



PeiP2 : **Electricité et magnétisme**

TP électrostatique (v. 2024)

Les phénomènes électriques mettent en jeu des charges réparties à la surface ou à l'intérieur de matériaux. Si l'interaction entre quelques charges ponctuelles statiques peut être décrite par les forces de Coulomb, en présence d'un grand nombre de charges il est incontournable d'introduire la notion de champ électrique. Dans le cas de l'électrostatique on montre que le champ électrique dérive d'un champ scalaire, le potentiel électrique, qui représente l'énergie potentielle d'une charge unité. Ceci s'exprime par la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V$$

Un cas particulier important est celui des conducteurs à l'équilibre électrostatique car le champ électrique y est nul, les conducteurs constituant alors des équipotentielles. D'un point de vue pratique, le potentiel des conducteurs peut être contrôlé à l'aide d'une alimentation électrique continue qui permet de maintenir une différence de potentiel (d.d.p., dite aussi « tension ») constante entre le conducteur et la Terre, ou bien entre deux conducteurs. L'alimentation permet donc de déposer une charge électrique sur le conducteur. A l'équilibre, les charges sont distribuées en surface du/des conducteur(s) et génèrent un champ électrique dans l'espace environnant. Ces surfaces conductrices chargées s'appellent des électrodes et leur géométrie détermine l'allure des lignes du champ électrique.

Dans ce TP nous utilisons une alimentation continue à basse tension pour charger des électrodes de formes simples (circulaires ou planes) et nous proposons deux objectifs :

1. Mesurer le potentiel électrique créé dans l'espace par deux électrodes circulaires concentriques soumises à une d.d.p.. Nous vérifierons dans cette géométrie l'équation de Laplace vérifiée par le potentiel électrostatique en tout point de l'espace vide de charge électrique :

$$\Delta V = 0$$

2. Mesurer la capacité d'un condensateur plan en fonction de la distance entre les plaques. Pour rappel, dans un condensateur, constitué de deux conducteurs en regard (dits "armatures"), ces dernières portent des charges opposées et le phénomène d'influence est mis à profit pour accumuler, à d.d.p. donnée, une charge plus importante que sur un conducteur isolé. On veut vérifier qu'en géométrie plane la capacité est inversement proportionnelle à la distance entre les conducteurs, suivant la loi :

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

I- Mesures pour les jeux d'électrodes circulaires

Description du matériel

- On dispose de deux jeux d'électrodes circulaires concentriques :

	Electrode intérieure	Electrode extérieure
Jeu 1	électrode pleine $\varnothing = 15$ mm	$\varnothing_{\text{int}} = 80$ mm et $\varnothing_{\text{ext}} = 90$ mm
Jeu 2	$\varnothing_{\text{int}} = 60$ mm et $\varnothing_{\text{ext}} = 80$ mm	$\varnothing_{\text{int}} = 80$ mm et $\varnothing_{\text{ext}} = 90$ mm

