
Thème 10 : Phénomènes magnétiques

Cours



FIGURE 1 – Physicien et chimiste britannique, Michael Faraday (1791–1867) découvre en 1831 le phénomène d'induction électromagnétique : une variation du flux magnétique à travers un circuit peut engendrer une force électromotrice et un courant. Il introduit également la notion de lignes de champ, donnant une représentation physique du champ magnétique. Ses travaux sont à l'origine du transformateur, de l'alternateur et de la production industrielle d'électricité.

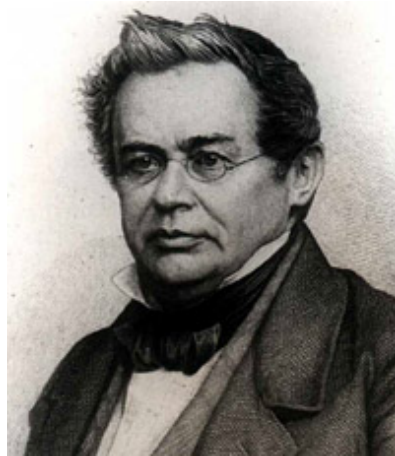


FIGURE 2 – Physicien germano-balte, Emil Lenz (1804–1865) formule la loi qualitative qui porte son nom : les courants induits s’opposent à la variation du flux magnétique qui les a produits. Cette loi exprime le sens physique du signe négatif dans la loi de Faraday et garantit la cohérence énergétique des phénomènes d’induction. Elle permet d’interpréter le freinage magnétique et les effets d’amortissement par induction.



FIGURE 3 – Physicien français, Léon Foucault (1819–1868) met en évidence les courants induits volumiques apparaissant dans les conducteurs massifs soumis à un champ magnétique variable, aujourd’hui appelés courants de Foucault. Ces courants provoquent un échauffement par effet Joule et sont exploités dans le chauffage par induction, le freinage électromagnétique et le contrôle non destructif des matériaux.

Table des matières

1	Introduction au champ magnétique	4
1.1	Définition et rôle du champ magnétique	4
1.2	Moment magnétique	6
1.3	Sources et topographie du champ magnétique	7
1.3.1	Flux magnétique	10
1.4	Théorème d'Ampère	11
1.4.1	Symétries et antisymétries du champ magnétique	11
1.4.2	Courants enlacés	13
1.4.3	Énoncé	14
1.4.4	Utilité et étapes	15
1.5	Applications du théorème d'Ampère	15
1.5.1	Champ créé par un fil infini	15
1.5.2	Champ créé par un solénoïde infini	17
2	Induction propre, induction mutuelle	19
2.1	Phénomène d'induction	19
2.1.1	Observations expérimentales	19
2.1.2	Loi de Faraday, loi de Lenz	20
2.2	Auto-induction	21
2.2.1	Flux propre et inductance propre	21
2.2.2	Densité volumique d'énergie magnétique	23
2.3	Circuits couplés par induction	24
2.3.1	Coefficient d'inductance mutuelle	24
2.3.2	Équations électriques	25
2.3.3	Étude énergétique	26
2.4	Applications	27
2.4.1	Détection ampèremétrique	27
2.4.2	Chauffage inductif	30
2.4.3	Fonctionnement d'un alternateur	31
3	Électromécanique	33
3.1	Force de Laplace	33
3.2	Rail de Laplace	34
3.2.1	Position du problème	34
3.2.2	Équations électrique et mécanique	35
3.2.3	Conversion électromécanique de puissance	37

Chapitre 1 : Introduction au champ magnétique

📌 Objectifs :

- Exploiter la notion de ligne de champ magnétique. Exploiter une carte de lignes de champ magnétique fournie.
- Exploiter l'expression de la force magnétique agissant sur une charge ponctuelle. Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
- Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans une machine électrique, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
- Déterminer le vecteur moment magnétique et les pôles nord et sud associés à une boucle de courant plane. Tracer schématiquement l'allure des lignes de champs à grande distance d'un dipôle magnétique. Modéliser un aimant par un dipôle magnétique. Identifier les pôles nord et sud d'un aimant.
- Exploiter l'expression fournie du couple subi par un moment magnétique placé dans un champ magnétique uniforme. Utiliser une boussole pour déterminer la direction d'un champ magnétique.
- Utiliser le fait que le flux du champ magnétique à travers une surface fermée est nul pour démontrer que le flux de ce champ est conservé le long d'un tube de champ. Exploiter qualitativement les lignes de champ magnétique pour prévoir les variations de la norme du champ le long d'un tube de champ magnétique.
- Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie éventuels d'une distribution de courants et les relier aux plans d'antisymétrie et de symétrie du champ magnétostatique créé. Identifier les invariances d'une distribution de courants. Exploiter les symétries et invariances pour caractériser le champ magnétostatique créé et prévoir la topographie des lignes de champ.
- Tracer l'allure des cartes de champ magnétostatique pour un aimant droit, un fil rectiligne, une spire circulaire, une bobine longue.
- Déterminer la circulation du champ magnétostatique dans des géométries simples. Énoncer le théorème d'Ampère. Exploiter le théorème d'Ampère pour calculer un champ magnétostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie (fil de rayon nul ou fini, solénoïde « infini »).

1.1 Définition et rôle du champ magnétique

Force magnétique

Soit une charge ponctuelle q et de vitesse \vec{v} .

On définit le **champ magnétique** \vec{B} (en tesla T) par la **force magnétique** \vec{F}_m subie par cette charge ponctuelle :

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

📌 *Remarque* : Quelques ordres de grandeurs : au contact d'un aimant permanent : $B_{\text{aimant}} \sim 0,1 \text{ T}$ à 1 T ; dans un électro-aimant à bobinage : $B_{\text{EA}} \sim 10 \text{ T}$ à 100 T ; dans un appareil d'IRM : $B_{\text{IRM}} \sim 1 \text{ T}$ à 3 T ; sur Terre : $B_{\text{Terre}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ T} = 50 \mu\text{T}$.

Question 1 : On suppose que $\vec{B} = B \cdot \vec{u}_z$. On se place en coordonnées cylindriques pour étudier le mouvement d'une charge ponctuelle q . Initialement, $\vec{v} = v_0 \cdot \vec{u}_\theta$. Faire un schéma de la situation, et déterminer le mouvement de la charge ponctuelle selon le signe de q .

Force de Lorentz

La **force de Lorentz** \vec{F} représente la force subie par une charge ponctuelle dans un champ électromagnétique $\{\vec{E}, \vec{B}\}$. Elle est la somme de la force électrique et de la force magnétique :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

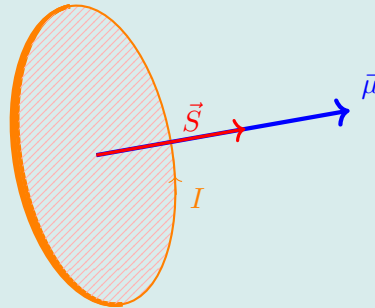
Question 2 : Montrer que le travail W de la force de Lorentz est indépendant de \vec{B} .

Question 3 : Par application du théorème de l'énergie cinétique, justifier que seul le champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule chargée. Quel rôle joue alors le champ magnétique ?

1.2 Moment magnétique

Moment magnétique

Soit une boucle de courant I et de surface S . On oriente la surface par un vecteur \vec{n} lui étant orthogonal, et dont le sens est déterminé par celui de I à l'aide de la règle de la main droite.



On définit alors le **moment magnétique** $\vec{\mu}$ de cette boucle de courant par :

$$\vec{\mu} = IS\vec{n} = I\vec{S}$$

avec $\vec{S} = S\vec{n}$.

Question 4 : Quelle est l'unité du moment magnétique ?

Pôle nord magnétique, pôle sud magnétique

Le **pôle nord** d'un aimant est celui dont fuient les lignes de champ magnétique. Le **pôle sud** d'un aimant est donc celui par lesquelles les lignes de champ magnétique sont attirées.

Question 5 : Déterminer les pôles nord et sud du moment magnétique figuré ci-dessus.

Question 6 : Quel système « naturel » correspondrait à une spire de courant, c'est-à-dire au mouvement d'électrons autour d'une même orbite ? Quel phénomène cela peut-il expliquer ?

En réalité, tous les électrons possèdent un *spin*, grandeur quantique que l'on peut assimiler dans l'idée à la rotation de l'électron sur lui-même. Ces mouvements internes d'électrons peuvent alors créer un champ magnétique dans un sens (*up*) ou dans l'autre (*down*).

Certaines espèces chimiques (notamment le fer Fe, le nickel Ni et le cobalt Co), possédant des électrons non appariés, peuvent créer un micro-champ magnétique en alignant leurs spins (tous dans le sens *up*, par exemple). D'un point de vue macroscopique, la somme de ces micro-champs donne un champ magnétostatique important et mesurable.

Dans tous les cas, on admet que l'on peut modéliser à l'échelle macroscopique un aimant par un moment magnétique.

Couple subi par un moment magnétique

Soit un moment magnétique $\vec{\mu}$ plongé dans un champ magnétique \vec{B} . Ce moment magnétique subit un **couple**^a $\vec{\tau}$ de la part du champ magnétique :

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

^a. Cette notion, uniquement définie en cours de sciences industrielles, correspond à une action mécanique entraînant uniquement une rotation sans translation.

Question 7 : À quelle condition un moment magnétique cesse-t-il de subir le couple du champ magnétique ? Quel dispositif modélise-t-on ici ?

