

Electrotechnique

Électromagnétisme

Michel Piou

Chapitre 1 Eléments d'électromagnétisme

Édition 21/05/2010

Extrait de la ressource en ligne *MagnElecPro* sur le site Internet iutenligne.net

Table des matières

1.	POURQUOI ET COMMENT ?.....	1
2.	INDUCTION MAGNETIQUE ET FLUX D'INDUCTION MAGNETIQUE.....	2
2.1	Induction magnétique.....	2
2.2	Loi de Biot et Savart dans le vide ou l'air.....	4
2.3	Flux d'induction (à travers une surface).....	6
2.4	Conventions d'orientation.....	9
3.	FORCE ELECTROMOTRICE INDUITE (LOI DE FARADAY).....	10
3.1	Loi de Faraday:.....	10
3.2	f.e.m. dans un bobinage de N spires:.....	11
3.3	Différence de potentiel aux bornes d'une bobine:.....	12
3.4	Exercice d'application:.....	12
3.5	Loi de Lenz.....	13
3.6	Expérience du rail de Laplace:.....	13
4.	CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE.....	15
5.	PROBLEMES ET EXERCICES.....	17
Chap 1. Exercice 1 :	Rail de Laplace et conversion de l'énergie.....	17
Chap 1. Exercice 2 :	Principe d'un alternateur triphasé.....	18
6.	REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS.....	19

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

Ce document est extrait de la ressource *MagnElecPro* qui est disponible en version numérique sur le site Internet *IUT en ligne*

Je ne renonce pas à ma qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de mon document.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document et de la ressource *MagnElecPro*, notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Tout ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou*, la référence à *MagnElecPro* et au site Internet *IUT en ligne*.

Michel PIOU - Agrégé de génie électrique – IUT de Nantes - FRANCE

1. POURQUOI ET COMMENT ?

Les phénomènes électromagnétiques jouent un grand rôle en électrotechnique. On les retrouve dans les moteurs électriques, les transformateurs, les capteurs inductifs, le chauffage inductif et la distribution d'énergie électrique (la liste n'est pas exhaustive).

En partant de résultats expérimentaux, les lois qui les régissent ont été peu à peu formalisées au cours du XIX^{em} et du XX^{em} siècle.

Prérequis :

Les notions de « courant » et de « tension » (ou différence de potentiel) sont supposées connues ainsi que la loi d'Ohm « $U = R.I$ ».

Objectifs :

Notre objectif n'est pas de nous attarder sur la physique des champs, mais de préparer l'étude d'applications concrètes.

Nous nous contenterons donc d'énoncer quelques lois sans revenir aux expériences et aux mathématiques dont elles sont issues.

A l'issue de ce chapitre, les notions de **champ d'induction** magnétique \vec{B} et de **flux**, ainsi que la loi de **Faraday** devront être connus avec les choix d'**orientations** associés.

Méthode de travail :

Les notions abordées dans ce chapitre sont relativement abstraites, mais elles conditionnent la compréhension des chapitres suivants. Une grande attention devra être apportée aux questions de la rubrique « Ce que j'ai retenu de ce chapitre ». Les définitions à retenir devront être connues par cœur même si leur compréhension n'est pas totale dans un premier temps.

Travail en autonomie :

Pour permettre une étude du cours de façon autonome, les réponses aux questions du cours sont données en fin de document.

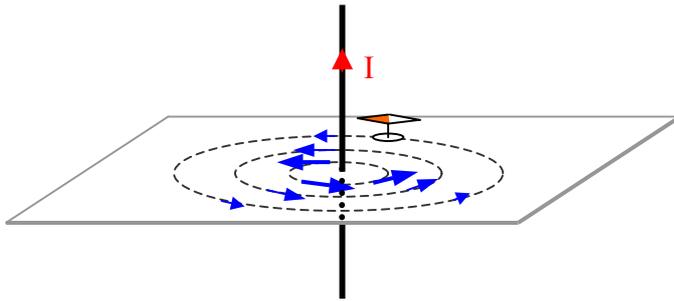
2. INDUCTION MAGNETIQUE ET FLUX D'INDUCTION MAGNETIQUE.

2.1 Induction magnétique

2.1.1 Vecteur induction magnétique

2.1.1.1 Champ d'induction magnétique engendré par un conducteur rectiligne

(voir Magnelecpro chapitre 1 vidéo 1 et Magnelecpro chapitre 1 vidéo2)



Une aiguille aimantée placée à proximité d'un conducteur change de direction lorsqu'un courant parcourt ce conducteur.

On constate que passage du courant engendre un effet à distance.

En tout point de l'environnement du conducteur, cet effet a une direction et un sens matérialisés par la position que prend l'aiguille.

Cet effet est appelé **induction magnétique**.

(Ce phénomène a été découvert en 1819 par Christian Oersted)

Pour visualiser l'induction magnétique au voisinage du conducteur, on disperse de minuscules grains de limaille de fer.

Sous l'effet de vibrations, les grains de limaille s'orientent sur des cercles concentriques autour du conducteur parcouru par un courant électrique.

Les grains de fer ont été aimantés. Ils se comportent comme de petites aiguilles qui s'enroulent autour du conducteur parcouru par le courant.

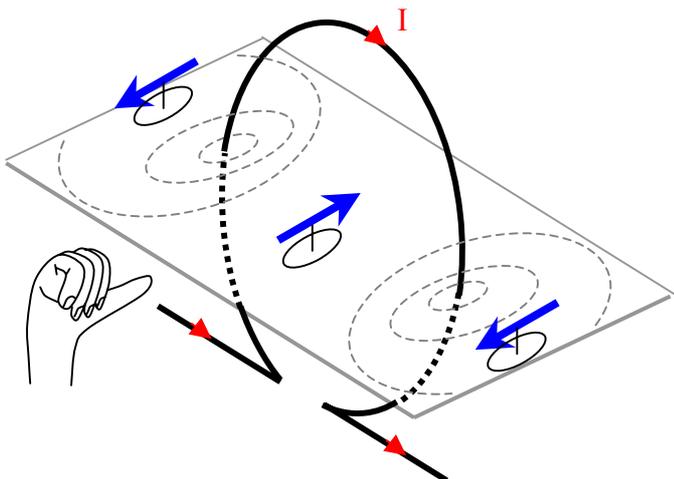
On dit que l'espace environnant le conducteur parcouru par un courant est soumis à un **champ d'induction magnétique**.

En chaque point de l'espace, on exprime l'induction magnétique par un **vecteur induction magnétique** noté \vec{B} .

La direction et le sens du vecteur représentent la direction et le sens que prendrait une aiguille aimantée placée en ce point.

La longueur (ou module) des vecteurs représente l'importance du phénomène en chaque point.

Plus on s'éloigne du conducteur, plus l'induction magnétique s'affaiblit.



2.1.1.2 Champ d'induction magnétique engendré par une spire

(voir Magnelecpro chapitre 1 vidéo3)

Un courant I qui parcourt une spire conductrice, engendre un **effet à distance**: les aiguilles aimantées placées dans son voisinage sont déviées.

