

---

# Les milieux magnétiques

---

« La matière c'est ce qui ne dure pas. »

Emmanuel Perl in « Mort de la morale bourgeoise ».

---

## Résumé

Dans le vide, les grandeurs vectorielles **champ d'induction magnétique** et **champ d'excitation magnétique** sont liées par la **perméabilité magnétique du vide**,  $\mu_0$ , dans une relation linéaire. Dans un matériau isotrope une nouvelle grandeur vectorielle, l'aimantation, se superpose au champ d'excitation pour traduire l'influence du milieu. L'aimantation est liée à l'induction par la susceptibilité magnétique du matériau dans une relation linéaire, elle aussi. A terme, on observe une relation vectorielle linéaire entre l'induction et l'excitation : le coefficient de perméabilité absolue remplace la perméabilité du vide.

Observés par un regard magnétique, les matériaux se classent en trois grandes catégories. Dans les **paramagnétiques** les vecteurs champ et aimantation sont de même sens et l'aimantation disparaît avec l'excitation. Pour les **diamagnétiques** l'influence est similaire, mais champ et aimantation sont de sens contraires. Ces deux classes n'ont pas de propriétés magnétiques avantageuses en technologie. Les matériaux les plus intéressants sont **ferromagnétiques** : le coefficient de proportionnalité entre induction et excitation est important, mais non constant, ce qui procure à ces matériaux des comportements non linéaires.

L'observation microscopique des matériaux ferromagnétiques permet de les décrire par la **théorie des domaines**. Par ce biais, on peut justifier que l'**induction** résultant d'une excitation magnétique **évolue de manière non linéaire**. Ceci conduit à représenter le **cycle d'hystérésis** d'un matériau qui lie l'induction à l'excitation. Les caractéristiques de ces cycles (valeurs typiques, forme, surface) permettent une **classification des matériaux ferromagnétiques** : doux ou dur.

Dans une dernière partie, on envisage les **applications technologiques** des phénomènes magnétiques. **L'induction est créée** dans un **bobinage**, **transportée** dans un **circuit magnétique** pour être **exploitée** dans un **entrefer**. Ce schéma s'applique à diverses machines de l'électrotechnique, qu'elles soient statiques ou destinées à la création de mouvements.

---

## Sommaire

<b>I. Relation entre l'induction magnétique <math>\vec{B}</math> et le champ d'excitation <math>\vec{H}</math> .....</b>	<b>3</b>
<b>II. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique.....</b>	<b>4</b>
II.1. Matériaux paramagnétiques (tableau 1A) .....	4
II.2. Matériaux diamagnétiques (tableau 2B).....	4
II.3. Matériaux ferromagnétiques .....	5
II.4. Résumé .....	5
<b>III. Polarisation et classification des matériaux ferromagnétiques.....</b>	<b>6</b>
III.1. Organisation en domaines .....	6
III.2. Processus de polarisation .....	6
III.2.1. Courbe de première aimantation .....	6
III.2.2. Cycle d'hystérésis.....	7
III.3. Classification des matériaux ferromagnétiques .....	7
<b>IV. Applications des matériaux ferromagnétiques.....</b>	<b>8</b>
IV.1. Produire le champ d'excitation.....	8
IV.2. Canaliser l'induction .....	8
IV.3. Applications .....	8

# I. Relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ et le champ d'excitation $\vec{H}$

Dans le vide les vecteurs champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  et champ d'excitation magnétique  $\vec{H}$  sont colinéaires puisque liés par la relation  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  où  $\mu_0$  est la **perméabilité magnétique du vide** (T.m/A).

**Remarque** : dans l'air, le comportement est similaire.

Dans un milieu magnétique quelconque mais isotrope<sup>1</sup>, ces vecteurs restent colinéaires. Cependant, le coefficient de proportionnalité dépend du matériau.

On définit le **vecteur aimantation**  $\vec{J}$  qui indique l'influence du milieu. Champ d'excitation et aimantation se superposent pour exprimer le champ d'induction :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}.$$

Or l'aimantation est proportionnelle au champ d'excitation, si bien que :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \text{ où } \chi \text{ est la } \mathbf{susceptibilité magnétique} \text{ du matériau.}$$

Il en résulte une nouvelle expression liant  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  :

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

où  $\mu$  est la **perméabilité absolue** et  $\mu_r$  la **perméabilité relative** du matériau.

Les matériaux peuvent être classés suivant leur comportement magnétique, c'est à dire suivant la **susceptibilité magnétique**  $\chi$ .

