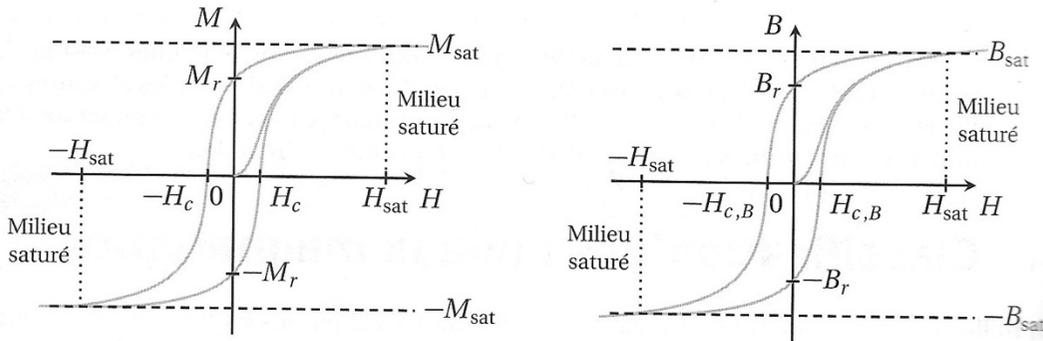


→ Caractéristiques M(H) et B(H) des milieux ferromagnétiques

Première aimantation et cycle d'hystérésis



- a. Évolution de l'aimantation dans un milieu magnétique lorsque l'excitation magnétique varie.
- b. Évolution du champ magnétique dans un milieu magnétique lorsque l'excitation magnétique varie.

→ Comparaison des ferromagnétiques doux et dur

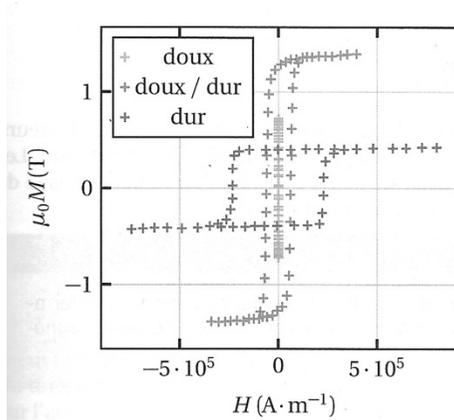


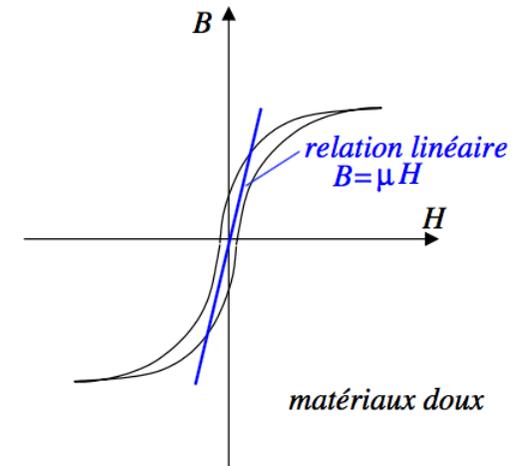
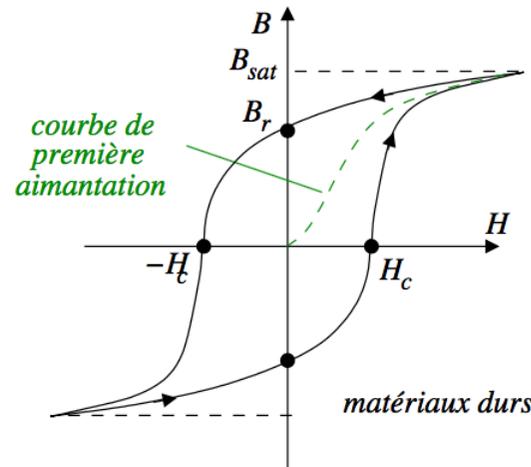
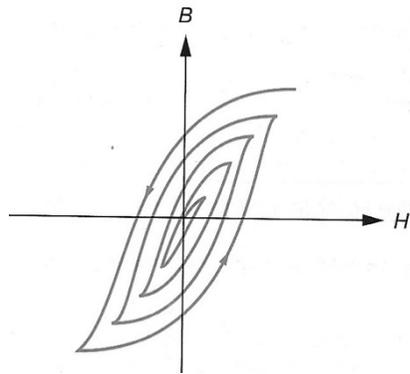
Tableau 17.1. Excitation coercitive et nature magnétique de certains matériaux ferromagnétiques (source : en.wikipedia.org/wiki/Coercivity).

