

Physique pour Tous ! Saison 6

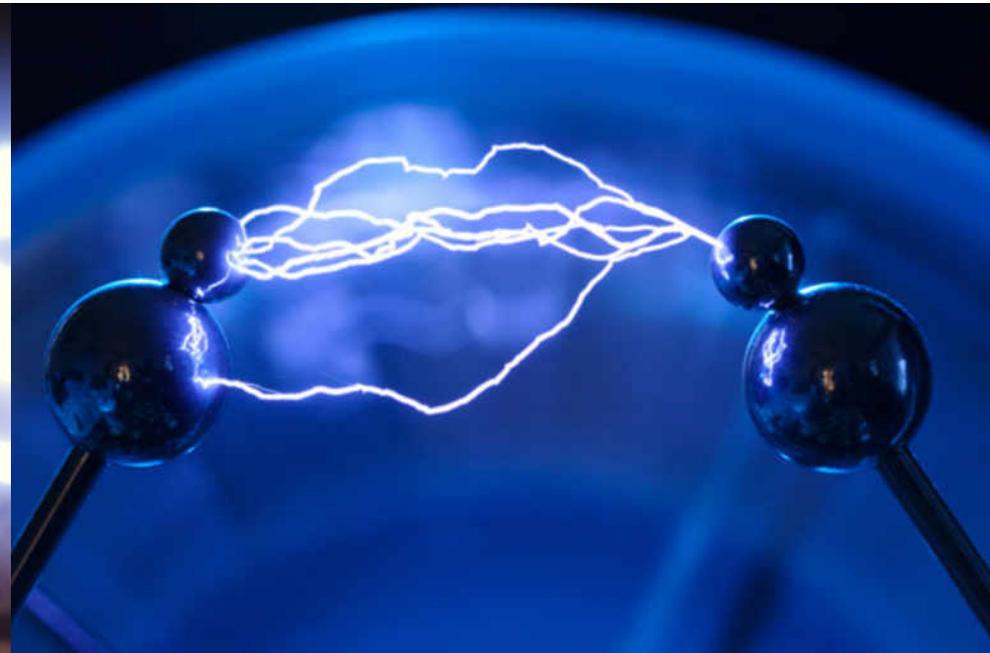
Cycle de Rentrée 2023-2024

Physique
pour Tous!



Des expériences de Physique À réaliser chez soi !

ANNÉE 2023-2024
DE LA PHYSIQUE



contact : physiquepourtous@unistra.fr / web : physiquepourtous.unistra.fr

Pourquoi l'électricité ?



Pourquoi l'électricité ?



Darth Sidious – Empereur Palpatine

Pourquoi l'électricité ?



Comte Dooku

Pourquoi l'électricité ?



Electricité « statique » – mal connue mais importante !

Review Article | Published: 15 July 2019

Long-standing and unresolved issues in triboelectric charging

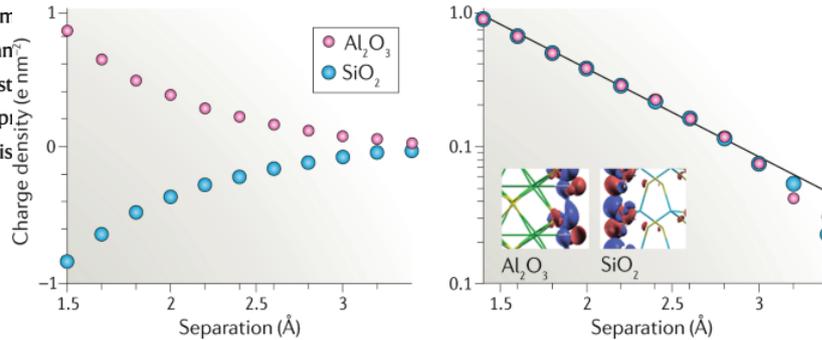
Daniel J. Lacks  & Troy Shinbrot

Nature Reviews Chemistry **3**, 465–476 (2019) | [Cite this article](#)

3893 Accesses | 235 Citations | 31 Altmetric | [Metrics](#)

Abstract

Static electrification is among the earliest of the sciences, well known to us all and with widespread and important consequences. Yet, its most basic foundations remain poorly understood. For example, after centuries of research, it is still not clear whether electrons, ions or even bulk material transfer is responsible for the observed charging. Recent work has leveraged the most advanced experimental and theoretical approaches, and has addressed the phenomenon from mechanochemistry and aspects of our understanding only beginning to appreciate accompanying surprises.



→ Tout n'est pas bien encore connu !!

Electrical charging overcomes the bouncing barrier in planet formation

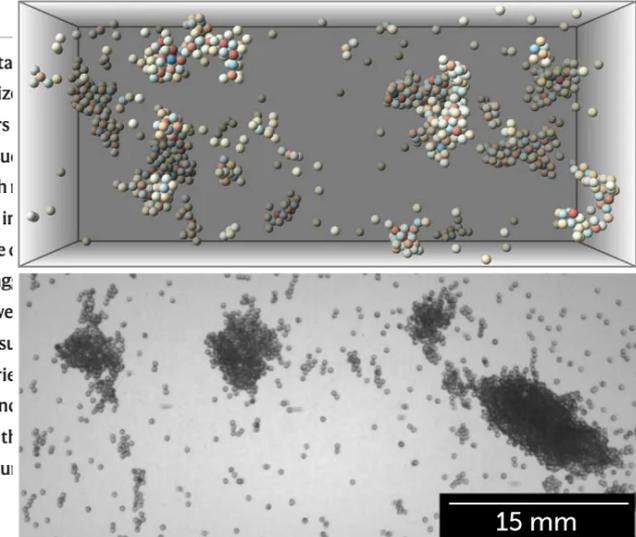
Tobias Steinpilz , Kolja Joeris, Felix Jungmann, Dietrich Wolf, Lothar Brendel, Jens Teiser, Troy Shinbrot & Gerhard Wurm 

Nature Physics **16**, 225–229 (2020) | [Cite this article](#)

4295 Accesses | 50 Citations | 336 Altmetric | [Metrics](#)

Abstract

In protoplanetary discs, micrometre-sized grains aggregate to form planetesimals. However, the streaming instability required in the centimetre to millimetre range stalls. Here we show that streaming instabilities lead to streaming instabilities that overcome the bouncing barrier and form planetesimals. We find a size gap that can



Quelques effets faciles à observer

→ **Film disque vinyle frotté** : <https://phymain.unisciel.fr/la-danse-des-petits-bouts-de-papier/index.html>

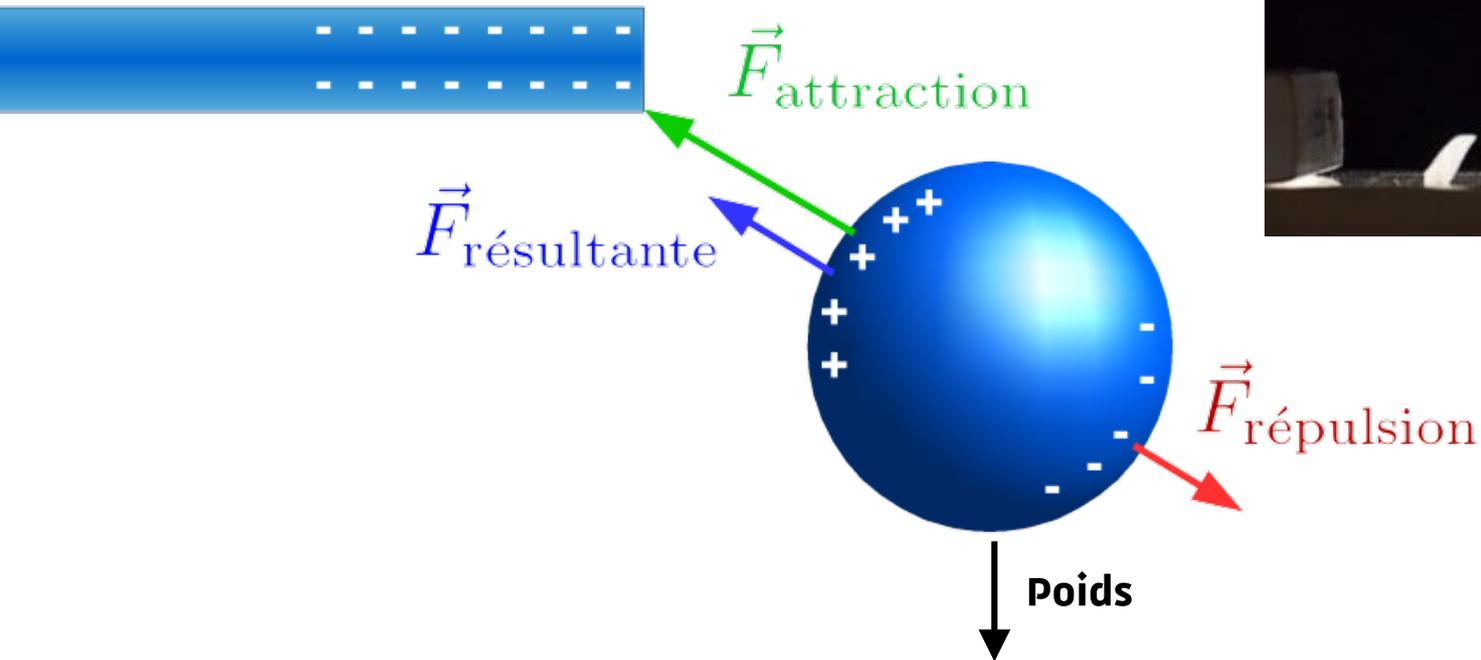


100g/m^2 pour $1\text{cm}^2 \rightarrow 10\text{mg/papier} \rightarrow F_{\text{electrostatique}} > 0.1\text{mN} = m \times g$

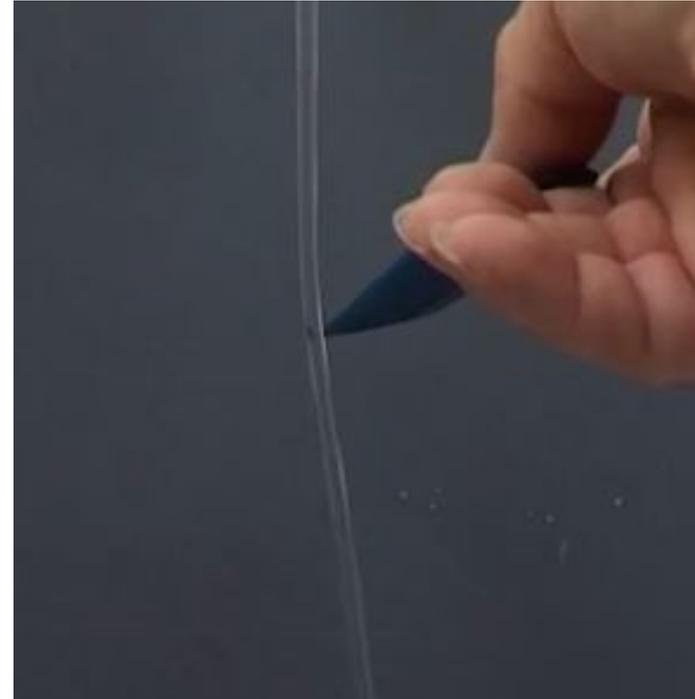
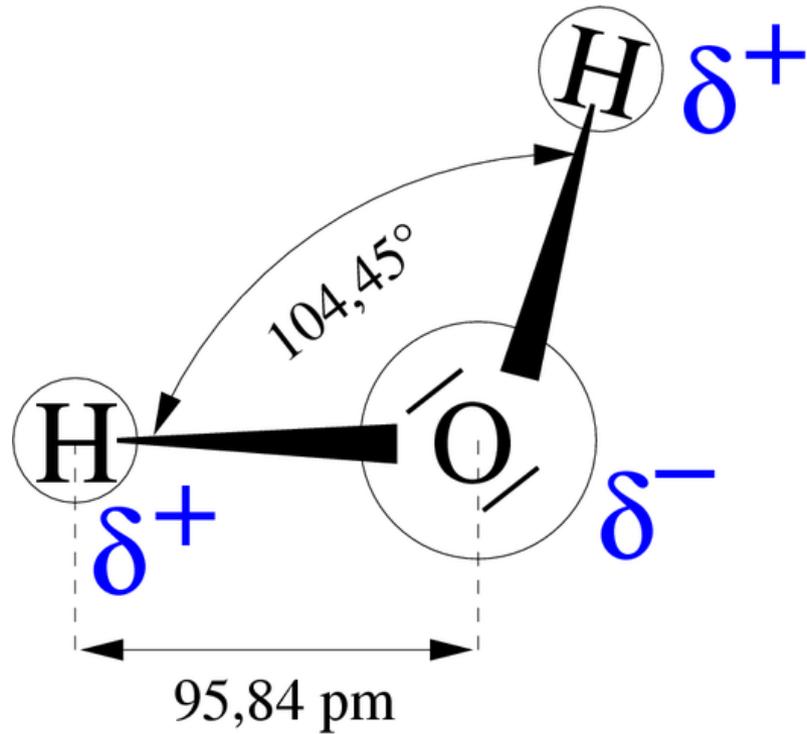
Si chacun est chargé à $10^{-8}\%$ à 1m de distance \rightarrow accélération de 10^7g !!

Quelques effets faciles à observer

Règle chargée négativement



Quelques effets faciles à observer



Lorsqu'on approche la paille chargée, elle attire les charges de même signe et repousse les autres : les dipôles changent d'orientation ce qui crée un effet d'attraction (les charges attirées seront plus proches que les charges repoussées, plus éloignées : l'effet global est donc une attraction).

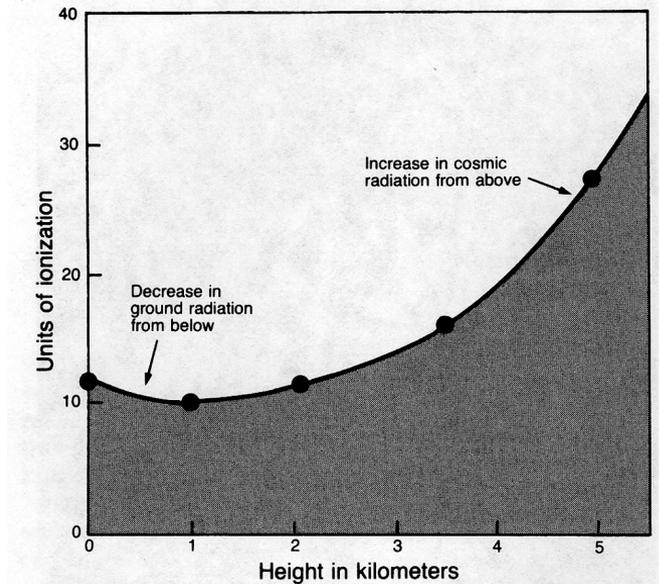
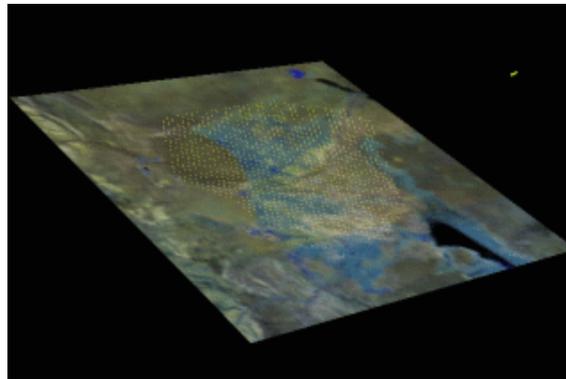
→ **Film peigné frotté et filet d'eau** : <https://phymain.unisciel.fr/comment-devier-un-filet-deau/index.html>

Quelques effets faciles à observer

→ **Film Baudruche au plafond** : <https://phymain.unisciel.fr/des-ballons-de-baudruche-tres-collants/index.html>

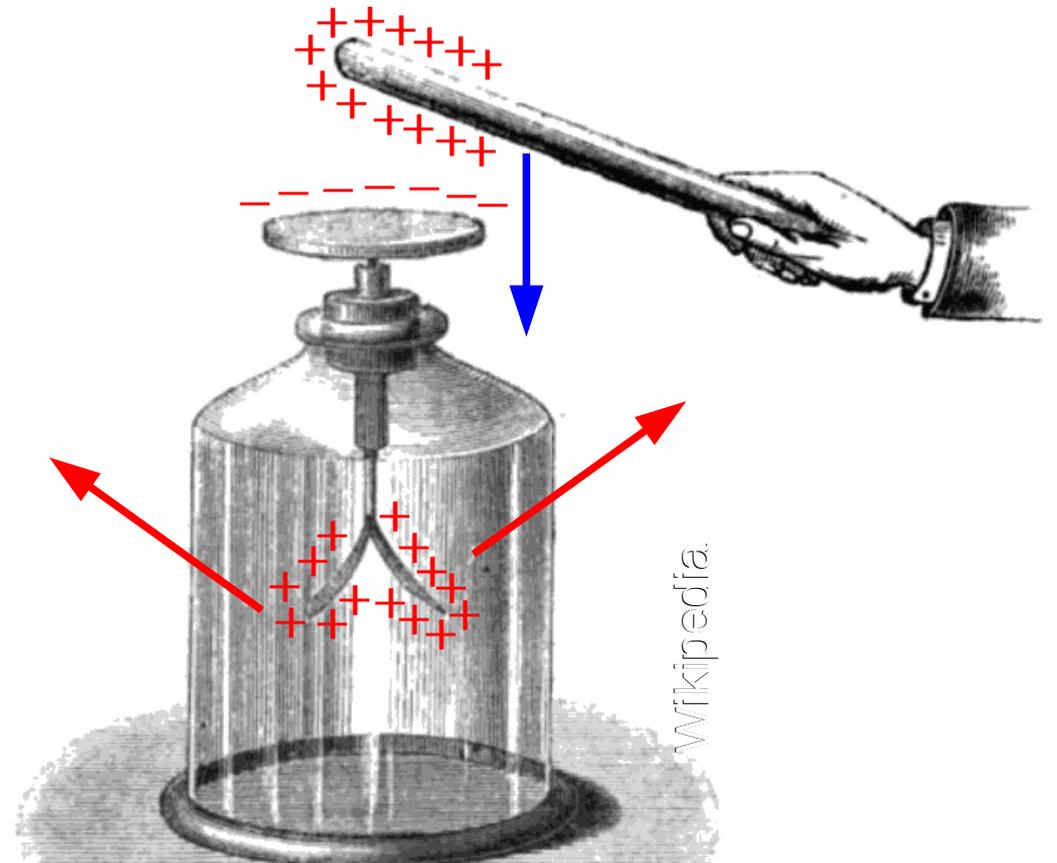
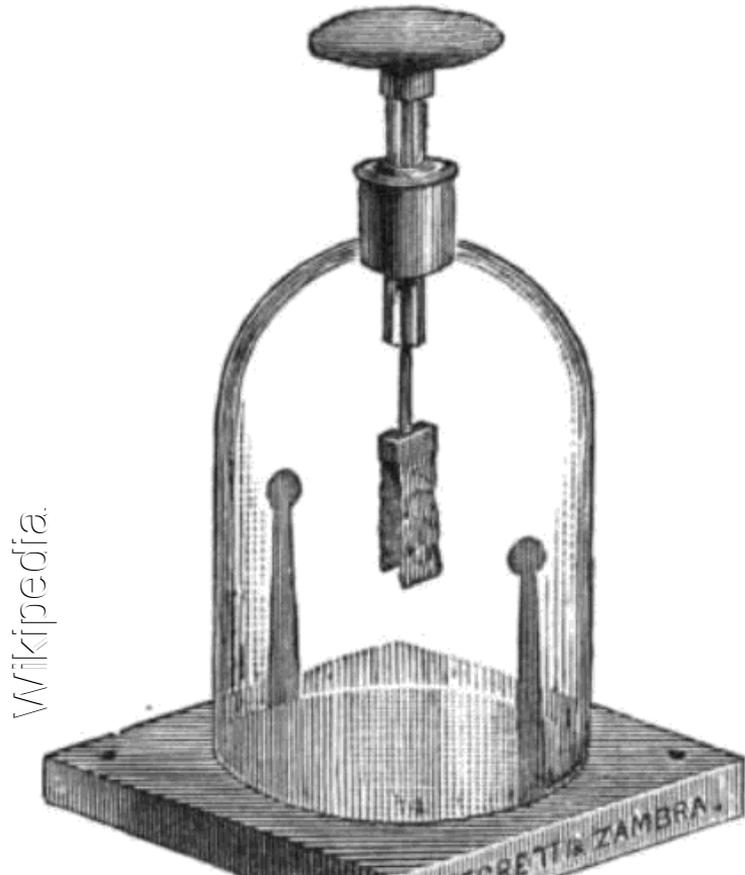


L'électroscope – un instrument de Physique Fondamentale



Readings on ionization chamber Victor Hess carried aloft in the Böhmen. Above four kilometers the ionization rose rapidly indicating "that rays of very great penetrating power are entering our atmosphere from above". These cosmic rays contain the only modern samples of matter from outside our solar system which can be investigated directly.

