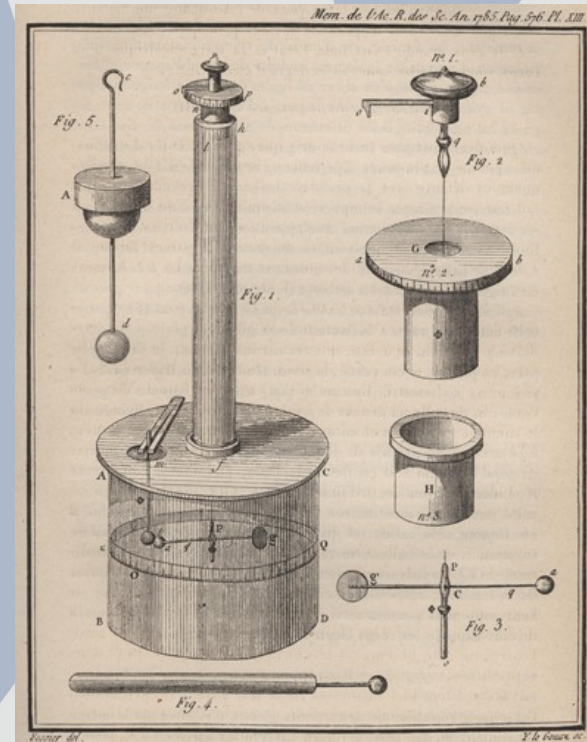


Electromagnétisme

Chapitre 1 – Force entre deux charges



Inscription sur Teams

- Consignes pour s'inscrire : [Teams - Création compte étudiants](#)

Code de l'équipe Teams : **op2updm**

- Documents : [lien vers le canal "Général" du cours](#)
- Chaînes *YouTube* de [vidéo d'illustration](#)

- Chapitre 1 - Force entre deux charges
- Chapitre 2 - Champ électrostatique
- Chapitre 3 - Théorème de superposition et symétries
- Chapitre 4 - Théorème de Gauss
- Chapitre 5 - Potentiel électrostatique
- Chapitre 6 - Conducteurs en équilibre électrostatique

Plan (variations possibles)

1.1 Force entre deux charges

1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

1.1.2 Notion de charge

1.1.3 Invariance de la charge

1.1.4 Expériences de Coulomb

1.1.5 Loi de Coulomb

1.2 Champ électrique



1.2.1 Unités rationalisées

1.2.2 Lignes de champ

1.2.3 Champ électrostatique d'une distribution continue de charges

1.3 Théorème de superposition et symétries

1.3.1 Invariances d'une distribution

1.3.2 Direction de E en un point d'un plan de symétrie ou d'antisymétrie d'une distribution

1.3.3 Exemples

Plan (variations possibles)