1.3 Sources et topographie du champ magnétique

Le champ magnétique peut notamment être créé par trois origines : les courants électriques, les aimants et les variations temporelles du champ électrique¹.

Pour un aimant droit

On peut observer que, contrairement aux lignes de champ électrostatique, les lignes de champ magnétostatique ont tendance à former des boucles. Nous chercherons à exploiter cette propriété un peu plus tard.

Question 8 : Représenter un petit aimant (une boussole) sur la modélisation de la figure 1.1, en dehors de l'aimant droit. Placer alors les pôles nord et sud de cette boussole. Pourquoi peut-on dire que le « nord magnétique » et le « sud magnétique » ne sont que relatifs ?

1. Nous parlerons plus explicitement de cette dernière source dans le thème des ondes.

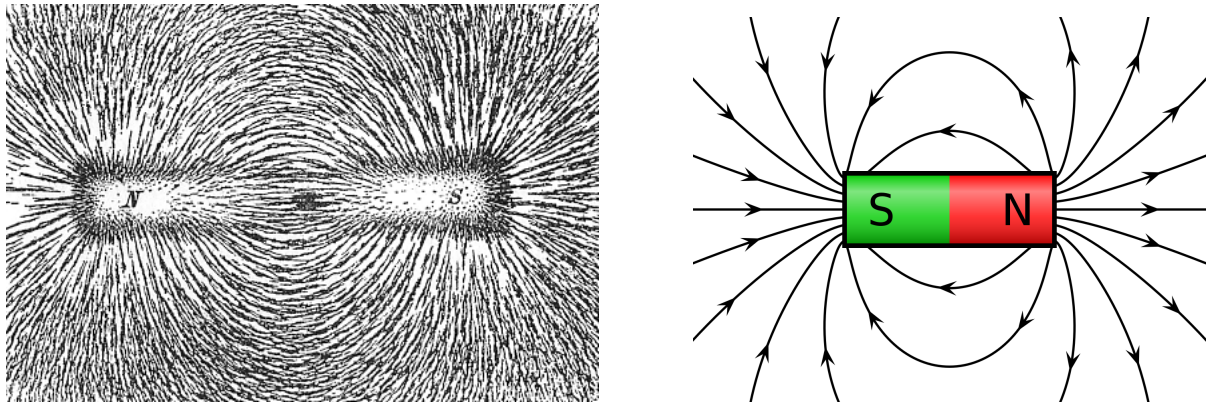


FIGURE 1.1 – Lignes de champ magnétostatique pour un aimant droit. Gauche : obtention expérimentale par de la limaille de fer (By Newton Henry Black - Newton Henry Black, Harvey N. Davis (1913) Practical Physics, The MacMillan Co., USA, p. 242, fig. 200, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73846>) ; droite : modélisation (By Geek3 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10587119>).

Pour un fil rectiligne et une spire circulaire

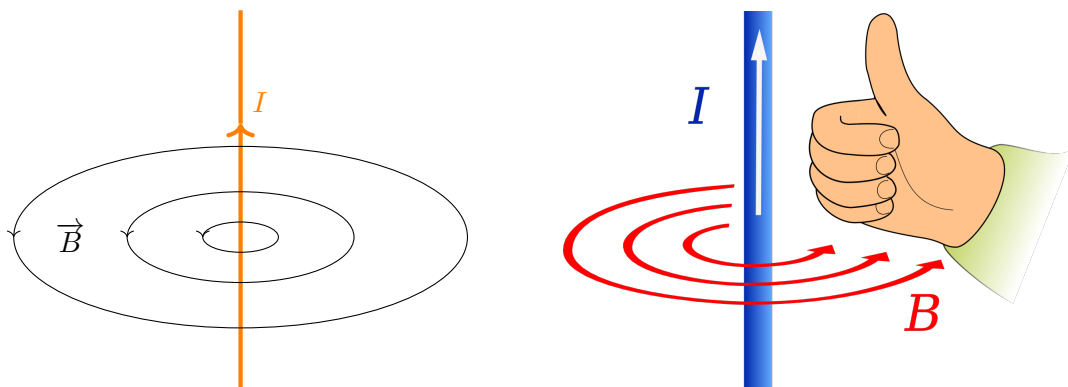


FIGURE 1.2 – Gauche : lignes de champ magnétostatique pour un fil rectiligne infini. Droite : règle du tire-bouchon (avec la main droite uniquement!) pour retenir l'orientation du champ magnétostatique selon le sens du courant (By Jfmelero - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3634402>).

À nouveau, on peut noter la propriété de « bouclage » du champ magnétostatique autour de sa source.

Pour déterminer l'allure des lignes de champ magnétostatique pour une spire circulaire (c'est-à-dire un fil que l'on a relié de bout en bout), on peut voir cette spire comme un assemblage infini de fils rectilignes élémentaires. Localement, chaque méso-fil rectiligne fait tourner le champ magnétostatique autour de lui de la même manière qu'un fil rectiligne infini.

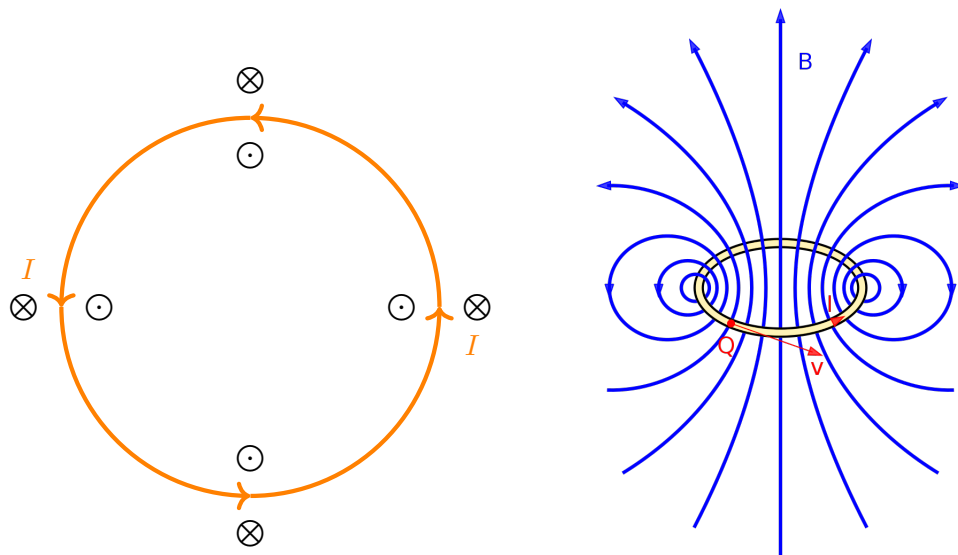


FIGURE 1.3 – Lignes de champ magnétostatique pour une spire circulaire. Gauche : vue de dessus ; droite : perspective cavalière (Par 30px MovGP0, CC BY-SA 2.0 DE <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/deed.en>, via Wikimedia Commons).

Pour une bobine longue et un tore

On appelle bobine longue (ou solénoïde) un enchaînement de spires sur un axe rectiligne, telle que la longueur L de la bobine soit grande devant son rayon R . En pratique, on enroule un fil conducteur le long d'un cylindre jusqu'à la longueur désirée ; si le fil est suffisamment fin, on peut alors considérer que la bobine est bien composée de spires perpendiculaires à l'axe de révolution de celle-ci.

Dans cette approximation, on conserve les propriétés des spires circulaires sur la quasi-totalité de la longueur du solénoïde : le champ magnétostatique rentre dans celui-ci selon la règle du tire-bouchon, puis en ressort pour reboucler de l'autre côté (voir figure 1.4).

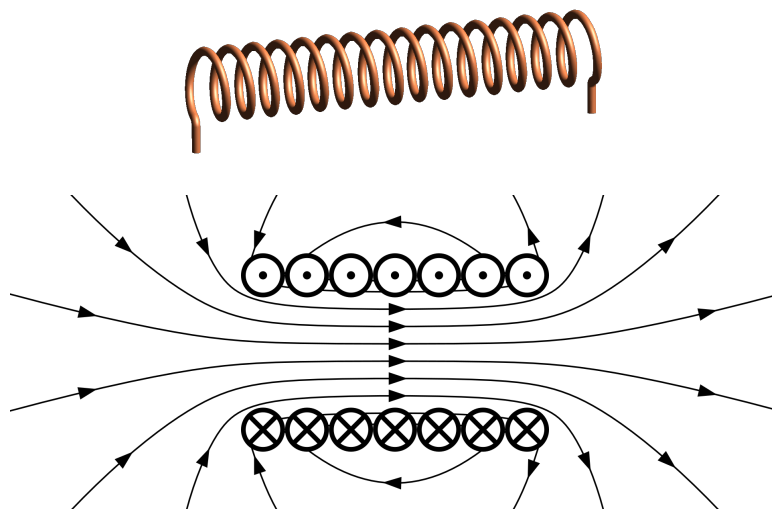


FIGURE 1.4 – Haut : solénoïde (Par Zureks — Travail personnel, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17624128>). Bas : lignes de champ d'un solénoïde vu en coupe (Par Geek3 — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10618762>).

Question 9 : Afficher le pôle nord et le pôle sud du solénoïde de la figure 1.4.

Un tore magnétique consiste en l'enroulement d'une bobine de bout en bout (tout comme une spire correspond à l'enroulement d'un fil sur lui-même).