L'électroscope – un instrument de Physique Fondamentale

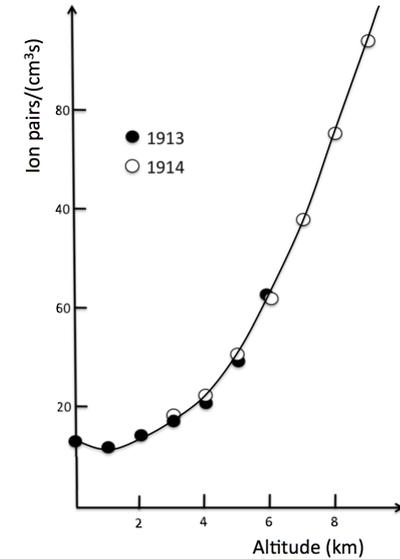
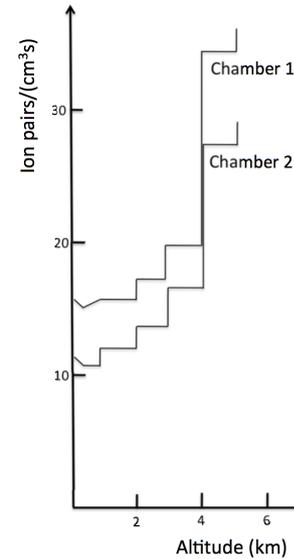


Electroscope : cet instrument rudimentaire a mis en évidence les rayons cosmiques !

L'électroscope – un instrument de Physique Fondamentale



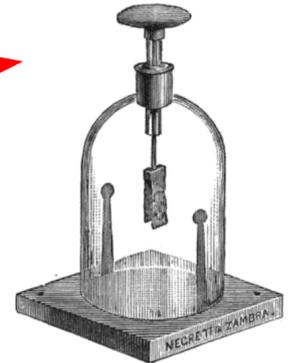
Victor HESS (1913)



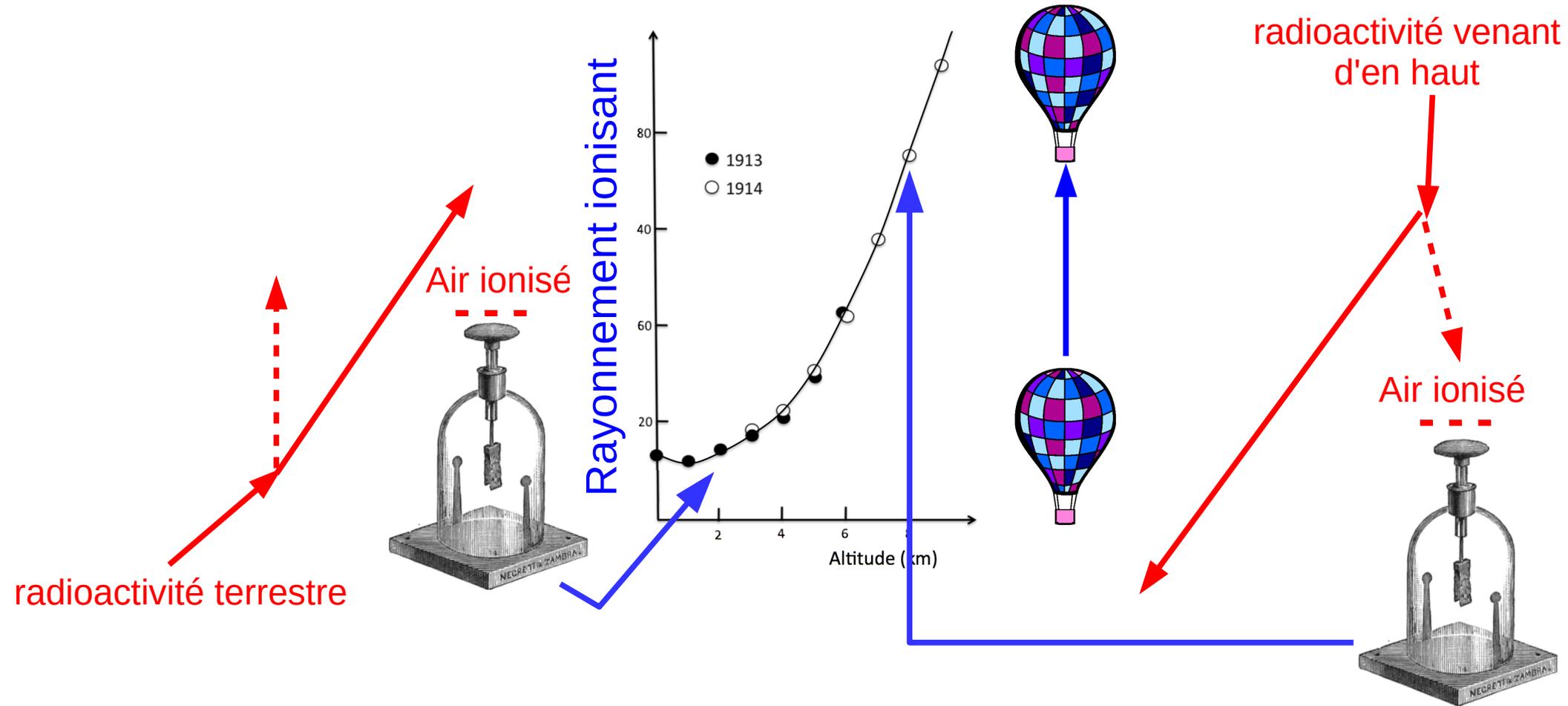
Particule énergétique

Atome dans l'air (Azote,...)

électron



L'électroscope – un instrument de Physique Fondamentale

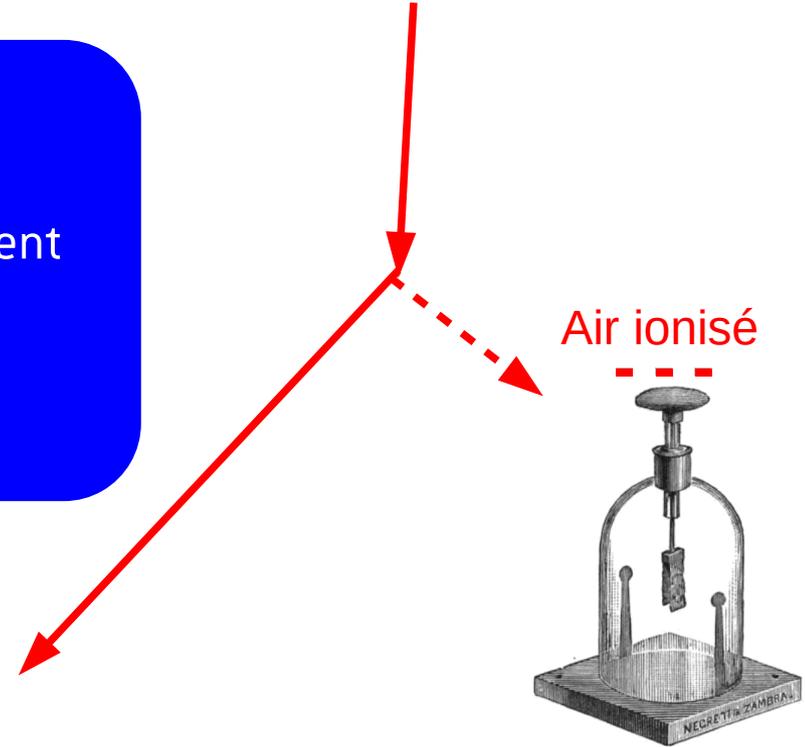


L'électroscope – un instrument de Physique Fondamentale

- 1913 : Höhenstrahlung → rayonnement « cosmique » (1925, Millikan)

« Le résultat de ces observations semble être expliqué de la façon la plus simple en supposant qu'un rayonnement extrêmement pénétrant entre dans notre atmosphère par au-dessus » (V. Hess)

radioactivité venant
d'en haut



L'électroscope – un instrument...rudimentaire !

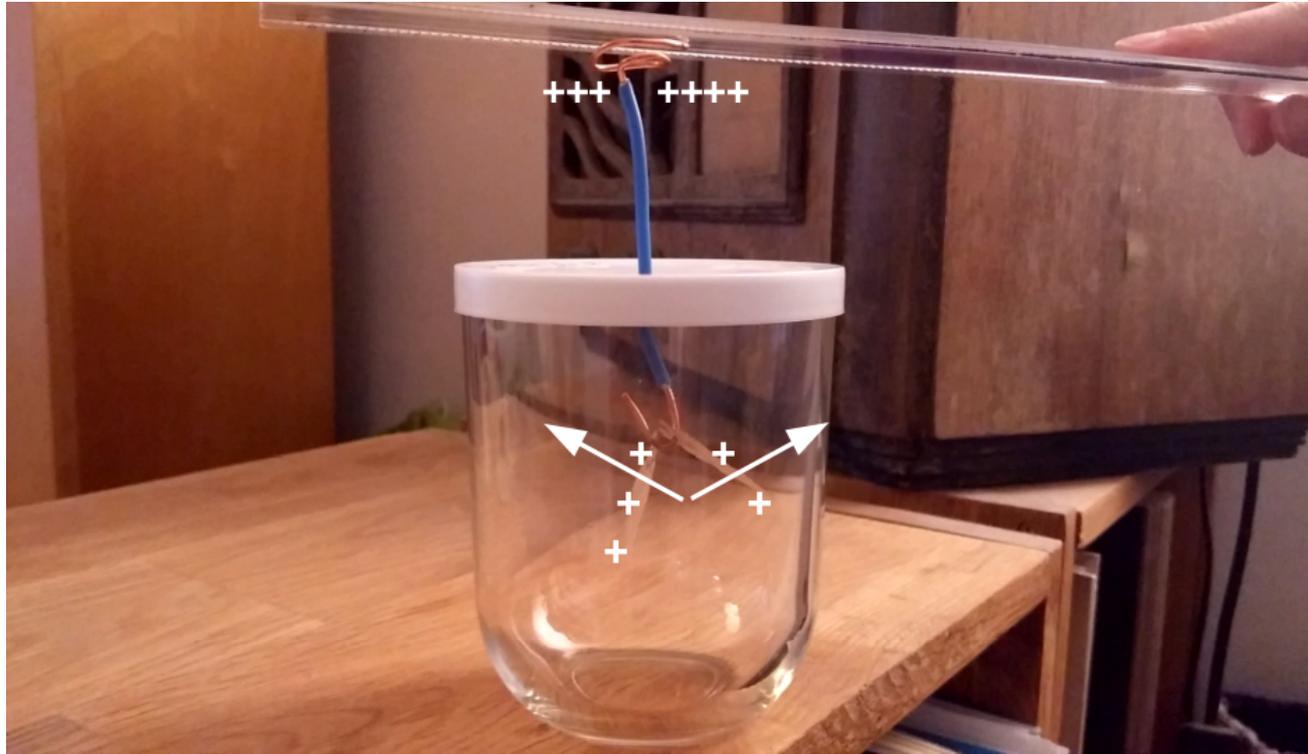


Electroscope – Observations



→ **Film Influence de la règle :** <http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/electromaison.mp4>

Electroscope – charge par contact



→ **Film Charge par contact** : <http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/electromaison2.mp4>

Electroscope – charge/décharge par contact

Charge par contact - Lorsque l'on met en contact la règle (chargée par exemple négativement), des charges positives de l'électroscope sont attirées. Il y a donc globalement un excès de charges négatives dans l'électroscope, et les feuilles, chargées négativement toutes les deux, se repoussent. Par contact avec un objet chargé négativement, l'électroscope se charge négativement.

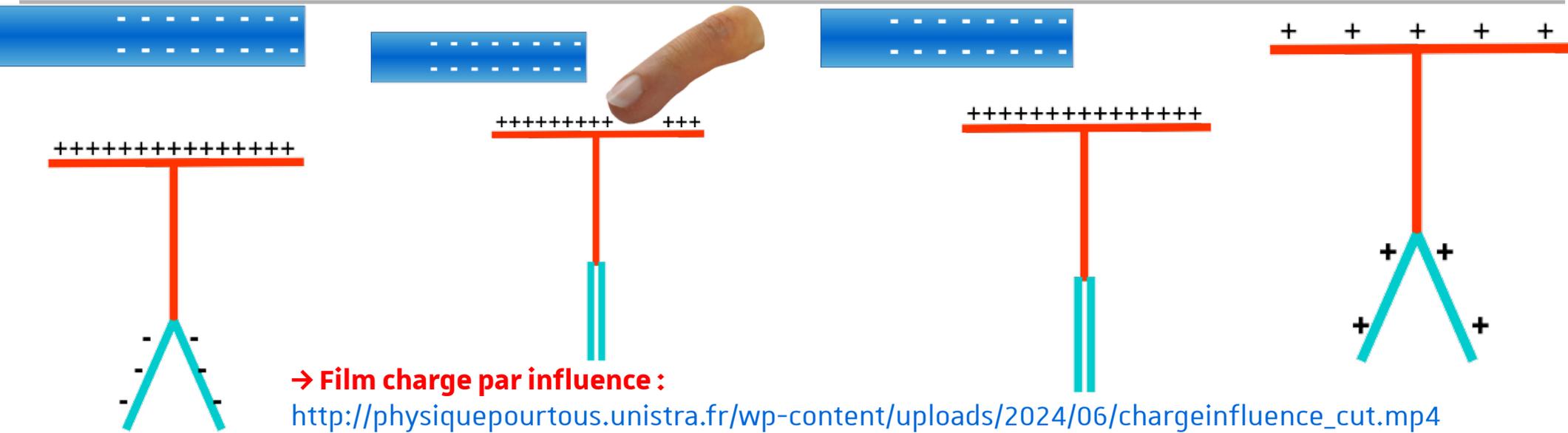
Décharge par contact - En touchant du doigt le plateau, les feuilles retombent. À l'instant du contact, l'électroscope et le corps de l'opérateur ne forment plus qu'un seul conducteur à la surface duquel les charges initialement sur l'électroscope se répartissent. La surface de l'électroscope étant petite par rapport à celle du corps, il ne reste quasiment plus de charges sur l'électroscope. Et l'opérateur est en contact avec la Terre !

→ **Film Décharge par contact :**

http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/decharge_cut.mp4

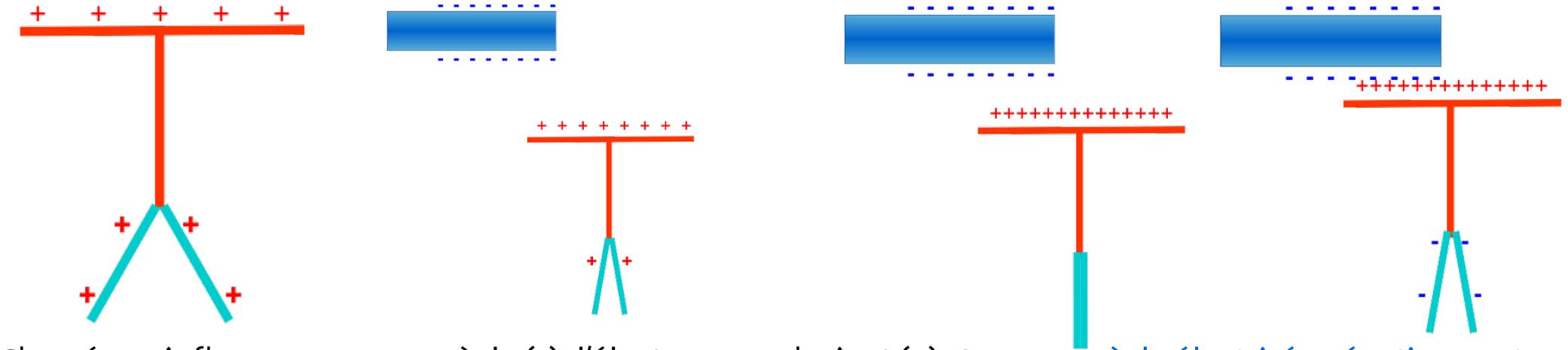


Electroscope – charge par influence



Les feuilles sont négatives comme la règle. En touchant le plateau du doigt, l'électroscope se décharge, mais il y a toujours l'influence de la règle. Le plateau reste positif et seules les charges négatives des feuilles, qui sont loin de cette influence, s'écoulent dans le sol, à travers le corps de l'opérateur. L'électroscope est devenu positif. En retirant le doigt, on isole l'électroscope et cela lui permet de conserver sa nouvelle charge. En retirant la règle, on supprime son influence et les charges positives se répartissent librement entre le plateau et les feuilles. Après cette charge par influence avec un objet chargé négativement, l'électroscope est chargé positivement.

Mise en évidence de 2 types de charge électriques (1)



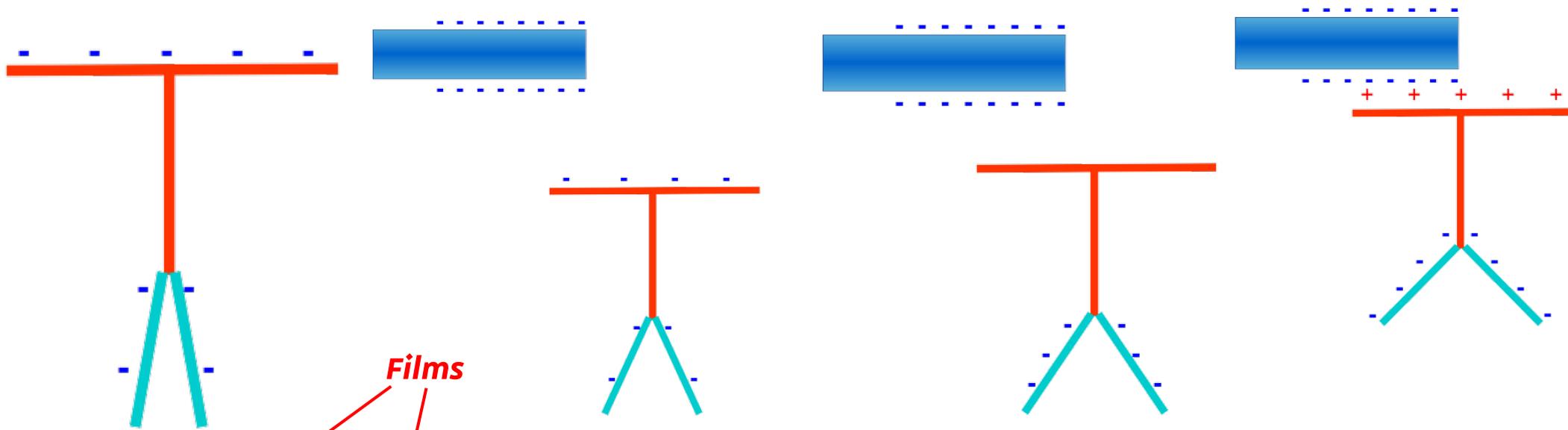
Chargé par influence avec une règle (-), l'électroscope devient (+). Avec une règle électrisée négativement on va observer, en approchant la règle de plus en plus :

- des feuilles qui retombent parce qu'elles deviennent moins positives ;
- des feuilles collées lorsqu'elles sont devenues neutres ;
- puis des feuilles qui s'écartent à nouveau en devenant négatives.

Même phénomène avec un électroscope négatif (chargé par contact avec une règle (-)) et un tube en verre frotté (qui s'est donc chargé positivement celui-là !).

Films

Mise en évidence de 2 types de charge électriques (2)



Avec un électroscope positif, le tube en verre, chargé positivement, va repousser les charges de même signe - les feuilles déjà chargées positivement vont d'avantage s'écarter.

Avec un électroscope négatif, la règle négative va attirer des charges positives sur le plateau qui va devenir successivement moins négatif, neutre, puis positif. Plus la règle sera proche, plus les feuilles deviendront négatives et s'écarteront.