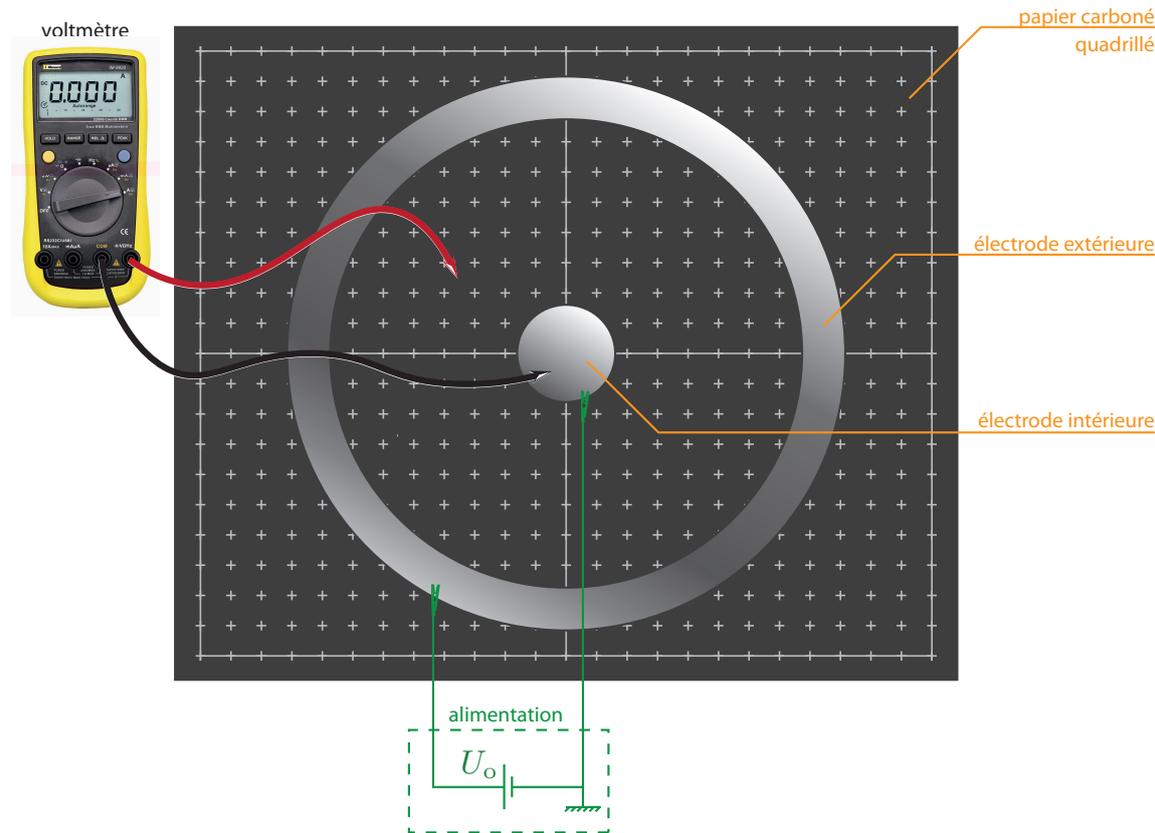
- Les électrodes en aluminium sont fixées sur une plaque isolante en plastique (polyméthacrylate de méthyle) au moyen de vis de serrage, une feuille de papier carbonée étant intercalée entre les électrodes et la plaque isolante.

NB : ne pas toucher au montage électrodes /papier carboné /plaque isolante.

- L'alimentation ELC stabilisée délivre une tension continue (trois valeurs possibles : 10V, 12V ou 15V). Les liaisons électriques entre les électrodes et l'alimentation sont assurées à l'aide de fils et pinces crocodiles.
- Un multimètre avec une sonde.
- Une webcam montée sur pied reliée par port USB à l'ordinateur.

Principe de la mesure

On établit une différence de potentiel U_0 entre les deux électrodes (*mesurer la valeur de U_0 à l'aide du multimètre*). Les électrodes étant en contact électrique avec la feuille de papier carboné, elle-même conductrice, il existe alors en tout point du papier carboné un champ électrique. A l'aide de la sonde du multimètre amenée au contact du papier carboné conducteur, on mesure la différence de potentiel existant entre l'électrode intérieure, de potentiel nul, et un point quelconque du plan.



NB : La conductivité du papier étant faible (de l'ordre de quelques 1 S m^{-1} , à comparer à quelques 10^7 S m^{-1} pour l'aluminium), le courant électrique généré dans le papier carboné reste négligeable. D'autre part, en régime permanent on peut justifier que l'équation de Laplace rappelée en introduction reste valable dans le conducteur ohmique¹.

Tracé des courbes équipotentiels

Utiliser le jeu n°1 d'électrodes pour tracer une équipotentielle. Par exemple, pour $U_0 \approx 12 \text{ V}$, choisir $V_0 = 9 \text{ V}$.