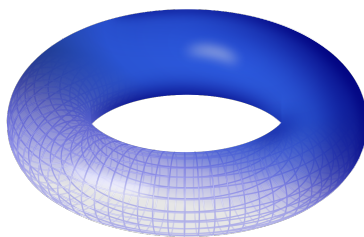


FIGURE 1.5 – Tore de révolution (By Leonid_2 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8643414>).

Le champ magnétostatique est théoriquement piégé dans un tore, puisqu'il ne peut pas s'échapper (il n'y a pas de sortie... ni d'entrée!). Ainsi, les lignes de champ sont des cercles contenus à l'intérieur du tore, et le champ magnétostatique extérieur est nul.

Le solénoïde et le tore sont les dispositifs les plus simple à mettre en place pour créer un champ magnétostatique uniforme en leur sein : les électro-aimants ou les tokamaks reposent sur ces technologies, à plus ou moins grande échelle.

1.3.1 Flux magnétique

Reprenons l'exemple du solénoïde en figure 1.6.

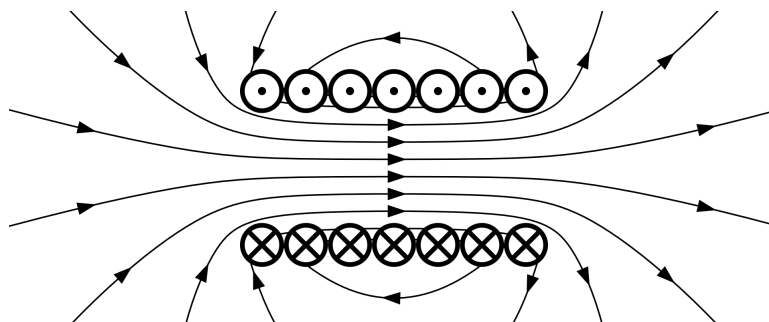


FIGURE 1.6 – Lignes de champ d'un solénoïde vu en coupe (Par Geek3 — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10618762>).

Question 10 : Tracer en figure 1.6 deux surfaces fermées quelconques, l'une englobant le solénoïde et l'autre étant à l'extérieur. Compter les lignes de champ entrantes et sortantes de cette surface.

Conservation du flux magnétique

Soit S une surface fermée. Le flux du champ magnétique à travers cette surface est nulle :

$$\Phi_B^{S \text{ fermée}} = 0$$

En d'autres termes, si l'on considère un contour fermé C , alors le flux du champ magnétique à travers n'importe quelle surface ouverte s'appuyant sur C est conservé :

$$\Phi_B^{\text{entrant}} = \Phi_B^{\text{sortant}}$$

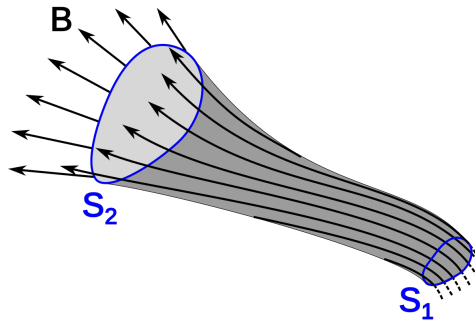


FIGURE 1.7 – Tube de flux magnétique (By Chetvorno - Own work, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=81086298>). Si l'on note B_1 le champ magnétique uniforme en entrée de section S_1 et B_2 le champ magnétique uniforme en sortie de section S_2 , on a alors $B_1 \times S_1 = B_2 \times S_2$.

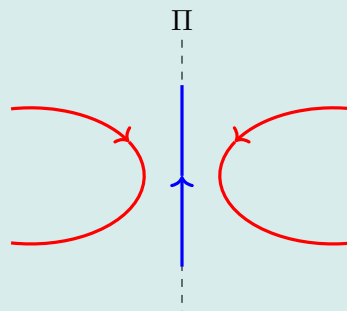
☛ *Remarque* : Les propriétés topologiques du champ magnétique sont donc équivalentes à celles vues en mécanique des fluides pour le champ des vitesses lors d'un écoulement incompressible.

1.4 Théorème d'Ampère

1.4.1 Symétries et antisymétries du champ magnétique

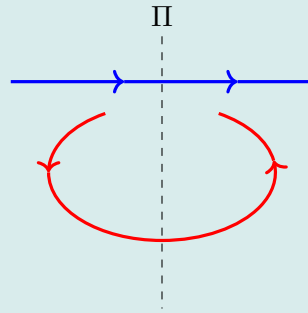
Plan de symétrie des courants

On dit qu'un plan Π est un plan de **symétrie** des courants si, lorsqu'un courant existe d'un côté de ce plan, alors un courant de même valeur existe de l'autre côté de ce plan, symétriquement au premier courant.



Plan d'antisymétrie des courants

On dit qu'un plan Π est un plan d'**antisymétrie** des courants si, lorsqu'un courant existe d'un côté de ce plan, alors un courant de signe opposé et de même valeur absolue existe de l'autre côté de ce plan, symétriquement au premier courant.



Question 11 : Lister les plans de symétrie et d'antisymétrie des courants pour un fil rectiligne infini.

Question 12 : Lister les plans de symétrie et d'antisymétrie des courants pour une spire circulaire.

Question 13 : Lister les plans de symétrie et d'antisymétrie des courants pour une bobine de longueur infinie.

Question 14 : Lister les plans de symétrie et d'antisymétrie des courants pour un tore magnétique.

Question 15 : Que peut-on dire du champ magnétostatique pour les plans de symétrie ?

Question 16 : Que peut-on dire du champ magnétostatique pour les plans d'antisymétrie ?

Direction du champ magnétostatique selon la symétrie des courants

Soit un point M appartenant à un plan de symétrie Π_+ des courants. Le champ magnétostatique $\vec{B}(M)$ est alors orthogonal à ce plan : $\vec{B}(M) \perp \Pi_+$.

Soit un point M appartenant à un plan d'antisymétrie Π_- des courants. Le champ magnétostatique $\vec{B}(M)$ est alors contenu dans ce plan : $\vec{B}(M) \in \Pi_-$.

1.4.2 Courants enlacés

Considérons une distribution quelconque de courants filiformes ainsi qu'un contour fermé « encerclant » ces courants (voir figure 1.8).

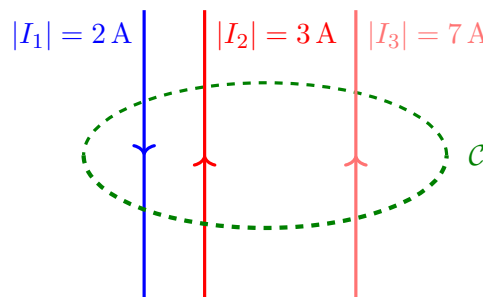


FIGURE 1.8 – Distribution de courants. Un contour fermé \mathcal{C} est représenté en traitillés verts.

On dit que les courants I_1 , I_2 et I_3 sont **enlacés** par le contour fermé \mathcal{C} . Selon le choix² de l'orientation du contour, on comptera positivement ou négativement les courants selon la règle du tire-bouchon³ (voir figure 1.9).

2. Il s'agit vraiment d'un choix de la personne étudiant le problème : aucun choix n'est meilleur qu'un autre !

3. Qui ne fonctionne qu'avec la main droite ! Les quatre doigts, de l'index à l'annulaire, suivent le sens du contour : le pouce donne alors le sens avec lequel on compte positivement les courants.

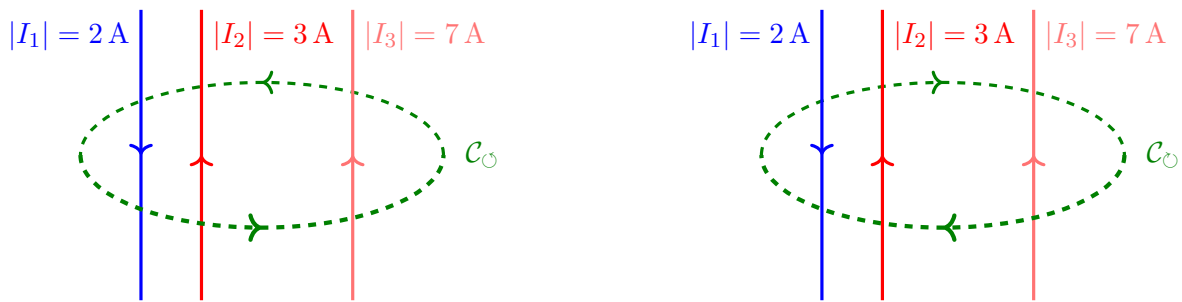


FIGURE 1.9 – Représentation des courants avec les deux orientations possibles pour le contour fermé. Dans le cas de gauche, le courant enlacé par le contour \mathcal{C}_O sera $I_O = -|I_1| + |I_2| + |I_3| = 8 \text{ A}$; dans le cas de droite, le courant enlacé par le contour \mathcal{C}_O sera $I_O = +|I_1| - |I_2| - |I_3| = -8 \text{ A}$.

1.4.3 Énoncé

Théorème d'Ampère

La circulation du champ magnétostatique \vec{B} le long d'un contour fermé \mathcal{C} orienté est proportionnelle aux courants enlacés par ce contour, comptés positivement s'ils sont orientés dans le même sens et négativement sinon :

$$\oint_{M \in \mathcal{C}} \vec{B}(M) \cdot d\vec{\ell}_M^{\text{selon } \mathcal{C}} = \mu_0 \times I_{\text{enlacés par } \mathcal{C}}$$

où $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ est la **perméabilité magnétique du vide**.