Comme pour le conducteur rectiligne, en chaque point du voisinage de la spire, cet

effet se caractérise par une valeur, une direction et un sens. Cet effet est appelé: **Induction magnétique**

En chaque point de l'espace, on exprime l'induction magnétique par un **vecteur induction magnétique** noté \vec{B} .

Sa **direction** est celle d'une aiguille aimantée placée en ce point.

Son **sens** est celui de l'aiguille aimantée (on l'obtient aussi par la "règle de la main droite" ou celle de "tire-bouchon"). (1)

Son **module** indique la quantité de l'effet en ce point. Dans le système d'unités internationales, il s'exprime en Tesla.

L'unité légale de l'induction est le **Tesla** (symbole: T).

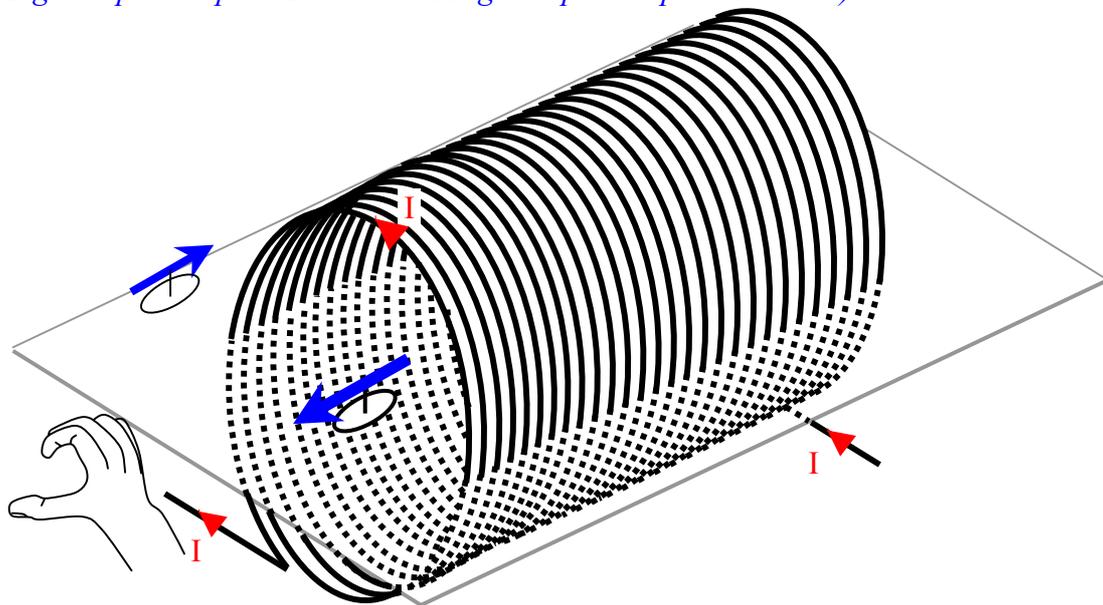
(On trouve aussi parfois une ancienne unité: le Gauss; $1\text{T} = 10^4$ gauss).

Le vecteur \vec{B} caractérise donc l'effet du magnétisme en un point. Il dépend de:
 la valeur et du sens du courant dans le circuit électrique
 la forme de ce circuit et du milieu dans lequel il est placé. (par exemple dans l'air).

2.1.1.3 Champ d'induction magnétique engendré par une bobine

(Une bobine est un ensemble de spires en série)

(voir [Magnelecpro chapitre 1 video4](#) et [Magnelecpro chapitre 1 video5](#))



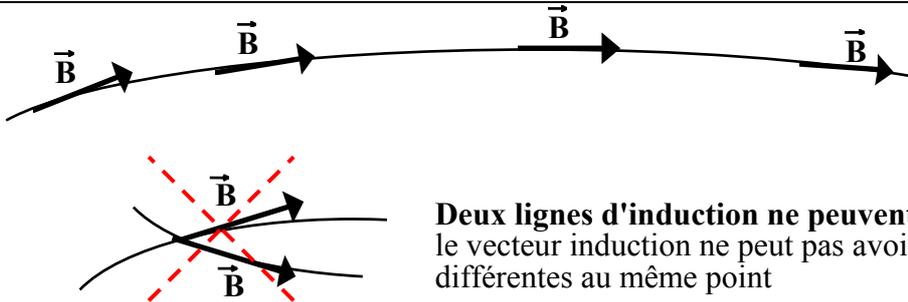
Le sens du champ d'induction à l'intérieur de la bobine est donné par la règle de la main droite.

(1) Règle de la main droite: Les doigts de la main droite étant placés dans le sens du courant dans la spire, le pouce indique le sens du vecteur induction magnétique \vec{B} à l'intérieur de la spire.

Règle du "tire-bouchon" : Si un tire-bouchon tourne dans le sens du courant, il progresse dans le sens du vecteur induction magnétique \vec{B} à l'intérieur de la ou des spires.

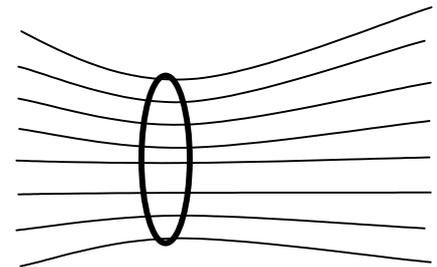
2.1.2 Ligne d'induction et tube d'induction.

Par définition, une **Ligne d'induction** est une ligne imaginaire telle qu'en chacun de ses points le vecteur induction magnétique lui soit tangent.



Deux lignes d'induction ne peuvent pas se croiser, car le vecteur induction ne peut pas avoir deux directions différentes au même point

Par définition, un **Tube d'induction** est un ensemble de lignes d'induction s'appuyant sur un contour fermé et limitant ainsi une zone de l'espace.



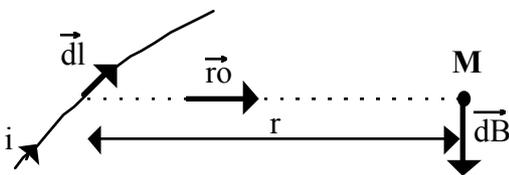
2.2 Loi de Biot et Savart dans le vide ou l'air.

2.2.1 Principe.

Un conducteur quelconque peut être décomposé en une somme de tout petits morceaux de conducteurs mis bout à bout. Lorsqu'il est parcouru par un courant, chacun de ces petits morceaux engendre en chaque point de l'espace qui l'environne un petit champ d'induction.

En faisant la somme vectorielle des contributions de tous les petits morceaux du conducteur, on peut en déduire le champ d'induction en un point engendré par la totalité du conducteur parcouru par ce courant.

Enoncé de la loi:



Un élément de conducteur $d\ell$ infiniment petit parcouru par un courant i crée en un point M de son environnement un "champ" d'induction magnétique

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{r}_0}{r^2}$$

avec: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: perméabilité magnétique du vide en unité SI.

\vec{r}_0 : vecteur unitaire.

$d\vec{\ell}$: direction et sens du courant i ; et module égal à la longueur de l'élément $d\ell$.