Electroscope – Historique

Antiquité

- Ambre jaune – elektron – électrostatique - « vitreuse » + / « résineuse » -
- Magnésie – aimant naturel



Electroscope – Historique

Antiquité

- Poissons électriques → traitements médicaux (Egypte par exemple, +50)
- Asie → boussole (+100, puis occident 900)



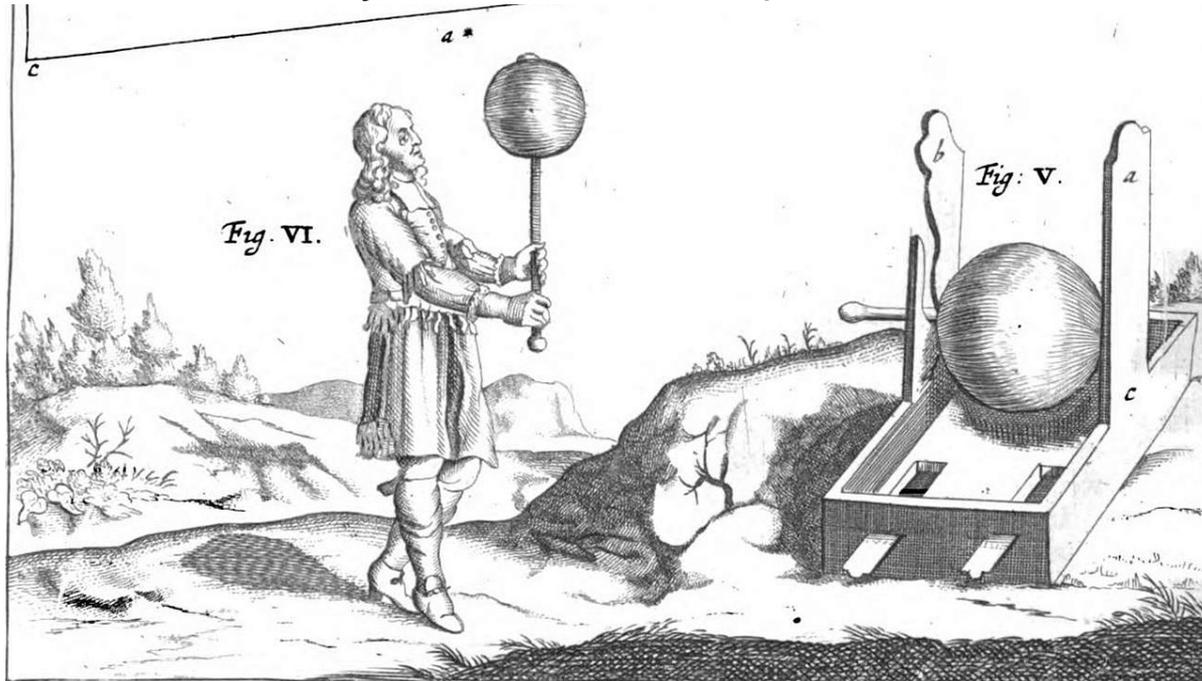
Electroscope – Historique

Plus tard...

→ 1672 – Otto von Guericke – Globe de soufre → éclairs

→ **1747-50 – premiers électroscopes**

→ 1752 – Benjamin Franklin & le paratonnerre

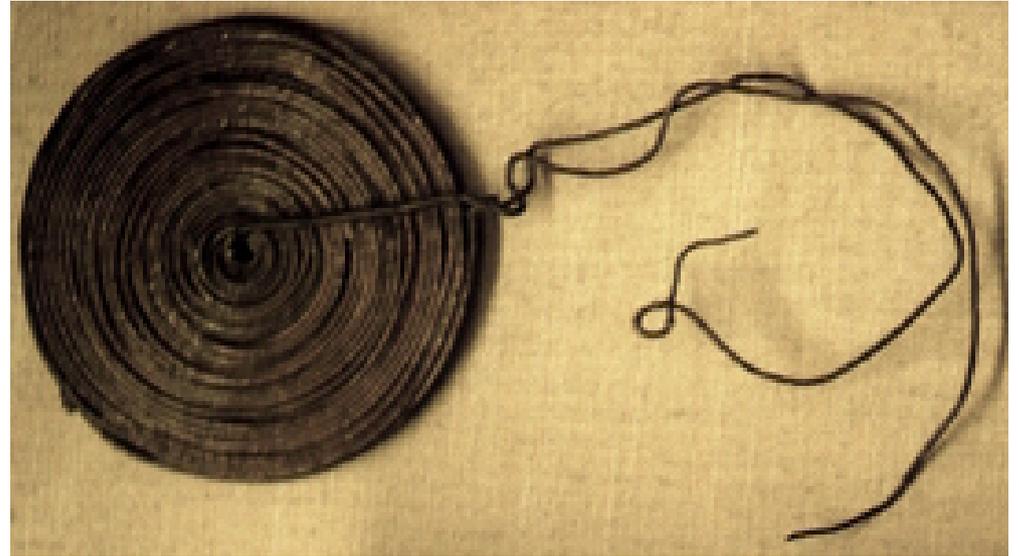
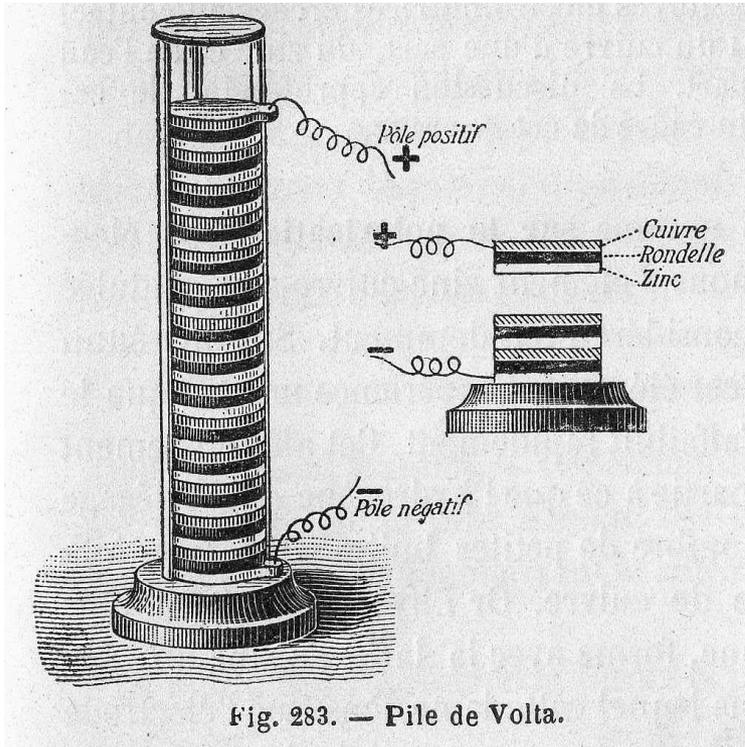


Electroscope – Historique

Plus tard...

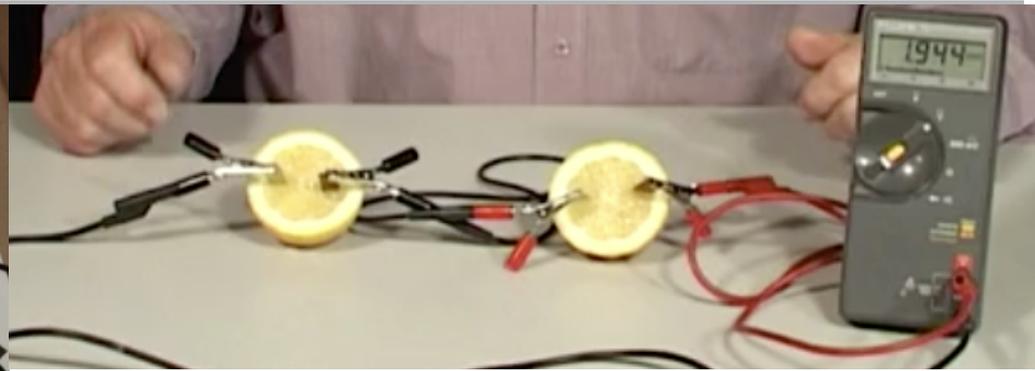
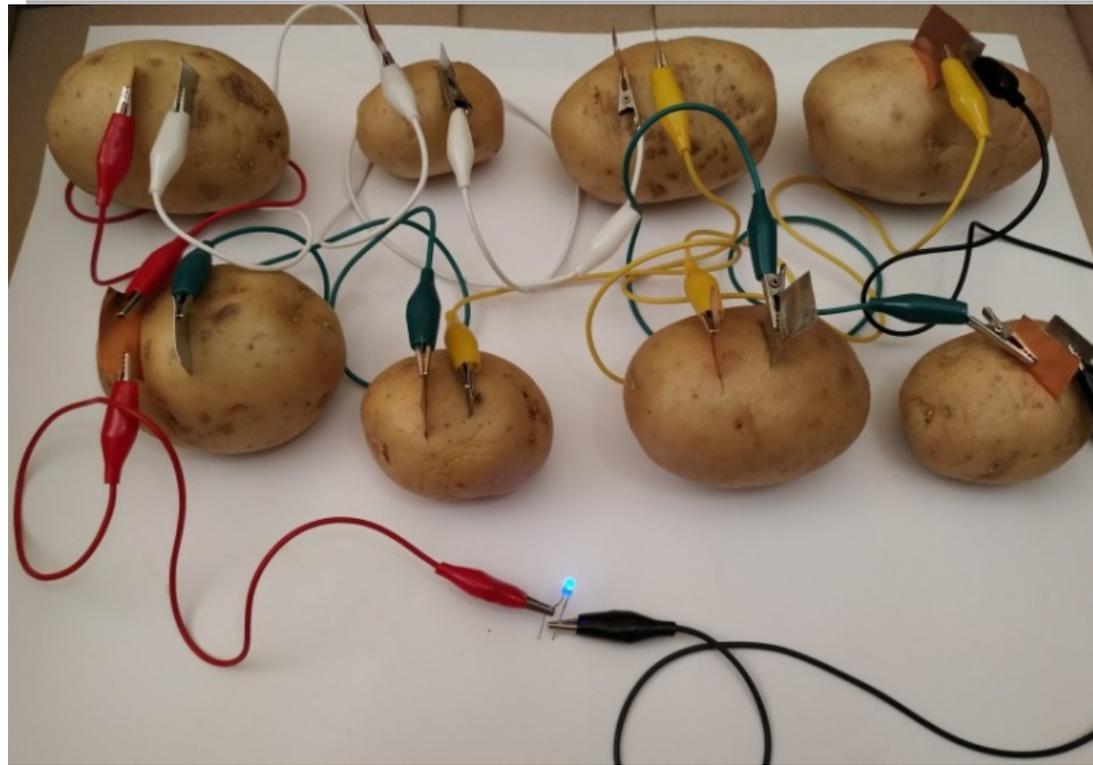
→ 1799 – **Pile** d'Alessandro Volta (Cuivre/Saumure/Zinc)

→ 1827 – Ampère – **charges électriques en mouvement** → **magnétisme**



https://www.sorbonne-universite.fr/sites/default/files/media/2021-09/acid_-_invention_de_la_pile_electrique_0.pdf

Electroscope – Des piles biologiques



Citron, Patate, Pamplemousse, Pomme → **ions A**



Ions Zn passent dans le Citron

Ions Citron → plaque de Cu

Au voisinage de Zn, champ E entre Zn

Nombreuses ressources

<https://arduiblog.com/2019/05/27/la-pile-patate>

<http://phymain.unisciel.fr/la-pile-au-citron/>

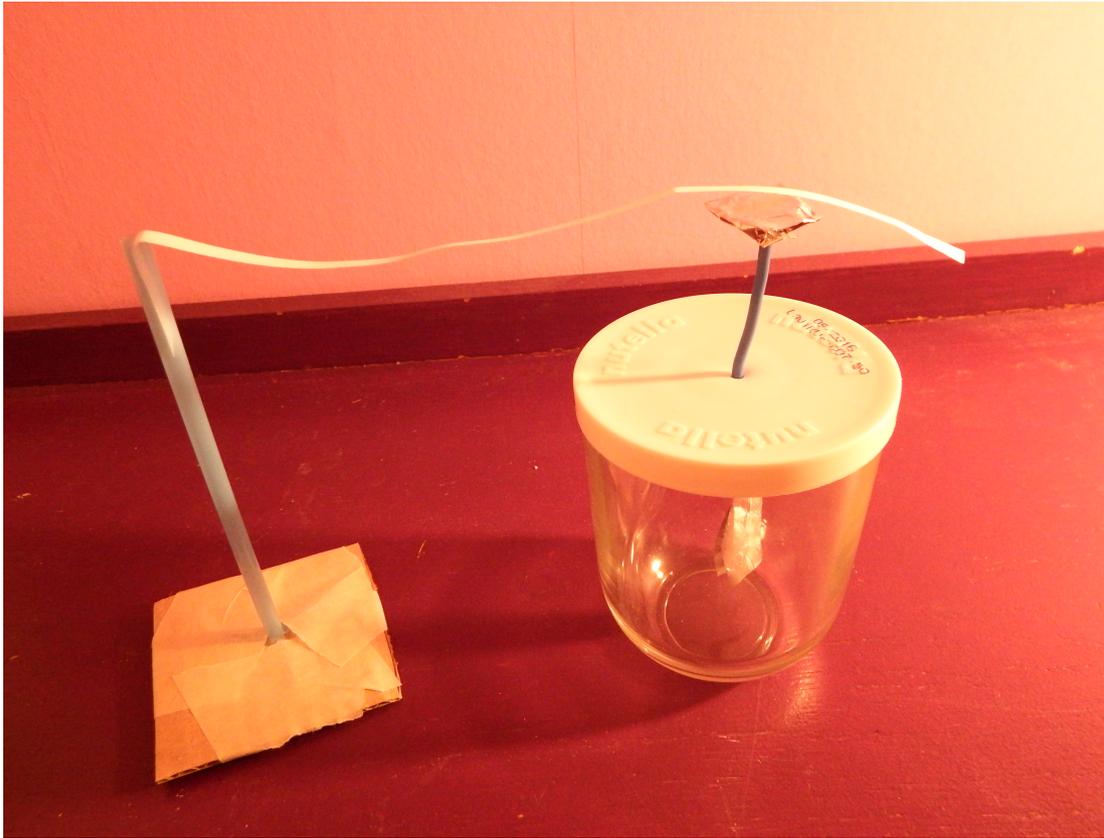
Document LAMAP



Par fil e⁻ Zn → Cuivre, neutralisent H⁺

Pile Zn/H⁺

Electroscope – Conduction des charges



Au cours des expériences précédentes, l'écartement des feuilles était simultané à l'approche de la règle chargée, et instantané. Ici la règle négative repousse les électrons du papier et ce mouvement de charges met quelques secondes pour atteindre les feuilles : la bande de papier est plus résistante (et donc moins conductrice) que le cuivre du plateau de l'électroscope

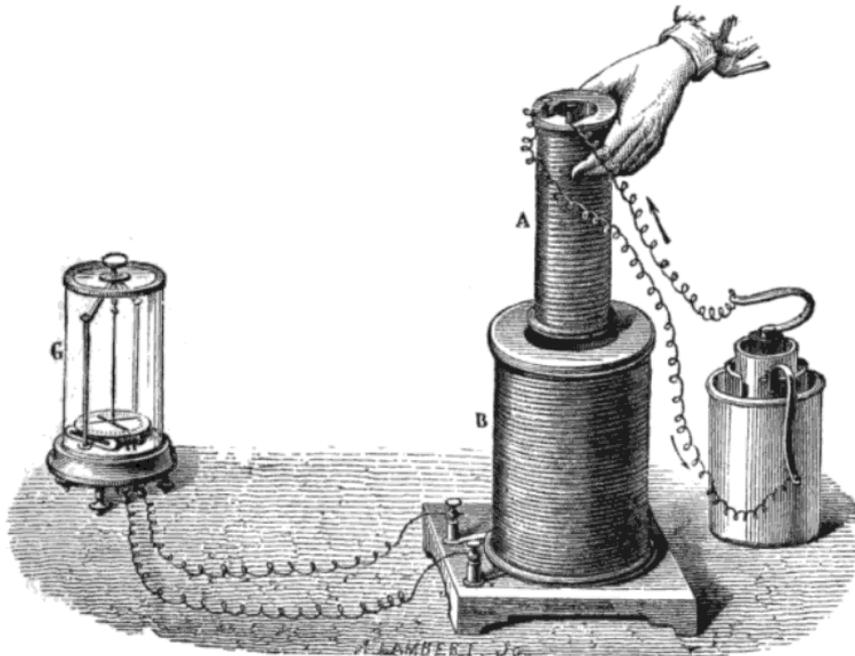
→ **Film Conduction** : <http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/electroconduction1.mp4>

Electroscope – Historique

Plus tard...

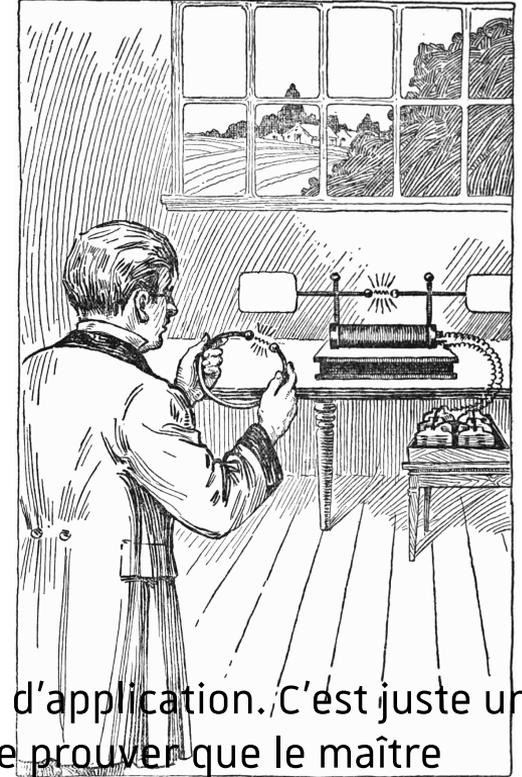
→ 1831 – **Induction électromagnétique** Faraday

→ 1886-88 – Expérience de Hertz → ondes électromagnétiques



Faraday

Hertz



« Cela n'a aucune espèce d'application. C'est juste une expérience qui permet de prouver que le maître Maxwell avait raison – nous avons simplement ces ondes électromagnétiques mystérieuses que nous ne pouvons voir à l'œil nu. Mais elles sont là »

Electroscope – Historique

→ 1873 – Equations de Maxwell

Maxwell-Gauss

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

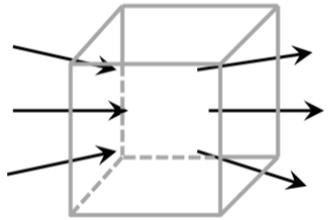
Maxwell-Faraday

Maxwell-Thomson
(Maxwell-Flux)

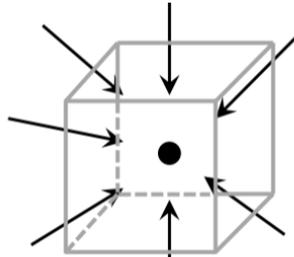
$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

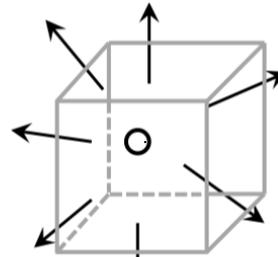
Maxwell-Ampère



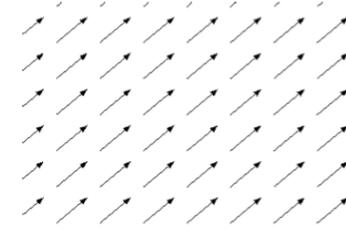
$$\operatorname{div} \vec{F} = 0$$



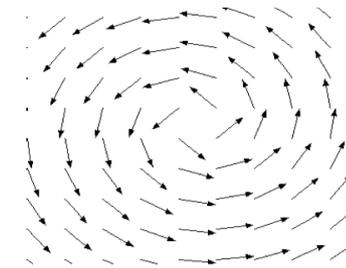
$$\operatorname{div} \vec{F} < 0$$



$$\operatorname{div} \vec{F} > 0$$



$$\operatorname{rot} \vec{F} = \vec{0}$$



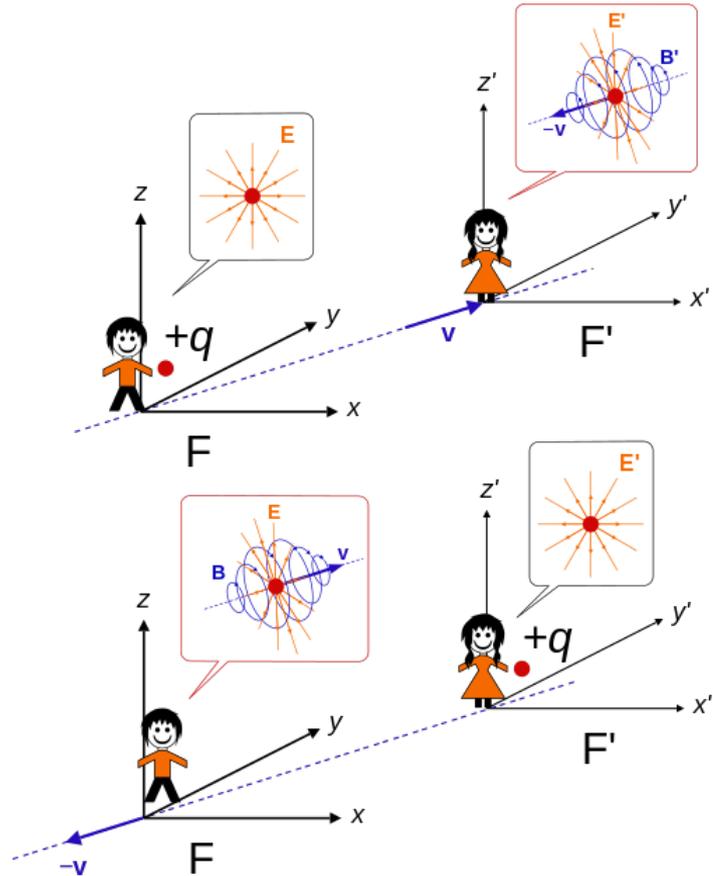
$$\operatorname{rot} \vec{F} \neq \vec{0}$$

