfaces ; celles-ci ont donc une charge stationnaire, appelée charge libre.

Les charges libres affaiblissent à leur tour le champ électrique \vec{E} des charges réelles Q , qui se trouvent sur les plaques du condensateur, à l'intérieur du diélectrique. L'affaiblissement du champ électrique \vec{E} dans le diélectrique est exprimée par la constante diélectrique spécifique du matériau sans dimension ϵ ($\epsilon = 1$ dans le vide) : $\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$ (7)

Théorie (7/12)

où \vec{E}_0 est le champ électrique généré uniquement par les charges réelles Q . Ainsi, le champ opposé généré par les charges libres doit être $\vec{E}_f = \vec{E}_0 - \vec{E} = \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} \vec{E}_0$ (8)

En négligeant les charges à l'intérieur du volume du diélectrique de manière macroscopique, seules les charges de la surface libre ($\pm Q_f$) génèrent effectivement le champ opposé :

$$E_f = \frac{Q_f}{A\varepsilon_0} = \frac{Q_f \cdot d}{V\varepsilon_0} = \frac{p}{V\varepsilon_0} \quad (9)$$

où p est le moment dipolaire total des charges de surface. Dans le cas général d'un diélectrique inhomogène, l'équation (9) devient :

$$\vec{E}_f = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \frac{d\vec{P}}{dV} = \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{P} \quad (10)$$

Théorie (8/12)

où \vec{P} -Le moment dipolaire total par unité de volume est appelé polarisation diélectrique.

Si en plus un \vec{D} -(déplacement diélectrique) est défini :

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (11)$$

dont les lignes de champ ne commencent ou ne se terminent que par des charges réelles (directement mesurables), les trois grandeurs électriques, l'intensité du champ \vec{E} , déplacement diélectrique \vec{D} et la polarisation diélectrique \vec{P} sont liées entre elles par l'équation suivante :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

Théorie (9/12)

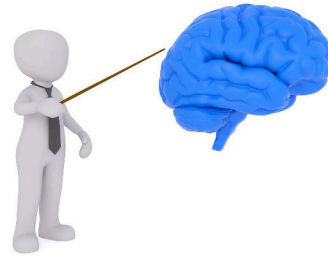
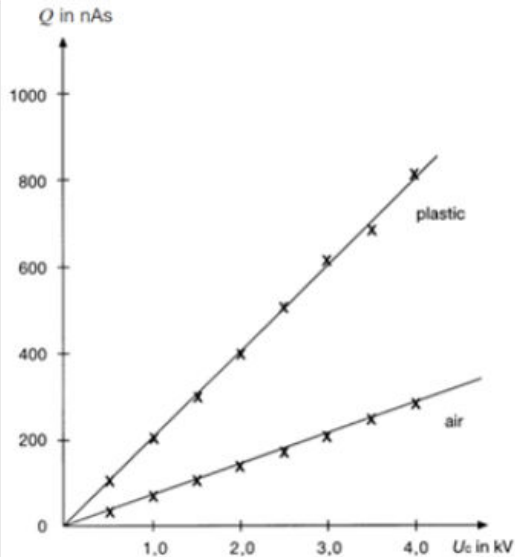


Figure 5 : Charge électrostatique Q d'un condensateur à plaques en fonction de la tension appliquée U_c avec et sans diélectrique (plastique) entre les plaques ($d = 0,98 \text{ cm}$)

Théorie (10/12)

Si la charge réelle Q reste sur le condensateur, tandis qu'un diélectrique est inséré entre les plaques, selon la définition (3), la tension U_c entre les plaques est réduite par rapport à la tension U_{vac} dans le vide (ou, selon une bonne approximation, dans l'air) par la constante diélectrique :

$$U_C = \frac{U_{vac}}{\epsilon} \quad (12)$$

De même, on obtient la définition de la capacité (4) :

$$C = \epsilon \cdot C_{vac} \quad (13)$$

La forme générale de l'équation (4) est la suivante :

$$Q = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot U_c \quad (14)$$



Théorie (11/12)

PHYWE
excellence in science

Plaque en plastique diélectrique

Dans la figure 5, la charge Q sur le condensateur est tracée en fonction de la tension de plaque appliquée U_c pour comparaison avec la situation avec et sans plaque plastique entre les plaques du condensateur, toutes les autres conditions restant inchangées : ainsi, pour la même tension, la quantité de charge du condensateur est significativement augmentée par le diélectrique, dans cet exemple par un facteur de 2,9.