L'interprétation du théorème d'Ampère est la suivante :

- Tout courant \vec{j} crée un champ magnétostatique tournant autour dudit courant, selon la règle du tire-bouchon. Ainsi, si l'on prend un contour fermé \mathcal{C} enlaçant ce courant, on pourra compter « à quel point » le champ magnétostatique tourne autour de \vec{j} en calculant sa circulation selon \mathcal{C} ;
- Par ailleurs, la norme du champ magnétostatique est d'autant plus importante que le flux⁴ de \vec{j} à travers la surface délimitée par \mathcal{C} est grande;
- Ainsi, la circulation du champ magnétostatique est proportionnelle aux courants enlacés par \mathcal{C} : c'est le théorème d'Ampère.

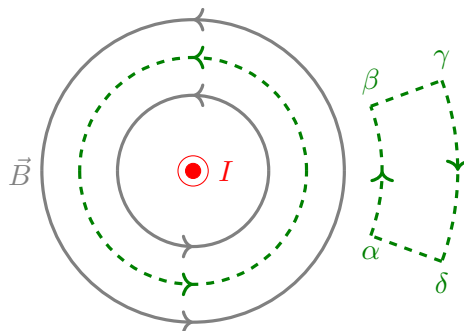


FIGURE 1.10 – Illustration du théorème d'Ampère pour deux contours fermés en traitillés, avec un courant I orienté vers le lecteur. Les lignes de champ magnétique sont représentées en gris et en traits pleins.

4. On rappelle que le flux de \vec{j} est l'intensité du courant : $I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S}$.

Pour le contour circulaire de la figure 1.10, la circulation du champ magnétostatique est non-nulle et positive car \vec{B} et $d\vec{\ell}$ sont toujours colinéaires. Ceci est cohérent car I enlacé est bien positif.

Pour le contour de droite de la figure 1.10, la circulation du champ magnétostatique est nulle car la circulation sur la portion $\alpha \rightarrow \beta$ positive est compensée par celle, négative, sur la portion $\gamma \rightarrow \delta$. Ceci est cohérent car le courant enlacé par ce contour fermé est nul.

1.4.4 Utilité et étapes

L'utilité principale du théorème d'Ampère est de pouvoir exprimer le champ magnétostatique $\vec{B}(M)$ en tout point M , si suffisamment de symétries permettent de simplifier le problème. Pour cela :

1. On choisit un point M dans l'espace, et on identifie les plans de symétrie et/ou d'antisymétrie passant par ce point : on en déduit **la direction** du champ $\vec{B}(M)$;
2. On recense les invariances dues aux répartitions des courants : on en déduit **les variables** de la composante du champ B ;
3. On choisit un **contour d'Ampère**, que l'on oriente, qui passe par le point M , et le long duquel le champ \vec{B} est uniforme : l'expression de la circulation du champ magnétostatique se simplifie ;
4. On compte les courants intérieurs au contour d'Ampère, avec un $+$ si les deux ont la même orientation (selon la règle du tire-bouchon) ou avec un $-$ sinon ;
5. On applique le théorème d'Ampère pour déterminer $B(M)$, puis $\vec{B}(M)$.

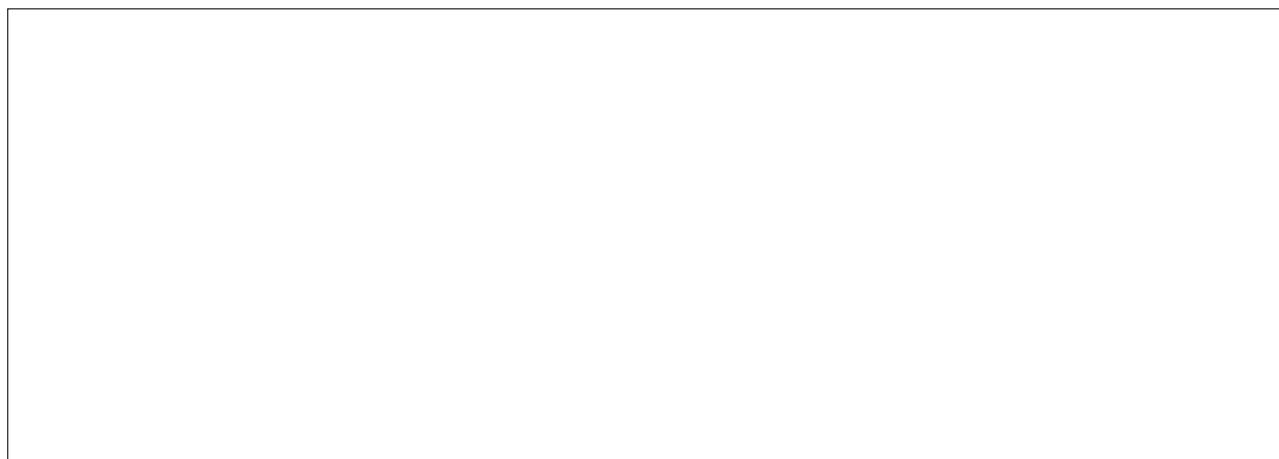
1.5 Applications du théorème d'Ampère

1.5.1 Champ créé par un fil infini

Considérons un fil infini et vertical, parcouru par un courant I allant vers le haut.

On fixe un point M quelconque dans l'espace contenu au-dehors du fil.

Question 17 : Faire un schéma du problème, en représentant notamment la base cylindrique $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$. Quel plan passant par M est de symétrie par rapport aux courants ? En déduire la direction du champ magnétostatique en M .



Question 18 : Quelles invariances observe-t-on ? En déduire les variables de la composante du champ magnétostatique B .

Question 19 : Quel contour d'Ampère va-t-on choisir ici ? Exprimer sa circonférence et simplifier l'expression de la circulation magnétostatique.

Question 20 : Que vaut $I_{\text{enlacés}}$? À l'aide du théorème d'Ampère, en déduire l'expression de B puis de \vec{B} .

1.5.2 Champ créé par un solénoïde infini

On considère un solénoïde de rayon R et de longueur $L \gg R$. Il y a au total N spires jointives ; on note $n \triangleq \frac{N}{L}$ la densité de spires par unité de longueur. Un courant I circule dans les spires.

On **admet** que le champ magnétostatique au-dehors du solénoïde est **nul**.

On fixe un point M quelconque dans l'espace contenu au-dehors du fil.

$$\vec{B}_{\text{ext}} = \vec{0}$$

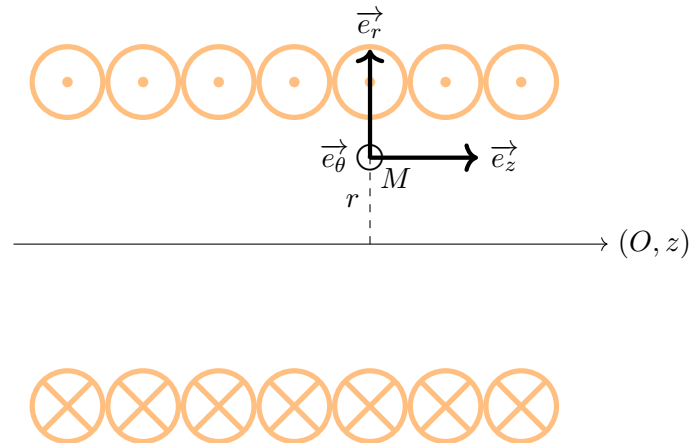


FIGURE 1.11 – Modélisation d'un solénoïde infini.

Question 21 : Quelles invariances observe-t-on ? En déduire les variables de la norme du champ magnétostatique B .

Question 22 : Quel plan passant par M est de symétrie par rapport aux courants ? En déduire la direction du champ magnétostatique en M .

On choisit comme contour d'Ampère un rectangle de longueur a selon la direction (O, z) et de longueur b selon la direction radiale, de telle manière à ce que le point M soit situé sur un des côtés de longueur a et que l'autre côté de longueur a soit à l'extérieur du solénoïde.

Question 23 : Simplifier l'expression de la circulation magnétostatique.

Question 24 : Que vaut $I_{\text{enlacés}}$? En déduire l'expression de B puis de \vec{B} . Quel commentaire peut-on faire ?

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- On rappelle l'expression de la force de Lorentz : $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$. Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
- Donner des ordres de grandeur pour le champ magnétique créé par un aimant permanent ; dans un électro-aimant à bobinage ; dans un appareil à IRM ; sur Terre.
- Tracer les lignes de champ magnétique pour un aimant droit ; pour un fil rectiligne ; pour une spire circulaire ; pour une bobine longue (ou solénoïde)..
- Définir ce que sont un plan de symétrie des courants et un plan d'antisymétrie des courants. Que peut-on dire du champ magnétique en un point de chacun de ces plans ?
- Énoncer le théorème d'Ampère en explicitant chacun des termes ainsi que leurs unités respectives.
- Déterminer en tout point de l'espace l'expression du champ magnétostatique créé par un fil infini parcouru par un courant I .
- Déterminer l'expression du champ magnétostatique créé par un solénoïde infini comportant n spires par unité de longueur parcourues par un même courant I , en admettant que le champ magnétostatique extérieur est nul.

