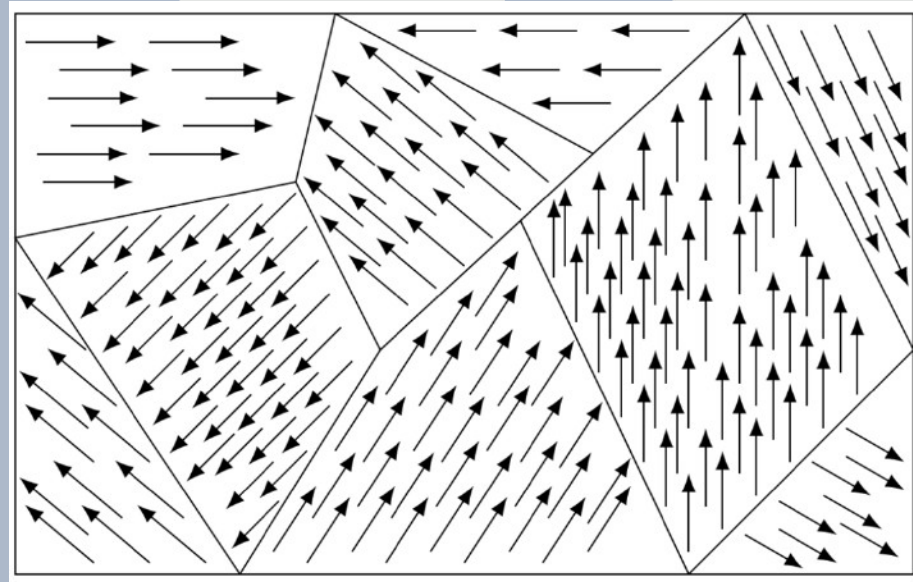


Électromagnétisme

Chapitre 2 - Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries



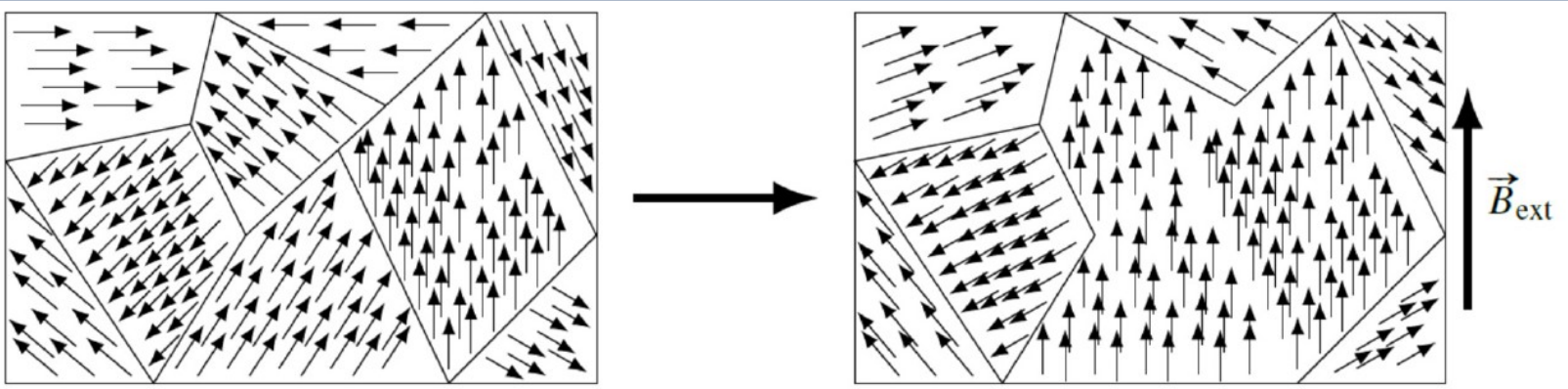
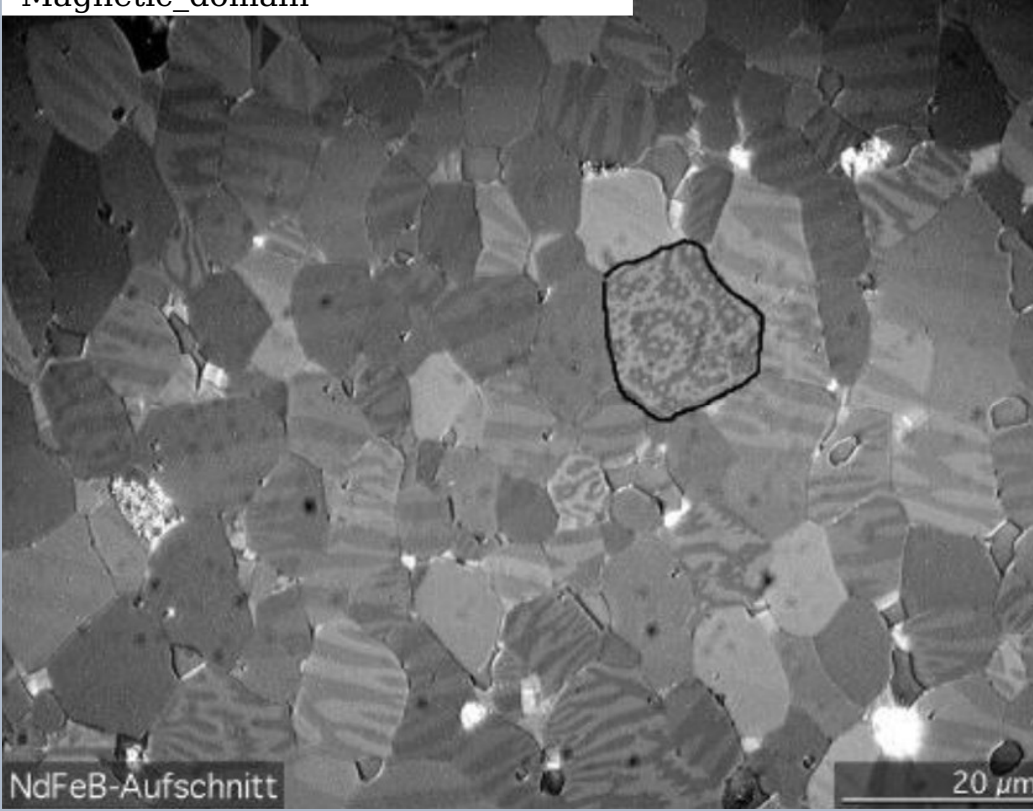
- Chapitre 1 - Champ magnétique - Force de Lorentz
- **Chapitre 2 - Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries**
- Chapitre 3 - Induction électromagnétique

But : Calcul du *champ magnétique* en régime permanent et dans l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires **A.R.Q.S.** (régimes lentement variables) :
magnétostatique

spins alignés

Le ferromagnétisme et diamagnétisme pas au programme....
Ci-dessous : domaine de Weiss etc...

en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_domain



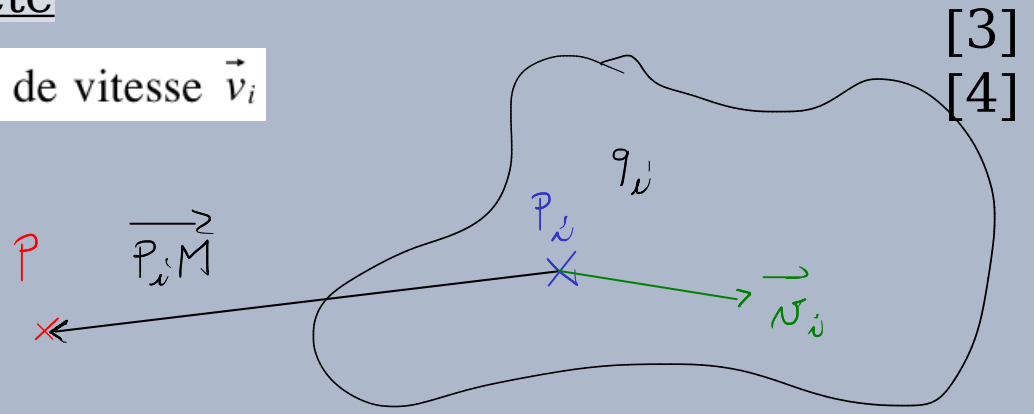
2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.0 Notion de distribution de courant

Principe de superposition : distribution discrète

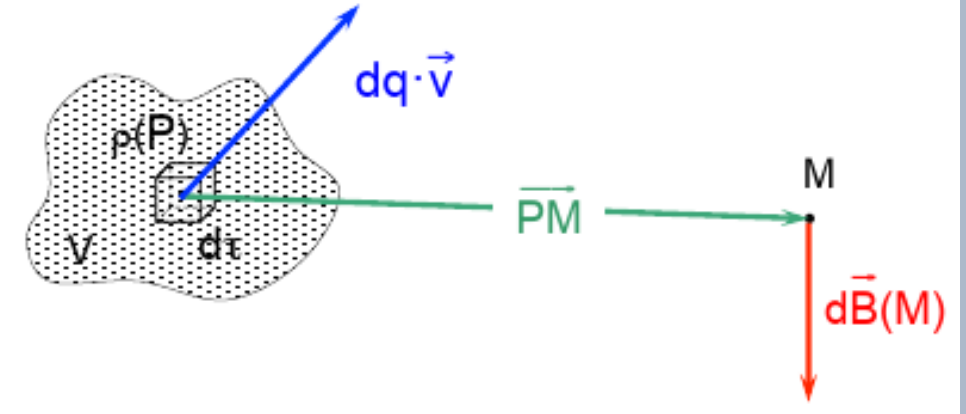
N particules de charges q_i situés en des points P_i et de vitesse \vec{v}_i

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{v}_i \wedge \vec{P_i M}}{\|\vec{P_i M}\|^3}$$



Toutes les charges créent un champ électrique, mais **seules les charges en mouvement** (courant) créent un **champ magnétique**.

