

Prenons la clé des champs ... magnétiques !

Hubert Baty, Observatoire astronomique de Strasbourg

hubert.baty@unistra.fr



1. Les sources de champ magnétique
2. De l'expérience d'Oersted à la théorie d'Ampère
3. Champs magnétiques d'astres en rotation, et les colères du champ magnétique solaire
4. La fusion thermonucléaire par confinement magnétique

Résumé du premier cours

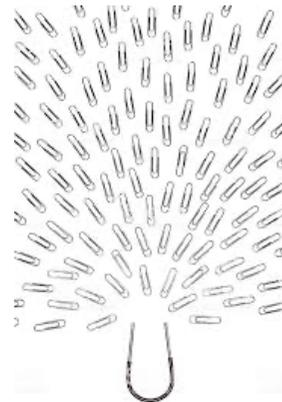
Sources de champ : aimants



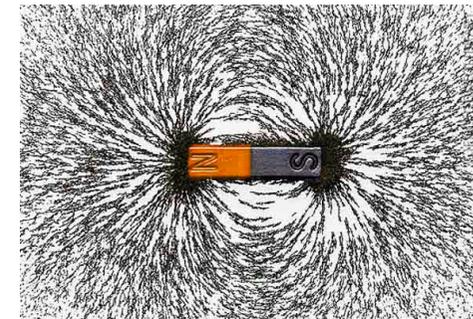
attire



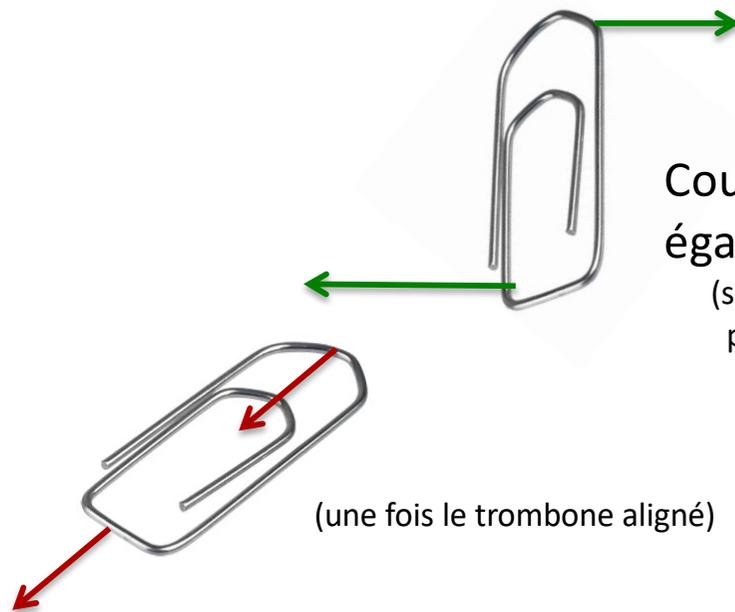
oriente



attire et oriente



1. Aimants : mise en évidence de la force magnétique !



En mécanique du solide, on appelle **couple** un ensemble de forces appliquées à un solide dont la résultante est nulle, mais dont le moment total est non nul. En pratique, un couple tend seulement à mettre en rotation le système.

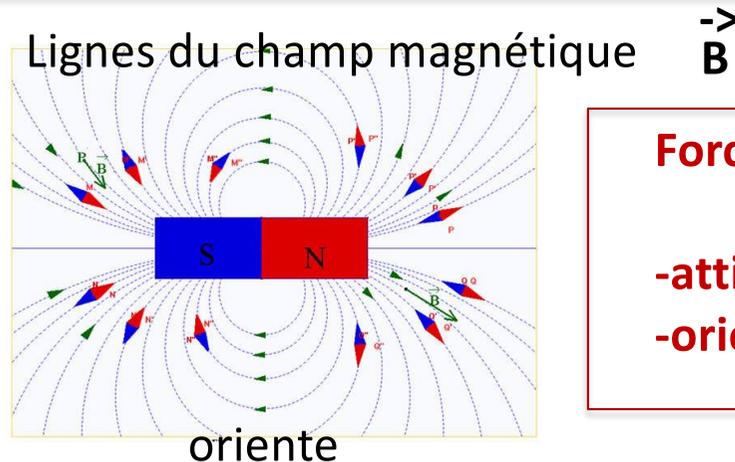
Source wikipédia

Sources de champ : aimants

- Intérieur de l'aimant -> source du champ ?
- Propriété dipolaire de l'aimant (pas de mono-pole) ?
- Comment est fabriqué un aimant ?
- Différence entre aiguille d'une boussole et un aimant ?
- Différence entre aiguille et Fer (limaille) dans le champ d'un aimant ?
- Le paramètre physique reliant le champ à la force ?
 $m^* = \text{'masse magnétique'}$ (telle que $\text{force} = m^* B$)



attire



orienté

Force magnétique:

-attire

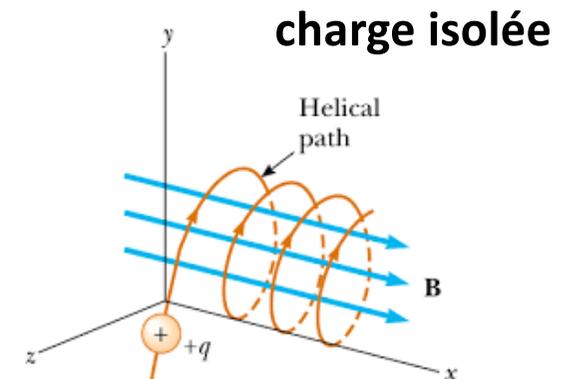
-orienté

Résumé du premier cours

http://olivier.granier.free.fr/MOOC/co/rappels-de-cours-meca-pt-mvnts-champs-E-B_1.html

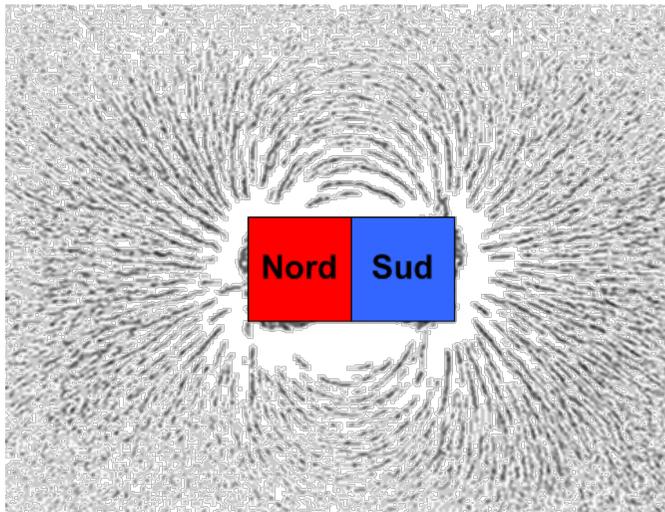
**Force magnétique: lien entre B et la force
-> 'masse magnétique'**

- dépend de la charge q**
- dépend de la vitesse de la charge**

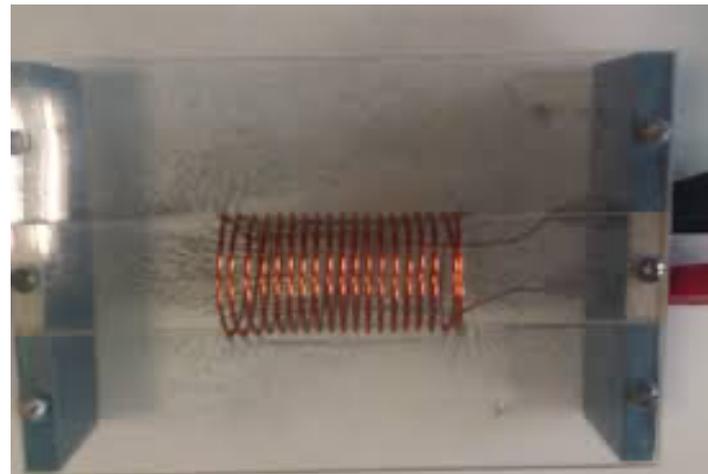


Sources de champ : aimants, courants électriques

- Champ magnétique de même nature que celui d'un aimant ?
- Mêmes propriétés ?
- Propriété dipolaire (pas de mono-pole) ?
- Paramètre physique reliant le champ à la force ?



aimant

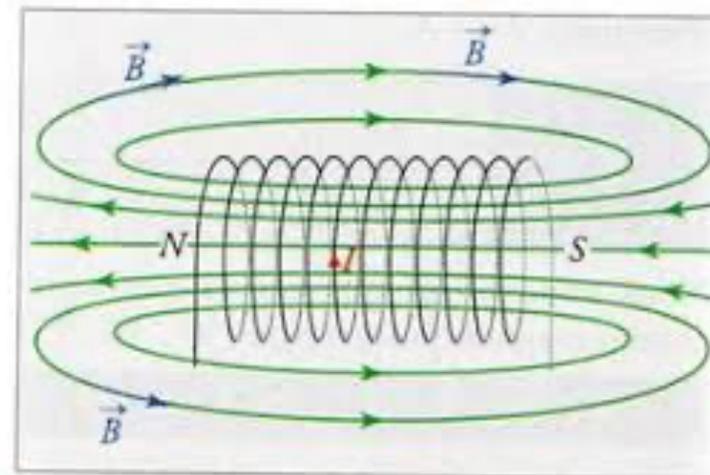
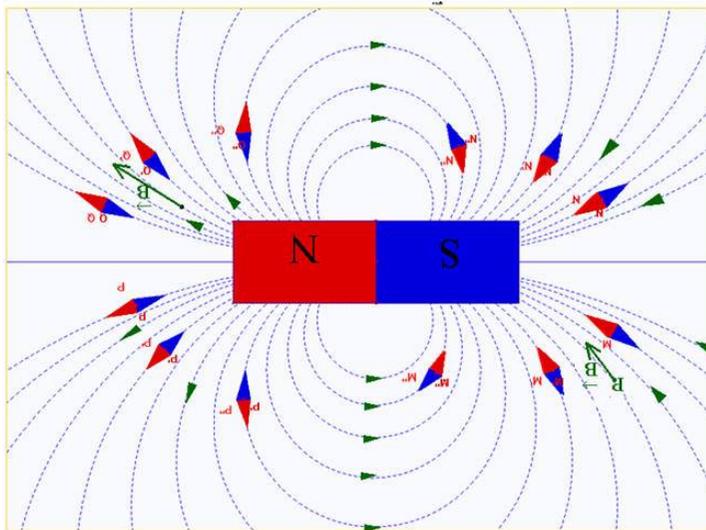


solénoïde

Sources de champ : aimants, courants électriques

- Champ magnétique de même nature que celui d'un aimant ?
- Mêmes propriétés ?
- Propriété dipolaire (pas de mono-pole) ?

- Paramètre physique reliant le champ à la force ?



■ Doc. 7 Lignes de champ d'un solénoïde.

Sens de I détermine le sens de B

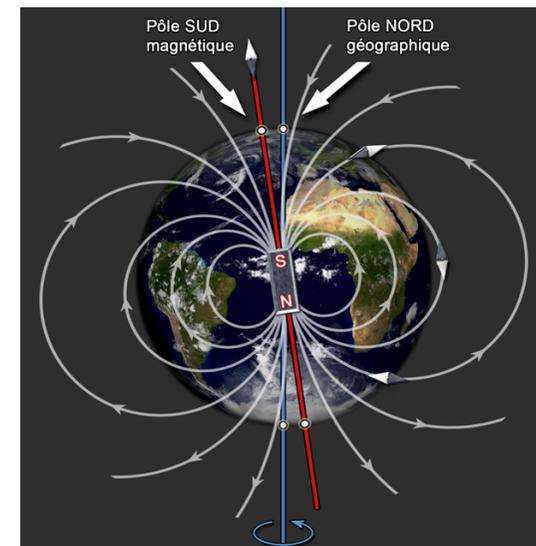
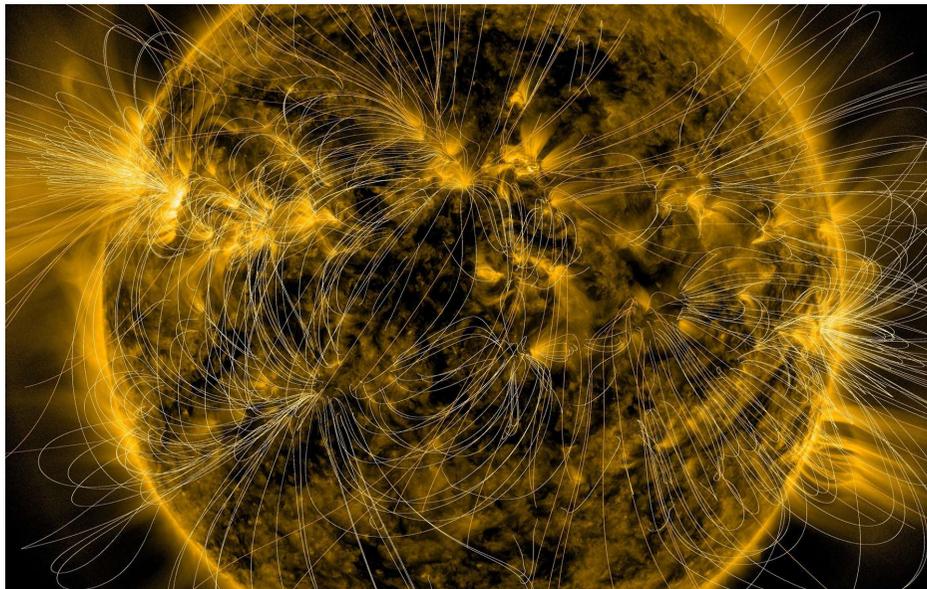
Résumé du premier cours

Sources de champ : aimants, courants électriques, astres

- Comme un aimant ou comme un courant électrique ?