Si les charges obtenues avec et sans plastique (équations [4] et [14]) sont divisées l'une par l'autre :

$$\frac{Q_{\text{plastic}}}{Q_{\text{vacuum}}} = \epsilon \quad (15)$$

la valeur numérique obtenue est la constante diélectrique du plastique.

Théorie (12/12)

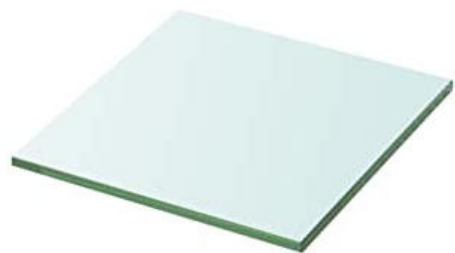
PHYWE
excellence in science

Pour les plaques de verre, une valeur de $\epsilon = 9.1$ est obtenu de la même manière.

Afin de prendre en considération l'influence des charges libres décrite ci-dessus, l'équation de Maxwell (1) est généralement complétée par la constante diélectrique ϵ du diélectrique qui remplit le volume correspondant :

$$\iint_A \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} d\vec{A} = \iint \vec{D} d\vec{A} = Q \quad (16)$$

L'équation (14) devient donc l'équation (4).



plaque de verre diélectrique

Equipement

Position	Matériau	Numéro d'article	Quantité
1	PHYWE Alimentation haute tension avec affichage numérique, 10 kV DC : 0... ± 10 kV, 2 mA	13673-93	1
2	PHYWE Amplificateur de mesure universel	13626-93	1
3	Condensateur à plaques, d 260mm	06220-00	1
4	Plaque en plastique (diélectrique), 283 x 283 mm	06235-00	1
5	Plaque de verre (diélectrique), 300 x 300 mm	06233-03	1
6	PHYWE Multimètre numérique, 600V AC/DC, 10A AC/DC, 20 MΩ, 200 μF, 20 kHz, -20°C...760°C	07122-00	1
7	Cordon de raccordement, 30 kV, 500 mm	07366-00	1
8	Cordon de raccordement, 100 mm, vert-jaune	07359-16	1
9	Cordon de raccordement, 32 A, 500 mm, rouge	07361-01	1
10	Cordon de raccordement, 32 A, 500 mm, bleu	07361-04	1
11	Cordon de raccordement, 32 A, 1000 mm, jaune	07363-02	1
12	Résistance de haute valeur, 10 MOhm	07160-00	1
13	Condensateur 220nF/250V, G1	39105-19	1
14	Câble blindé, BNC, l = 750 mm	07542-11	1
15	Adaptateur, prise BNC/prise 4 mm	07542-20	1
16	Connecteur, type T, BNC	07542-21	1
17	Adaptateur, paire BNC mâle/4 mm femelle	07542-26	1



Configuration et procédure

Mise en place

Le dispositif expérimental est illustré à la figure 1 et le schéma de câblage correspondant à la figure 6. La plaque du condensateur hautement isolé est connectée au connecteur supérieur de l'alimentation haute tension par l'intermédiaire de l'interrupteur d'alimentation. $10M\Omega$ des résistances de protection. Le connecteur central de l'alimentation haute tension et la plaque opposée du condensateur sont tous deux mis à la terre par l'intermédiaire de l'alimentation haute tension et de la plaque opposée du condensateur. $220nF$ condensateur.

La mesure correcte de la tension initiale doit être assurée par le réglage correspondant de l'interrupteur à bascule de l'appareil. La charge d'induction électrostatique sur le condensateur à plaques peut être mesurée par la tension sur l'interrupteur à bascule de l'appareil. $220nF$ selon l'équation (4). L'amplificateur de mesure est réglé sur une résistance d'entrée élevée, un facteur d'amplification de 1 et une constante de temps de 0.