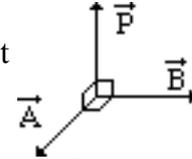
Cette loi n'est vérifiée que si r est très grand devant le diamètre du conducteur.

Le symbole \wedge est le symbole du "produit vectoriel":

On définit le produit vectoriel \vec{P} de deux vecteurs \vec{A} et \vec{B} (c'est à dire $\vec{P} = \vec{A} \wedge \vec{B}$) par:

$$\|\vec{P}\| = \|\vec{A}\| \cdot \|\vec{B}\| \cdot \sin(\alpha), \text{ avec } \alpha = (\vec{A}, \vec{B}).$$

direction et sens de \vec{P} tels que \vec{A} , \vec{B} et \vec{P} forment un trièdre direct



L'induction \vec{B} produite par un circuit électrique complet est la somme vectorielle des $d\vec{B}$ produits par tous les éléments $d\vec{\ell}$ successifs qui constituent ce circuit.

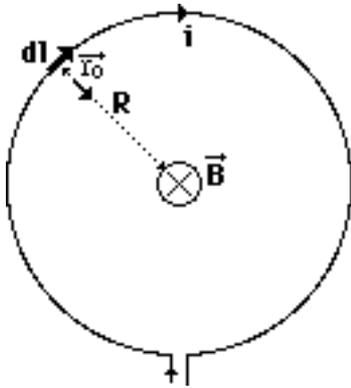
2.2.2 Convention de notation:

\odot : Flèche perpendiculaire au plan de la feuille et dirigée vers le lecteur (on voit la pointe de la flèche).

\otimes : Flèche perpendiculaire au plan de la feuille et dirigée vers la feuille (on voit la queue de la flèche).

2.2.3 Exemple:

Induction magnétique produite au centre d'une spire circulaire placée dans l'air.



Démontrer que : $\|\vec{B}\| = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$.

(Réponse 1:)

2.2.4 Conclusion:

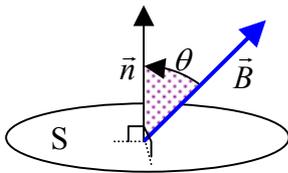
On retiendra seulement que par le calcul ou à l'aide de logiciels spécialisés, on peut généralement déterminer l'induction \vec{B} engendrée par un circuit en un point M quelconque de son environnement (dans l'air ou le vide).

Nous ne nous attarderons pas sur la loi de Biot et Savart dans la suite de ce cours.

2.3 Flux d'induction (à travers une surface)

La notion de "flux" constitue un outil de calcul important, car le flux est doté d'une propriété remarquable: "la conservation". Il apparaît également dans les formules servant à déterminer les effets du magnétisme. *C'est une notion un peu abstraite, mais il est important de faire tout de suite l'effort de la mémoriser.*

2.3.1 Flux d'une induction uniforme à travers une surface plane:



Soit \vec{n} un vecteur unitaire normal ⁽²⁾ à la surface S (le sens de \vec{n} est choisi arbitrairement, il définit le sens positif)

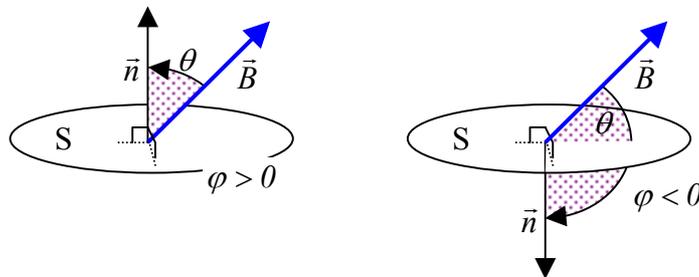
Soit \vec{B} un champ d'induction uniforme ⁽³⁾ dans le voisinage de S.

- On définit le flux φ du vecteur \vec{B} à travers la surface S par la relation: $\varphi = \|\vec{B}\| \cdot S \cdot \cos(\theta)$. *C'est un scalaire et non pas un vecteur.*

(Si on définit un « vecteur surface » par $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$, on peut exprimer le flux par le produit scalaire

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S})$$

- Le flux est une grandeur algébrique dont le signe dépend de la convention initiale pour \vec{n} :



L'unité légale de flux du vecteur induction magnétique est le Weber (symbole Wb)

- Dans la suite de ce cours, le flux du vecteur induction magnétique sera simplement désigné par le mot « flux ».

⁽²⁾ unitaire = module 1
normal = perpendiculaire au plan de la surface

⁽³⁾ uniforme $\Leftrightarrow \vec{B}$ est le même en tout point de ce voisinage

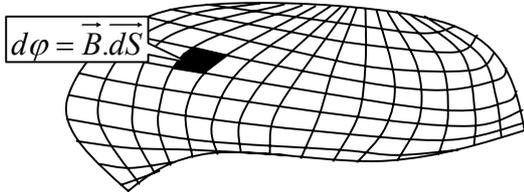
2.3.2 Flux d'un champ d'induction non-uniforme à travers une surface non-plane:

- **Champ d'induction magnétique.**

Si le vecteur induction magnétique n'est pas le même en tout point de l'espace considéré, on est conduit à le décrire avec des mots ou sous la forme d'une expression mathématique (fonction de la position (x,y,z) dans l'espace). On parle alors de « champ d'induction magnétique ».

Le mot « **champ** » signifie « description de la grandeur dans une zone considérée de l'espace »;

- Flux si \vec{B} n'est pas uniforme ou si S n'est pas plane.



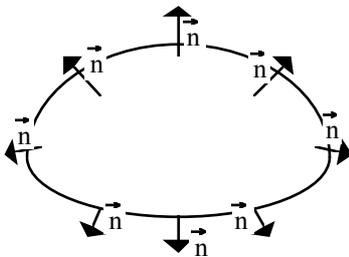
Dans ce cas, on divise la surface en une somme de surfaces ds infiniment petites sur lesquelles on peut considérer \vec{B} uniforme et ds plane.

Le flux total sur la surface S est la somme des flux élémentaires $d\varphi$ sur toutes les surfaces ds qui constituent

$$S: \varphi = \sum d\varphi \quad (4)$$

Il existe maintenant des logiciels spécialisés capables de décomposer une surface en une somme d'un grand nombre de surfaces élémentaires, de calculer le flux de \vec{B} sur celles-ci et d'en déduire le flux total sur l'ensemble de la surface considérée.

2.3.3 Loi de conservation du flux:



Le flux d'un champ d'induction sortant d'une surface fermée est nul. ⁽⁵⁾

On dit que **le flux est conservatif**.

(Cette propriété ne sera pas démontrée dans ce cours).

- **Remarque:**

La surface fermée considérée **n'est pas nécessairement une surface matérielle**. (C'est une zone de l'espace qu'on limite par une frontière qui peut être fictive).

