

Figure – Charge par friction. a) A l'intérieur du nuage d'orage, les courants ascendants (air chaud) et descendants (air froid) font s'entrechoquer les particules d'eau et de glace. Ces frictions finissent par électriser le nuage. b) Friction d'une fourrure sur une baguette plastique. D'après *On the origin of contact-electrification*; Wang, *Materials Today* **30**, 34 (2019).

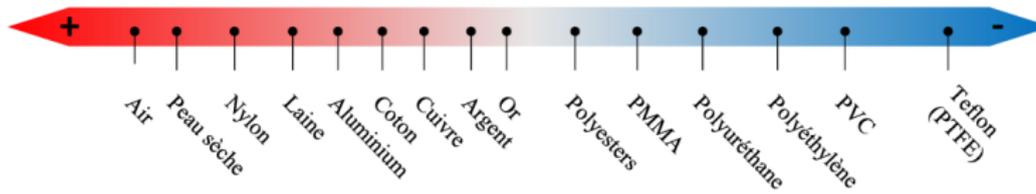


Figure – Exemple de série tribologique. D'après *Récupération d'énergie mécanique pour vêtements autonomes connectés*; M. Geller, thèse Université Grenoble (2017).

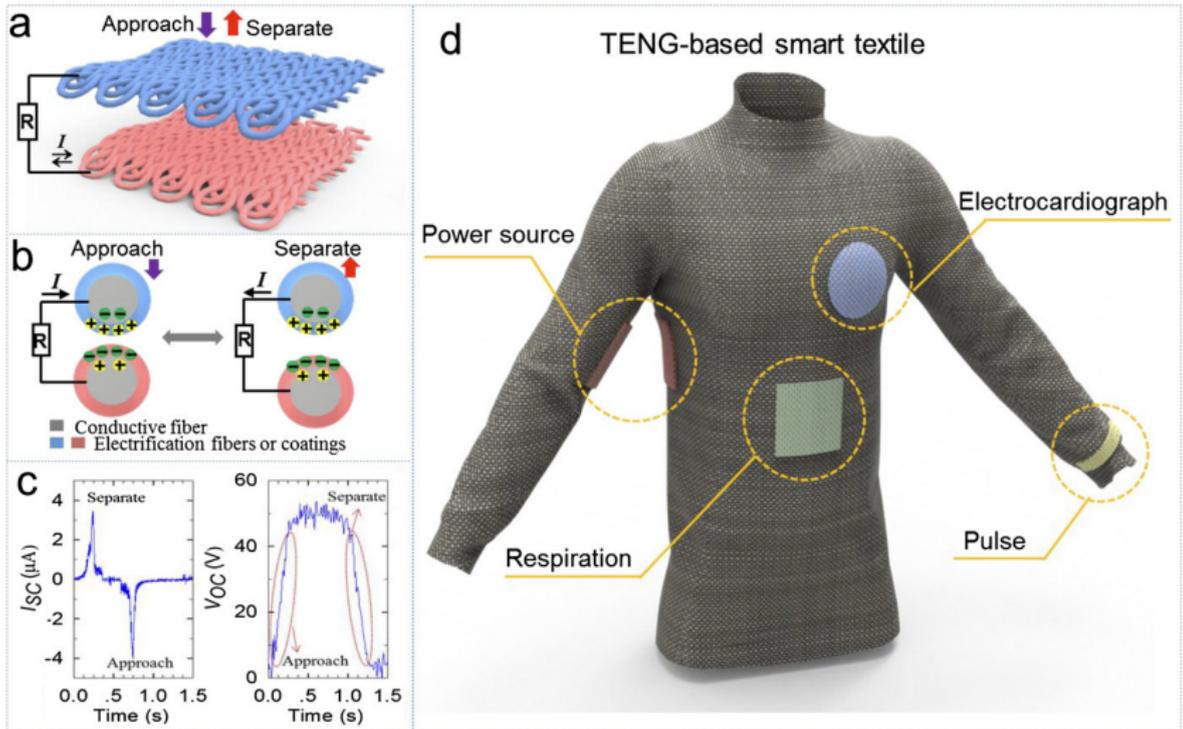
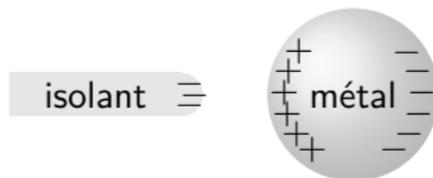