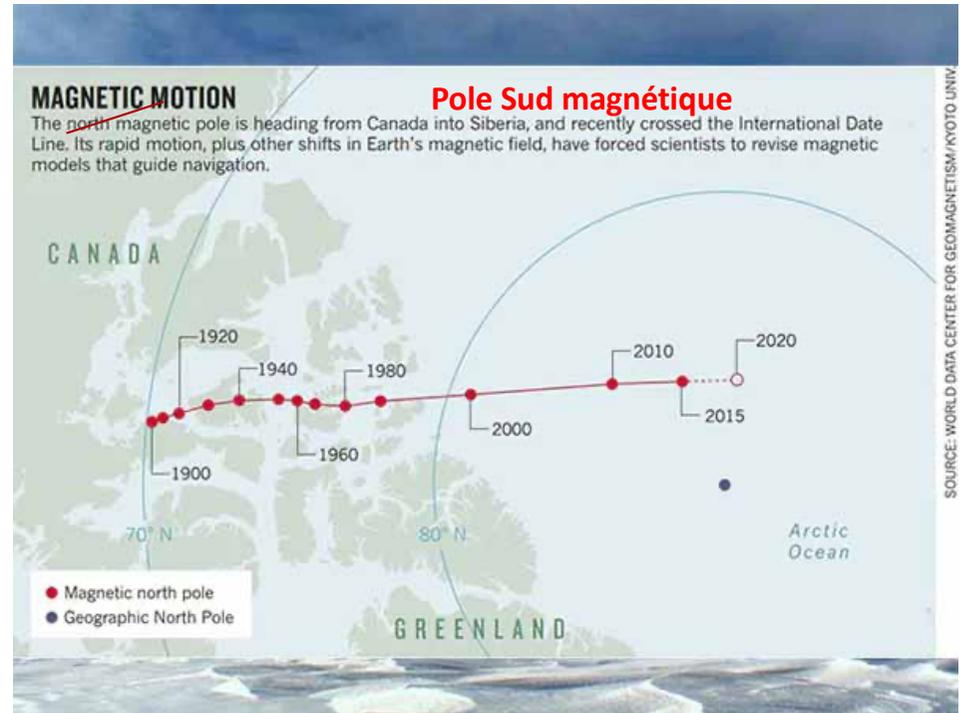
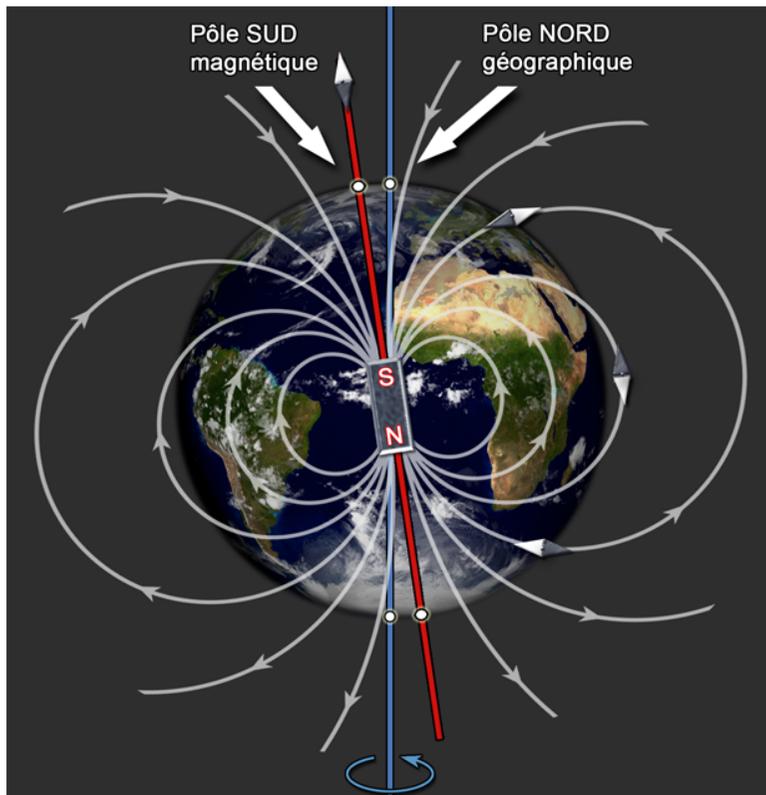
- Rôle joué par la Rotation ?

- Réponses aux questions => prochain cours !



Résumé du premier cours

la Terre

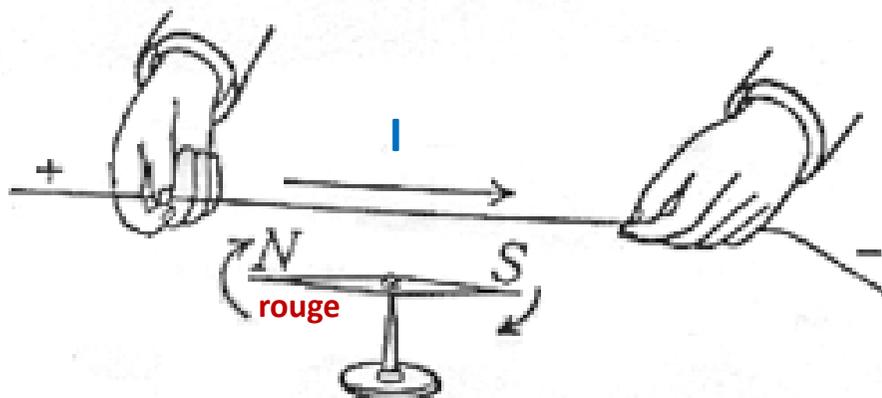


est dipolaire mais ... dérive !

1. L'expérience d'Oersted
2. Loi de Biot & Savart
3. La force de Laplace
4. La notion de courants Ampériens
5. Explication de l'expérience d'Oersted
6. Réponses à nos questions sur la nature du magnétisme

1. Expérience d'Oersted : découverte fortuite

1819: Hans-Christian Oersted

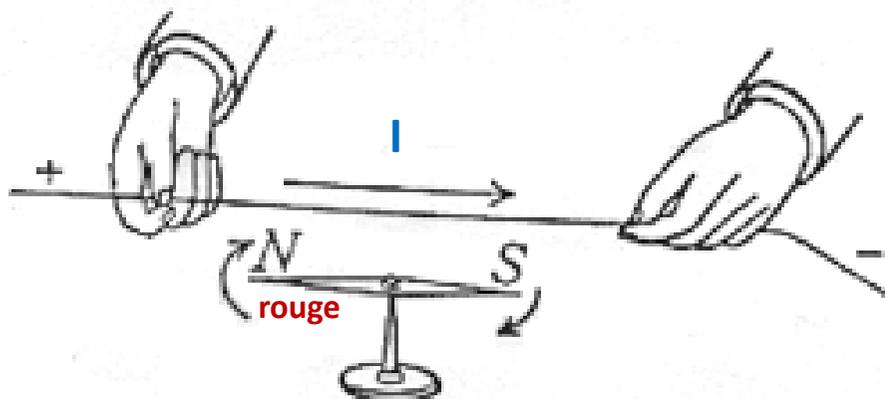
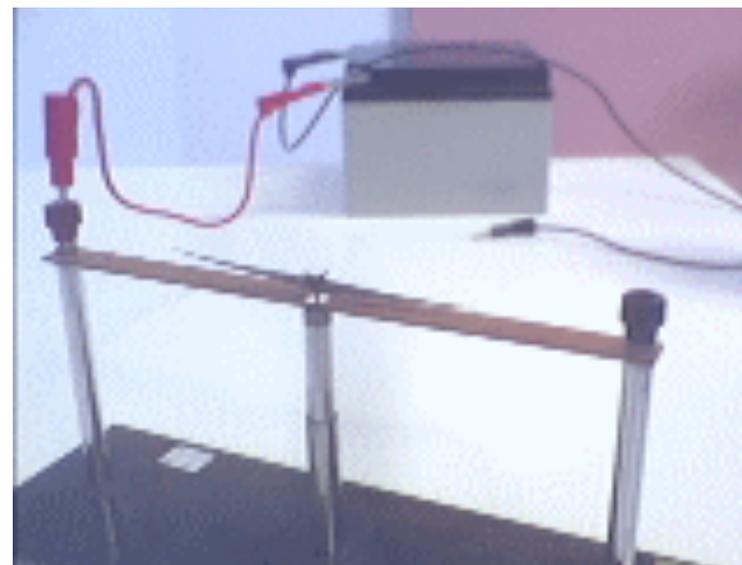


Aiguille boussole pivote et se stabilise
perpendiculairement au fil

1. Expérience d'Oersted : découverte fortuite



1819: Hans-Christian Oersted



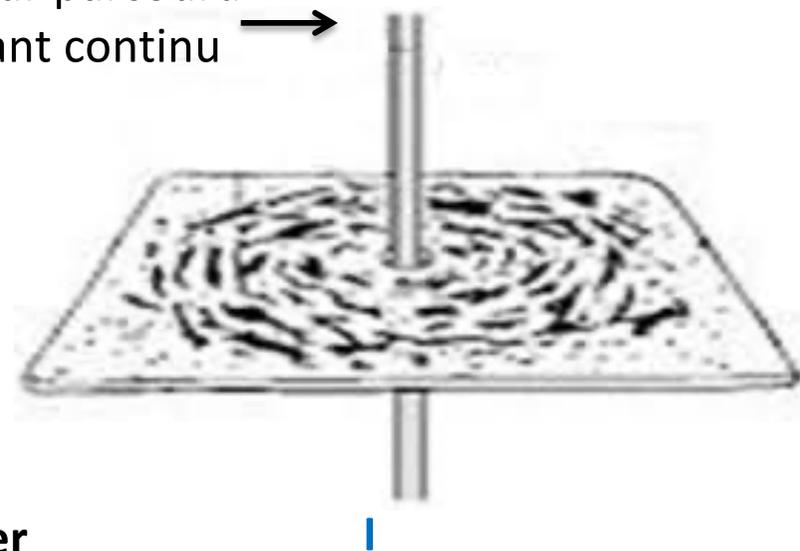
Aiguille boussole pivote et se stabilise perpendiculairement au fil

2. Loi de Biot & Savart : champ magnétique créé par un courant 'droit'

1820: Jean-Baptiste Biot et Félix Savart



Fil conducteur parcouru
par un courant continu →



Limaille de fer
trace les lignes de champ

2. Loi de Biot & Savart : champ magnétique créé par un courant 'droit'

1820: Jean-Baptiste Biot et Félix Savart

Lignes de champ => cercles

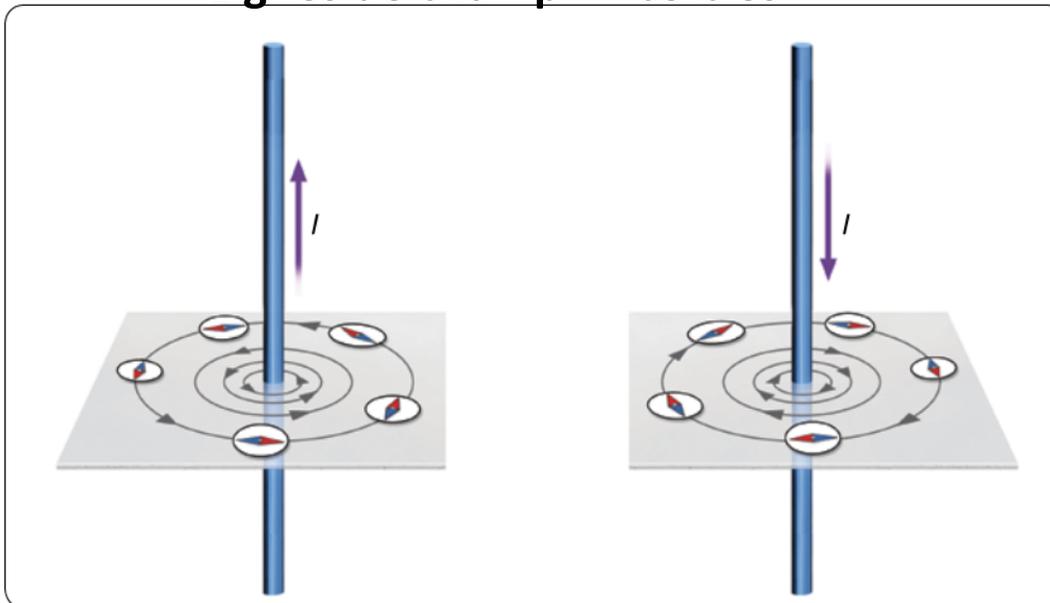
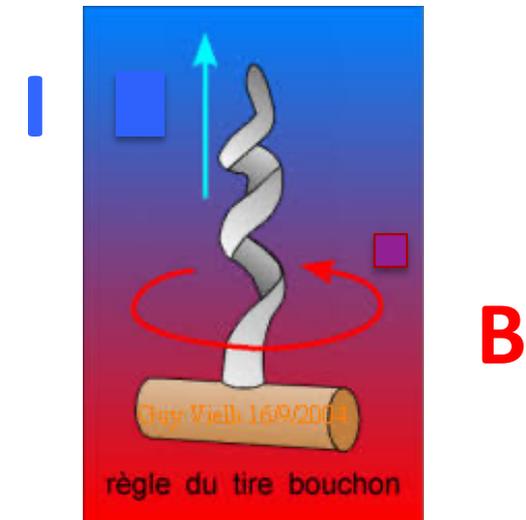


FIGURE 22 | Si l'on place des boussoles autour d'un fil parcouru par un courant, leurs aiguilles s'orienteront tangentiellement aux cercles centrés sur le fil. Les pôles Nord pointeront dans le sens des lignes de champ.