Principe de superposition : distribution continue

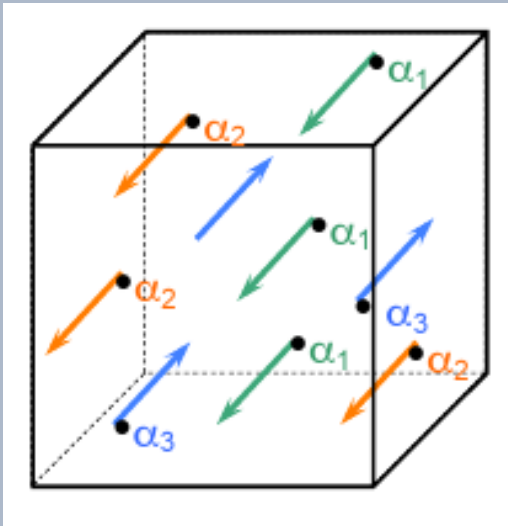


$\rho(P)$: densité de charges en P
 $\hookrightarrow dq$: charges élémentaires
 $\hookrightarrow \vec{dB}$ champ magnétique élémentaire

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.0 Notion de distribution de courant

[2]



volume infinitésimal $d\tau$

$$dq \cdot \vec{v} = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} q_{\alpha} \vec{v}_{\alpha} d\tau$$

ρ_{α} : densité de particules de type α (ayant une charge q_{α})
 \vec{v}_{α} : vitesses des particules de type α

$$\vec{j} = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} q_{\alpha} \vec{v}_{\alpha}$$

densité de courant flux de charges par unité de temps

Distribution volumique quelconque de charges en mouvement

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} d\tau$$

∀ géométrie

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.1 Loi de Biot et Savart

a) **Énoncé** (Postulée par Jean-Baptiste Biot et Félix Savart (1820) à partir d'observations expérimentales)

[2]
[3]
[4]

Fil filiforme parcouru par un courant I : champ mag. en M créé par l'élément de courant $I d\vec{\ell}$ (P) en P

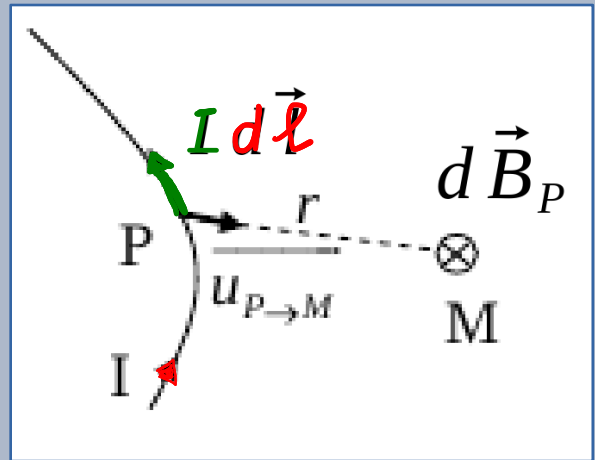
champ magnétique élémentaire.

$$d\vec{B}_P(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3}$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$dq \vec{v} = dq \frac{d\vec{\ell}}{dt}$$

$$= \frac{dq}{dt} d\vec{\ell} = I d\vec{\ell}$$



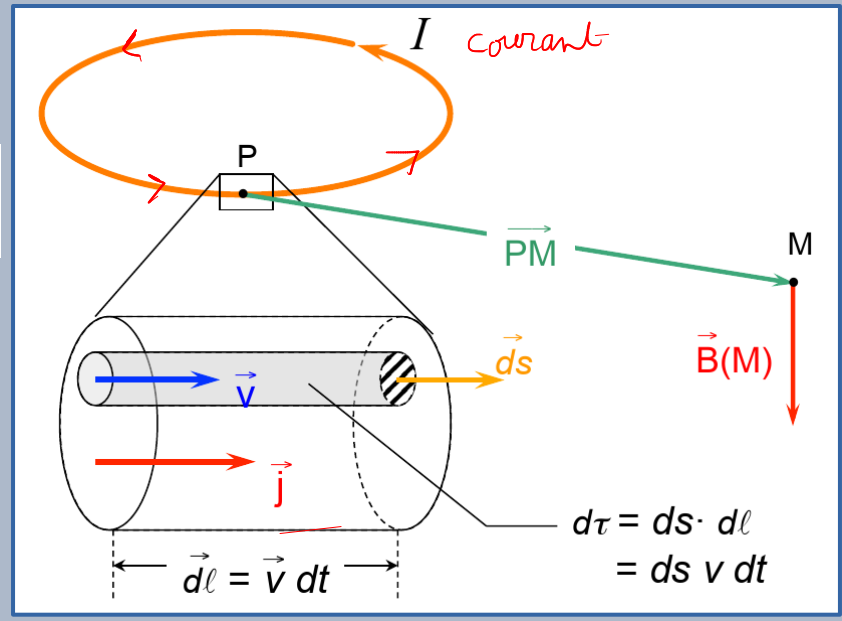
μ_0 : perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ en $H.m^{-1} = kg.m.A^{-2}s^{-2} = T.m.A^{-1}$ (H : Henri)

$\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ en S.I., avec c la vitesse de la lumière dans le vide

$$I = \oint (\vec{j}) \cdot d\vec{s}$$

\vec{j} : densité de courant
(flux de charges par secondes)

$C \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$



2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.1 Loi de Biot et Savart

Démonstration

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{P \in \text{volume}} \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} d\tau \quad [2]$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{circuit}} dl \iint_S \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} ds \quad [3]$$

$$\quad [4]$$

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{circuit}} \left[\frac{\iint_S \vec{j}(P) ds}{PM^3} \right] dl \wedge \vec{PM} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\text{circuit}} \left[\frac{\iint_S j(P) ds}{PM^3} \right] d\vec{l} \wedge \vec{PM} \quad \vec{j} = j \vec{e}$$

avec $\iint_S j(P) ds = I$ courant traversant la section S

Champ total

$$\vec{B}(M) = \int_{P \in \text{fil}} d\vec{B}_P(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{P \in \text{fil}} \frac{I d\vec{l}(P) \wedge \vec{PM}}{PM^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{P \in \text{fil}} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2}$$

$$\vec{u}_{PM} = \frac{\vec{PM}}{PM} \text{ et } r = PM$$

Le champ magnétique n'est donc pas défini (donc ni continu) aux points où se trouve un courant filiforme.

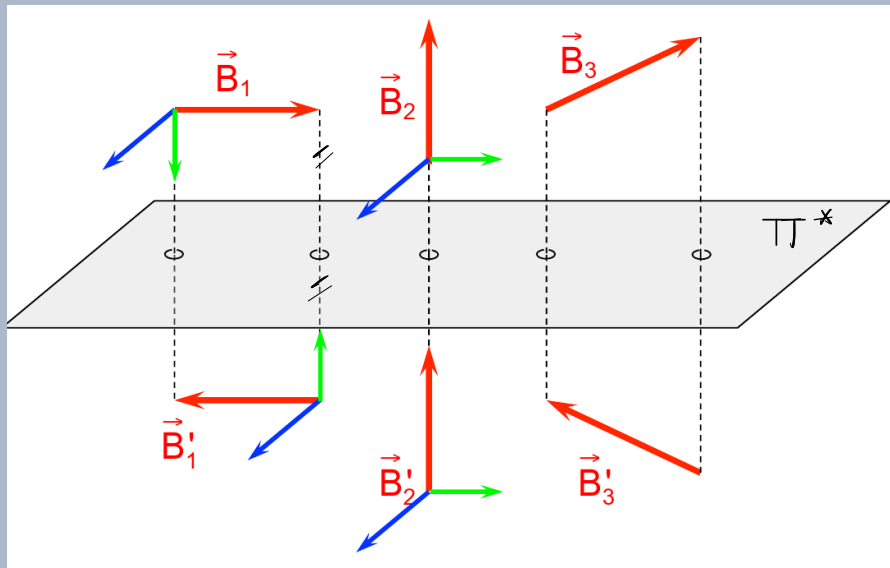
2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.1 Loi de Biot et Savart

b) Continuité et discontinuité du champ

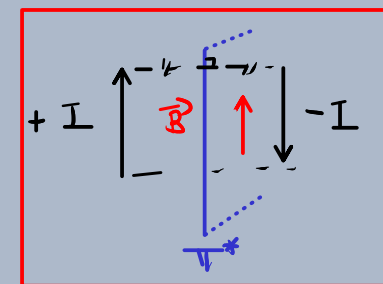
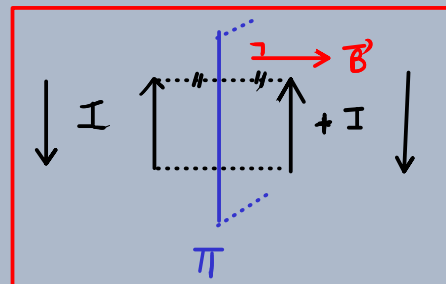
- $\vec{B}(M)$ est **continu** en M lorsque M est dans une **distribution volumique** de courant,
- $\vec{B}(M)$ est **discontinu** en M lorsque M est **sur une nappe de courant surfacique**,
- $\vec{B}(M)$ **diverge** en M lorsque M est **sur une distribution linéique** de courant.

c) Transformation des vecteurs axiaux



cf distribution de courant \vec{I} (charges en mouvement) $\uparrow \vec{I}$

- Si la source du champ \vec{B} possède un **plan de symétrie**, alors le **champ \vec{B} est perpendiculaire à ce plan**. π
- Si la source du champ \vec{B} possède un **plan d'antisymétrie**, alors le **champ \vec{B} est contenu dans ce plan**. π^*



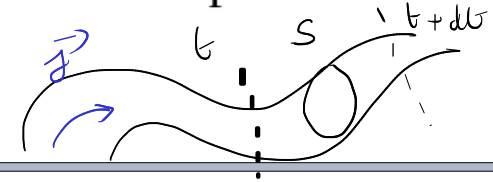
2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.2 Invariances d'une distribution de courant

a) Densité de courant \vec{j}

L'**intensité** du courant I est la charge qui traverse une section S de fil par unité de temps. [2]

Soit la charge dQ qui travers S pendant dt : $I = \frac{dQ}{dt}$



Régime *permanent* = I indépendant du temps t .

