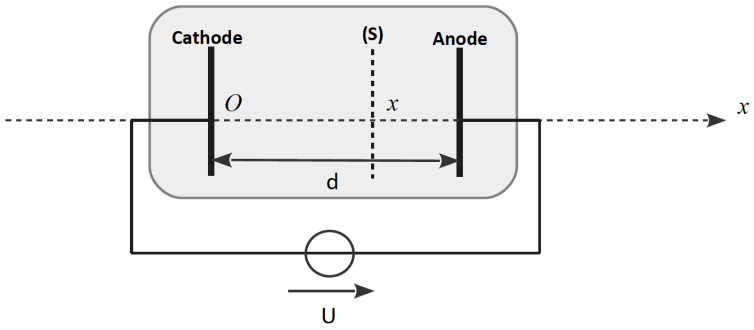
EIVP - CONCOURS INTERNE - PHYSIQUE – 2026

Durée : 4 heures – Sans document ni téléphone portable - Calculatrice autorisée

- Le barème tient compte des qualités de rédaction et de présentation de la copie.
- Si un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et indique les initiatives qu'il est amené à prendre.
- Les résultats numériques seront donnés avec une précision de un chiffre significatif.
- Dans tout le sujet, *Exprimer* signifie conventionnellement *Donner l'expression littérale* et *Calculer* signifie conventionnellement *Donner la valeur numérique.*

1 Diode à vide

Une diode à vide est constituée d'une cathode et d'une anode, de surface S, perpendiculaires à l'axe O_x, espacées de d. La cathode chauffée est susceptible d'émettre des électrons de charge $-e$ et de masse m avec une vitesse négligeable. Alimentée par un générateur de fem $U > 0$, la diode est traversée par un courant d'intensité I. La cathode est au potentiel 0 et on se place en régime stationnaire. Le mouvement des électrons vers l'anode crée une charge d'espace de densité volumique $\rho(x)$ de la forme : $\rho(x) = \alpha x^{\beta}$ et un courant que nous étudierons ultérieurement. **On admet que le champ au niveau de la cathode est nul.**



1 - Rappeler le théorème de Gauss. Donner un exemple de système simple pour lequel il ne permet pas de calculer le champ.

2 - Prévoir les dépendances et la direction du champ $\overrightarrow{E}(M)$ entre les électrodes. Figurer sur un schéma la surface de Gauss fermée utilisée, et à l'aide du théorème de Gauss, exprimer la composante non nulle du champ $E(M) = E(x, \alpha, \beta, \varepsilon_0)$.

3 - Rappeler la relation entre champ électrique et potentiel électrique. En déduire le potentiel électrique $V(M)$ en fonction des mêmes variables. En déduire la différence de potentiel $U = U(d, \alpha, \beta, \varepsilon_0)$ aux bornes de l'ensemble.

La charge d'espace de densité volumique $\rho(x)$ est en fait constituée de particules chargées de charges q qui se déplacent à la vitesse $v(x)$. On considère une de cette particule individuelle, de charge q, de masse m, placée dans le champ $\overrightarrow{E}(M)$ déterminé précédemment et de sorte que que $v(0) = 0$. On

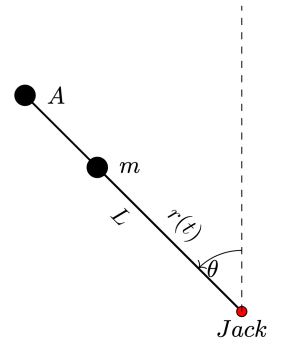
4 - Ecrire le principe fondamental de la dynamique appliqué à la particule. Montrer que l'équation obtenue est équivalente à $\frac{1}{2}mv^2(x) + qV(x) = cste$ (on pourra par exemple dériver cette dernière équation par rapport au temps). En prenant $V(0) = 0$, exprimer $v(x)$.

5 − Faire un schéma des particules susceptibles de traverser la section S pendant une durée dt. En déduire l'intensité I dans le système en fonction de $\rho(x)$, $v(x)$ et S. Donner la valeur de β pour que I ne soit pas une fonction de x. En pratique, c'est la valeur adoptée à l'équilibre de fonctionnement.

6 - En déduire l'équation de fonctionnement de la diode, $U = f(I)$.

2 Jack et la guillotine

Lors d'une de ses trépidantes aventures, Jack, éternel pirate, est placé sur une guillotine et attend sa dernière heure. Or un boulet de canon est tiré sur l'échafaud et met l'ensemble en mouvement, entraînant une rotation rapide autour d'un axe horizontal. On suppose que la situation peut être ramenée au problème suivant : Jack est immobile, au niveau de O, et il appartient à l'axe de rotation horizontal de la guillotine. Celle-ci est assimilée à un rail qui tourne à la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ autour de l'axe horizontal Δ. Sur ce rail, une lame M de masse m est repérée par $r(t) = OM$. On note $OA = L$ la longueur totale de la guillotine. On note m la masse de la lame qui part de la butée A avec une vitesse radiale nulle.



