



BLAISE PASCAL
PT 2023-2024

TD 16 – Électromagnétisme

Conduction électrique

- Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
- Difficulté technique et calculatoire ;
- Exercice important.



Flasher ce code pour
accéder au corrigé

Ceinture		Proposition de parcours d'entraînement
	Ceinture blanche	Questions de cours + exercices 1 et 5
	Ceinture jaune	Questions de cours + exercices 1, 2 et 5
	Ceinture rouge	Questions de cours (★) + exercices 1, 2, 3 et 5
	Ceinture noire	Questions de cours (★) + exercices 2 à 7

Questions et applications de cours

Seuls les étudiants du groupe PT* seront interrogés en colle sur les questions marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

(★) 16.1 - Établir le lien entre le vecteur densité volumique de courant \vec{j} , la densité volumique de charge libre ρ_{libre} et la vitesse d'ensemble des porteurs \vec{v} . On raisonnera sur un système unidimensionnel ne contenant qu'un seul type de porteurs libres.

La démonstration consiste à identifier les définitions « microscopique » (charge traversant une section) et « mésoscopique » (flux de \vec{j}) de l'intensité pour obtenir l'identité $\vec{j} = \rho_{\text{libre}} \vec{v}$.

16.2 - Établir l'équation de conservation de la charge à une dimension à partir d'un bilan mésoscopique, et la généraliser sans démonstration au cas tridimensionnel.

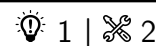
16.3 - Établir l'équation de conservation de la charge à partir des équations de Maxwell.

16.4 - En raisonnant sur un conducteur ohmique unidimensionnel, retrouver la loi d'Ohm intégrale à partir de la loi d'Ohm locale ainsi que l'expression de la résistance du cylindre.

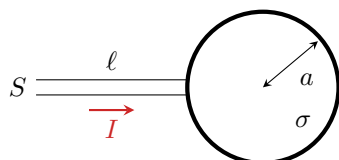
(★) 16.5 - En raisonnant sur un conducteur ohmique unidimensionnel, retrouver l'expression de la puissance totale dissipée par effet Joule (le célèbre RI^2) à partir de la densité volumique de puissance Joule.

Bilan de charge

Exercice 1 : Charge d'une sphère



- ▷ Bilan de charge ;
- ▷ Potentiel électrostatique ;
- ▷ Résistance d'un fil conducteur.



Une sphère de rayon a est mise sous tension afin d'être chargée. Elle est supposée parfaitement conductrice : les charges ne peuvent subsister qu'à sa surface, avec une densité surfacique $\sigma(t)$ supposée uniforme à tout instant. Elles sont apportées par un fil de conductivité γ , de longueur ℓ et section S , parcouru par un courant d'intensité I , dont une extrémité est reliée à la sphère et l'autre à un générateur non représenté sur le schéma. Le processus est supposé suffisamment lent pour que les résultats de l'électrostatique demeurent valables bien que σ dépende du temps.

1 - Dans un premier temps, on suppose que la charge se fait à courant I constant. Déterminer l'évolution de la densité surfacique de charge $\sigma(t)$ en fonction du temps.

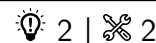
Dans un second temps, on suppose que c'est le potentiel V_0 imposé par le générateur qui demeure constant et non plus le courant I .

2 - Déterminer le champ créé par la sphère en tout point de l'espace. En déduire le potentiel V_s auquel se trouve la surface de la sphère en prenant comme référence $V = 0$ à l'infini.

3 - En reprenant la démarche de la première question, établir l'équation différentielle vérifiée par $\sigma(t)$ et la résoudre.

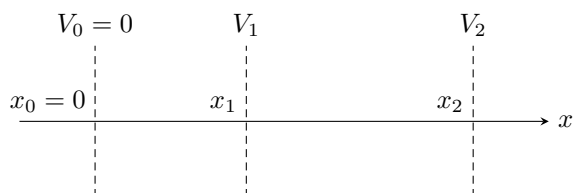
Mouvement des particules chargées

Exercice 2 : Gravure ionique



- ▷ Mouvement d'une charge dans un potentiel ;
- ▷ Conservation de la charge ;
- ▷ Équation de Poisson.