Matériau	H_c ($A \cdot m^{-1}$)	Nature
Permalloy	80	doux <i>80% Ni</i>
Fer	160	doux <i>15% Fe</i>
Ferrite	15000	doux / dur
Alnico 5	50963	dur
Alnico 8	109300	dur
NdFeB 32	883310	dur

Figure 17.5. Quelques données expérimentales donnant l'évolution de l'aimantation en fonction de l'excitation magnétique pour trois matériaux (source www.magnets.com.cn).

→ Approximation linéaire pour les ferromagnétiques doux dans le domaine non saturé

Désaimantation



Complément hors-programme : origine du cycle d'hystérésis

Le point central du ferromagnétisme, est que la matériau est constitué de nombreux petits domaines, de taille caractéristique entre 0,1 mm et 1 mm, qui présentent tous un certain moment dipolaire, dirigé dans une direction quelconque. Ces domaines sont séparés par des zones de forte variation de l'aimantation microscopique. Chaque domaine crée un champ magnétique. Pour un matériau qui n'est pas aimanté, les champs magnétiques de chaque petit domaine s'annulent en moyenne. L'ensemble ne présente alors aucun champ magnétique macroscopique, comme le montre la figure 24.9, à gauche.

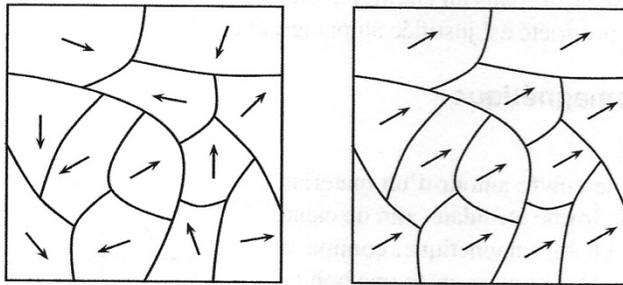


Figure 24.9 – Structure mésoscopique d'un ferromagnétique : aimantation nulle à gauche, aimantation à saturation à droite.

Lorsqu'on présente une excitation magnétique aux petits domaines, ils s'orientent dans la direction de l'excitation. Mais ce déplacement s'effectue par à-coups, les grains ne peuvent se déplacer que pour une valeur suffisante de l'excitation. Une analogie classique serait de dire que les domaines doivent vaincre les frottements pour s'orienter. On pourrait ainsi voir un cycle d'hystérésis du type de la figure 24.10, en regardant à petite échelle.

Le premier enseignement est qu'il faut fournir de l'énergie pour déplacer les domaines, c'est-à-dire que le parcours du cycle d'hystérésis consomme de l'énergie. Ce point est approfondi au paragraphe 4.4.

Le deuxième enseignement est que, lorsque tous les domaines pointent dans la même direction, la matériau est saturé, son aimantation est maximale, comme le montre la figure 24.9, à droite.

De plus, le déplacement d'une paroi dans un sens, puis dans l'autre, ne ramène pas au même état. On peut exploiter l'analogie mécanique d'un objet posé sur le sol, qu'on déplace en le poussant dans un sens, puis qu'on repousse dans l'autre, mais pas exactement à la même place. Là se loge le phénomène d'hystérésis.