1.4 Théorème de Gauss

1.4.1 Flux du champ d'une charge à travers une surface

1.4.2 Théorème de Gauss

1.4.3 Exemples

1.5 Potentiel électrostatique V ($U = V_2 - V_1$ tension)

1.5.1 Énergie potentielle électrique

1.5.2 Circulation du champ électrique

1.5.3 Potentiel électrique - Exemples d'une ou plusieurs charges

1.5.4 Potentiel électrique d'une distribution continue de charges

1.5.5 Détermination de E à partir de V

1.6 Conducteurs en équilibre électrostatique

1.6.1 Champ d'un conducteur en équilibre

1.6.2 Propriétés générales des conducteurs en équilibre

1.6.3 Équilibre d'un système de deux conducteurs

1.6.4 Équilibre des conducteurs

1.6.5 Applications

Modalités d'évaluation

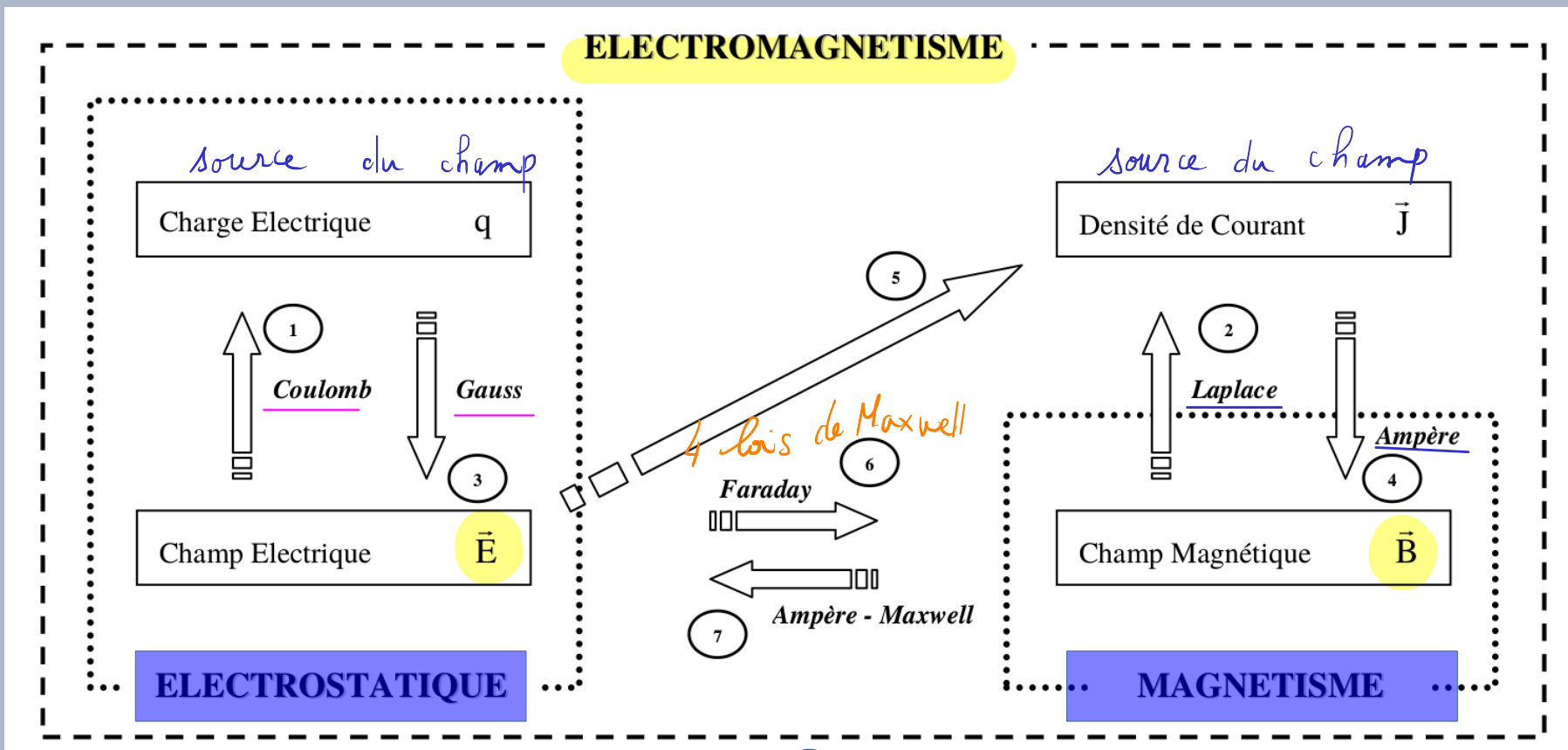
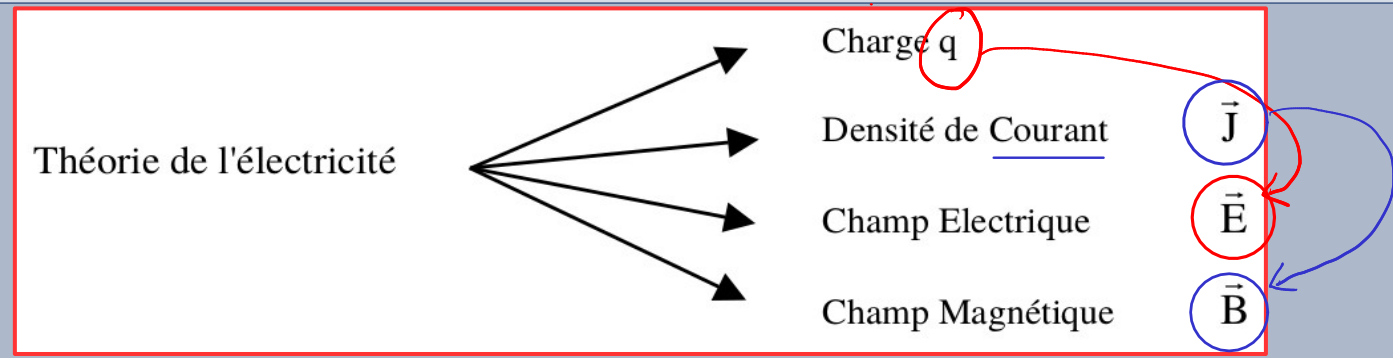
- 3 CC toutes les 3 à 4 semaines : QCM avec ou sans questions ouvertes
- Coefficients proportionnels à la durée du CC soit *(à voir)*

CC1 : 1h (27/10/21) CC2 : 1h30 (01/12/21) CC3 : 2h (26/01/22)

- **Chapitre 1 - Force entre deux charges**
- Chapitre 2 - Champ électrostatique
- Chapitre 3 - Théorème de superposition et symétries
- Chapitre 4 - Théorème de Gauss
- Chapitre 5 - Potentiel électrostatique
- Chapitre 6 - Conducteurs en équilibre électrostatique

1.1 Force entre deux charges

1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme



①, ② ... ⑦ : lois ou théorèmes.

1.1 Force entre deux charges

1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

Théorème de Noether exprime l'équivalence qui existe entre les lois de conservation et l'invariance des lois physiques en ce qui concerne certaines transformations (typiquement appelées symétries).

Dans une lettre adressée au New York Times, Einstein écrit, le 1er mai 1935 :

*«Selon le jugement de la plupart des mathématiciens compétents en vie, Fräulein Noether était le **génie mathématique** créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures jusqu'à aujourd'hui. Dans le domaine de l'**algèbre**, qui a occupé les mathématiciens les plus doués depuis des siècles, elle a découvert des méthodes qui se sont avérées d'une importance énorme pour les recherches de l'actuelle nouvelle génération de mathématiciens.»*

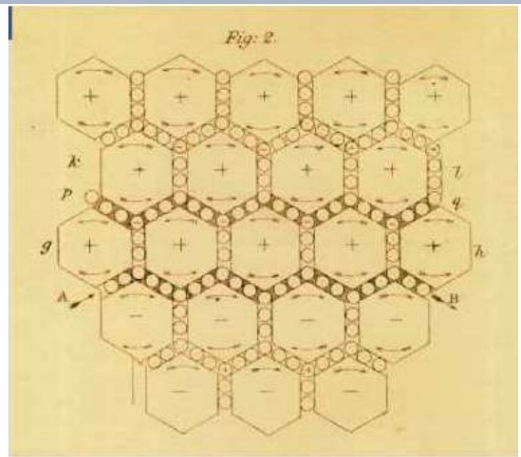


Amalie Emmy Noether
(23/03/1882 - 14/04/1935)

1.1 Force entre deux charges

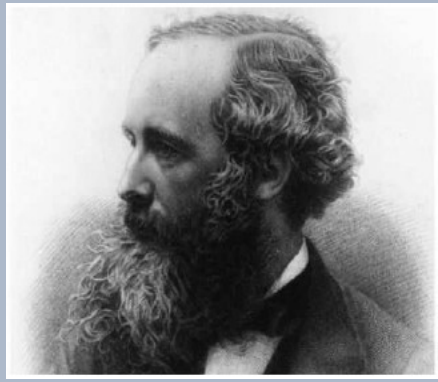
1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