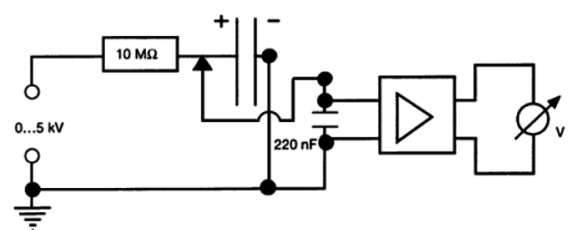


Fig. 6 : Schéma de câblage

Procédure (1/2)



Dans un premier temps, le condensateur à plaques est chargé à l'aide de l'alimentation haute tension. Dans un deuxième temps (avec l'alimentation haute tension déconnectée !), la charge du condensateur à plaques est mesurée.

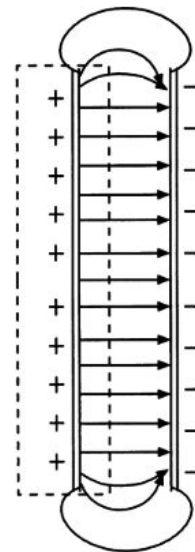
Dans un premier temps, la surface des plaques du condensateur est déterminée à l'aide de leur rayon. L'expérience se déroule en deux parties :

- Dans la première partie, la distance entre les plaques du condensateur à plaques est modifiée sous une tension constante, et la charge sur les plaques du condensateur est mesurée. La relation linéaire entre la charge et la tension du condensateur à plaques est ensuite vérifiée. Les données mesurées permettent de déterminer la constante électrique. ϵ_0 Veuillez à ne pas vous trouver à proximité du condensateur pendant les mesures, sinon le champ électrique du condensateur risque d'être déformé.

Procédure (2/2)

- Dans la deuxième partie, la dépendance de la charge d'induction électrostatique par rapport à la tension, avec et sans plaque en plastique (sans entrefer !), est examinée dans l'espace entre les plaques, avec la même distance entre les plaques. Le rapport entre les charges d'induction électrostatique permet de déterminer la constante diélectrique ϵ_0 de plastique. La constante diélectrique de la plaque de verre est déterminée de la même manière.

Fig. 7 : Champ électrique d'un condensateur à plaques avec une faible distance entre les plaques, comparée au diamètre des plaques. Les lignes pointillées indiquent le volume d'intégration.





L'évaluation

Résultats (1/2)

Mesure de la constante électrique :

$$A = 0.0531 \text{ m}^2 \quad U_c = 1.5 \text{ kV} \quad C = 218 \text{ nF}$$

U [V]	3.3	2.4	1.6	1.35	1.2	1.1
d [cm]	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
$1/d$ [cm ⁻¹]	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3	2.9
Q [nAs]	719	523	350	294	262	240
ε_0 [pAs/Vm]	9.00	9.85	8.75	9.25	9.85	10.50

$$A = 0.0531 \text{ m}^2 \quad d = 0.2 \text{ cm} \quad C = 218 \text{ nF}$$

U_c [kV]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
U [V]	0.5	1.1	1.6	2.05	2.65	3.15	4.0	4.6
Q [nAs]	109	240	348	447	578	687	872	1003
ε_0 [pAs/Vm]	8.2	9.0	8,7	8.4	8.7	8.6	9.4	9.5

Résultats (2/2)

Measurement of dielectric constant

Plastic: $A = 0.0531 \text{ m}^2$ $d = 0.98 \text{ cm}$ $C = 218 \text{ nF}$

$U_c [\text{kV}]$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$U [\text{V}]$	0.5	0.92	1.35	1.8	2.3	2.8	3.1	3.7
$Q [\text{nAs}]$	109	201	294	392	501	610	676	807
$Q \frac{d}{A \epsilon_0} \frac{1}{U_c}$	4.6	4.2	4.1	4.1	4.2	4.3	4.0	4.2
$U_{\text{vac}} [\text{V}]$	0.16	0.32	0.51	0.62	0.78	0.95	1.12	1.3
$Q_{\text{vac}} [\text{nAs}]$	35	70	111	135	170	207	244	283
Q/Q_{vac}	3.1	2.9	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9

Glass: $d = 0.17 \text{ cm}$ $\bar{U} = 5.8 \text{ V}$ $Q = 1.264 \mu\text{As}$ $U_c = 500 \text{ V}$
 $\epsilon_{\text{glass}} = 9.1$