On suppose dans un premier temps qu'il n'y a pas de frottement : la réaction du rail sur la masse m est de la forme $\vec{N} = N\vec{u}_\theta$ où N peut être positive ou négative.

7 - Rappeler les expressions génériques de la vitesse et de l'accélération en coordonnées polaires.

8 - Ecrire les deux équations polaires du mouvement. Les simplifier si l'on suppose que $\dot{\theta} = \omega$ est constante.

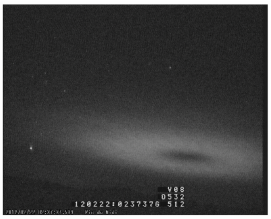
9 - Pourquoi ne peut-on pas utiliser l'équation obtenue sur $\vec{u_\theta}$? On considère l'équation obtenue sur $\vec{u_r}$. Déterminer la forme générale de la solution de l'équation homogène associée. Déterminer la solution particulière de l'équation. En déduire $r(t)$.

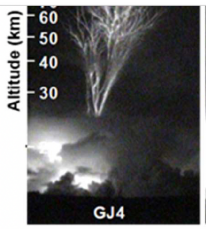
10 - On pose $\alpha = \frac{g_0}{L\omega^2}$. Déterminer la valeur critique α_C qui permet d'avoir $r(t) = L$ à tout instant, sachant qu'**à cause de la butée A, il n'est en fait pas possible d'avoir $r(t) > L$.**

3 Décharges électriques autour d'une cellule orageuse

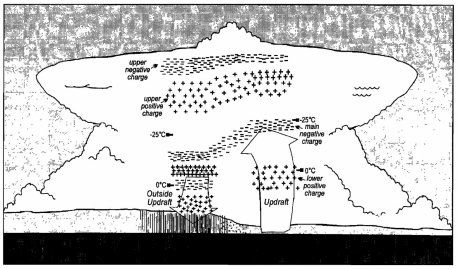
La physique des cellules orageuses s'est développée très rapidement ces deux dernières décennies avec l'observation et l'étude de nombreux phénomènes de décharges électriques à l'intérieur ou autour des cellules orageuse. En plus des éclairs, on distingue ainsi les *sprites*, les *elves* et les *jets géants* respectivement représentés sur les photographies suivantes - la plupart des documents sont issus du compte-rendu de l'académie des sciences du 16 juin 2025, et sont en lien avec des observations effectuées à l'observatoire du pic du Midi.

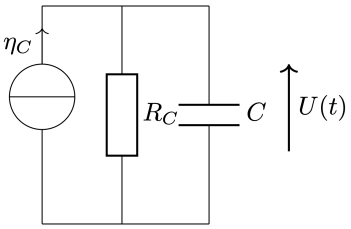






Modèle de charge d'une cellule Tous ces phénomènes sont liés à l'apparition d'une distribution de charges non uniforme dans le nuage orageux, dans l'atmosphère qui l'entoure et dans le sol à proximité. La solvatation des ions atmosphériques par des gouttelettes d'eau amène en effet à une séparation des charges électriques dans le nuage, à la manière de ce qui se passe dans un condensateur. Une première approche simple consiste à modéliser le nuage comme un condensateur C en parallèle avec une résistance R_C. Cet ensemble est alimenté par le continuel courant d'ions présents dans l'atmosphère qui se déplacent du sol vers la haute atmophère : ce courant électrique charge le nuage par en-dessous, à travers sa base. On modélise ce courant par une source idéale de courant de courant électromoteur η_C. Une cellule en train de se charger est donc modélisée par le circuit ci-après, à droite.



