



Les applications numériques seront données avec 1 chiffre significatif

**Recommandations :**

- Pour choisir l'ordre dans lequel vous traiterez les problèmes lisez le sujet en entier au préalable.
- Les résultats littéraux et numériques doivent être encadrés.
- Un résultat numérique sans unité est considéré faux.
- Les correcteurs (effaceurs, peinture, ruban, stylo à friction) sont interdits.
- La rédaction se fait en langue française respectant syntaxe, grammaire et orthographe.
- Une relecture finale attentive, 15 minutes avant la fin de l'épreuve est indispensable.

**Pénalité :** Un défaut de qualité de la copie (présentation, écriture, orthographe, syntaxe) pourra faire l'objet d'une pénalité de 1 ou 2 points sur la note finale.

*Problème Pour Tous*

**La force de van der Waals**

Grâce à des faisceaux laser, les physiciens savent aujourd'hui piéger et contrôler des atomes un à un. La force de van der Waals s'exerçant entre deux atomes de rubidium a ainsi pu être mesurée directement pour la première fois.

Un ensemble de valeurs numériques et un formulaire sont disponibles en fin d'énoncé. Il est conseillé de les lire avant de commencer à traiter le sujet.

Lorsque deux atomes présentant un moment dipolaire électrique sont à distance suffisante, ils interagissent entre eux sous forme d'interaction dipôle – dipôle. Cette partie cherche à expliquer le principe de cette interaction.

A –

**Q 1.** Rappeler la définition d'un dipôle électrostatique et de son moment dipolaire  $\vec{p}$  (il est conseillé de s'appuyer sur un dessin).

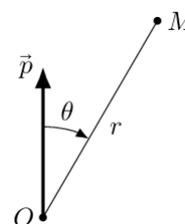
**Q 2.** Donner un exemple de dipôle électrostatique rencontré dans la nature ainsi que l'ordre de grandeur du moment dipolaire de l'exemple choisi.

**B –** Le potentiel électrique d'un dipôle électrostatique placé à l'origine  $O$  évalué en un point  $M$  situé à grande distance de  $O$  s'écrit

$$V(M) = \frac{\vec{p} \cdot \overrightarrow{OM}}{4\pi\epsilon_0 \|\overrightarrow{OM}\|^3}$$

**Q 3.** À quelle condition peut-on considérer que le point  $M$  se trouve à grande distance de  $O$  ?

**Q 4.** Déterminer dans le système de coordonnées sphériques (*figure 1*) le champ électrique créé par le dipôle en un point  $M$  en fonction des variables  $r = \|\overrightarrow{OM}\|$  et  $\theta$ .



**Figure 1**

**Q 5.** Tracer schématiquement sans démonstration les lignes de champ électrostatique associées au dipôle.

**C – Polarizabilité d'un atome**

Lorsqu'un atome est soumis à un champ électrique extérieur  $\vec{E}_{ext}$  uniforme à l'échelle de l'atome on constate qu'il acquiert alors un moment dipolaire  $\vec{p}_{ind}$  dit *moment dipolaire induit* vérifiant

$$\vec{p}_{ind} = \alpha\epsilon_0\vec{E}_{ext} \tag{1}$$

où  $\alpha$  s'appelle la polarisabilité de l'atome.

**Q 6.** Justifier qualitativement la relation (1) et donner l'unité de  $\alpha$  dans le système international d'unités. Justifier que  $\alpha$  est une grandeur positive.

Pour déterminer un ordre de grandeur de  $\alpha$ , on peut utiliser le modèle de l'atome d'hydrogène proposé en 1904 par le physicien anglais Sir Joseph John Thomson (1856–1940) :

- l'atome est assimilé à une sphère de centre  $O$  et de rayon  $a$  ;
- la charge positive  $e$  de l'atome est répartie uniformément dans le volume intérieur de cette sphère ;
- la sphère est supposée fixe dans un référentiel galiléen propre à l'étude
- l'électron se déplace librement à l'intérieur de la sphère ;
- on néglige l'interaction gravitationnelle devant l'interaction électromagnétique.

**Q 7.** Quelle est l'expression de la force ressentie par l'électron en fonction des données du problème et de la position de l'électron ? Commenter.

**Q 8.** On ajoute maintenant un champ extérieur  $\vec{E}_{ext}$  supposé uniforme sur la dimension de l'atome. En admettant que l'électron reste dans la sphère de rayon  $a$ , déterminer sa position d'équilibre.

**Q 9.** En déduire une expression de  $\alpha$  dans le cadre de ce modèle et proposer un ordre de grandeur.

### D – Interactions entre atomes de rubidium

Les atomes de rubidium ( $Z = 37$ ) servant à l'étude des interactions de Van der Waals, ne possèdent pas de moment dipolaire propre, tout comme l'atome d'hydrogène étudié précédemment. Néanmoins, ils peuvent posséder des moments dipolaires induits et la force qui existe entre deux atomes résulte de l'interaction entre ces deux moments dipolaires induits.