Sens de I et B sont liés par la règle du Tire-bouchon

2. Loi de Biot & Savart : champ magnétique créé par un courant 'droit'

1820: Jean-Baptiste Biot et Félix Savart

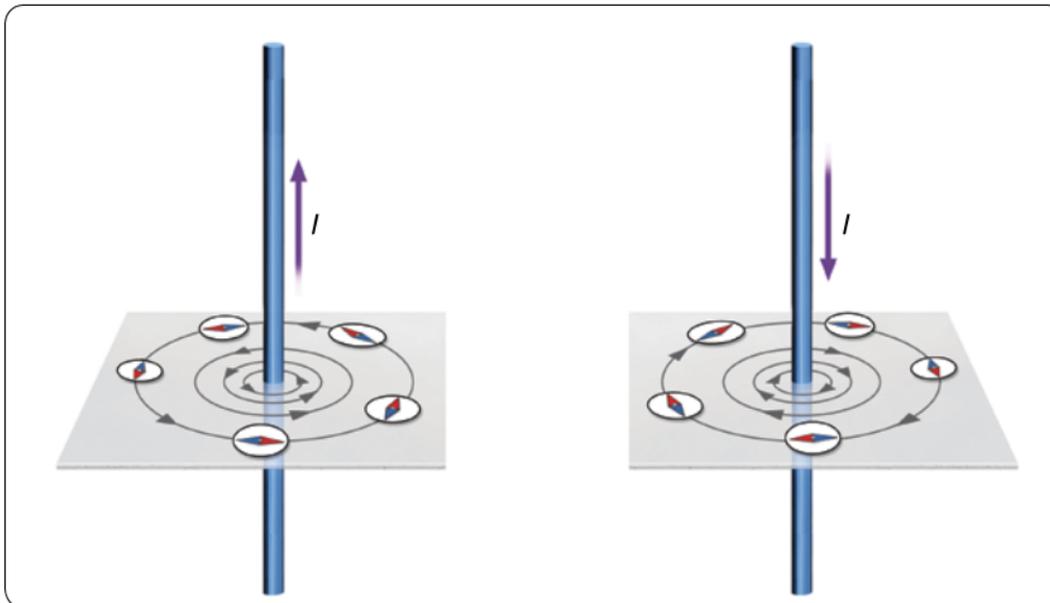


FIGURE 22 | Si l'on place des boussoles autour d'un fil parcouru par un courant, leurs aiguilles s'orienteront tangentiellment aux cercles centrés sur le fil. Les pôles Nord pointeront dans le sens des lignes de champ.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

R: distance mesurée depuis le fil

Unité pour B -> T (Tesla)

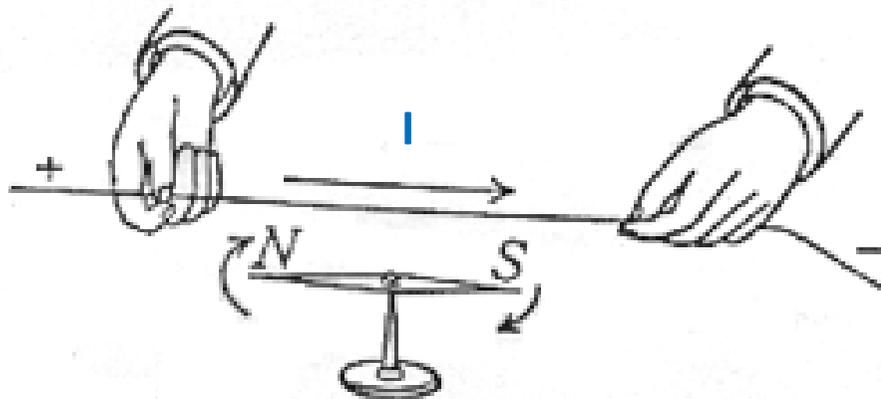
Unité pour I -> Ampère

μ_0 = constante

Sens de I et B sont liés par la règle du Tire-bouchon

2. Loi de Biot & Savart : champ magnétique créé par un courant 'droit'

1820: Jean-Baptiste Biot et Félix Savart

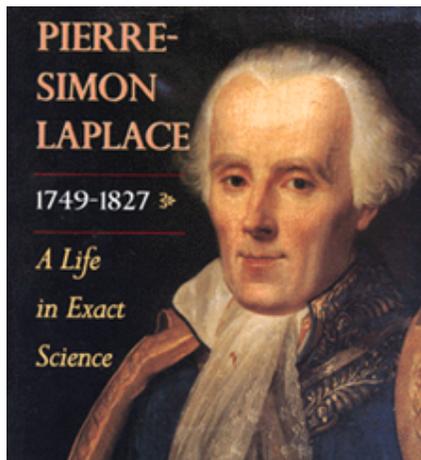


$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Sens de I et B sont liés par
la règle du Tire-bouchon

Interaction entre champ magnétique créé par le fil et l'aiguille ?
=> on a besoin de connaître les forces pour comprendre l'expérience d'Oersted ?

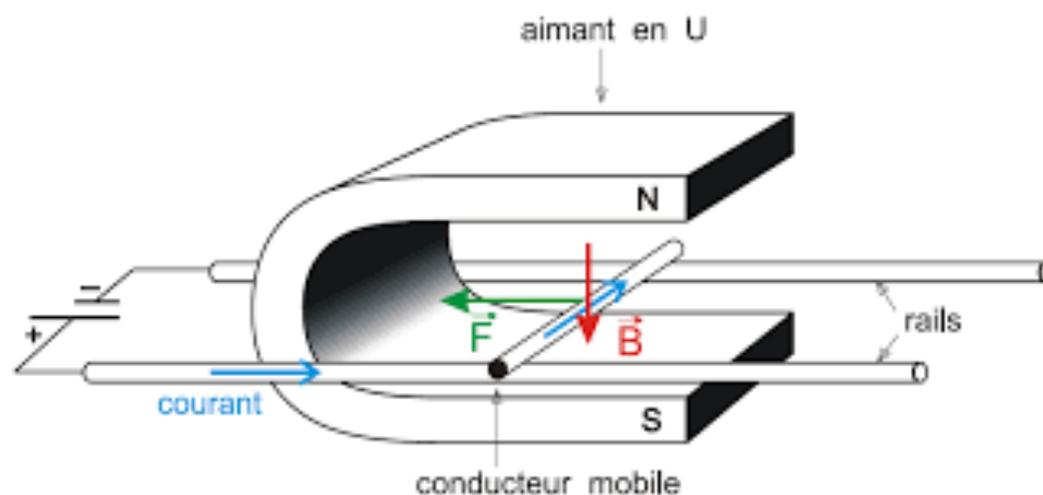
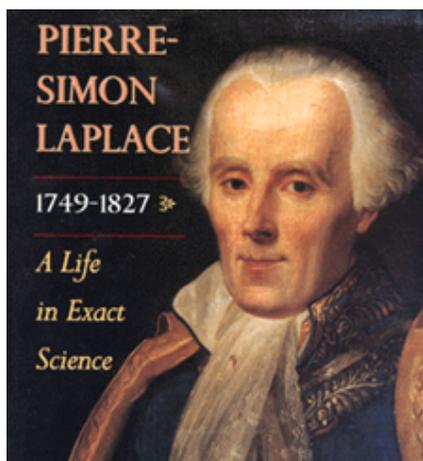
3. La force de Laplace : expérience des rails de Laplace



LAPLACE Pierre Simon,
marquis de-français, 1749-1827
Astronome, physicien, mathématicien et politicien

Laplace fut inspecteur des armées avant la révolution de 1789, ministre sous Bonaparte, comte sous Napoléon, marquis sous Louis XVIII

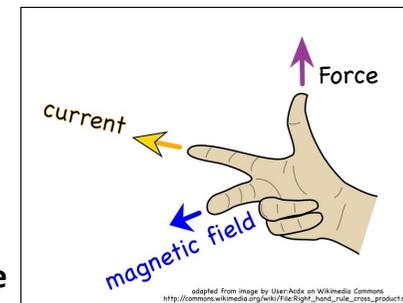
3. La force de Laplace : expérience des rails de Laplace



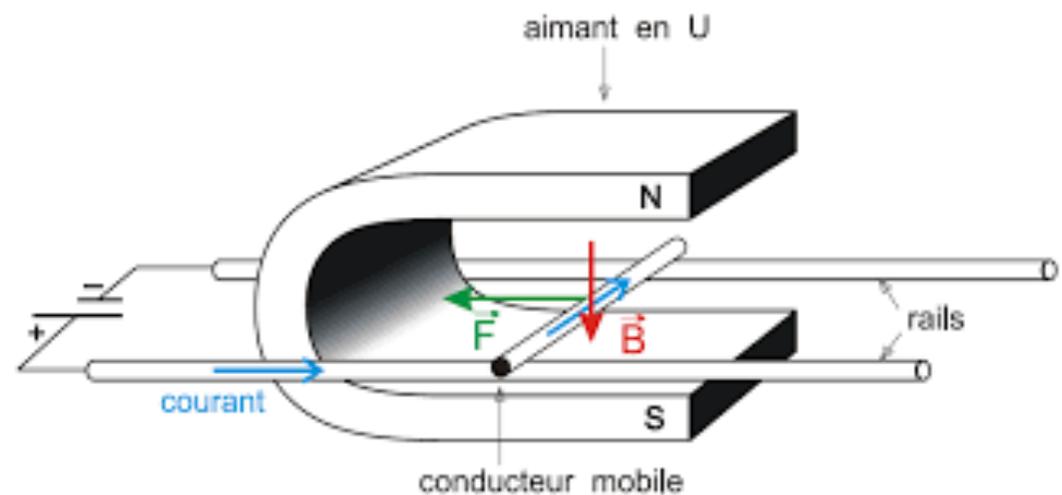
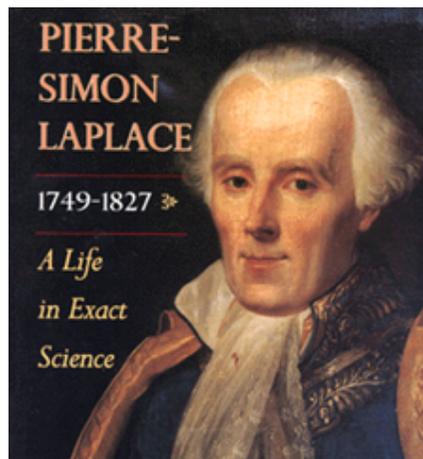
https://www.youtube.com/watch?v=QK_irFTM-U

Courant électrique + champ magnétique indépendants

On peut aussi utiliser le tire-bouchon : de I vers B pour obtenir la force



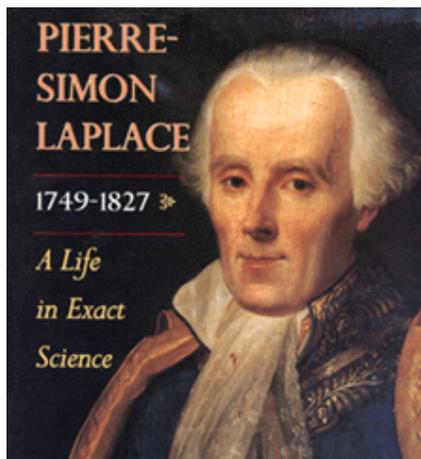
3. La force de Laplace : expérience des rails de Laplace (ou moteur linéaire)



**Courant électrique + champ magnétique indépendants
⇒ Force perpendiculaire au courant et au champ !
et agissant sur le courant ...**

**Si le courant et le champ sont
parallèles => force nulle !**

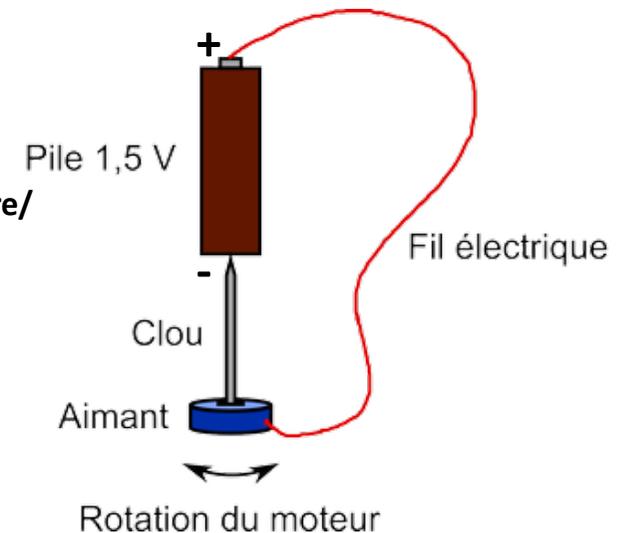
3. La force de Laplace : expérience des rails de Laplace => moteur



Démo en direct

Voir aussi

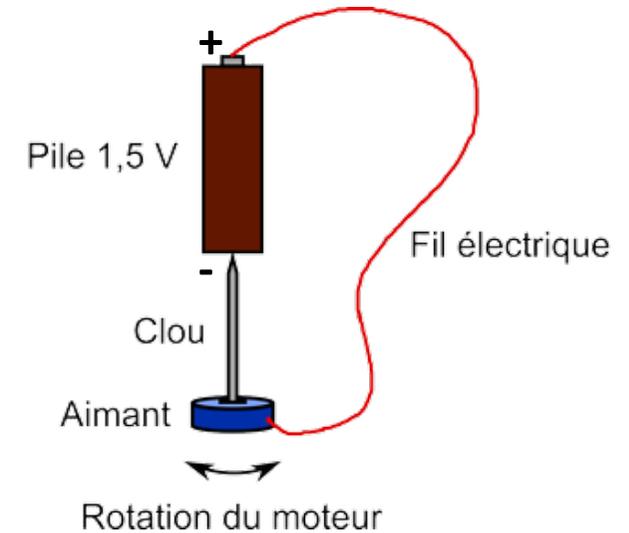
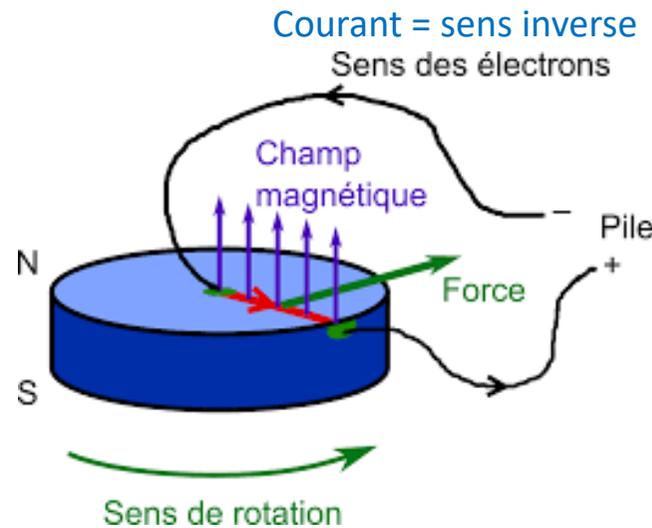
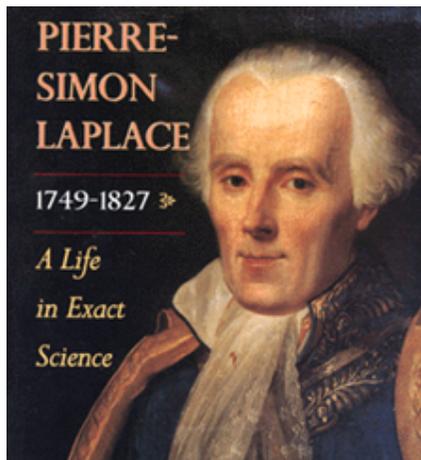
<https://pod.univ-lille.fr/video/3441-le-moteur-homopolaire/>