La gravure ionique est un procédé couramment utilisé dans l'industrie micro-électronique. Elle permet de graver la surface d'un substrat en la bombardant d'un faisceau d'ions de densité importante, mais de vitesse modérée, ce qui permet à des réactions chimiques d'avoir lieu uniquement à la surface du matériau. Il est donc nécessaire d'accélérer les ions en nombre important, puis, une fois le courant d'ions créé, de les ralentir afin de contrôler leur action sur le substrat.



Pour contrôler séparément l'intensité du courant ionique et l'énergie cinétique des ions, on utilise un système constitué de trois grilles métalliques, numérotées 0, 1 et 2. Les trois grilles sont portées à des potentiels différents, contrôlables indépendamment les uns des autres, tels que $V_1 < V_2 < V_0 = 0$. Le potentiel $V(x)$ est partout négatif.

Le dispositif est traversé par un flux continu de cations identiques, tous de masse m et charge e , se propageant dans la direction x . On note $n(x)$ la densité volumique correspondante, c'est-à-dire le nombre de cations par unité de volume du faisceau. Les cations sont lâchés au niveau de la grille 0 avec une vitesse initiale négligeable.

1 - Déterminer la vitesse $v(x)$ d'un cation en fonction du potentiel $V(x)$ et montrer qu'il subit une phase d'accélération et une phase de décélération au sein du dispositif.

2 - En utilisant la conservation de la charge, montrer que le vecteur densité de courant s'écrit sous la forme $\vec{j} = J_0 \vec{e}_x$ avec J_0 une constante que l'on ne cherchera pas à déterminer pour l'instant.

3 - Montrer que le potentiel $V(x)$ en présence du faisceau d'ions est solution de l'équation différentielle

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{J_0}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{-2eV}} = 0.$$

On admet que la résolution de cette équation différentielle dans le domaine $0 \leq x \leq x_1$ conduit à

$$V(x) = - \left(\frac{3x}{2} \right)^{4/3} \left(\frac{J_0}{\varepsilon_0} \right)^{2/3} \left(\frac{m}{2e} \right)^{1/3} .$$

4 - En déduire que $J_0 = k |V_1|^{3/2}$, avec k une constante à déterminer.

5 - On place un substrat de section S immédiatement après la grille 2 dans l'axe du faisceau pendant une durée Δt . Le faisceau est supposé uniforme à l'échelle du substrat. Déterminer le nombre N de cations atteignant le substrat, et leur vitesse. Conclure sur le bon fonctionnement du dispositif, c'est-à-dire la possibilité de contrôler séparément les deux paramètres.

Remarque : La solution donnée pour le potentiel V n'est valable que pour le domaine $0 \leq x \leq x_1$. En effet, la discontinuité du champ électrique de part et d'autre de la grille 1, liée à la présence de charges réparties en surface de la grille, modifie les conditions aux limites et donc la rend inopérante au delà. Ainsi, contrairement à ce qu'une interprétation trop simple pourrait laisser croire, le potentiel V_2 de la grille 2 n'a pas d'influence sur J_0 , qui est exclusivement fixé par la grille 1. En revanche, le champ électrique entre les grilles 1 et 2 dépend de J_0 .

Exercice 3 : Diode à vide

inspiré oral banque PT |  2 |  2



- ▷ Équation de Poisson ;
- ▷ Mouvement d'une charge dans un potentiel ;

Les premières diodes ont été fabriquées au début du XX^e siècle pour l'émission et la réception d'onde radio. Ces composants aujourd'hui très courants sont désormais fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs, mais les premiers modèles étaient des diodes à vide. Une diode à vide est modélisée par un fil cylindrique (anode A) de rayon R_A placé sur l'axe d'un cylindre creux (cathode C) de rayon $R_C > R_A$ de même hauteur H . Les deux électrodes sont conductrices et sont placées dans une ampoule dans laquelle un vide poussé a été réalisé. Une tension $U_0 = V_C - V_A$ est imposée entre l'anode et la cathode. L'anode est supposée reliée à la masse : $V_A = 0$.

Donnée : pour $V = V(r)$ en coordonnées cylindriques, $\Delta V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right)$.

1 - On admet que le problème est « à symétrie cylindrique ». Définir ce terme.

2 - Calculer le potentiel $V(r)$ régnant entre les deux électrodes en fonction de r , U_0 , R_A et R_C .