Chapitre 2 : Induction propre, induction mutuelle

Objectifs :

- Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
- Exploiter la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.
- Déterminer le sens et l'intensité du courant induit, connaissant la résistance de la boucle de courant dans différentes situations.
- Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
- Différencier le flux propre des flux extérieurs.
- Évaluer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.
- Exprimer la densité volumique d'énergie magnétique dans un solénoïde infini.
- Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe, de grande longueur en influence totale.
- Écrire les équations électriques dans un circuit mettant en jeu une inductance mutuelle.
- Citer des exemples d'applications des courants de Foucault.
- Expliquer le principe du chauffage inductif, le principe d'une détection ampèremétrique.

2.1 Phénomène d'induction

2.1.1 Observations expérimentales

Ampère, à l'aide de son théorème, avait pu constater qu'un courant électrique pouvait être à l'origine d'un champ magnétique. Faraday, au dix-neuvième siècle, a pu observer une sorte de réciproque au théorème d'Ampère : les champs magnétiques semblent pouvoir créer des courants.

Son expérience (figure 2.1) était la suivante : une pile est reliée à un solénoïde, créant ainsi un champ magnétique en son sein. Lorsque le solénoïde est mis en mouvement à l'intérieur de l'autre bobinage, un courant électrique, détecté par le galvanomètre, circule dans ce dernier.

Cependant, lorsque le petit cylindre est immobile dans le grand cylindre, aucun courant électrique n'est détecté. Ainsi, sans que les solénoïdes ne soient en contact, le **mouvement** du premier bobinage **induit** un courant électrique dans le deuxième bobinage.

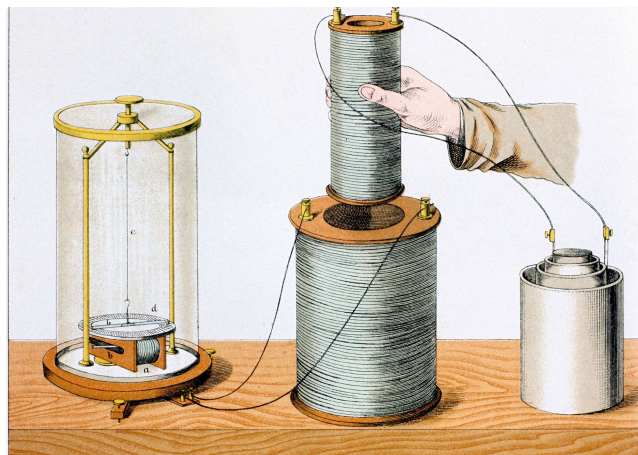


FIGURE 2.1 – Expérience de Faraday. À gauche : galvanomètre (équivalent d'un ampèremètre) ; à droite : pile ; en haut et en bas : solénoïdes.

2.1.2 Loi de Faraday, loi de Lenz

Loi de Faraday

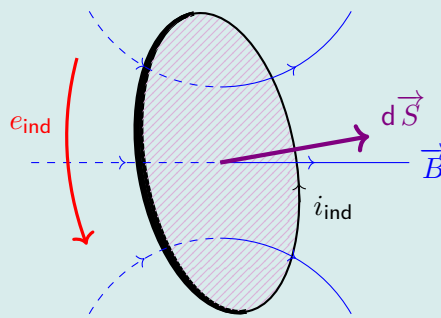
Soit un contour fermé \mathcal{C} orienté et constitué d'un matériau conducteur, et \mathcal{S} une surface quelconque « s'appuyant » sur \mathcal{C} et dirigée dans le même sens que \mathcal{C} ($d\vec{S}$ est donc dirigé selon \mathcal{C} selon la règle du tire-bouchon).

Notons $\Phi_B \triangleq \iint_{\mathcal{S}} \vec{B} \cdot d\vec{S}$ le flux du champ magnétique à travers la surface \mathcal{S} .

Si le flux magnétique varie au cours du temps, une force électromotrice ^a e_{ind} est induite dans le circuit fermé, orientée de la même manière que \mathcal{C} , telle que :

$$e_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

De cette tension induite découle un courant induit i_{ind} orienté dans le même sens que \mathcal{C} et e_{ind} .



a. C'est-à-dire une tension électrique.

☛ *Remarque* : \vec{B} est le plus souvent donné par l'énoncé ; le sens de $d\vec{S}$ dépend en revanche du sens choisi pour l'orientation de \mathcal{C} , selon la règle du tire-bouchon (à faire avec la main droite). Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise façon d'orienter le contour ; il faut en revanche rester sur la même convention le long du problème, car le sens de e_{ind} et de i_{ind} dépend directement de celui de \mathcal{C} !

☛ *Remarque* : Deux grands cas ont lieu pour provoquer de l'induction. Le circuit peut être fixe dans un champ magnétique qui varie dans le temps : $\vec{B} = \vec{B}(t)$, ou bien le circuit peut se déplacer et se déformer dans un champ magnétique constante : $d\vec{S} = d\vec{S}(t)$. Dans ce chapitre, nous allons plutôt nous intéresser au premier cas.

☛ *Remarque* : Si l'on note (O, z) l'axe de la spire, on dira que le courant est **orienté selon** $\pm \vec{u}_z$ et que la surface est **dirigé par** $\pm \vec{u}_z$.

Prenons l'exemple d'une spire fixe de rayon R et d'axe de révolution (O, x) , plongée dans un champ magnétique variable et uniforme $\vec{B}(t) = B_0 \frac{t}{T} \vec{e}_x$.

Question 1 : Exprimer Φ_B en fonction des données de l'énoncé. En déduire e_{ind} .

Question 2 : Faire un schéma électrique du circuit équivalent, en supposant que la spire a une résistance r . En déduire le courant induit i .

Question 3 : Qualitativement, que peut-on dire du sens du champ magnétique induit \vec{B}_{ind} par le courant i ?

Loi de modération de Lenz

De par le signe négatif de la loi de Faraday, une augmentation du flux magnétique induit une force électromotrice négative, et donc un courant négatif, qui créera un champ magnétique s'opposant au champ initial.

Cette loi qualitative de modération s'énonce souvent ainsi : « *Les courants induits tendent, par leurs conséquences, à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance* ».

☛ *Remarque :* Cette loi de modération, assez empirique, est valable dans de nombreux domaines de la physique et de la chimie : elle permet de justifier le fait que l'on n'observe pas « d'emballement » de phénomènes, mais plutôt une douce atténuation des causes par les conséquences.

2.2 Auto-induction

2.2.1 Flux propre et inductance propre

Mettons pour l'instant de côté l'idée de circuits différents pouvant être en influence entre eux. Le cas le plus simple à imaginer est celui d'un bobinage alimenté et parcouru par un courant i_0 . Ce courant est à l'origine d'un champ magnétique \vec{B}_0 , dont on peut calculer le flux Φ_0 à travers cette bobine. Si ce flux varie au cours du temps, on créera donc un courant induit i_1 dans le bobinage qui s'ajoutera au courant de départ i_0 , ce qui créera un nouveau champ magnétique \vec{B}_1 et donc un nouveau flux Φ_1 , etc.

Considérons, pour simplifier, un solénoïde « infini de longueur ℓ » possédant $n \triangleq \frac{N}{\ell}$ spires par unité de longueur et parcouru par un courant total $i = i_0 + i_1 + \dots$. On note \vec{B} le champ magnétique total et Φ_B son flux dans la totalité de la bobine. Le rayon du solénoïde sera noté r .

Question 4 : On rappelle l'expression du champ magnétique \vec{B} d'un solénoïde « infini de longueur ℓ » : $\vec{B} = \mu_0 \frac{N}{\ell} i \cdot \vec{u}_z$. En déduire φ_B , flux magnétique à travers une spire, puis Φ_B .

Inductance propre

Un circuit peut créer un champ magnétique induisant en lui-même des courants électriques. Si l'on note Φ_{propre} le **flux** magnétique **propre** au circuit à travers lui-même, et i l'intensité le parcourant, on s'aperçoit que les deux grandeurs sont proportionnelles :

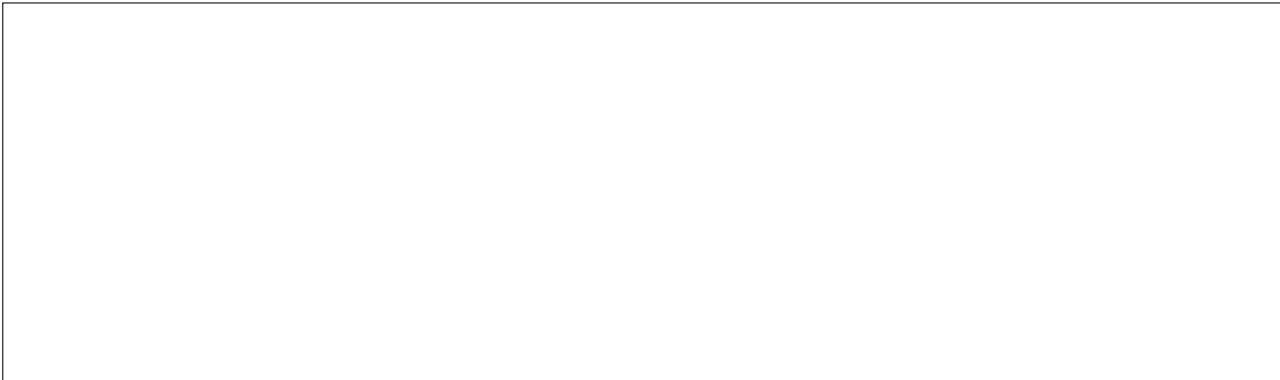
$$\Phi_{\text{propre}} = L \times i$$

où L est le coefficient d'**inductance propre** du circuit, qui s'exprime en henry H et ne dépend que de la géométrie du circuit.