Le lecteur désireux de lire une présentation plus approfondie de ce paragraphe pourra se reporter à FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, *Le cours de physique de Feynman, Électromagnétisme 2*, Dunod.

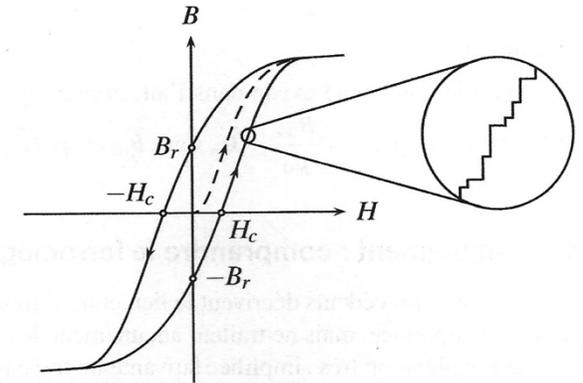


Figure 24.10 – Zoom sur le cycle d'hystérésis.

Tableau comparatif des ferromagnétiques doux et dur

doux	dur
cycle étroit	cycle large
$H_c : 0,1 \rightarrow 100 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$H_c : 10^3 \rightarrow 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
$B_r \approx 0,1 \rightarrow 1 \text{ T}$	$B_r \approx 1 \text{ T}$
exemples de valeur de H_c :	exemples de valeur de H_c :
Permalloy (78,5%Ni, 21,5%Fe) : $5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	acier (Fe, 4%C) : $4 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
(Fe, 4%Si) : $20 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	AINiCo : $10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
	aimant au néodyme NdFeB : $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
faciles à aimanter / désaimanter	difficiles à aimanter / désaimanter
faibles pertes par hystérésis	fortes pertes par hystérésis
électro-aimants :	aimants permanents :
moteurs électriques, transformateurs, contacteurs	haut-parleurs, écouteurs, moteurs électriques, bandes et disques magnétiques

→ Circuit magnétique sans entrefer : le tore

Différentes géométries possibles pour le tore

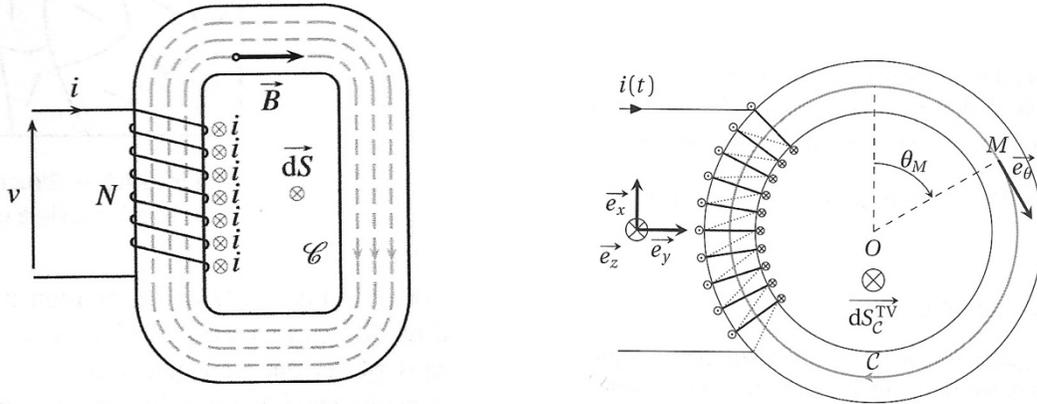
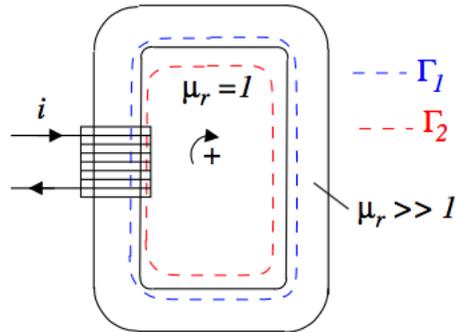
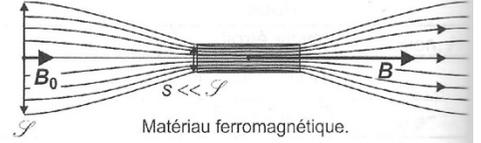


Figure 24.11 – Tore ferromagnétique ; en gris, quelques lignes de champ.