A.R.Q.S. : $I(t)$ varie lentement dans le temps t .

a.1) Courant volumique

Vecteur densité volumique de courant \vec{j} : $I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$ avec S une section du fil.

$$I = \Phi(\vec{j})$$

$$\vec{j} : C \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$$

- Charges mobiles identiques, même vitesse :

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$

avec n la densité de porteurs de charges mobiles q de vitesse \vec{v}

- Plusieurs types de charges mobiles :

$$\vec{j} = \sum_k n_k q_k \vec{v}_k$$

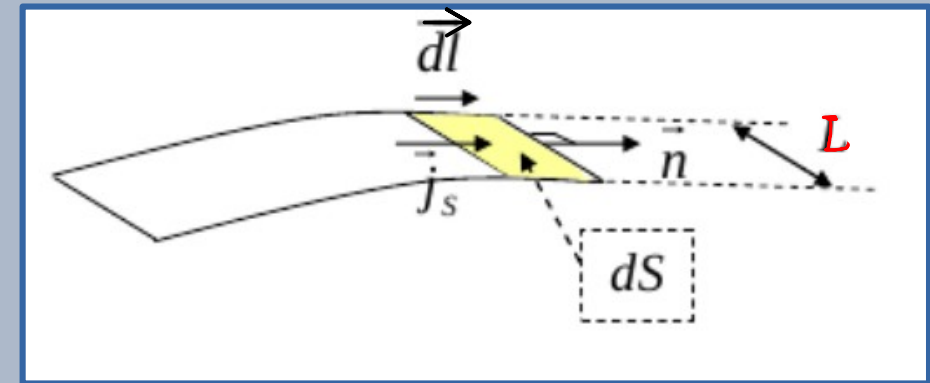
avec n_k la densité de porteurs de charges mobiles q_k de vitesse \vec{v}_k

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.2 Invariances d'une distribution de courant

a.2) Courant surfacique

1 des 3 dim. de la distribution de courant
 << 2 autres dimensions
 ⇒ nappe de courant d'épaisseur négligeable (courant surfacique)



Vecteur densité surfacique de courant \vec{j}_s

$$I = \int_L \vec{j}_s \cdot (dL \vec{n})$$

L largeur du fil

\vec{n} vecteur unitaire perpendiculaire à L

a.3) Courant linéique

2 des 3 dim. de la distribution de courant
 << 3^{ème} dimension
 ⇒ courant linéique

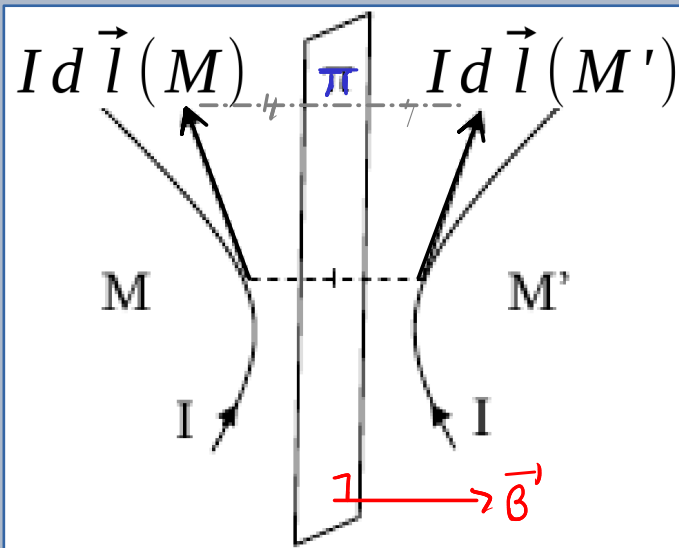
2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.2 Invariances d'une distribution de courant

b) Invariances et symétries d'une distribution de courant

[2]

- Une distribution de courant peut être **invariante** par **translation** et/ou par **rotation autour d'un axe**.
- **Plans de symétrie** et **anti-symétrie** pour la *distribution de courant*



Plan de symétrie π :

Quelque soient M et M' deux points symétriques par π :

Le courant en M' est symétrique du courant en M :

c-à-d $I d\vec{l}(M')$ est le symétrique de $I d\vec{l}(M)$ par π .

Plan d'anti-symétrie π^* :

Quelque soient M et M' deux points symétriques par π^* :

Le courant en M' est l'opposé du symétrique du courant en M :

c-à-d $-I d\vec{l}(M')$ est le symétrique de $I d\vec{l}(M)$ par π^* .

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.2 Invariances d'une distribution de courant

c) Conservation de la charge et loi des nœuds

[2]

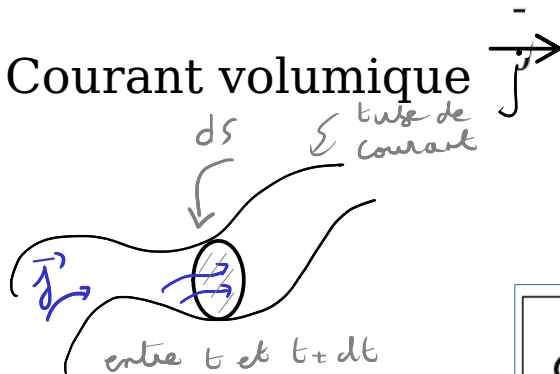
Conservation de la charge

$$\frac{dQ}{dt} + I_{\text{sortant}} = 0$$

$$-\frac{dQ}{dt} = I_{\text{sortant}}$$

• Q la charge dans une surface fermée S

• Courant volumique \vec{j}



$$-\frac{dQ}{dt} = \oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

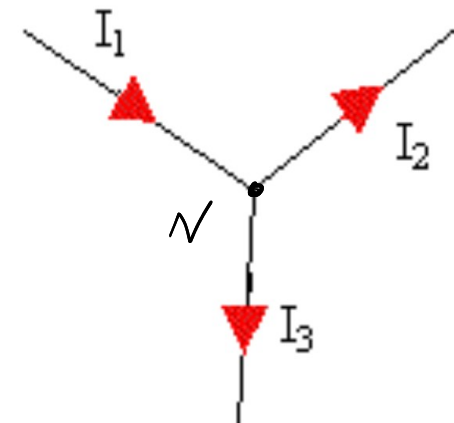
$$\oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

Régime permanent :

surface fermée

› Courant constant le long d'un fil

› Loi de nœuds $I_1 = I_2 + I_3$ au nœud N



2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

[2]

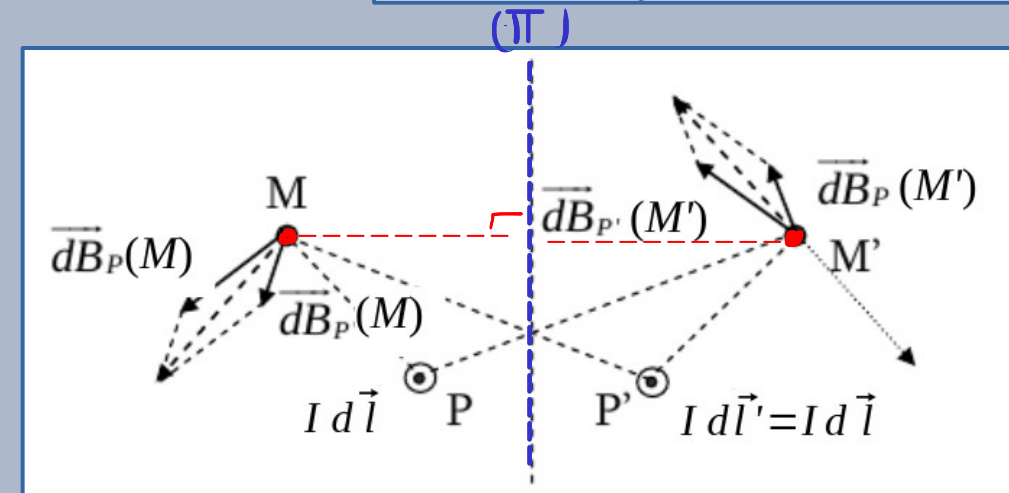
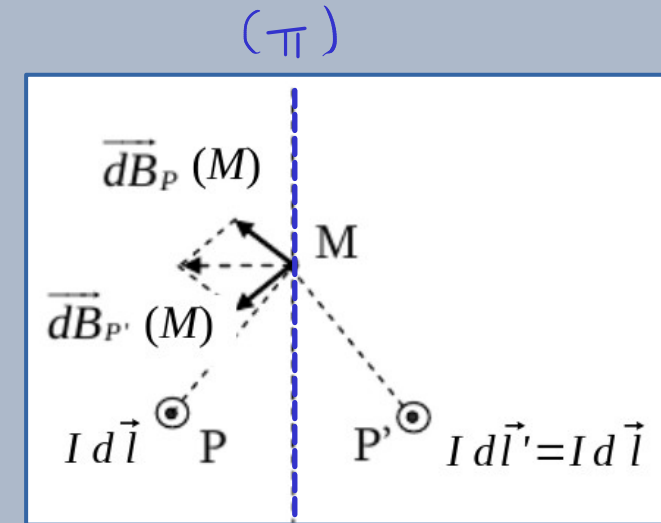
a) Symétries

Soit une distribution de courant symétrique par rapport au plan π :

Propriété 1 : Le champ $\vec{B}(M)$ en tout point M du plan de symétrie π est perpendiculaire à π .

→ 1 plan $\pi \Rightarrow$ direction de \vec{B}

Propriété 2 : Soient M et M' deux points symétriques par rapport à π : $\vec{B}(M')$ est l'opposé du symétrique de $\vec{B}(M)$ par rapport à π .



2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

[2]

b) Anti-symétries

Soit une distribution de courant anti-symétrique par rapport au plan π^* :

Propriété 1 : Le champ $\vec{B}(M)$ en tout point M du plan d'anti-symétrie π^* est colinéaire à π^* .

\hookrightarrow 2 plans $\pi^* \Rightarrow$ direction de \vec{B}

Propriété 2 : Soient M et M' deux points symétriques par rapport à π^* : $\vec{B}(M')$ est le symétrique de $\vec{B}(M)$ par rapport à π^* .

c) Invariances

- Si une distribution de courant est invariante par translation suivant l'axe (Oz) : $\vec{B}(M)$ est indépendant de z (coordonnée de M suivant (Oz)). (De même suivant (Ox) et (Oy) ...)
- Si une distribution de courant est invariante par rotation autour d'une d'axe (Oz) :
 $B(M) = \|\vec{B}(M)\|$ ne dépend pas de θ (en coordonnées cylindriques de M).
- Si une distribution de courant est invariante par rotation autour du point O : $B(M) = \|\vec{B}(M)\|$ ne dépend pas de θ et φ (en coordonnées sphériques centrées en O).

