2 LE POTENTIEL ÉLECTRIQUE

Pourquoi y a-t-il parfois de telles décharges électriques dans les fenêtres du cockpit des avions ?

aviationforaviators.com/2021/02/26/static-discharge-vs-st-elmos-fire/

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

2.1 L'ÉNERGIE POTENTIELLE ÉLECTRIQUE (U_E)

On peut utiliser le principe de conservation de l'énergie mécanique pour résoudre des problèmes. La seule chose qui nous manque pour utiliser cette méthode est la formule de l'énergie potentielle électrique.

L'énergie potentielle électrique

La force électrique faite par une sphère chargée est une force conservatrice. Cela signifie qu'il existe une énergie potentielle associée à cette force. Pour la force électrique, cette énergie sera notée U_E.

Énergie potentielle d'une charge *q* à une distance *r* du centre d'une sphère ayant une charge *Q*

$$U_E = \frac{kqQ}{r}$$

On peut alors résoudre quelques problèmes en utilisant la conservation de l'énergie mécanique. Peut-être que quelques rappels seraient les bienvenus.

Quelques rappels

L'énergie mécanique

L'énergie mécanique d'un système est

$$E_{mec} = E_k + U$$

où U est l'énergie potentielle. (Pour éviter toute confusion avec le champ électrique dans ce chapitre, l'énergie mécanique sera toujours notée E_{mec}.) On connait maintenant 2 formes d'énergie potentielle, soit l'énergie gravitationnelle et l'énergie électrique.

$$U = U_g + U_E$$

$$U_g = mgy \qquad U_E = \frac{kQq}{r}$$

Le principe de conservation de l'énergie mécanique

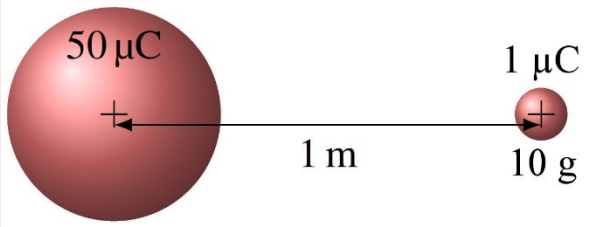
S'il n'y a pas de forces externes ou de forces non conservatrices comme la friction, on peut utiliser le principe de conservation de l'énergie mécanique

$$E_k + U = E_k' + U'$$

S'il y a des forces externes ou des forces non conservatrices, on peut résoudre avec

$$E_k + U + W_{autres} = E'_k + U'$$

Exemple 2.1.1



Une charge de 1 µC ayant une masse de 10 g est initialement au repos à une distance de 1 m du centre d'une sphère ayant une charge de 50 µC. Il y a alors répulsion électrique entre les charges. On laisse alors partir la charge de 1 µC tout en maintenant la sphère en place. Quelle sera la vitesse de la charge de 1 µC quand elle sera loin de la sphère ?

On va résoudre ce problème avec la conservation de l'énergie mécanique. L'énergie mécanique de la charge de 1 µC est

$$E_{mec} = \tfrac{1}{2} m_p v^2 + U_E$$

<u>Énergie quand la charge de 1 µC</u> <u>est à 1 mètre de la sphère</u>

Initialement, l'énergie cinétique est nulle puisque la charge de 1 µC est au repos. L'énergie initiale est donc

$$E_{mec} = U_E = \frac{kQq}{r}$$

La valeur de l'énergie mécanique initiale est donc

$$\begin{aligned} E_{mec} &= \frac{kQq}{r} \\ &= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot 50\times10^{-6} C \cdot 10\times10^{-6} C}{1m} \\ &= 4,5J \end{aligned}$$

<u>Énergie quand la charge de 1 µC est loin de la sphère</u>

L'énergie mécanique quand la charge de 1 µC est loin est

$$\begin{aligned} E'_{mec} &= \tfrac{1}{2} mv'^2 + U'_E \\ &= \tfrac{1}{2} \cdot 0,01kg \cdot v'^2 + 0 \end{aligned}$$

(L'énergie potentielle est nulle puisque la distance *r'* devient alors très grande.)

Application du principe de conservation de l'énergie mécanique

La conservation de l'énergie nous donne alors

$$E_{mec} = E'_{mec}$$
$$4,5J = \tfrac{1}{2} \cdot 0,01kg \cdot v'^2$$
$$v' = 30 \tfrac{m}{s}$$

Erreur vraiment très fréquente : utiliser des formules pour accélération constante

Certains pourraient tenter de résoudre le problème précédent en cherchant le champ électrique à l'endroit où est la charge de 1 μC pour ensuite trouver la force sur la charge et son accélération. Avec l'accélération et le déplacement, ils trouvent la vitesse en utilisant les formules du mouvement à accélération constante. Cette façon de faire est uniquement bonne si le champ est uniforme. Si le champ n'est pas uniforme, la force et l'accélération changent continuellement et on ne peut pas appliquer les formules du mouvement à accélération constante. C'était le cas dans l'exemple précédent.

L'énergie potentielle électrique peut donc nous permettre de résoudre certains problèmes beaucoup plus facilement qu'avec les forces. On va donc développer cette idée.

2.2 LE POTENTIEL

Définition du potentiel

Comme on l'a fait pour le calcul de la force, on va séparer le calcul de l'énergie électrique en deux parties. Ainsi, le calcul de l'énergie potentielle électrique d'une charge q se fera avec les deux étapes suivantes.

1) On calcule une première partie qui dépend uniquement de la présence des charges autour de la charge pour laquelle on veut savoir l'énergie potentielle. Ce qu'on obtient s'appelle *le potentiel* (V).

2) On calcule l'énergie électrique de la charge avec la formule suivante, qui est en fait la définition du potentiel.

Définition du potentiel

$$U_E = qV$$

Cette séparation semble inutile dans des cas simples, mais elle permet d'analyser certaines situations plus facilement.

Unité du potentiel

La définition du potentiel veut dire que le potentiel doit être en J/C. On a donné le nom de *volt* à cette unité.

Le volt

$$1V = 1\tfrac{J}{C}$$

Le potentiel fait par une sphère

Revenons à notre petite charge q près de la sphère de charge Q. Avec ce qu'on sait, on peut maintenant trouver une formule qui donne le potentiel fait par la sphère.

On sait que l'énergie potentielle électrique d'une charge q près d'une sphère ayant une charge Q est

$$U_E = \frac{kQq}{r}$$

Or, l'énergie potentielle électrique de la charge q doit aussi être donnée par

$$U_E = qV$$

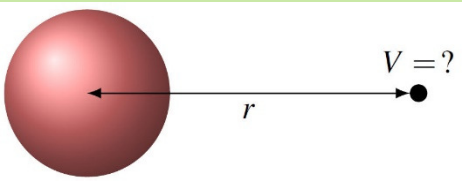
Puisque ces deux formules doivent donner le même résultat, on a

$$qV = \frac{kQq}{r}$$
$$V = \frac{kQ}{r}$$

Ce potentiel doit être fait par la charge Q. La charge q a une énergie potentielle uniquement parce que la charge Q est à proximité. S'il n'y avait pas de charge Q, il n'y aurait pas d'énergie potentielle et s'il n'y avait pas d'énergie potentielle, il n'y aurait pas de potentiel. On en conclut donc que c'est la charge Q qui fait le potentiel. Cela veut donc dire que la charge Q fait un potentiel autour d'elle. Ce potentiel est donné par cette formule.

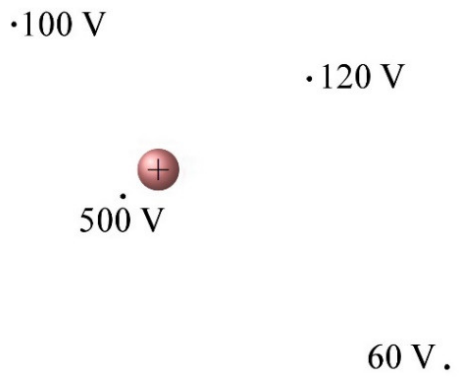
Potentiel à une distance *r* du centre d'une sphère ayant une charge *Q*

$$V = \frac{kQ}{r}$$



On se rappelle qu'au chapitre 1, les objets chargés créaient un champ électrique partout autour d'eux et que ce champ pouvait varier d'un endroit à l'autre.

Ici, on a un peu la même chose avec le potentiel : les objets chargés créent un potentiel électrique autour d'eux et ce potentiel peut changer d'un endroit à l'autre.



Par exemple, la figure de droite montre le potentiel à quelques endroits près d'une petite sphère chargée. Le potentiel diminue avec la distance, tel que prévu par la formule.

Notez que le potentiel est un scalaire. À chaque point de l'espace, il y a une valeur du potentiel. Ce n'est pas un vecteur, c'est un simple chiffre.

Exemple 2.2.1

Quel est le potentiel à 50 cm du centre d'une sphère ayant une charge de 40 µC ?

À cette distance, le potentiel est

$$\begin{aligned} V &= \frac{kQ}{r} \\ &= \frac{9\times10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}\cdot 40\times10^{-6}\,C}{0,5m} \\ &= 720\,000V \end{aligned}$$

Il ne faut pas se surprendre si on obtient des valeurs de quelques millions de volts…

Les surfaces équipotentielles

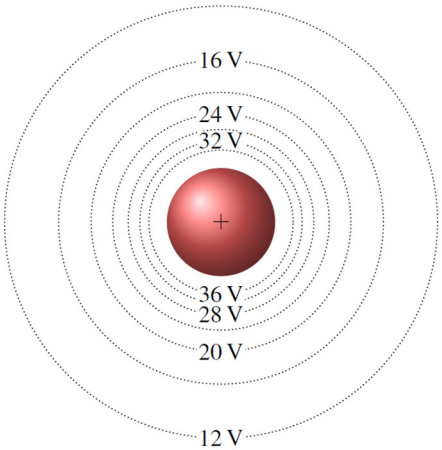
Définition

Comme avec le champ électrique, on peut représenter le potentiel autour d'un objet chargé. Pour y arriver, on utilise les surfaces équipotentielles.

Surfaces équipotentielles

Les surfaces équipotentielles sont des surfaces qui relient tous les endroits au même potentiel.

Surfaces équipotentielles d'une sphère chargée



Par exemple, la figure de droite montre les surfaces équipotentielles de 12 V, 16 V, 20 V, 24 V, 28 V, 32 V et 36 V près d'une sphère ayant une charge de 8 nC.

Comme le potentiel d'une sphère dépend uniquement de la distance, les surfaces équipotentielles sont des sphères autour de la sphère. Le potentiel est de 12 V à 600 cm de la charge, le potentiel est de 16 V à 450 cm de la charge, le potentiel est de 20 V à 360 cm de la charge et ainsi de suite jusqu'à la dernière ligne montrée de 36 V qui est à 200 cm de la charge. Plus on s'approche de la charge, plus le potentiel augmente. (Avec une charge négative, le potentiel serait de plus en plus négatif à mesure qu'on s'approcherait de la sphère.)

Calcul de l'énergie potentielle d'une petite charge

On peut maintenant utiliser le potentiel pour calculer l'énergie potentielle.