L'anode est portée à très haute température (plus de 1000 °C) et des électrons en sont arrachés sous l'effet de l'agitation thermique. On supposera négligeable la vitesse d'un électron venant juste d'être arraché de l'anode. Sous l'effet du potentiel $V(r)$, ces électrons peuvent être amenés à rejoindre la cathode. On les suppose suffisamment peu nombreux pour qu'ils ne perturbent pas le potentiel $V(r)$ déterminé précédemment.

3 - Quel doit être le signe de U_0 pour que la diode soit passante (un courant est transmis de l'anode à la cathode) ? pour qu'elle soit bloquée ?

4 - Justifier que la vitesse d'un électron dans l'espace inter-électrodes s'écrit $\vec{v} = v(r) \vec{e}_r$. Déterminer $v(r)$.

5 - Notons I le courant total circulant entre les deux électrodes. Déterminer la densité volumique d'électrons $n(r)$ dans l'espace inter-électrodes.

Exercice 4 : Mesure de salinité

 3 |  2



- ▷ Loi d'Ohm ;
- ▷ Modèle microscopique.

La salinité de l'eau de mer est la masse totale de substances solides dissoutes par kilogramme d'eau de mer, c'est-à-dire la masse totale des ions contenus dans 1 kg d'eau de mer. Elle se mesure à l'aide d'une simple cellule de conductimétrie correctement étalonnée.

Les ions contenus dans l'eau de mer sont modélisés par des sphères de rayon r_i se déplaçant à la vitesse \vec{v}_i . Les interactions microscopiques ion-eau et ion-ion sont modélisées par une unique force proportionnelle au rayon et à la vitesse de l'ion,

$$\vec{F} = -\alpha_i r_i \vec{v}_i ,$$

où α_i est une constante dépendant a priori du type d'ions considéré. Le poids des ions est négligé.

1 - Un ion de charge $q_i = z_i e$ ($z_i \in \mathbb{Z}$) et de masse m_i est placé dans une région où règne un champ électrique uniforme et stationnaire \vec{E} . Montrer qu'après une phase transitoire de durée τ_i à déterminer, l'ion atteint une vitesse limite $\vec{v}_{i\infty}$ à déterminer également.

2 - En déduire l'expression de la conductivité σ de l'eau de mer en considérant qu'il y a plusieurs types d'ions de concentrations molaires respectives c_i . Commenter l'influence relative des cations et des anions sur la conductivité. Quelle loi (que vous connaissez de longue date) retrouve-t-on ?

Une cellule de conductimétrie constituée de deux électrodes planes parallèles, d'aire A et distantes de ℓ , est plongée dans un échantillon d'eau de mer.

3 - Donner sans démonstration l'expression de la résistance de la portion de solution se trouvant entre les électrodes en fonction de σ . En déduire le principe d'une mesure de conductivité.

4 - Expliquer qualitativement pourquoi une tension constante appliquée entre les deux électrodes ne permet pas de procéder à la mesure. Pourquoi une tension alternative est-elle plus appropriée ? Pourquoi la tension doit-elle malgré tout être de faible fréquence ? Préciser sans calcul ce que signifie « faible fréquence » dans ce contexte.

5 - Des analyses d'échantillons d'eau de mer provenant de diverses profondeurs et de divers océans ont montré que les proportions des constituants dissouts dans l'eau de mer sont indépendantes de la salinité. Montrer qu'une mesure de conductivité permet de déterminer la salinité de l'échantillon, à condition d'un étalonnage préalable sur un échantillon de salinité connue.

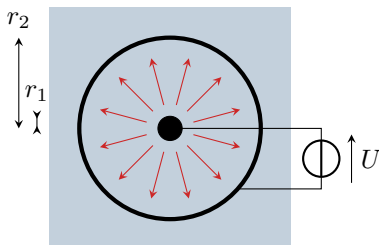
Loi d'Ohm

Exercice 5 : Chute ohmique dans un électrolyseur



- ▷ Loi d'Ohm locale et intégrale ;
- ▷ Coordonnées cylindriques.

L'électrolyse est un processus fondamental en chimie. Parmi ses multiples applications, citons la métallurgie (production de métaux à partir de minerais) ou la production de dihydrogène « vert » à partir d'énergies renouvelables. Cette technique étant très consommatrice en énergie, l'optimisation du rendement est essentielle. On modélise dans cet exercice l'un des phénomènes affectant le rendement énergétique d'électrolyse, la chute ohmique, dans un électrolyseur cylindrique.