ÉLECTRICITÉ - Électromagnétisme



Les tourbillons de Maxwell

1861, 1^{ère} photo couleur



Maxwell

1.1 Force entre deux charges

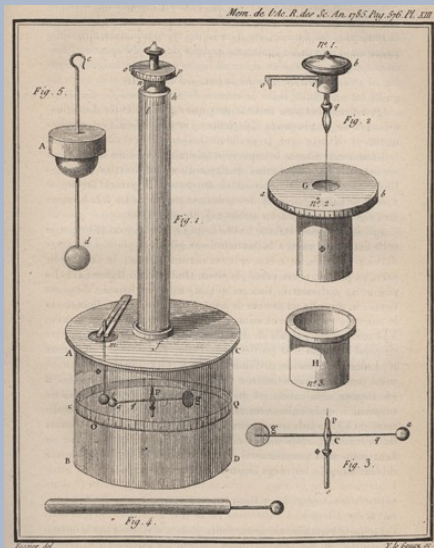
1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

600 : **Thalès de Milet** (625-547), célèbre mathématicien, découvre l'électrisation en frottant un morceau d'ambre jaune avec une peau de chat. Il attribut à ces objets une « âme et un souffle pour expliquer ces phénomènes.

1785 : **Charles Augustin de Coulomb**, physicien français, (1736-1806), établit les lois fondamentales de l'électrostatique : «les forces électriques entre deux particules chargées sont proportionnelles à leurs charges et inversement proportionnelles au carré de leurs distances.»

Balance électrique de Coulomb (1785)

<http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/coulomb/fortification/index.php>



1.1 Force entre deux charges

1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

En 1800, la découverte de la pile de Volta permet d'obtenir des courants électriques. Alors, ce fait la jonction de deux catégories : électricité et magnétisme et l'on découvre les courants d'inductivité (Foucault vers 1850).

1920 : **Ernest Rutherford**, physicien anglais, (1871-1937), prouve que les atomes sont constitués de protons et d'électrons.

Histoire de l'électricité : des pierres précieuses aux supraconducteurs

Espace des sciences.

1.1 Force entre deux charges

1.1.1 Développement historique de l'électromagnétisme

- Propriétés des *aimants à -195°C* :

www.youtube.com/watch?v=blLTiCvrLco

- Le train à lévitation magnétique :

<http://www.tp.physique.usherbrooke.ca/index.php/trains-a-levitation-magnetique>

Le train est propulsé par un moteur magnétique linéaire similaire à celui d'un vrai *Maglev* !

1.1 Force entre deux charges

1.1.2 Notion de charge

a) Charges positives et charges négatives

La charge électrique peut exister sous deux formes, l'une qualifiée de positive et l'autre de négative. Le choix d'affecter une charge (électrique) négative pour l'électron est purement conventionnel.

b) Extensivité de la charge

La charge électrique d'un système est une grandeur extensive : elle peut se mettre sous la forme d'une somme algébrique des charges qui la constituent (rejoint le principe de superposition).

c) Quantification de la charge

De nombreuses expériences montrent que la charge électrique d'un système ne peut varier que par de multiples entiers d'une charge élémentaire de valeur e :

$$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$Q = Z \cdot e \text{ avec } Z \text{ un entier}$$

Electron

$$q = - e$$

$$m_e = 0,91091 \cdot 10^{-30} \text{ Kg}$$

Proton

$$q = + e$$

$$m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

1.1 Force entre deux charges

1.1.3 Invariance de la charge

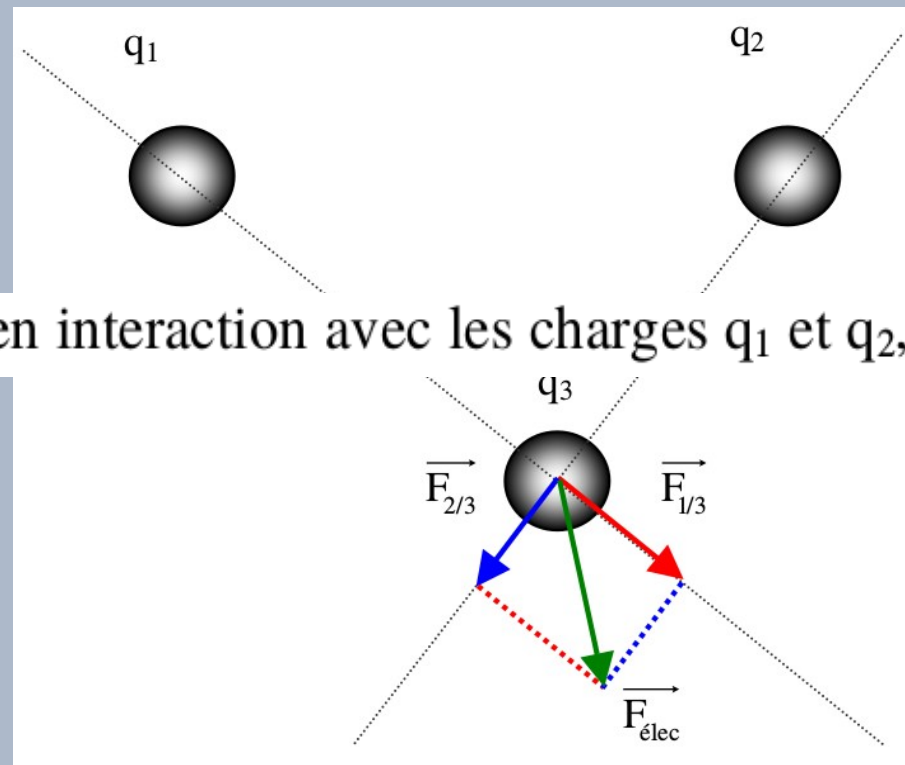
d) Conservation de la charge électrique

Considérons un **système fermé** (c'est à dire qu'il n'échange pas de matière avec l'extérieur). La charge électrique d'un système fermé se conserve, c'est à dire qu'elle reste constante et indépendante (invariante) du référentiel dans lequel on étudie le système.