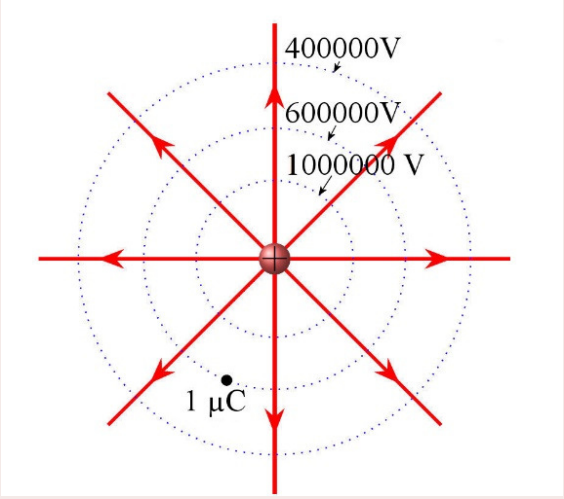
Exemple 2.2.2

Une petite charge de 1 μC est à 90 cm du centre d'une sphère ayant une charge de 60 μC. Quelle est l'énergie potentielle électrique de la petite charge ?

Nous allons commencer par trouver le potentiel fait par la sphère de 60 μC à une distance de 90 cm. À cette distance de la charge, le potentiel est de

$$\begin{aligned} V &= \frac{kQ}{r} \\ &= \frac{9\times10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}\cdot 60\times10^{-6}\,C}{0,9m} \\ &= 600\,000V \end{aligned}$$

On a donc une petite charge située à un endroit où le potentiel est de 600 000 V. La figure montre cette situation.



L'énergie potentielle électrique de la charge de 1 μC est donc

$$\begin{aligned} U_E &= qV \\ &= 1\times10^{-6}C \cdot 600\,000V \\ &= 0,6J \end{aligned}$$

Rappelons qu'avec cette façon de faire, on a donc calculé l'énergie potentielle de la charge de 1 µC en deux étapes.

1) On a calculé le potentiel fait par la sphère à l'endroit où est placée la charge de 1 µC (600 000 V).

2) On a calculé l'énergie de la charge de 1 µC avec $U_E = qV$.

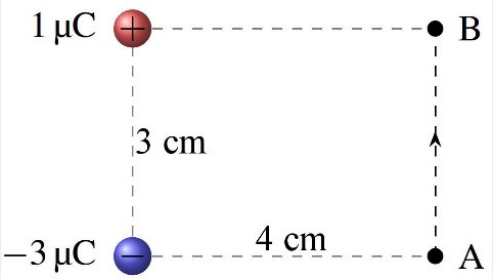
Le potentiel fait par plusieurs sphères chargées

S'il y a plusieurs sphères autour d'un point où on veut connaitre le potentiel, le potentiel à cet endroit sera simplement la somme des potentiels faits par chacune des sphères.

Potentiel à un endroit fait par plusieurs sphères chargées

$$V = \sum \frac{kQ}{r}$$

Exemple 2.2.3



Considérons la situation montrée sur la figure.

a) Quel est le potentiel au point A ?

Le potentiel au point *A* est fait par deux sphères chargées. Le potentiel sera donc la somme des potentiels faits par chacune des sphères chargées.

Au point *A*, on est à 4 m de la charge de -3 µC et à 5 m (diagonale du rectangle) de la charge de 1 µC. Le potentiel est donc

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} \\ &= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \left(-3\times10^{-6}C\right)}{0,04m} + \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot 1\times10^{-6}C}{0,05m} \\ &= -495\,000V \end{aligned}$$

b) Quel est le potentiel au point B ?

Au point *B*, on est à 5 m (diagonale du rectangle) de la charge de -3 µC et à 4 m de la charge de 1 µC. Le potentiel est donc

$$\begin{aligned} V_B &= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} \\ &= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot\left(-3\times10^{-6}C\right)}{0,05m} + \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot 1\times10^{-6}C}{0,04m} \\ &= -315\,000V \end{aligned}$$

c) Quel travail faut-il faire pour prendre une charge de -5 µC initialement au repos au point A et la placer au repos au point B ? (Il n'y a pas de gravitation et de friction.) On va résoudre ce problème avec l'énergie mécanique. Le travail externe qu'il faut faire se trouve avec la formule suivante.

$$E_k + U_E + W_{ext} = E_k' + U_E'$$

Comme la charge est au repos au début et à la fin, les énergies cinétiques sont nulles. On a alors

$$\begin{aligned} U_E + W_{ext} &= U_E' \\ W_{ext} &= U_E' - U_E \end{aligned}$$

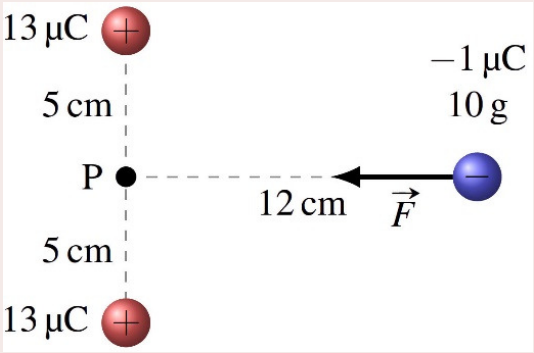
Comme l'énergie potentielle est qV, on a

$$\begin{aligned} W_{ext} &= qV' - qV \\ &= q\left(V' - V\right) \\ &= \left(-5\times10^{-6}C\right)\cdot\left(-315\,000V - -495\,000V\right) \\ &= -0,9J \end{aligned}$$

(Autrement dit, on reçoit 0,9 J quand on déplace cette charge.)

Exemple 2.2.4

Une charge négative de -1 µC est initialement au repos à la position montrée sur la figure. Elle est cependant attirée vers le point *P* par les deux charges positives. Quelle sera sa vitesse quand elle arrivera au point *P* ? (Il n'y a pas de gravitation et de friction.)



On va résoudre ce problème avec la conservation de l'énergie mécanique. L'énergie mécanique de la charge de -1 μC est

$$E_{mec} = \frac{1}{2}mv^2 + U_E$$

Énergie mécanique à l'instant 1 (situation illustrée sur la figure)

Au départ, l'énergie cinétique est nulle. On peut trouver l'énergie potentielle avec

$$U_E = qV$$

Le potentiel à cet endroit est le potentiel fait par les deux charges positives. La distance entre ces charges et la position initiale de l'électron est

$$\sqrt{(5cm)^2 + (12cm)^2} = 13cm$$

Le potentiel est donc

$$\begin{aligned} V &= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} \\ &= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot 13\times10^{-6}C}{0,13m} + \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot 13\times10^{-6}C}{0,13m} \\ &= 1,8\times10^6 V \end{aligned}$$

L'énergie potentielle de la charge est donc

$$\begin{aligned} U_E &= qV \\ &= -1\times10^{-6}C\cdot 1,8\times10^6 V \\ &= -1,8J \end{aligned}$$

Ainsi, l'énergie mécanique initiale est

$$E_{mec} = -1,8J$$

Énergie mécanique à l'instant 2 (charge au point P)

L'énergie mécanique au point *P* est

$$E'_{mec} = \frac{1}{2}mv'^2 + U'_E$$

Pour trouver l'énergie potentielle à cet endroit, il nous faut le potentiel. Au point *P*, on est à 5 cm des charges positives. Le potentiel est donc

$$\begin{aligned} V' &= \frac{kQ_1}{r_1'} + \frac{kQ_2}{r_2'} \\ &= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot 13\times10^{-6}C}{0,05m} + \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\cdot 13\times10^{-6}C}{0,05m} \\ &= 4,68\times10^6 V \end{aligned}$$

L'énergie potentielle de la charge à cet endroit est donc

$$\begin{aligned} U_E' &= qV' \\ &= -1\times10^{-6}C\cdot 4,68\times10^6 V \\ &= -4,68J \end{aligned}$$

L'énergie mécanique au point P est donc

$$\begin{aligned} E_{mec}' &= \frac{1}{2}mv'^2 + U_E' \\ &= \frac{1}{2}\cdot 0,01kg\cdot v'^2 - 4,68J \\ &= 0,005kg\cdot v'^2 - 4,68J \end{aligned}$$

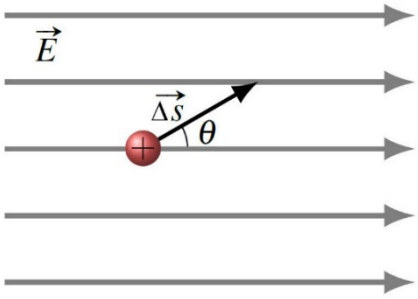
La conservation de l'énergie mécanique

On a alors

$$\begin{aligned} E_{mec} &= E_{mec}' \\ -1,8J &= 0,005kg\cdot v'^2 - 4,68J \\ v' &= 24\tfrac{m}{s} \end{aligned}$$

2.3 LE POTENTIEL ET LE CHAMP ÉLECTRIQUE

Le changement de potentiel dans un champ électrique uniforme



Il y a un lien entre le champ électrique E et la différence de potentiel ΔV entre deux endroits qui nous sera utile tout au long de ce chapitre. Pour le trouver, imaginons qu'une charge se déplace d'une distance Δs dans un champ électrique uniforme.

Le travail fait par la force électrique sur la charge est

$$\begin{aligned} W_E &= F\Delta s\cos\theta \\ &= qE\Delta s\cos\theta \end{aligned}$$

Puisque la force électrique est une force conservatrice, le travail fait par la force électrique doit être égal à -ΔU_E, on a donc

$$\Delta U_E = -qE\Delta s\cos\theta$$

Puisque

$$\begin{aligned} \Delta U_E &= U_{E2} - U_{E1} \\ &= qV_2 - qV \\ &= q\left(V_2 - V_1\right) \\ &= q\Delta V \end{aligned}$$

on arrive à

$$q\Delta V = -qE\Delta s\cos\theta$$

En éliminant les q, on arrive à

Lien entre ΔV et E

$$\Delta V = -E\Delta s\cos\theta$$

Plusieurs conclusions intéressantes peuvent être obtenues à partir de cette équation.

Le potentiel change quand il y a un champ électrique

La formule

$$\Delta V = -E\Delta s\cos\theta$$

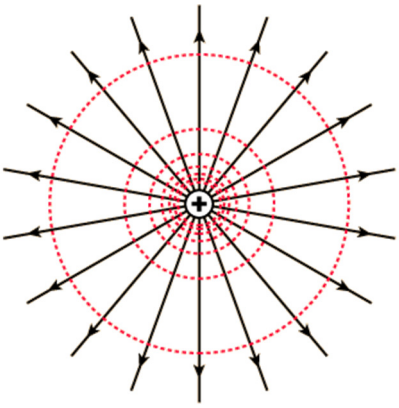
montre qu'un champ électrique fait changer le potentiel. Si le champ est nul, alors ΔV est toujours 0 peu importe la direction θ, ce qui signifie que le potentiel est le même partout. Par contre, s'il y a un champ électrique dans une région de l'espace, alors ΔV pourrait ne pas être nul, ce qui signifie que le potentiel n'est pas le même partout.

Cette formule montre aussi que le changement de potentiel est plus grand si le champ électrique est plus grand. Plus le champ est grand, plus le potentiel augmente rapidement et plus les lignes équipotentielles sont près les unes des autres. Cela signifie que

Propriété des surfaces équipotentielles

Plus les surfaces équipotentielles sont près les unes des autres, plus le champ électrique est fort.

