

Champs électrostatique et magnétostatique

Sources, spectres, propriétés de symétrie

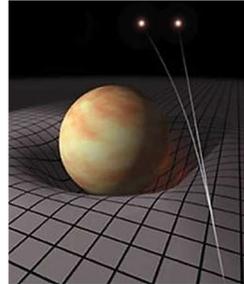
Champs – Lignes de champ

Toute la physique s'exprime à l'aide de champs, il s'agit donc d'une notion essentielle. Les champs de gravitation, de pesanteur, électrique, magnétique peuvent apparaître comme des grandeurs abstraites. Pour comprendre cette notion, il convient de garder à l'esprit que :

- ce sont les **forces** associées qui traduisent concrètement l'existence de champs ;
- un champ est engendré par une **source** tout à fait réelle.

💡 On peut comprendre un champ comme une déformation de l'espace ou plus exactement une **propriété de l'espace** (grandeur physique) définie en un point M de l'espace à un instant t engendrée par :

- une masse dans le cas du champ de gravitation ;
- une charge dans le cas d'un champ électrique ;
- un courant dans le cas d'un champ magnétique.



Ci-contre, en relativité, la présence d'une masse provoque une déformation de l'espace susceptible de dévier un rayon lumineux.

On distingue deux types de champs :

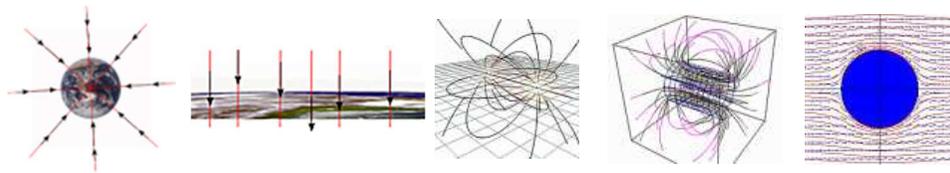
- les champs **scalaires** : à chaque point M d'une région de l'espace est associé un **nombre** ;
- les champs **vectoriels** : à chaque point M d'une région de l'espace est associé un **vecteur**.

Définition

📖 Une **ligne de champ** est une courbe tangente en chacun de ses points à un champ vectoriel, orientée dans le sens du champ.

📖 Un ensemble des lignes de champ s'appelle un **spectre** en électromagnétisme. Cf. **tube de champ** et conservation du flux (thermodynamique et mécanique des fluides).

Lignes de champ



Champ de gravitation

Champ de pesanteur

Champ électrostatique

Champ magnétostatique

Champ des vitesses au sein d'un fluide

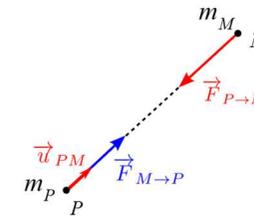
Propriétés

💡 La norme du champ n'est pas nécessairement constante le long d'une ligne de champ.

📖 Les lignes de champ ne se coupent pas (sauf en des points singuliers où le champ n'est pas défini, par exemple à l'emplacement d'une charge) : si tel était le cas le champ posséderait deux directions en un point donné, ce qui est impossible sauf si le champ n'est pas défini.

Forces de Newton et de Coulomb – Champs associés

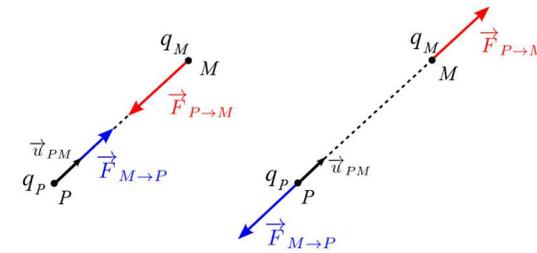
Force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles



$$\vec{F}_{P \rightarrow M} = -G \frac{m_P m_M}{PM^2} \vec{u}_{PM} = -G \frac{m_P m_M}{PM^3} \overrightarrow{PM}$$

Définition : champ créé en M par la masse en P : $\vec{G}_P(M) = \frac{\vec{F}_{P \rightarrow M}}{m_M} = -G \frac{m_P}{PM^2} \vec{u}_{PM}$