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Avec $1/c^2 = \mu_0 \epsilon_0 = \text{constante !}$

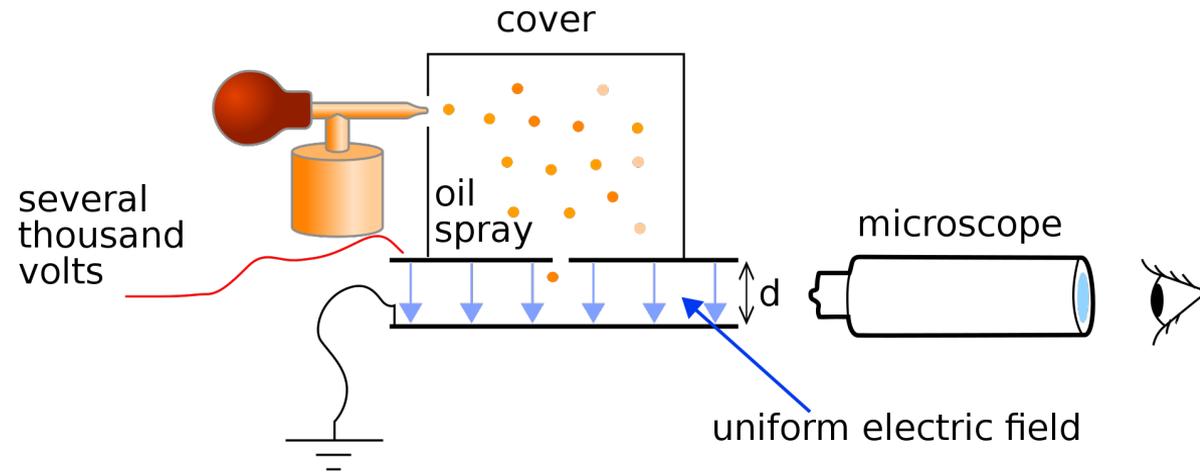
Electroscope – Historique

→ 1905 – Lorentz, Poincaré, Einstein – Relativité restreinte & électromagnétisme



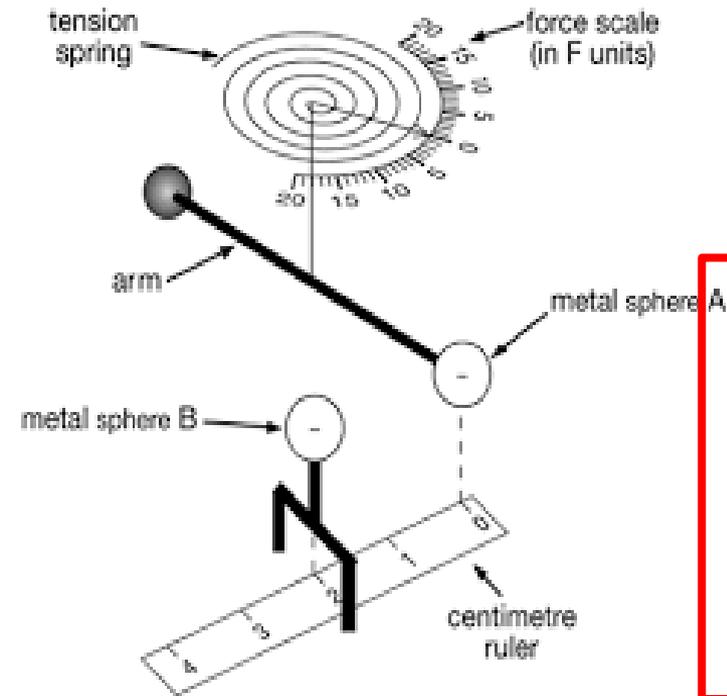
Electroscope – Historique

→ 1913 – Millikan – quantification de la charge électrique (Prix Nobel 1923)



→ $Q = n e$ avec $e \sim 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Electroscope – expériences historiques

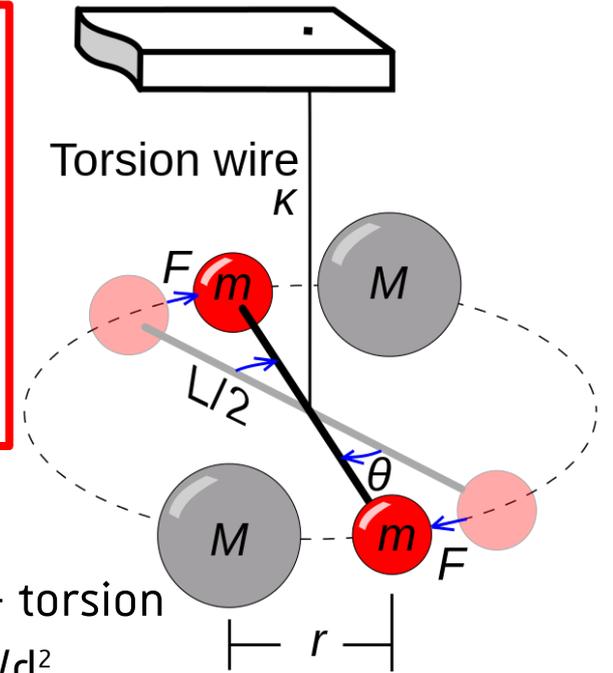


Balance de Coulomb (circa 1785) :

→ mise en évidence de la loi de Coulomb

Loi de Coulomb

$$\vec{F}_1 = \frac{Qq_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$$
$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$$

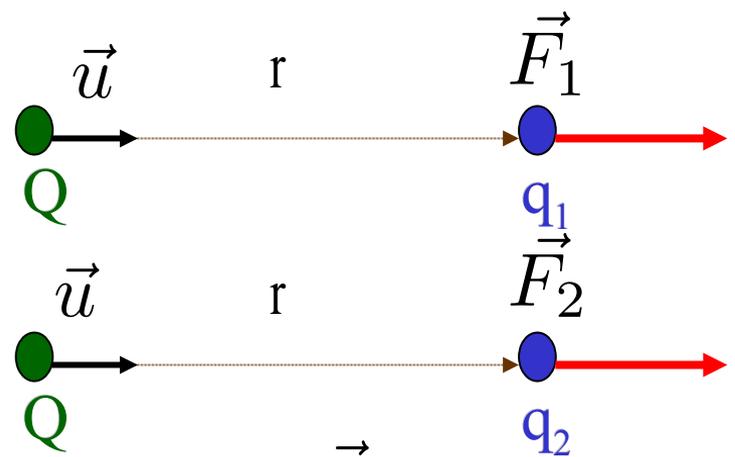


Balance de Cavendish (1798)

→ Gravitation de M sur m + frottement + torsion

→ mesure de G et vérification de $F_g \propto 1/d^2$

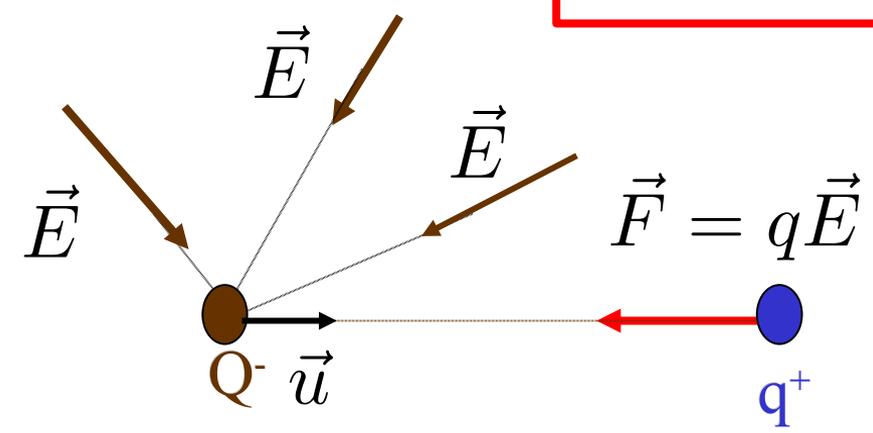
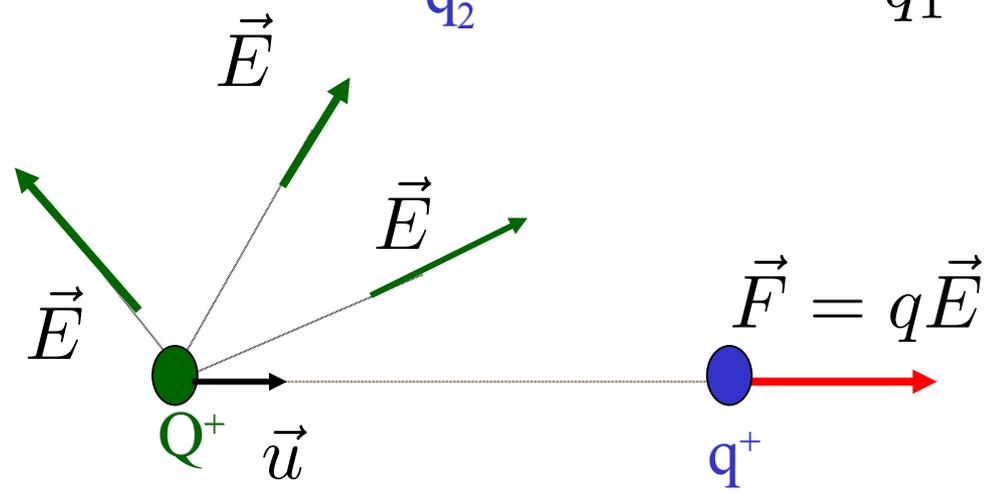
Electroscope – « Champ » électrique



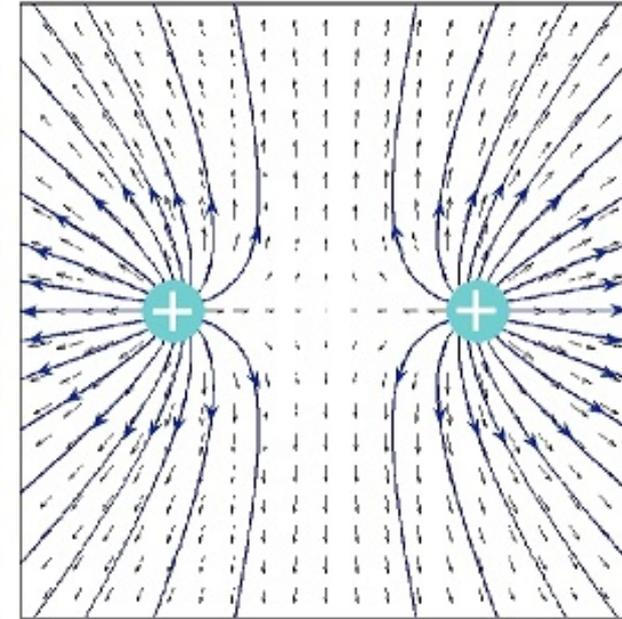
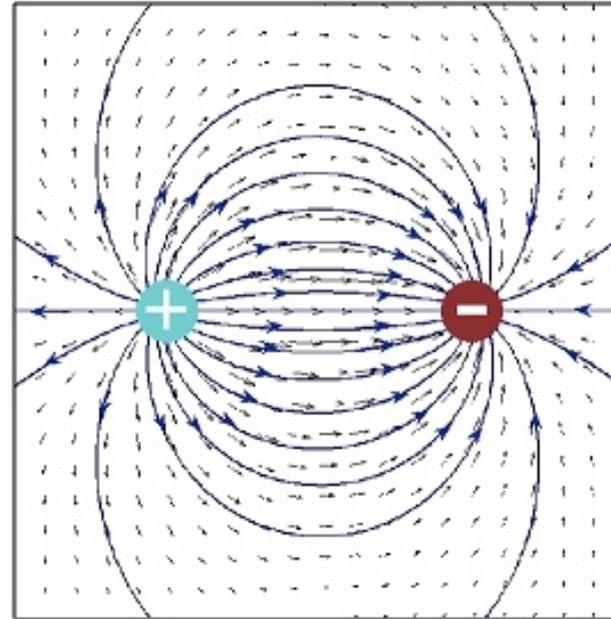
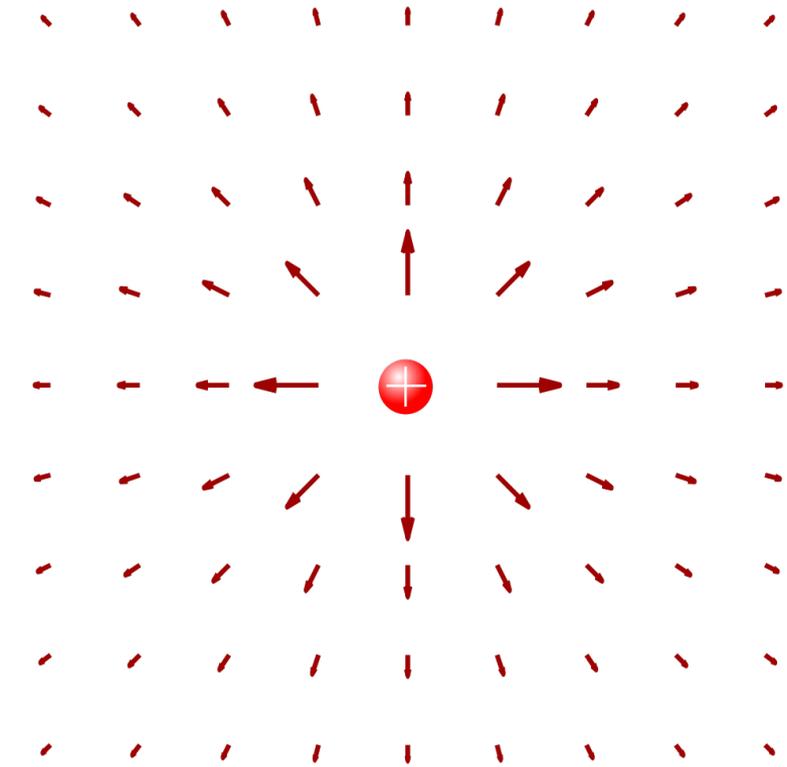
$$\vec{F}_1 = \frac{Qq_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$$

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



Electroscope – « Champ » électrique



« Lignes » de champ

Electroscope – « Potentiel » électrique

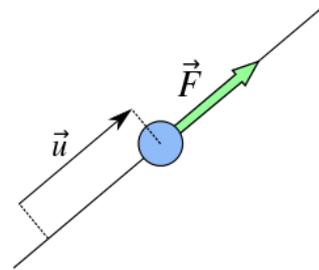
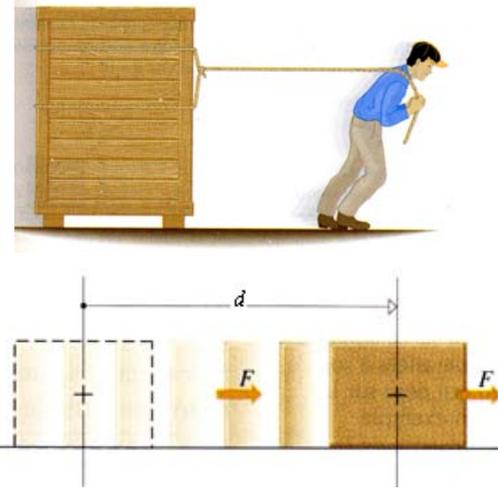
- Surface [S] = L²
- Volume [V] = L³
- Vitesse [v] = L/T = L.T⁻¹
- Accélération [a] = [Δv/Δt] = L.T⁻²
- Force [F] = [m.a] = M.L.T⁻²
- Pression [P] = force/surface = M.L⁻¹.T⁻²
- Energie [E] = force × longueur = M.L².T⁻²

« Energie » électrostatique E_p ~ F x d

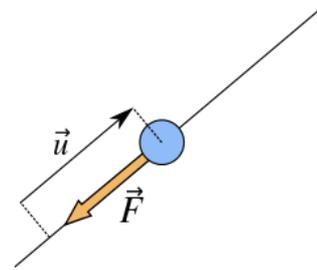
$$\rightarrow E_p \sim q E x d$$

« Potentiel » électrique = E_p/q ~ E x d

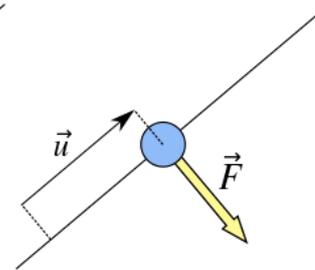
$$\Delta V \sim \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



Force motrice



Force résistante



Force à travail nul

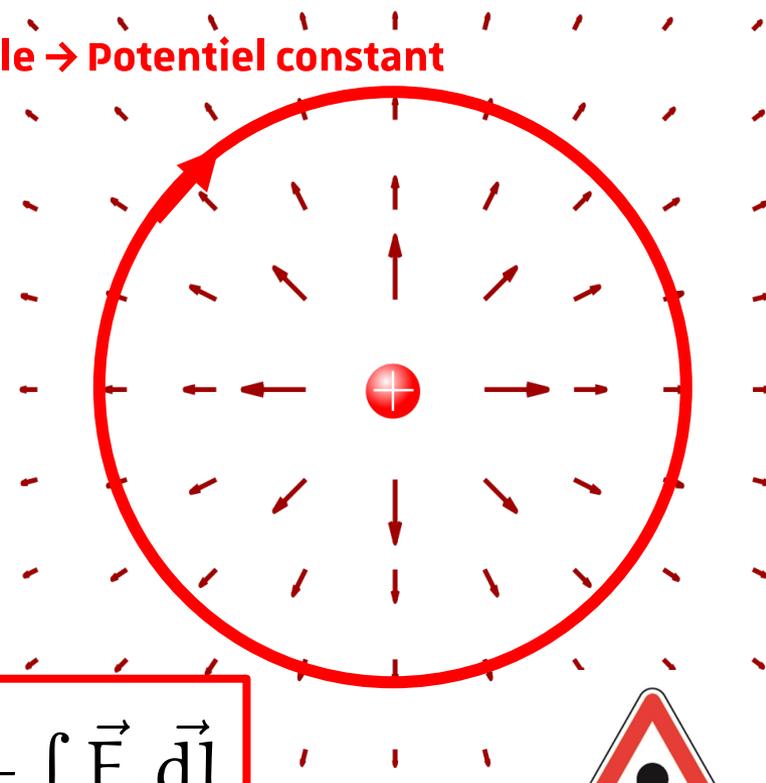
Electroscope – « Potentiel » électrique

$$\Delta V \sim \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

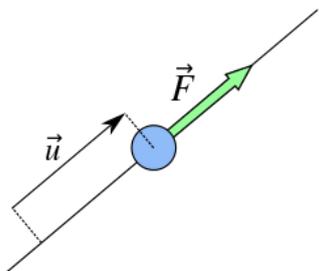
$$V_B - V_A = W_{\text{fourni/charge}} = -\frac{1}{q} \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



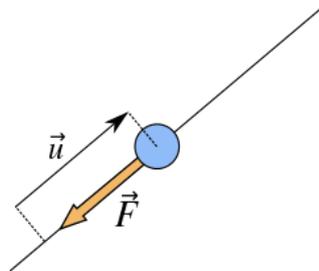
Travail nul → énergie nulle → Potentiel constant



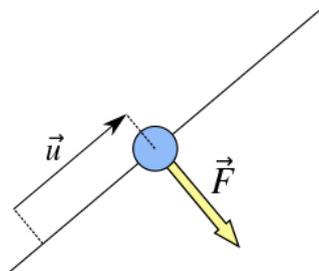
Travail maximal → énergie maximale à fournir contre le champ E