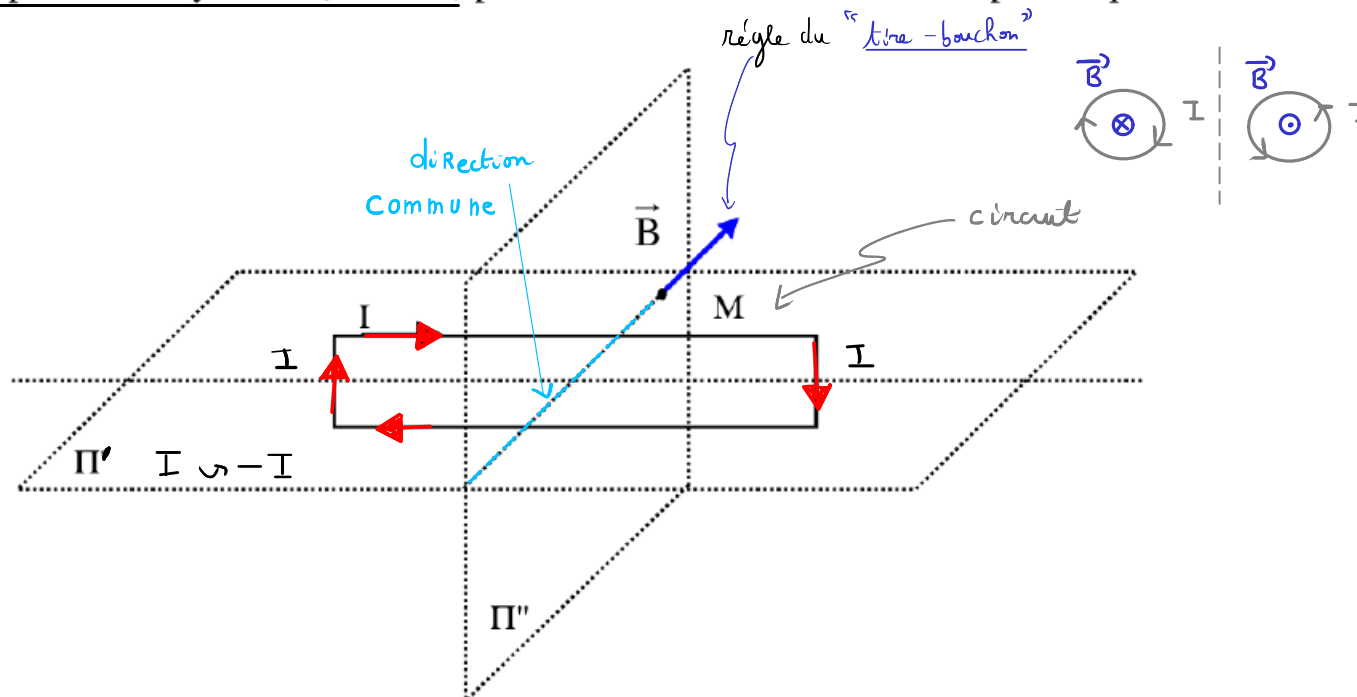
2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

Symétries et anti-symétries

[2]

1. La direction du champ magnétique en M est celle de la droite orthogonale à un plan Π de symétrie pour la distribution de courants et passant par M. $\vec{B} \perp \Pi$
2. Le vecteur champ magnétique en M est inclus dans tout plan d'antisymétrie Π^* pour la distribution de courants et passant par M. $\vec{B} \in \Pi^*$
3. La direction du champ magnétique en un point M est celle de la droite intersection d'au moins deux plans d'antisymétrie (Π' et Π'') pour la distribution de courants et passant par M.

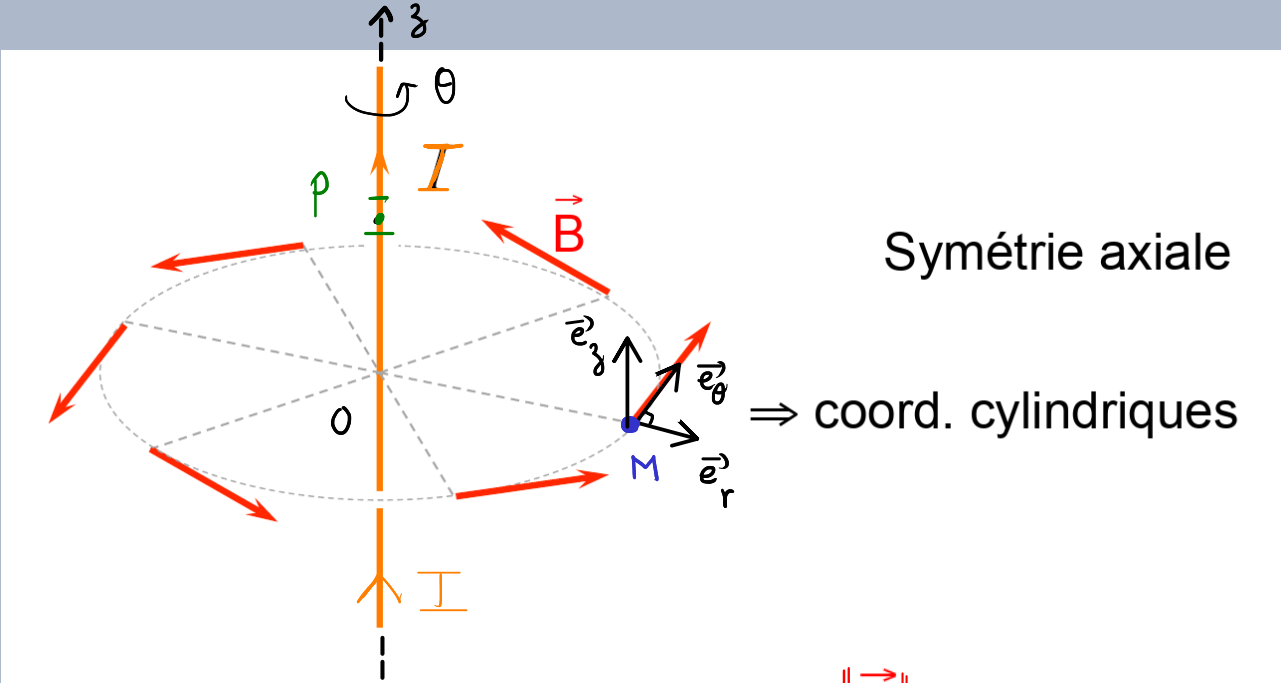


2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

Exemple : fil rectiligne infini parcouru par un courant I

Analyse des symétries [2]



$$\begin{aligned}
 & \bullet I d\vec{\ell} = I dz \vec{e}_z \\
 & \bullet \vec{PM} = \vec{OM} \vec{e}_r + \vec{PO} \vec{e}_z \\
 & \hookrightarrow d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3} \\
 & \bullet \vec{e}_z \wedge \vec{e}_r = \vec{e}_\theta \quad \text{direction de } \vec{B} \\
 & \bullet \vec{e}_z \wedge \vec{e}_z = \vec{0}
 \end{aligned}$$

- Invariance par rotation $\Rightarrow \|\vec{B}\|$ ne dépend pas de θ .
- Invariance par translation $\Rightarrow \|\vec{B}\|$ ne dépend pas de z .
- Les lignes de champ pour lesquelles $\|\vec{B}\| = C^{te}$ sont circulaires

$\vec{B} \wedge d\vec{L} = \vec{0}$

$$\vec{B}(\vec{r}) = B(r) \vec{e}_\theta, \quad \Pi_1^* = (M, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta) \quad \text{et} \quad \Pi = (M, \vec{e}_r, \vec{e}_z)$$

$$\vec{B} \in \Pi_1^* \quad \vec{B} \perp \Pi$$

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

d) Lignes et tubes de champ

[1][2]

Définitions :

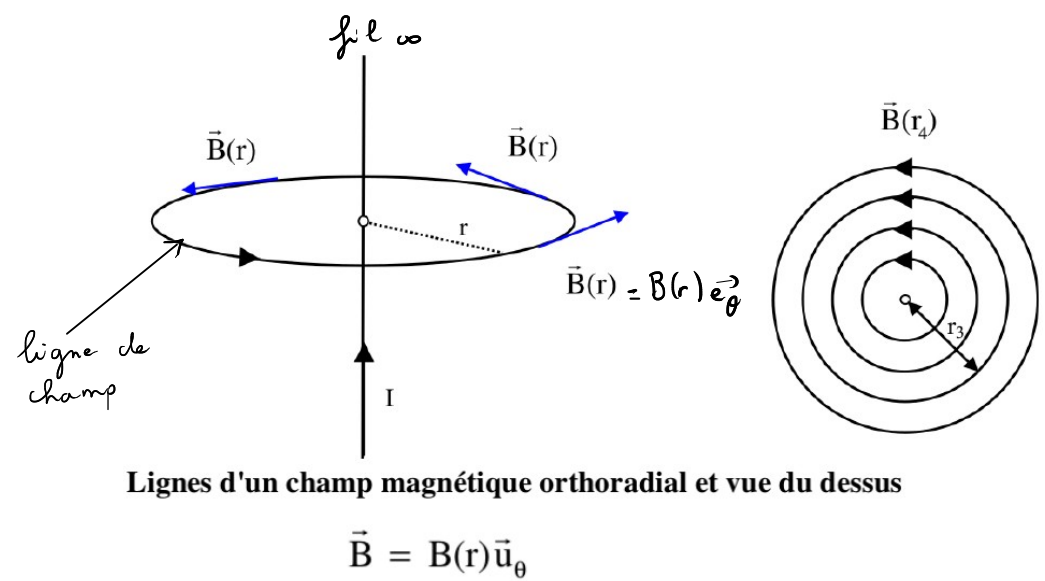
- Une **ligne de champ** de \vec{B} est une **courbe tangente** en tout ses points M à $\vec{B}(M)$.
- Un **tube de champ** de \vec{B} est un **ensemble de lignes de champ s'appuyant sur un contour fermé C** .



Propriétés :

- Deux lignes de champ ne peuvent pas se couper, sauf si en ce point $B = 0$.
- Les lignes de champs de \vec{B} sont fermées et tournent autour des sources de \vec{B} (courants), selon la règle de la main droite ou du tire-bouchon.