Canalisation des lignes de champ : flux de fuite magnétique

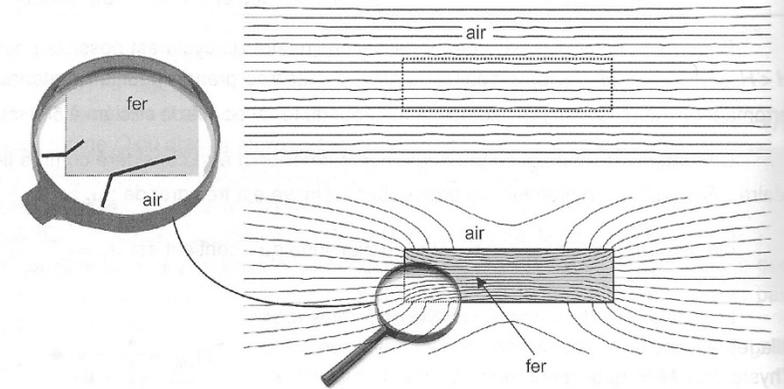


Cette canalisation est due à la grande valeur de μ_r .
 Placé par exemple dans un solénoïde qui crée un champ magnétique uniforme \vec{B}_0 en l'absence du matériau, le matériau s'aimante et crée un champ magnétique de norme très supérieure à B_0 .



D'après la conservation du flux de \vec{B} le long d'un tube de courant, les lignes de champ se concentrent dans le matériau : $B_0 \mathcal{S} = B s$, avec $B \gg B_0 \Rightarrow s \ll \mathcal{S}$.

On a tracé ci-dessous une simulation, par la méthode des éléments finis, des lignes de champ magnétique stationnaire dans un solénoïde. Sur la figure du dessus, le solénoïde ne contient que de l'air : le champ est uniforme et parallèle à l'axe du solénoïde. Quand on place un pavé en fer dans le solénoïde, on constate que les lignes de champ sont radicalement différentes (figure du dessous) :



Le champ magnétique s'est « engouffré » dans le fer, où il est très intense. Il subit une réfraction à l'interface air-fer, qu'on peut quantifier grâce aux relations de passage

$$\begin{cases} B_{2N} = B_{1N} \\ \vec{H}_{2T} - \vec{H}_{1T} = \vec{J}_{\mathcal{S}} \wedge \vec{N}_{1 \rightarrow 2} \end{cases} \text{ entre deux milieux magnétiques (1) et (2).}$$

Il n'y a pas de courants surfaciques dans le fer (des courants induits pourraient apparaître si le champ magnétique du solénoïde varie dans le temps, mais ils ne seraient pas surfaciques, ces derniers n'apparaissant que dans une modélisation où le

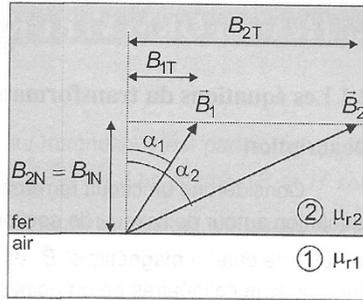
fer est considéré comme un conducteur parfait). On a donc $\begin{cases} B_{2N} = B_{1N} \\ \frac{B_{2T}}{\mu_0 \mu_{r2}} = \frac{B_{1T}}{\mu_0 \mu_{r1}} \end{cases}$.