**Q 10.** Proposer une explication qualitative de ce phénomène.

Pour modéliser le phénomène, on considère deux dipôles alignés sur un axe ( $Ox$ ) et espacés d'une distance  $x = O_1O_2$  (figure 2).



Figure 2

**Q 11.** À partir de l'expression de l'énergie potentielle d'un dipôle dans un champ extérieur, montrer que la force exercée par le premier dipôle sur le second dipôle peut s'écrire sous la forme

$$\vec{F}_{1/2} = p_2 \frac{dE_1}{dx} \vec{e}_x$$

où  $E_1$  est la composante selon  $\vec{e}_x$  du champ électrique créé par le dipôle  $p_1$  à l'abscisse  $x$  (au niveau de  $p_2$ ).

**Q 12.** En déduire que cette force peut se mettre sous la forme

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{K}{x^7} \vec{e}_x$$

où  $K$  est une constante dont on précisera le signe.

**Q 13.** Cette force est-elle attractive ou répulsive ? Comment pouvait-on prévoir ce résultat sans calcul ?

**Q 14.** En déduire l'énergie potentielle d'interaction entre les deux dipôles.

### E - Calcul de la force d'adhérence du gecko au plafond

La force, calculée précédemment, correspond à une interaction de Van der Waals. Si on considère maintenant deux plans infinis parallèles, distants de  $D$  et séparant chacun un milieu solide (figure 3), on montre en prenant en compte l'ensemble des  $A$  interactions de Van der Waals que la force surfacique entre les deux milieux s'écrit :  $f(D) = \frac{A}{6\pi D^3}$

La constante  $A$ , appelée constante de Hamaker, dépend de la nature des interactions de Van der Waals et des densités moléculaires des deux solides en interaction.

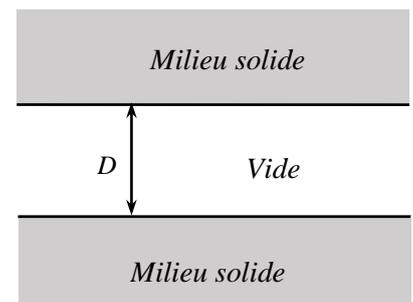
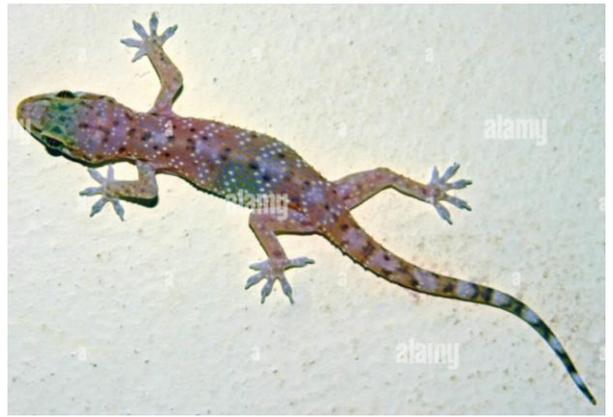


Figure 3 - Deux milieux plans infinis en interaction

**Q15.** Vérifier que la constante de Hamaker  $A$  est homogène à une énergie.

**Q16.** Un gecko de masse  $m = 50 \text{ g}$  est suspendu par ses quatre pattes au plafond. Le gecko possède au total 6 millions de sétules, comportant chacune en moyenne 500 spatules. En modélisant une spatule par une surface carrée de  $0,2 \mu\text{m}$  de côté située à une distance  $D = 1 \text{ nm}$  du plafond, estimer le pourcentage de sétules utilisées par le gecko pour soutenir sa masse. On prendra  $A = 10^{-19} \text{ J}$  et on négligera tout effet de bord.



Sachant que l'équipe de Kellar Autumn a constaté qu'un gecko de  $50 \text{ g}$  utilise à son maximum d'adhérence uniquement  $0,04 \%$  de ses sétules pour soutenir sa masse, peut-on bien imputer les facultés d'adhérence du gecko aux interactions de Van der Waals ? Pourquoi le gecko mobilise-t-il certainement davantage de sétules pour assurer son adhérence ?

### Données et formulaire

Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Rayon de Bohr	$a_0 = 52,92 \text{ pm}$
Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène	$E_I = 13,60 \text{ eV}$
Masse molaire du rubidium	$M_{\text{Rb}} = 85,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Énergie potentielle d'un dipôle électrique de moment dipolaire $\vec{p}$ dans un champ extérieur $\vec{E}$	

$$E_{\text{pot}} = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

Expression du gradient en coordonnées sphériques

$$\vec{\text{grad}}(U) = \frac{\partial U}{\partial r} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \vec{u}_\varphi$$

## Exemples d'électricité dans l'atmosphère

### Données :

- Masse de l'électron :  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .
- Charge de l'électron :  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
- Conductivité électrique du cuivre :  $\gamma_c = 6 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
- Vitesse de la lumière :  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Permittivité diélectrique du vide :  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ .

L'électricité atmosphérique influe sur les systèmes électriques usuels, surtout en présence de la foudre qui est un courant de grande intensité entre les nuages et le sol terrestre.

### 1. Atmosphère nuageuse

On considère un nuage situé entre les altitudes  $z = h_1 = 2 \text{ km}$  et  $z = h_2 = 10 \text{ km}$  et de section horizontale  $S = 1 \text{ km}^2$ . Dans la modélisation proposée, on néglige tout effet de bord et on suppose que les densités volumiques de charges ne dépendent que de l'altitude  $z$ , et que le champ électrique peut se mettre sous la forme (**Figure 1**) :

$$\vec{E}(M) = E(z) \cdot \vec{u}_z$$

1.1 - Près du sol, dans la région  $0 \leq z \leq h_0$ , les charges positives sont réparties avec la densité volumique de charges uniforme  $\rho_0$ .

Déterminer le champ électrique  $E(z)$  dans cette zone, en prenant  $E(z=0) = 0$ .

1.2 - Montrer que pour  $h_0 \leq z \leq h_1$ , le champ électrique est uniforme, et donner sa valeur  $E_0$ .

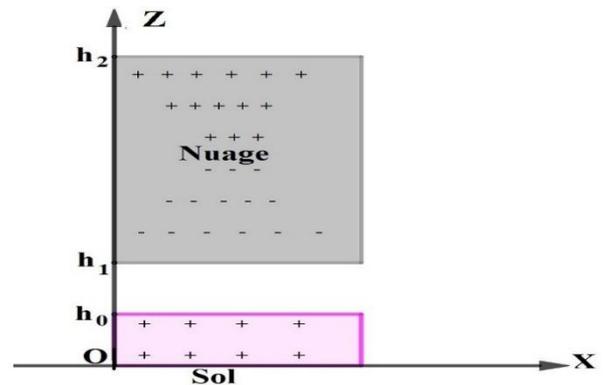


Figure 1 – Distributions de charges d'une atmosphère nuageuse

1.3 - A l'intérieur du nuage, on suppose que  $\rho(z)$  varie linéairement avec  $z$  dans l'intervalle  $\rho_1 \leq \rho(z) \leq -\rho_1$ , où  $\rho_1 = \rho(z = h_1) < 0$  est la densité volumique de charges pour  $z = h_1$ .

Déterminer l'expression de  $\rho(z)$  pour  $h_1 \leq z \leq h_2$ .

1.4 - Donner l'expression de  $E(z)$  dans le nuage.

1.5 - Représenter l'allure du champ électrique dans la région  $0 \leq z \leq h_2$

### 2. Modélisation de la foudre

Le système nuage-sol peut être assimilé à un condensateur géant de capacité  $C$ . Si le champ entre les armatures dépasse le champ disruptif  $E_{max}$ , il se forme un canal conducteur dans l'air. L'éclair nuage-sol peut être modélisé schématiquement comme la décharge d'un condensateur de capacité  $C$ , à travers ce conducteur, supposé ohmique, de résistance  $R$ . Le condensateur est initialement chargé sous une tension continue  $u_0 = 10^7 \text{ V}$  positive (**Figure 2**).