Figure – Textile connecté auto-alimenté par triboélectricité. D'après (*TENG - Triboelectric nanogenerator*, Wang, *Rep. Prog. Phys.* **84**, 096502 (2021)).

a)

b)



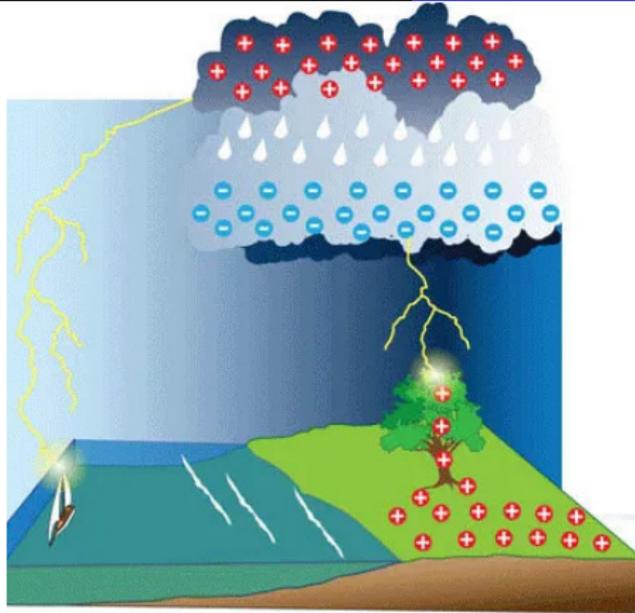


Figure – a) Charge par influence d'un métal. b) Charge par influence à proximité d'un nuage d'orage (chargé par friction). Au delà du seuil de claquage de l'air, un éclair se produit entre le nuage et le sol (principalement vers les points hauts, car plus proche et aussi à cause d'un effet de pointe). Image tirée de Hubpages.



Définition :

La quantité de charge d'un objet est nécessairement un multiple entier relatif de la charge élémentaire :

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

valeur fixée par convention bureau international des poids et mesure (BIPM), en mai 2019).