e) Principe de superposition

force totale subie par une charge q_3 en interaction avec les charges q_1 et q_2 ,

$$\vec{F}_{\text{élec}} = \vec{F}_{1/3} + \vec{F}_{2/3} \text{ en } q_3$$

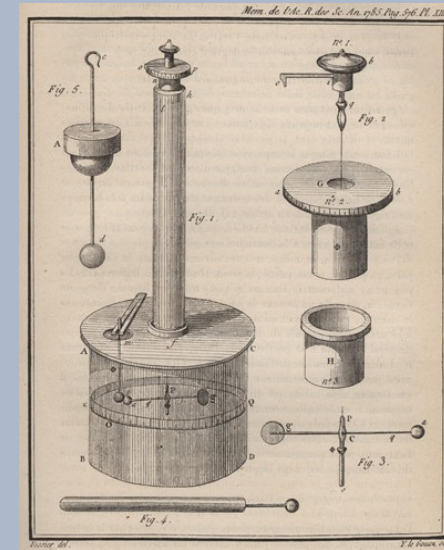


1.1 Force entre deux charges

1.1.4 Expérience de Coulomb

Balance électrique de Coulomb (1785)

<http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/coulomb/fortification/index.php>



1.1 Force entre deux charges

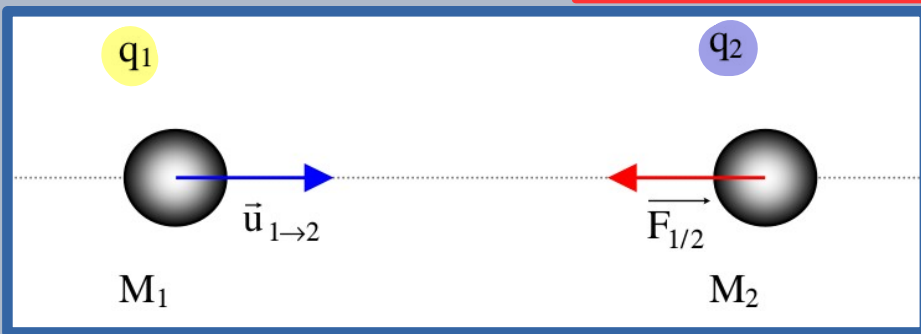
1.1.5 Loi de Coulomb

a) Énoncé de la loi de Coulomb :

Énoncé : Soient la charge q_1 , placée au point M_1 , et la charge q_2 , placée au point M_2 .

La force $\vec{F}_{1/2}$ exercée par la charge ponctuelle q_1 sur la charge ponctuelle q_2 a pour expression :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \vec{F}_{1/2} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$



- $\vec{F}_{1/2}$ force en Newton (N) de q_1 sur q_2
- q_1, q_2 charges ponctuelles en Coulomb (C)
- r_{12} ($= M_1 M_2$) distance en Mètre (m) entre q_1 et q_2
- $\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ vecteur unitaire sans dimension dirigé de M_1 vers M_2

avec $r_{12} = \| \overrightarrow{M_1 M_2} \|$ et $\vec{u}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{\| \overrightarrow{M_1 M_2} \|}$

La constante **k** dépend du milieu. [SI] : $[Kg.m^3.s^{-4}.A^{-2}]$

Dans le vide elle vaut : $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9$ [SI] avec ϵ_0 , permittivité absolue du vide.

$$\vec{F}_{2/1} = k \frac{q_2 q_1}{r_{21}^2} \vec{u}_{2 \rightarrow 1} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{2 \rightarrow 1} = -k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{1/2}$$

1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

Deux charges q_1 et q_2 de même signe se repoussent.

$$q_1 q_2 > 0$$

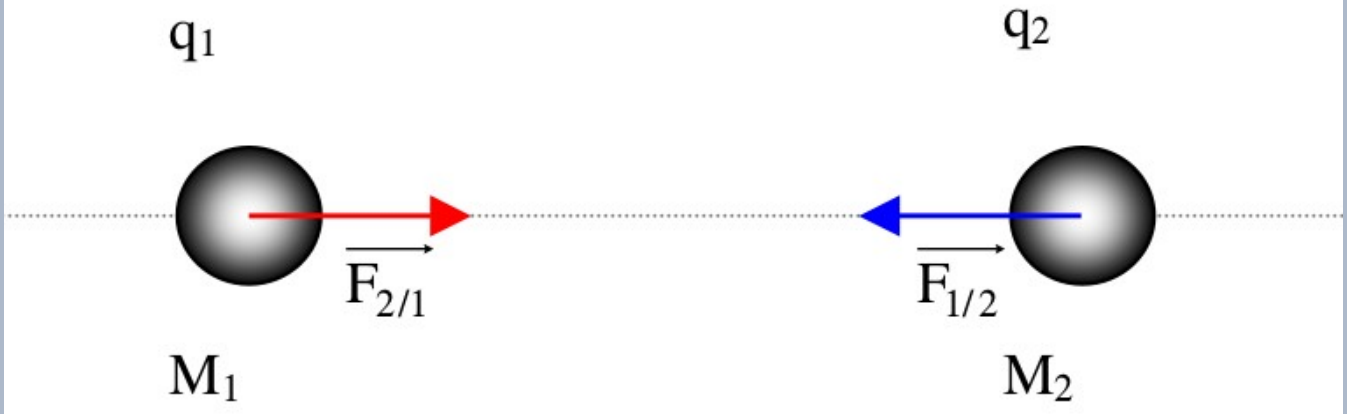
$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