Force motrice



Force résistante

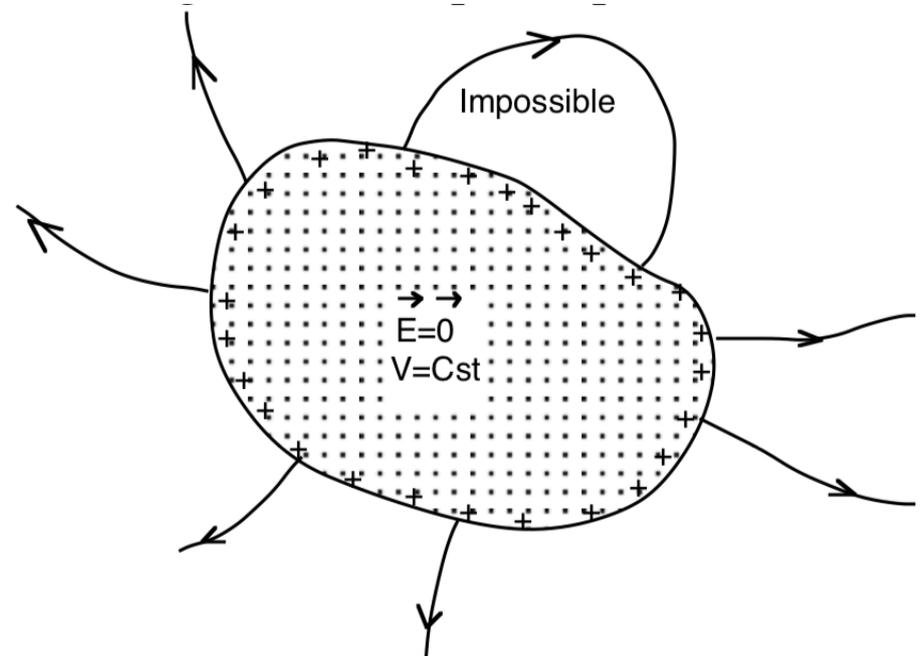
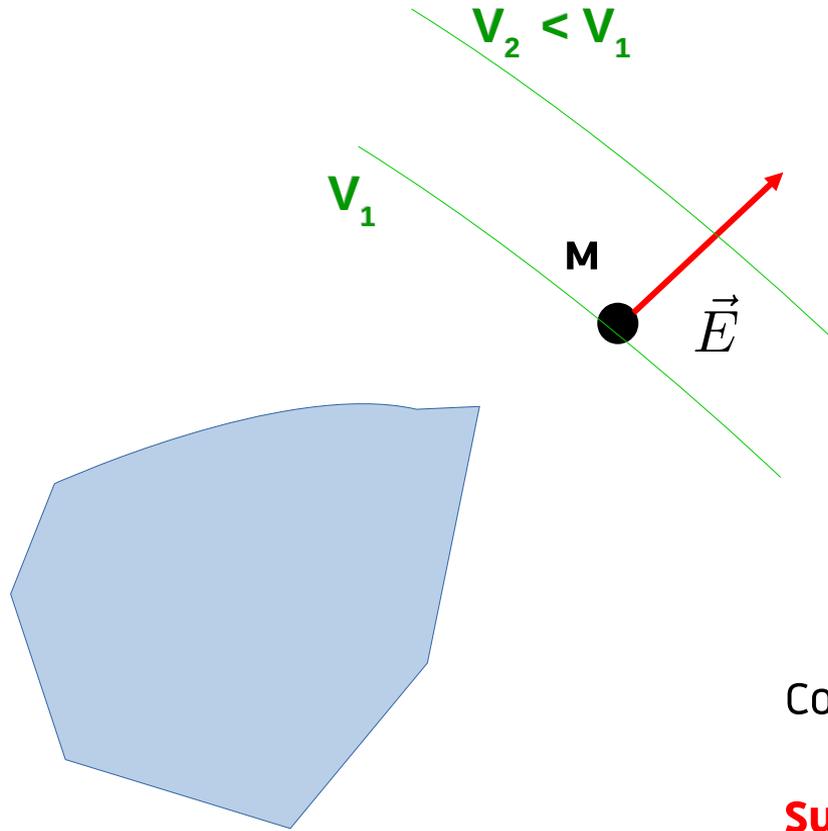


Force à travail nul

$$\Delta V \sim - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$
$$E \sim - \frac{\Delta V}{\Delta x}$$



Electroscope – « Potentiel » électrique



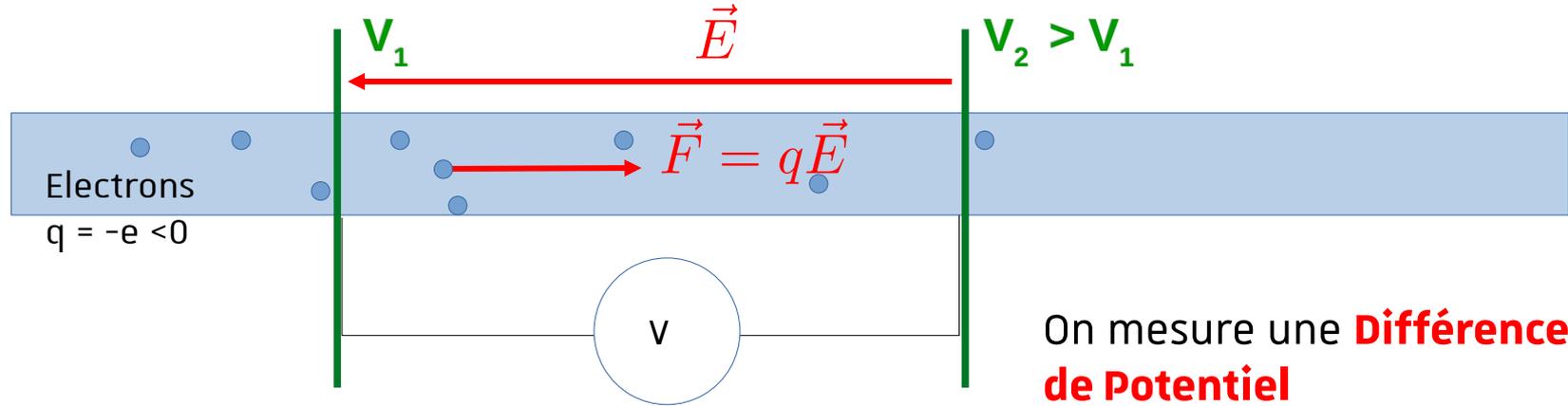
Conducteur « à l'équilibre » → **Champ $E = 0$ à l'intérieur**
→ charges en surface - voir plus tard
Surface = équipotentielle
→ lignes de champ orthogonales

Electroscope – « *Potentiel* » électrique

Equipotentielles orthogonales aux **Lignes de champ**

Champ dans le sens des V **décroissants**

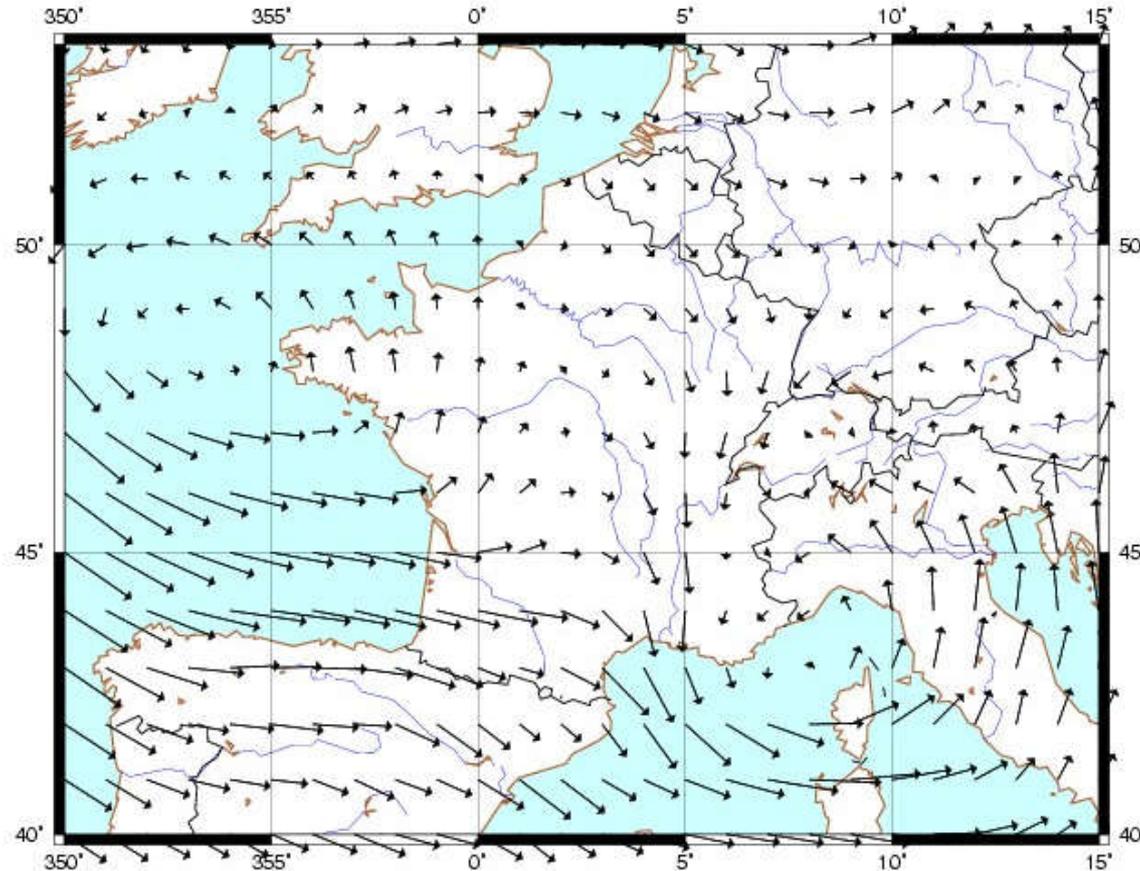
Conducteur
électrique



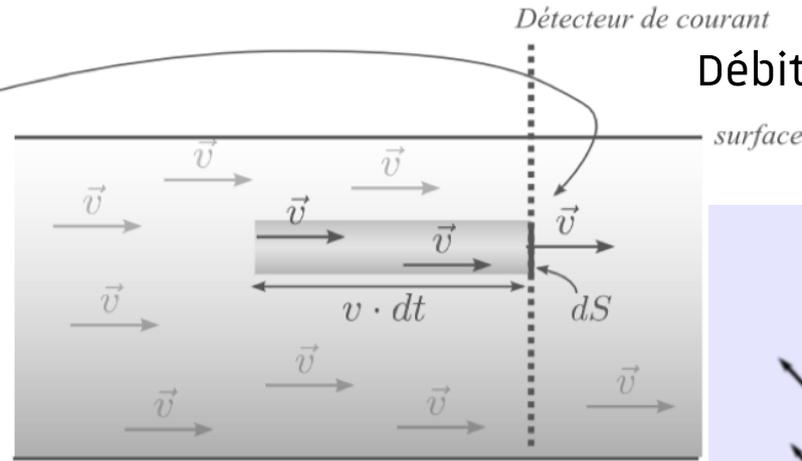
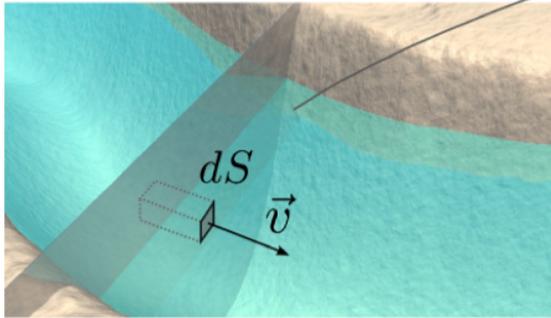
On mesure une **Différence de Potentiel**

Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss

Champ de vent 27Mars1999 06h00UTC

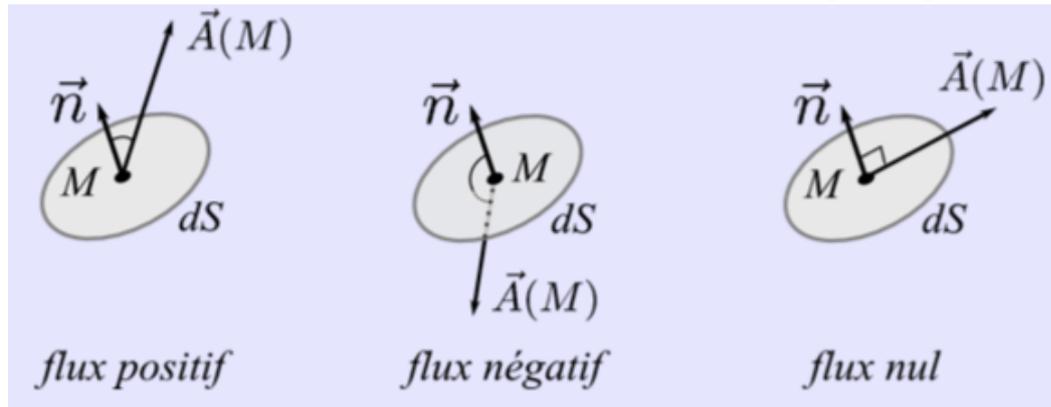
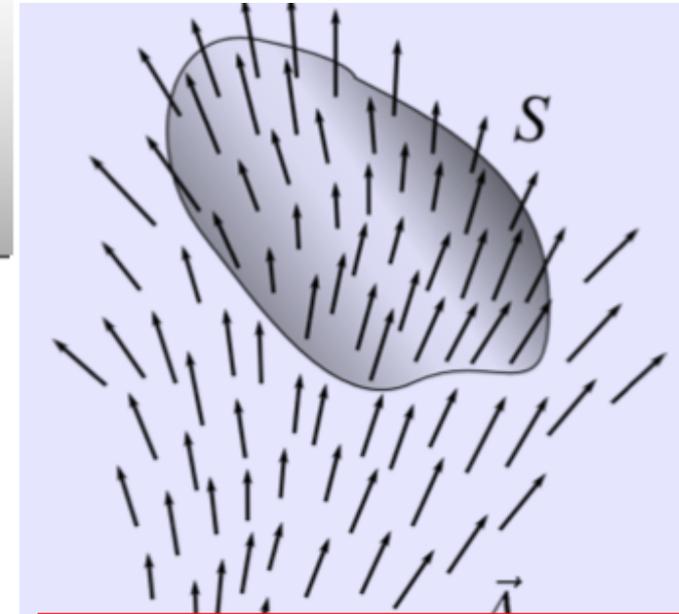


Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss



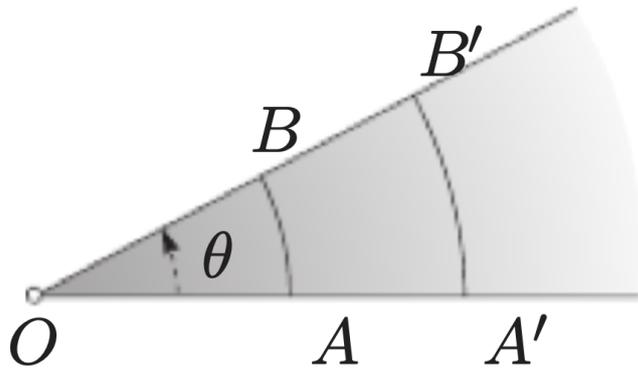
Débit $\sim v \cdot S =$ flux du champ v

$$\Phi \sim E \times S$$

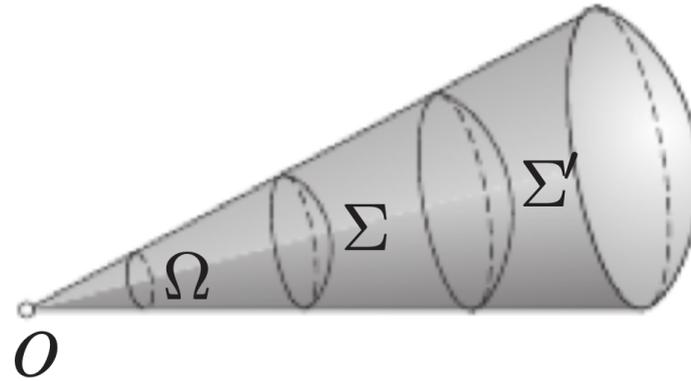
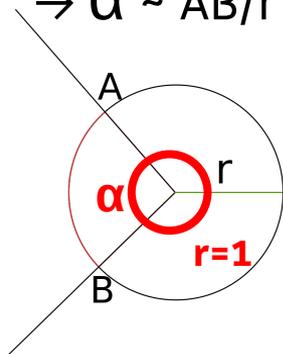


**Dépend de « l'angle solide »
de la surface !**

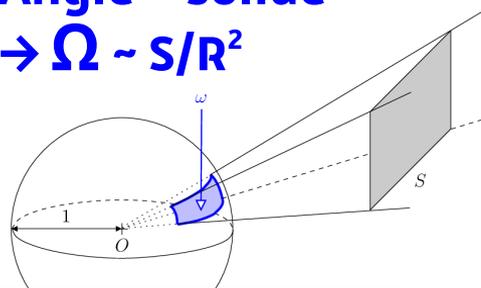
Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss



Angle « plan »
 $\rightarrow \alpha \sim AB/r$



Angle « solide »
 $\rightarrow \Omega \sim S/R^2$

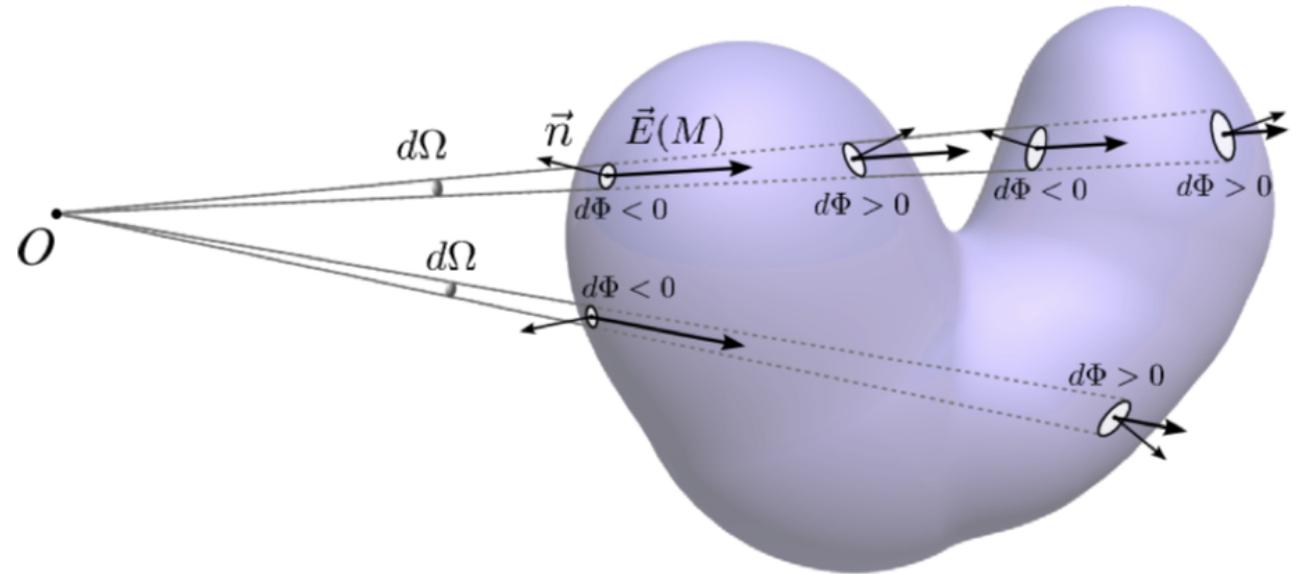
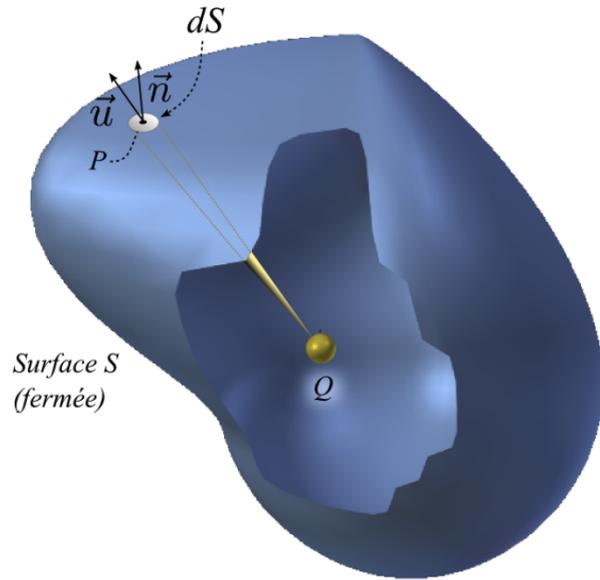