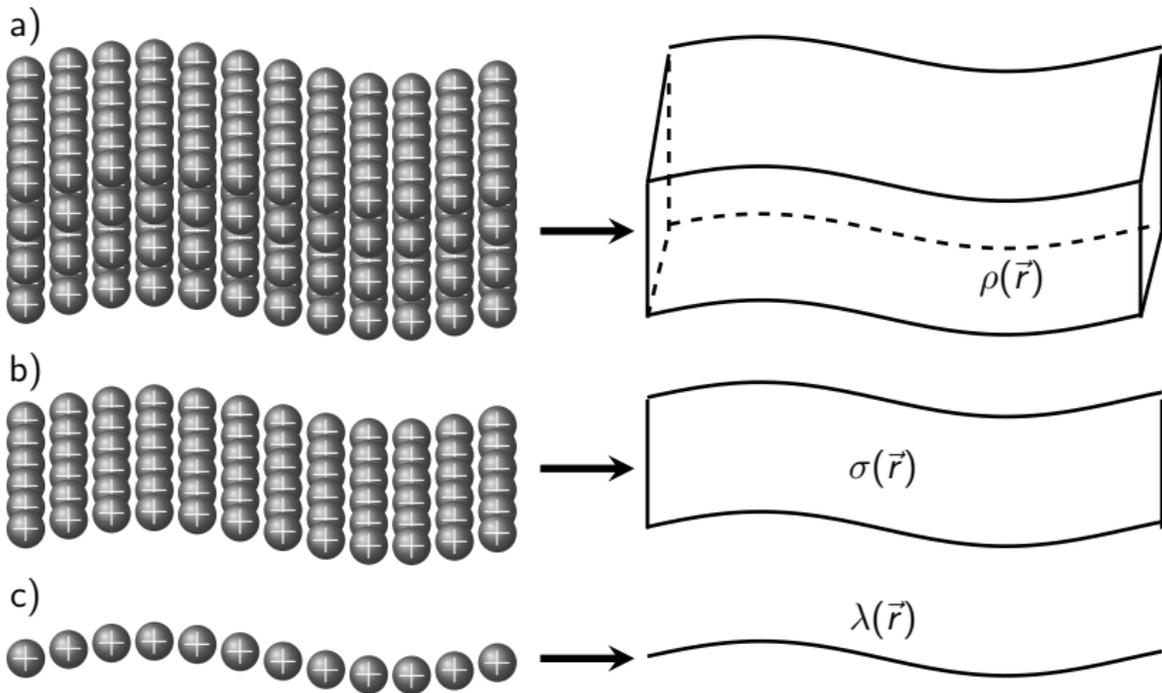


Figure – Modélisation continues de distributions de charges. a) Charges réparties en volumes remplacées par une distribution volumique de charges ρ . b) Charges confinées en surface assimilées par une distribution surfacique de charges σ . c) Charges réparties le long d'un fil assimilées par une distribution linéique de charges λ .

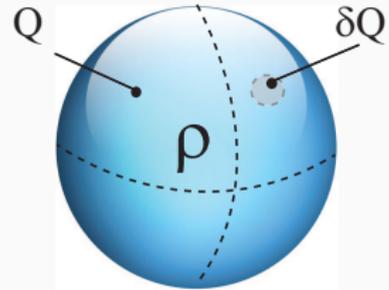


Définition :

Pour un matériau chargé en volume, on décrit la charge par la distribution volumique $\rho(\vec{r})$ telle que sur un élément de volume $d^3\tau$, la charge élémentaire vaut

$$\delta Q = \rho(\vec{r})d^3\tau$$

avec $[\rho] = \text{C} \cdot \text{m}^{-3}$.



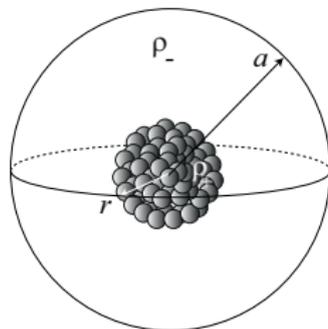
Exemple 1

Un noyau de Plomb contient 82 protons répartis sur une sphère de rayon $r = 7 \text{ fm}$, le rayon atomique vaut $a = 180 \text{ pm}$.

1 - En supposant la répartition de charges uniformes, déterminer la densité volumique de charge ρ_+ dans le noyau.

2 - De même, estimer la densité volumique de charge dans le nuage électronique notée ρ_- .

Données : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.





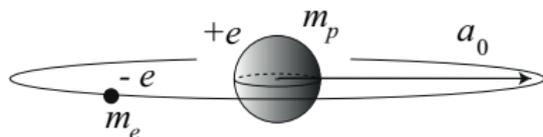
Définition :

- Pour une distribution surfacique σ , la charge contenue sur une surface infinitésimale est donc donnée par : $\delta Q = \sigma d^2S$ avec $[\sigma] = \text{C.m}^{-2}$.
- De même, pour une distribution linéique, la charge contenue sur un segment infinitésimale $d\ell$ est donnée par $\delta Q = \lambda d\ell$ avec $[\lambda] = \text{C.m}^{-1}$.



Exemple 2

Comparer (en norme) la force électrostatique et la force de gravitation entre le proton et l'électron dans l'atome d'hydrogène. On assimilera la distance entre le proton et l'électron au rayon de Bohr a_0 .