## II. Classification des matériaux d'un point de vue magnétique

D'après les travaux de Pierre Curie<sup>2</sup> en 1895.

### II.1. Matériaux paramagnétiques (tableau 1A)

La susceptibilité  $\chi$  est faible (donc  $\mu_r \approx 1$ ), positive et pratiquement constante (variation en  $1/T$ ). Les vecteurs  $\vec{H}$  et  $\vec{J}$  sont de même sens et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation.

Dans ces matériaux, les moments magnétiques permanents s'alignent sous l'effet d'un champ magnétique. Mais cette orientation ne compense pas l'agitation thermique qui reste prépondérante. En conséquence l'aimantation globale reste faible.

La plupart des gaz, certains métaux et quelques sels font partie de la catégorie des paramagnétiques.

### II.2. Matériaux diamagnétiques (tableau 2B)

La susceptibilité  $\chi$  est faible (donc  $\mu_r \approx 1$ ), négative et pratiquement constante (variation en  $1/T$ ). Les vecteurs  $\vec{H}$  et  $\vec{J}$  sont de sens contraires et l'aimantation disparaît avec le champ d'excitation.

Dans ce cas, le champ magnétique provoque un mouvement orbital des électrons. Le comportement est alors similaire à une spire créant un courant qui s'oppose au champ : d'où le signe négatif de  $\chi$ .

Tableau 1A Matériaux paramagnétiques			
Matière	$\chi$	Matière	$\chi$
Na	$8,6 \cdot 10^{-6}$	Pt	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Al	$7,7 \cdot 10^{-6}$	U	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Mn	$1,2 \cdot 10^{-4}$	CoO	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Ta	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Fe <sub>3</sub> C*	$3,7 \cdot 10^{-5}$
W	$3,5 \cdot 10^{-6}$	Fe <sub>γ</sub> *	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Tableau 1B Matériaux diamagnétiques			
Matière	$\chi$	Matière	$\chi$
Si	$-1,2 \cdot 10^{-6}$	Se	$-4,0 \cdot 10^{-6}$
Cu	$-1,08 \cdot 10^{-6}$	Ag	$-2,4 \cdot 10^{-6}$
Zn	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	Pb	$-1,4 \cdot 10^{-6}$
Ge	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$-3,5 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1 : susceptibilité de différents matériaux à température ambiante (sauf \* à  $T = 1000^\circ\text{C}$ ).

<sup>1</sup> Un élément est dit isotrope s'il possède les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions.

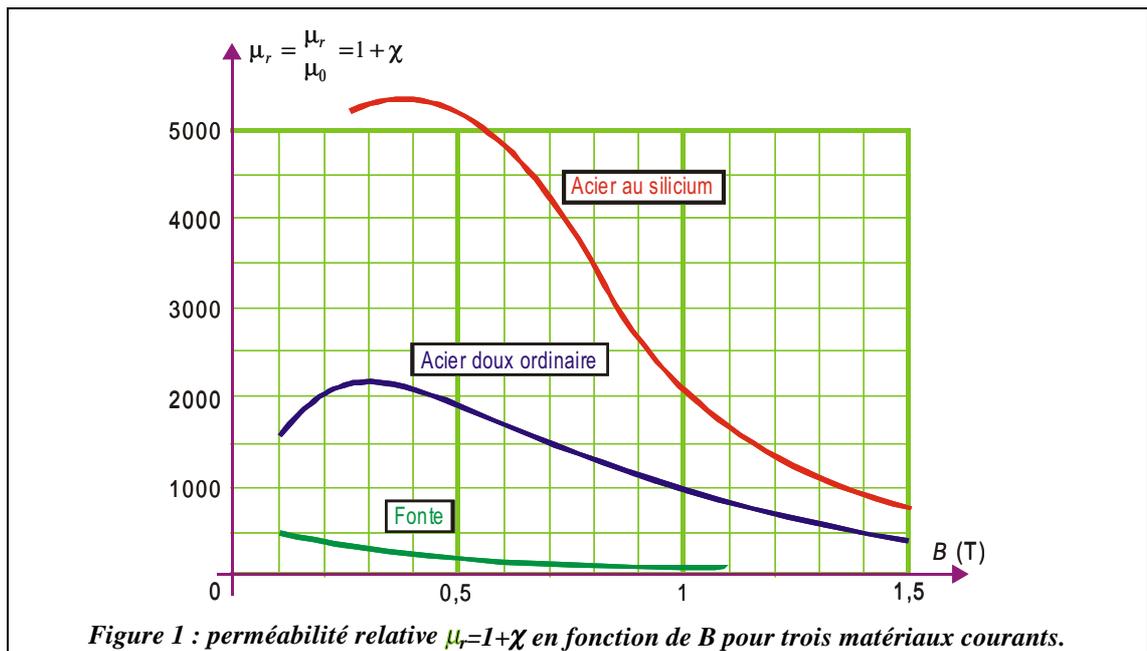
<sup>2</sup> Curie (Pierre), physicien français (1859-1906), époux de Marie Curie. Acad. sc. 1905, prix nobel conjoint de phys. 1903.