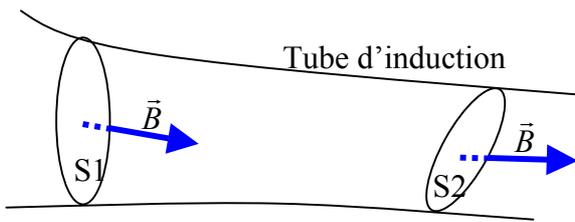
(4) **Compléments hors cours**

mathématiquement, on écrit cela sous forme d'une intégrale de surface: $\varphi = \iint_S \vec{n} \cdot \vec{B} \cdot ds$ ou

$$\varphi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

(5) Une surface « fermée » constitue l'enveloppe d'un volume.

- Application à un tube d'induction.



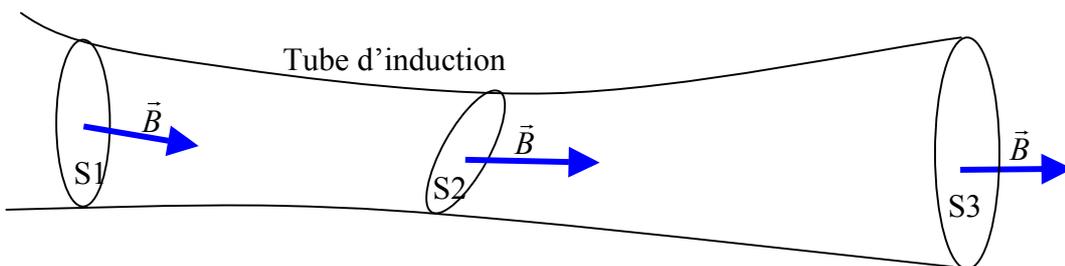
Un morceau de tube d'induction considéré entre deux sections S1 et S2 constitue une surface fermée. Le flux sur la surface latérale du tube est nul car \vec{B} est tangent à cette surface (par définition d'une ligne d'induction et d'un tube d'induction). Par conséquent la somme des flux qui sortent par S1 et par S2 est nulle.

Donc le flux qui entre dans la surface par S1 est égal au flux qui sort par S2.

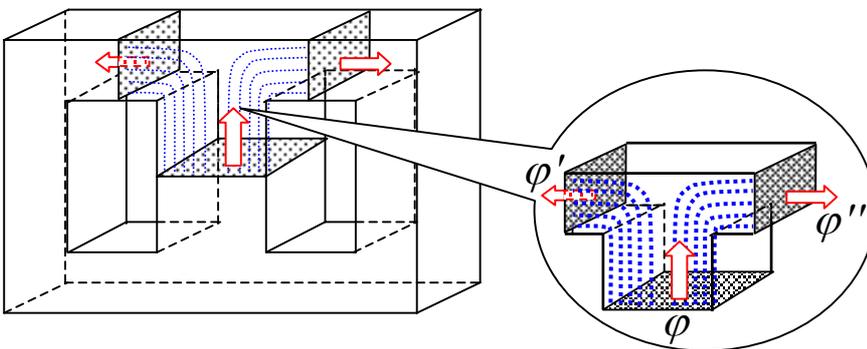
En généralisant ce raisonnement, on en déduit que:

Le flux d'induction magnétique est le même dans n'importe quelle section d'un tube d'induction.

Deux exemples de tubes d'induction sont représentés ci-après:



D'après la loi de conservation du flux :

$$\begin{aligned} \varphi_1 \text{ dans } S_1 \\ &= \varphi_2 \text{ dans } S_2 \\ &= \varphi_3 \text{ dans } S_3 \end{aligned}$$


Dans un chapitre suivant, nous verrons que dans un circuit magnétique, un tube d'induction peut se séparer en plusieurs branches.

Dans l'exemple ci-contre (circuit magnétique d'un transformateur), le flux de la colonne centrale se sépare en deux.

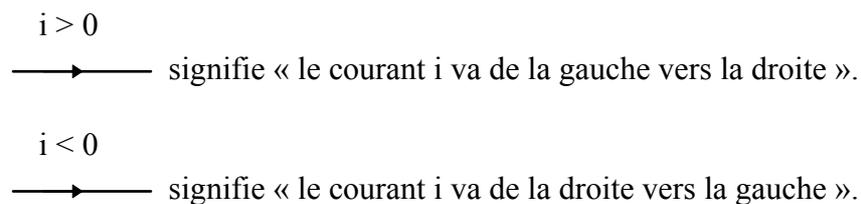
La loi de conservation du flux se traduit donc par $\varphi = \varphi' + \varphi''$

2.4 Conventions d'orientation.

Par la suite, nous allons préciser les relations qui existent entre différentes grandeurs: *courant*, *tension*, *flux*... Ces différentes grandeurs ont non seulement une valeur, mais également **un sens repéré par une orientation associée à un signe.**

- *Il convient avant toute chose de bien distinguer sens et orientation.*

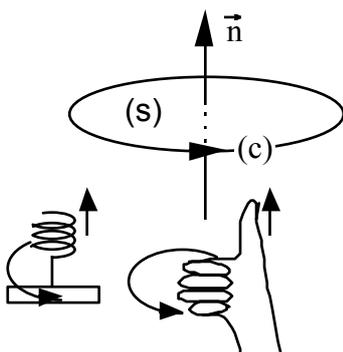
Les **orientations** sont des **repères** choisis arbitrairement afin de faciliter les calculs ou l'expression d'un résultat:



Orienter une grandeur consiste donc à lui associer un repère (souvent une flèche) sur un schéma. La flèche définit le « sens positif » de la grandeur.

- Dans le paragraphe suivant, nous allons aborder la notion de f.e.m induite engendrée par les phénomènes électromagnétiques. Cette grandeur s'exerce dans un certain sens, et la loi qui la décrit impose de définir au préalable des conventions d'orientation qui lui sont associées.

Notre premier objectif est de fixer une règle permettant d'associer à une orientation (un sens positif) tournant sur un contour, une orientation (un sens positif) pour la normale à une surface limitée par ce contour ⁽⁶⁾:



Soit une surface (s) de contour (c).

Le sens de parcours positif du contour et le sens de la normale \vec{n} à la surface (s) sont associés par la règle de la main droite ou la règle du tire-bouchon:

* Les doigts de la main droite indiquent le sens de parcours de (c), et le pouce le sens de \vec{n} .

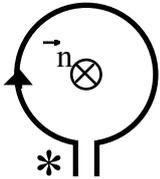
* Le tire-bouchon lorsqu'il visse progresse dans le sens de \vec{n} .

Cette règle, appliquée à une spire conductrice, permet de définir la convention d'orientation entre le sens de parcours de cette spire et le sens de la normale \vec{n} à cette spire (qui détermine le signe du flux traversant cette spire).

⁽⁶⁾ Cette règle est un choix arbitraire. Nous avons retenu le choix généralement pris dans les ouvrages.

Remarque:

Un courant positif (dans le sens du parcours) crée à l'intérieur de la spire un champ d'induction positif (dans le sens de \vec{n}).

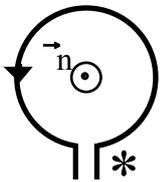


La figure ci-contre montre l'ensemble des orientations choisies de manière cohérente entre-elles.

Pour faciliter l'application de ces conventions (en particulier pour l'étude des transformateurs qui sera présentée par la suite), on matérialise par un **repère de polarité**

« * » la borne choisie comme **borne entrante** (ou borne de polarité) de la spire.