Données : constante de gravitation $\mathcal{G} = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ S} \cdot \text{l} \cdot ; a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$; masse du proton $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; masse de l'électron $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; charge élémentaire $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



Définition :

Le champ électrique créé en un point M (repéré par le vecteur $\overrightarrow{OM} = r\vec{e}_r$ dans le repère sphérique) par une charge ponctuelle q placée en O est

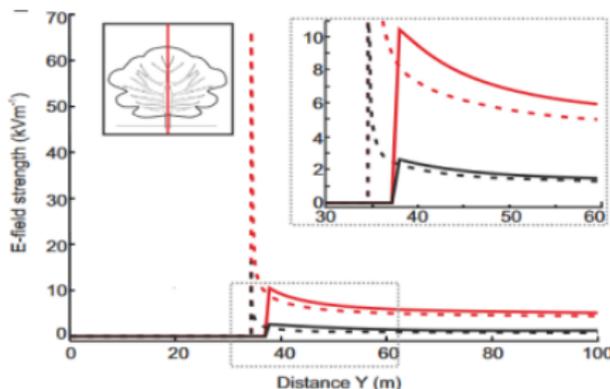
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$$

L'unité du champ électrique est le volt par mètre ($V \cdot m^{-1}$).

e^- à 1 cm	e^- à 1 m	terrestre	champ disruptif de l'air
$1,4 \cdot 10^{-5} \text{ V.m}^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-9} \text{ V.m}^{-1}$	100 V.m^{-1}	$1,6 \cdot 10^6 \text{ V.m}^{-1}$

Table – Quelques valeurs du champ électriques.

Exemple 3 Des travaux récents suggèrent que certaines araignées (appelées araignées montgolfières-ballooning spider en anglais) pourraient décoller et voler sur de longues distance en utilisant des fils de soie chargés, soumis au champ électrique de l'atmosphère.



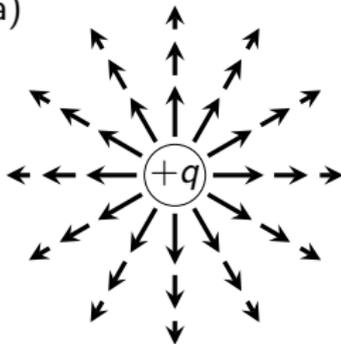
Simulation du champ électrique sur un chêne. D'après *Electric Fields Elicit Ballooning in Spiders*, *Current Biology*, 2018

1 - Pour un fil de soie de longueur $\ell = 80$ cm, portant une charge

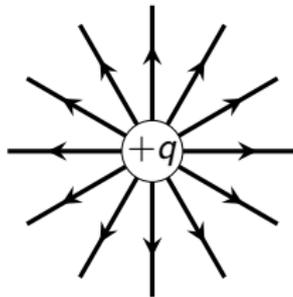
linéique uniforme $\lambda = 1 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot \text{m}^{-1}$, estimer la force de Coulomb s'exerçant sur un fil d'araignée placée en haut d'un arbre (cf. figure ci-dessus).

2 - Comparer au poids d'un araignée de masse $m = 1 \text{ mg}$. Conclure.

a)



b)



c)

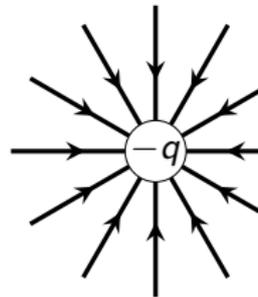
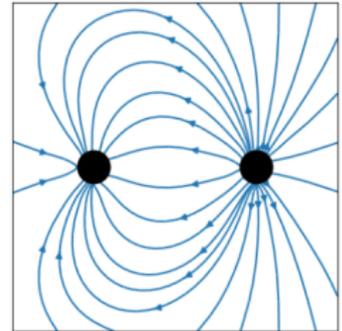
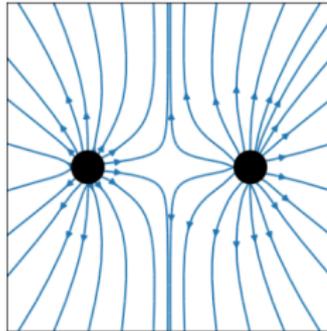
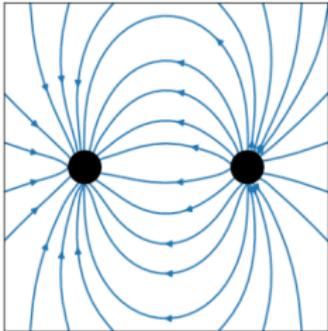


Figure – a) Champ électrostatique généré par une charge $q > 0$. b) Lignes de champs correspondantes. c) Lignes de champs pour une charge $-q < 0$. Le champ est orienté vers la charge négative.