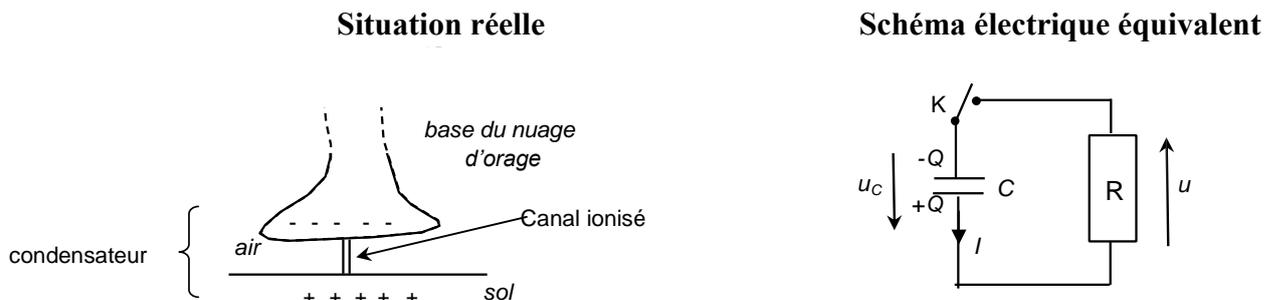
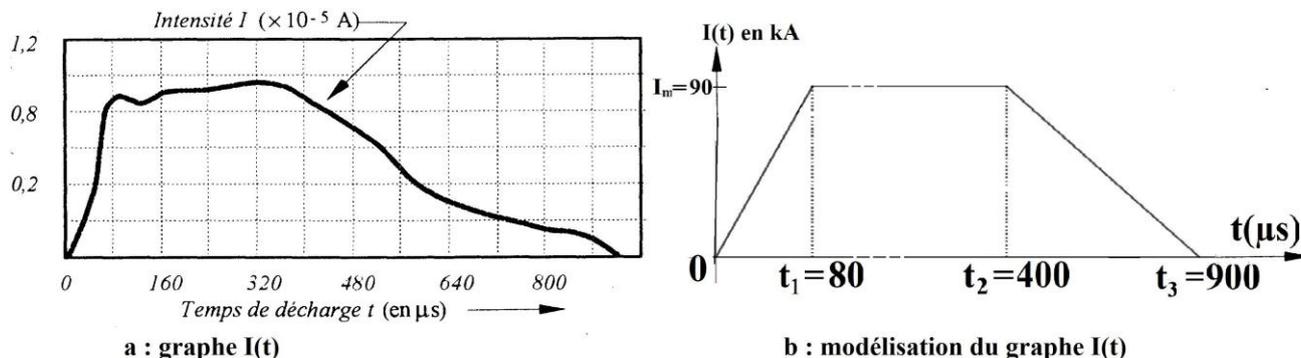


Figure 2 – Décharge d'un condensateur

- 2.1 - Établir l'équation différentielle vérifiée par la charge  $Q(t)$ .
- 2.2 - En déduire l'expression de l'intensité  $I(t)$ .
- 2.3 - Les variations de l'intensité du courant de la foudre sont représentées par la **figure 3a** et modélisées par la **figure 3b**. Évaluer la charge écoulee par la foudre  $Q_{tot}$ .
- 2.4 - Estimer l'énergie électrique  $E_e$  initiale de ce condensateur.
- 2.5 - Calculer la valeur de la capacité  $C$  du condensateur considéré.



**Figure 3 – Intensité du courant lors d'un éclair**

### 3 - Activité magnétique

Lors d'un coup de foudre l'air est ionisé dans un canal conduisant du sol au nuage orageux. On assimile l'éclair à un fil électrique cylindrique infini, d'axe OZ et de rayon  $a$ , parcouru par un courant  $I(t)$ , uniformément réparti dans une section droite.

- 3.1 - Que peut-on déduire des considérations d'invariances et de symétries, pour le champ magnétique  $\vec{B}(r, \theta, z)$  créé par cette distribution. On utilisera la base cylindrique  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$ .
- 3.2 - Déterminer le vecteur champ magnétique créé en tout point M de l'espace.
- 3.3 - A partir de la force de Lorentz, justifiez la tendance du canal de l'éclair à implorer.

La foudre engendre, donc, des champs magnétiques variables qui peuvent perturber les circuits électriques domestiques. On considère le circuit électrique domestique qu'on assimile géométriquement à un cadre carré de côté  $d = 5 \text{ m}$ , situé à la distance moyenne  $D$  de l'éclair. Le circuit électrique et l'éclair sont coplanaires : (**figure 4a**).

- 3.4 - Justifier l'apparition d'une force électromotrice d'induction  $e(t)$ .

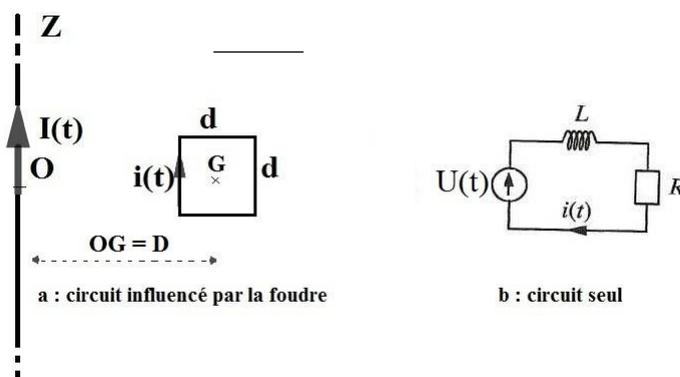
Le circuit électrique domestique est modélisé par une alimentation alternative de force électromotrice  $U(t) = U_m \cdot \cos(\omega t)$ , une bobine d'inductance  $L$  et une résistance  $R$  en série (**figure 4b**).

- 3.5 - Établir l'équation différentielle électrique complète de ce circuit, reliant  $I(t)$  et  $i(t)$ , courant circulant dans le circuit électrique en présence de l'éclair.