Exemple du fil infini parcouru par un courant uniforme :



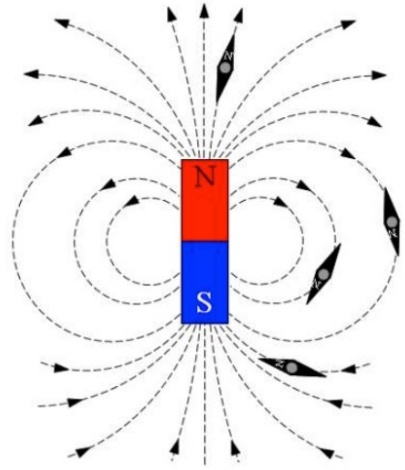
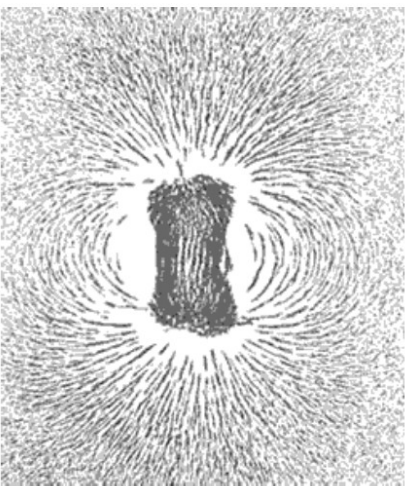
• $\vec{B} = B(r) \vec{e}_\theta$
 • $r = r_1 : B(r_1) = \text{constant}$
 ↳ lignes de champ
 ∥
 cercles

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

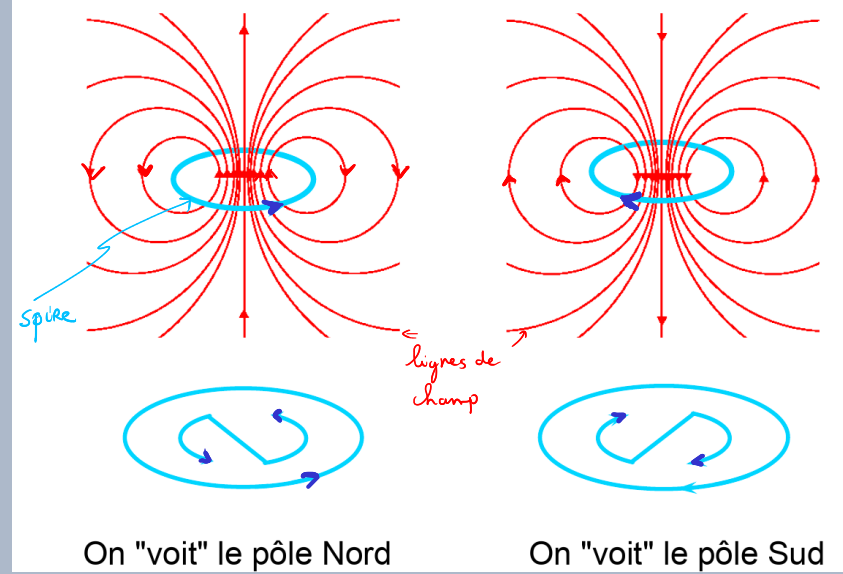
2.2.3 Direction de B en un point d'un plan de sym. ou d'antisym.

Exemples

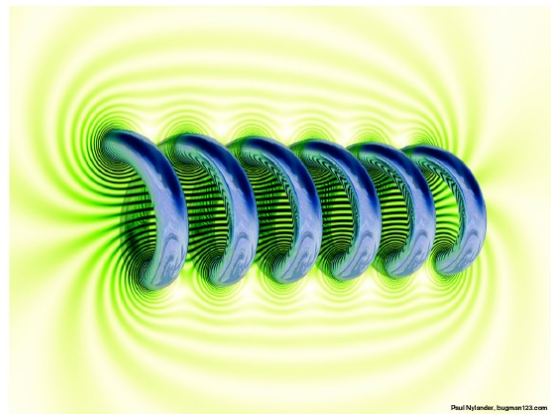
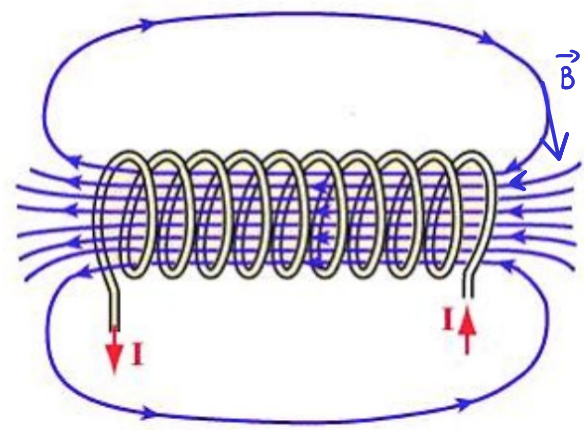
• **Aimant**



• **Spire**



• **Solénoïde** (de nombreuses spires jointives)

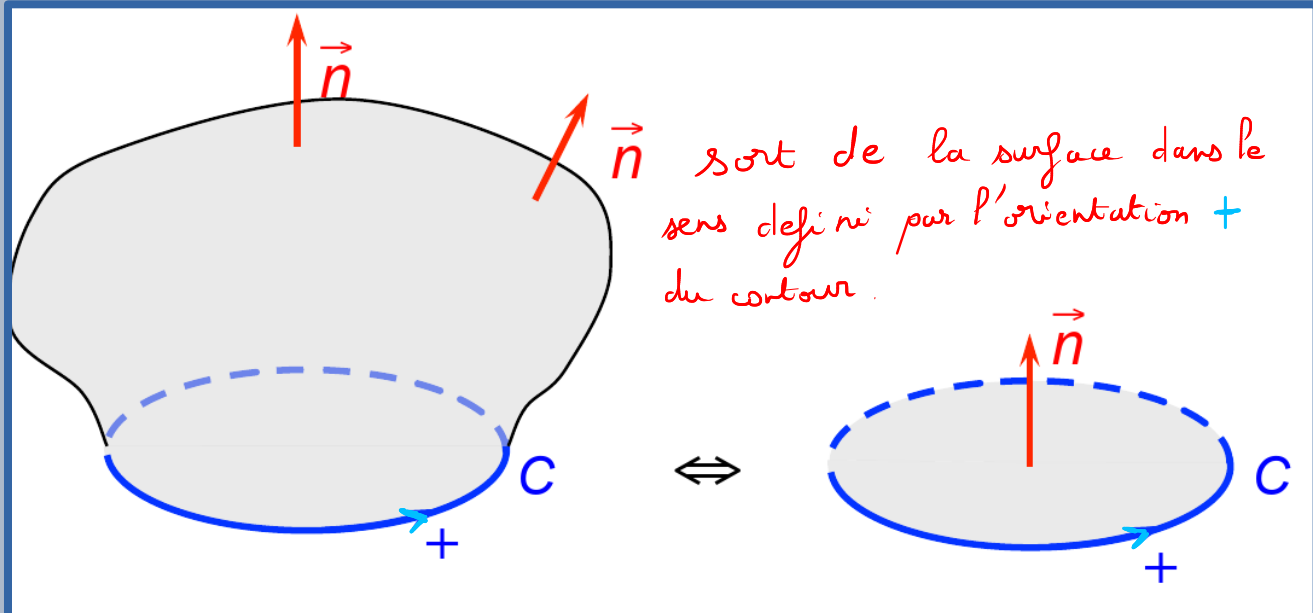
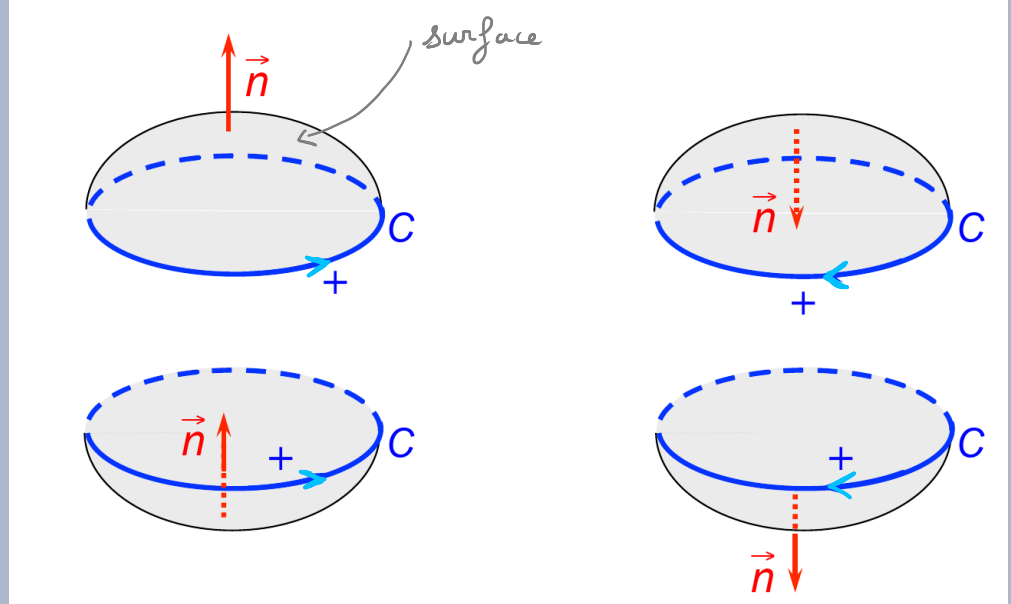


2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

a) Contours et surfaces orientés

- contour fermé C sur lequel s'appuie une surface Σ ;
- on *oriente* le contour **C** et la surface Σ ;
- surface de n'importe quelle forme.



« règle du tire-bouchon »

[3]

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

b) Flux de B à travers une surface fermée

[3]

Le flux du champ magnétique \vec{B} à travers une surface S s'écrit :

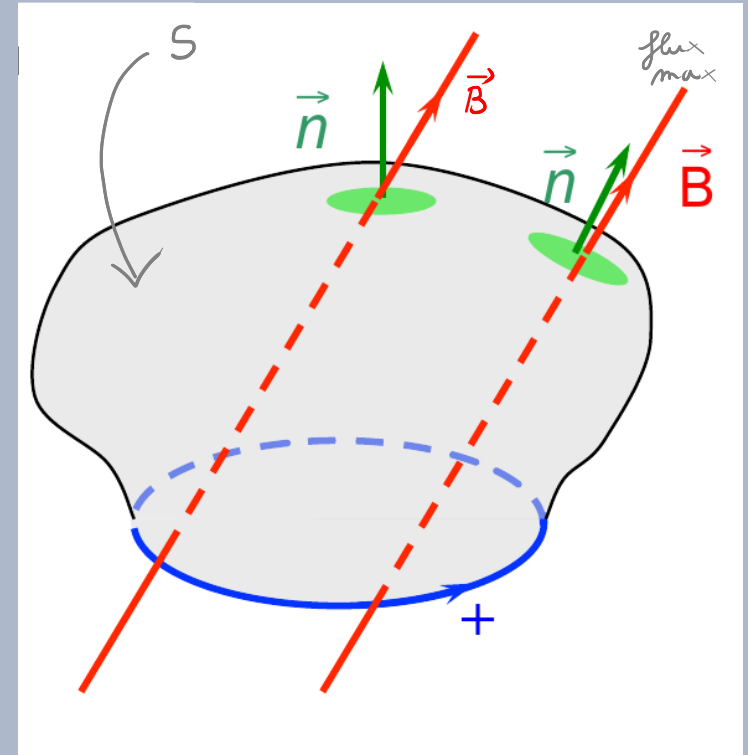
produit scalaire



$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

où \vec{n} est le vecteur normal à l'élément de surface dS .