## II.3. Matériaux ferromagnétiques

Dans cette catégorie essentielle pour l'électrotechnique, la susceptibilité  $\chi$  est élevée ( $\mu_r \gg 1$ ), positive et variable avec l'excitation magnétique (**Figure 1**). D'autre part la température influence particulièrement  $\chi$  : au delà de la température de Curie, un matériau ferromagnétique se comporte comme un matériau paramagnétique. Enfin, notons aussi que l'induction magnétique dépend du sens de variation de  $\vec{H}$ , ce qui introduit la notion de rémanence et de cycle d'hystérésis (Cf. §III.2.2).

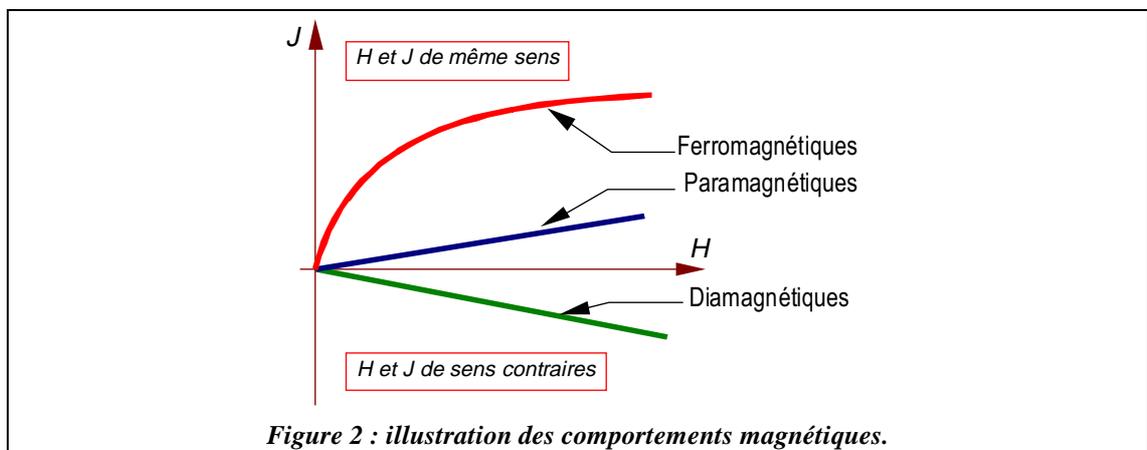
**Exemples de matériaux ferromagnétiques** : fer, cobalt, nickel et leurs alliages.

Notons enfin ces matériaux ferromagnétiques particuliers, les ferrimagnétiques (ferrites) ne sont pas conducteurs du courant électrique. Ils sont intéressants car ils ne favorisent pas la création des courants de Foucault (courants apparaissant dans les masses magnétiques soumises à des champs variables et générateurs de pertes électromagnétiques). Les pertes se trouvent donc diminuées ce qui les destine à des applications en haute fréquence (selfs radiofréquences, alimentations à découpage, etc.).



## II.4. Résumé

Les différents comportements magnétiques des trois catégories de matériaux peuvent être illustrés par le graphe de la **Figure 2**.



### III. Polarisation et classification des matériaux ferromagnétiques

#### III.1. Organisation en domaines

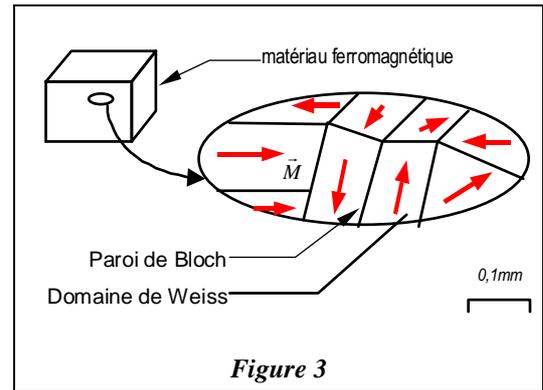
Domaine de Weiss<sup>3</sup> :

Au niveau de chaque atome, un moment magnétique apparaît :  $\vec{M} = M \cdot \vec{n}$

Un domaine de Weiss est une région où tous les moments magnétiques sont identiques.