« Angle solide » de la surface

$$\begin{aligned} \Phi &\sim E \times S \\ \Rightarrow \Phi &\sim \frac{Q}{\pi\epsilon_0 R^2} \times R^2 \Omega \\ \Rightarrow \Phi &\sim \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \Omega \end{aligned}$$



Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss



**Q à l'intérieur $\rightarrow \Omega = 4\pi = 4\pi R^2 / R^2$
 $\rightarrow \Phi = Q_{\text{int}} / \epsilon_0$**

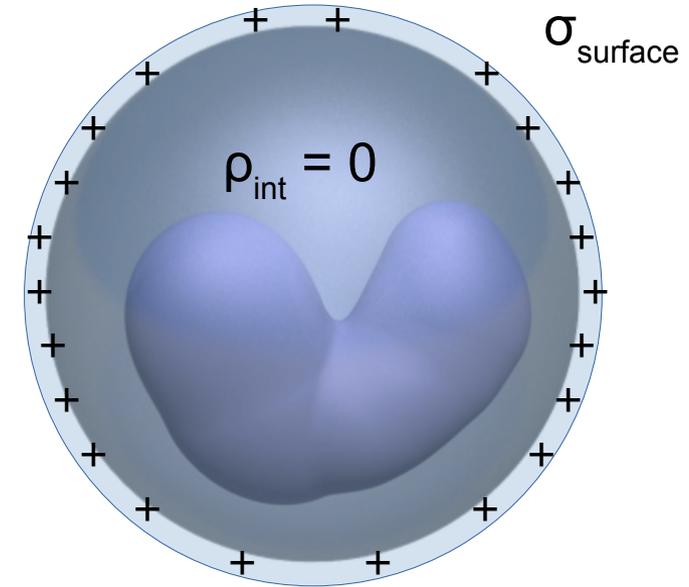
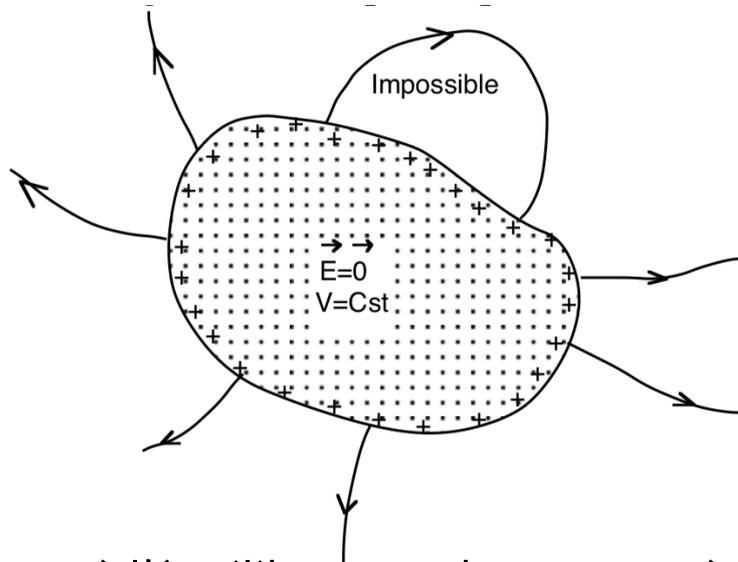
**Q à l'extérieur
 $\rightarrow \Phi = 0 !!$**

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \Omega$$

$$\Phi = \frac{Q_{\text{int}}}{4\pi\epsilon_0} \Omega = \frac{Q_{\text{int}}}{4\pi\epsilon_0} 4\pi = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$



Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss



Conducteur « à l'équilibre » → Champ $E = 0$ à l'intérieur

→ Flux nul pour toute surface « de Gauss »

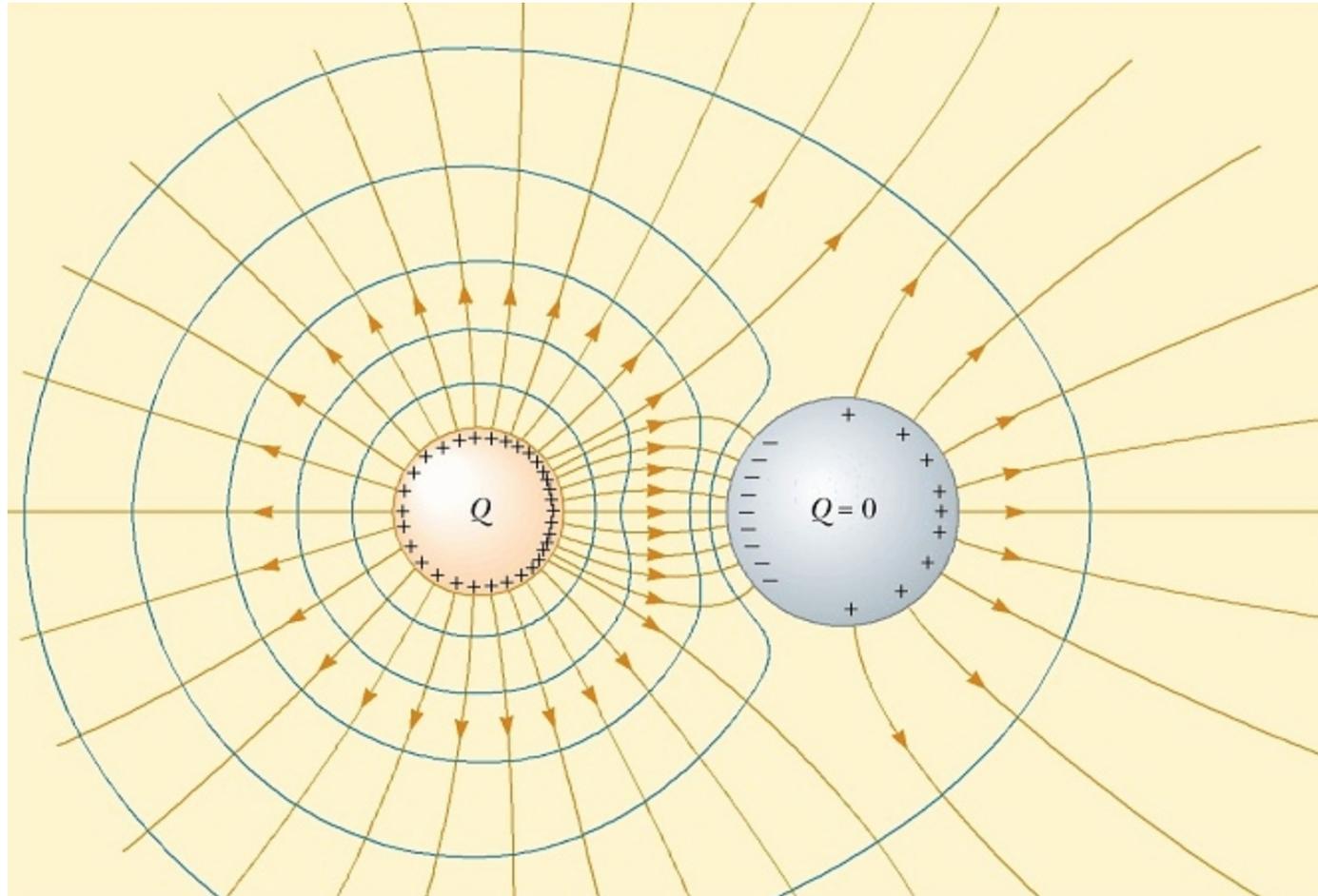
→ $Q_{int} = 0$ → **Charges nulles à l'intérieur !!**

→ **charges en surface**

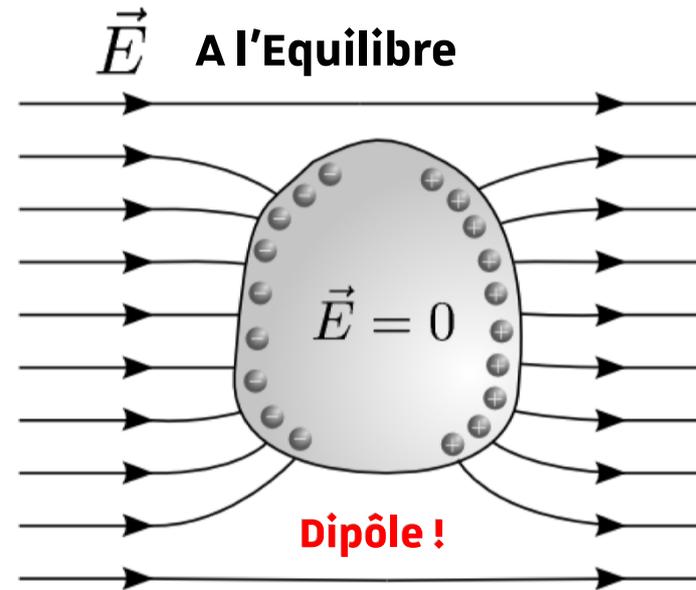
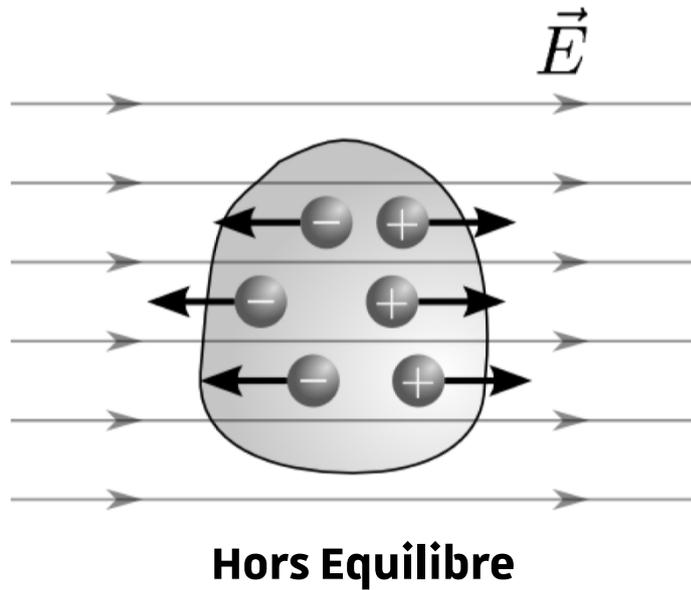
Surface = équipotentielle

→ lignes de champ orthogonales

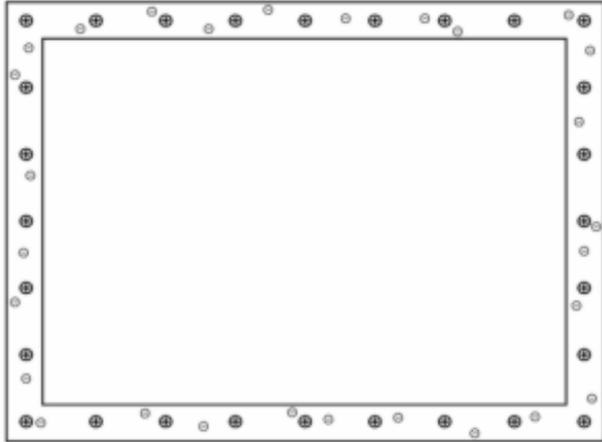
Electroscope – Flux du champ E & Théorème de Gauss



Electroscope – Théorème de Gauss & Cage de Faraday



Electroscope – Théorème de Gauss & Cage de Faraday



Animation montrant le fonctionnement d'une cage de Faraday (boîte). Lorsqu'un champ électrique externe (flèches) est appliqué, les électrons (petites boules) dans le métal se déplacent vers le côté gauche de la cage, lui donnant une charge négative, tandis que la charge déséquilibrée restante des noyaux donne au côté droit une charge positive. Ces charges induites créent un champ électrique opposé qui annule le champ électrique externe dans tout le boîtier.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Faraday_cage.gif

Electroscope – Théorème de Gauss & Cage de Faraday



- Portable dans plastique + papier alu
- Portable + micro-ondes → fréquences
 - Maille petite pour f grande

← ici chapeau pour isoler les cheveux !



Electroscope – Théorème de Gauss & Cage de Faraday

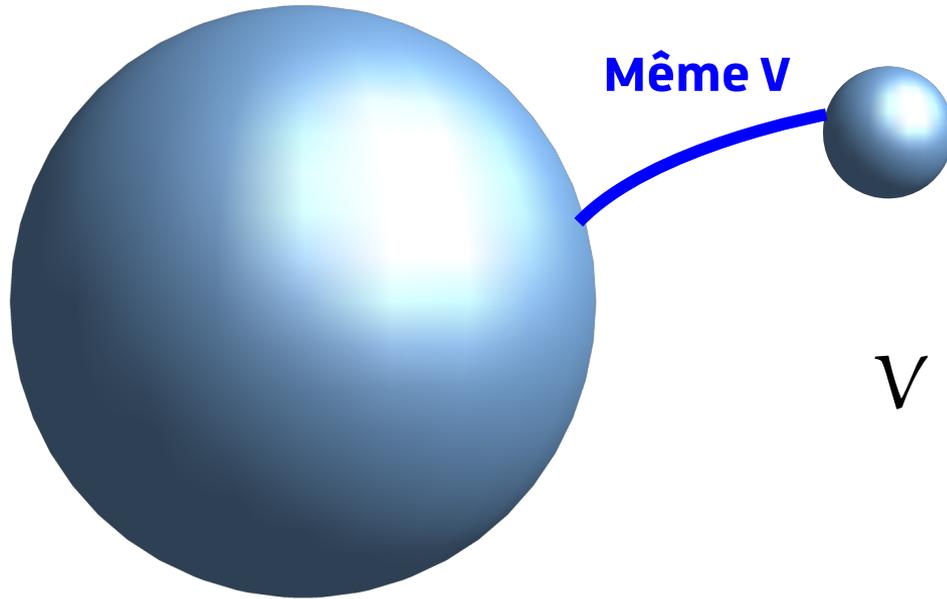


Le métal entourant l'électroscope constitue ce que l'on appelle un écran électrostatique, ou Cage de Faraday. Les charges extérieures sont sans action sur l'électroscope. Les charges restent sur la surface métallique extérieure. Plus exactement, le charge électrique externe provoque le mouvement de charges électriques dans le conducteur métallique qui va induire un champ électrique qui va compenser le champ externe : il va compenser (en partie ou totalement) le champ électrique externe.

→ **Film Cage de Faraday :**

<http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/electrofaraday.mp4>

Electroscope – Pouvoir des pointes



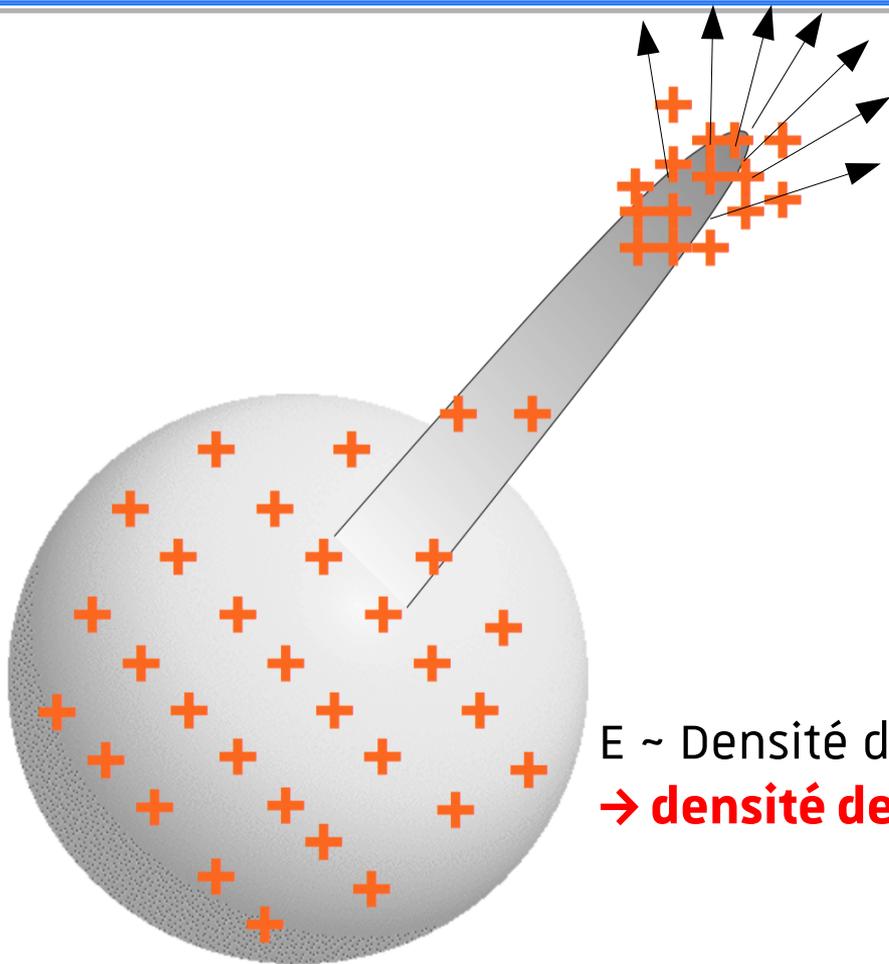
$$\Delta V \sim - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$
$$E \sim - \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

$$V \sim E \times R \Rightarrow \frac{E_{\text{petit}}}{E_{\text{grand}}} = \frac{R_{\text{grand}}}{R_{\text{petit}}}$$

$E \sim$ Densité de Charges x Surface

→ densité de charges + grande pour petit rayon de courbure !

Electroscope – Pouvoir des pointes



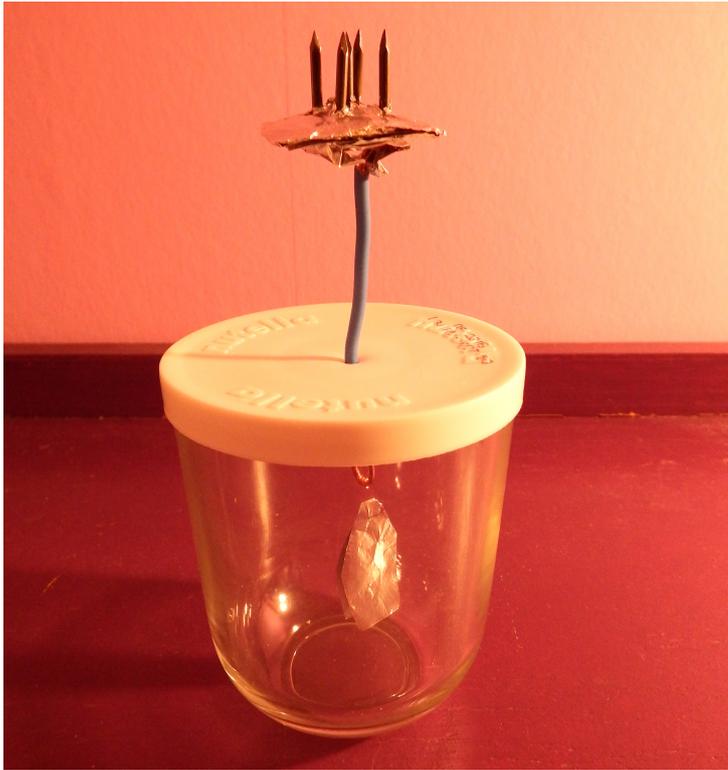
$$\Delta V \sim - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$
$$E \sim - \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

$$V \sim E \times R \Rightarrow \frac{E_{\text{petit}}}{E_{\text{grand}}} = \frac{R_{\text{grand}}}{R_{\text{petit}}}$$

$E \sim$ Densité de Charges \times Surface

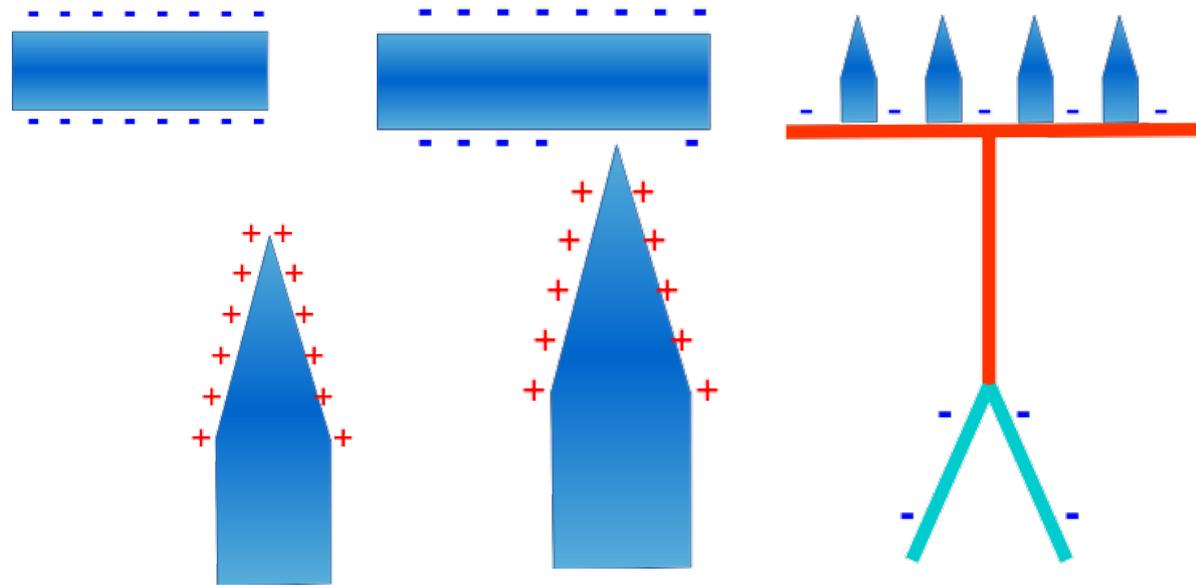
\rightarrow densité de charges + grande pour petit rayon de courbure !