Moteur homopolaire

**Courant électrique + champ magnétique indépendants
=> Force perpendiculaire au courant et au champ !
et agissant sur le courant ...**

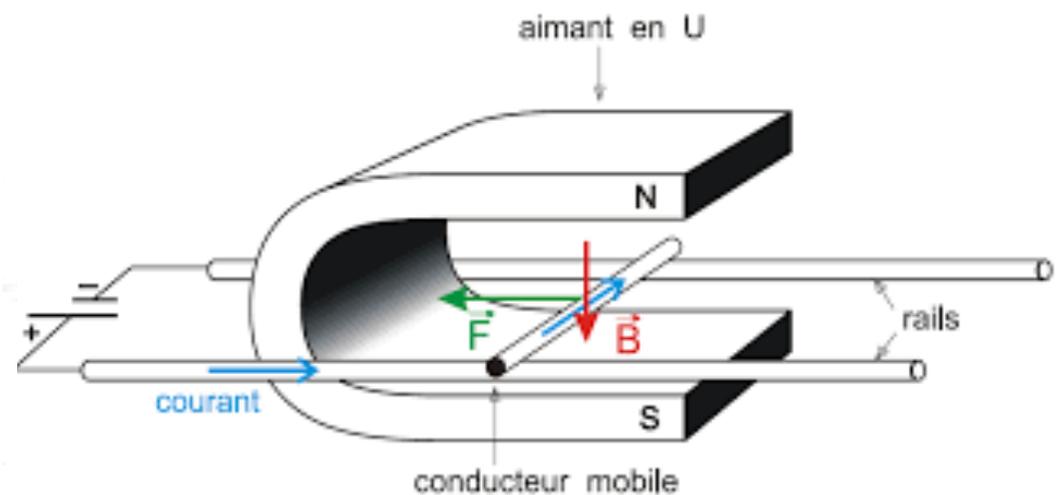
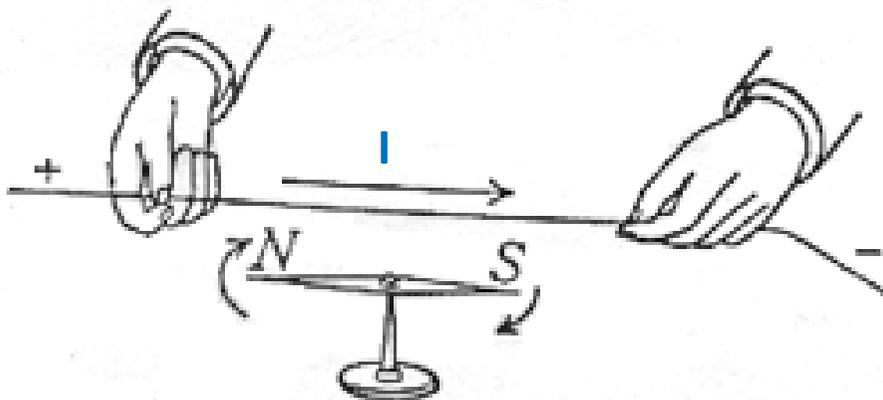
3. La force de Laplace : expérience des rails de Laplace => moteur



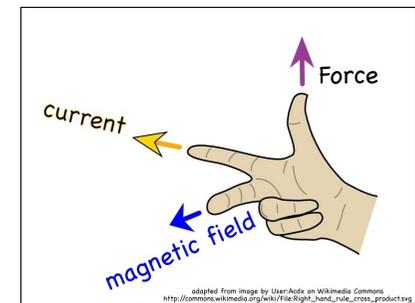
**Courant électrique + champ magnétique indépendants
=> Force perpendiculaire au courant et au champ !
et agissant sur le courant ...**

Moteur homopolaire

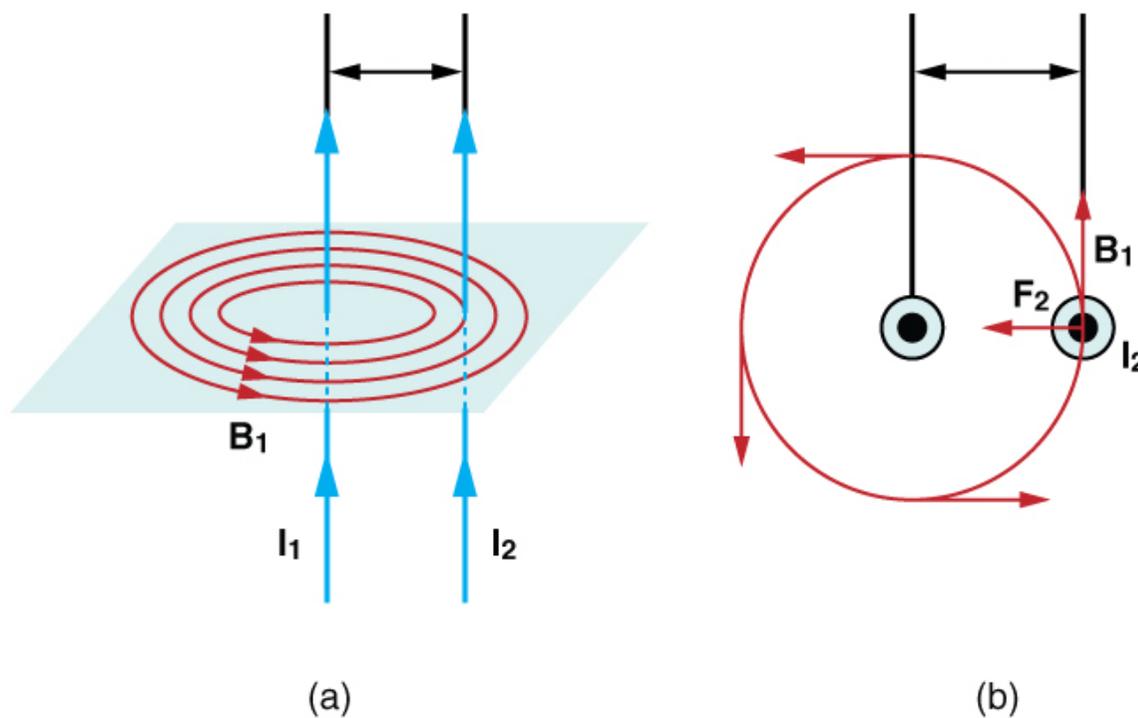
3. La force de Laplace : retour sur l'expérience d'Oersted



Courant électrique + champ magnétique indépendants
 \Rightarrow Force perpendiculaire au courant et au champ !
et agissant sur le courant ... **et force sur boussole ?**

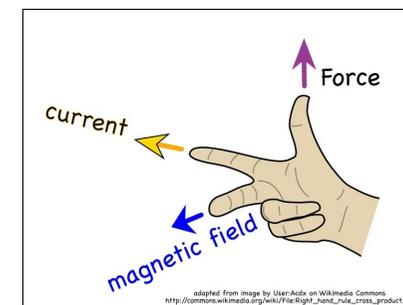


3. La force de Laplace : force entre 2 courants électriques

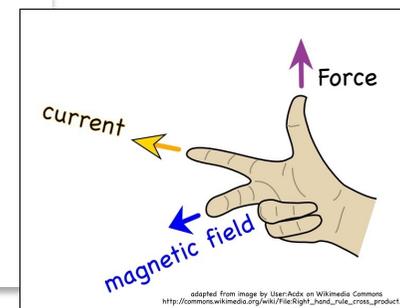
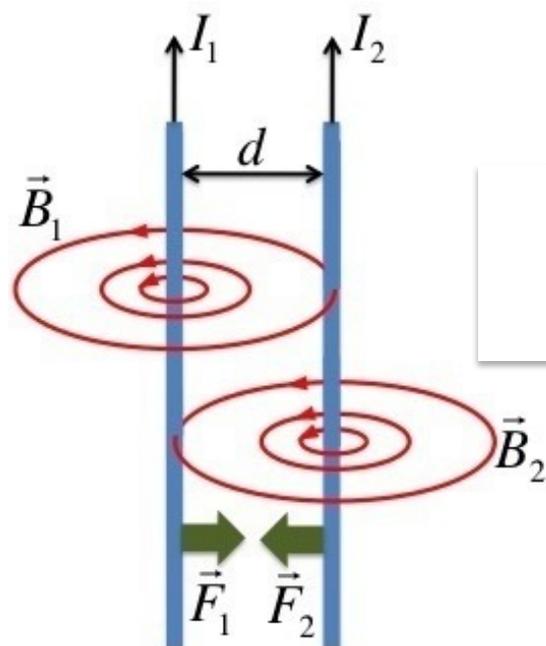


Force de Laplace sur I_2
(vue de dessus)

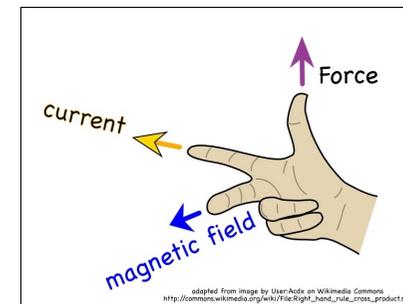
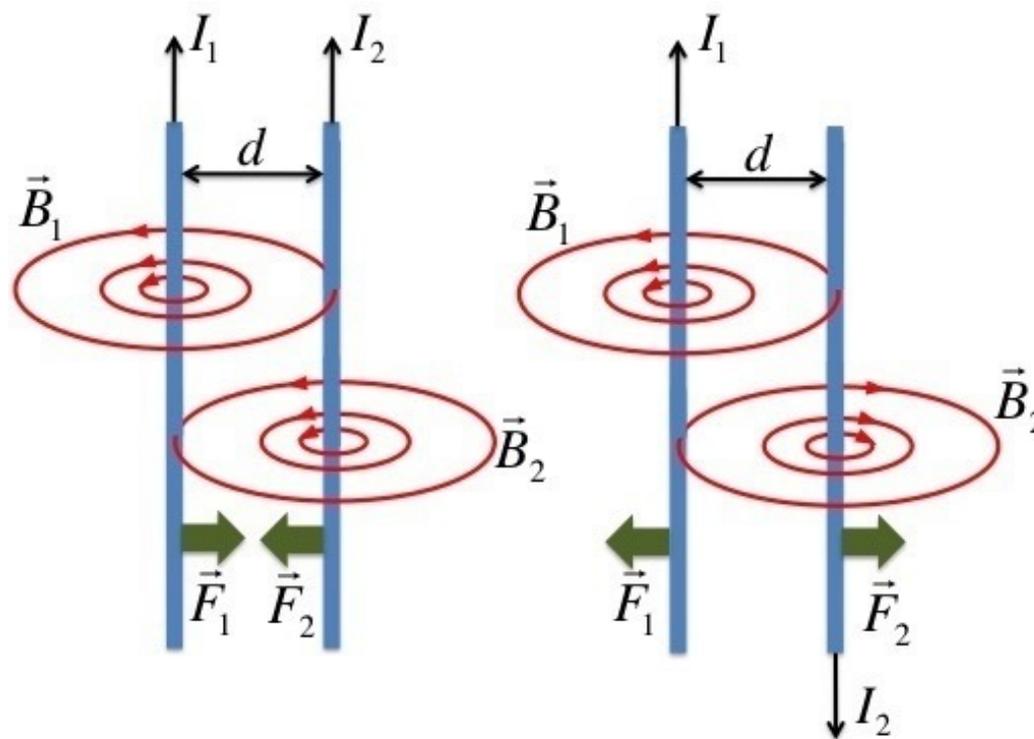
à cause de I_1 qui produit B_1



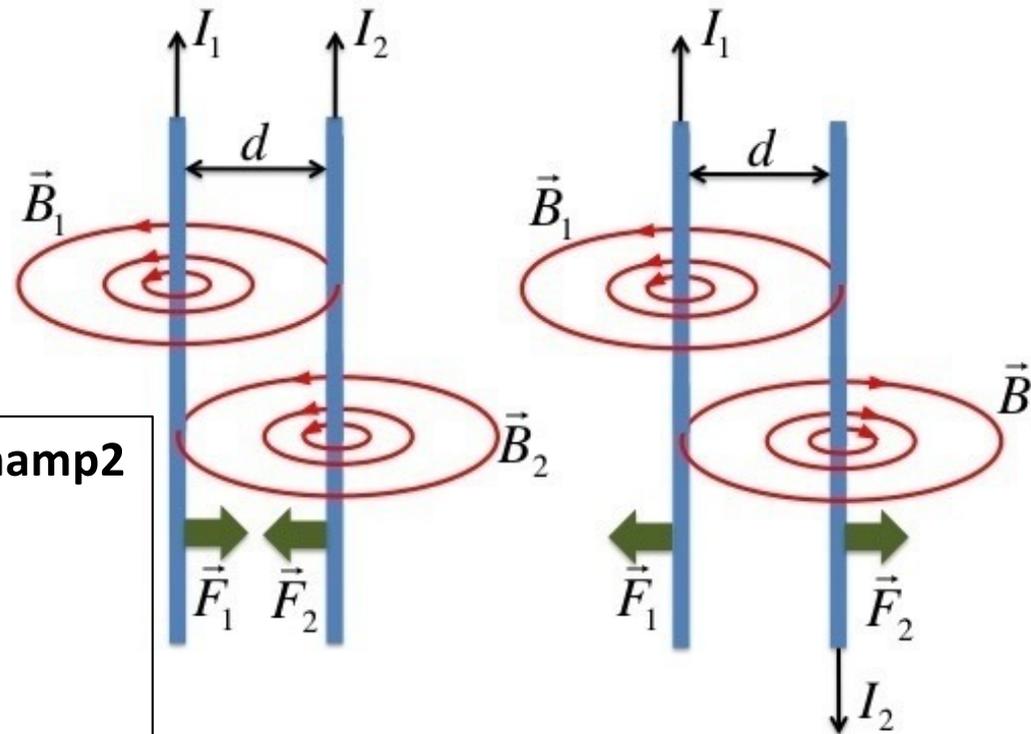
3. La force de Laplace : force entre 2 courants électriques