Paroi de Bloch<sup>4</sup> :

Lors du transit d'un domaine de Weiss à un autre, les moments magnétiques changent de direction dans les parois de Bloch pour atteindre celle du nouveau domaine.

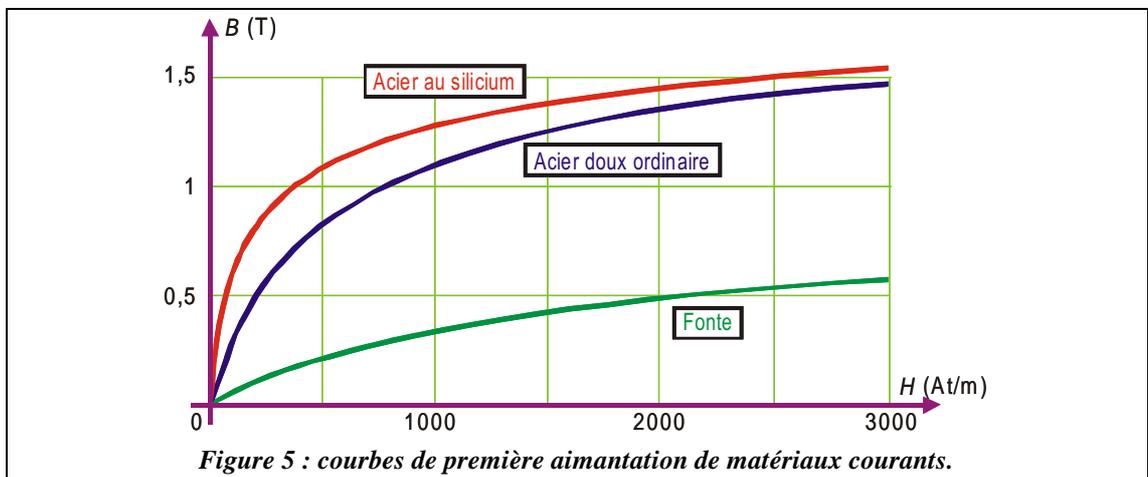
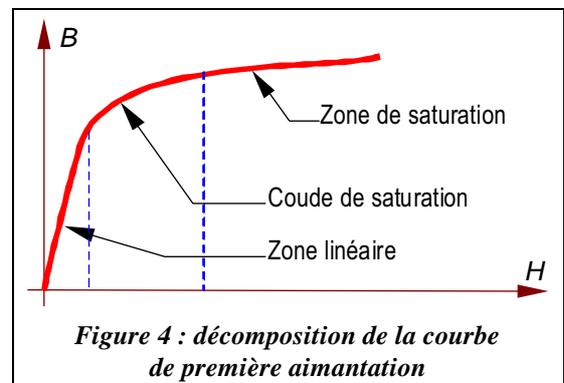


#### III.2. Processus de polarisation

##### III.2.1. Courbe de première aimantation

Le matériau est initialement démagnétisé (pas d'aimantation). On fait progressivement croître le champ d'excitation dans lequel est plongé le matériau. La courbe de la **Figure 4** représente l'induction  $B$ . On distingue trois zones : la première linéaire, puis le coude de saturation et la zone de saturation.

Pour situer l'influence des matériaux, la **Figure 5** présente différentes courbes de première aimantation.

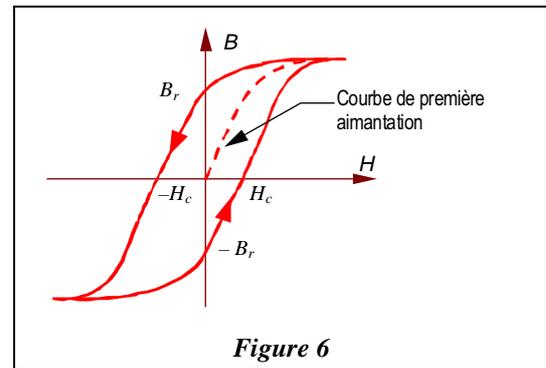


<sup>3</sup> Weiss (Pierre), physicien français (1865-1940). Théorie du ferromagnétisme en 1907. Académie des sciences en 1926.