- si \vec{B} et \vec{n} sont dans le même sens : $\phi > 0$
- si \vec{B} et \vec{n} sont opposés: $\phi < 0$



2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

Flux de B à travers une surface fermée

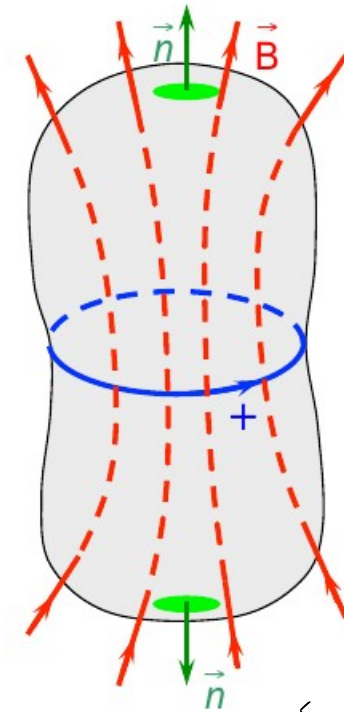
Pour calculer le flux de \vec{B} à travers une surface fermée, on utilise le théorème de Green-Ostrogradski :

(Chapitre 3)

$$\oiint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iiint_V (\text{div } \vec{B}) d\tau$$

$$\oiint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

divergence (cartésien) : $\text{div}(\vec{B}) = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z}$



Forme locale de cette propriété : en tout point de l'espace : $\boxed{\text{div } \vec{B} = 0}$ Éq. de Maxwell

Conséquence 1 : \vec{B} est à **flux conservatif**.

- Le flux de \vec{B} à travers une section S d'un même tube de champ de \vec{B} est constant (c-à-d indépendant de la section S).
- Soit un **contour fermé** C , quelque soit la surface S délimitée par C , le **flux de** \vec{B} à travers S est **constant** (c-à-d indépendant de S).

Conséquence 2 : **Il n'existe pas de mono-pôle magnétique.**

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

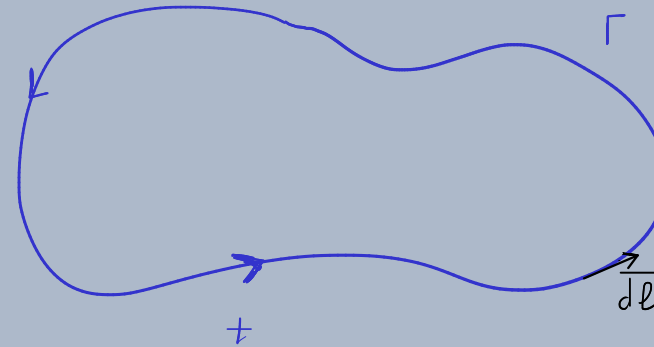
2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

c) Circulation du champ magnétique

[3]

$$\mathcal{E} = \int_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

circulation sur le contour Γ



où $d\vec{\ell}$ est un élément de longueur de la ligne dont le sens dépend du choix de l'orientation de Γ .

L la longueur de la ligne de champ considérée

Γ : ligne de champ
 B tangent à Γ : $\vec{B} \cdot d\vec{\ell} = B dl$
 B constant sur Γ

$$\mathcal{E} = \int_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_{\Gamma} B \cdot dl = B \cdot L$$

B constant

ligne de champ est orientée dans le sens du champ

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

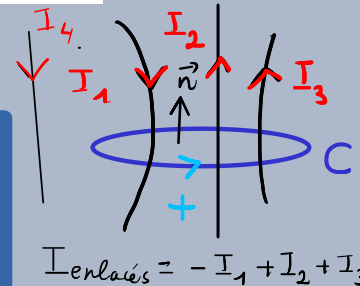
2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

d) Théorème d'Ampère

[3]

circulation **le long d'une courbe C fermée ou non, le long de laquelle le module de B reste constant**, il est possible de déterminer le champ magnétique.

↳ en général : C ligne de champ où B constant



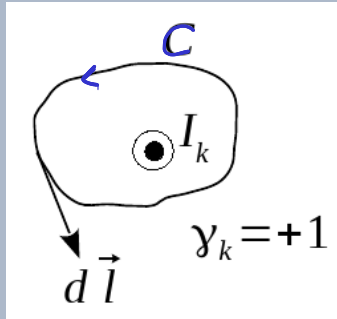
Théorème d'Ampère : (André-Marie Ampère (1775-1836), mathématicien et physicien.)

En régime permanent (les courants ne dépendent pas du temps) ou dans l'approximation des régimes quasi-stationnaire (ARQS) (les courants varient lentement dans le temps), quelque soit le contour fermé C :

$$\oint_{M \in C} \vec{B}(M) \cdot d\vec{l}(M) = \mu_0 I_{enlacés} = \mu_0 \sum_k \gamma_k I_k$$

avec les courants I_k enlacés par C

$\gamma_k = +1$ ou -1 selon le sens de I_k par rapport à $d\vec{l}$ (règle de la main droite ou du tire-bouchon). → cf orientation du contour C



La circulation de \vec{B} n'est pas conservative (contrairement à celle de \vec{E} en statique), donc \vec{B} ne dérive pas d'un potentiel scalaire.

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.4 Flux de B - Théorème d'Ampère

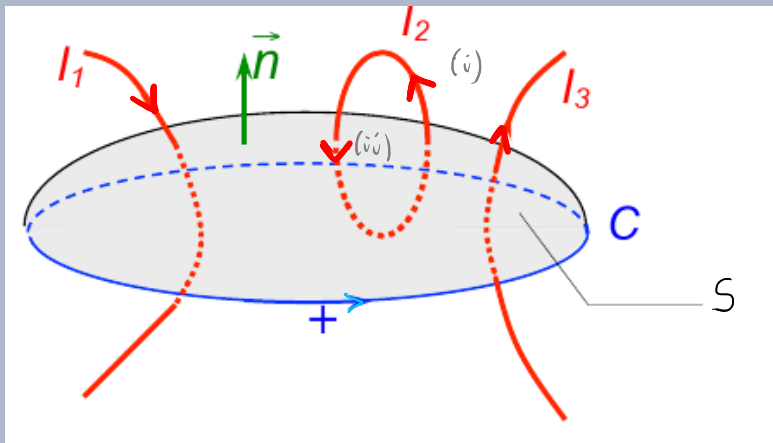
Distribution volumique de courant :

Pour une distribution (volumique de courant), le **théorème d'Ampère** s'écrit en régime permanent et dans l'ARQS : Quelque soit le **contour fermé C**, et quelque soit la surface S délimitée par C :

$$\oint_{M \in C} \vec{B}(M) \cdot d\vec{l}(M) = \mu_0 I_{\text{enlacés}} = \mu_0 \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Avec le sens de $d\vec{S}$ fixé par le sens de $d\vec{l}$ avec la règle de la main droite (ou du tire-bouchon).

Forme locale du théorème d'Ampère : $\vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$ (équation de Maxwell)



$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (-I_1 + I_2 - I_2 + I_3) = \mu_0 (-I_1 + I_3)$$

[2][3]

I_{alg} (comptée positivement si elle traverse S dans le sens de sa normale)

2.2.5 Exemples

[2]

Méthode pour utiliser le théorème d'Ampère : pour calculer le champ magnétique

(0) choix du système de coordonnées
 (2) (1)

- Analyser les symétries et invariances pour connaître la direction \vec{B} en tout point P de l'espace, et ses dépendances en fonction du systèmes de coordonnées (adapté aux symétries de la distribution de courant).
- Choisir un contour fermé C (« contour d'Ampère »), contenant M , le long duquel le calcul de la circulation de \vec{B} est simple (en général $\vec{B} \perp d\vec{l}$ ou $\vec{B} \parallel d\vec{l}$) *C: ligne de champ souvent*
- Calculer le courant enlacé par ce contour : $I_{enlacé}$
- Écrire $\oint_{P \in C} \vec{B}(P) \cdot d\vec{l}(P) = \mu_0 I_{enlacé}$ et en déduire $\vec{B}(M)$.

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.5 Exemples

a) Loi d'Ohm locale

loi d'Ohm globale : $I = \frac{U}{R}$

[2]

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

loi d'Ohm locale

avec

\vec{E} champ électrostatique ($V.m^{-1}$ ou $N.C^{-1}$)

\vec{j} densité de courant [SI]

γ coefficient de conductivité du conducteur (dépend du milieu et de la T°)
l'unité est le Siemens

$\frac{1}{\gamma}$ résistivité en Ohm.mètre ($\Omega.m$) $\left[\frac{1}{\gamma} \right] = [R] L$

$\vec{j} = nq \vec{v} = \rho_m \vec{v}$, où $nq = \rho_m$ est la densité volumique de charges des porteurs mobiles de vitesse \vec{v} .

$$I = \int_S di = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.5 Exemples

Loi d'Ohm locale ou globale ?