Si on note α_1 et α_2 les angles compris entre 0 et $\pi/2$ (non orientés), que font les champs magnétiques dans le milieu (1) et dans le milieu (2), avec la normale à l'interface entre

les deux milieux, on a
$$\begin{cases} \tan \alpha_2 = \frac{B_{2T}}{B_{2N}} \\ \tan \alpha_1 = \frac{B_{1T}}{B_{1N}} \end{cases} \text{ d'où :}$$

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{B_{1T}}{B_{2T}} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}$$
. Ainsi $\mu_{r1} < \mu_{r2} \Rightarrow \alpha_1 < \alpha_2$:

le champ se rapproche de la normale dans le milieu de plus petite perméabilité.



Dans le cas d'un matériau ferromagnétique, $\mu_{r2} \gg 1$, alors que $\mu_{r1} = 1$ dans l'air : le champ dans l'air est quasiment normal à l'interface air-matériau ferromagnétique. On définit un matériau ferromagnétique *parfait* par $\mu_r \rightarrow \infty$.

Dans un matériau ferromagnétique parfait, la canalisation est parfaite. Dans notre exemple, toutes les lignes de champ provenant de l'air rentrent par la face de gauche et sortent par la face de droite et le champ magnétique est tangent à la surface latérale : le matériau est un tube de champ magnétique.

→ Effets dissipatifs dans un matériau ferromagnétique en régime sinusoïdal

Construction du courant appelé par le circuit magnétique : caractère non linéaire

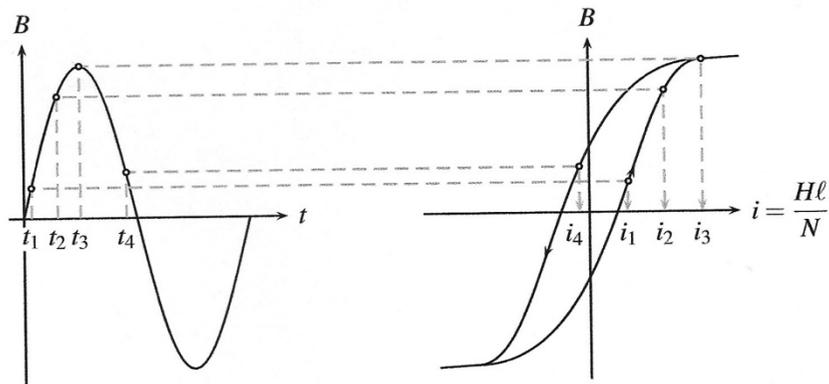


Figure 24.12 – Construction du courant appelé : à chaque date successive, on relève H donc i sur le cycle d'hystérésis. L'aller et le retour sont différents.

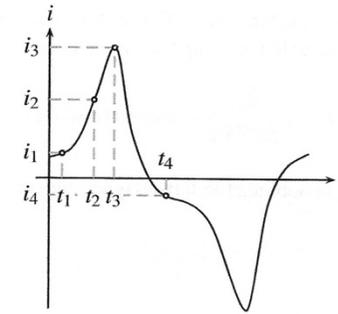
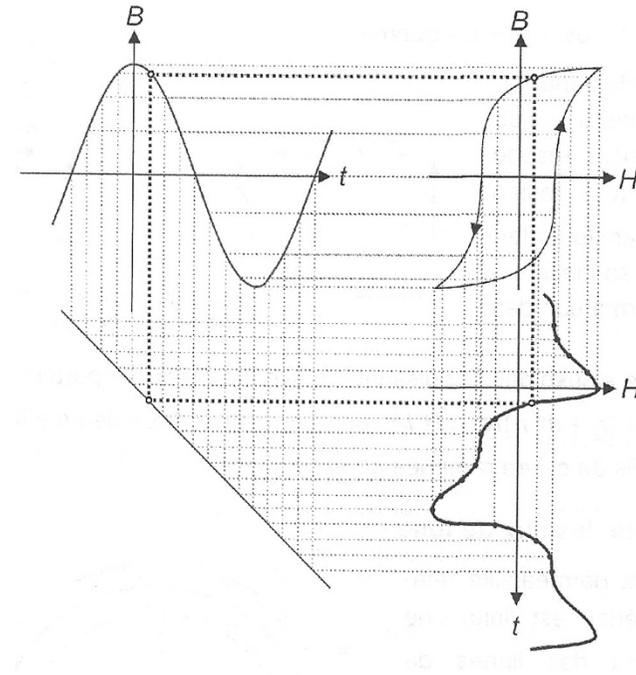