Exemple 4

Dans la figure ci-dessous, identifier les charges positives des charges négatives.



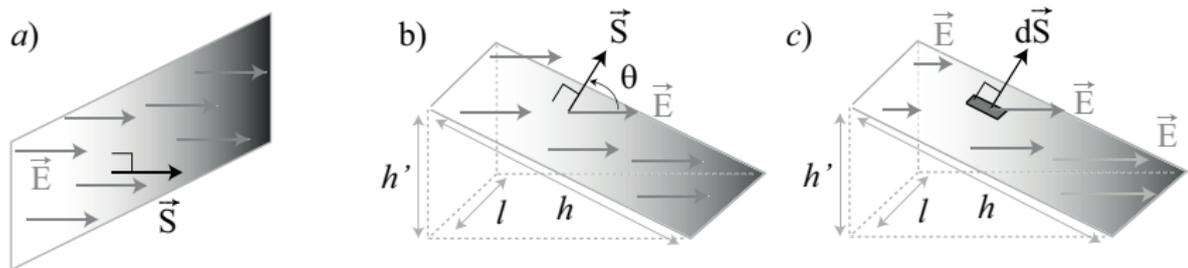


Figure – Flux du champ électrique a) Champ uniforme et surface perpendiculaire au champ. b) Surface non perpendiculaire au champ. c) champ non uniforme.



Définition :

L'expression générale suivante pour une surface quelconque

$$\phi = \iint_S \vec{E}(M) \cdot d\vec{S}$$

qui est l'intégrale du flux élémentaire sur l'ensemble de la surface.

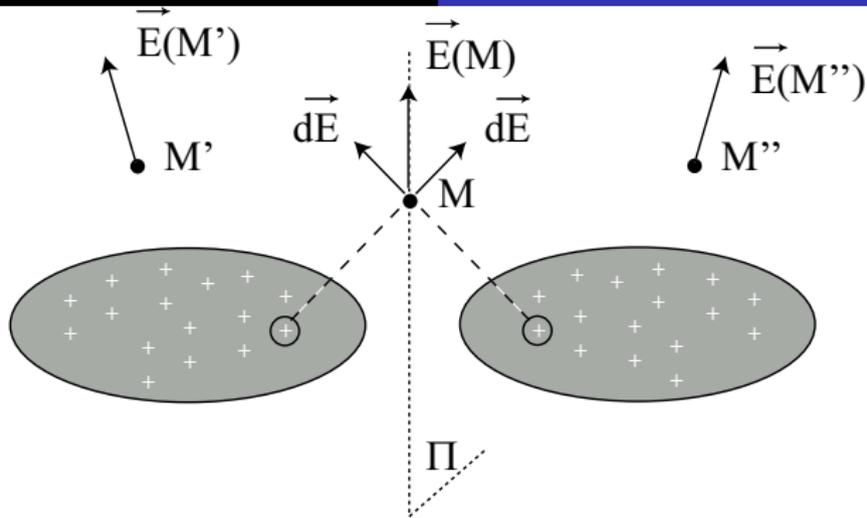


Figure – Propriétés de symétrie du champ électrique pour une distribution de charge présentant un plan de symétrie.

Exemple 5

Dans une boule plasma, objet déco des années 80, la sphère centrale possède un grand nombre de charges. Grâce à un champ supérieur au champ disruptif du gaz piégé dans la sphère extérieur, les éclairs suivent principalement des droites de la sphère intérieure à celle extérieure.

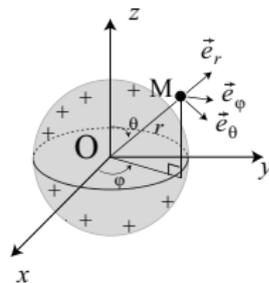
En admettant que les éclairs sont orientés selon le champ électrique, par un choix judicieux du système de coordonnées, justifier que celui-ci est radial



Exemple 6

Le modèle de Thomson de l'atome d'hydrogène modélise un proton par une boule de rayon R uniformément chargée. On note ρ la densité volumique de charge supposée uniforme. L'électron se déplace alors dans cette « gelée » positive.