Question 5 : Donner la valeur de l'inductance propre d'un solénoïde de longueur $\ell = 10$ cm, de diamètre $D = 1$ cm et possédant 5 spires/cm.

Question 6 : Exprimer la force électromotrice induite e_{ind} en fonction du courant débité i dans le circuit.

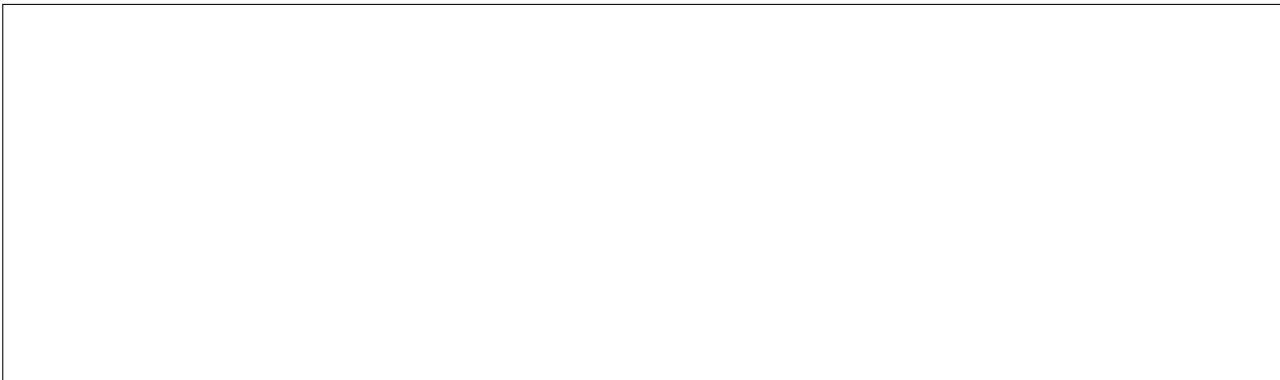
Question 7 : Représenter le circuit électrique correspondant, et montrer que l'on peut modéliser le phénomène d'auto-induction par l'introduction d'une bobine « passive », d'inductance L



2.2.2 Densité volumique d'énergie magnétique

Revenons sur le cas du solénoïde infini de longueur ℓ .

Question 8 : Après avoir exprimé i en fonction de B , montrer que $\mathcal{E}_L = u_m \times V$ avec V le volume intérieur de la bobine.



Densité volumique d'énergie magnétique

Soit un champ magnétique \vec{B} régnant dans l'espace. On associe à ce champ magnétique une **densité volumique u_m d'énergie magnétique** (en J/m^3) :

$$u_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

L'énergie électrique totale contenue dans l'espace est donc $\mathcal{E}_m = \iiint u_m dV$.

2.3 Circuits couplés par induction

2.3.1 Coefficient d'inductance mutuelle

Dans un chapitre antérieur, nous avons vu, sans entrer dans les détails, qu'un circuit pouvait induire une force électromotrice dans un autre circuit. Étudions de manière plus précise ce phénomène.

Considérons deux circuits C_1 et C_2 assimilés à des spires respectivement parcourues par des courants i_1 et i_2 . On note \vec{B}_1 et \vec{B}_2 les champs magnétiques créés par ces deux spires.

Question 9 : Justifier le fait que l'on puisse écrire $\vec{B}_1 = i_1 \cdot \vec{b}_1$ et $\vec{B}_2 = i_2 \cdot \vec{b}_2$, avec \vec{b}_1 et \vec{b}_2 deux champs (pas magnétiques, au vu de leurs dimensions !) dépendant uniquement de la géométrie de chacun des circuits et pas des intensités i_1 et i_2 .

Question 10 : Exprimer le flux $\Phi_{2 \rightarrow 1}$ du champ magnétique \vec{B}_2 à travers le circuit C_1 en fonction de i_2 et d'un paramètre dépendant uniquement de la géométrie du circuit C_2 et de son orientation par rapport au circuit C_1 .

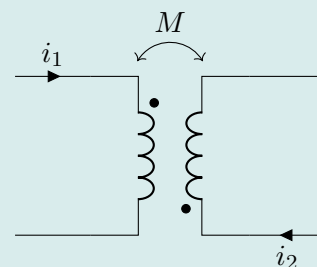
Coefficients d'inductance mutuelle

Soient deux circuits C_1 et C_2 parcourus respectivement par des courants i_1 et i_2 , qui créent des champs magnétiques \vec{B}_1 et \vec{B}_2 .

Si l'on note $\Phi_{2 \rightarrow 1}$ le flux de \vec{B}_2 à travers C_1 , et $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ le flux de \vec{B}_1 à travers C_2 , on a

$$\Phi_{2 \rightarrow 1} = M \times i_2 \quad \text{et} \quad \Phi_{1 \rightarrow 2} = M \times i_1$$

Ce même coefficient M , positif ou négatif, est appelé **coefficient d'inductance mutuelle** des deux circuits. Schématiquement, on représente alors cette interaction comme ci-contre :



☛ **Remarque** : Le coefficient d'inductance mutuelle M vérifie toujours l'inégalité suivante : $M^2 \leq L_1 L_2$. On dit que les deux circuits sont **parfaitement couplés** dans le cas d'égalité : $|M| = \sqrt{L_1 L_2}$. Cela signifie physiquement que les flux magnétiques de chaque circuit sont maximisés.

2.3.2 Équations électriques

À partir de cette partie, on supposera les circuits fixes l'un par rapport à l'autre.

Question 11 : Quel est le flux magnétique total Φ_1 capté par le circuit C_1 ? L'exprimer en fonction notamment de L_1 , inductance propre du circuit C_1 , et de M .

Question 12 : En déduire la force électromotrice $e_{\text{ind},1}$ induite dans le circuit C_1 . Par analogie, faire le même travail pour la force électromotrice $e_{\text{ind},2}$ induite dans le circuit C_2 d'inductance propre L_2 .

Question 13 : On suppose que le circuit C_1 est composé d'un générateur de fém E et de résistance totale R_1 ; le circuit C_2 n'est qu'un récepteur de résistance totale R_2 . Faire un schéma électrique du problème, et en déduire des expressions de $e_{\text{ind},1}$ et $e_{\text{ind},2}$ par la loi des mailles.

Question 14 : En déduire un système d'équations différentielles portant sur i_1 et i_2 .

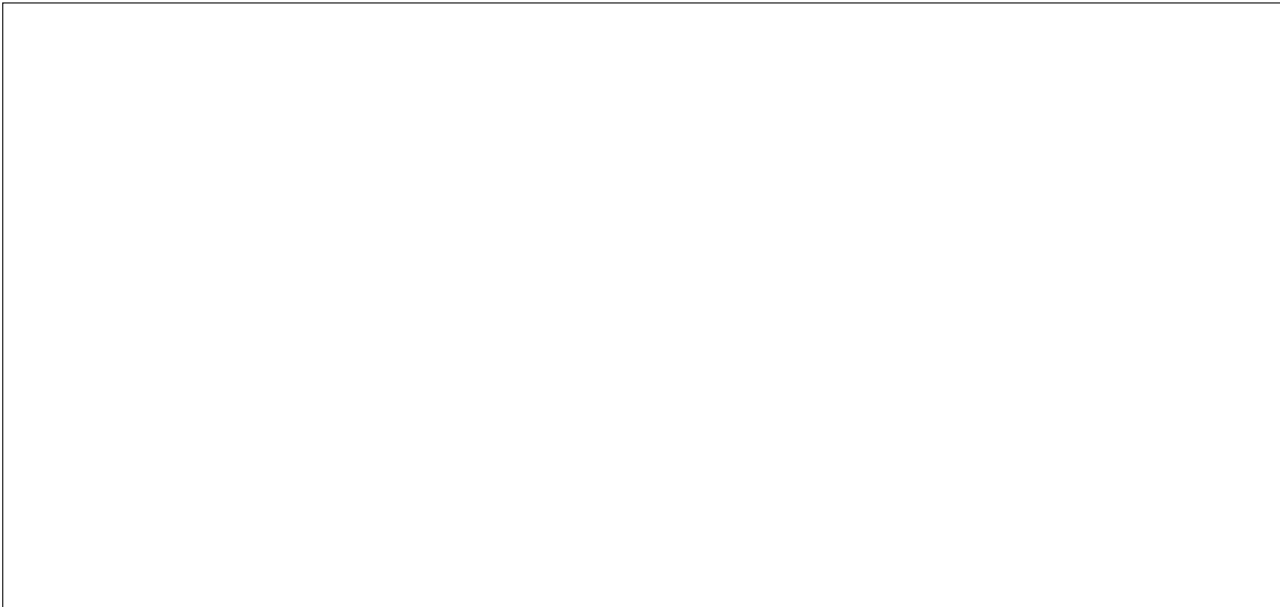
2.3.3 Étude énergétique

Détermination de l'équation énergétique en électrocinétique

Afin d'aborder d'un point de vue énergétique un problème d'électrocinétique, il faut multiplier l'équation électrique (issue de la loi des mailles) par l'intensité du courant.