> 0



Deux charges q_1 et q_2 de signes opposés s'attirent.

$$q_1 q_2 < 0$$



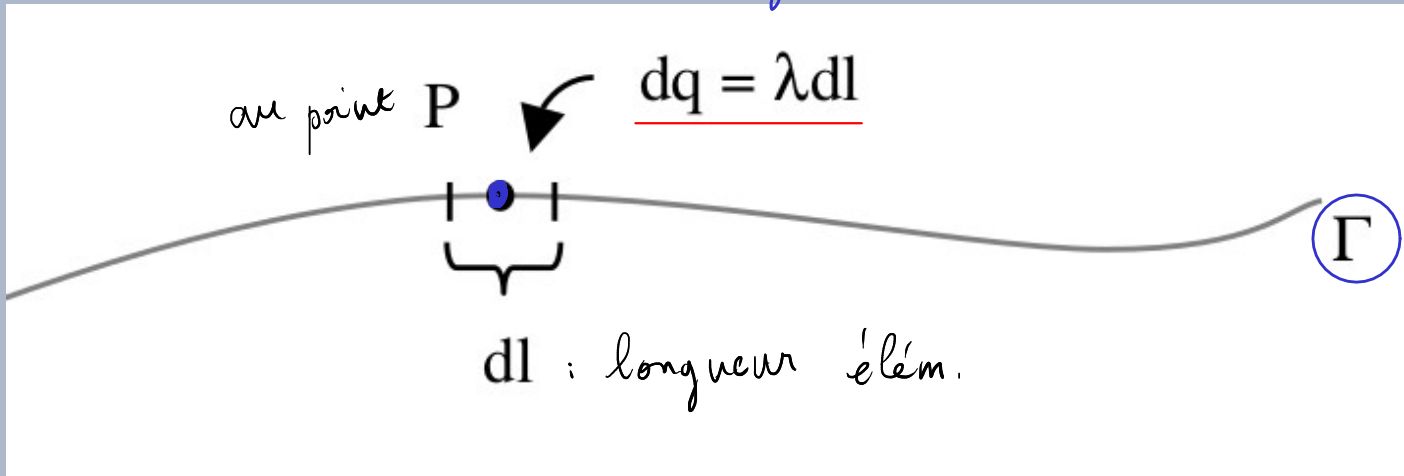
1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

b) Charge totale d'une distribution : ponctuelle, linéique, surfacique ou volumique
 => notion de densité de charge

Distribution linéique de charges (1D)

Soit une ligne Γ et sa distribution linéique de charges de densité λ (C.m⁻¹)



découpage élémentaire

$$\lambda = \frac{dq}{dl}$$

↙ C
↘ m

La charge totale Q de la distribution de charges le long de la ligne Γ vaut :

Somme continue

$$Q = \int_{\Gamma} dq = \int_{\Gamma} \lambda dl$$

1.1 Force entre deux charges

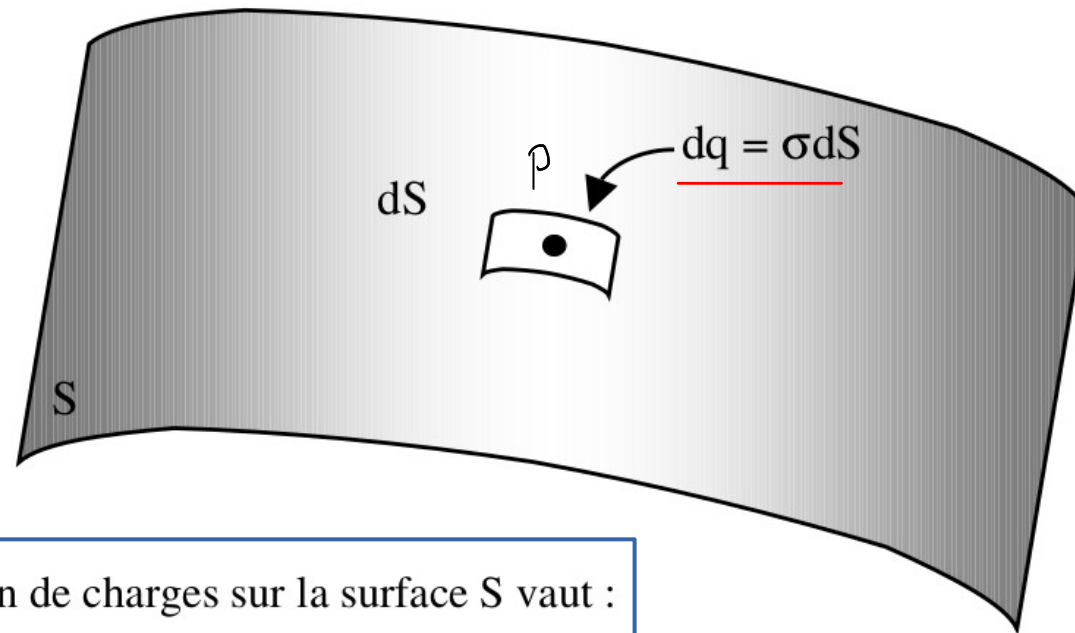
1.1.5 Loi de Coulomb

Distribution surfacique de charges (2D)

Soit une surface S et sa distribution surfacique de charges de densité σ (C.m^{-2})