C'est ce qui se passe avec une sphère chargée. Puisque le champ est de plus en plus grand à mesure qu'on s'approche de la sphère, le potentiel change de plus en plus rapidement et les surfaces équipotentielles sont de plus en plus près les unes des autres.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/equipot.html

Les surfaces équipotentielles sont perpendiculaires aux lignes de champ électrique

Si, dans une région où il y a un champ électrique, on se déplace d'une petite distance Δs entre deux points sur une surface équipotentielle, on devrait avoir que

$$\Delta V = 0$$

puisque, par définition, les deux points sont au même potentiel s'ils sont sur la même surface équipotentielle. Or, la différence de potentiel peut aussi se calculer avec

$$\Delta V = -E\Delta s \cos\theta$$

En combinant ces deux résultats, on obtient

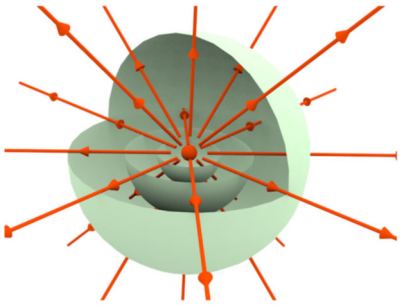
$$0 = -E\Delta s \cos\theta$$

Comme il y a un champ, ce n'est pas E qui est nul. Comme on se déplace, ce n'est pas le déplacement qui est nul. C'est donc le cosinus qui doit être nul. Cela signifie que l'angle est de 90°. Cet angle est l'angle entre le champ et le déplacement. Puisqu'on se déplaçait ici le long d'une surface équipotentielle, cela veut dire qu'il y a 90° entre le champ et la surface équipotentielle. Cette propriété sera notre 6e propriété des lignes de champ.

Propriétés des lignes de champ

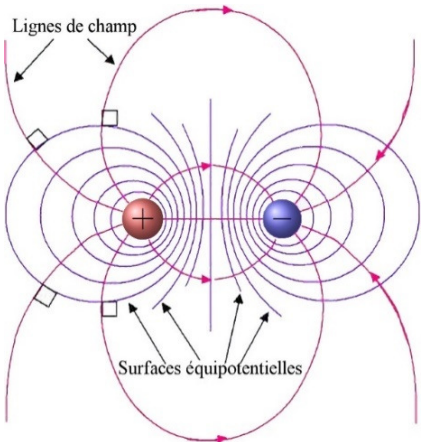
6) Les lignes de champ sont toujours perpendiculaires aux surfaces équipotentielles.

C'est ce qu'on peut voir sur cette image montrant les surfaces équipotentielles et les lignes de champ électrique d'une sphère chargée.

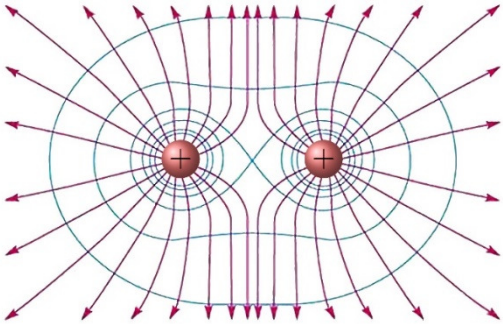


edberg.ccnysites.cuny.edu/F13-PHYS208/13/#/31

Les deux images suivantes montrent les lignes de champ et les surfaces équipotentielles pour 2 situations (2 charges de signes opposées et 2 charges positives). On voit bien sur ces figures que les lignes de champ sont toujours perpendiculaires aux surfaces équipotentielles.



www.pstcc.edu/departments/natural_behavioral_sciences/Web%20Physics/Experim%2001.htm



www.lchsyes.org/cms/lib04/PA02001489/Centricity/Domain/87/AP%20Physics/APPhysCh19.pdf

La direction du champ électrique

La formule

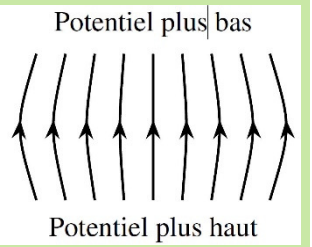
$$\Delta V = -E\Delta s \cos\theta$$

nous indique aussi, que si on se déplace dans le sens du champ électrique ($\theta = 0°$), on obtient un ΔV négatif, signifiant que le potentiel baisse dans cette direction.

Si on se déplace dans le sens opposé au champ électrique ($\theta = 180°$), on obtient un ΔV positif, signifiant que le potentiel monte dans cette direction.

On arrive donc à la conclusion suivante.

Le potentiel baisse si on va dans la direction du champ électrique et le potentiel monte si on va dans la direction opposée au champ électrique.



Le mouvement des charges

Si on place une charge positive dans le champ, elle subira une force dans le sens du champ, donc vers l'endroit où le potentiel est le plus bas. Si on place une charge négative dans le

champ, elle subira une force dans le sens contraire du champ, donc vers l'endroit où le potentiel est le plus élevé.

Les charges positives sont attirées vers les endroits où le potentiel est plus bas et les charges négatives sont attirées vers les endroits où le potentiel est plus haut.

On peut faire deux analogies pour visualiser ce mouvement et le concept de potentiel.

En 1813, Siméon Poisson fit l'analogie suivante entre l'électricité et la gravitation.

Gravitation	Quantité équivalente en électricité
Masse	Charge
Énergie gravitationnelle	Énergie électrique
Altitude	Potentiel

Ainsi, les charges positives cherchent à aller vers les endroits où le potentiel est le plus bas, exactement comme les masses cherchent à descendre vers la plus basse altitude sous l'effet de la gravitation.
On peut aussi faire l'analogie suivante avec la thermodynamique.

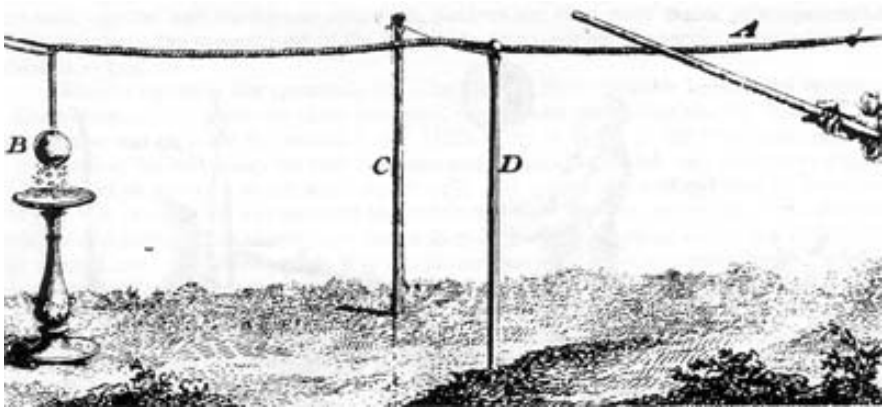
Thermodynamique	Quantité équivalente en électricité
Chaleur	Charge
Température	Potentiel

Ainsi, les charges positives cherchent à aller vers les endroits où le potentiel est le plus bas, exactement comme la chaleur cherche à aller vers les endroits où la température est basse. Cette analogie est vraiment bonne, car les équations qui décrivent le transport des charges dans la matière sont exactement identiques à celles décrivant le transport de la chaleur dans la matière.

2.4 LES ISOLANTS ET LES CONDUCTEURS

En février 1729, Stephen Gray se lance dans l'étude du passage de l'électricité d'un corps à un autre. Il avait déjà observé cette transmission en 1721 quand il avait vu qu'une plume qui avait été mise en contact avec un tube de verre chargé pouvait à son tour attirer des petits objets. Cette fois, il décide d'étudier davantage ce phénomène. Il fixe donc des objets de plus en plus longs au bout d'un tube tout en variant les matériaux utilisés (il utilise même des légumes !). Quand il charge le tube en le frottant, il examine si la charge se propage dans l'objet fixé au bout du tube. Ses observations montrent que l'électricité peut effectivement se déplacer sur une distance d'un peu plus d'une dizaine de mètres, ce qui l'amène à penser que l'électricité se déplace dans la matière un peu comme un fluide.

Le 30 juin, Gray s'installe avec ses instruments chez son bon ami Granville Wheler, qui possède un vaste domaine à la campagne et qui s'intéresse aussi à l'électricité. Ensemble, ils parviennent à transmettre l'électricité sur une distance de quelques centaines de mètres. (On dirait que chaque histoire de cette découverte donne une distance différente !)



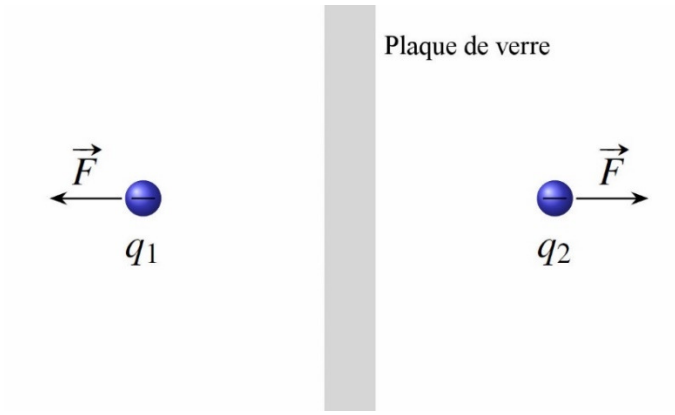
faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/revoltingideas/week7j.html

Tout fonctionne bien tant que le long fil dans lequel doit se propager l'électricité est soutenu par des fils de soie. Mais quand ils remplacent les fils de soie par des fils de laiton (parce que les fils de soie étaient trop fragiles), plus rien ne fonctionne ! Jusque-là, ils pensaient que l'électricité ne pouvait pas passer par les fils de soie parce qu'ils étaient trop petits. Mais comme les fils de laiton étaient tout aussi petits, ce devait être autre chose. Le 3 juillet 1729, il devient clair pour eux qu'il y a une différence importante entre le laiton et la soie. La soie ne laisse pas passer facilement l'électricité alors que le laiton laisse passer facilement l'électricité. Quand on soutient le long fil par des fils de laiton, la charge du fil peut s'échapper par les fils de laiton et on ne peut plus le charger.

Ils viennent de faire une découverte majeure. Certaines substances, comme les métaux, laissent très facilement passer l'électricité. Ce sont les *conducteurs.* D'autres substances, comme des fils de soie, ne laissent pas passer l'électricité. Ce sont des *isolants.* (Gray n'utilise pas les termes d'isolants et de conducteurs. Le terme *conducteur* fut introduit par son compatriote Desaguliers en 1740.)

Les découvertes de Gray et Wheler permettent aussi d'expliquer pourquoi on parvenait à charger certains objets et pourquoi on ne parvenait pas à charger d'autres objets. Les substances isolantes peuvent être facilement chargées, car les charges générées par le frottement restent en place sur l'objet. Par contre, les substances conductrices ne peuvent pas se charger si on les tient dans notre main, car les charges créées par le frottement se déplacent dans l'objet pour aller dans notre main et ensuite se perdre dans le sol. Gray et Wheler montrent qu'on peut charger un conducteur à condition de soutenir l'objet avec des fils isolants plutôt qu'avec la main. Ainsi, les charges ne peuvent pas quitter l'objet et l'objet peut être chargé.