1. Par contacts successifs de la sonde avec le papier carboné (attention à ne pas appuyer de manière excessive sur le papier), chercher les positions correspondant au potentiel V_0 choisi.
2. Visualiser l'image du dispositif à l'aide de la webcam et du logiciel d'acquisition *Image J* (à noter qu'il faut patienter au démarrage du logiciel qui présente quelques lenteurs). Ajuster la position

1. En effet, en régime permanent l'équation $\text{rot} \vec{E} = \vec{0}$ reste valable ce qui implique $\vec{E} = -\text{grad} V$. D'autre part, la conservation de la charge en régime permanent implique $\rho = 0$ et donc $\text{div} \vec{E} = 0$. L'équation de Laplace découle de ces deux relations.

de la webcam (centrer l'image sur le centre des électrodes). **Ne plus toucher au montage ou à la webcam! L'image enregistrée doit être fixe (seule la sonde du multimètre sera déplacée sur le papier).**

3. Relever la position du centre des électrodes ainsi que les positions d'une équipotentielle (si possible une vingtaine de points de mesures) à l'aide de l'outil "*Multi-point Tools*" d'Image J et sauvegarder le relevé des mesures comme "*ROI*" (détail de la procédure en annexe).
4. Exporter le "*ROI*" sous forme de fichier CSV que vous importerez dans le tableur d'OpenOffice.
5. Mettre en forme une figure représentant les points de l'équipotentielle (les coordonnées des points doivent être calculées en référence au centre des électrodes).
6. Interpréter l'allure de la courbe équipotentielle mesurée. Qu'en déduisez-vous quant à la direction du champ électrique? Expérimentalement, vérifier autour d'un point de mesure donné dans quelle direction le potentiel varie le plus vite.
7. Appliquer ensuite la différence de potentiel U_0 au jeu n°2 d'électrodes et mesurer le potentiel électrique dans la région intérieure de l'électrode intérieure. Interpréter.

Etude de la loi $V(\rho)$

Appliquer la différence de potentiel U_0 à nouveau au jeu n°1 d'électrodes.

1. En déplaçant la sonde le long d'une demi-droite (le plus simple est de choisir un axe du papier conducteur), mesurer avec la sonde du multimètre la valeur du potentiel $V(r)$ en différentes positions de coordonnée r entre les deux électrodes. Pour chaque point de mesure, relever la valeur de r avec *Image J* (détail de la procédure en annexe).
2. Représenter le graphe de V en fonction de $\frac{\rho}{R_1}$ avec une échelle semi-logarithmique, ou bien en fonction de $\ln(\frac{\rho}{R_1})$ avec une échelle linéaire.
3. Vérifier que les données expérimentales sont en accord avec la résolution de l'équation de Laplace, qui dans cette géométrie et avec les conditions aux limites imposées donne (cf. travail préparatoire) :

$$V(\rho) = \frac{V(R_2) - V(R_1)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \ln\left(\frac{\rho}{R_1}\right) + V(R_1)$$

NB : les valeurs de potentiel $V(R_i)$ mesurées sur le papier carboné à proximité des électrodes peuvent différer des valeurs de potentiel V_i des électrodes à cause de l'imperfection du contact électrique (chute de potentiel due à une résistance de contact non nulle).

II- Mesures pour le condensateur plan

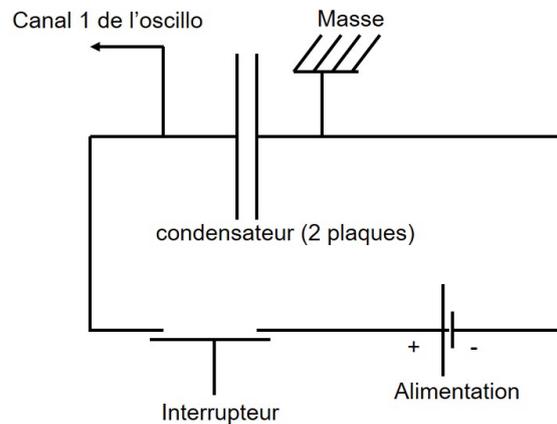
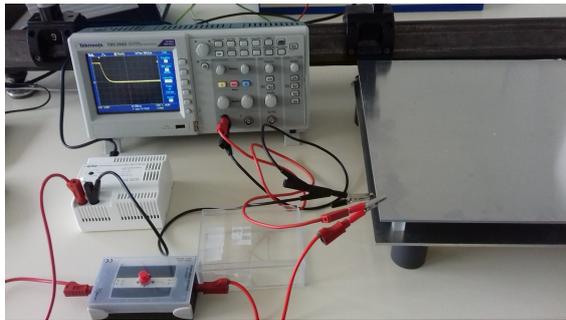
Description du matériel