Question 15 : Multiplier l'équation électrique du circuit C_1 par i_1 , puis celle du circuit C_2 par i_2 . Retrouver la puissance fournie par le générateur, les puissances dissipées par effet Joule et les puissances emmagasinées par les inductances propres des circuits.

Question 16 : Sommer les deux équations, et déterminer l'expression de la puissance emmagasinée par l'induction mutuelle entre les deux circuits. En déduire une énergie électrique de mutuelle induction.



2.4 Applications

2.4.1 Détection ampèremétrique



La pince ampèremétrique, aussi appelée capteur de courant sans contact, est un type d'ampèremètre permettant de mesurer l'intensité du courant électrique circulant dans un fil conducteur sans avoir à ouvrir le circuit pour y placer un ampèremètre classique (voir figure 2.2).

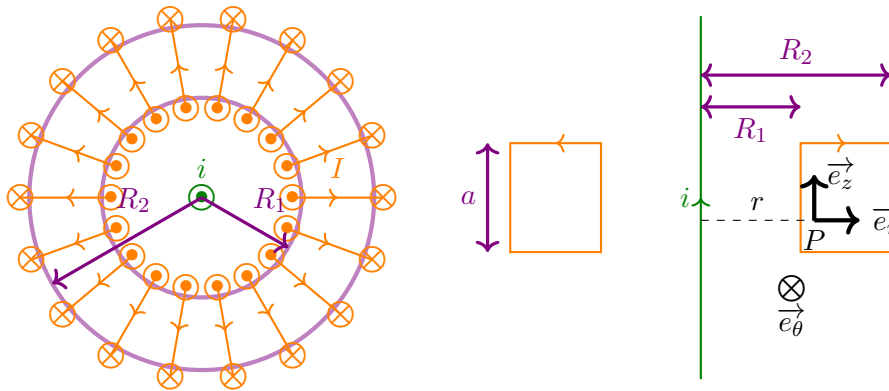
Le fonctionnement de la pince ampèremétrique se base sur la mesure indirecte du courant circulant dans un conducteur à partir du champ magnétique ou du champ électrique que génère cette circulation de courant.

En effet, la tension induite dans la pince ampèremétrique est proportionnelle à la dérivée du flux magnétique du fil d'étude, lui même proportionnel à l'intensité électrique du courant parcourant le fil. Ainsi, via quelques opérations mathématiques, on peut aisément remonter à la valeur du courant.

FIGURE 2.2 – Pince ampèremétrique. Par Pano38 — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47203181>

Soit un fil d'axe (O, z) (orienté vers le haut) dans lequel circule un courant $i(t) = i_0 \cos(\omega t)$ orienté selon \vec{e}_z . Le but est de déterminer la valeur de i_0 .

On place autour de ce fil un tore à section rectangulaire de rayon intérieur R_1 , de rayon extérieur R_2 et de hauteur a ; l'axe du tore est également (O, z) . Le tore possède un total de N spires jointives, parcourues par un courant $I(t)$ **induit** par le fil.



On rappelle que le champ créé par le fil s'écrit $\vec{B}_{\text{fil}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \cdot \vec{e}_\theta$, et on admet¹ celui créé par le tore en son sein est $\vec{B}_{\text{tore}} = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} \cdot \vec{e}_\theta$.

Question 17 : On note \vec{B} le champ magnétique total au sein du tore. Exprimer le flux φ_B de \vec{B} à travers une spire du tore.

1. Cela a probablement été vu en TD...

Question 18 : En déduire le flux total Φ_B dans le bobinage. Montrer que l'on peut l'écrire $\Phi_B = M \times i + L_{\text{bobinage}} \times I$ avec M et L à exprimer en fonction des données de l'énoncé.

Question 19 : On suppose que le bobinage possède une résistance \mathcal{R} . Montrer, par la loi des mailles sur le bobinage, que l'on a $L_{\text{bobinage}} \frac{dI}{dt} + \mathcal{R}I = -M \frac{di}{dt}$.

Question 20 : Comment peut-on déterminer i_0 ?

2.4.2 Chauffage inductif

Si un conducteur **non filiforme** est soumis à un champ magnétique variable, il va être le siège de courants électriques **volumiques** qui, par effet Joule, vont avoir tendance à l'échauffer. On appelle ces courants volumiques **courants de Foucault** : ce sont ces courants qui permettent le chauffage par induction.

Cet échauffement n'est pas forcément souhaitable : il s'agit d'une perte énergétique considérable pour un transformateur électrique par exemple ! On les évite en feuilletant le matériau conducteur, c'est-à-dire en empilant des tôles de conducteur séparées par une fine couche de vernis isolant (voir figure 2.3).

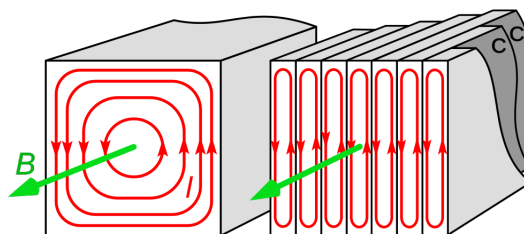


FIGURE 2.3 – Feuilletage d'un noyau d'acier pour limiter les courants de Foucault. *C* désigne le vernis (*coating*, en anglais). Par Chetvorno — Travail personnel, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46764443>

Il existe de nombreuses applications relatives à l'utilisation des courants de Foucault :

- Freinage électromagnétique : dans certains trains, bancs d'essai ou montagnes russes, un aimant se déplace devant un rail conducteur (ou inversement). Les courants de Foucault induits créent un champ magnétique opposé au mouvement (loi de Lenz), produisant une force de freinage sans contact mécanique. L'usure est fortement réduite.
- Chauffage par induction : une bobine parcourue par un courant alternatif crée un champ magnétique variable qui induit des courants de Foucault dans une pièce métallique. Les pertes par effet Joule chauffent directement le matériau. Cette technique est utilisée en métallurgie (fusion, traitements thermiques) et dans les plaques de cuisson à induction.
- Contrôle non destructif (CND) : on utilise des sondes générant un champ magnétique variable pour induire des courants de Foucault dans une pièce métallique. La présence de fissures ou de défauts modifie localement la circulation des courants et donc la réponse mesurée. Cela permet de détecter des défauts sans détériorer la pièce.
- Amortissement dans les appareils de mesure : dans certains galvanomètres analogiques, une palette conductrice se déplace dans un champ magnétique. Les courants de Foucault induits produisent un couple résistant proportionnel à la vitesse, ce qui amortit les oscillations de l'aiguille et stabilise rapidement la mesure.

2.4.3 Fonctionnement d'un alternateur

Un alternateur est un dispositif permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif.

En pratique, on utilise souvent un aimant dont l'axe nord-sud tourne à une fréquence angulaire ω . Si l'on place une spire conductrice près de cet aimant permanent, le flux magnétique Φ_B à travers la spire va alors être sinusoïdal de période $T \triangleq \frac{2\pi}{\omega}$.

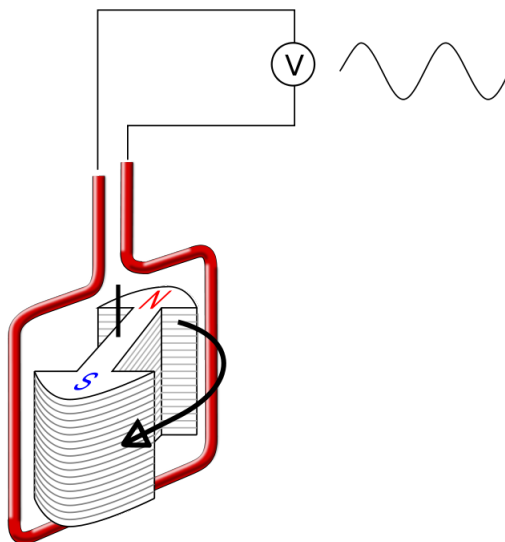


FIGURE 2.4 – Schéma d'un alternateur simple composé d'un noyau magnétique tournant (le rotor) et d'une spire immobile (le stator). La flèche noire représente la rotation du noyau magnétique. By Egmason - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10250453>

Par la loi de Faraday, on en déduit qu'une fém sinusoïdale sera induite dans le circuit, et donc un courant sinusoïdal par la loi d'Ohm.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- Énoncer la loi de Faraday (en donnant la définition du flux magnétique). Comment est déterminé le sens du champ magnétique \vec{B} ? Celui du vecteur $d\vec{S}$? Celui de la force électromotrice induite e_{ind} ? Celui du courant induit i_{ind} ?
- Énoncer la loi de modération de Lenz. Expliquer en quoi on la retrouve dans la loi de Faraday.
- Rappeler la définition de l'inductance propre d'un circuit parcouru par un courant i . On explicitera chacun des termes ainsi que leurs unités respectives. En admettant que le champ magnétique créé par un solénoïde en son sein est $B = \mu_0 n i$, avec n le nombre de spires par unité de longueur, déterminer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de longueur $\ell = 30$ cm, de rayon $R = 2$ cm et possédant $n = 10$ spires/cm. On rappelle que $\mu_0 \approx 1,26 \times 10^{-6}$ SI.
- Quelle est la relation intensité-tension pour une bobine, en convention récepteur? Donner des ordres de grandeur pour les inductances propres des bobines utilisées en travaux pratiques.
- Quelle est l'expression de l'énergie emmagasinée par une bobine? En prenant l'exemple du solénoïde infini de longueur ℓ (champ magnétique uniforme $B = \mu_0 \frac{N}{\ell} i$ en son sein), retrouver l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique.