Force électrostatique entre deux charges ponctuelles



Cas attractif : $q_M q_P < 0$

Cas répulsif : $q_M q_P > 0$

$$\vec{F}_{P \rightarrow M} = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 PM^2} \vec{u}_{PM} = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 PM^3} \overrightarrow{PM}$$

Définition : champ créé en M par la charge en P : $\vec{E}_P(M) = \frac{\vec{F}_{P \rightarrow M}}{q_M} = \frac{q_P}{4\pi\epsilon_0 PM^2} \vec{u}_{PM}$

Sources des champs \vec{E} et \vec{B}

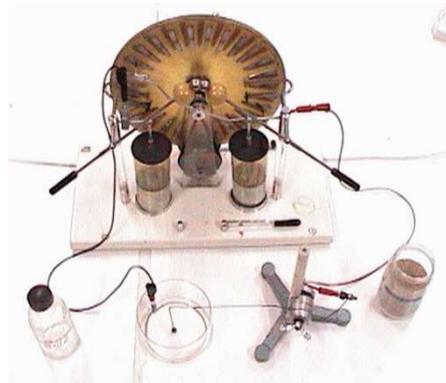
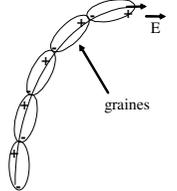
- Un champ **électrostatique** $\vec{E}(M)$ a pour source des **charges fixes** dans le référentiel d'observation.
- Un champ **magnétostatique** $\vec{B}(M)$ a pour source des **courants permanents** (charges mobiles) ou des **aimants** dans le référentiel d'observation.

Rq : le suffixe « statique » signifie que les champs ne dépendent pas du temps.

Topographie du champ électrostatique – Spectres expérimentaux

Spectres électriques :

- machine électrostatique ;
- cristalliseur ;
- électrodes de formes variées ;
- huile ;
- graines de gazon (particules isolantes, neutres mais polarisables).



Machine de Wimshurst

Expérience E1 : champ créé par un condensateur plan (électrodes planes parallèles)

Avant mise sous tension

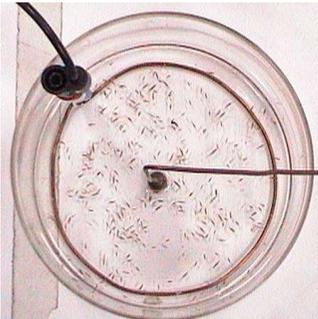


Après mise sous tension

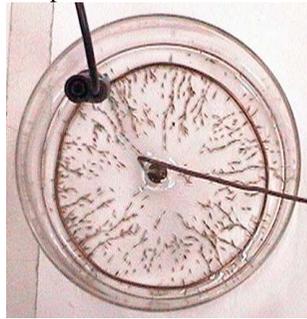


Expérience E2 : simulation du champ créé par une charge ponctuelle (électrode annulaire et électrode « ponctuelle »)

Avant mise sous tension



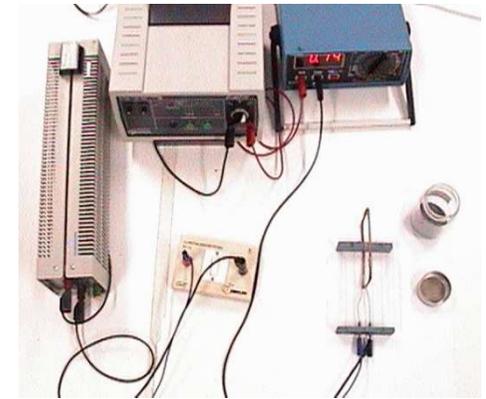
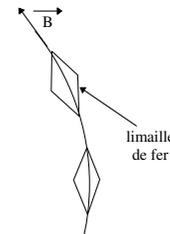
Après mise sous tension



Topographie du champ magnétostatique – Spectres expérimentaux

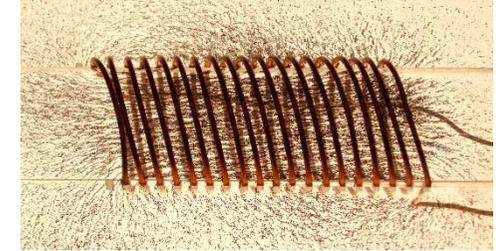
Spectres magnétiques :

- générateur ($U = 12\text{ V}$ et $I = 5\text{ A}$) ;
- rhéostat ;
- ampèremètre ;
- bobines de fils de formes variées sur plexiglas ;
- limaille de fer + tamis.