Notez que les isolants bloquent le passage des charges, mais ne bloque pas la force électrique. Deux charges identiques séparées par une plaque isolante se repousseront comme s'il n'y avait pas de plaque.



(Cela fut d'ailleurs à l'origine de nombreuses disputes au 18e siècle. Comme on pensait que la force électrique était causée par un mouvement de fluide électrique, le fluide électrique devait donc pouvoir passer librement à travers une plaque de verre puisque le verre ne bloquait pas la force. Pourtant le verre est un isolant ce qui signifie qu'il ne devrait pas laisser passer le fluide…)

2.5 LE CHAMP ÉLECTRIQUE MAXIMUM DANS UN ISOLANT

Dans un isolant, il y a un champ électrique maximum. Si on dépasse cette valeur, la substance devient subitement conductrice.

La **rigidité diélectrique** est la valeur maximale du champ électrique que peut supporter un diélectrique. Voici la valeur maximale du champ électrique pour quelques diélectriques.

Substance	Rigidité MN/C	Substance	Rigidité MN/C
Air	3,6	**Papier**	16
Quartz	8	**Bakélite**	24
Titanate de strontium	8	**Polystyrène**	24
Nylon	14	**Téflon**	60
Pyrex	14	**Mica**	150

Ces valeurs sont un peu approximatives, car la valeur exacte peut dépendre d'impuretés dans la substance. Par exemple, la rigidité électrique de l'air peut descendre à 1 MN/C si elle est très humide.

Cette limite existe parce que si le champ devient trop fort, des électrons de valence seront arrachés des atomes et pourront alors se déplacer pour faire un courant. La substance devient alors conductrice.

C'est ce qui se passe quand il y a des éclairs. Quand le champ électrique dans l'air dépasse la rigidité électrique de l'air, l'air devient conducteur et il se forme un éclair.

deweybertolini.com/2016/01/24/lightning-strike/lightning/

Dans le clip suivant, on peut voir ce qui se produit quand le champ entre 2 composantes d'un réseau électrique devient trop grand. L'air devient conducteur et il se forme un éclair entre les composantes. Cela se produit souvent lors de l'ouverture ou de la fermeture d'un interrupteur. Quand les 2 côtés de l'interrupteur sont tout près l'un de l'autre, le champ très important entre les 2 côtés de l'interrupteur et il se peut qu'on dépasse la rigidité électrique de l'air.
https://www.youtube.com/watch?v=UVF3iC_voyU
https://www.youtube.com/watch?v=AbHvjgEGM4c

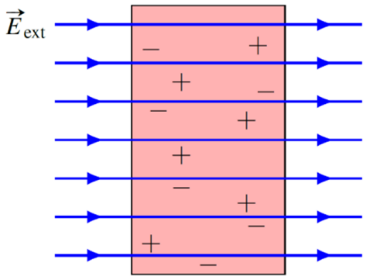
2.6 LE CHAMP ÉLECTRIQUE ET LES CONDUCTEURS

3 propriétés du champ avec un conducteur

Première propriété

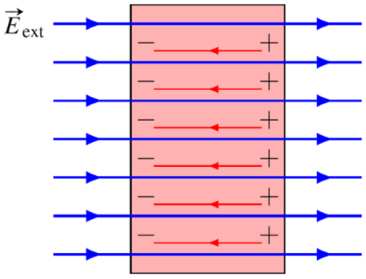
Propriétés du champ électrique à l'intérieur ou près d'un conducteur

1) Le champ est nul dans un conducteur à l'équilibre.

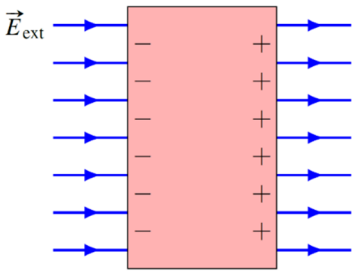


Expliquons pourquoi il doit en être ainsi. Supposons qu'il y ait un champ électrique dans un conducteur et que les charges positives et négatives peuvent se déplacer dans ce conducteur. Pour illustrer, notre conducteur sera un simple bloc dans un champ électrique uniforme.

Au départ (figure de droite), quand on place le conducteur dans un champ électrique (appelé ici E_{ext} pour champ à l'extérieur du conducteur), on a cette situation. On a placé quelques charges dans le conducteur pour illustrer qu'il y a des charges qui peuvent se déplacer. Ces charges se retrouvent alors dans un champ électrique et elles vont donc subir une force. Les charges positives subissent une force vers la droite et les charges négatives subissent une force vers la gauche. Les charges vont donc se déplacer dans ces directions, jusqu'à ce qu'elles atteignent la surface de droite (charges positives) ou de gauche (charges négatives). On a alors la situation montrée sur la figure de gauche.



Les charges se sont déplacées jusqu'aux surfaces. Toutefois, cette séparation de charge crée à son tour un champ électrique allant des charges positives aux charges négatives. Ce champ vers la gauche (en bleu sur la figure), appelé *le champ induit*, s'oppose au champ électrique externe. Tant que ce champ induit n'annule pas le champ extérieur, il reste du champ dans le conducteur et les charges subissent une force qui les amène vers les surfaces. Ceci augmente la séparation de charge, ce qui augmente le champ induit. Le tout s'arrête quand le champ induit annule exactement le champ extérieur. Alors, il n'y a plus de champ dans le conducteur et la séparation de charge reste stable. On a alors la situation montrée à droite.

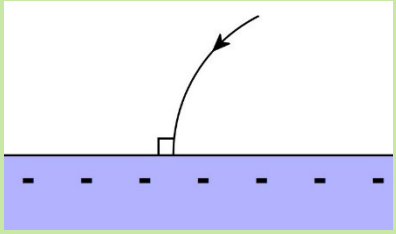


Ainsi à l'équilibre, le champ à l'intérieur est nul.

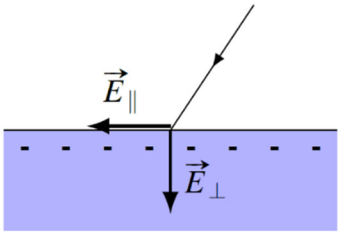
Deuxième propriété

Propriétés du champ électrique à l'intérieur ou près d'un conducteur

2) Le champ est toujours perpendiculaire à la surface à l'extérieur du conducteur.



La démonstration est un peu similaire à celle faite précédemment. Commençons par supposer que le champ ne soit pas perpendiculaire à la surface. Dans ce cas, il y aura deux composantes du champ à la surface du conducteur : la composante parallèle et la composante perpendiculaire (figure de droite).



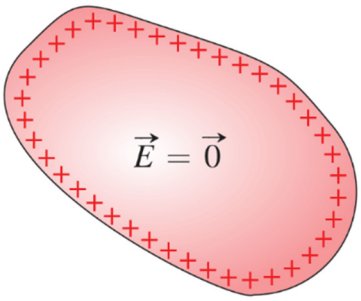
La composante perpendiculaire ne peut pas faire grand-chose, car elle ne peut amener les charges à l'intérieur puisque dès qu'on entre à l'intérieur, le champ disparait comme on l'a vu précédemment. Par contre, la composante parallèle va pouvoir déplacer des charges le long de la surface. Ce déplacement de charges va à son tour créer un champ dans la direction opposée au champ parallèle. Ce déplacement durera tant qu'il y aura des forces sur les charges, donc tant qu'il restera du champ électrique parallèle à la surface. Quand on atteint l'équilibre, c'est qu'il n'y a plus de déplacement de charge le long de la surface, donc plus de champ parallèle. Il ne reste donc que le champ perpendiculaire, ce qui montre que les lignes de champ arrivent toujours perpendiculairement à la surface d'un conducteur.

Troisième propriété

Propriétés du champ électrique à l'intérieur ou près d'un conducteur

3) La charge excédentaire d'un conducteur est toujours sur la surface du conducteur.

Ainsi, si on donne une charge positive au conducteur de la figure suivante, la répartition de charge ressemblera à ce qu'on peut voir sur la figure de droite.



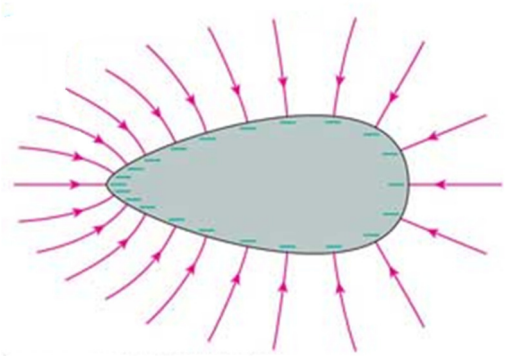
On peut simplement comprendre cette propriété en se disant que ces charges se repoussent toute les unes des autres, ce qui les pousse vers la surface de l'objet.

2 Situations pour résumer

Résumons ces 3 propriétés par deux exemples.

Exemple 1 : Un objet chargé négativement.

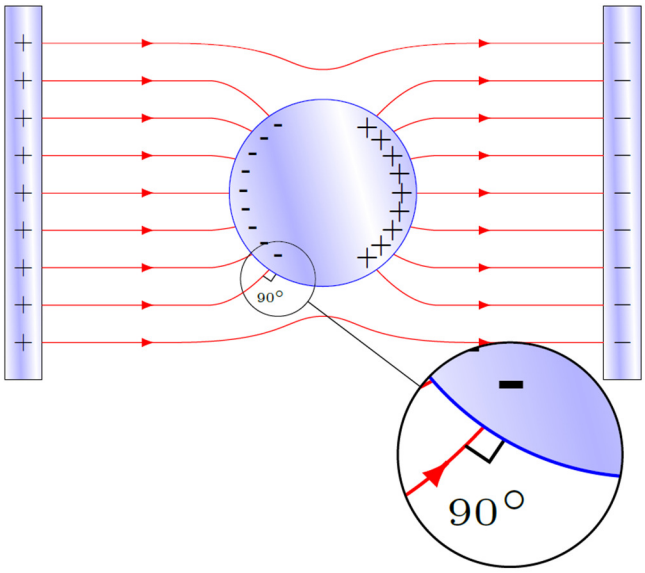
On voit que les charges se retrouvent à la surface du conducteur et que les lignes de champ font toujours 90° avec la surface. Il n'y a pas de lignes à l'intérieur, car le champ est nul à l'intérieur du conducteur. Remarquons que les lignes de champ sont plus rapprochées les unes des autres du côté plus pointu de l'objet, ce qui signifie que le champ est plus intense à cet endroit. Nous nous pencherons sur cela plus tard.



whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/apphysics/studyguides/APPhysics2012/Chapter20_2012/Chapter20_2012.html

Exemple 2 : On place une sphère conductrice non chargée entre 2 plaques de charges opposées.

Le champ sera déformé par le mouvement des charges dans la sphère pour arriver finalement au champ montré sur la figure de droite. Dans cette situation, le champ des plaques a provoqué une séparation de charge dans la sphère qui a amené des charges en surface jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de champ à l'intérieur. Les charges en surface sont également réparties de façon à ce que le champ arrive toujours perpendiculairement à la surface de la sphère.

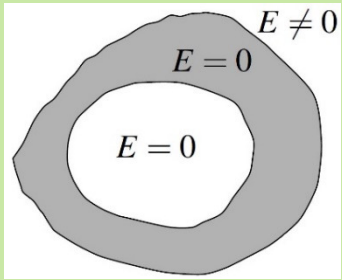


La cage de Faraday

S'il y a une cavité dans un conducteur et qu'il n'y a pas de charge dans cette cavité, on peut montrer que le champ doit aussi être nul dans la cavité.