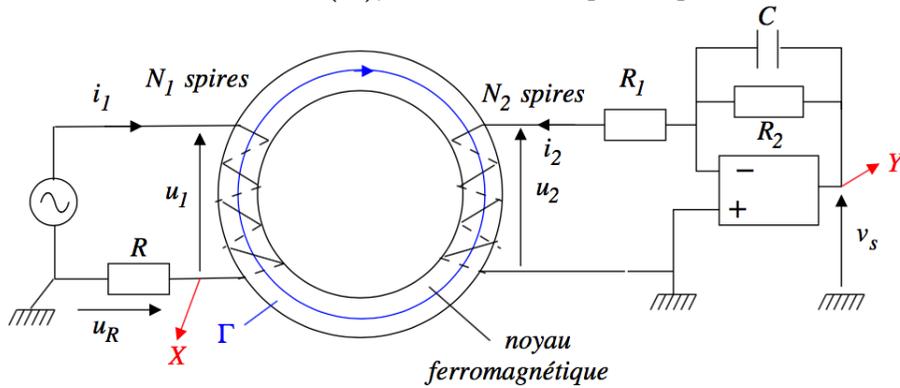
Figure 24.13 – Courant appelé par un tore ferromagnétique.

On observe un pic de courant à la date t_3 , qui peut être très important si l'amplitude de B est importante. Afin de ne pas dépasser l'intensité limite, à partir de laquelle l'alimentation du laboratoire disjoncte, il faut limiter l'amplitude $\frac{V_0}{NS\omega}$ de B , en pratique, diminuer V_0 .

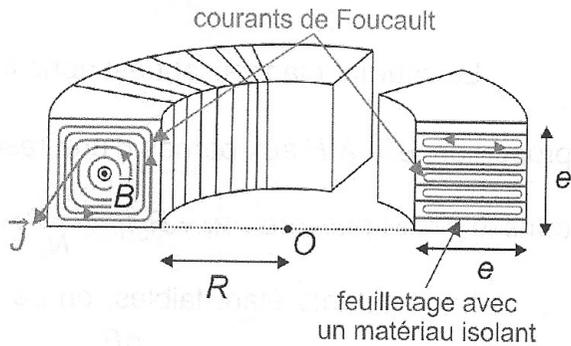


→ **Dispositif expérimental de mesure du cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique**

Pour réaliser la courbe $B = B(H)$, on utilise le dispositif présenté ci-dessous :



Feuilletage pour réduire les pertes par courants de Foucault



→ **Electroaimant**

Un **électroaimant** est un circuit magnétique, alimenté par un bobine enroulée autour du ferromagnétique. Le circuit magnétique est interrompu par une ou plusieurs zones nommées **entrefer**. Les électroaimants sont utilisés pour créer un champ magnétique bien déterminé dans l'entrefer (cas de gauche sur la figure 24.15), ou pour lever ou attirer des masses ferromagnétiques (cas de droite sur la figure 24.15); le principe de fonctionnement est le même dans les deux cas.