(Choisir la borne « * » revient à choisir l'orientation de la spire et de sa normale positive).



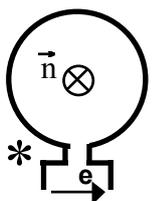
La figure ci-contre présente le second ensemble d'orientations cohérentes entre elles.

Le choix entre les deux façons d'orienter la spire et sa normale est a priori arbitraire.

On peut remarquer que la normale au plan de la spire est toujours orientée dans le sens de l'induction qu'engendrerait à l'intérieur de cette spire un courant entrant par la borne « * ».

3. FORCE ELECTROMOTRICE INDUITE (LOI DE FARADAY).

3.1 Loi de Faraday:



Toute variation du flux φ dans une spire ⁽⁷⁾ engendre dans celle-ci une f.e.m. (induite) d'expression:

$$e(t) = - \frac{d(\varphi(t))}{dt} \quad \text{dans le sens de l'orientation.}$$

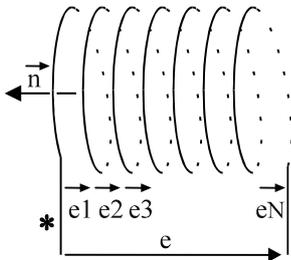
(La flèche de e part du point * pour aller vers l'autre extrémité de la spire)

Cette relation sera admise sans démonstration.

⁽⁷⁾ La spire ainsi représentée ne constitue pas un « contour fermé » délimitant une surface « s » sur la quelle on peut calculer le flux. On contourne la difficulté en considérant que l'ouverture de la spire est très petite.

- Cette f.e.m. apparaît quel que soit le mode de variation du flux: déformation du circuit ou variation de l'induction.

3.2 f.e.m. dans un bobinage de N spires:



$$e(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) + \dots + e_N(t)$$

$$e(t) = -\frac{d\varphi_1(t)}{dt} - \frac{d\varphi_2(t)}{dt} - \frac{d\varphi_3(t)}{dt} - \dots - \frac{d\varphi_N(t)}{dt}$$

$$\text{Soit } \phi(t) = \varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t) + \dots + \varphi_N(t)$$

ϕ est appelé « flux **total** » dans le bobinage.

$$\Rightarrow \boxed{e(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt}}$$

C'est sous cette forme qu'il convient de retenir l'expression de la f.e.m. induite dans un bobinage.

On fera attention aux orientations.

- **Remarque 1:**

La lettre φ désignera toujours pour nous le flux dans 1 spire du bobinage (c'est à dire le flux dans une section), alors que la lettre ϕ désignera le flux total dans un bobinage.

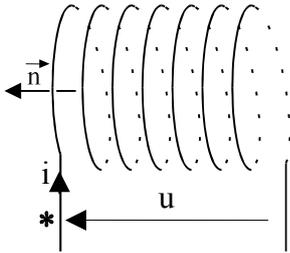
C'est l'un des points délicats auquel il convient d'être très attentif. L'usage désigne malheureusement avec le même mot « flux » deux grandeurs φ et ϕ qui ne sont identiques que si le bobinage n'a qu'une seule spire.

- **Remarque 2:**

Si les N spires sont traversées par le même flux $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_N \Rightarrow \phi = N.\varphi$

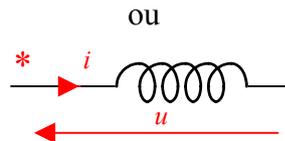
$\Rightarrow e(t) = -\frac{d(N.\varphi(t))}{dt}$; mais ceci est un cas particulier.

3.3 Différence de potentiel aux bornes d'une bobine:

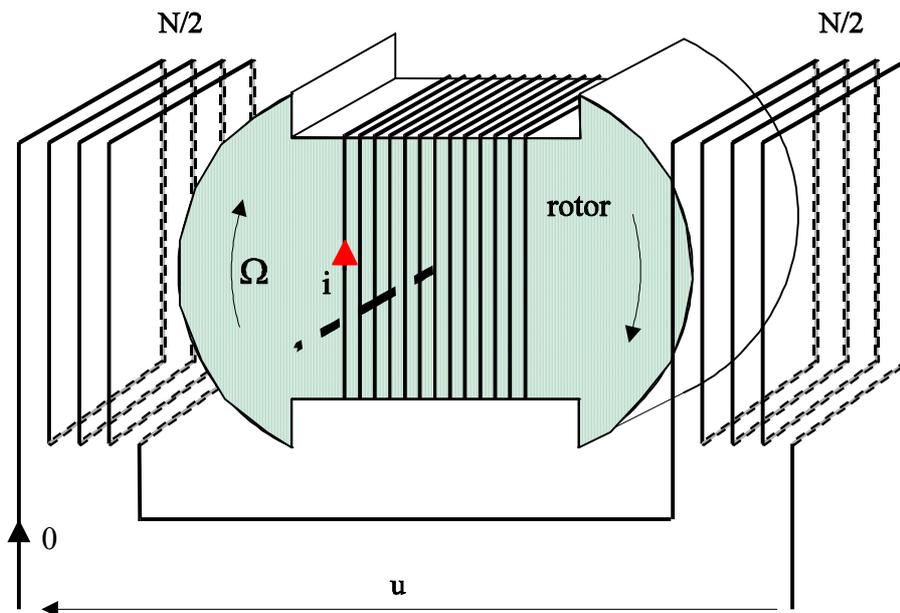


Soit une bobine, constituée avec un conducteur enroulé de résistance totale « r ». Si elle est parcourue par un courant $i(t)$ et traversée par un flux total $\phi(t)$, la tension à ses bornes s'exprime par la relation

$u(t) = r.i(t) - e(t)$ ou $u(t) = r.i(t) + \frac{d\phi(t)}{dt}$ à condition de prendre des orientations conformes à l'exemple ci-contre. ⁽⁸⁾



3.4 Exercice d'application:



Un alternateur est constitué de deux parties:

- Un électroaimant appelé « rotor » (au centre) en rotation à la vitesse angulaire Ω autour de son axe.
- Un bobinage fixe de N spires au total réparti par moitié de part et d'autre du rotor.

L'électroaimant tourne à la vitesse angulaire Ω constante dans le sens de la flèche. Il est équipé d'un bobinage alimenté par un courant i continu > 0 .

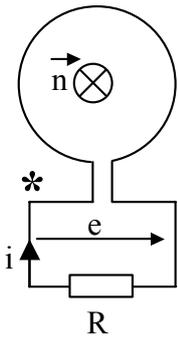
On suppose que sa géométrie est telle qu'il engendre dans chaque spire du bobinage fixe un flux ϕ alternatif sinusoïdal d'amplitude ϕ_{max} .

Munir le bobinage fixe d'un repère de polarité "*". Puis en prenant pour instant origine l'instant où le rotor est dans la position indiquée sur la figure, représenter $\phi(t)$ dans une spire du bobinage fixe et la tension $u(t)$ aux bornes de celui-ci (sachant que le courant dans ce dernier est supposé nul). Préciser l'amplitude de u .