Champ électrique dans une cavité dans un conducteur

Le champ électrique dans une cavité dans un conducteur est nul s'il n'y a pas de charge dans la cavité, peu importe s'il y a un champ à l'extérieur du conducteur.



C'est le principe de la cage de Faraday : en s'enfermant dans une cage de métal, on se protège des champs électriques externes. Ça marche même s'il y a des trous dans le conducteur, comme dans une cage (sous certaines conditions).
http://www.youtube.com/watch?v=Zi4kXgDBFhw
Les charges passent simplement sur la surface externe du conducteur et il n'y a jamais de champ à l'intérieur.

2.7 LE POTENTIEL ET LES CONDUCTEURS

On a vu que les lignes de champ sont toujours perpendiculaires à la surface d'un conducteur. On a vu également que les lignes de champs sont toujours perpendiculaires aux surfaces équipotentielles. Cela signifie que la surface d'un conducteur est une surface équipotentielle et que le potentiel est le même partout sur la surface d'un conducteur.

De plus, comme le champ à l'intérieur du conducteur est nul, le potentiel ne peut pas changer si on entre dans le conducteur. En effet, la variation de potentiel est

$$\Delta V = -E\Delta s \cos\theta$$

Si on a $E = 0$, on a nécessairement $\Delta V = 0$. Le potentiel à l'intérieur du conducteur est donc le même qu'à la surface du conducteur. On en arrive donc à la conclusion suivante.

Potentiel d'un conducteur à l'équilibre

Dans un conducteur, le potentiel est le même partout (ce qui inclut la surface et l'intérieur).

Potentiel d'une sphère conductrice chargée

On sait que le potentiel à l'extérieur d'une sphère est

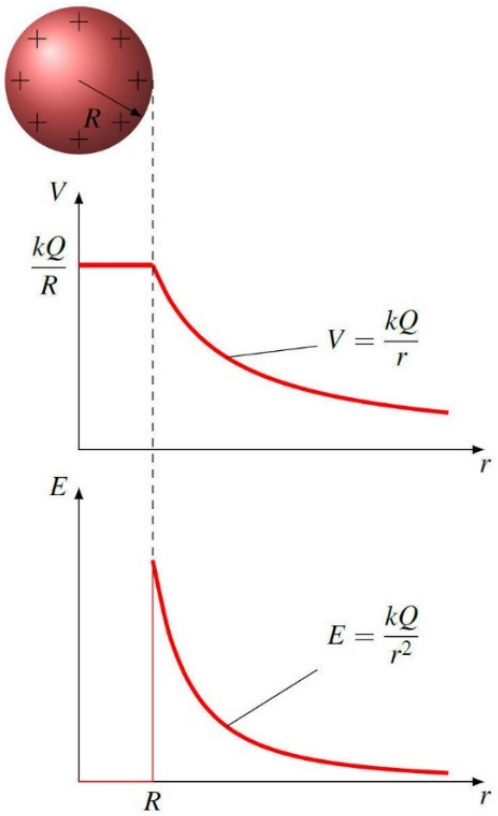
$$V = \frac{kQ}{r}$$

Si la sphère est positive, le potentiel augmente à mesure qu'on s'approche de la surface. Le potentiel de la sphère chargée est la valeur du potentiel quand on arrive à la surface de la sphère.

Potentiel d'une sphère conductrice de rayon *R* chargée avec une charge *Q*

$$V = \frac{kQ}{R}$$

Voici le graphique du potentiel et du champ électrique en fonction de la distance du centre de la sphère conductrice chargée.

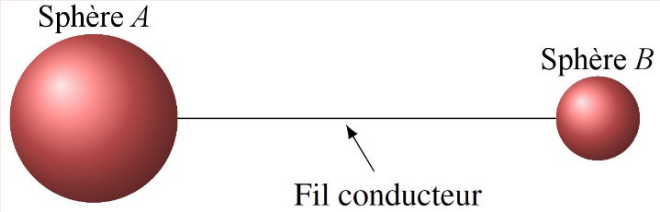


On remarque que le potentiel reste constant partout à l'intérieur de la sphère.

On remarque que le champ électrique tombe subitement à zéro à l'intérieur de la sphère conductrice.

Sachant que le potentiel d'un conducteur est partout le même, voici ce qui se produit si on relie 2 sphères conductrices avec un fil conducteur.

Exemple 2.7.1



Une sphère conductrice *A* a une charge de 10 μC et un rayon de 50 cm et une sphère conductrice *B* a une charge de -3 μC et un rayon de 20 cm. On relie alors les deux sphères avec un fil conducteur.

a) Quelles sont les charges des sphères après qu'on les ait reliées avec un fil ?

Quand on ajoute le fil conducteur, les sphères et le fil deviennent le même conducteur et les sphères échangent des charges jusqu'à ce qu'elles aient le même potentiel puisque le potentiel doit être partout le même dans un conducteur. On aura donc (si on note les charges après l'échange avec des primes)

$$V'_A = V'_B$$
$$\frac{kQ'_A}{R_A} = \frac{kQ'_B}{R_B}$$
$$\frac{Q'_A}{0,5m} = \frac{Q'_B}{0,2m}$$

Il nous faut une autre équation pour résoudre ce problème. Cette équation est la conservation de la charge. La somme des charges des sphères avant l'échange doit être égale à la somme des charges après l'échange.

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$
$$10\mu C + -3\mu C = Q'_A + Q'_B$$
$$7\mu C = Q'_A + Q'_B$$

Si on isole Q'_B dans cette équation et qu'on remplace dans l'équation des potentiels, on obtient

$$\frac{Q'_A}{0,5m} = \frac{Q'_B}{0,2m}$$
$$\frac{Q'_A}{0,5m} = \frac{7\mu C - Q'_A}{0,2m}$$
$$0,2Q'_A = 0,5\left(7\mu C - Q'_A\right)$$
$$0,2Q'_A = 3,5\mu C - 0,5Q'_A$$
$$0,7Q'_A = 3,5\mu C$$
$$Q'_A = 5\mu C$$

Ce qui nous permet d'obtenir Q'_A = 5 µC et Q'_B = 2 µC.

b) Quel est le potentiel des sphères après qu'on les ait reliées avec un fil ?

Le potentiel après contact est

$$V' = \frac{kQ'_A}{R_A}$$
$$= \frac{9\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot 5\times10^{-6} C}{0,5m}$$

$$= 90\,000V$$

On aurait pu le calculer avec les valeurs pour la sphère B et on aurait obtenu le même résultat puisque les deux sphères ont le même potentiel après le contact.

c) Quel est le champ à la surface de chaque sphère après qu'on les ait reliées avec un fil ?

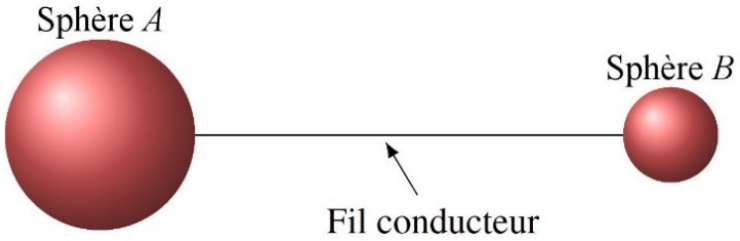
Les champs sont

$$E'_A = \frac{kQ'_A}{R_A^2} = \frac{9\times10^9\,\frac{Nm^2}{C^2}\cdot 5\times10^{-6}C}{(0,5m)^2} = 180\,000\,\tfrac{V}{m}$$

$$E'_B = \frac{kQ'_B}{R_B^2} = \frac{9\times10^9\,\frac{Nm^2}{C^2}\cdot 2\times10^{-6}C}{(0,2m)^2} = 450\,000\,\tfrac{V}{m}$$

L'effet de pointe

On va maintenant montrer comment change le champ électrique à la surface d'un conducteur. Pour découvrir ce résultat, on va considérer un conducteur formé de deux sphères conductrices et d'un fil conducteur.



Si les deux sphères et le fil sont conducteurs, alors cet objet est un conducteur, ce qui signifie qu'il doit être partout au même potentiel. Cela implique que les deux sphères sont au même potentiel.

Le champ électrique près de la surface de la sphère est

$$E = \frac{kQ}{R^2}$$

Or, comme le potentiel d'une sphère est

$$V = \frac{kQ}{R}$$

on a

$$E = \frac{kQ}{R^2} = \frac{kQ}{R}\frac{1}{R} = \frac{V}{R}$$

Comme le potentiel est le même pour les deux sphères, cette équation nous indique que le champ sera plus grand si le rayon de courbure de la sphère est petit. Le champ est donc plus grand à la surface de la petite sphère. En fait, ce résultat est très général.

Champ électrique à la surface d'un conducteur

Le champ à la surface est inversement proportionnel au rayon de courbure de l'objet à cet endroit.

Cela est conforme au résultat obtenu à l'exemple précédent. Le champ à la surface de la sphère ayant un rayon de 20 cm était de 450 000 V/m alors que le champ à la surface de la sphère ayant un rayon de 50 cm était de 180 000 V/m. On constate que le champ est plus grand près de la sphère ayant le plus petit rayon.

On peut aussi calculer la densité de charge à la surface des sphères. On sait que le potentiel de la sphère est

$$V = \frac{kQ}{R}$$

De là, on trouve que Q est

$$Q = \frac{VR}{k}$$

On peut maintenant calculer la densité de charge à la surface de la sphère.

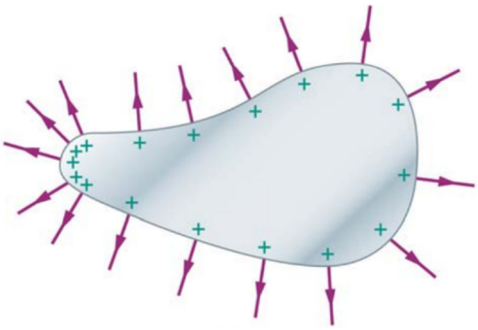
$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\text{charge}}{\text{aire}} \\ &= \frac{VR/k}{4\pi R^2} \\ &= \frac{V}{4\pi kR}\end{aligned}$$

On constate alors que la densité de charge est aussi inversement proportionnelle au rayon de courbure. En fait, ce résultat est, encore une fois, très général.

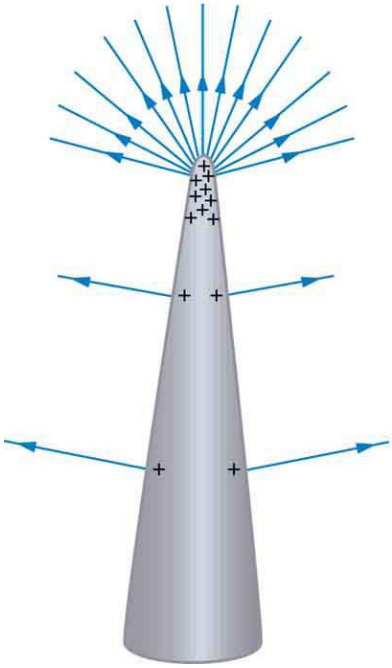
Densité de charge à la surface d'un conducteur

La densité de charge est inversement proportionnelle au rayon de courbure de l'objet à cet endroit.