- Deux plaques carrées d'aluminium de surface 350 mm × 350 mm.
- Un jeu de quatre pieds isolants en PVC, de hauteur 50mm, sur lesquels repose la plaque inférieure posée horizontalement.
- 5 jeux de 4 parallélépipèdes isolants, de section 10 mm × 10 mm, de hauteur h , à disposer entre la plaque inférieure et la plaque supérieure pour contrôler la distance d entre les deux plaques avec $d = 30$ mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm et 3 mm. On dispose aussi de lames isolantes d'épaisseur $d \approx 1$ mm (on pourra contrôler l'épaisseur d avec un pied à coulisse).
- La même alimentation ELC stabilisée qu'en partie I, délivrant une tension continue, pour établir une différence de potentiel entre les deux plaques.
- Un interrupteur actionné par un bouton-poussoir (ouvert si relâché, fermé si pressé).
- Un oscilloscope (de résistance d'entrée $R = 1.00$ M Ω).

Principe de la mesure

On fixe la distance d entre les plaques. Les deux plaques constituent un condensateur plan pour lequel l'approximation des plaques infinies est raisonnable (car d est petit devant les côtés de la plaque). Le volume des petites cales isolantes étant négligeable, le diélectrique entre les plaques est essentiellement de l'air, qu'on peut assimiler au vide.

Pour mesurer la capacité C du condensateur, on réalise sa décharge au travers d'une résistance, ici celle de l'oscilloscope qui nous permet également de mesurer la tension $V(t)$ aux bornes du condensateur, suivant le montage électrique représenté ci-dessous.



Pour charger/décharger le condensateur, il suffit d'enfoncer/relâcher le bouton-poussoir. La mesure de la décharge s'effectue à l'aide de l'oscilloscope en mode "normal". Pour cela, le déclencher sur la voie 1, pente descendante, et choisir le seuil de déclenchement en fonction de la valeur choisie pour la tension d'alimentation.

Travail à faire

- Réaliser la mesure de la décharge du condensateur pour les 5 valeurs de d . Faire attention à ne pas faire bouger la position des fils du montage lors de l'échange des cales isolantes. Pour s'affranchir du signal parasite de 50 Hz qui peut induire des oscillations visibles en fin de décharge, choisir une base de temps adaptée (par exemple pour $d = 30$ mm un bon compromis est une base de temps de 100 μ s). Enregistrer les données au format .csv à l'aide du logiciel *Open Choice Desktop*.
- Ajuster ensuite chacune des courbes expérimentales avec la loi de décroissance exponentielle attendue pour la décharge du condensateur

$$V(t) = V(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

où le temps caractéristique de décroissance est donnée par $\tau = RC$.

L'ajustement peut être réalisé à l'aide de *Regressi* avec la même procédure d'ajustement qu'en partie I (voir annexe).

Si la tension mesurée présente un offset, on peut être amené à utiliser deux variables d'ajustement, avec une fonction de la forme :

$$f(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + B$$

Dans *Regressi*, le modèle s'écrit alors : $V2=a*\exp(-t/\tau)+b$.

- Reporter dans une feuille de tableur les valeurs de d et les valeurs de τ correspondantes et calculer la valeur de la capacité $C = \frac{\tau}{R}$ où R est la résistance d'entrée de l'oscilloscope (à mesurer avec le tableau).
- Tracer le graphe de la capacité C en fonction de $1/d$, ajouter une "courbe de tendance". La relation apparaît-elle linéaire ou affine ? Conclusion.

ANNEXES au TP Electrostatique

Les logiciels utilisés sont accessibles depuis le dossier « TP Physique » situé sur le bureau. Toutes les données devront être sauves sur le lecteur « P : » qui est personnel à chaque étudiant (pour y accéder il suffit d'ouvrir la session de l'ordinateur avec son compte prenom.nom@u-psud.fr et son identifiant adonis).