- 3.6 - On peut caractériser la perturbation de la foudre par  $\varepsilon = \frac{|e(t)|_{max}}{U_m}$ . On donne  $U_m = 311 \text{ V}$ .

3.6.1 - Montrer que pour avoir  $\varepsilon \leq 1\%$ , on doit avoir  $D \geq D_{min}$ ; donner l'expression de la distance minimale  $D_{min}$ . On justifiera les éventuelles approximations utilisées.

3.6.2 - En vous inspirant de 2), donner un ordre de grandeur de  $D_{min}$ .



**Figure 4 – Influence magnétique éclair-cadre**

#### 4 - Décharge de la foudre dans le sol

Le sol est assimilé à un conducteur, homogène et isotrope, de conductivité  $\gamma_s = 2 \cdot 10^{-2} \text{ S.m}^{-1}$ . Quand la foudre tombe sur un arbre, celui-ci peut être assimilé à une tige conductrice  $OZ$  parcourue par un courant  $I = 10 \text{ kA}$ .

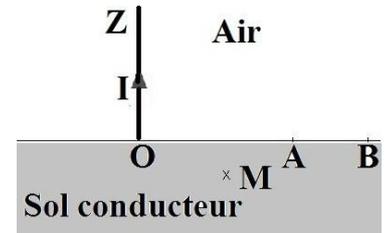


Figure 5 – Distribution de courants dans le sol conducteur

4.1 - En régime permanent, déterminer l'expression du vecteur densité de courant en un point quelconque dans le sol  $\vec{j}(M)$ . On utilisera les propriétés de symétrie et d'invariance.

4.2 - En déduire le potentiel électrique  $V(M)$  en un point quelconque M dans le sol en supposant le potentiel nul à l'infini.

4.3 - Déterminer l'expression de la différence de potentiel  $V = V_A - V_B$ , sachant que  $O, A$  et  $B$  sont alignés et qu'on pose  $OA = D, OB = D + p$ .

#### 5. S'abriter sous un arbre, en temps d'orage?

Un homme, de masse  $m = 70 \text{ kg}$ , court avec un pas de  $1 \text{ m}$ , vers l'arbre pour s'abriter d'un orage.

Estimez les risques qu'il peut encourir si l'arbre est touché par la foudre, sachant que celle-ci dure  $900 \mu\text{s}$ . Les raisonnements seront accompagnés, d'abord, par des expressions littérales.

**On donne :** La résistance électrique de son corps vaut  $R = 2 \text{ k}\Omega$ .

Pour  $i_H \geq I_{max} = 50 \text{ mA}$ , il y a risque de défibrillation cardiaque pouvant entraîner la mort.

La capacité calorifique massique de l'eau est  $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

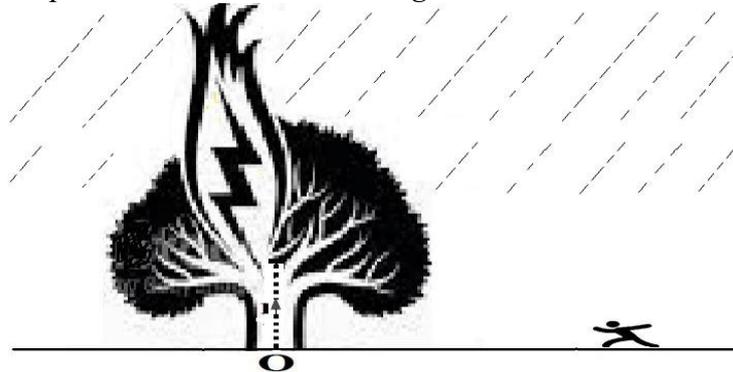


Figure 6 – Foudre se déchargeant à travers un arbre

## LA Foudre

† Nous étions à un certain moment (l'orage était menaçant) dans un champ électrique prodigieux. Il suffisait d'écartier les doigts de nos gants pour qu'à l'extrémité de chaque doigt surgisse un effluve violet permanent de plusieurs centimètres. Les cagoules de mes amis étaient frangées de petits arcs grésillants. Entre mes semelles isolantes au potentiel zéro et ma tête, il y avait certainement plusieurs centaines de milliers de volts†<sup>a</sup> (récit de Paul Beylier - Mergier, escalade du Cervin ; le Cervin est une montagne très pointue, isolée dans le massif des Alpes)