Examinons les conséquences de cela avec ce patatoïde chargé. On remarque qu'il s'accumule plus de charges et que les lignes de champ sont plus près les unes des autres aux endroits où le rayon de courbure de l'objet est plus petit.



www.csun.edu/~rd436460/100B/lectures/chapter20-3-4.pdf



En poussant un peu plus loin la différence de courbure, on peut obtenir le résultat de la figure de gauche. Dans ce cas, le champ devient très fort et il y a beaucoup de charges qui s'accumulent à l'endroit où l'objet forme une pointe (où le rayon de courbure est très petit).

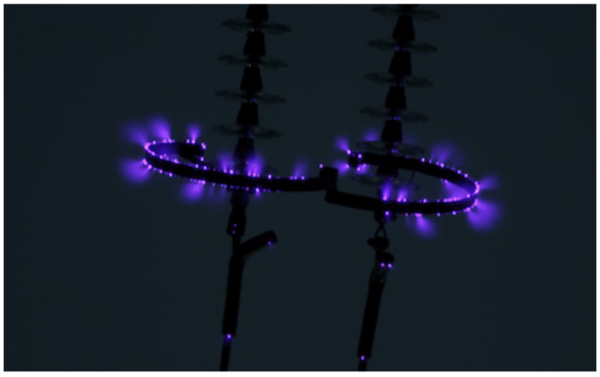
cnx.org/content/m42317/latest/?collection=col11406/latest

Le champ électrique près des pointes peut devenir si fort qu'il peut se former des éclairs. Quand le champ électrique dans l'air dépasse 3×10^6 V/m (la valeur exacte dépend de l'humidité), des électrons sont arrachés des atomes et l'air, contenant maintenant des électrons libres et des ions, devient conducteur, ce qui permet le déplacement des charges. Ce déplacement des charges dans l'air est un éclair. Ces éclairs se formeront nécessairement aux endroits où il y a des pointes sur un conducteur, car c'est là que le champ est le plus fort. C'est pour cette raison que les éclairs se forment souvent aux pointes, comme c'est le cas dans ce vidéo, où l'éclair se forme au bout de la tour du CN.
https://www.youtube.com/watch?v=CB-ZRtDJ6j0

En fait, la plupart du temps, il n'y a même pas d'éclairs au bout des pointes. Le simple fait que le champ soit plus fort près de la pointe permet d'ioniser l'air. Les particules ayant une charge contraire à celle de la pointe vont se diriger vers la pointe et les particules ayant la même charge que la pointe vont s'éloigner de la pointe pour aller annuler la charge de l'autre objet qu'il fait le champ électrique.
https://www.youtube.com/watch?v=s8704VbBKbw

Ainsi, la plupart du temps, les paratonnerres installés sur les édifices permettent de décharger les nuages et le sol avant même que l'éclair ne se forme. Essentiellement, les paratonnerres servent à prévenir la formation d'éclair. Si jamais il se forme un éclair quand même, il y a de bonnes chances que ce soit le paratonnerre qui soit frappé (puisque c'est une pointe) et ce dernier est conçu pour pouvoir transporter le courant de l'éclair vers le sol sans qu'il y ait le moindre dommage.

Quand un objet se décharge par effet de pointe, il y a souvent une lueur bleue près des pointes. Ces lueurs sont appelées *feux de Saint-Elme*. Cette lueur vient de la recombinaison d'ions et d'électrons dans la zone ionisée par le champ électrique intense. Comme ces recombinaisons provoquent l'émission de lumière, on obtient les feux de Saint-Elme.



www.livescience.com/st-elmos-fire.html

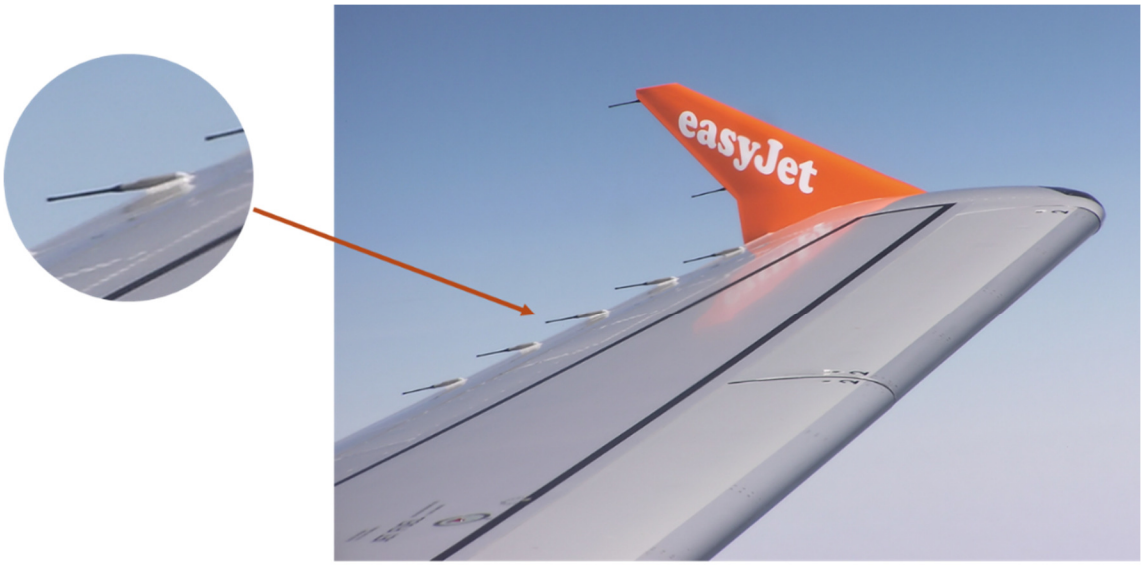
Même si on ne voit pas cette lueur bleue (on ne la verrait pas en plein jour), on peut quand même entendre le bruit de grésillement caractéristique de ces feux.
https://www.youtube.com/watch?v=1W9j6-jERpE

2.8 LE CHAMP ÉLECTRIQUE ET LE POTENTIEL EN AVIATION

L'écoulement de l'air sec ou des précipitations (cristaux de glace, neige, nuages ou même poussière volcanique) sur le fuselage pendant le vol peut générer une charge électrique dans le fuselage de l'avion. Si elles ne sont pas éliminées, ces charges peuvent affecter les systèmes de communication et de navigation puisque les charges ont tendance à s'accumuler et à retourner dans l'air par les parties pointues du fuselage, comme les antennes radio et les antennes de navigation. Les antennes doivent maintenir une charge relativement nulle pour que la performance soit maximale. Si on permet aux charges excédentaires de s'accumuler dans les antennes, on risque, par exemple, d'obtenir du bruit de fond dans les communications et d'affecter les récepteurs de navigation.

Les déperditeurs sur les avions

Pour éviter que les avions se chargent en vol (par frottement entre l'avion et l'air, la pluie, la grêle ou des poussières dans l'air), on installe des *déperditeurs d'électricité statique* qui permettent aux charges qui s'accumulent sur le fuselage de retourner dans l'air. Ce sont simplement des petites pointes placées sur les ailes qui permettent aux charges de quitter l'avion par effet de pointe.



By Adrian Pingstone (Arpingstone) - Own work, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7840012

Les mèches des déperditeurs sont fabriquées avec des fibres de carbone enveloppées dans une gaine dont la longueur se situe entre 7,6 et 20,3 cm. Le diamètre de la mèche est entre 0,5 et 0,8 cm. Chaque mèche se termine par une pointe pour que le champ soit très fort à cet endroit. Si la charge devient trop importante, le champ au bout de la pointe dépasse la valeur maximale que l'air peut supporter. L'air près de la pointe s'ionise et devient alors conducteur, ce qui permet aux charges de quitter l'avion.

Il peut se former des feux de Saint-Elme au bout des déperditeurs quand l'avion accumule des charges très rapidement et qu'il perd ensuite ces charges par les déperditeurs. C'est cette lueur bleutée qu'on peut voir au bout de l'aile sur cette photo.

aerosavvy.com/static-discharges/

Évidemment, les déperditeurs doivent être reliés à tout le fuselage. Si une partie du fuselage n'était pas reliée aux déperditeurs, alors cette partie du fuselage pourrait se charger. Quand cette partie deviendrait trop chargée par rapport aux autres parties du fuselage, il pourrait se former des étincelles à la jonction entre les parties.

Pour relier toutes les parties du fuselage et s'assurer qu'elles ont toutes le même potentiel, on connecte ensemble toutes les parties. C'est la **liaison équipotentielle**.

On relie les parties mobiles (comme les volets) au reste de l'avion par des tresses de liaison. On peut voir une de ces tresses sur la figure de droite. Ces tresses doivent être aussi courtes que possible et doivent avoir une résistance très faible (pas plus de 0,003 Ω). N'oubliez pas d'inspecter ces éléments fréquemment.

avritec.fr/home/produits/tresses-de-masse/

Les avions modernes ne sont plus faits d'aluminium, mais de matériaux composites qui ne conduisent pas l'électricité. Pour éviter que le fuselage ne se charge, les fabricants ajoutent un grillage en cuivre dans le matériau composite pour conduire l'électricité.

Le 26 juin 1959, un Starliner (photo) de la TWA s'est écrasé environ 15 minutes après son décollage de Milan. L'avion s'est écrasé dans des conditions orageuses. On pense que l'avion s'est chargé et qu'il s'est formé des décharges par effet de pointe près des sorties des conduits de ventilation des réservoirs de carburants. On pense que ces décharges ont alors provoqué l'ignition des vapeurs de carburants qui sortaient de ces conduits (ce qui ne devrait plus se produire aujourd'hui) et provoqué l'explosion de deux réservoirs de carburant.

en.wikipedia.org/wiki/TWA_Flight_891

Les décharges dans les fenêtres du cockpit

Parfois, bien que ce soit assez rare, on observe des décharges électriques dans les fenêtres du cockpit des avions.
https://www.youtube.com/watch?v=P0vrDQzqKN4
Ces décharges se produisent quand l'avion a un rythme d'accumulation de charge très grand. Les charges du fuselage s'éliminent tout aussi rapidement par les déperditeurs, mais les charges accumulées par les vitres du cockpit continuent de s'accumuler parce que le matériau utilisé pour les vitres n'est pas conducteur d'électricité. Quand la différence de potentiel entre la vitre chargée et le fuselage devient trop grande et que la valeur du champ électrique de la substance isolante qui forme la vitre dépasse la valeur maximale (rigidité électrique), il se forme de petits éclairs dans la vitre. Dans internet, on appelle souvent ces décharges des feux de Saint-Elme, mais elles n'en sont pas. Ce sont tout simplement des décharges dans les vitres, pas une ionisation de l'air qui se produit près d'une pointe.