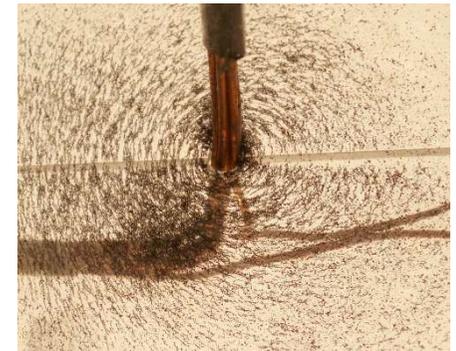
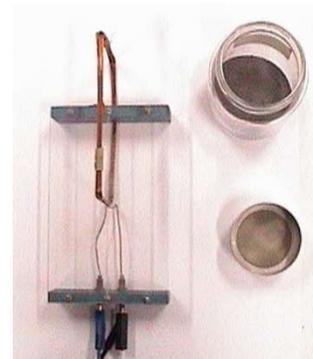
Expérience B1 : champ créé par un solénoïde (bobine circulaire de longueur \gg rayon)

Avec courant



Expérience B2 : simulation du champ créé par un fil (bobine carrée plate étudiée au voisinage d'un côté)

Avec courant



Topographie - Conclusions

Les expériences précédentes (page 2) permettent de matérialiser les lignes de champ (spectre).

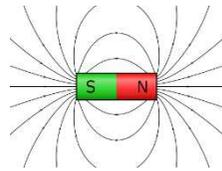
Conclusion qualitative (observation des spectres ci-dessus)

- Les lignes de champ \vec{E} **divergent** à partir des charges ou **convergent** vers elles.
- Les lignes de champ \vec{B} **tournoient** autour des courants.

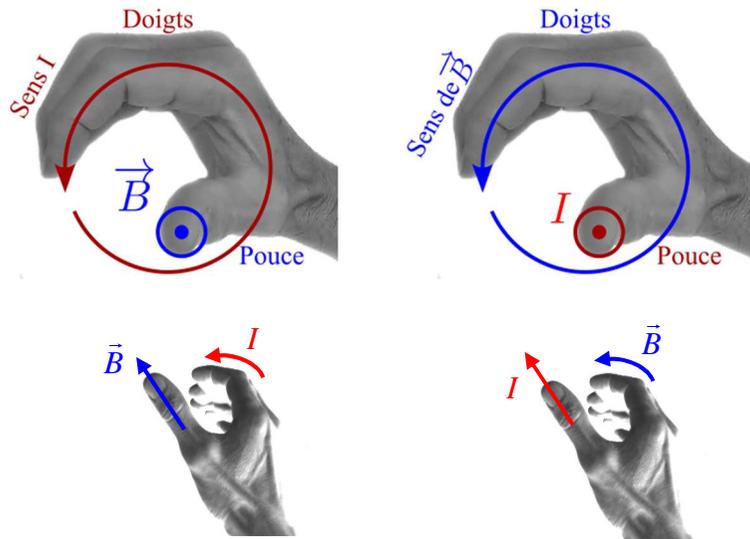
Règles d'orientation des champs (admisses)

- Sens de \vec{E} : des charges + vers les charges – donc **du potentiel le plus élevé vers le potentiel le moins élevé** (en pratique, on relie la borne + du générateur à une électrode et la borne – à l'autre), \vec{E} est donc dirigé vers les potentiels décroissants.

- Sens de \vec{B} :
- aimant : du Nord vers le Sud à l'extérieur de l'aimant ;