3. La force de Laplace : force entre 2 courants électriques

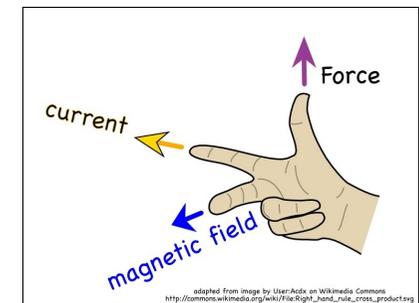


3. La force de Laplace : force entre 2 courants électriques

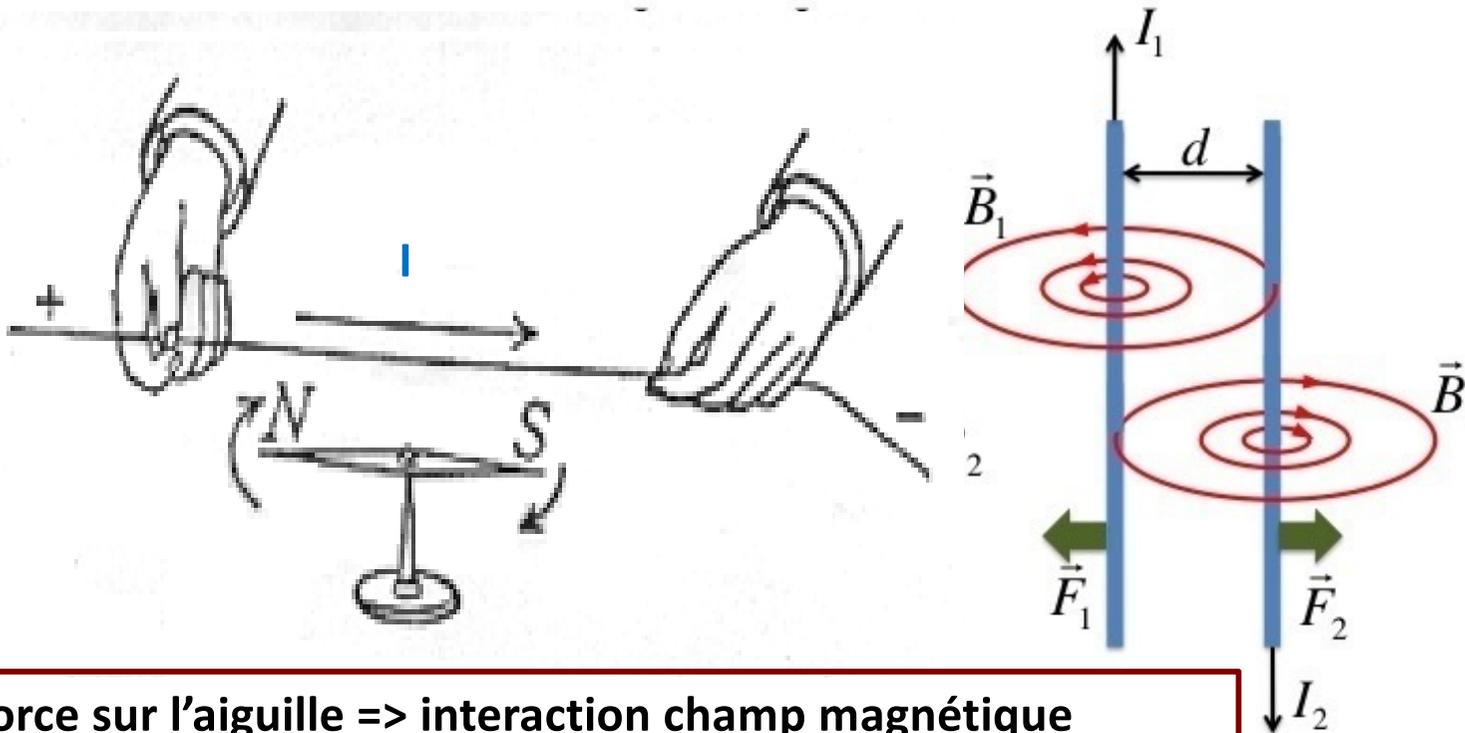


Interaction champ1/champ2
ou courant1/courant2

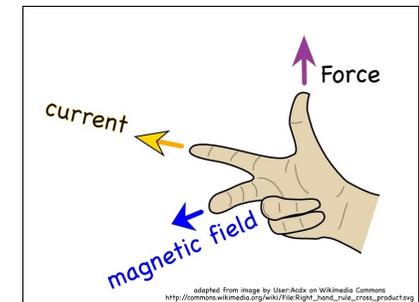
ou champ1/courant2
ou champ2/courant1



3. La force de Laplace : retour sur l'expérience d'Oersted

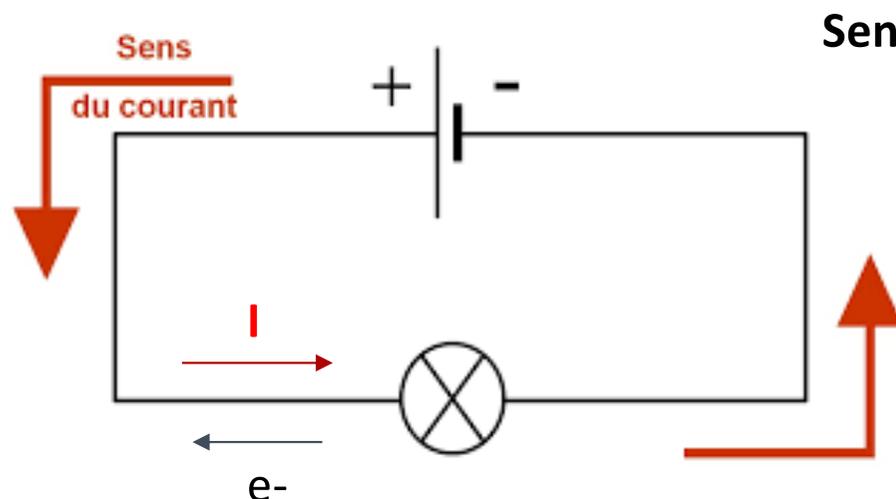


Force sur l'aiguille => interaction champ magnétique produit par le courant du fil avec un courant dans l'aiguille ?

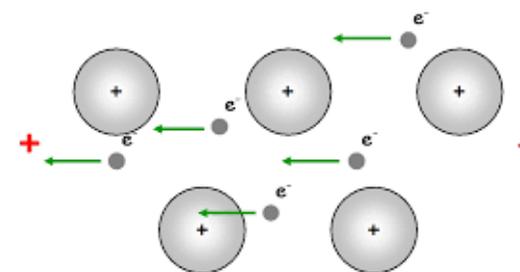


4. La notion de courants Ampériens

Rappel : ce qui fait le courant électrique dans un conducteur => mouvement des électrons imposé par une DDP (ou pile ou batterie)



Sens du courant = sens opposé des électrons



Électrons de valence : portion du fil

4. La notion de courants Ampériens

Question : mouvement des électrons dans un aimant/aiguille de boussole ?



André Marie Ampère (1775-1836)

N'ayant jamais été à l'école, Il lira et apprendra par coeur les vingt volumes de l'Encyclopédie à l'âge de 14 ans !

Ampère se révèle très tôt remarquable en mathématiques, il écrit notamment un traité sur les sections coniques dès l'âge de treize ans.

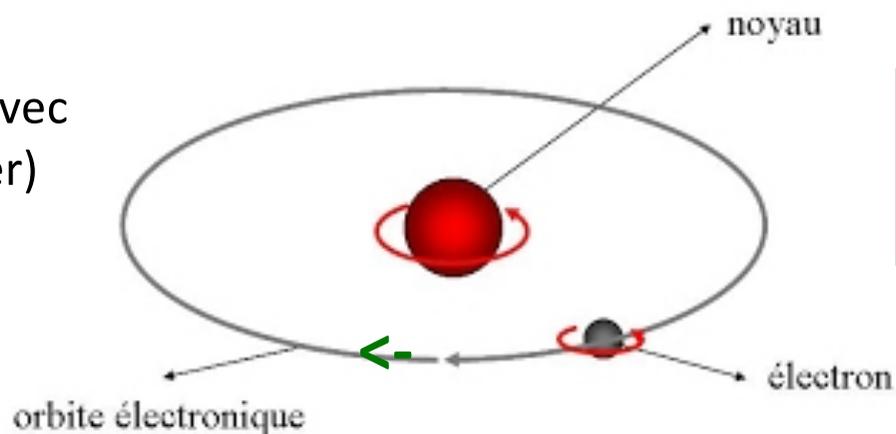
Ampère rencontre Oersted en juillet 1820 et met au point une théorie de l'électrodynamique dans les semaines suivantes.

4. La notion de courants Ampériens

Question : mouvement des électrons dans un aimant/aiguille de boussole ?

Niveau atomique

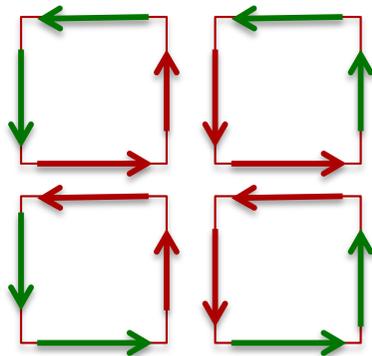
(on suppose un atome avec
1 électron pour simplifier)



**Spire microscopique
de courant**

4. La notion de courants Ampériens

Question : mouvement des électrons dans un aimant/aiguille de boussole ?

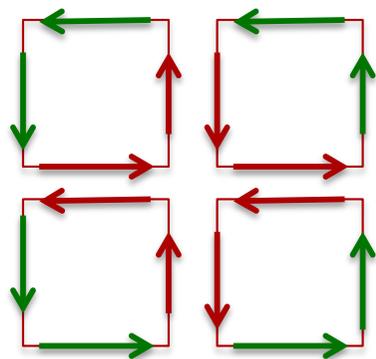


**4 spires microscopiques carrées voisines
pour faciliter l'explication**

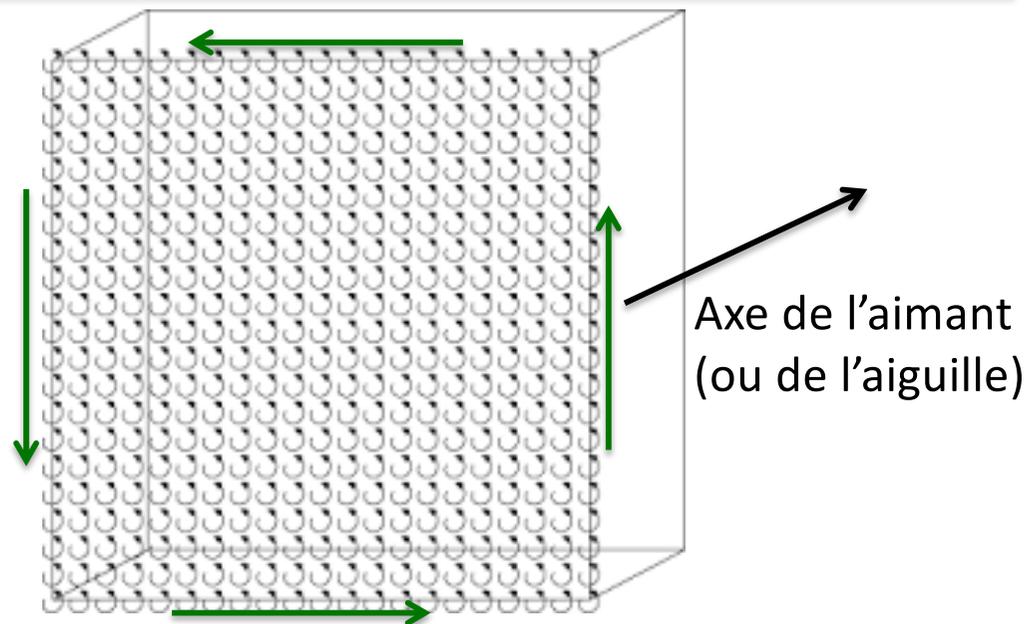
=> Seul compte le déplacement extérieur !

4. La notion de courants Ampériens

Question : mouvement des électrons dans un aimant/aiguille de boussole ?

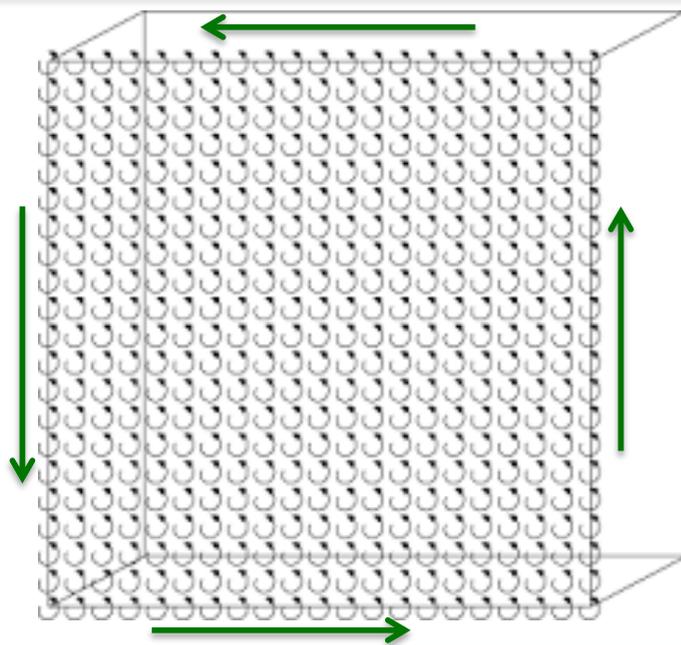


⇒ Déplacement en surface

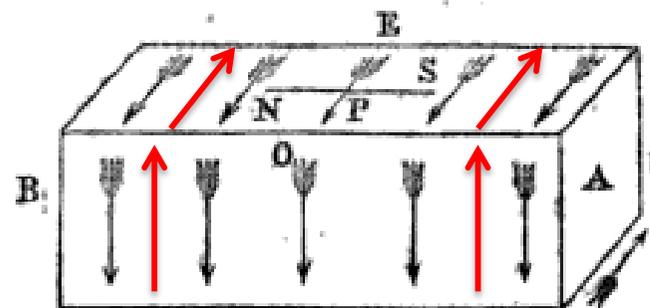


4. La notion de courants Ampériens

Question : mouvement des électrons dans un aimant/aiguille de boussole ?