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

$$dq = \sigma dS$$



La charge totale Q de la distribution de charges sur la surface S vaut :

$$Q = \iint_S dq = \iint_S \sigma dS$$

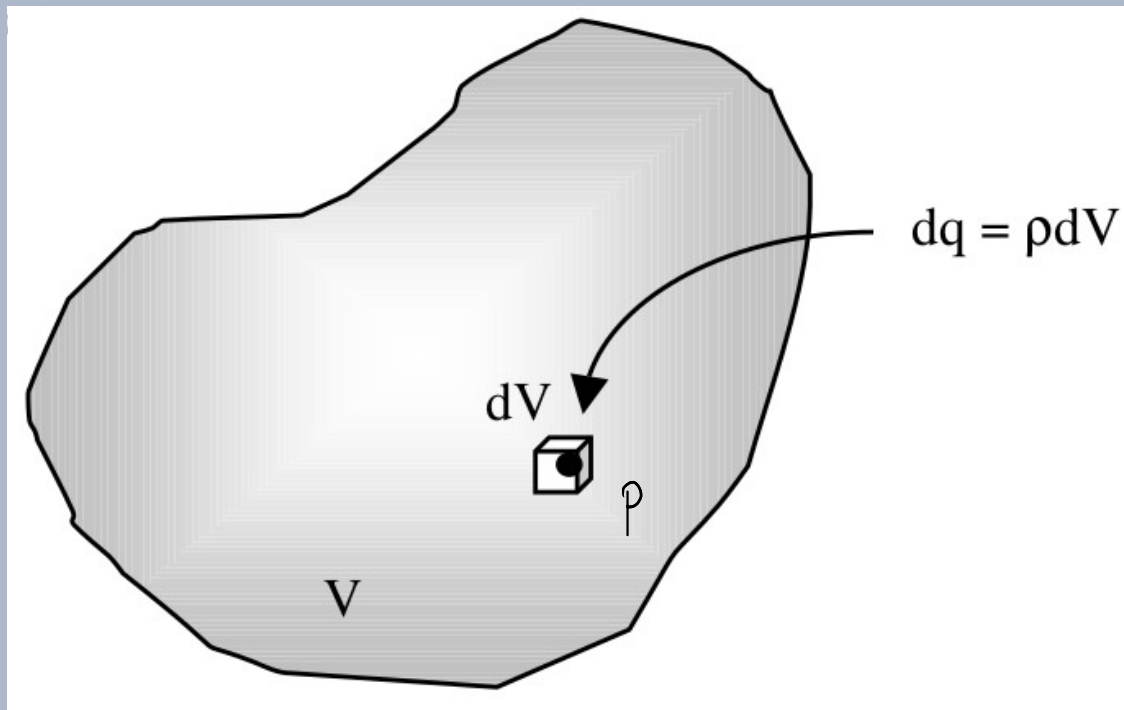
1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

Distribution volumique de charges

Soit un volume V et sa distribution volumique de charges de densité ρ

(C.m^{-3})



$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

La charge totale Q de la distribution de charges sur le volume total V vaut :

$$Q = \iiint_V dq = \iiint_V \rho dV$$

1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

Cas particuliers : densité **uniforme** et **constante**

$\lambda = \omega \epsilon$

$$Q = \int_{\Gamma} dq = \int_{\Gamma} \lambda dl = \lambda \int_{\Gamma} dl = \lambda L \quad \text{pour une ligne de longueur } L$$

$$Q = \iint_S dq = \iint_S \sigma dS = \sigma \iint_S dS = \sigma S \quad \text{pour une surface d'aire } S$$

$$Q = \iiint_V dq = \iiint_V \rho dV = \rho \iiint_V dV = \rho V \quad \text{pour un volume de capacité } V$$

1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

Intégrales multiples :

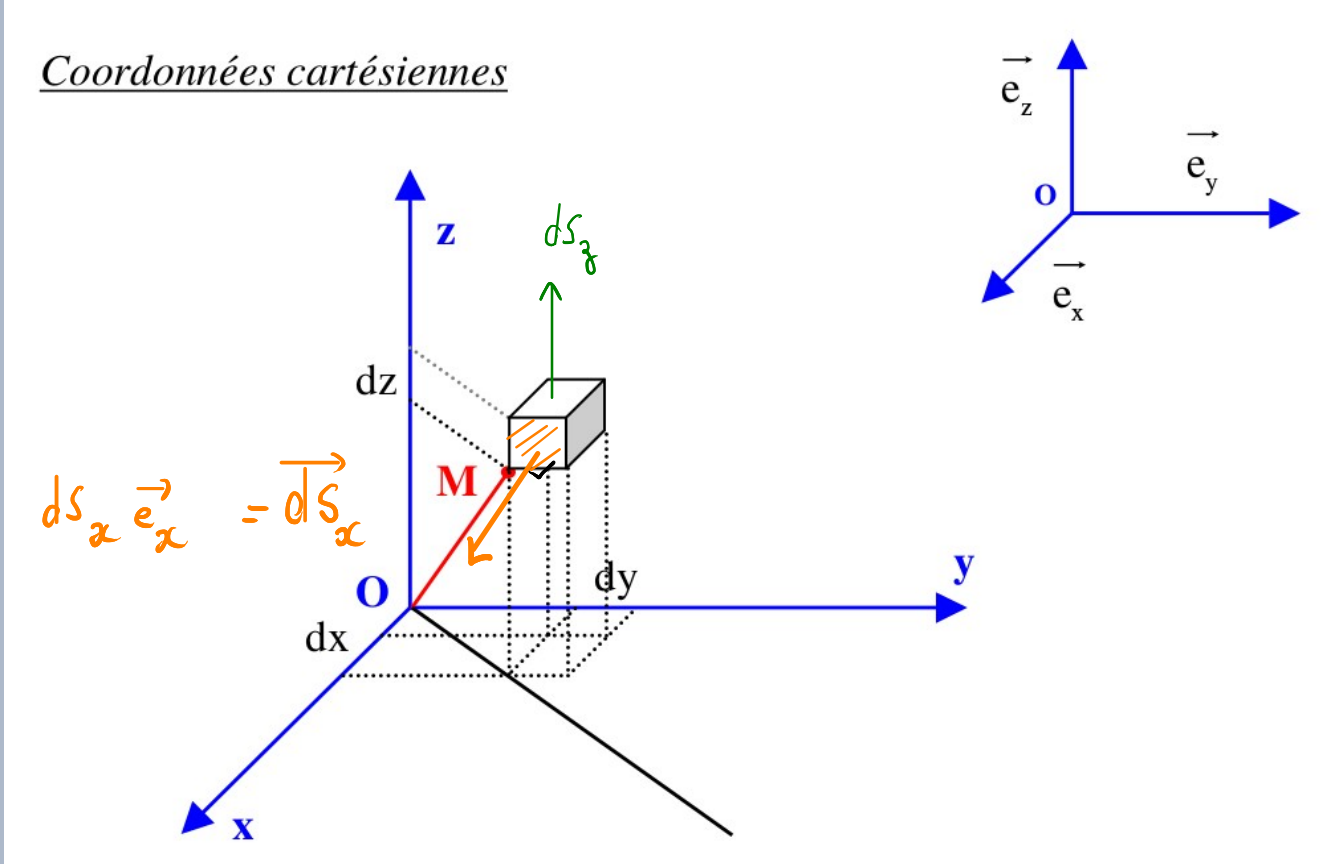
$$\iiint f(x) g(y) h(z) dx dy dz = \int f(x) dx \int g(y) dy \int h(z) dz$$