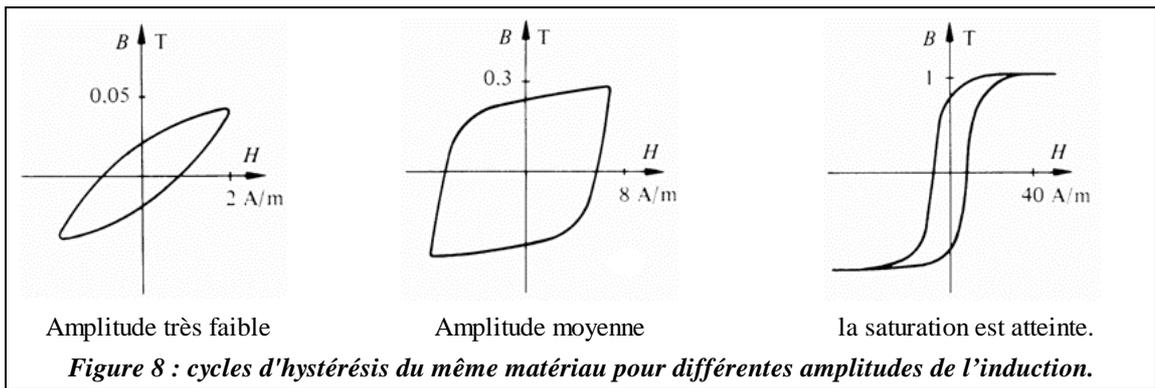
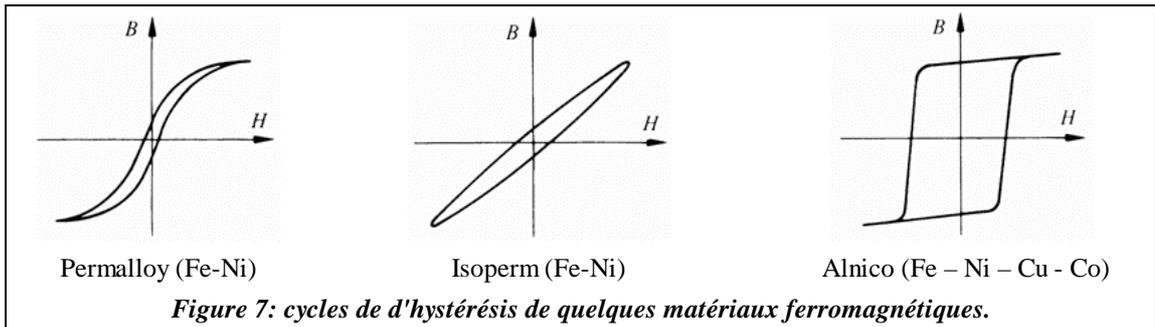
<sup>4</sup> Bloch (Félix), physicien américain d'origine suisse (1905-1983). Prix Nobel de physique en 1952 avec E. Purcell.

### III.2.2. Cycle d'hystérésis

A partir d'un point  $(H, B)$  de la courbe de première aimantation, on diminue le champ  $H$ , l'induction  $B$  ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence,  $B$  nulle ne correspond plus à une valeur nulle de  $H$ . Il subsiste une **induction rémanente**  $B_r$  (l'induction qui demeure après la disparition du champ). Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler  $B$ , c'est le **champ coercitif**  $H_c$  (le champ à appliquer pour annuler l'induction). L'induction maximale est l'**induction de saturation**  $B_{sat}$ .



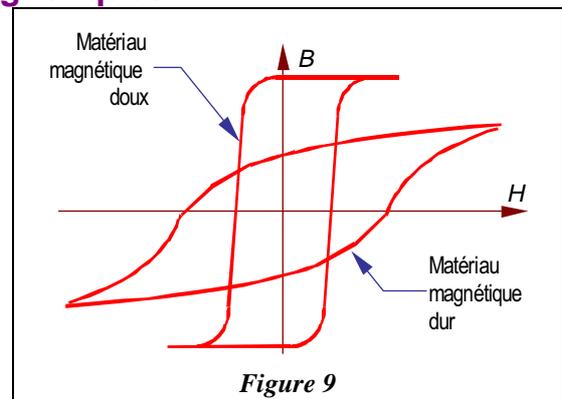
On assiste à un phénomène irréversible car les domaines de Weiss sont bouleversés.