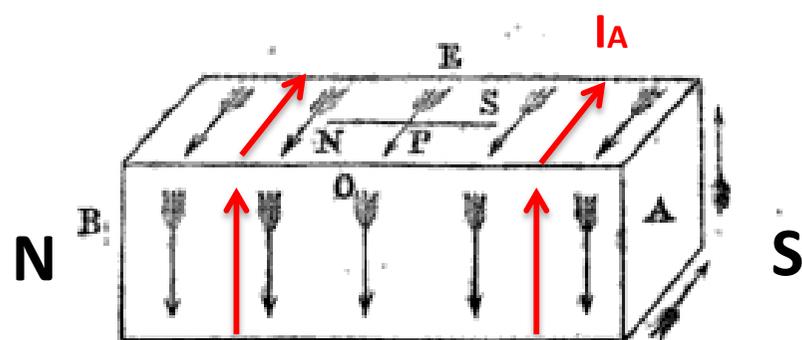


Dessin d'Ampère

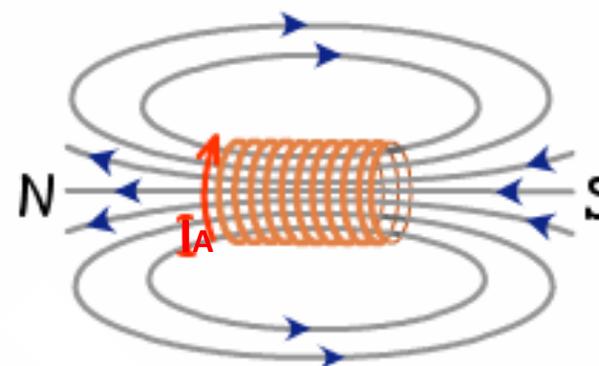


Sens des électrons qui contribuent à fabriquer un courant virtuel en surface (en sens inverse en rouge)

4. La notion de courants Ampériens



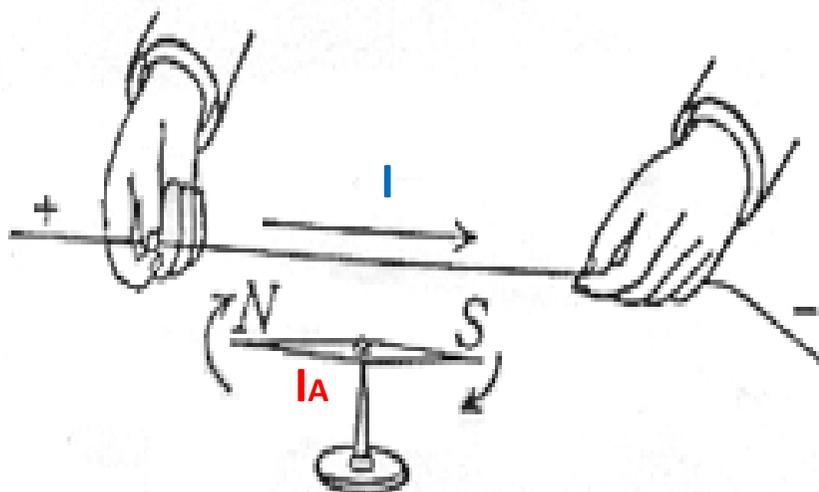
Analogie



Règle du Tire-bouchon

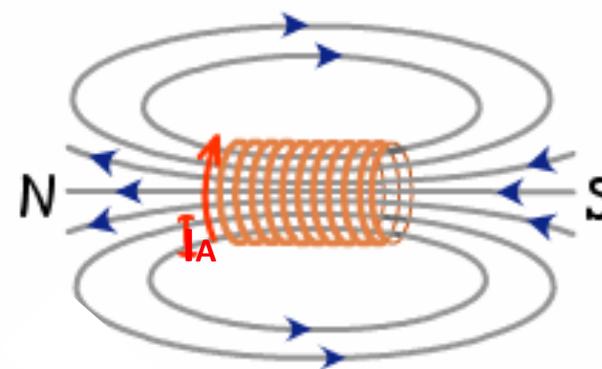
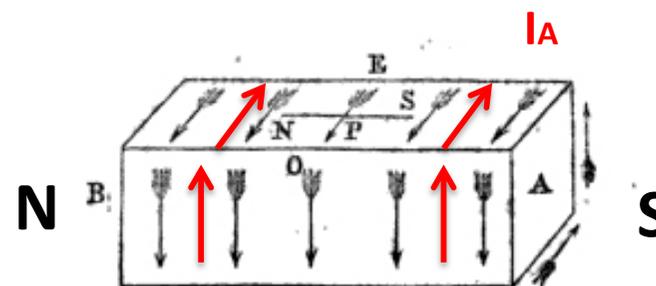
(pour déduire le sens du champ magnétique à l'intérieur de l'aimant)

4. La notion de courants Ampériens : retour sur l'expérience d'Oersted



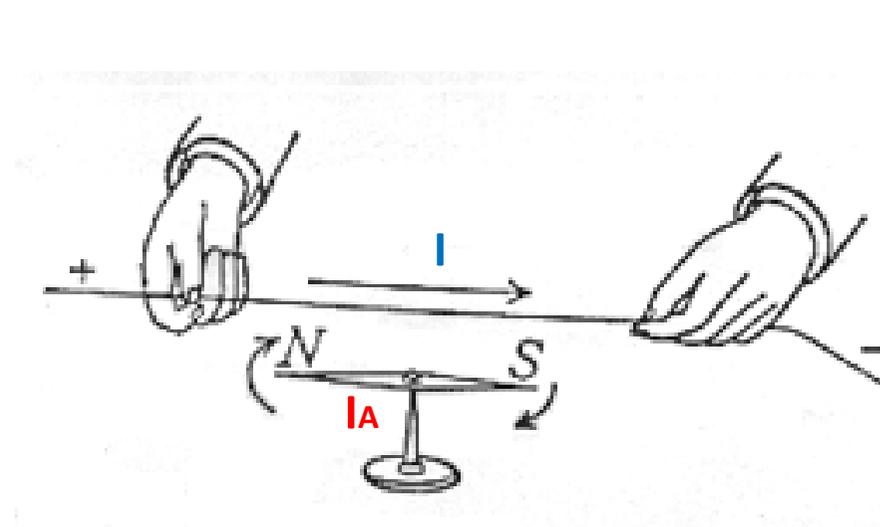
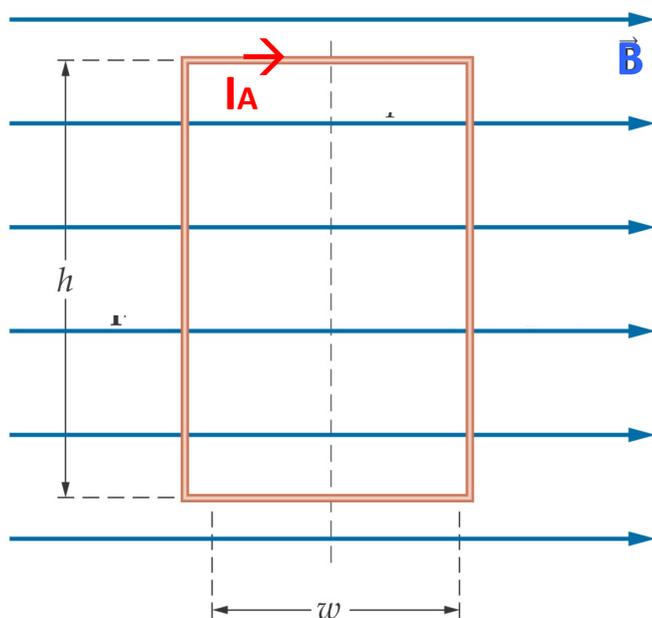
Force de Laplace sur l'aiguille ?

Courant électrique + champ magnétique indépendant
 \Rightarrow Force perpendiculaire au courant et au champ !
et agissant sur le courant de l'aiguille



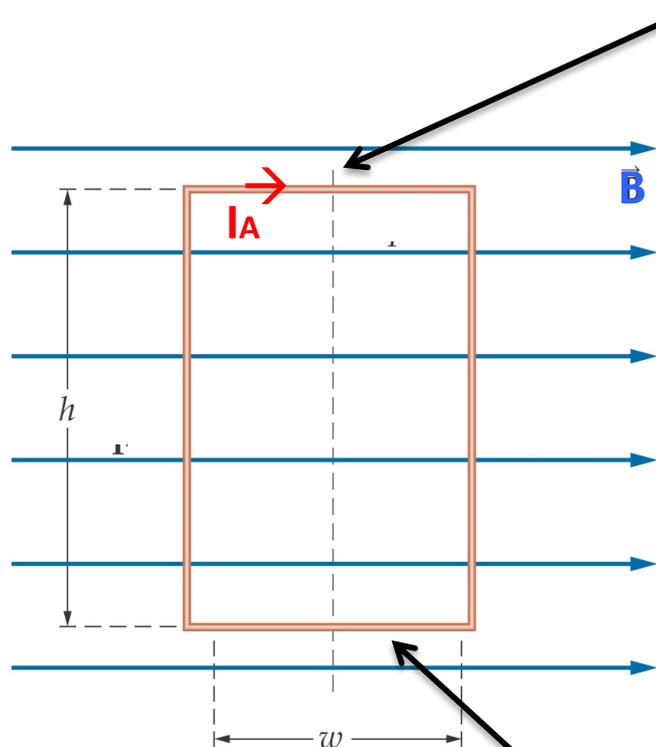
5. L'explication de l'expérience d'Oersted

Champ magnétique du fil + courant virtuel de l'aiguille

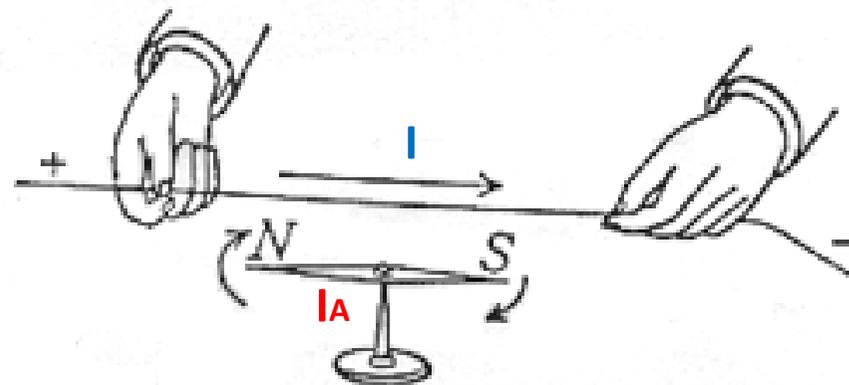


Vue de côté en se plaçant sous le fil

5. L'explication de l'expérience d'Oersted

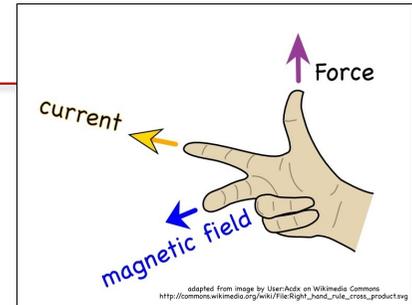


Force Laplace nulle (car \mathbf{I}_A et \mathbf{B} sont parallèles)

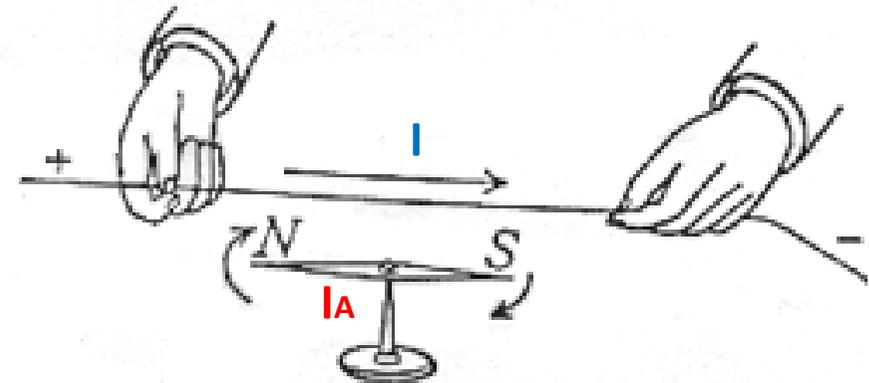
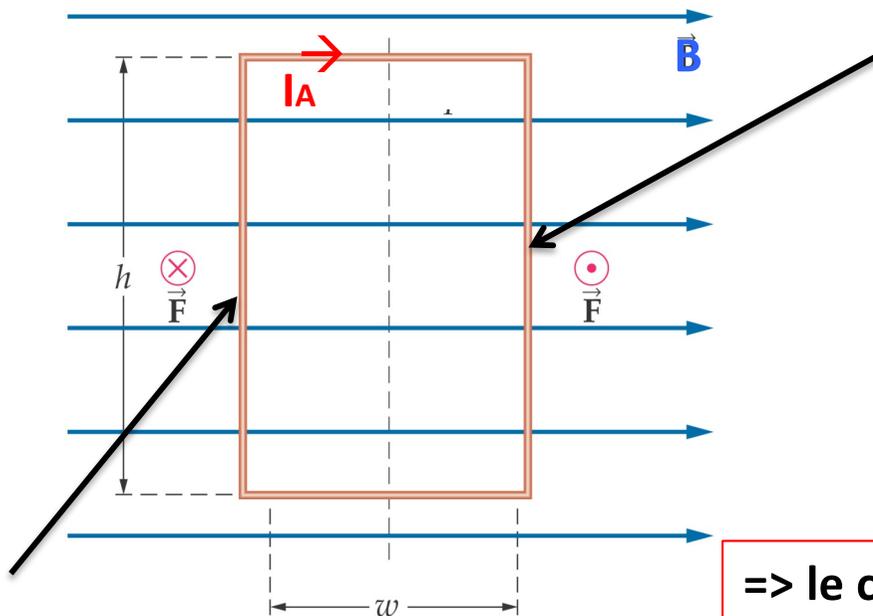


Force Laplace nulle

5. L'explication de l'expérience d'Oersted



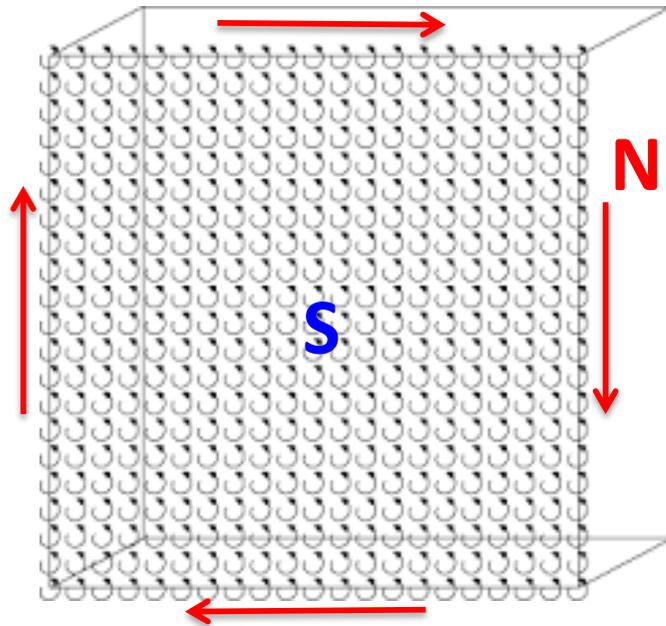
Couple de Forces de Laplace => fait PIVOTER !