- 1 - Déterminer l'orientation du champ $\vec{E}(M)$ en un point M quelconque de l'espace.
- 2 - Déterminer les variables dont dépend $|\vec{E}(M)|$.
- 3 - Déterminer l'expression du champ $\vec{E}(r)$ pour $r < R$ et $r > R$.
- 4 - Lorsque l'électron se déplace à l'intérieur de la boule chargée, justifier la dénomination d'électron « élastiquement lié ».



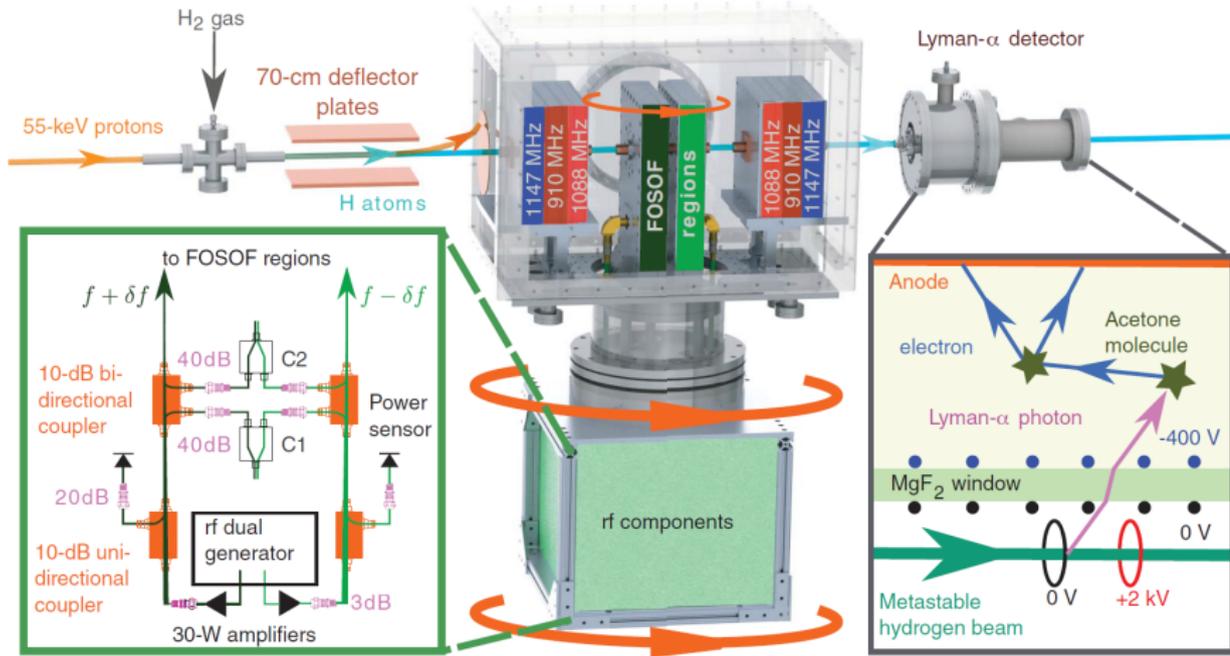
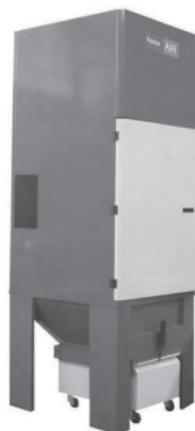
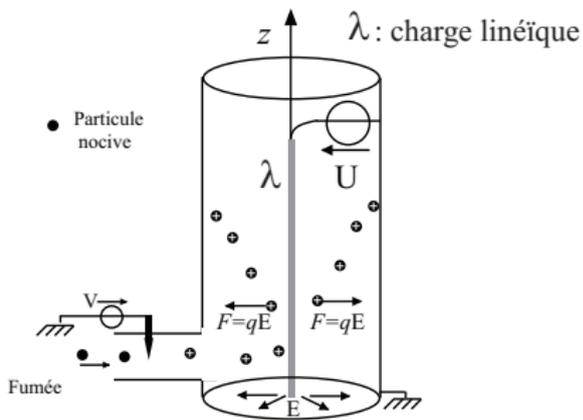