[2]

résistance R d'un conducteur de section S

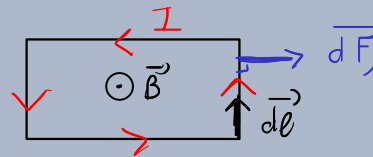
$$R = \frac{V_A - V_B}{I} = \frac{\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell}}{\iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}}$$

Loi d'Ohm globale

force de Laplace \vec{F}_1 est la force subie par un conducteur parcouru par un courant électrique sous l'action du champ magnétique \vec{B}

force de Laplace élémentaire

$$d\vec{F}_1 = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$



densité volumique de la force de Laplace

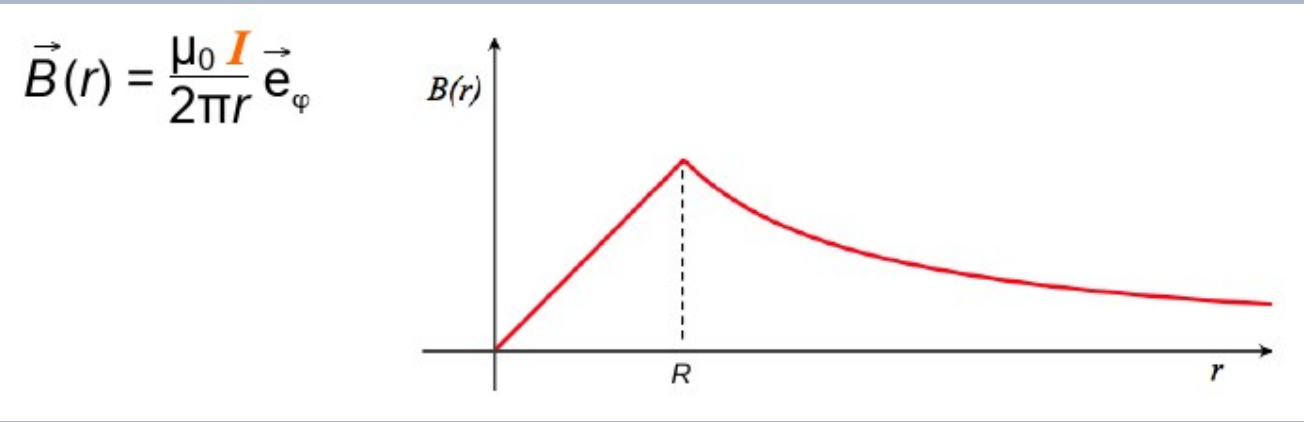
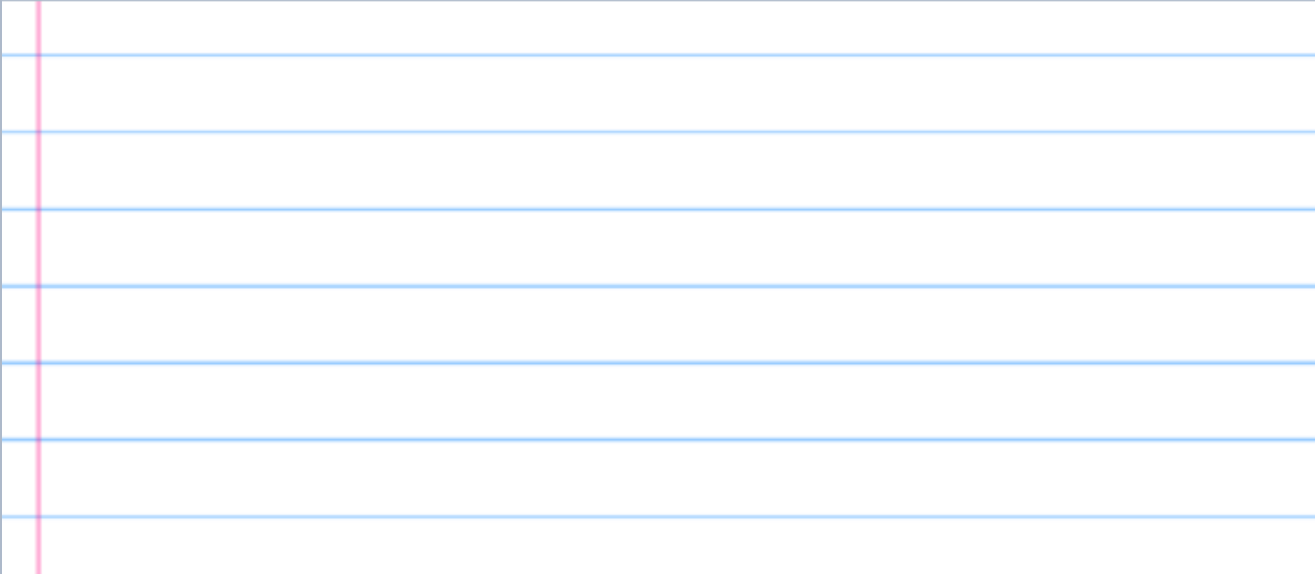
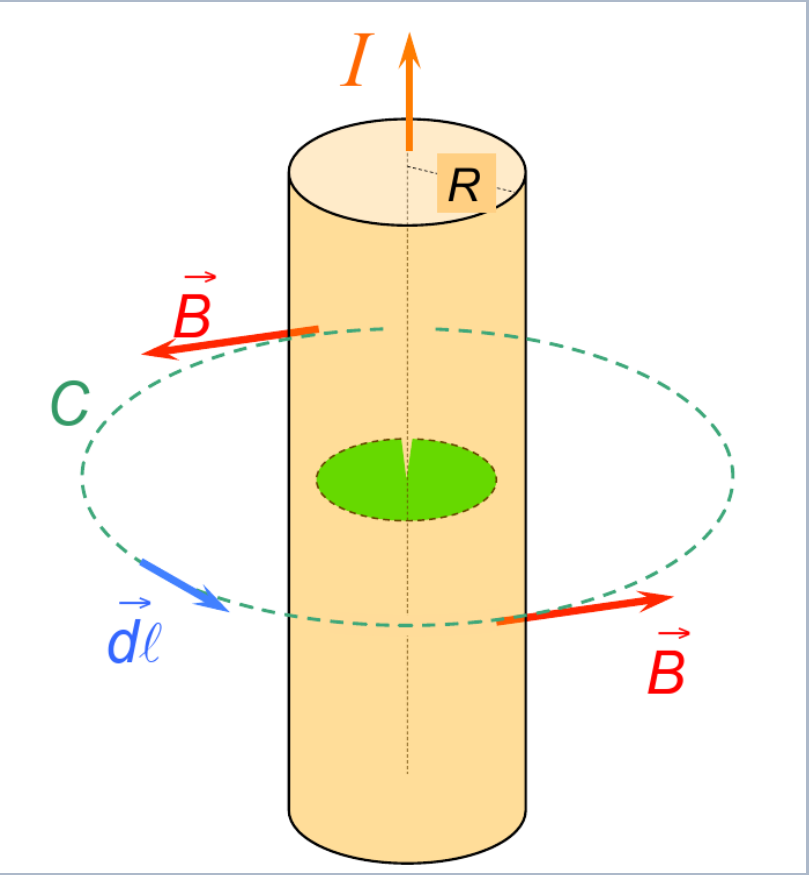
$$\frac{d\vec{F}_1}{d\tau} = \vec{j} \wedge \vec{B}$$

2.2 Loi de Biot et Savart - Théorème de superposition et symétries

2.2.5 Exemples

b) Fil rectiligne

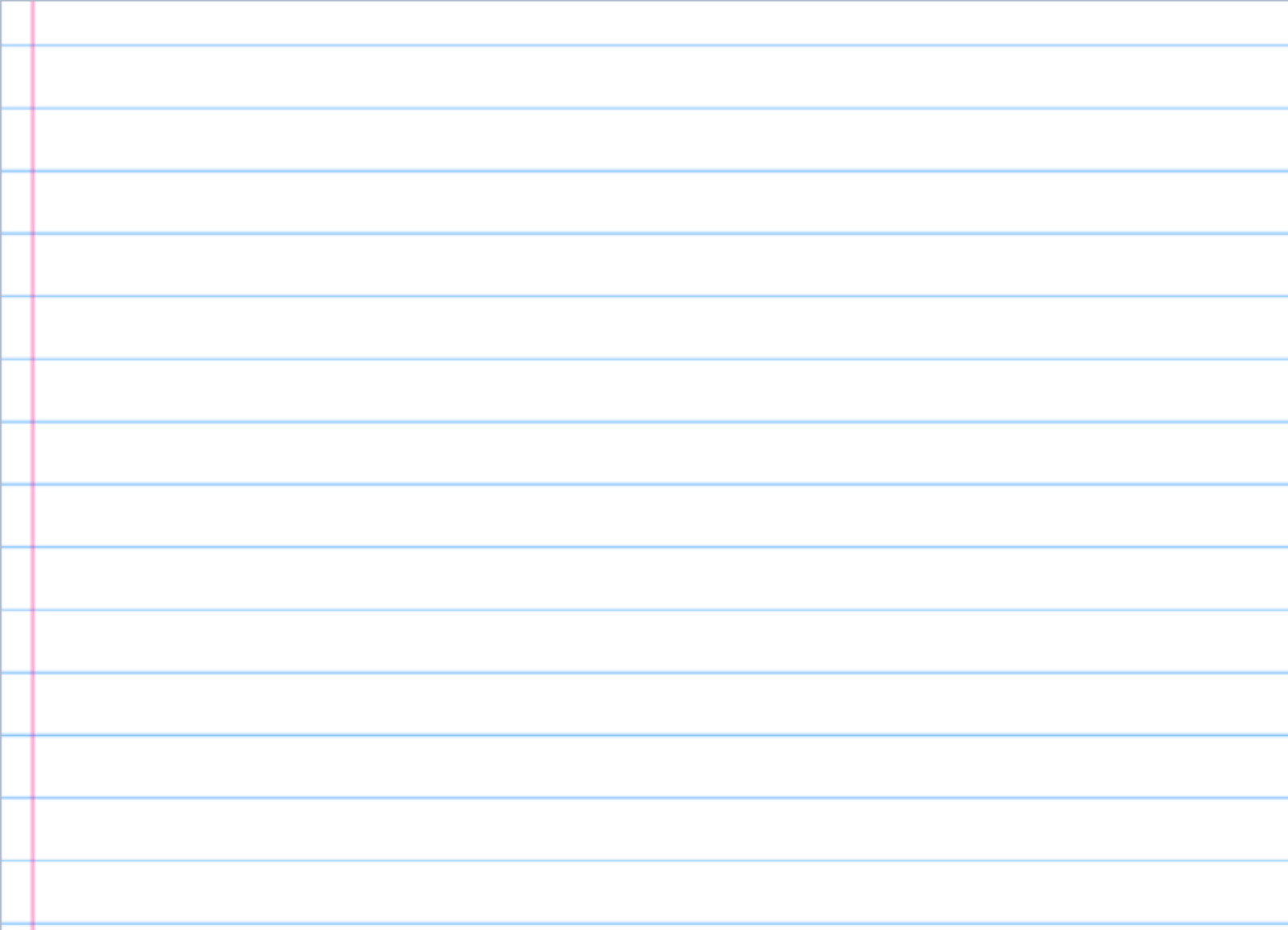
[2]