L'électrode de travail et la contre-électrode d'un électrolyseur sont constituées de deux cylindres coaxiaux de rayons $r_1 < r_2$ plongeant sur une hauteur h dans une solution électrolytique de conductivité σ supposée uniforme et constante. Une tension $U = V(r_1) - V(r_2) > 0$ est imposée entre les deux électrodes. On suppose le régime stationnaire atteint. La densité de courant dans la solution s'écrit alors sous la forme

$$\vec{j} = j(r) \vec{e}_r \quad \text{avec} \quad j(r) > 0.$$

- 1 - Exprimer le courant traversant un cylindre de rayon r compris entre r_1 et r_2 . En déduire l'expression de $j(r)$ en fonction de I , r et h , puis celle du champ électrique \vec{E} au sein de la solution électrolytique.
- 2 - Établir l'expression de la résistance R de la portion de solution comprise entre les deux électrodes.
- 3 - Déterminer la puissance totale dissipée par effet Joule dans la solution en fonction du courant I d'électrolyse.

Exercice 6 : Accident de pêche

oral Centrale MP | 3 | 2



- ▷ Loi d'Ohm locale et intégrale ;
- ▷ Champ magnétique.

Avec sa canne à pêche, un pêcheur touche une ligne à haute tension $U_{\max} = 10 \text{ kV}$. On modélise la canne à pêche comme schématisé figure 1 par un cône creux d'épaisseur $0,5 \text{ mm}$ et de longueur 10 m , fait d'un métal de conductivité $\sigma = 1 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

- 1 - Justifier que l'on peut se placer dans l'ARQS.
- 2 - Rappeler la résistance d'un échantillon métallique de longueur L , de section S et de conductivité σ . En déduire la résistance de la canne à pêche. Commenter.

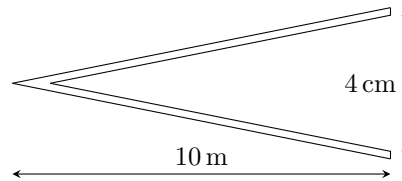
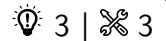


Figure 1 – Schéma géométrique de la canne à pêche.

3 - Déterminer le courant traversant le pêcheur, assimilé à une résistance de $3 \text{ k}\Omega$.

4 - Ce pêcheur est cardiaque, doté d'un pacemaker, qui ne peut résister qu'à des champs électriques inférieurs à $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ et des champs magnétiques inférieurs à $100 \text{ }\mu\text{T}$. Si le pêcheur survit, le pacemaker sera-t-il endommagé ?

Exercice 7 : Magnétorésistance, effet Corbino



- ▷ Loi d'Ohm locale;
- ▷ Modèle microscopique.

Considérons un anneau torique d'axe \vec{e}_z à section rectangulaire (rayon interne R_1 , externe R_2 , hauteur h), fait dans un métal de conductivité γ_0 . La face interne est mise en contact avec une électrode de potentiel V_1 , la face externe avec une électrode de potentiel V_2 . Les deux faces définissent ainsi deux surfaces équipotentielles.

1 - Déterminer la résistance électrique R_0 de l'anneau.

L'anneau est plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B} = B\vec{e}_z$, dont on souhaite étudier l'effet sur la résistance électrique. On se place pour cela dans le modèle de Drude de la conduction électrique : les électrons de conduction (masse m , charge $-e$) ont tous la même vitesse \vec{v} , et leur interaction avec le réseau cristallin est modélisée par une force de frottement fluide

$$\vec{f} = -\frac{ne^2}{\gamma_0} \vec{v},$$

avec γ la conductivité électrique du métal et n la densité volumique d'électrons de conduction.

2 - Établir une relation entre \vec{j} , \vec{B} et \vec{E} . On admettra que l'accélération des porteurs de charge est négligeable, et on introduira la constante de Hall du matériau $C_H = -1/ne$.

3 - En déduire la résistance apparente R de l'anneau. Pourquoi parle-t-on de magnétorésistance ?

Pour donner une interprétation qualitative à ce résultat, nous allons chercher à établir l'équation analytique des lignes de courant électrique.

4 - Montrer que les lignes de courant électrique sont en tout point du métal inclinées par rapport aux lignes de champ électrique d'un même angle α tel que

$$\tan \alpha = \frac{1}{\gamma_0 C_H B}.$$

5 - En déduire l'équation des lignes de courant électrique. Conclure qualitativement.