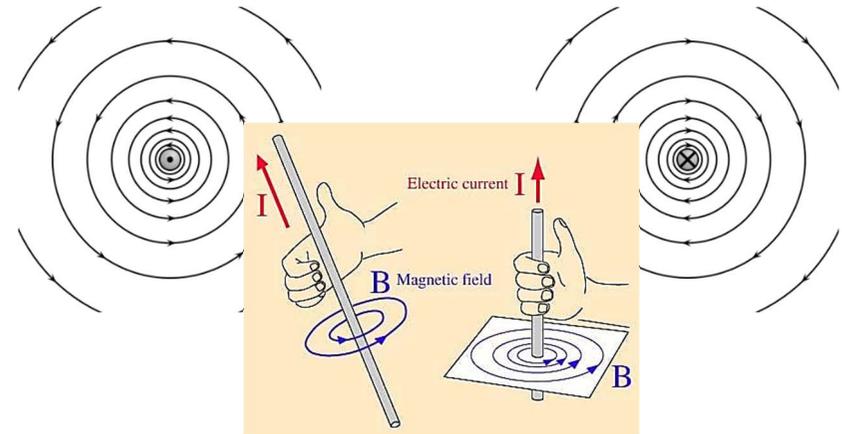


- courant : **règle de la main droite** (doigts = courant, pouce = champ ou l'inverse suivant la géométrie, cf. deux cas ci-dessous).

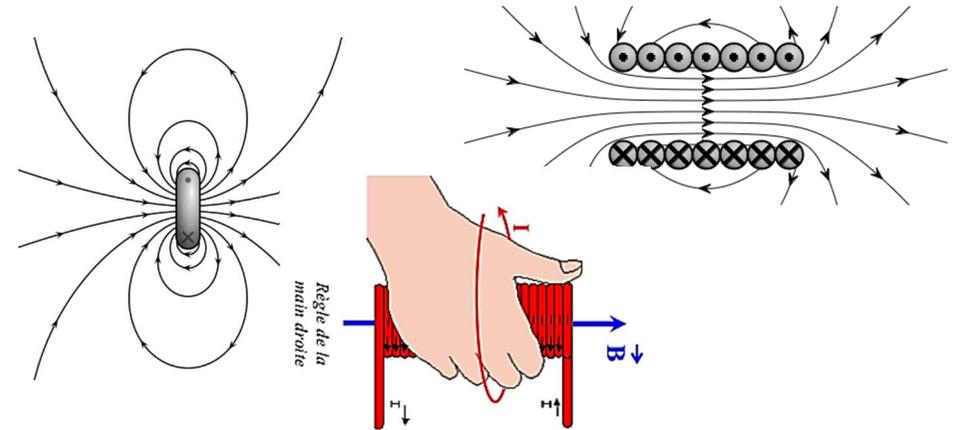


Exemples :

Règle de la main droite : pouce = courant / doigts = \vec{B}



Règle de la main droite : doigts = courant / pouce = \vec{B}



Symétrie des sources

En physique, concernant la symétrie par rapport à un plan, on distingue :

- ✓ les plans π appelés plans de **symétrie** laissant invariants la **forme** de l'objet mais également les **charges** ou le **sens des courants** lors de la symétrie par rapport à π ;
- ✓ les plans π^* appelés plans d'**antisymétrie** laissant invariante la **forme** de l'objet mais **inversant** le signe des charges ou le sens des courants.

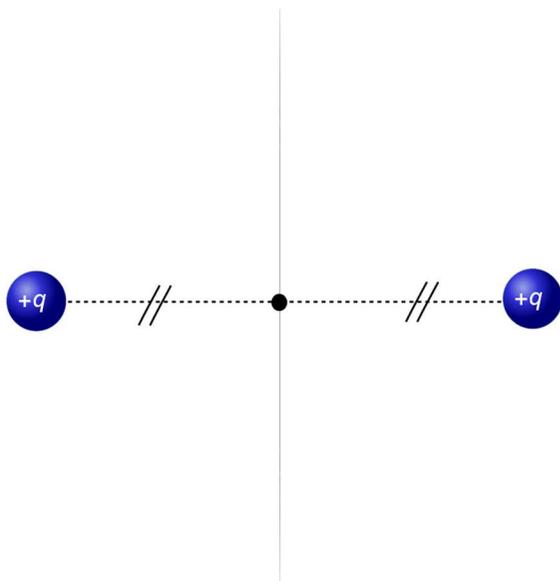
Plans de symétrie et d'antisymétrie – Distributions de charges

Plan	Résultat de la symétrie
	
	
	
	
	