Touché par l'éclair

Les avions sont très souvent touchés par les éclairs.
https://www.youtube.com/watch?v=m37z5R2rJ5E
https://www.youtube.com/watch?v=hgOTvx8uBvM

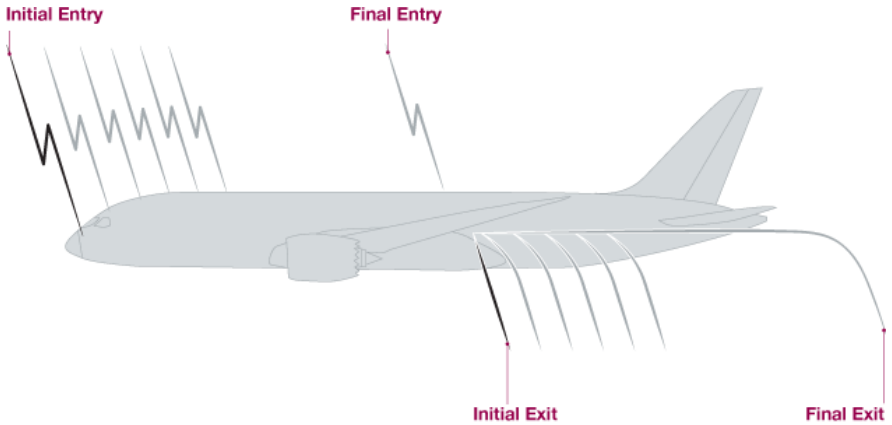
Un avion de ligne est frappé en moyenne 1 à 2 fois par année par la foudre s'il est utilisé régulièrement. On estime qu'un pilote vivra cette expérience toutes les 3000 heures de vol en moyenne.

Il ne se passe presque rien dans l'avion quand il est touché par l'éclair. Le courant va passer par le fuselage et il n'y aura même pas de champ électrique dans l'avion puisque le fuselage agit comme une cage de Faraday.

Dans 96 % des cas, les avions sont à l'intérieur des nuages quand ils sont touchés par un éclair. Dans 3 % des cas, l'avion est sous les nuages. L'avion est souvent touché au décollage ou à l'atterrissage puisque les conditions orageuses sont particulièrement intenses à des altitudes entre 5 000 pieds et 15 000 pieds. C'est presque impossible d'être touché par la foudre à une altitude supérieure à 24 000 pieds.

L'éclair frappe souvent quand il pleut (70 % des cas) et que la température de l'air est près de 0 °C.

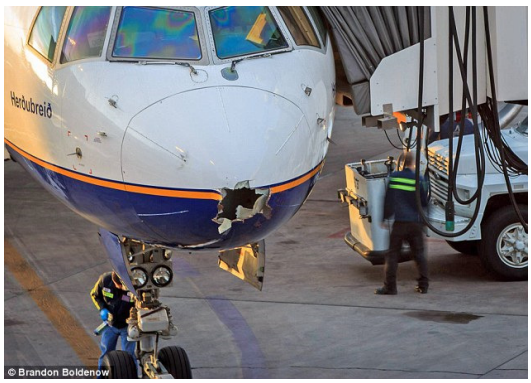
Les points d'entrée et de sortie de l'éclair se situent souvent dans les parties pointues de l'avion, comme le nez, les bouts des ailes et le bout de la queue. Comme il y a souvent plusieurs éclairs à la suite qui passent par le même chemin (comme le montre ce clip),
https://www.youtube.com/watch?v=r2tF9pshGlM
il se peut que les points d'entrée et de sortie glissent le long de l'avion (puisque l'avion avance) quand les éclairs se succèdent.



zandz.com/en/news/20210916/why-is-lightning-strike-dangerous-for-planes/

Parfois, il y a de petits dommages aux points d'entrée et de sortie de l'éclair. L'image suivante montre les dommages faits en 2015 par un éclair sur le devant d'un Boeing 757.

zandz.com/en/news/20210916/why-is-lightning-strike-dangerous-for-planes/



L'avion a été touché par l'éclair peu après son décollage de Keflavik en Islande. Après quelques vérifications, l'équipage a décidé de poursuivre le vol et l'avion s'est posé sans problème 7,5 heures plus tard à Denver au Colorado.

Les accidents sérieux sont plutôt rares et on n'est jamais certain que l'éclair soit véritablement la cause de l'accident.

Le 8 décembre 1963, un Boeing 707 de Pan Am est en attente dans des conditions orageuses pour se poser près dans un aéroport près de Baltimore. Soudainement, alors que l'avion est à une altitude de 5000 pieds, un réservoir de carburant dans l'aile gauche explose et l'avion s'écrase. Selon les enquêteurs, un éclair aurait causé l'ignition du mélange d'air et de vapeur de carburant dans le réservoir presque vide dans l'aile gauche. Normalement, un éclair ne peut pas atteindre le réservoir et les enquêteurs n'ont jamais trouvé le mécanisme exact qui aurait produit l'explosion. Il se pourrait que du carburant ait réussi à se loger dans les conduits de ventilation du réservoir. Suite à cet accident, on a modifié (en 1967) la ventilation des réservoirs pour éviter que les vapeurs de carburants puissent s'échapper par le conduit et s'enflammer en présence d'étincelles ou d'éclairs.

Le 24 décembre 1971, un Lockheed Electra s'est écrasé dans une tempête en Amazonie. Il est possible qu'un éclair ait joué un rôle dans l'écrasement de vol 508 de Lansa, mais les conditions de vol difficiles dans l'orage peuvent tout aussi bien être en cause. Reste qu'une seule personne sur les 92 à bord a survécu. La jeune fille de 17 ans a fait une chute de 10 000 pieds bien attachée à son siège et la forêt amazonienne a, on ne sait pas trop comment, amorti sa chute. Avec une clavicule cassée et une blessure assez importante au bras droit, elle a parcouru la forêt amazonienne pendant 10 jours avant de trouver refuge dans une hutte, où elle a été rescapée par des pêcheurs. 14 autres personnes avaient initialement survécu à l'écrasement, mais ils sont morts en attendant les secours.

Un seul modèle d'avion semble être un peu plus susceptible d'avoir une panne quand il est frappé par l'éclair : le Swearingen SA (image). Il est possible que le système électrique de l'avion ait subi une panne majeure quand un éclair a touché l'avion à 3 occasions. Remarquez que dans les 2 cas où l'avion s'est écrasé, on n'est pas certain que l'éclair soit la cause de l'écrasement parce que les enregistreurs de vol ont cessé de fonctionner lors de la panne dans un cas et parce qu'il n'y avait pas d'enregistreurs de vol dans l'autre cas.

en.wikipedia.org/wiki/Flightline_Flight_101

Le 8 février 1988, le vol 101 de la Nürmberger Flugdienst s'est écrasé après avoir été touché par un éclair, alors que l'avion s'apprêtait à se poser à l'aéroport de Düsseldorf. Il semble qu'un éclair ait fait perdre l'alimentation électrique. Sans instruments dans les nuages, l'équipage ne pouvait plus connaitre l'orientation de l'avion. L'avion commence

alors une descente rapide. Quand l'avion sort des nuages, les pilotes retrouvent l'horizon et redressent l'avion pour remonter et retourner dans les nuages. Après 2 minutes de vol erratique, la vitesse excessive de l'avion finit par mener au détachement d'un flap (qui ne pouvait être rétracté sans alimentation électrique). Cela envoie l'avion dans une spirale incontrôlable qui provoque la désintégration de l'avion en plein vol.

Le 10 octobre 2001, un autre de ces avions aurait perdu son alimentation électrique après avoir été frappé par un éclair. Encore une fois, il est fort probable que l'avion se soit écrasé dans la mer parce que les pilotes, sans instruments en pleine nuit, ne pouvaient plus savoir l'orientation de l'avion.

En novembre 1991, un éclair avait aussi causé une panne électrique sur un autre de ces appareils, mais l'équipage a réussi à remettre le système en fonction et à se poser normalement.

Le 15 décembre 2014, un Saab 2000 commence une descente incontrôlée après avoir été touché par un éclair lors de l'approche de l'aéroport de Sumburgh en Écosse. En fait, les pilotes avaient présumé que l'éclair avait désengagé le pilote automatique, mais il était toujours bien engagé. La descente a été provoquée par des commandes contradictoires entre les pilotes et le pilote automatique (Mayday, saison 21 épisode 1).

Les poussières volcaniques

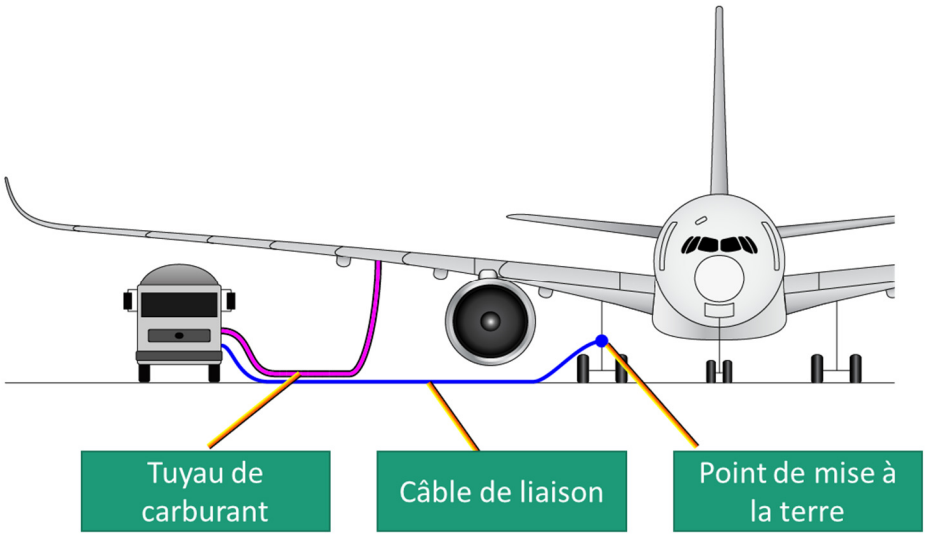
Le 24 juin 1982, il commence à y avoir des décharges électriques dans les fenêtres du cockpit sur un Boeing 747-200B de British Airways qui vole entre Kuala Lumpur (Malaisie) et Perth (Australie). Les passagers observent ensuite une lueur produite à l'intérieur des moteurs (probablement des feux de Saint-Elme sur les parties pointues du moteur). Puis, les 4 moteurs s'arrêtent. Après une descente bien involontaire, l'équipage réussit à redémarrer les moteurs et à se poser normalement. L'interaction entre des cendres volcaniques dans l'atmosphère et l'avion faisait en sorte que l'avion se chargeait fortement. Ce sont aussi les cendres volcaniques qui ont provoqué l'extinction de moteurs. Quand l'avion est sorti de la zone où il y avait des cendres, les croutes de cendres volcaniques qui s'étaient accumulées dans les moteurs se sont détachées et les moteurs ont pu être démarrés à nouveau (Mayday, saison 4, épisode 3).
https://www.youtube.com/watch?v=bmF_JNbOzb4
Dans ce clip, l'avion est comme entouré d'une lumière bleue. Je ne vois pas trop quel mécanisme pourrait faire en sorte qu'il y ait une telle lumière bleue. Il pourrait bien sûr y avoir des feux de Saint-Elme près des pointes, mais pas partout autour de l'avion.

Notez que la collision de l'avion avec les cendres volcaniques a « sandblasté » l'avion à tel point que les pilotes ne pouvaient plus voir clairement à travers les fenêtres du cockpit. Cette impossibilité de voir devant l'avion a considérablement nui aux pilotes lors de l'atterrissage.