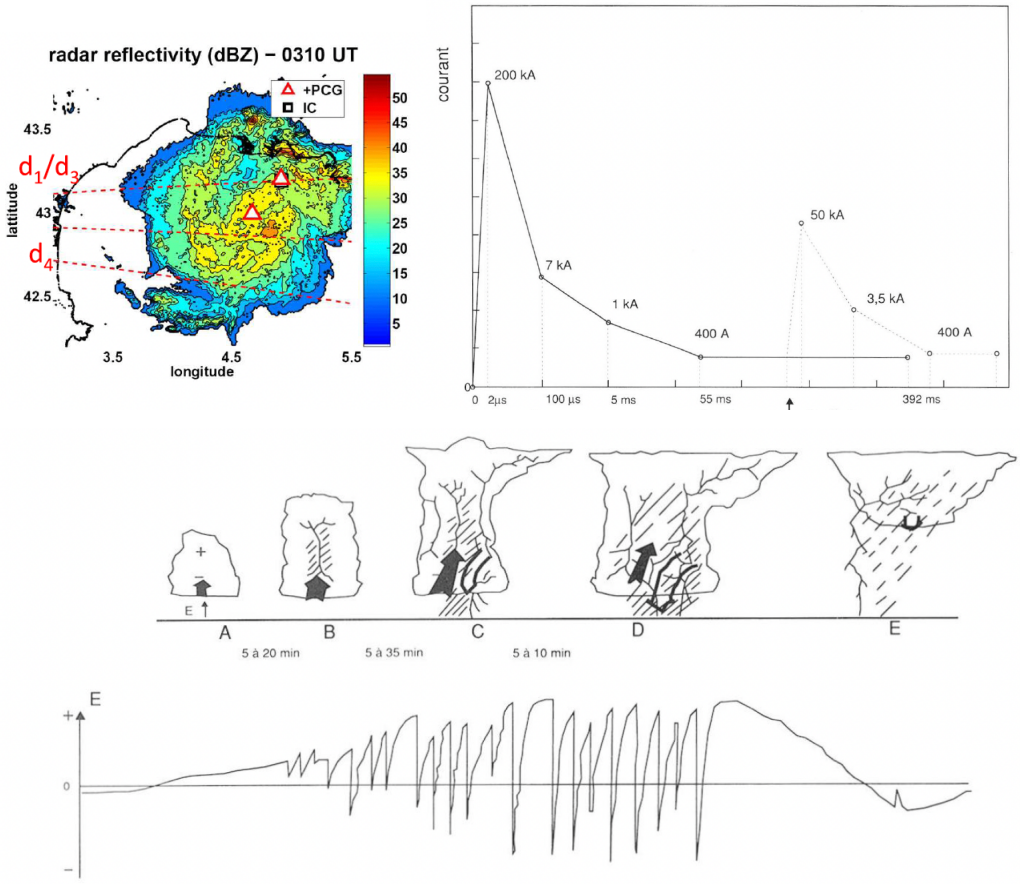


11 - Etablir l'équation différentielle vérifiée par $U(t)$. Faire apparaître un temps typique de charge, τ_C. En déduire l'expression de $U(t)$ si l'on considère une cellule non chargée initialement.

12 - On admet que le comportement de la cellule change si $U(t)$ atteint une valeur seuil, U_S. Exprimer la durée t_S mise par la cellule pour atteindre ce seuil.

On cherche à évaluer numériquement les paramètres utilisés dans le modèle précédent à l'aide de mesures.

L'image radar suivant à gauche (**figure (a)**) représente une cellule orageuse vue de l'espace. On rappelle qu'en France, un degré de lattitude ou de longitude correspond à environ $8.10^1 km$. On admet que le courant électrique atmosphérique ascendant moyen par unité de surface est de l'ordre de $j_s \simeq 2.10^{-12} A.m^{-2}$. La courbe de droite (**figure (b)**) est une représentation de l'évolution temporelle de l'intensité hors cellule lors d'un éclair. La figure en-dessous (**figure (c)**) est la représentation de l'évolution d'une grandeur électrique lors du développement à long terme d'une cellule orageuse - on y distingue notamment la charge lente de la cellule et les décharges successives rapides dues aux éclairs - la courbe s'étale sur globalement une heure.



Pour les questions **13** à **18,** on demande des estimations : on pourra donc rappeler la définition générale de la grandeur demandée, puis, à l'aide d'une approximation fondée sur les figures, en déduire une estimation numérique.

13 - A l'aide de la **figure (a)**, proposer une estimation de η_C.

14 - A l'aide de la **figure (b)**, proposer une estimation de la charge totale déchargée lors d'un éclair.

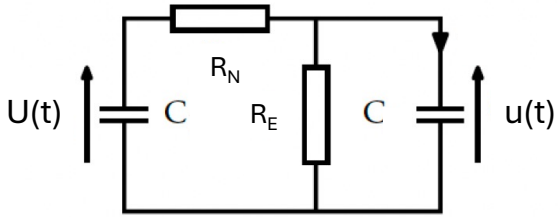
15 - A l'aide de ce qui précède et de la **figure (c)**, proposer une estimation de la charge totale déchargée par une cellule orageuse lors de son évolution.

16 - Si l'on suppose que la tension seuil est de l'ordre de $U_s \simeq 10^7 V$, estimer la capacité équivalente à la cellule, C. Comparer avec la capacité d'un condensateur-modèle du nuage dont on estimera les grandeurs géométriques pertinentes, sachant que la permittivité de l'air est de l'ordre de $\varepsilon \simeq 10^{-11} u_{SI}$.

17 - A l'aide de la **figure (c)**, estimer le temps typique de charge. En déduire une valeur pertinente de R_C.

18 - Estimer l'énergie électrostatique contenue dans le nuage avant sa décharge.