2.2.5 Exemples

b) Fil rectiligne

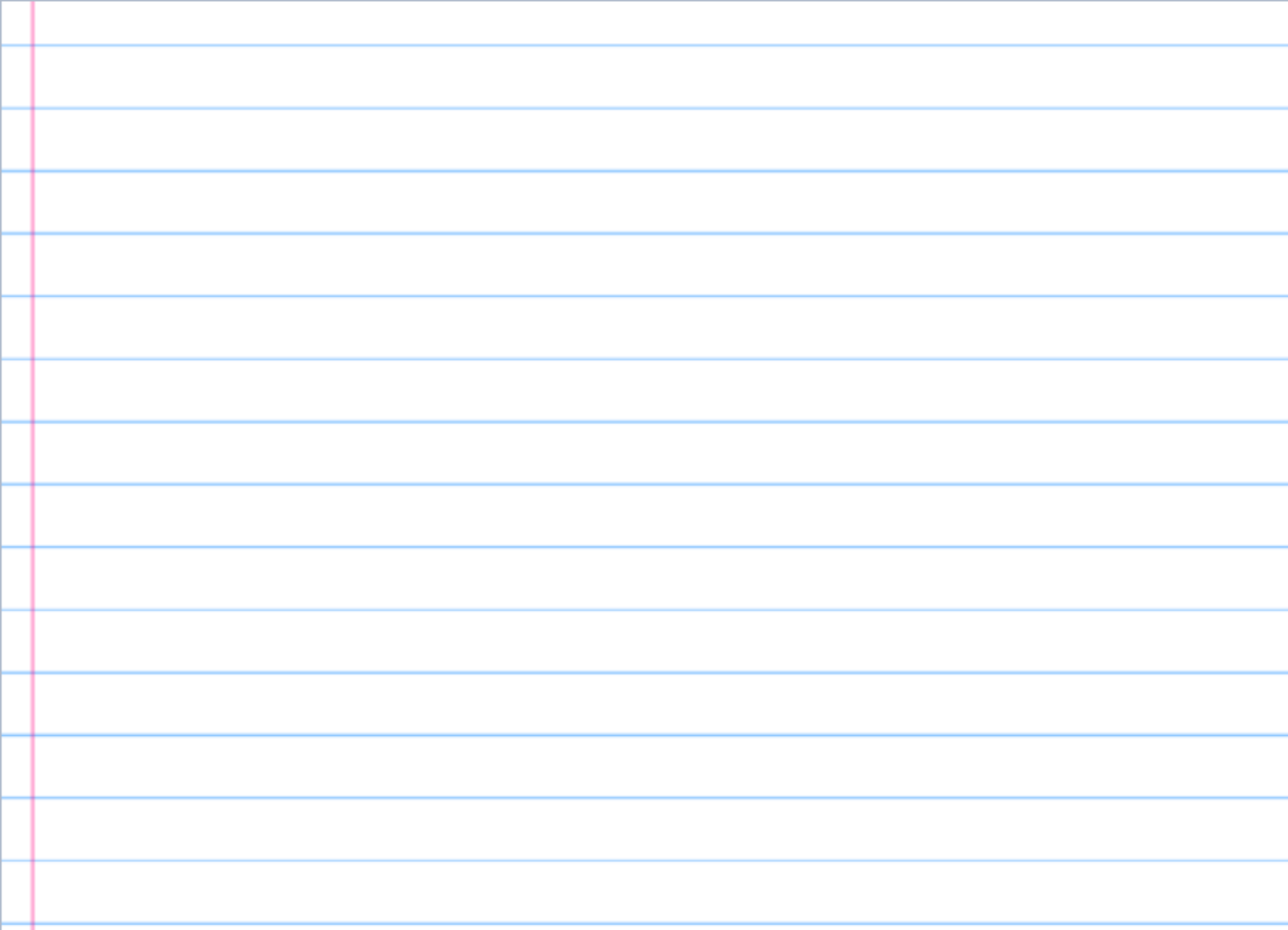
[2]



2.2.5 Exemples

b) Fil rectiligne

[2]



2.2.5 Exemples

c) Expériences sur le champ magnétique et les courants.

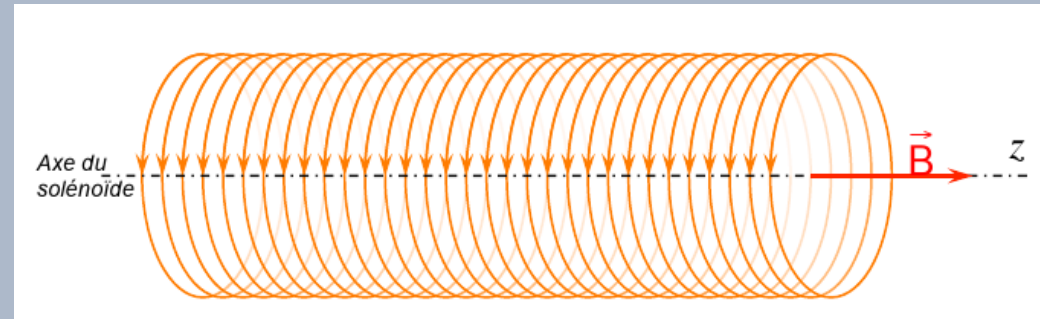
[2]

2.2.5 Exemples

d) Solénoïde

[2]

- Solénoïde rectiligne infini dont les spires sont traversées par un courant I
- Solénoïde compte N spires par unité de longueur



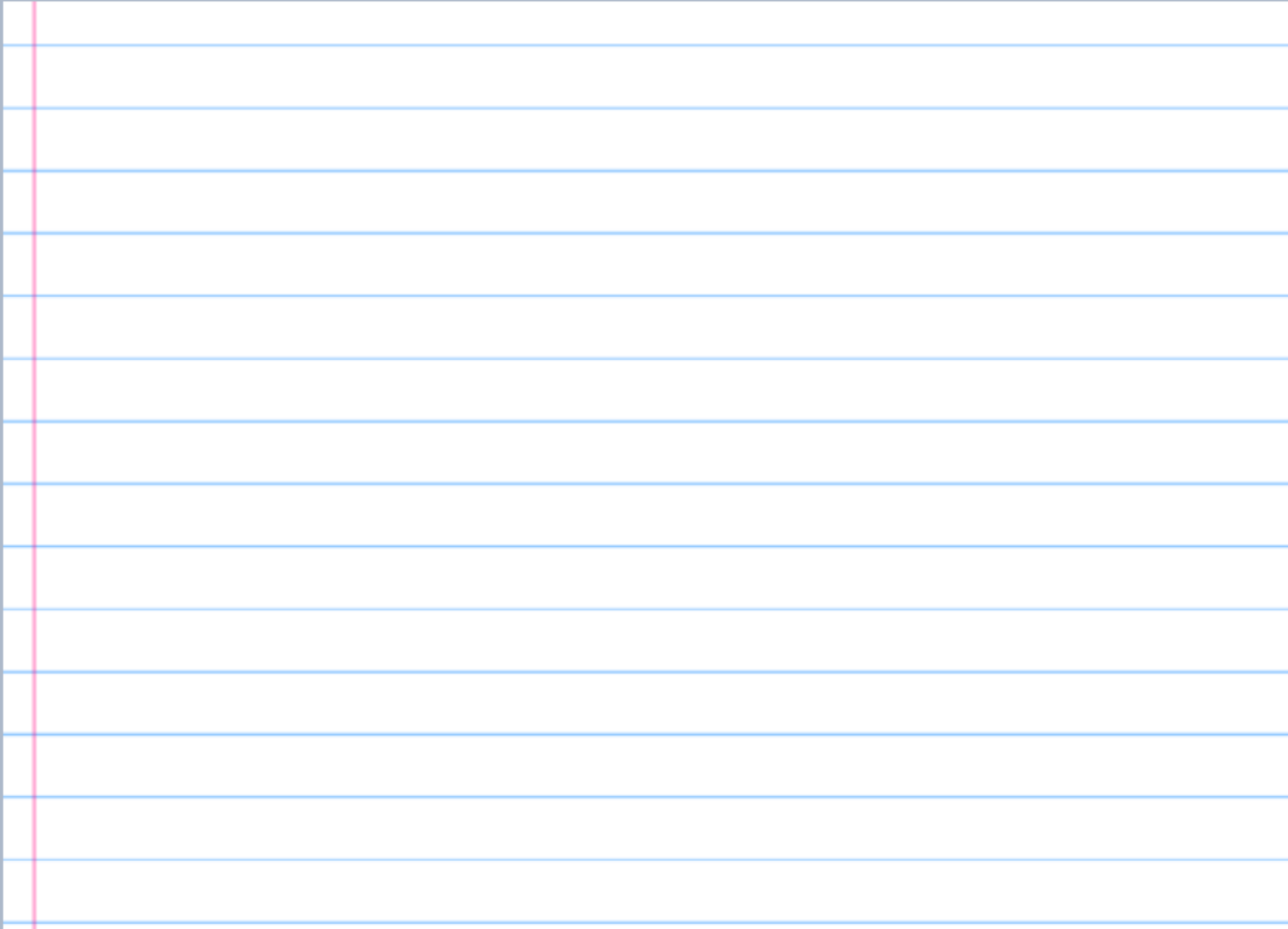
$$\vec{B}_{\text{extérieur du solénoïde}} = \vec{0}$$

Soit n le nombre de spires par unité de longueur : $\vec{B}_{\text{intérieur du solénoïde}} = \mu_0 n I \vec{u}$ avec \vec{u} vecteur unitaire de axe du solénoïde orienté par le sens de I (règle de la main droite ou du tire-bouchon).

2.2.5 Exemples

d) Solénoïde

[2]



2.2.5 Exemples

d) Solénoïde

[2]



- [1] Polycopié de cours
- [2] [CUPGE - CY : Introduction à l'électromagnétisme](#)
- [3] Cours [LP 203 - Champs électrique et magnétique](#) de Nicolas MENGUY
- [4] Cours de Luc Tremblay, collège Mérici - [« Électricité et magnétisme »](#).
- [5] David Sénéchal - [« Histoire des sciences » PHQ399](#) Université de Sherbrooke, QC
- [6] pour la suite : [Khan Academy](#) , [Unisciel](#) etc.