(Réponse 2:)

⁽⁸⁾ Cette relation néglige le couplage capacitif entre les différentes spires qui peut apparaître en très haute fréquence.

3.5 Loi de Lenz.



Si le circuit est fermé, le sens du courant i qu'engendre la f.e.m. induite e est tel que le flux qu'il crée à travers son propre circuit s'oppose à la variation qui lui a donné naissance.

Exemple:

Si le flux dans la spire est croissant (dans le sens de l'orientation \vec{n}), déterminer le signe de la f.e.m. « e » aux bornes de la spire, et le signe du courant i qui entre dans la spire par la borne *.

(Réponse 3:)

Animation sur <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/lenz.html>

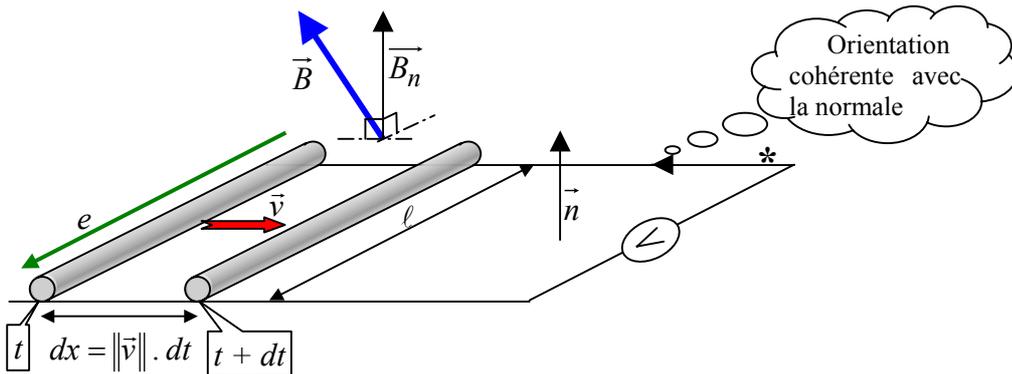
3.6 Expérience du rail de Laplace:

L'expérience de Laplace fait apparaître les deux phénomènes qui sont à l'origine du fonctionnement des machines électromécaniques (moteurs électriques):

(voir *Magnelecpro chapitre 1 video6*)
 et voir *Chap 1. Exercice 1* :

- **Déplacement** d'un conducteur placé dans un "champ" d'induction \Rightarrow **f.e.m.** (induite).
- **Courant** dans un conducteur placé dans un "champ" d'induction \Rightarrow **force** (de Laplace).

3.6.1 F.e.m. induite:



Un conducteur de longueur ℓ se déplace sur un rail à la vitesse \vec{v} dans un champ d'induction uniforme \vec{B} . La spire qu'il constitue avec les rails et le voltmètre est traversée par un flux variable.

Il y a donc apparition d'une f.e.m. « e » à ses bornes:

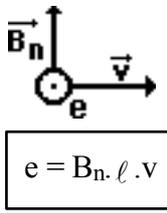
En un temps dt , le conducteur se déplace vers la droite d'une quantité dx .

Le flux qui traverse la spire diminue d'une quantité $d\phi = -B_n \cdot \ell \cdot dx$ ⁽⁹⁾ (Avec l'orientation choisie pour la spire, la composante de \vec{B} normale à la spire: (\vec{B}_n) est positive).

⁽⁹⁾ $d\phi < 0$ car l'aire de la spire diminue.

Donc: la variation du flux dans la spire en un temps dt est $d\phi = -B_n \cdot \ell \cdot dx$, et la f.e.m. induite dans le conducteur est:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{-B_n \cdot \ell \cdot dx}{dt} = B_n \cdot \ell \cdot \frac{dx}{dt} = B_n \cdot \ell \cdot v$$



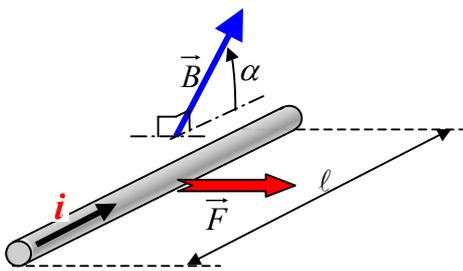
Règle simple pour retrouver le sens de la fem = **G**énérateur: règle de la main **G**AUCHE:
 Le pouce = le sens de déplacement.
 L'index = la fem.
 Le majeur = le magnétisme.

$e = B_n \cdot \ell \cdot v$

Compléments hors cours

On peut aussi noter: $e = (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{\ell}$

3.6.2 Force de Laplace

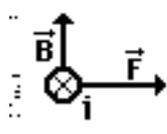


Un conducteur de longueur ℓ , placé dans un champ d'induction uniforme \vec{B} , et parcouru par un courant i est soumis à une force \vec{F} telle que:

$$\vec{F} \perp \vec{B} \text{ et } \vec{F} \perp \vec{i} \text{ et } \|\vec{F}\| = \|\vec{B}\| \cdot i \cdot \ell \cdot \sin(\alpha)$$

$$\text{avec } \alpha = (\vec{i}, \vec{B})$$

Animation sur : <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/forcelaplace.html>



Règle simple pour retrouver le sens de la force: force = moteur: règle de la **main DROITE**:
 Le pouce = la force.
 L'index = l'intensité.
 Le majeur = le magnétisme.

Compléments hors cours

On peut aussi noter: $\vec{F} = i \cdot (\vec{\ell} \wedge \vec{B})$

4. CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE.

1 Le vecteur induction magnétique \vec{B} caractérise l'effet du magnétisme en un point de l'espace. Dans le système international, en quelle unité s'exprime son module ?

2 Qu'est-ce qu'une ligne d'induction ?

3 Deux lignes d'induction peuvent-elles se croiser ?

4 Qu'est-ce qu'un tube d'induction (ou tube de champ) ?

5 Comment s'exprime le flux du vecteur induction à travers une surface plane si \vec{B} est uniforme et normal à cette surface ?

6 Comment s'exprime le flux du vecteur induction à travers une surface plane si \vec{B} est uniforme faisant un angle θ avec la normale à cette surface ?

7 Comment s'exprime le flux à travers une surface non-plane si \vec{B} est non-uniforme ?

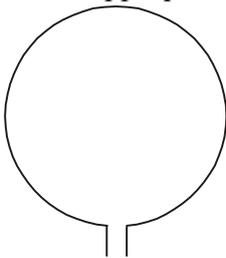
8 Le flux est-t-il toujours positif ?

9 Le flux du vecteur induction \vec{B} à travers une surface fermée est doté d'une propriété importante; Quelle est cette propriété ?

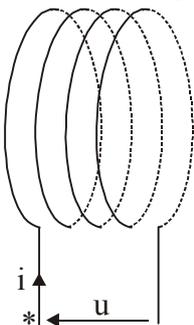
10 Le flux du vecteur induction \vec{B} à travers une section d'un tube d'induction est doté d'une propriété importante; Quelle est cette propriété ?

11 Le mot « flux » recouvre deux concepts différents que nous avons notés φ et ϕ . Quelle est la différence entre φ et ϕ ?