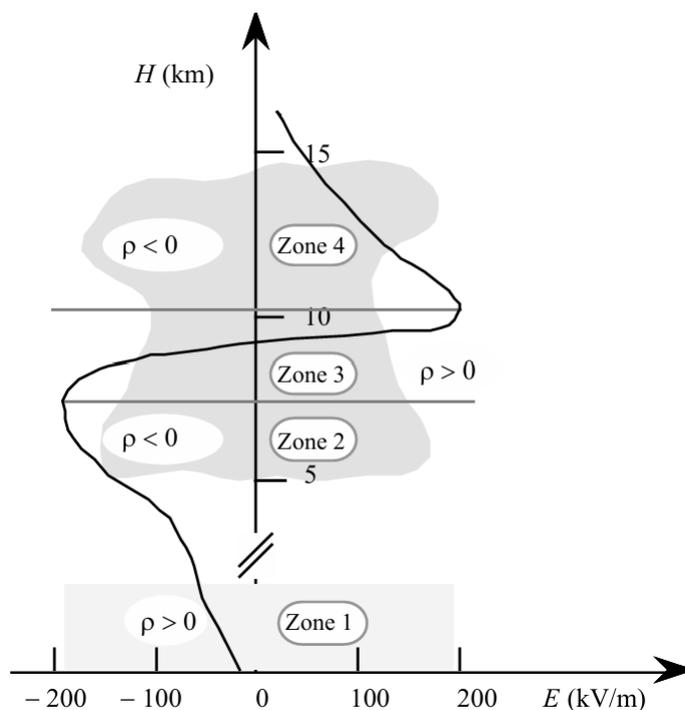
Perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7}$  SI

Vitesse de la lumière  $c = 3.10^8$  m.s<sup>-1</sup>

### I. Physique du nuage orageux

Une équipe du laboratoire d'aérodynamique de l'Université de Toulouse a développé une technique qui permet d'envoyer, jusqu'à l'intérieur des nuages, des sondes de champ électrique accrochées à de petits ballons. Ce champ est essentiellement vertical et on supposera dans tout le problème qu'il est strictement vertical. La **figure 1** donne un exemple du profil de sa valeur algébrique, comptée positivement pour un champ ascendant.

Le nuage est chargé et l'on peut y distinguer deux zones chargées négativement et une zone chargée positivement.



**Figure 1 :** Champ électrique atmosphérique en fonction de l'altitude

1 - Indiquer, en le justifiant (théorème de Gauss ou équation de Maxwell-Gauss), le signe des charges électriques dans chaque zone.

2 - On modélise le nuage par un dipôle vertical situé en son centre. En admettant que le champ créé au sol ( $5$  kV/m) est créé par ce dipôle, donner un ordre de grandeur de ce moment dipolaire. Préciser l'orientation de ce dipôle.

Au voisinage du sol, se développe sur une hauteur de  $500$  m, une zone chargée positivement par ionisation de l'air et par l'effet de pointe que l'on va illustrer sur un exemple particulier. On a tracé les équipotentielles au voisinage de deux aspérités (**figure 2 en fin d'énoncé sur document réponse**). Ces aspérités sont supposées conductrices, donc leurs surfaces sont des équipotentielles.

3 - Sur le document réponse, représenter l'allure de quelques lignes de champ au voisinage des deux aspérités.

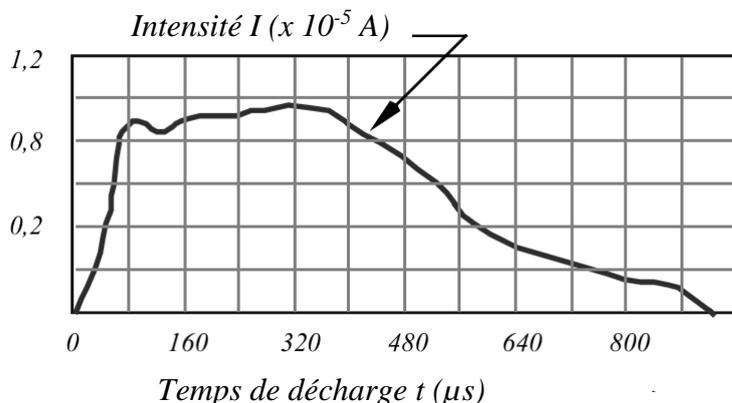
4 - Sur le document réponse, indiquer les régions le champ est-il le plus intense ?

5 - Si on admet que loin de l'aspérité le champ est de  $5$  kV/m, évaluer graphiquement le champ au sommet de chaque aspérité.

6 - Commenter le texte donné en préambule à l'aide des réponses aux questions précédentes et de la donnée du champ disruptif dans l'air sec, soit  $30$  kV/cm.

## II. Décharge électrique : la foudre.

La première phase d'un coup de foudre est la formation d'une pré décharge peu lumineuse appelée traceur qui progresse à travers l'air avec une vitesse relativement faible. Cette pré-décharge prend naissance d'une part au sol (coups de foudre ascendants) d'autre part dans le nuage (coups de foudre descendants). Lorsque les traceurs se rejoignent, il s'établit une liaison conductrice entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité. La **figure 3** donne un exemple de l'intensité  $I(t)$  d'un coup de foudre.