=> le champ magnétique de la boussole (spire) tend à s'aligner avec le champ du fil

6. Réponses à nos questions : intérieur d'un aimant

Matériau dit ferrimagnétique/ferromagnétique



Nature d'un aimant:

Courants virtuels (ou Ampériens)

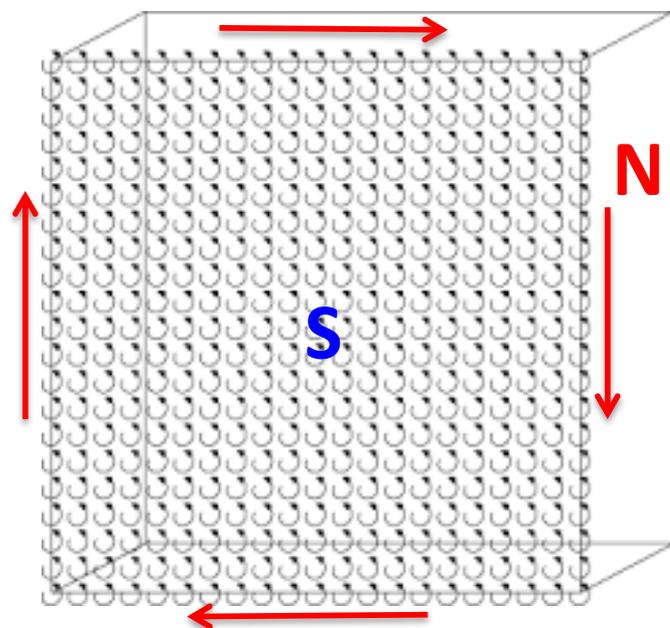
⇒ Champ magnétique similaire à celui d'un solénoïde

Niveau atomique: aimantation

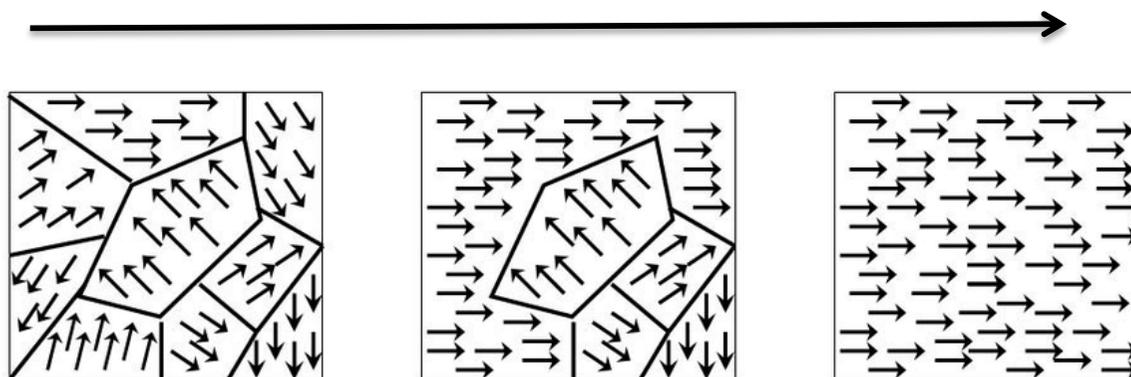
-> 'Chorégraphie d'électrons' qui est quasi-permanente une fois acquise !

6. Réponses à nos questions : intérieur d'un aimant

Matériau dit ferrimagnétique/ferromagnétique



Acquisition de l'aimantation

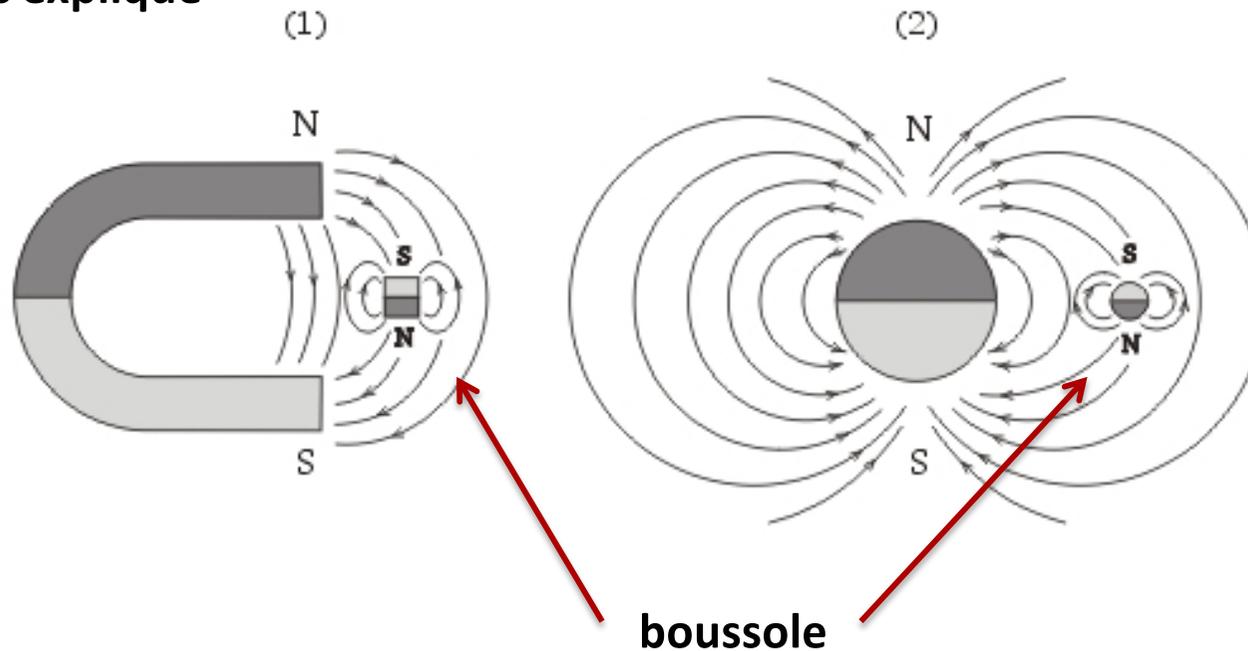


Domaines de Weiss (0,1 à 0,001 mm)

6. Réponses à nos questions : intérieur d'un aimant/aiguille boussole

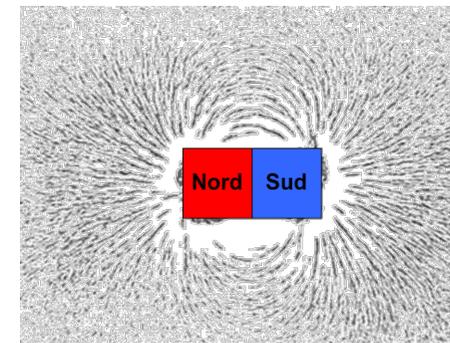
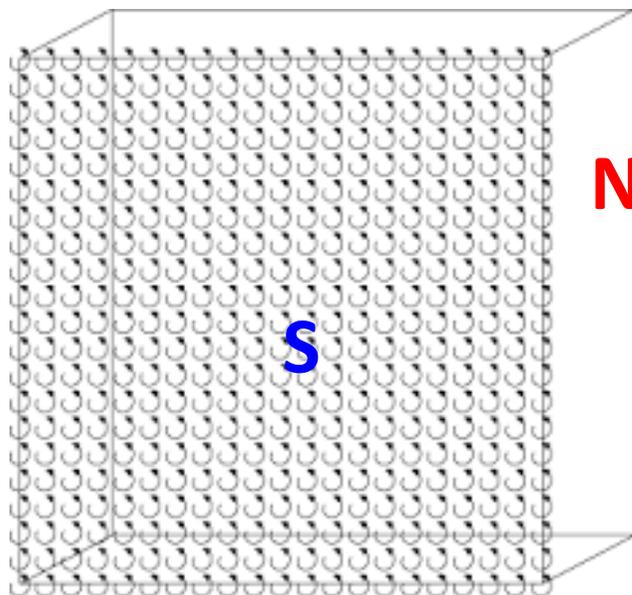
Boussole => aiguille = mini-aimant (magnétisation faible)

L'orientation s'explique



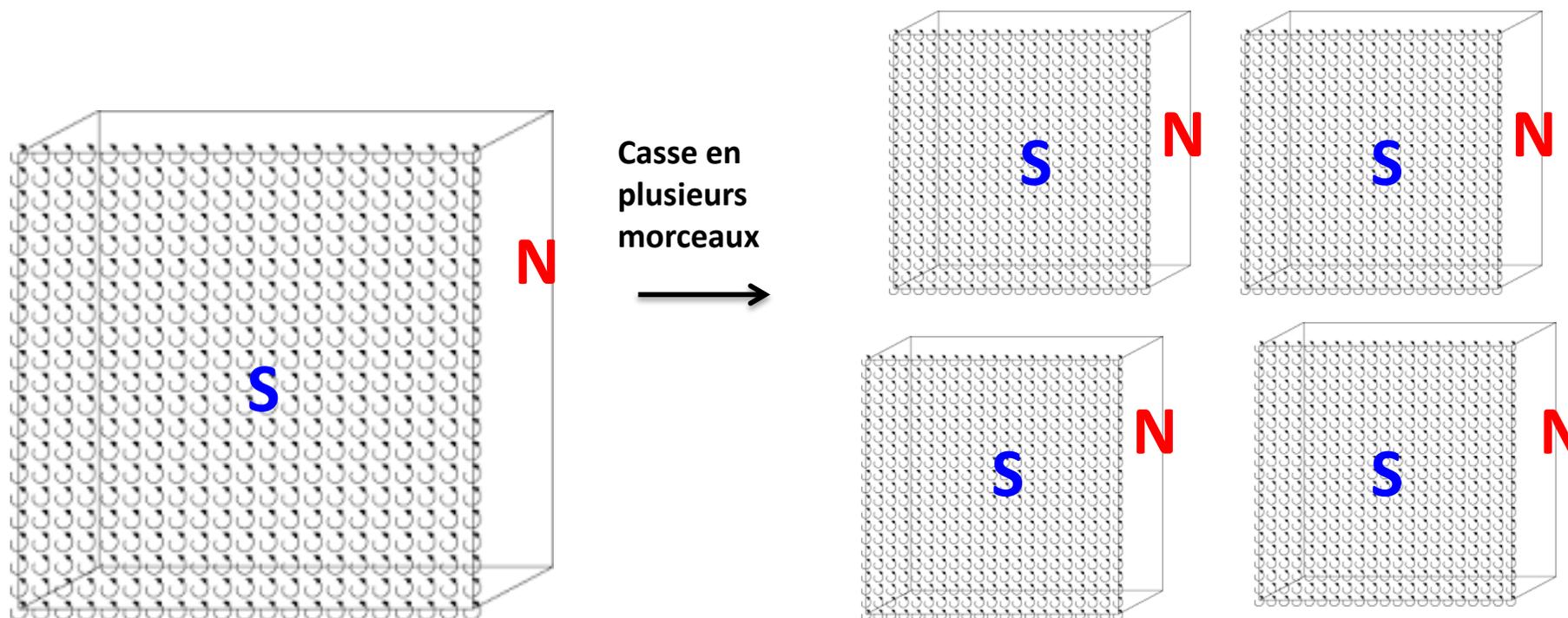
6. Réponses à nos questions : limaille de fer

Matériau dit paramagnétique (cas du Fer)

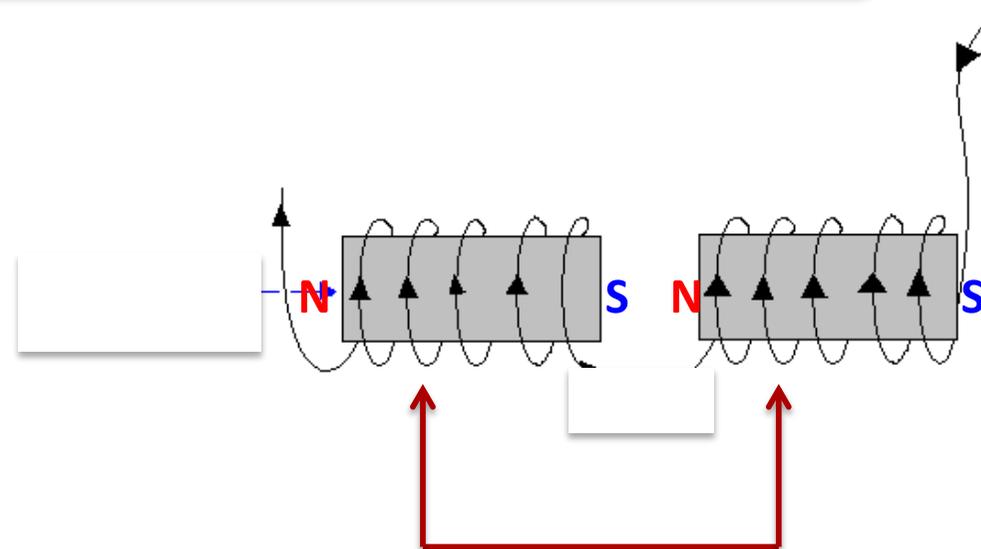
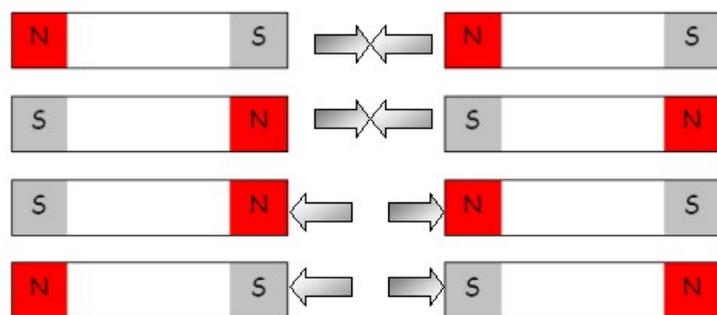