Figure – Dispositif expérimental permettant la mesure du rayon du proton en utilisant la transition 2s-2p. *Bezginov, Science, 2019*

Exemple 7

Une cheminée électrostatique permet de filtrer les particules de fumée en les plaquant contre la paroi de la cheminée grâce à l'action du champ électrique. On modélise ce dispositif par un fil chargé d'axe Oz et de hauteur h , portant une charge linéique uniforme λ , à l'intérieur d'un cylindre conducteur de rayon R telle que $R \ll h$.



1 - Justifier que le fil puisse être considéré comme infini pour un

observateur à l'intérieur de la cheminée.

2 - Déterminer l'orientation du champ électrique \vec{E} .

3 - Déterminer les invariances du champ \vec{E} .

4 - En déduire le champ électrique en tout point intérieur à la cheminée.

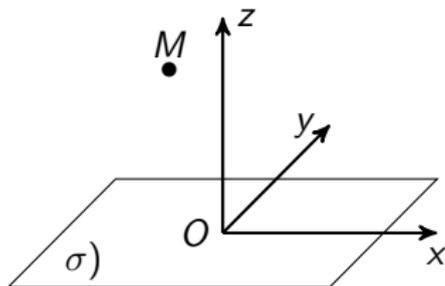
Exemple 8

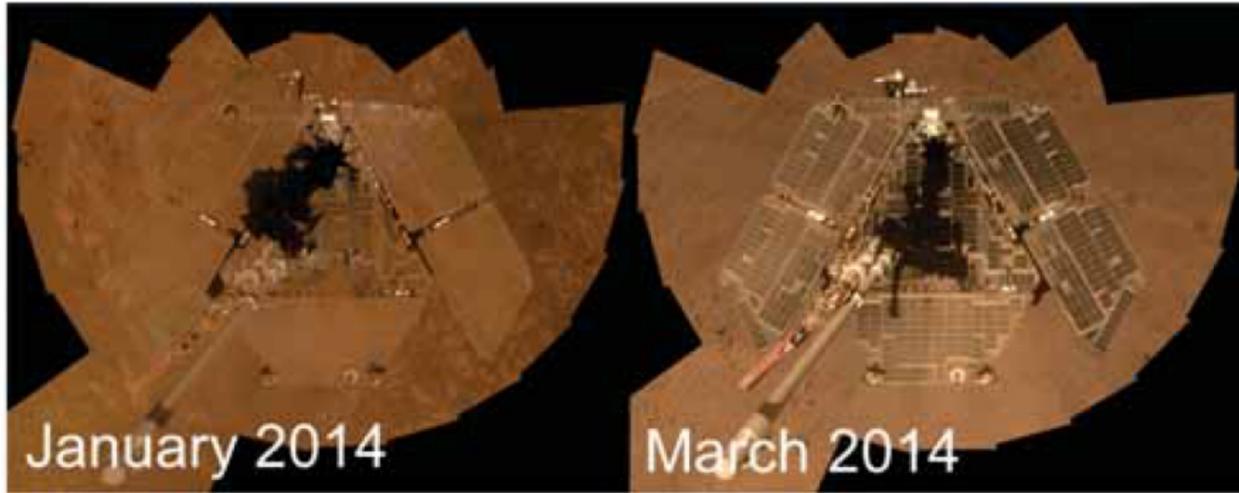
On considère une plaque infiniment étendue portant une charge surfacique uniforme σ .

1 - Déterminer l'orientation du champ électrique \vec{E} .

2 - Déterminer les invariances du champ \vec{E} .

3 - En déduire l'expression du champ électrique en un point quelconque M .