Electroscope – Pouvoir des pointes – charge sans contact



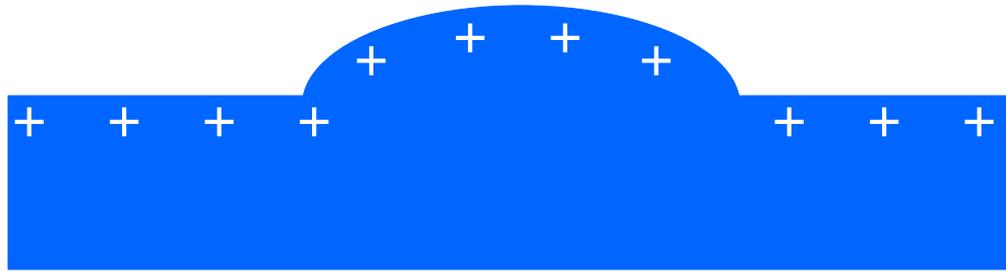
→ **Film Charge par les pointes :**

http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/chargeparpointe_cut.mp4



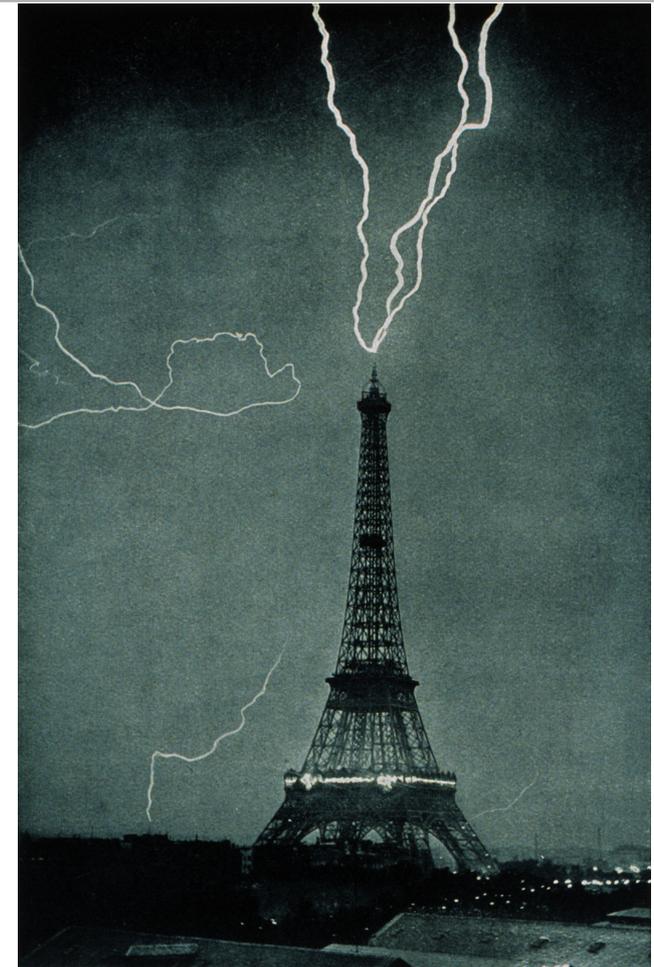
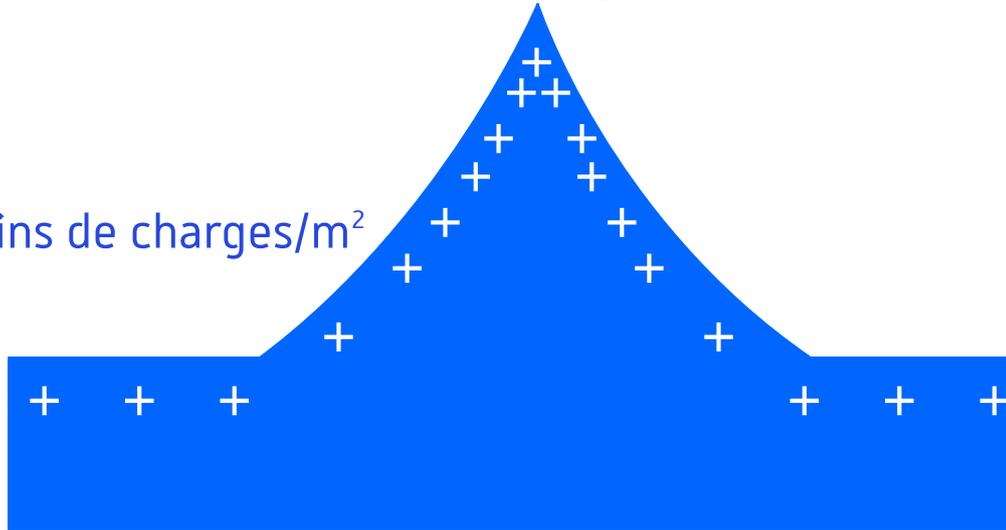
Plus le rayon de courbure est faible, plus il y a concentration de charges. Lorsque la règle (-) s'approche, l'accumulation des charges (+) apparues par influence à l'extrémité de la pointe est si grande qu'elles vont être expulsées et neutraliser localement les charges (-) de la règle. La pointe a perdue autant de charges (+) que la règle de charges (-) : **l'électroscope est chargé (-)**

Electroscope – Pouvoir des pointes & foudre

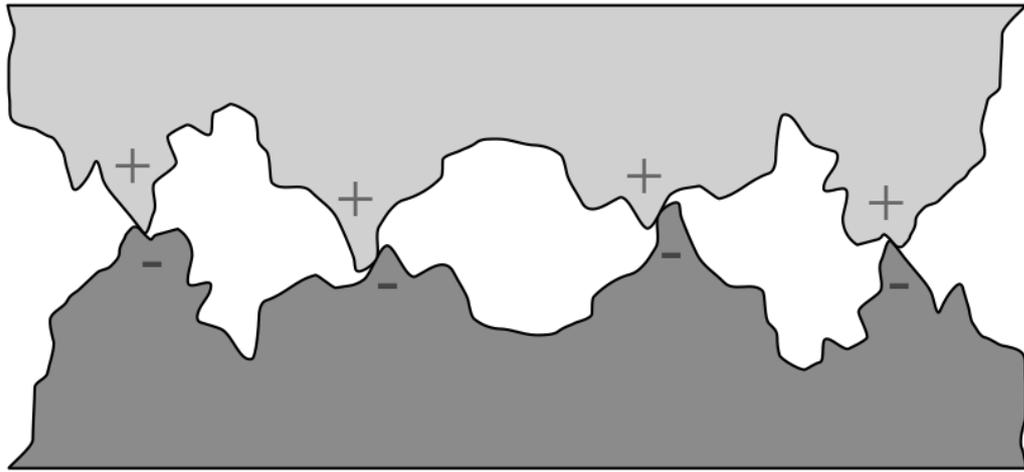


Plus de charges/m²

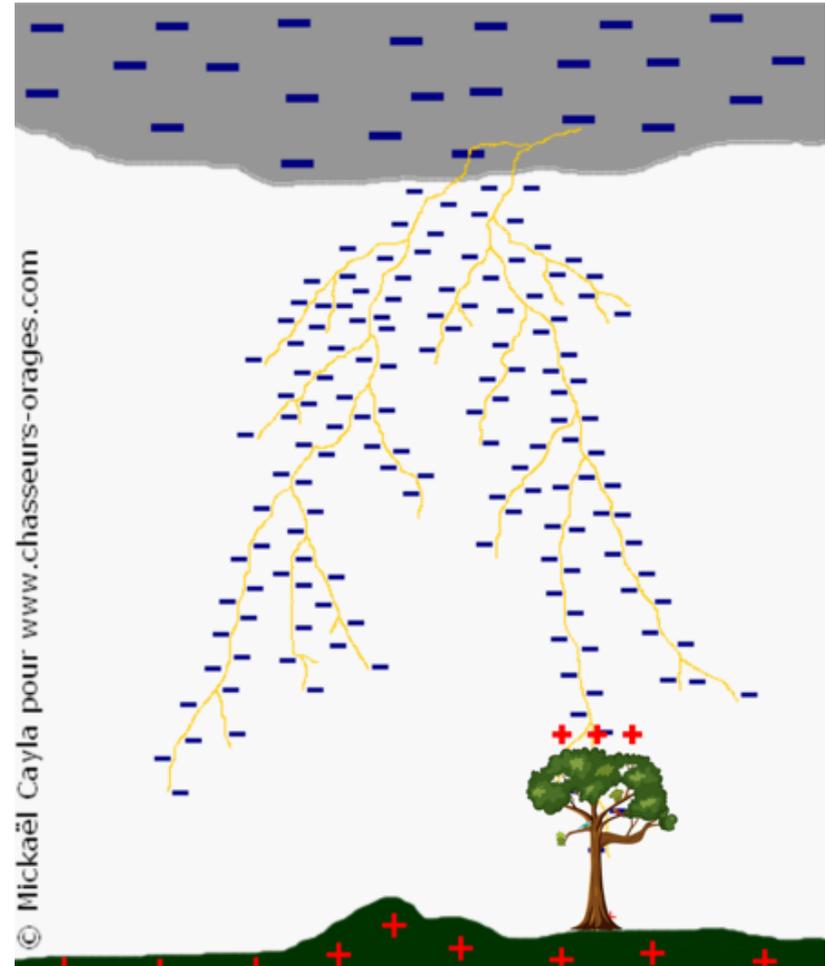
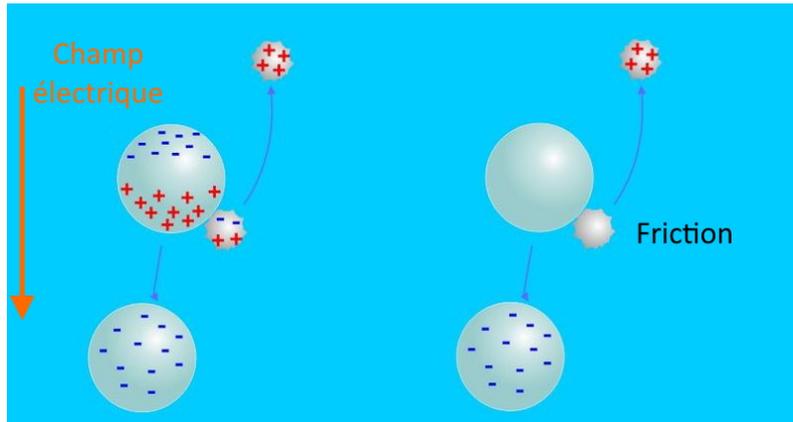
Moins de charges/m²



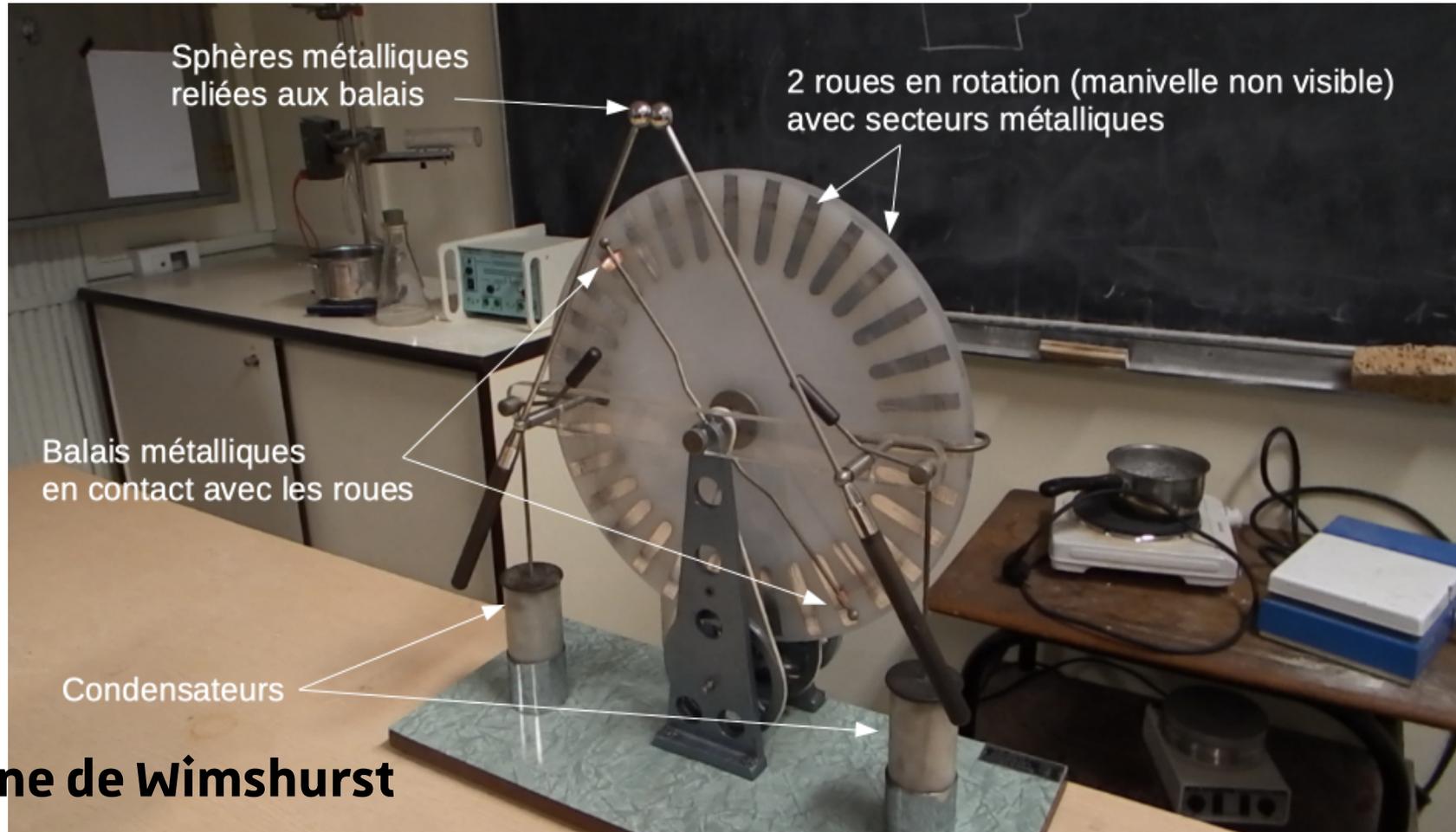
Electroscope – Pouvoir des pointes & foudre



Une des explications de la « Triboélectricité »

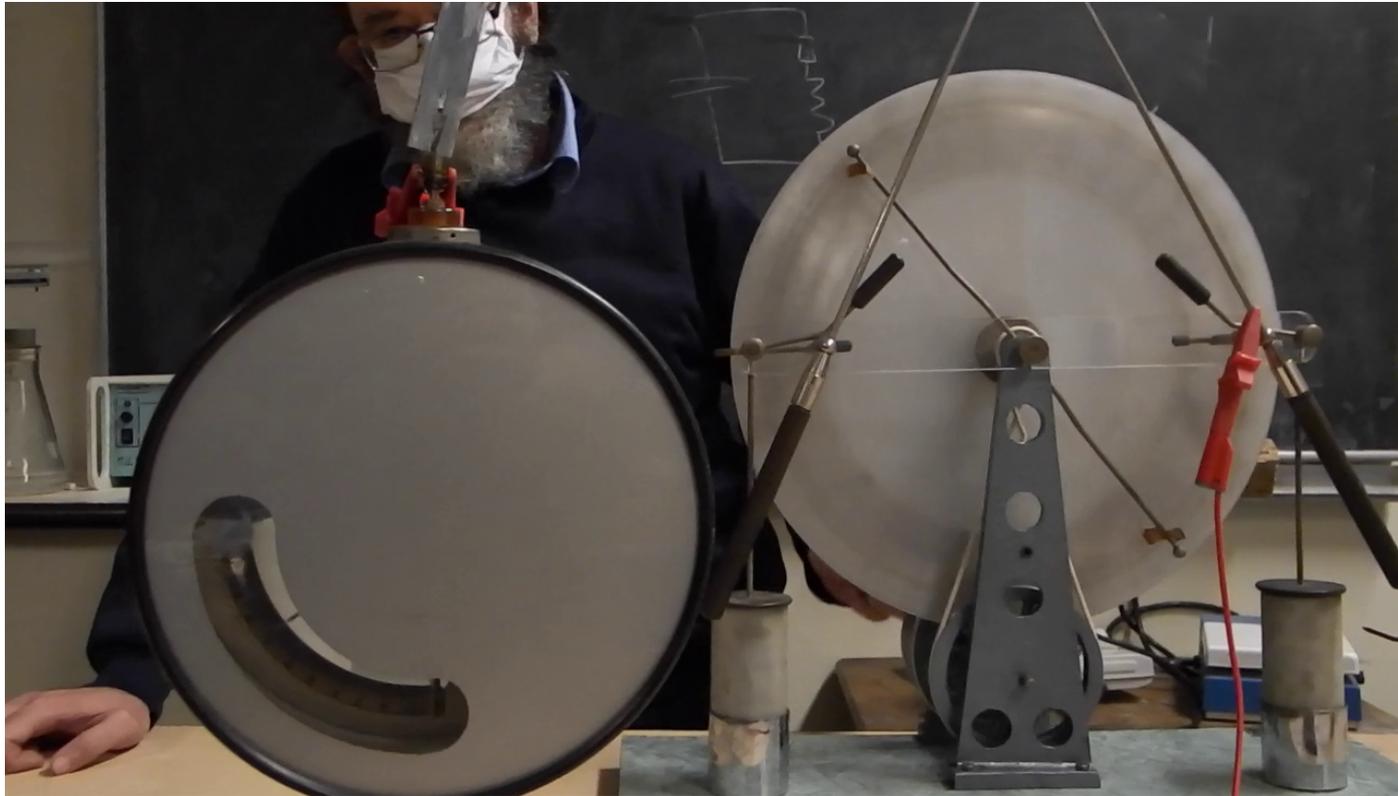


Electroscope – Pouvoir des pointes & vent électrostatique



Machine de Wimshurst

Electroscope – Pouvoir des pointes & vent électrostatique



→ **Film Electroscope relié à la Machine de Wimshurst :**

http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/machine_et_electroscope.mp4

Electroscope – Pouvoir des pointes & vent électrostatique



→ **Film Vent Electrostatique :**

<http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/bougie8.mp4>

Electroscope – Pouvoir des pointes & vent électrostatique

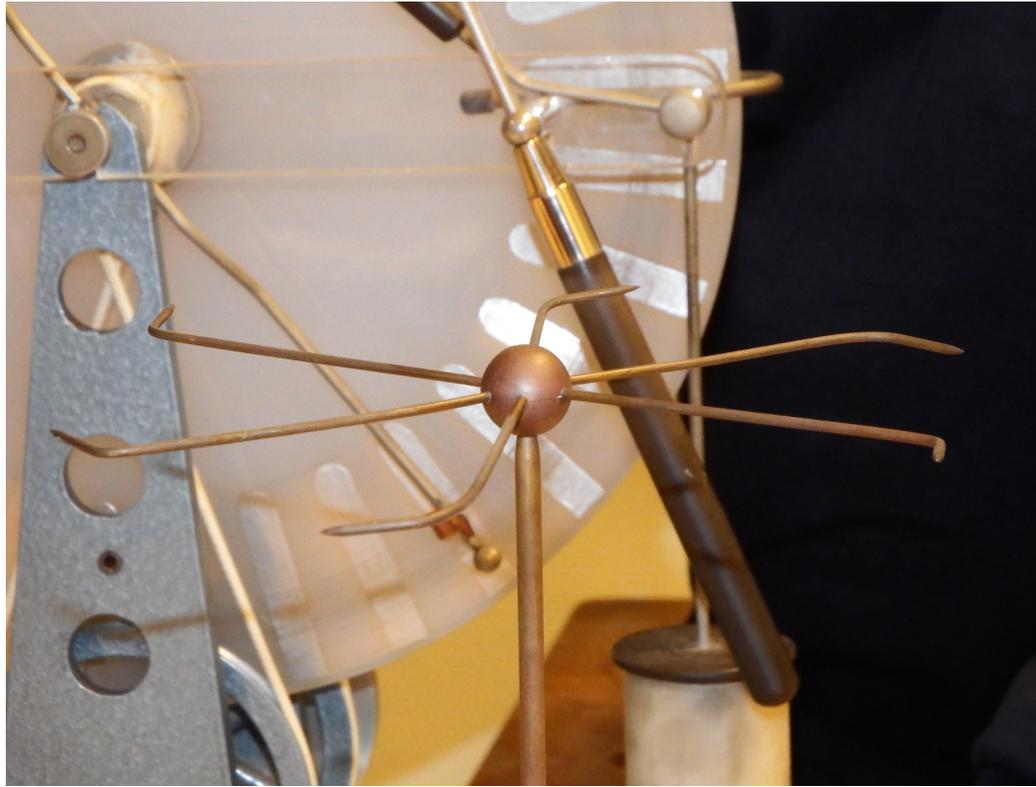


En reliant la machine à une pointe métallique, on peut utiliser le pouvoir des pointes : la densité de charges dépend du rayon de courbure - une pointe possède donc en surface beaucoup de charges qu'une surface plane (c'est pour cela qu'il vaut mieux se mettre à plat ventre dans un champ lors d'un orage, pour éviter la foudre, plutôt que de rester debout !). La densité de charges est telle que le champ électrique engendré peut ioniser l'air environnant, et repousser les charges électriques de même signe que la charge de la pointe. Il se crée un vent électrostatique, qui est assez puissant pour souffler sur la bougie pour finalement même arriver à l'éteindre !