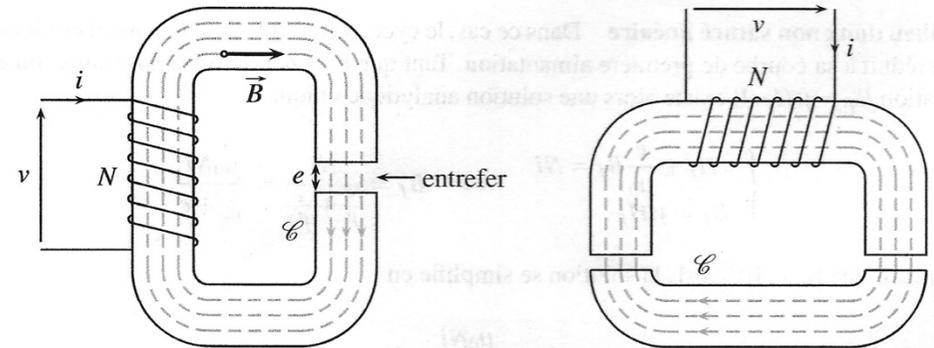
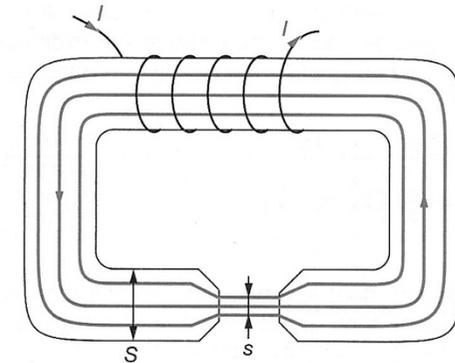


Figure 24.15 – Electroaimants : simple à gauche, de levage à droite.



→ Transformateur monophasé

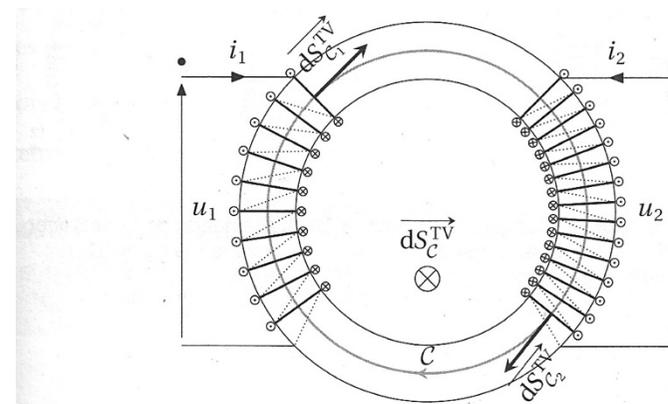
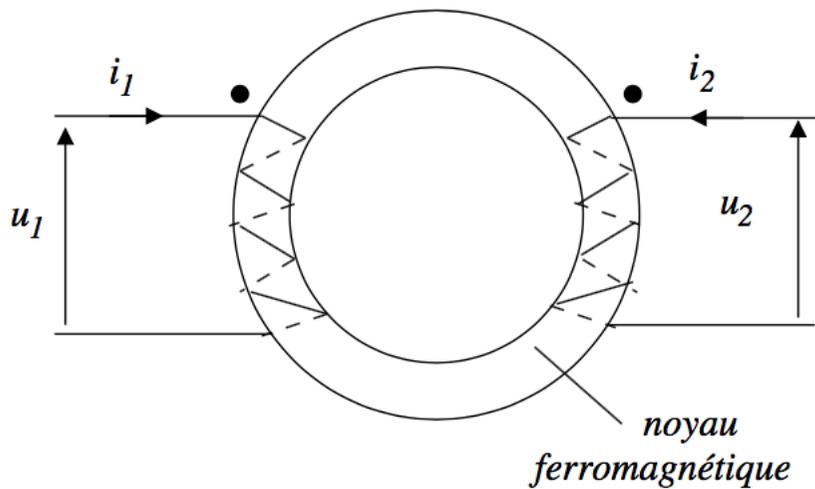
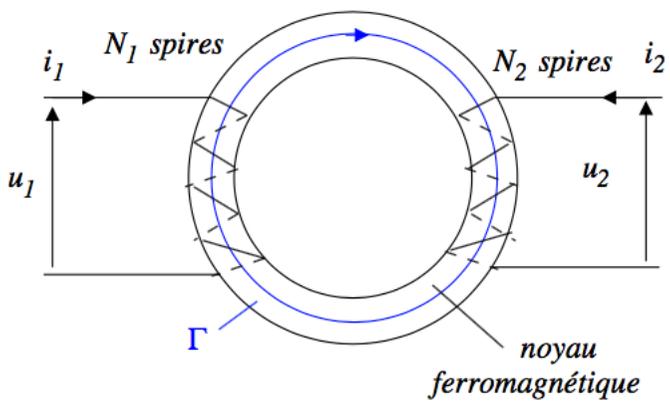