### III.3. Classification des matériaux ferromagnétiques

L'observation des cycles d'hystérésis permet de regrouper les matériaux ferromagnétiques en deux catégories :

- Matériaux ferromagnétiques doux :  
 $B_r$  plutôt élevée,  
 $H_c$  plutôt faible,  
 Surface du cycle d'hystérésis faible.  
 ⇒ convient pour les aimants.
- Matériaux ferromagnétiques durs :  
 $B_r$  plutôt faible,  
 $H_c$  plutôt élevé  
 Surface du cycle d'hystérésis élevée.



Sans développer le sujet, on peut noter les différentes pertes dans les matériaux :

- **Hystérésis** : déplacement des parois de Bloch, ce sont des pertes par « frottements ».
- **Courants de Foucault** : courants dans les circuits magnétiques conducteurs, ils dépendent de la résistivité. Ces pertes sont minimisées par l'emploi de ferrites (matériaux de bonnes propriétés magnétiques pour une résistivité élevée) ;
- **Traînage** : dues au retard de  $B$  sur  $H$ .

## IV. Applications des matériaux ferromagnétiques

**Objectif** : obtenir un champ d'induction magnétique dans un milieu où celui-ci est utile.

**Moyen** : d'abord **produire** le champ d'excitation en un lieu, puis le **canaliser** jusqu'à l'utilisation.

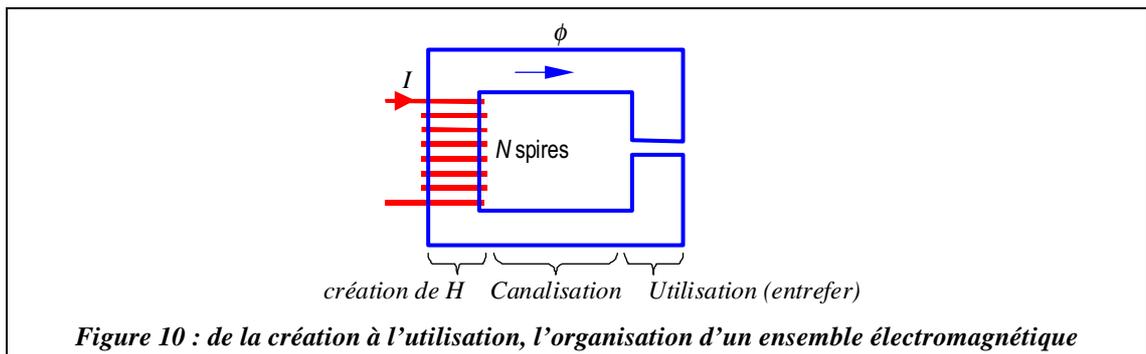
### IV.1. Produire le champ d'excitation

Un bobinage permet de créer un champ d'induction dans sa partie centrale.

Grâce au théorème d'Ampère, on écrit le lien entre le courant et le champ d'excitation magnétique.

### IV.2. Canaliser l'induction

Le champ d'excitation créé précédemment, s'il apparaît dans un matériau à perméabilité  $\mu$  élevée, permettra d'obtenir une induction d'autant plus importante. Ce matériau permet alors la canalisation du flux qui sera d'autant plus efficace que la perméabilité  $\mu$  du matériau sera élevée.



### IV.3. Applications

*Machines statiques :*

- Inductance de lissage pour les machines à courant continu (un seul enroulement, ici l'entrefer permet de régler le comportement de l'inductance en concentrant l'essentiel de l'énergie magnétique),
- Echange d'énergie entre deux enroulements électriques, c'est le transformateur.

*Création d'une induction uniforme dans un entrefer*

- **Force portante** : créée à partir d'un courant électrique par le biais des grandeurs magnétiques. L'entrefer est de dimension variable. Il s'ouvre et se ferme pour obtenir un déplacement dans les électroaimants de contacteurs, de relais ou de vibreurs, mais aussi en levage.
- **Sustentation** : le champ magnétique assure un effort qui tend à lever une partie mécanique, assurant l'annulation des efforts de contact, donc du frottement. Utilisé dans les paliers magnétiques ou le transport (train à sustentation magnétique).
- **Mouvement** : un champ d'induction est créé dans une zone recevant une pièce mobile en rotation comportant un bobinage. C'est l'occasion de manifestation de forces de Laplace qui permettent la création d'un mouvement de rotation dans la machine à courant continu ou dans les appareils de mesure à cadre mobile.
- **Champ tournant** : un ensemble de bobinages crée un champ magnétique progressant dans l'espace et entraînant une pièce en rotation ou en translation. Ce principe est utilisé dans la machine asynchrone, la machine synchrone et le moteur pas à pas.