$\xrightarrow{\text{constant}}$

$$\vec{OM} = x \vec{e}_x + y \vec{e}_y + z \vec{e}_z$$

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz$$

$$d\vec{OM} = \begin{vmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{vmatrix} \Rightarrow d\vec{S} = \begin{vmatrix} dy dz \\ dx dz \\ dx dy \end{vmatrix}$$



1.1 Force entre deux charges

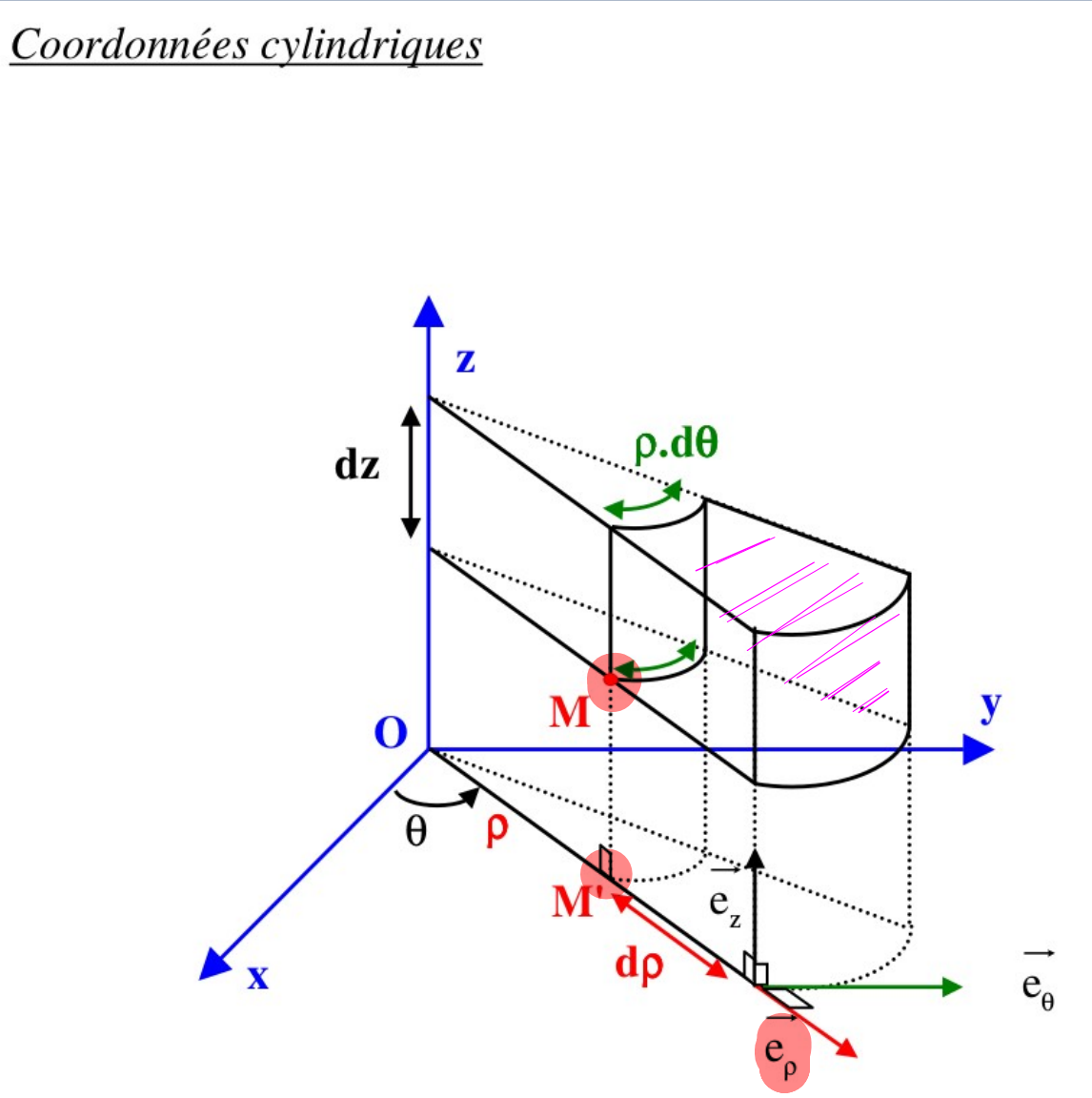
1.1.5 Loi de Coulomb

$$\vec{OM} = \vec{OM'} + \vec{M'M} = \rho \vec{e}_\rho + z \vec{e}_z$$

\vec{e}_θ
 \uparrow

$$dV = d\rho \cdot \rho d\theta \cdot dz$$

$$d\vec{OM} = \begin{pmatrix} d\rho \\ \rho d\theta \\ dz \end{pmatrix} \Rightarrow d\vec{S} = \begin{pmatrix} \rho d\theta dz \\ d\rho dz \\ \rho d\rho dz \end{pmatrix}$$