Modèle d'une décharge électrique Les décharges électriques qui ont lieu ont des durées typiques beaucoup plus faibles que le temps typique de charge. Ainsi, on peut considérer que pendant une décharge, tout se passe comme si ce processus de charge n'existait pas. Le nuage est de ce point de vue assimilé à un simple condensateur, aux bornes duquel on a une tension initiale $U(t = 0^-) = U_s$. L'environnement du nuage et la zone d'interaction entre le nuage et son environnement peuvent être modélisés par l'association de deux résistances R_N et R_E, et d'un condensateur C (on admet que la valeur de la capacité est identique). On note $u(t)$ la tension aux bornes de ce condensateur (à ne pas confondre avec $U(t)$) Lors d'une décharge, le système équivalent est donc :



19 - Établir que l'équation différentielle vérifiée par la tension $u(t)$ est :

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{2R_E+R_N}{R_E R_N C}\frac{du}{dt} + \frac{u}{R_E R_N C^2} = 0$$

20 - Mettre l'équation différentielle sous forme canonique et identifier sa pulsation propre ω_0 et son facteur de qualité Q, qu'on exprimera en fonction de $\mathrm{R}_N, \mathrm{R}_E$ et C. Vérifier que pour $\mathrm{R}_E \ll \mathrm{R}_N$, le facteur de qualité se met sous la forme :

$$\mathrm{Q} \simeq \alpha \left(\frac{\mathrm{R}_E}{\mathrm{R}_N}\right)^{\beta}$$

Avec α et β des constantes positives. On considère cette condition réalisée dans toute la suite, sauf mention explicite du contraire. Initialement la tension aux bornes du condensateur de gauche est $U(t = 0^-) = \mathrm{U}_S$, et le condensateur de droite est déchargé.

21 - Déterminer $u(t = 0^+)$ et $\left(\frac{du}{dt}\right)_{t=0^+}$. En déduire l'expression de $u(t)$.

22 - Tracer l'allure de $u(t)$.

23 - L'expression précédente fait intervenir deux temps, τ_1 et τ_2, où l'on posera $\tau_1 \ll \tau_2$. En utilisant l'inégalité forte vérifiée par Q, montrer que l'un de ces deux temps vaut approximativement $\frac{Q}{\omega_0}$ et l'autre $\frac{1}{Q\omega_0}$. Simplifier l'expression de de $u(t)$ sous la forme : $u(t) \simeq \gamma(\exp(-t/R_N C) - \exp(-t/R_E C))$ où γ est une fonction de U_S, R_N et R_E uniquement.

On s'intéresse d'abord aux comportements aux temps longs de $u(t)$.

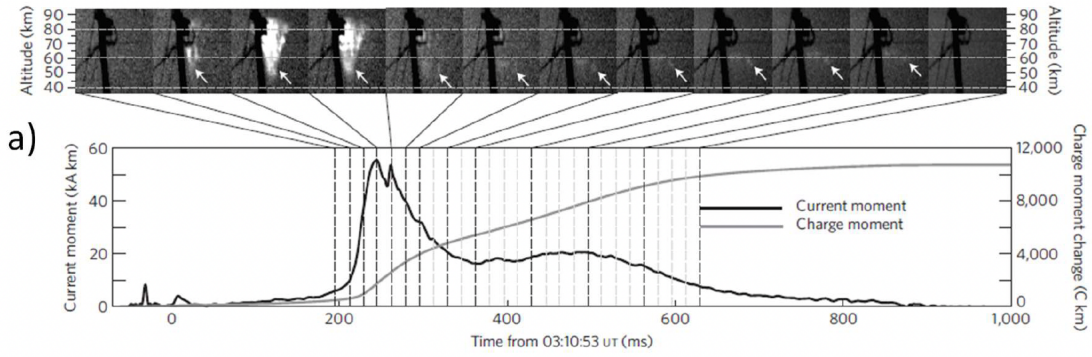
24 - Simplifier l'expression précédente aux temps longs. Proposer une estimation du temps typique de descente de la courbe.

On s'intéresse maintenant aux comportements aux temps courts de $u(t)$.

25 - Exprimer la pente initiale de $u(t)$, en fonction uniquement de U_s, R_N et C. On utilisera à nouveau $R_N \gg R_E$.

26 - Sans faire de calculs, proposer une estimation du maximum atteint par $u(t)$. En déduire une estimation du temps typique de montée de la courbe.

La figure suivante représente l'évolution d'une grandeur électrique liée à $u(t)$ au cours d'un jet géant.



27 - A l'aide des estimations temporelles de cette courbe, estimer R_N et R_E. En déduire une estimation de l'intensité $i(t = 0^+)$ qui traverse le condensateur de droite en début de phénomène. Comparer le résultat avec la valeur communément admise, de l'ordre de $20kA$.