**Figure 3 :** Forme d'un courant de foudre.

7 - Évaluer la charge totale  $Q$  écoulée et l'intensité moyenne  $I_m$  du courant de foudre.

8 - A partir de la **figure 1** et en modélisant le champ électrique dans la région considérée, estimer la différence de potentiel  $U$  entre le bas du nuage (situé à une altitude de l'ordre du kilomètre) et le sol. L'ordre de grandeur trouvé est voisin de 400 MV.

9 - Lors de la décharge, on admet que l'énergie dissipée est celle d'un condensateur de charge  $Q$  sous la d.d.p.  $U$ . Évaluer l'énergie dissipée au cours de cette décharge et la capacité de ce condensateur.

10 - Est-il envisageable pratiquement de récupérer cette énergie ?

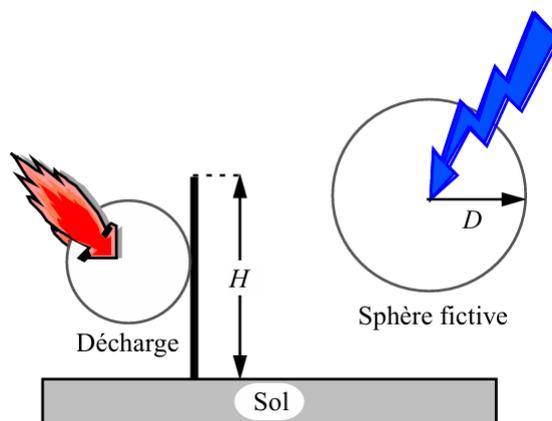
11 - La foudre peut engendrer des tensions perturbatrices le long des circuits électriques. Expliquer ce phénomène en s'appuyant sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme. À quel moment de la décharge ces effets sont-ils les plus importants ? Pourquoi ?

## III. Tige de Franklin ; zone de protection.

Lorsqu'un traceur arrive à une distance  $D$  d'un obstacle et qu'il est suivi d'une décharge d'intensité de crête  $I$ , on dit que  $D$  est la *distance d'amorçage*. Ainsi, le point d'impact de la foudre se détermine-t-il par le premier objet situé à la distance d'amorçage  $D$  du traceur descendant. Pour établir une zone de protection au voisinage d'un obstacle, on utilise la méthode de la *sphère fictive*. Pour ce faire, on entoure par la pensée l'extrémité du traceur d'une sphère fictive de rayon  $D$  (**Figure 4**).

On admettra dans ce qui suit la relation empirique liant  $D$  et  $I$  :

$$D \text{ (en m)} = 10 \cdot I^{2/3} \text{ (I en kA)}$$



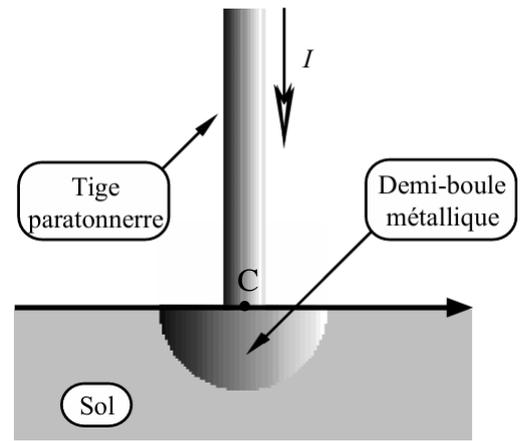
**Figure 4 :** Illustration de la méthode des sphères fictives

12 - Soit une tige conductrice de hauteur  $H$  fixée dans le sol. Montrer que tous les points sur le sol, situés à une distance  $R < L$  du pied de la tige ne peuvent être atteints par la foudre. On exprimera  $L$  en fonction de  $H$  et  $D$  en distinguant deux cas.

13 - Calculer, pour une tige de 30 m de hauteur, le rayon de protection  $L$  lorsque les intensités de crêtes de courant de foudre sont, respectivement, 3 kA, 10 kA, 30 kA et 50 kA.

14 - Commenter le résultat quant au rôle de protection d'une telle tige.

Lorsque le courant de foudre d'un impact direct sur un paratonnerre s'écoule par la prise de terre d'une installation, de fortes surtensions peuvent apparaître. La résistance de la prise de terre ne doit pas excéder  $30 \Omega$ . Considérons alors (**Figure 5**) une prise de terre constituée par une demi-sphère métallique pleine, de rayon  $a$  et placée dans un sol de résistivité  $\rho = 100 \Omega.m$ . Un courant de foudre, d'intensité  $I$ , arrive sur la tige paratonnerre fixée au centre  $C$  de l'hémisphère.



**Figure 5 :** Prise de terre

16 - En déduire, à la distance  $r > a$ , la densité de courant  $j(r)$  et le potentiel  $V(r)$ , ce dernier étant nul à l'infini.