Logiciel ImageJ

1. Dans le menu « Plugins », cliquer sur « IJ Webcam plugin » puis sélectionner la caméra Webcam C1700.
2. Calibration de l'échelle : après avoir réglé la position de la webcam, tirer un trait de longueur connue (par exemple un trait gradué du papier carboné) ; ouvrir le sous-menu « Analyse / Set scale » et indiquer sa valeur dans « known distance » et son unité dans « unit ». Sélectionner « global » pour que cette calibration s'applique à toutes les fenêtres ouvertes.
3. L'outil « ROI Manager » du sous-menu « Analyse / Tools » permet d'enregistrer des formes, traits, points etc. tracés par l'utilisateur comme ROI (Region Of Interest). Pour cela, après le tracé, cliquer sur « Add » dans le ROI Manager. On peut renommer la ROI, changer sa couleur, etc.
4. Il sera utile d'enregistrer le centre O des couronnes circulaires comme ROI.
5. Tracé d'une équipotentielle : dans la barre d'outils sélectionner « Multi-point Tool », cliquer successivement sur les points de mesures correspondant au potentiel. A la fin de la série de relevés, enregistrer l'ensemble des points comme ROI.
6. Toutes les ROI peuvent être superposées sur une fenêtre vierge à l'aide de « flatten » du « ROI Manager ». Sauver ensuite dans un format image.
7. Pour calculer les coordonnées d'un point M : les coordonnées cartésiennes $M(X, Y)$ seront importées dans un tableur et recalées par rapport aux coordonnées du centre O des électrodes $M(X - X_O; Y - Y_O)$.

Logiciel Regressi

1. Pour récupérer les données de l'oscilloscope :
 - exporter les données issues de l'oscilloscope au format .csv : « Capture données signal », « afficher les données », « enregistrer sous ».
 - NB** : pour que les données de l'oscillo soient lues correctement par *Regressi*, ouvrir le fichier .csv de l'oscillo sous *LibreOffice Calc* (sélectionner « virgule » en options de séparateur), ne conserver que les deux colonnes de données et sauver le fichier modifié au format .csv. Ensuite, ouvrir le fichier .csv dans *Bloc note*, remplacer les virgules par des points-virgules, puis enfin remplacer les points par des virgules. Exporter dans un nouveau fichier depuis *Bloc-note* puis ouvrir ce fichier csv dans *Regressi* (attention à bien choisir le filtre "tableur txt ou csv *.txt *.csv")
2. Pour visualiser le tableau de données : onglet « Grandeurs / Tableau ».
 - Ajouter des nouvelles colonnes déduites des précédentes : cliquer sur l'icône verte « Y+ », puis cocher « Grandeur calc. », rentrer l'expression voulue et son unité.
3. Pour visualiser les courbes : onglet « Graphe ».

Par défaut, l'abscisse x du graphe correspond à la première colonne du tableau, toutes les autres colonnes étant considérées comme des fonctions de x.
4. Le sous-menu « Coord » du menu « graphe » permet de :
 - Redéfinir la colonne des abscisses et/ou des ordonnées.
 - Définir l'échelle des axes : linéaire ou log
 - Définir l'affichage des courbes (symboles, lignes, couleur, etc).
5. Le sous-menu « Modèle » du menu « graphe » permet de faire l'ajustement d'une courbe expérimentale. Après avoir cliqué sur « Modèle » :
 - Cliquer sur « Bornes », puis sur « Bornes et nouveau modèle » pour sélectionner manuellement la portion du graphe à ajuster.

- La fenêtre « Définition d'une modélisation » apparaît. On peut soit utiliser un modèle prédéfini (par ex : exponentielle décroissante, croissante, loi affine, loi linéaire, etc), soit définir manuellement son propre modèle en choisissant les variables d'ajustement.
6. Impression des graphes : il n'y a pas de fonction de prévisualisation, on peut au préalable sauvegarder en pdf (« Imprimer », puis « Microsoft print to PDF »).

Logiciel OpenChoiceDesktop

1. Connecter l'oscilloscope à l'ordinateur par port USB et le mettre sous tension après la mise sous tension de l'ordinateur. Si besoin, vérifier que « USB Port : computer » est bien sélectionné par l'oscillo (aller dans « Utilitaires », puis « Options »).
2. Ouvrir le logiciel et « Sélectionner Instrument » pour vérifier que l'oscillo est reconnu et valider.
3. Pour afficher l'écran de l'oscillo, sélectionner « afficher écran ».
4. Pour enregistrer des données, sélectionner « capture données signal » puis « afficher les données », « enregistrer sous » et choisir le format .csv.