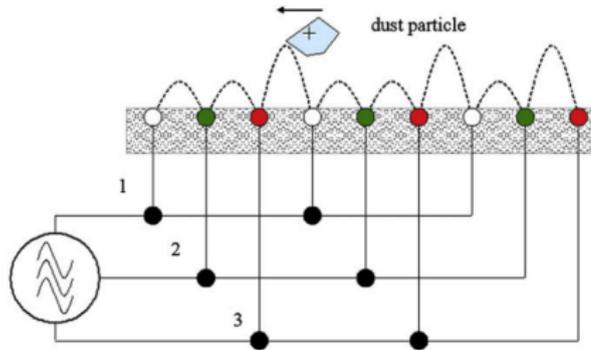


Fig. 1. Three-phase electric curtain.

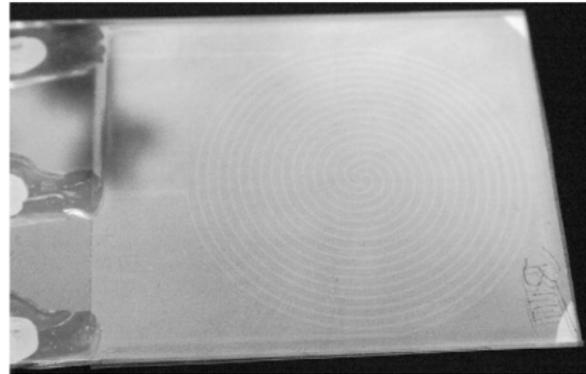


Fig. 2. Three-phase transparent dust shield with a spiral configuration of three ITO electrodes on glass.

Figure – Dispositif expérimental permettant le nettoyage des panneaux solaires. *particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions. Calle et al. Journal of electrostatics (2009)*



Figure – Dépôt conducteur sur le verre de gauche évitant l'adhésion de billes de polystyrène.

électrostatique	gravitation
$\vec{F}_{el} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$	$\vec{F}_{grav} = -\mathcal{G} \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{e}_r$
q	m
$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$-\mathcal{G}$
$\vec{F}_{el} = q\vec{E}$	$\vec{F}_{grav} = m\vec{g}$

Table – Grandeurs analogues électrostatique-gravitation



Définition :

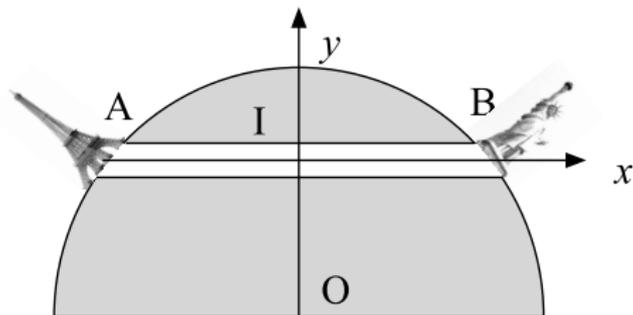
Le flux du champ de gravité \vec{g} à travers une surface S fermée est proportionnel à la masse contenue dans le volume délimité par cette surface. »

$$\Phi_S(\vec{g}) = \oiint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_S$$

où M_S est la masse contenue dans la surface fermée S .

Exemple 9 CCP 04, Mines-Ponts 11, CCP 12

La terre est assimilée à une sphère homogène de centre O et de rayon R . Soit g_0 la valeur de l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre. On ne tient pas



compte de la rotation de la terre. On relie deux villes A et B par un tunnel rectiligne de longueur d et de diamètre négligeable. Un train assimilable à un point matériel M se déplace sans frottement dans le tunnel. On note r la distance OM . Le référentiel terrestre est considéré comme galiléen, on note x l'abscisse du point M sur l'axe Ix .

- 1 - Déterminer $\vec{g}(r)$ l'accélération de la pesanteur au point M en fonction de g_0 , r et R .
- 2 - Écrire sous forme vectorielle le principe fondamental de la dynamique appliquée au point M .
- 3 - En déduire l'équation du mouvement du point M et déterminer

le temps pour aller de A à B



Figure – Forage de Kola à l'abandon (2012) et trappe d'accès condamnée CC