Le ravitaillement en carburant

Lorsqu'un liquide s'écoule dans un tuyau, il y a un échange d'électrons entre le liquide et le tuyau. Ainsi, lors d'un ravitaillement, il y a un échange d'électrons entre le carburant et le tuyau. Si on ne faisait rien pour remédier à cette situation, l'avion se chargerait avec un type de charge pendant que le camion se chargerait avec un autre type de charge de sorte que la différence de potentiel entre le camion et l'avion augmenterait. À un certain moment, la différence de potentiel deviendrait trop grande et se formerait un petit arc électrique entre l'avion et le camion et cette étincelle risquerait d'enflammer des vapeurs d'essence.

Pour éviter que ces charges s'accumulent, on relie l'avion et le camion ravitailleur par un fil conducteur. Ceci est fait en connectant un câble métallique entre le camion ravitailleur et l'avion (sur un point d'attache métallique qui est relié au fuselage). Cette précaution assure que le potentiel est le même pour le camion ravitailleur et l'avion et qu'il n'y a pas de champ électrique. Pour plus de sécurité, un câble peut être aussi branché à la terre pour éliminer toute charge électrique résiduelle qu'il pourrait y avoir.



https://safetyfirst.airbus.com/safe-aircraft-refuelling/

Notez que, pour les avions récents, les pneus n'isolent pas l'avion du sol. Les pneus très chargés en carbone conduisent l'électricité.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Énergie potentielle d'une charge *q* à une distance *r* du centre d'une sphère ayant une charge *Q*

$$U_E = \frac{kqQ}{r}$$

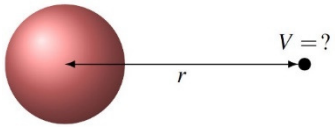
Définition du potentiel

$$U_E = qV$$

Potentiel à une distance *r* du centre d'une sphère ayant une charge *Q*

$$V = \frac{kQ}{r}$$

r est la distance du centre de la sphère.



Potentiel à un endroit fait par plusieurs sphères chargées

$$V = \sum \frac{kQ}{r}$$

Lien entre ΔV et E

$$\Delta V = -E\Delta s \cos\theta$$

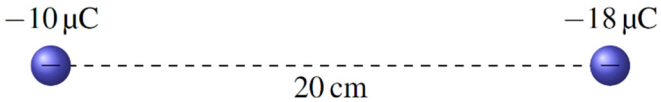
Potentiel d'une sphère conductrice de rayon *R* chargée avec une charge *Q*

$$V = \frac{kQ}{R}$$

EXERCICES

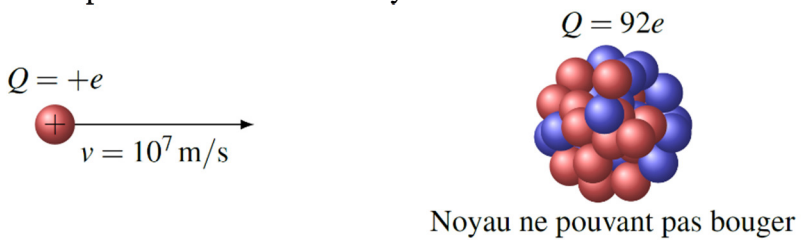
2.1 L'énergie potentielle électrique

1. Ces deux charges ont des masses identiques de 200 g. Initialement, on maintient en place ces deux charges qui se repoussent. Quelle est l'énergie potentielle électrique de cette paire de charges ?



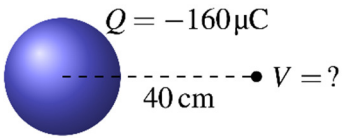
2. Un proton, dont la masse est de 1,67 x 10^{-27} kg, se dirige vers un noyau d'uranium dont la position est fixe. Initialement, le proton est tellement loin du noyau qu'on peut négliger l'énergie potentielle électrique du système. Selon les données

montrées sur la figure, jusqu'à quelle distance du centre du noyau le proton va-t-il s'approcher avant de s'arrêter ? Sachant que le rayon du noyau est de 1,4 x 10^{-15} m, déterminez si le proton va toucher au noyau ?

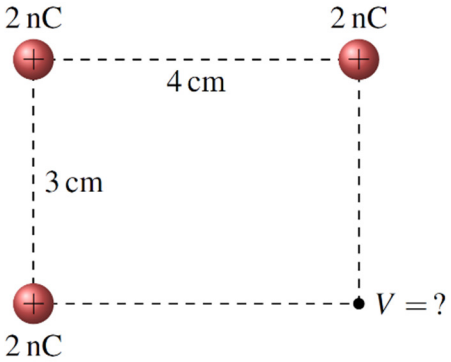


2.2 Le potentiel

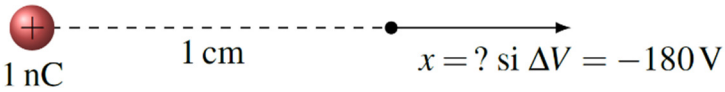
3. Une sphère ayant un rayon de 15 cm possède une charge de -160 µC. Quel est le potentiel à l'endroit montré sur la figure ?



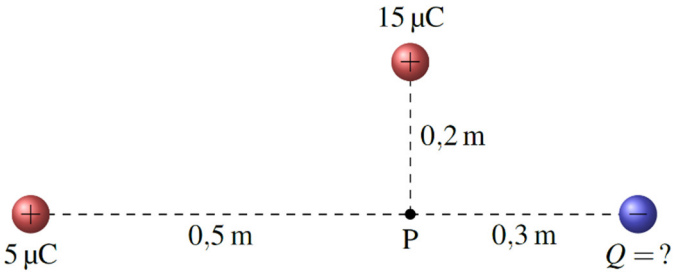
4. Quel est le potentiel à l'endroit indiqué sur la figure ?



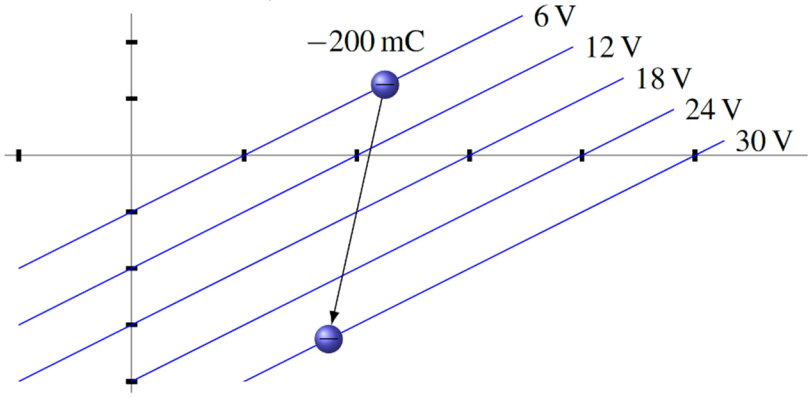
5. On est initialement à 1 cm d'une charge de 1 nC. De quelle distance x doit-on s'éloigner de la charge pour que le potentiel baisse de 180 V ?



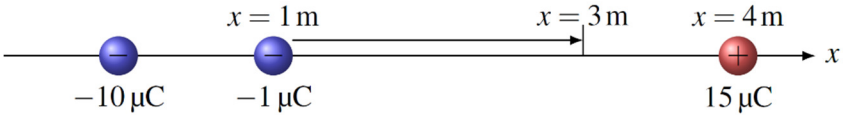
6. Dans la situation montrée sur la figure, quelle doit être la valeur de Q pour que le potentiel soit nul au point P ?



7. On prend une charge de 200 mC et on la déplace d'un endroit à un autre tel qu'illustré sur la figure. La vitesse de la charge est nulle au début et à la fin de son mouvement. Quelle énergie a-t-on donnée à la charge ou reçue de la charge avec ce déplacement ? (Autrement dit, on cherche le travail externe. Il n'y a pas de gravitation ni de force externe.)

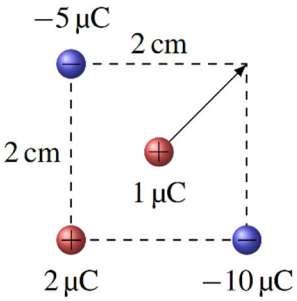


8. On déplace une charge de -1 µC de x = 1 m à x = 3 m tel qu'illustré sur la figure suivante.

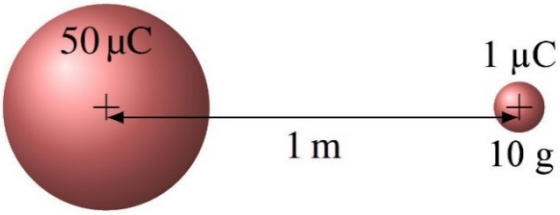


Quelle est la variation de l'énergie potentielle électrique de la charge de -1 µC quand elle passe de x = 1 à x = 3 m ?

9. On déplace une charge de 1 µC d'un endroit à un autre tel qu'illustré sur la figure suivante. (Initialement, la charge est exactement au centre du carré.) Quel travail externe faut-il faire pour déplacer la charge si elle est immobile au début et à la fin de son déplacement ?



10. Dans la situation montrée sur la figure, la grosse sphère ne peut pas bouger. On place une charge immobile de 1 µC à l'endroit montré sur la figure. On laisse ensuite partir la petite charge. Quelle sera la vitesse de la charge quand elle sera à 3 m de la sphère ? (Il n'y a pas de gravitation ni de force externe.)

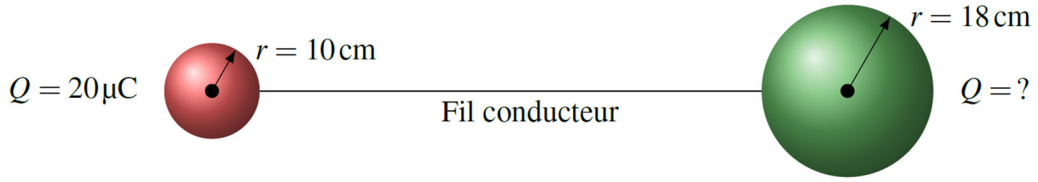


2.7 Le potentiel et les conducteurs

11. Le potentiel est de 450 V à la surface d'une sphère conductrice d'un rayon de 25 cm.

    a) Quel est le potentiel au centre de la sphère ?
    b) Combien d'électrons a-t-on enlevés à cette sphère pour lui donner ce potentiel ?

12. Les deux sphères de la figure sont reliées par un fil conducteur. Quelle est la charge de la sphère de droite ?



13. Une sphère conductrice ayant un rayon de 8 cm et une charge de 120 µC est reliée par un fil conducteur à une sphère conductrice ayant un rayon de 24 cm et une charge de –40 µC.

    a) Quelles seront les charges des sphères après qu'on les ait reliées avec le fil conducteur ?
    b) Quels seront les potentiels des sphères après qu'on les ait reliées avec le fil conducteur ?

RÉPONSES

2.1 L'énergie potentielle électrique

1. 8,1 J
2. 2,545 x 10^{-13} m. Il n'atteint pas le noyau.

2.2 Le potentiel

3. -3,6 x 10^{6} V
4. 1410 V
5. 0,25 cm
6. -25,5 µC
7. On reçoit 4,8 J
8. -0,15 J

9. 2,159 J
10. 7,746 m/s

2.7 Le potentiel et les conducteurs

11. a) 450 V b) $7{,}802 \times 10^{10}$
12. 36 μC
13. a) Sphère de 8 cm : Q = 20 μC Sphère de 24 cm : Q = 60 μC b) 2 250 000 V