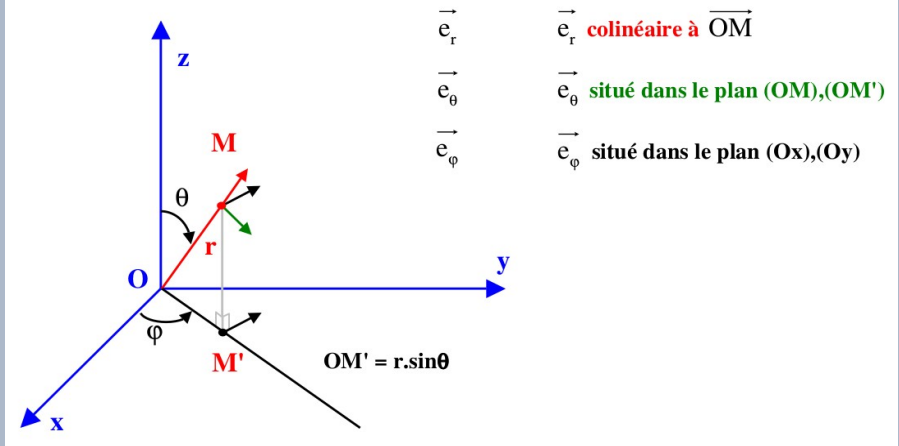
1.1 Force entre deux charges

1.1.5 Loi de Coulomb

Coordonnées sphériques

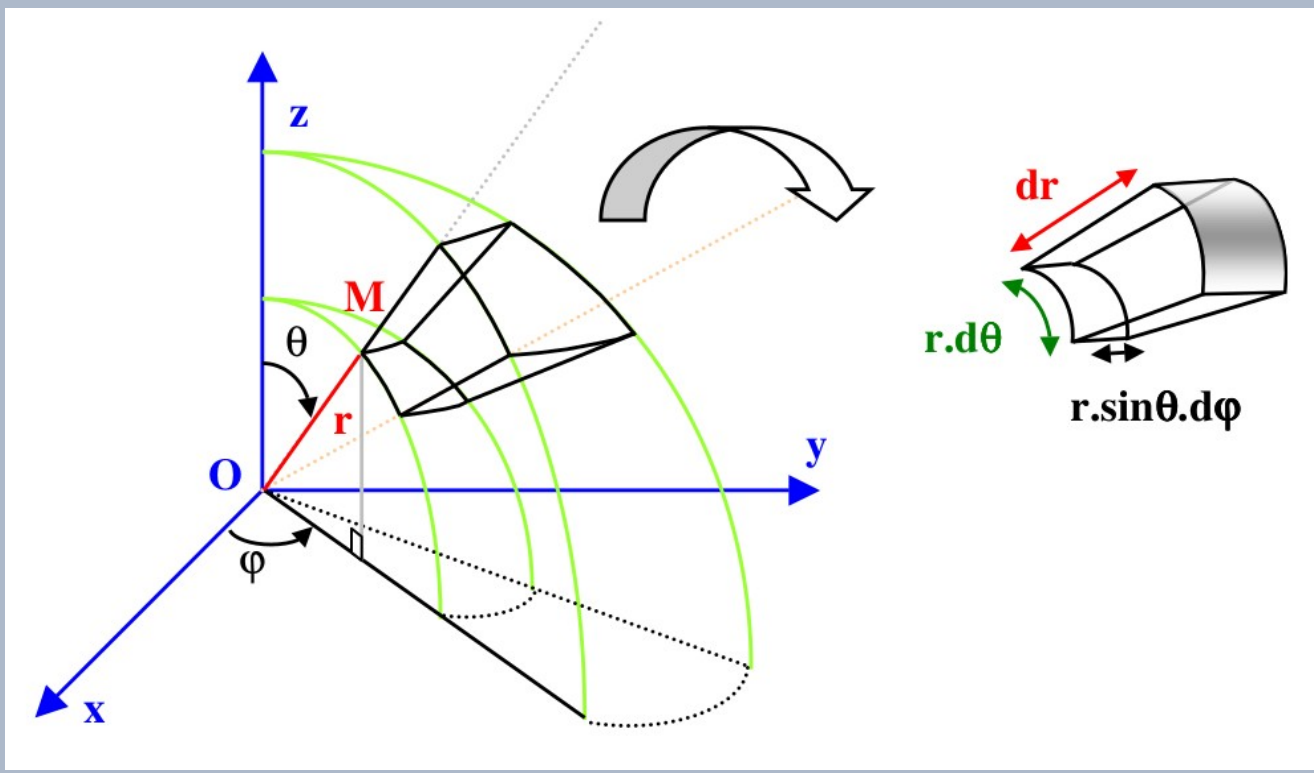
$$\vec{OM} = r \cdot \vec{e}_r$$

$$dV = dr \cdot r d\theta \cdot r \sin\theta d\varphi = r^2 \cdot \sin\theta \cdot dr \cdot d\theta \cdot d\varphi$$



$$d\vec{OM} = \begin{cases} dr \\ r d\theta \\ r \sin\theta d\varphi \end{cases}$$

$$dS = \begin{cases} r^2 \sin\theta d\varphi \\ r dr \sin\theta d\varphi \\ r dr d\theta \end{cases}$$



- [1] Polycopié de cours
- [2] [CUPGE - CY : Introduction à l'électromagnétisme](#)
- [3] Wikipédia
- [4] [Encyclopédie Universalis](#)
- [5] David Sénéchal - [« Histoire des sciences » PHQ399](#) Université de Sherbrooke, QC
- [6] pour la suite : [Khan Academy](#) , [Unisciel](#) etc...