→ **Film Bougie éteinte par le vent électrostatique :**

<http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/bougiesoufflee.mp4>

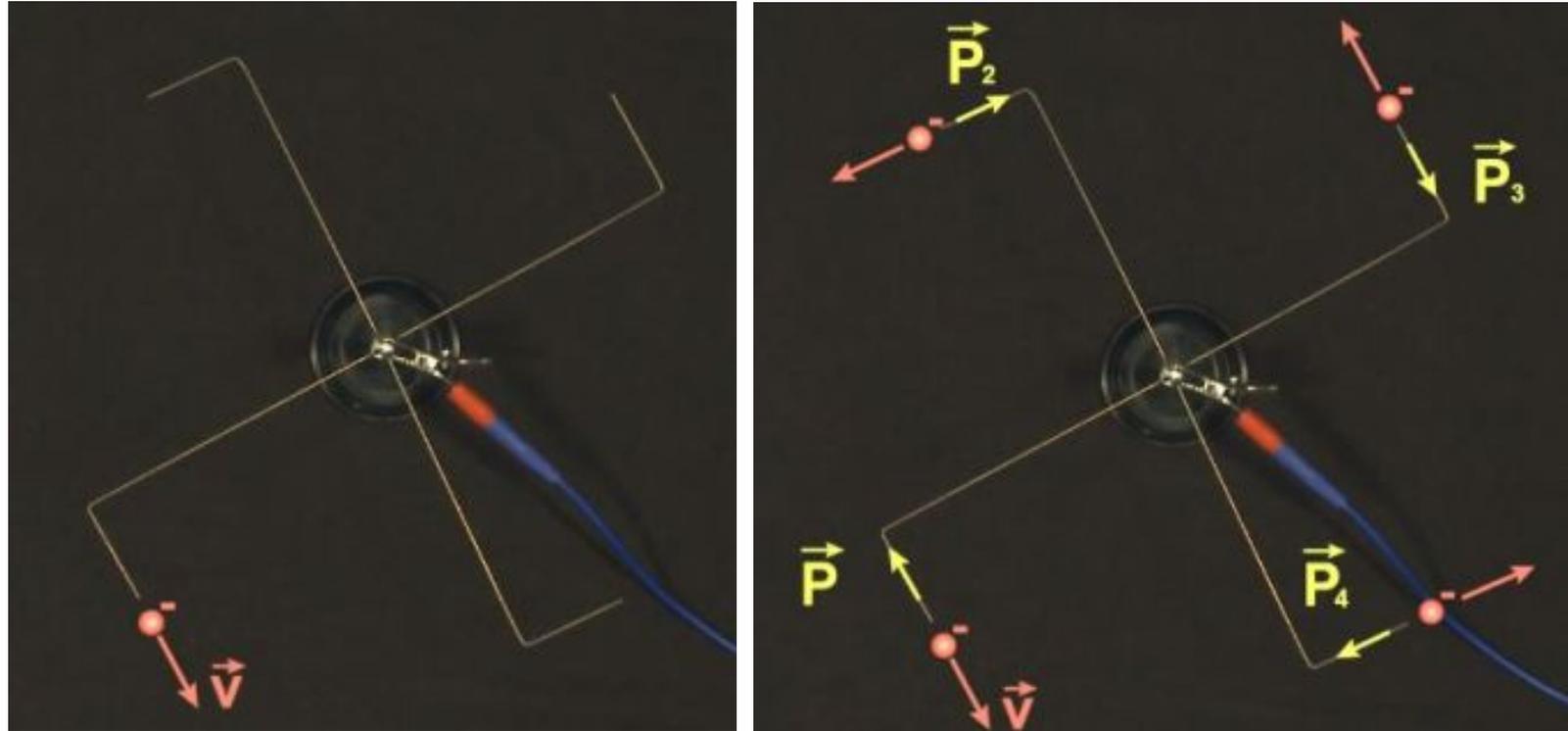
Electroscope – Pouvoir des pointes & tourniquet



→ **Film Tourniquet** : <http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/tourniquet1.mp4>

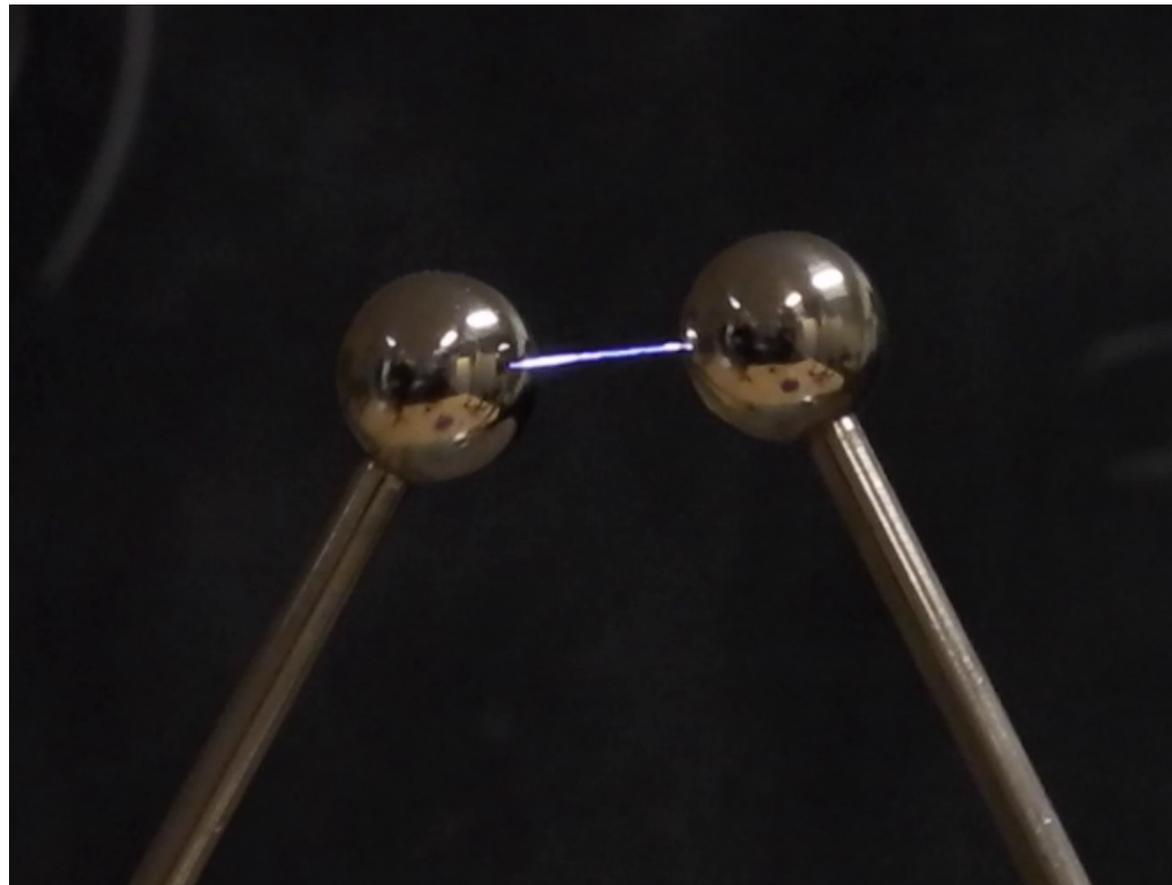


Electroscope – Pouvoir des pointes & tourniquet



<https://phymain.unisciel.fr/un-moulinet-electrostatique/index.html>

Electroscope – Pouvoir des pointes & claquage



Lorsque les charges accumulées créent un champ électrique suffisant, l'air ambiant est ionisé, et il apparaît un arc électrique entre les 2 sphères. Ce champ électrique est appelé **tension de claquage (3600kV/m dans l'air)**. Pour des sphères séparées de 1cm, on atteint donc une différence de potentiel de 36kV !

Cet arc électrique émet un rayonnement de couleur caractéristique du milieu en question. Cette décharge s'accompagne d'un bruit de claquage, dû à la brusque expansion du gaz suite à son échauffement brutal. La vidéo montre aussi que la fréquence des arcs dépend de la distance entre les sphères : plus elles sont proches, plus il est facile de créer un arc électrique

→ **Film Claquage** : http://physiquepourtous.unistra.fr/wp-content/uploads/2024/06/claquage_variationdistance.mp4

De l'Electroscope à Star Wars



Des éclairs au bout des doigts de l'Empereur ?



De l'Electroscope à Star Wars



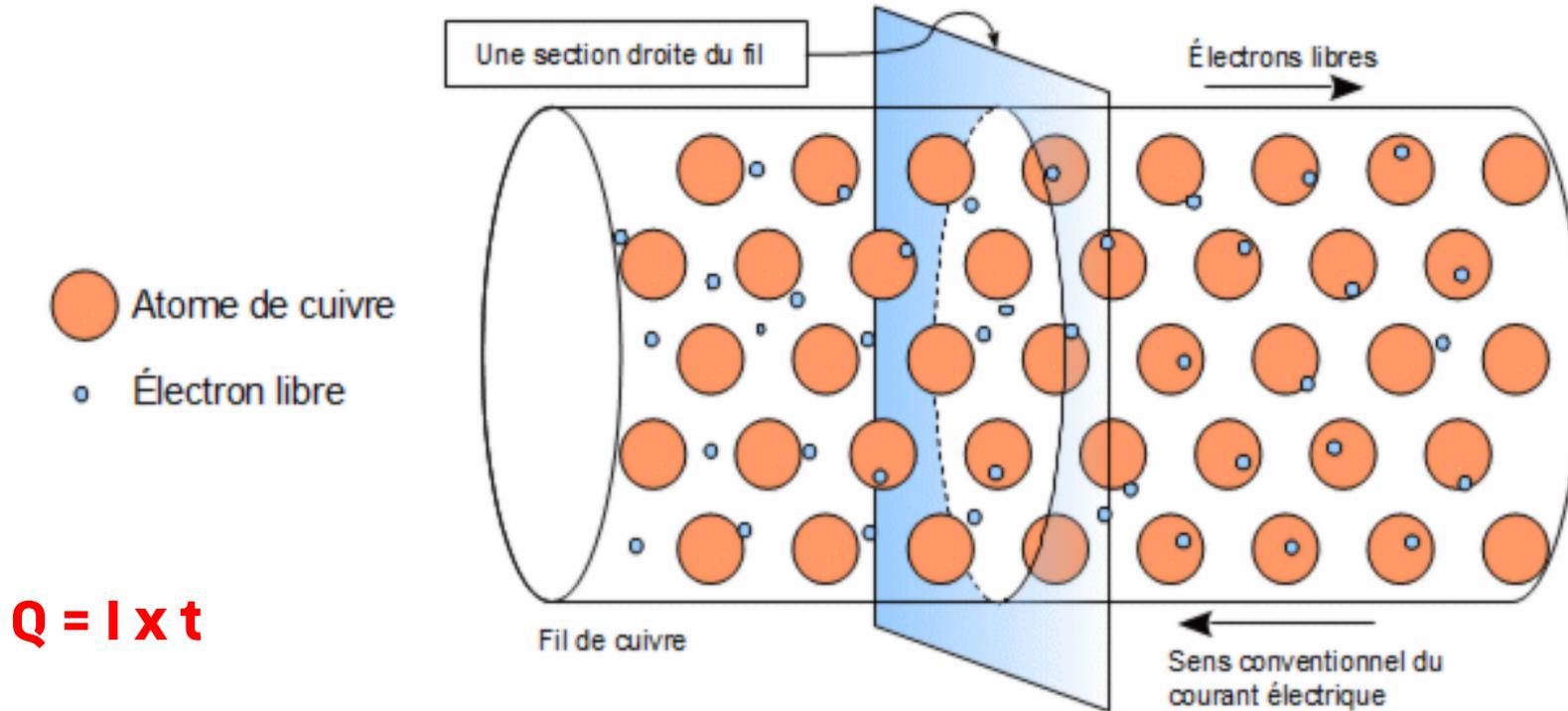
Il faut ~ **36 000 V/cm** dans l'air – Champ électrique de « claquage »
→ Ici ~3m, soit $36\,000 \times 300 = \mathbf{10 \times 10^6 \text{ V}}$ au bout des doigts de l'Empereur...

De l'Electroscope à Star Wars



Champ électrique E en \mathbf{V}/m , charge électrique Q subit une force $F = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E} = M \cdot a = M \times (L/T)/T$
 $\rightarrow M \cdot L \cdot T^{-2} = [\mathbf{I} \times \mathbf{T}] \cdot \mathbf{U} \cdot L^{-1} = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \times (T/L) \rightarrow \text{Puissance} = \text{Energie/Temps} = F \times L/T = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \times (T/L) \times (L/T)$
 \rightarrow **Puissance Electrique = $\mathbf{U} \times \mathbf{I}$**

Intensité d'un courant électrique



De l'Electroscope à Star Wars



Champ électrique E en \mathbf{V}/m , charge électrique Q subit une force $F = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E} = M \cdot a = M \times (L/T)/T$
 $\rightarrow M \cdot L \cdot T^{-2} = [\mathbf{I} \times \mathbf{T}] \cdot \mathbf{U} \cdot L^{-1} = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \times (T/L) \rightarrow \text{Puissance} = \text{Energie/Temps} = F \times L/T = \mathbf{U} \times \mathbf{I} \times (T/L) \times (L/T)$
 \rightarrow **Puissance Electrique = $\mathbf{U} \times \mathbf{I}$**

De l'Electroscope à Star Wars



Quelle Puissance ?

→ un courant de 1A va déjà bien picoter... **Foudre : 1kA – 100 kA !**

→ Puissance électrique = **Tension x Courant > 10 000 000 x 1 = 10x10⁶W = 10 MW → 10 GW**

De l'Electroscope à Star Wars



10MW = 20 000 cyclistes de très bon niveau

De l'Electroscope à Star Wars



10MW = 1 TGV

De l'Electroscope à Star Wars



Fessenheim ~ 1,8 GW

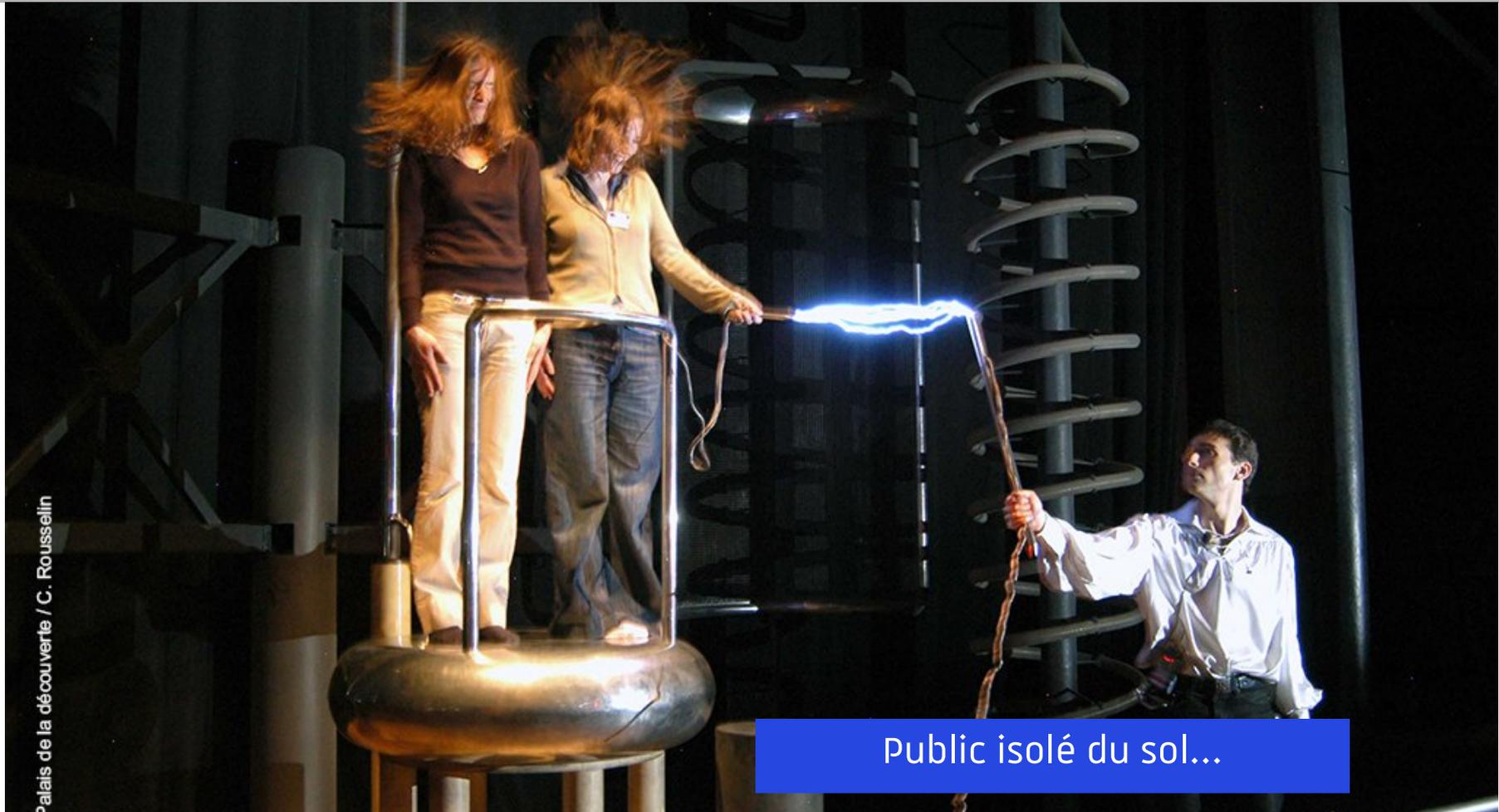


De l'Electroscope à Star Wars

2.21
GIGOWATTS !!!



De l'Electroscope à Star Wars



Palais de la découverte / C. Rousselin

Public isolé du sol...



De l'Electroscope à Star Wars



En quoi sont ses chaussures ?

→ « Claquage » du Caoutchouc : champ électrique $\sim 500\,000\text{ V/cm}$

→ **Il faut des talons de plus de 20cm pour supporter 10 000 000 V!**

De l'Electroscope à Star Wars

Pourquoi l'Empereur porte une
longue robe...



De l'Electroscope à Star Wars

Pourquoi l'Empereur porte une longue robe...

...pour cacher ses bottes plateforme !!