12 En appliquant la convention retenue dans ce cours, orienter de manière cohérente la borne de polarité « * », le sens de circulation sur la spire, le sens de la normale à cette spire et le sens de la f.e.m. à ses bornes. Exprimer cette f.e.m. en fonction du flux qui traverse cette spire (loi de Faraday).

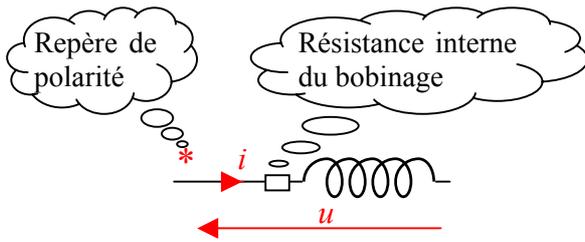


13 Le bobinage ci-contre présente une résistance interne R , il est parcouru par un courant « i ». Ses 4 spires sont traversées respectivement par des flux $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ et $\varphi_4(t)$ (orientés de façon cohérente avec la borne de polarité « * »).



Exprimer $u(t)$ en fonction de R , $i(t)$, $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ et $\varphi_4(t)$.

14



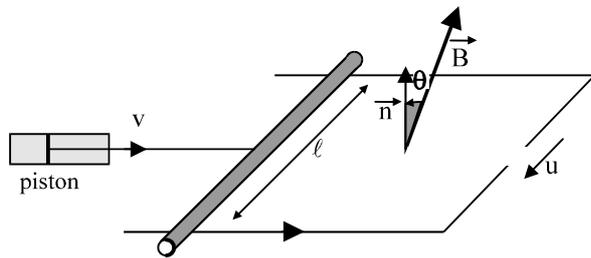
Quelle est la relation entre la tension, le courant et le flux total pour le bobinage ci-contre (avec les orientations de i et u choisies) ?

15 Que dit la loi de Lenz ?

16 L'expérience du « rail de Laplace » décrit deux phénomènes exprimés par deux formules (avec les deux mains). Indiquer ces relations ?

5. PROBLEMES ET EXERCICES.

Chap 1. Exercice 1 : Rail de Laplace et conversion de l'énergie.



Un piston pousse un conducteur mobile de sorte que celui-ci glisse sur deux rails conducteurs à une vitesse constante v .

L'ensemble conducteur mobile et rails constitue une spire presque fermée sur elle-même.

Cette spire est soumise à un champ d'induction magnétique uniforme engendré par un aimant permanent non représenté sur la figure.

\vec{B} fait un angle θ avec la normale \vec{n} au plan de cette spire.

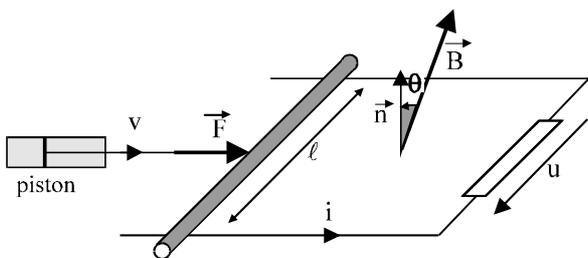
En un intervalle de temps dt infiniment petit, le conducteur se déplace d'une distance $dx = v \cdot dt$.

1) Orienter la spire de façon cohérente avec la normale \vec{n} .

2) Exprimer la variation de flux $d\phi$ dans la spire durant l'intervalle de temps dt .

Cette variation de flux engendre une f.e.m. $e = -\frac{d\phi}{dt}$ dans cette spire. Compte tenu des orientations choisies sur la figure ci-dessus, choisir $u = e$ ou $u = -e$. En déduire u en fonction de v et des dimensions du système.

3) Les rails sont reliés électriquement par un dipôle récepteur. L'ensemble conducteur mobile, rails et dipôle constitue une spire fermée sur elle-même parcourue par un courant i .



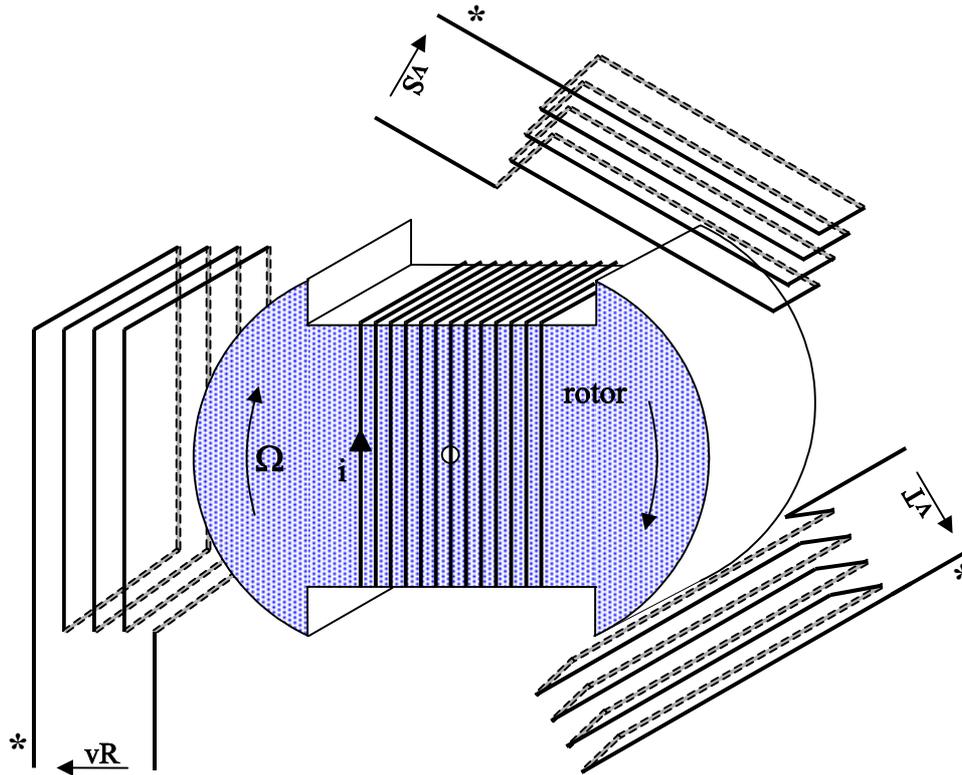
Le piston pousse le conducteur mobile avec une force \vec{F} de sorte que celui-ci se déplace toujours à la vitesse v .

En un intervalle de temps dt , le conducteur se déplace d'une distance $dx = v \cdot dt$. Il reçoit du piston une énergie mécanique égale au travail de la force \vec{F} soit: $dw = \|\vec{F}\| \cdot dx$.

Exprimer l'énergie électrique reçue par le dipôle récepteur pendant l'intervalle de temps dt en fonction de u et de i .

En négligeant les frottements ainsi que la résistance du conducteur mobile et des rails, l'énergie mécanique $dw = \|\vec{F}\| \cdot dx$ reçue par l'ensemble qui constitue la spire est intégralement transmise au dipôle récepteur. En déduire $\|\vec{F}\|$ en fonction de $\|\vec{B}\|$, i et des caractéristiques géométriques du système. Comparer à la relation donnée dans le cours.