- Soient deux circuits C_1 et C_2 parcourus respectivement par des courants i_1 et i_2 , qui créent des champs magnétiques \vec{B}_1 et \vec{B}_2 .
Donner les expressions des flux mutuels en fonction du coefficient d'inductance mutuelle M et des courants. Quelle inégalité peut-on établir entre M , L_1 (inductance propre de C_1) et L_2 (inductance propre de C_2) ? Quand arrive le cas d'égalité ?
- Définir ce que sont les courants de Foucault, puis expliquer le principe du chauffage inductif. Citer une autre application des courants de Foucault.
- Expliquer le principe d'une détection ampèremétrique.

Chapitre 3 : Électromécanique

Objectifs :

- Exprimer la force subie par un conducteur filiforme rectiligne parcouru par un courant en présence d'un champ magnétique extérieur uniforme.
- Interpréter qualitativement les phénomènes observés dans le cas des rails de Laplace.
- Établir les équations électrique et mécanique dans un dispositif de type rails de Laplace.
- Établir et interpréter la relation entre la puissance de la force de Laplace et la puissance électrique. Effectuer un bilan énergétique.
- Expliquer le principe de l'obtention d'énergie électrique à partir du phénomène d'induction.
- Expliquer le principe du freinage magnétique lié à l'apparition de courants de Foucault.

3.1 Force de Laplace

Tout comme deux charges interagissaient mécaniquement entre elles par l'action d'un champ électrostatique, deux fils conducteurs parcourus par des courants peuvent interagir mécaniquement entre eux par l'action d'un champ magnétostatique.

Force de Laplace

Soient deux conducteurs filiformes (1) et (2), respectivement parcourus par des courants constants I_1 et I_2 . Le conducteur (1) crée un champ magnétique total \vec{B}_1 , qui crée une force élémentaire $d\vec{F}_{1 \rightarrow 2}^m$ sur chaque portion infinitésimale $d\vec{\ell}_2$ (orienté dans le sens de I_2) du conducteur (2) :

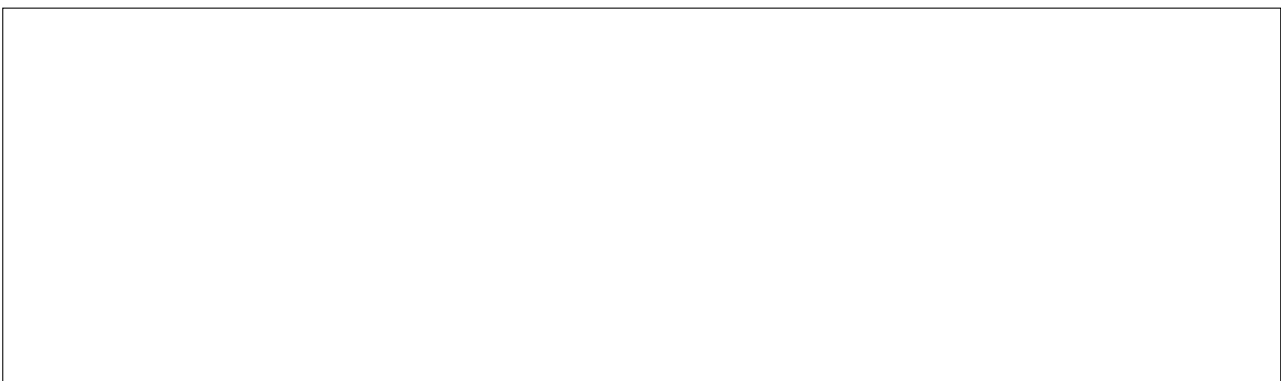
$$d\vec{F}_{1 \rightarrow 2}^m = I_2 d\vec{\ell}_2 \wedge \vec{B}_1$$

La résultante macroscopique de ces forces est la **force de Laplace** $\vec{F}_L^{1 \rightarrow 2}$ du conducteur (1) sur le conducteur (2) :

$$\vec{F}_L^{1 \rightarrow 2} = \int_{M \in (2)} I_2 d\vec{\ell}_2 \wedge \vec{B}_1(M)$$

On considère que le conducteur (1) est rectiligne et infini, et on se place en coordonnées cylindriques centrées autour de ce conducteur. Le conducteur (2), de longueur L , est également rectiligne et parallèle au conducteur (1), à la distance d de celui-ci. Les conducteurs (1) et (2) sont respectivement parcourus par des courants I_1 et I_2 , que l'on estime constants et « dans le même sens » \vec{e}_z .

Question 1 : Faire un schéma du problème, en faisant apparaître notamment la base cylindrique.



Question 2 : On rappelle que $\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \vec{e}_\theta$ en tout point du conducteur (2). Exprimer la force de Laplace \vec{F}_L du conducteur (1) sur le conducteur (2).

Question 3 : À quelle condition cette force est-elle attractive ? Répulsive ?

3.2 Rail de Laplace

3.2.1 Position du problème

Considérons un circuit fermé constitué d'un câble conducteur fixe et d'une baguette conductrice et rectiligne de masse m pouvant se mouvoir librement selon la direction x . On note R la résistance totale du circuit, considérée comme constante au cours de l'expérience.

Le circuit est plongé dans un champ magnétique uniforme et statique $\vec{B} = B_0 \cdot \vec{e}_z$, où (O, z) représente la direction perpendiculaire au circuit et $B_0 > 0$.

$x(t)$ désignera la position de la baguette au cours du temps selon l'axe (O, x) , et $v(t) \triangleq \dot{x}(t)$ sa vitesse. La dimension du circuit selon la direction y sera notée a . Le circuit étant posé sur une surface horizontale, le poids sera compensé par la réaction du support.

Tout phénomène d'auto-induction sera négligé.

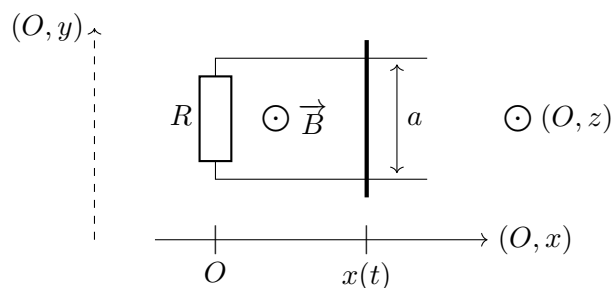


FIGURE 3.1 – Rail de Laplace vu de dessus.

3.2.2 Équations électrique et mécanique

Question 4 : Citer l'ensemble des phénomènes électriques et mécaniques qui se produisent.

Question 5 : Que permet de prédire la loi de Lenz quant au mouvement de la baguette ?

Question 6 : Recopier le circuit électrique correspondant au rail de Laplace ; orienter le circuit en choisissant un sens pour la fém induite e_{ind} aux bornes de la baguette. En déduire le sens pour l'intensité i le parcourant. Préciser le sens de l'axe (O, y) .

Question 7 : Exprimer e_{ind} en fonction de notamment B_0 et v .

Question 8 : En déduire l'expression de i par la loi des mailles. Que peut-on dire du champ magnétique créé par i ?

Question 9 : Exprimer la force de Laplace \vec{F}_L subie par la baguette. Est-elle en accord avec la loi de Lenz ?

Question 10 : En utilisant le PFD, déterminer alors l'équation du mouvement de la baguette.

Question 11 : En injectant l'expression de i issue de la loi des mailles dans celle de l'équation du mouvement, montrer que l'on a $\dot{v} + \frac{1}{\tau}v = 0$. Donner l'expression de τ .

Question 12 : Résoudre l'équation différentielle en utilisant la condition initiale $\vec{v}(t=0) = v_0 \cdot \vec{e}_x$. En déduire l'expression de $i(t)$.

3.2.3 Conversion électromécanique de puissance

Question 13 : Rappeler les expressions de F_L et de e_{ind} en fonction de B_0 , a , v et i . Multiplier la première expression par v ; la deuxième par i . Qu'observe-t-on ?

Conversion électromécanique de puissance

Lorsqu'un circuit est en mouvement dans un champ magnétique, il se produit deux phénomènes simultanés : le circuit reçoit une puissance mécanique \mathcal{P}_L de la force de Laplace, et une puissance électrique \mathcal{P}_{ind} de la fém induite.

Ces puissances sont liées par la loi de conversion électromécanique :

$$\mathcal{P}_L + \mathcal{P}_{\text{ind}} = 0$$

avec $\mathcal{P}_L = \vec{F}_L \cdot \vec{v}_{\text{circuit}}$ et $\mathcal{P}_{\text{ind}} = e_{\text{ind}} \times i_{\text{circuit}}$.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- Rappeler l'expression de la force de Laplace exercée par un champ magnétique \vec{B} sur un conducteur parcouru par un courant I .
- Comment déterminer une équation énergétique à partir de l'équation du mouvement ? Comment déterminer une équation énergétique à partir de la loi des mailles ? Comment en déduire alors l'équation énergétique totale pour un problème d'électromécanique ?
- Par quelle équation retranscrit-on la conversion électromécanique de puissance ? Expliciter tous les termes. Pourquoi peut-on estimer qu'elle est « parfaite » ?
- Établir l'équation du mouvement pour la baguette dans le problème du rail de Laplace.