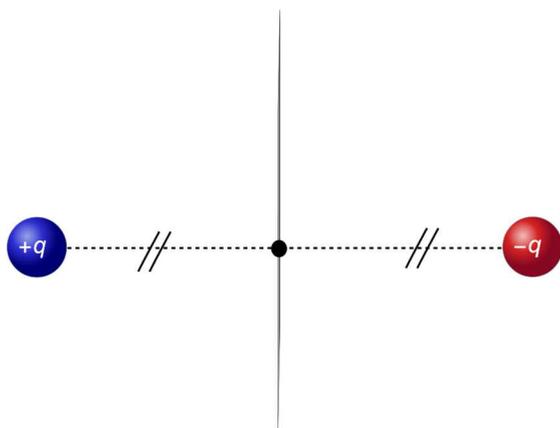
Plans de symétrie et d'antisymétrie – Distributions de courants/aimants

Plan	Résultat de la symétrie
	
	
	
	
	
	

Π plan de symétrie
plan miroir



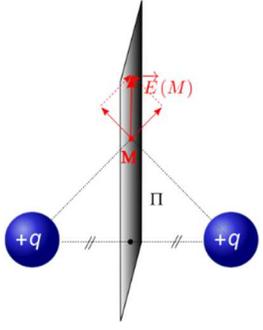
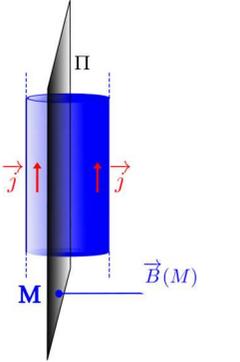
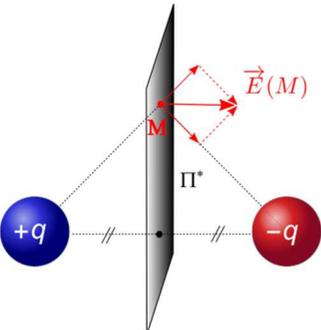
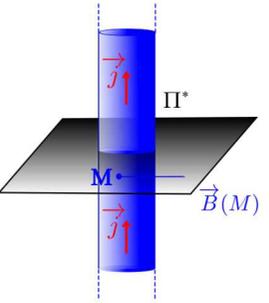
Π^* plan d'antisymétrie
plan anti-miroir



Champs déduits des symétries des sources - Conclusion

Principe de Curie

« Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. »

	$\vec{E}(M)$ « vrai » vecteur ou vecteur polaire	$\vec{B}(M)$ pseudo-vecteur ou vecteur axial
Π plan de symétrie plan miroir	$M \in \Pi$ plan de symétrie pour les charges \Rightarrow $\vec{E}(M) \in \Pi$ 	$M \in \Pi$ plan de symétrie pour les courants \Rightarrow $\vec{B}(M) \perp \Pi$ 
Π^* plan d'antisymétrie plan anti-miroir	$M \in \Pi^*$ plan de d'antisymétrie pour les charges \Rightarrow $\vec{E}(M) \perp \Pi^*$ 	$M \in \Pi^*$ plan de d'antisymétrie pour les courants \Rightarrow $\vec{B}(M) \in \Pi^*$ 

Champ et potentiel électrostatique pour des charges ponctuelles

On a les relations suivantes entre force et énergie potentielle d'une part et force et champ d'autre part :

$$\vec{F}_{P \rightarrow M} = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{PM} \quad \leftarrow \vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}} E_{pel} \rightarrow \quad E_{pel}(M) = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\updownarrow \vec{F}_{P \rightarrow M} = q_M \vec{E}_P(M) \quad ? \quad \updownarrow$$

$$\vec{E}_P(M) = \frac{q_P}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{PM} \quad \leftarrow ? \rightarrow \quad ?$$

D'un point de vue logique (mathématique), on peut donc compléter ce tableau de la façon suivante.

$$\vec{F}_{P \rightarrow M} = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{PM}$$

$$\updownarrow \vec{F}_{P \rightarrow M} = q_M \vec{E}_P(M)$$

$$\vec{E}_P(M) = \frac{q_P}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_{PM}$$

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}} E_{pel}$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

$$E_{pel}(M) = \frac{q_P q_M}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E_{pel}(M) = q_M V_P(M) \updownarrow$$

$$V_P(M) = \frac{q_P}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$V(M)$ est le **potentiel électrostatique** créé au point M par la charge **ponctuelle** q_P placée au point P .

Ce tableau met en évidence :

- la relation entre énergie potentielle E_{pel} et potentiel électrostatique V ;
- la relation entre champ \vec{E} et potentiel V .

Relations entre potentiel et champ électrostatique (distribution quelconque)

Relation locale :

Relation intégrale :