Chap 1. Exercice 2 : Principe d'un alternateur triphasé.



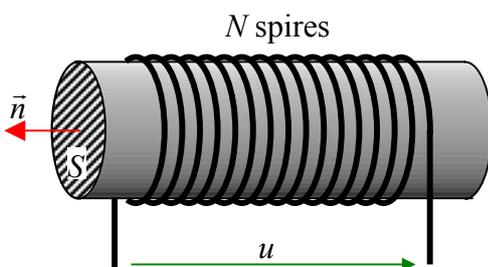
Un alternateur est constitué d'un électroaimant en rotation et de trois bobinages (notés R, S et T) fixes de 50 spires chacun.

L'électroaimant tourne à la vitesse constante de 3000 tours/minute. Il est alimenté par un courant continu i constant et positif. Sa géométrie est telle qu'il engendre dans une spire d'un bobinage fixe un flux alternatif sinusoïdal d'amplitude $\hat{\phi} = 20 \text{ mWb}$.

Les trois bobinages fixes sont décalés de $2\pi/3$ les uns par rapport aux autres.
Les courants dans les trois bobinages sont nuls.

En prenant pour instant origine l'instant où l'électroaimant (appelé rotor) est dans la position indiquée sur la figure, représenter le flux $\phi(t)$ dans une spire du bobinage de gauche (R) ainsi que les f.e.m. $v_R(t)$, $v_S(t)$ et $v_T(t)$ aux bornes des trois bobinages fixes. Préciser l'amplitude de ces f.e.m..

Chap 1. Exercice 3 : Formule de Boucherot



Le bobinage ci-contre est enroulé sur un noyau ferromagnétique ⁽¹⁰⁾ qui canalise les lignes de champ d'induction. On considèrera le champ d'induction uniforme sur toutes les sections droites S des spires.

Soit \vec{n} le vecteur unitaire normal aux spires.

On suppose le champ d'induction magnétique alternatif sinusoïdal d'expression: $\vec{B}(t) = \vec{n} \cdot B_{max} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$

Placer la borne de polarité cohérente avec \vec{n} . En négligeant la résistance interne du bobinage, exprimer $u(t)$ et U_{eff} en fonction de N , f , S et B_{max}

⁽¹⁰⁾ Voir le chapitre 2

6. REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS

Réponse 1:

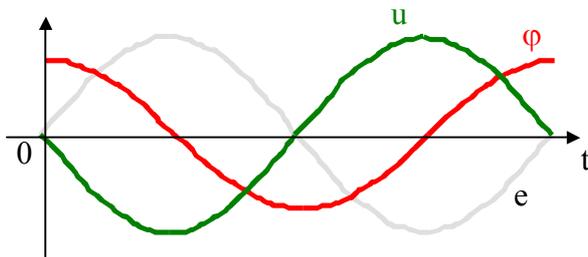
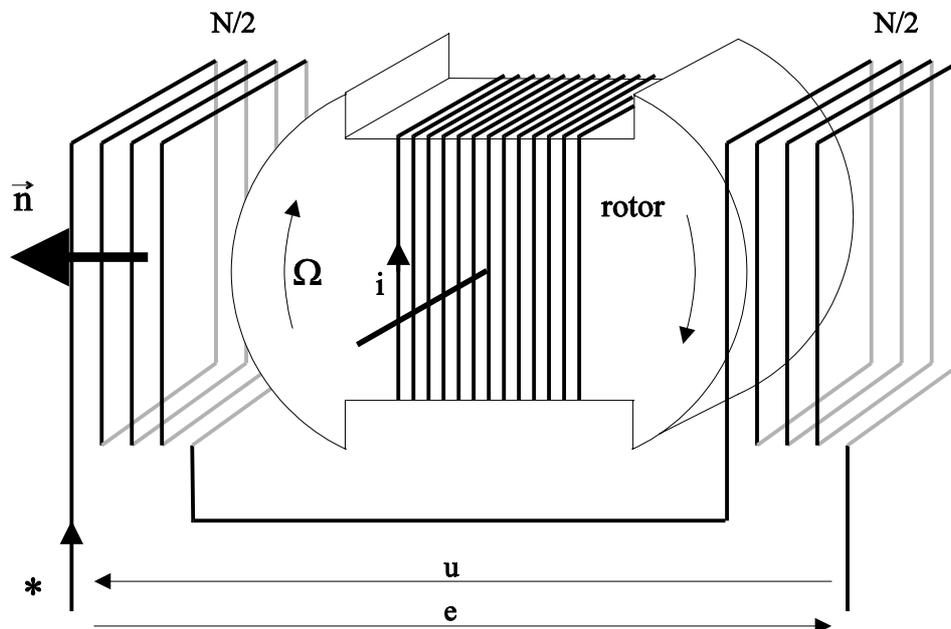
Induction élémentaire créée par un élément $d\ell$ du circuit: $\|d\vec{B}\| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot d\ell}{R^2}$ car \vec{r}_o est perpendiculaire à $d\vec{\ell}$.

Tous les vecteurs $d\vec{B}$ successifs engendrés par les éléments $d\vec{\ell}$ sur toute la circonférence sont colinéaires. \Rightarrow induction totale engendrée par le courant I dans la spire:

$$\|\vec{B}\| = \sum \|d\vec{B}\| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot 2\pi R}{R^2} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

[Retour](#)

Réponse 2:



A $t = 0$, le flux est maximum dans le bobinage

fixe, donc : $\varphi = \hat{\varphi} \cdot \cos(\Omega t)$

$$\Rightarrow e(t) = - \frac{d(N \cdot \hat{\varphi})}{dt} = N \cdot \hat{\varphi} \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t) = -u(t)$$

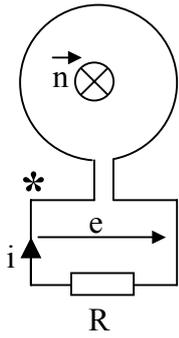
$$\Rightarrow \hat{U} = N \cdot \hat{\varphi} \cdot \Omega$$

Il était possible de mettre le point * à droite; cela n'aurait rien changé à $u(t)$.

On peut remplacer l'électroaimant par un aimant permanent : voir l'animation sur :

http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/documents/Flash/induction/aimant_tournant.php

[Retour](#)

Réponse 3:

La spire a été munie d'un repère de polarité "*" qui permet de fixer le signe des différentes grandeurs. La f.e.m. e et la normale \vec{n} la spire sont orientées correctement par rapport au point *, donc $e(t) = -\frac{d\varphi}{dt}$;

$\frac{d\varphi}{dt} > 0 \Leftrightarrow e(t) < 0 \Rightarrow i(t) < 0$ (du + vers le - dans le dipôle R) .

Le courant $i(t)$ agissant seul engendrerait donc un flux négatif (de sens contraire de \vec{n} d'après la règle du tire-bouchon) qui s'opposerait à l'augmentation du flux qui lui a donné naissance. La loi de Lenz est donc bien vérifiée.

[RetourT](#)