17 - Déterminer l'expression du potentiel  $U$  pris par la demi-sphère.

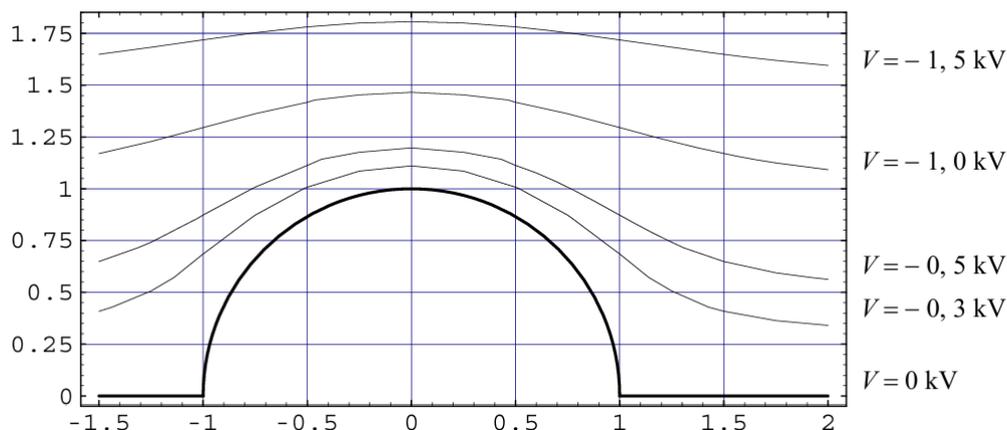
18 - La résistance de terre étant définie par  $R = U/I$ , calculer le rayon  $a$  de l'hémisphère de telle manière que la valeur de la résistance soit inférieure à  $30 \Omega$ .

19 - La tension de pas  $V_p$  étant définie comme la différence de potentiel entre deux points de la surface du sol distants de un mètre et situés sur la même droite issue de  $C$ . Calculer cette tension de pas pour un courant  $I = 50 \text{ kA}$  à 10 mètres puis à 100 mètres de la prise de terre.

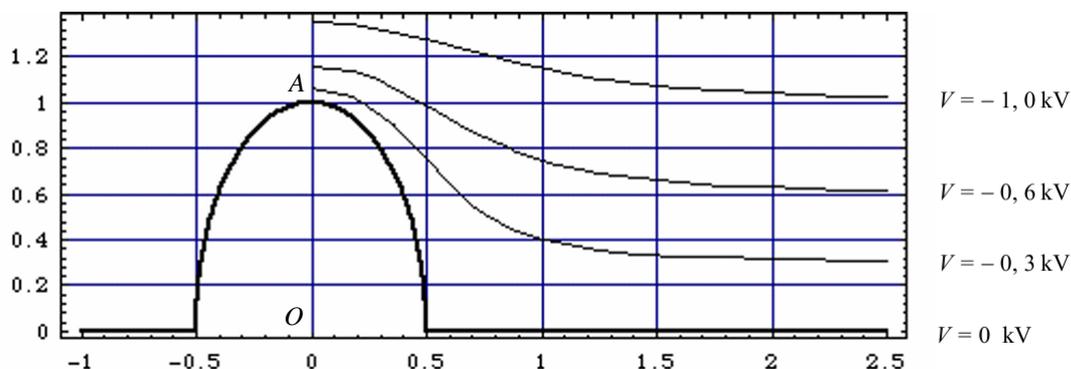
20 - Sachant que la résistance entre les deux pieds d'une personne est de  $2,5 \text{ k}\Omega$ , quel serait l'ordre de grandeur de l'intensité qui s'écoulerait à travers le corps de la personne ?

21- Sachant que l'intensité dans la personne ne doit pas dépasser  $25 \text{ mA}$ , à quelle distance doit-elle se trouver du point d'impact ?

NOM : .....



**Figure 2a** : allure de quelques lignes équipotentielles au voisinage d'une demi-sphère conductrice maintenue au potentiel du sol. Très loin de ce conducteur, le champ électrique est uniforme. L'unité de longueur est le rayon de la sphère.



**Figure 2b** : allure de quelques lignes équipotentielles (pour  $x$  positif) au voisinage d'un demi-ellipsoïde de révolution conducteur maintenue au potentiel du sol. Très loin de ce conducteur, le champ électrique est uniforme et parallèle au grand axe de l'ellipsoïde. L'unité de longueur est le demi-grand axe,  $OA$ , de l'ellipse. À titre documentaire : pour l'ellipsoïde est décrit par

$$r \frac{x^2 + y^2}{e^2} + z^2 = a^2 \quad (0 < e \leq 1) ; \quad \frac{E(A)}{E_0} = \frac{(1-e^2)^{3/2}}{e^2(\operatorname{argth}(\sqrt{1-e^2}) - \sqrt{1-e^2})}$$