'Chorégraphie d'électrons' est temporaire (acquise en présence d'un champ magnétique extérieur, et cesse si on enlève le champ extérieur)

6. Réponses à nos questions : dipolaire (pas de champ monopolaire)

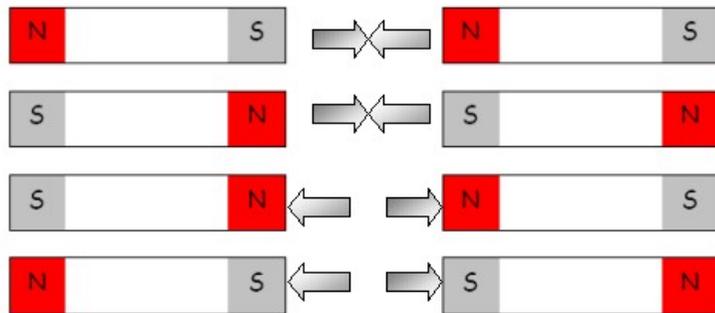


6. Réponses à nos questions : interaction entre aimants

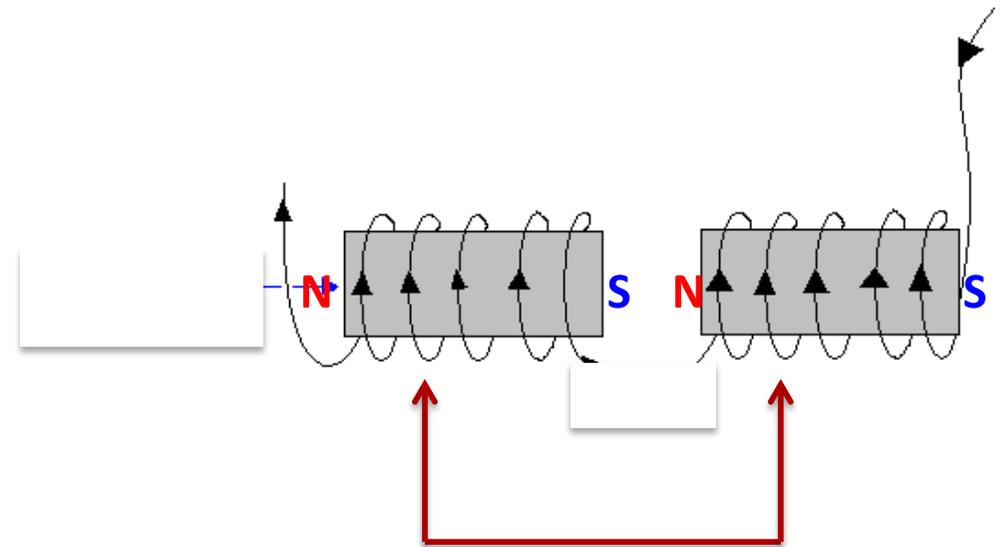


2 courants de même sens
s'attirent

6. Réponses à nos questions : interaction entre aimants



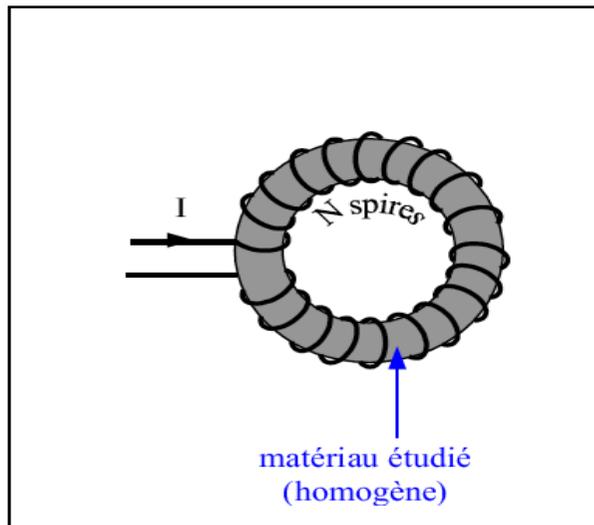
Limaille magnétisée paramagnétiquement est attirée



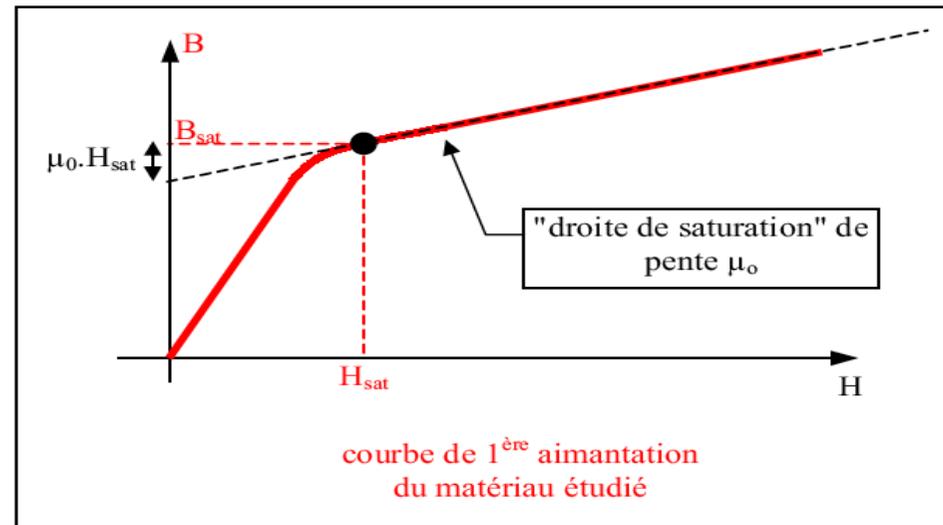
2 courants de même sens
s'attirent

6. Réponses à nos questions : fabrication des aimants

Alliage préformé (moulage et frittage)



magnétisation



Le champ magnétique associé à un courant électrique (solénoïde) est 'emprisonné' dans l'alliage => qui acquiert la chorégraphie électronique

Fabrication de l'alliage => https://www.youtube.com/watch?v=Jsc3NuJNo_A

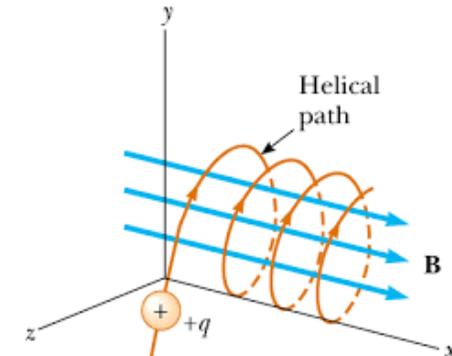
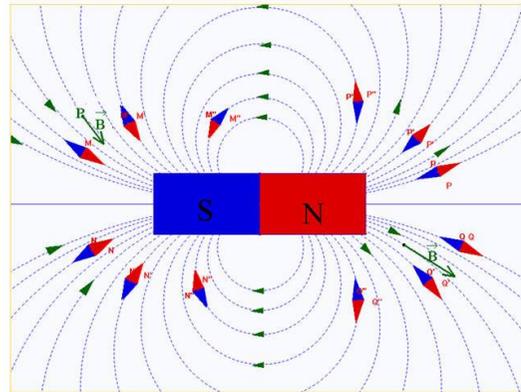
6. Réponses à nos questions : fabrication d'une boussole

Magnétisation de l'aiguille par frottements énergiques et répétés sur un aimant

Attention: le bout de l'aiguille frotté sera un Nord si frotté sur un Sud

-fragile car se démagnétiser facilement (champ magnétique fort, ou en chauffant)

6. Réponses à nos questions : paramètre reliant la force et le champ 'masse magnétique' ?



'Masse magnétique' m^* = paramètre manquant entre force et champ magnétique

-> charge q

-> vitesse V

c'est donc le courant électrique (flux de charge) * longueur

$$[m^*] = [q] \cdot [V] = [I] \cdot [L] = A \cdot m \quad \text{car } A = C \cdot s^{-1}$$

en accord avec l'unité pour B (le Tesla) -> Newton . A^{-1} . m^{-1}

(car force = $m^* B$)

6. Ordres de grandeurs de champs magnétiques

-> fil électrique droit , $I = 1,7 \text{ A} \Rightarrow$ champ magnétique à $d = 0,03 \text{ m}$ est $B = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
de l'ordre de la composante horizontale du champ terrestre

-> Champ terrestre (surface) $\Rightarrow 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

-> Lune $\Rightarrow 10^{-8} \text{ T}$ (résiduel ?)

-> Champ solaire (couronne) $\Rightarrow 10^{-2} \text{ T}$ (valeur moyenne)

-> Champ pulsar (étoile à neutrons magnétisée) $\Rightarrow 10^8 - 10^{11} \text{ T}$

-> aimants $\Rightarrow 10^{-1} \text{ T}$

-> IRM \Rightarrow jusqu'à 3 T

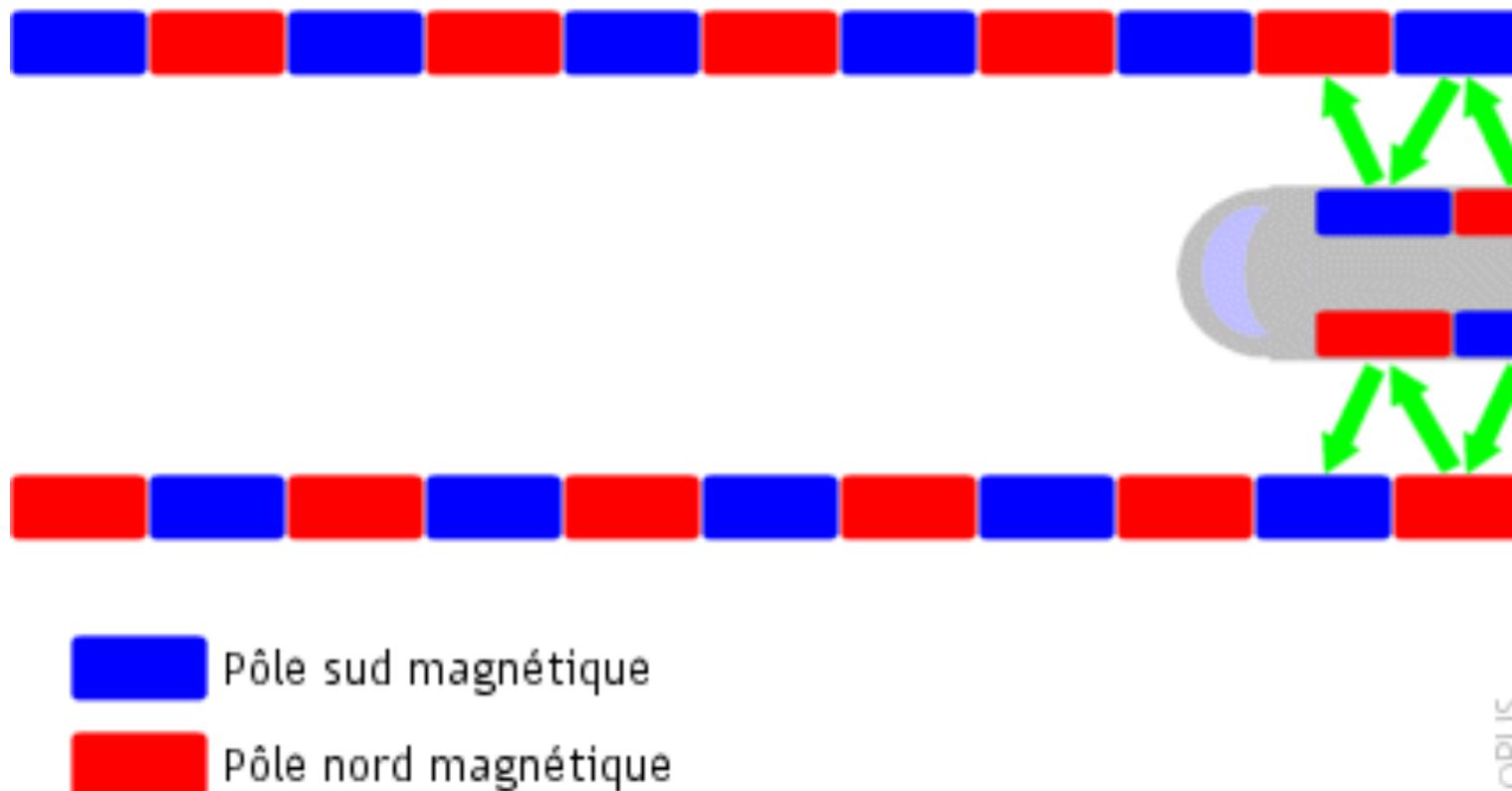
-> tokamaks $\Rightarrow 10 \text{ T}$

(record pour un électro-aimant -> 45 T pour champ statique)

-> milieu interstellaire $\Rightarrow 10^{-7} \text{ T}$

-> corps humain $\Rightarrow 10^{-15} \text{ T}$

De l'expérience d'Oersted ...



© OPUS

Principe du train à sustentation magnétique (Maglev)

De l'expérience d'Oersted ...

Equations de Maxwell (1865)



James Clerk Maxwell 1831-1879

And God said

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

and there was light.

De l'expérience d'Oersted ...

La semaine prochaine – troisième cours

Champs magnétiques d'astres en rotation, et les colères du champ magnétique solaire