Figure 18.1. Représentation schématique d'un transformateur monophasé. On remarquera l'utilisation à trois endroits différents de la règle du tournevis : pour l'enroulement primaire C_1 , pour l'enroulement secondaire C_2 et pour le contour d'Ampère C .



Bornes homologues : flux de même orientation

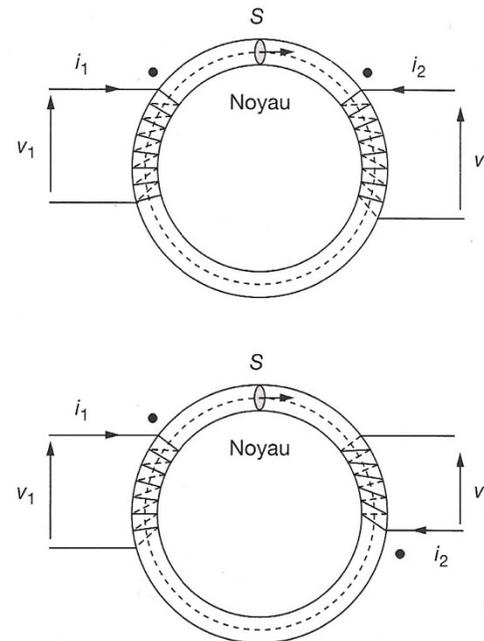
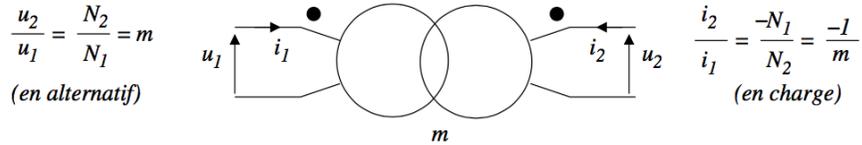


Schéma normalisé du transformateur parfait



Exemple de bornes non homologues

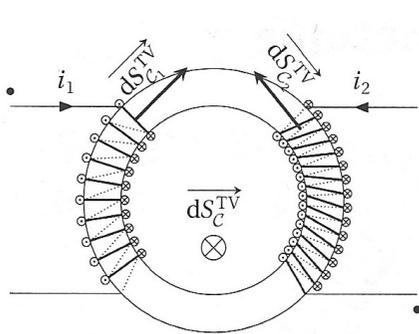


Figure 18.2. Un exemple où les bornes homologues ne correspondent pas nécessairement aux bornes où les courants rentrent.

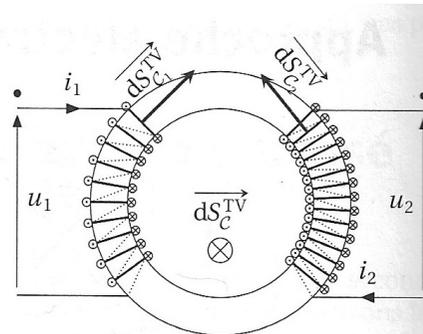


Figure 18.3. Changement d'orientation de i_2 par rapport à la figure 18.1.

➔ Transformateur d'isolement et isolation galvanique

Tous les points du montage (Fig. 9) sont galvaniquement isolés de la phase et du neutre du secteur.

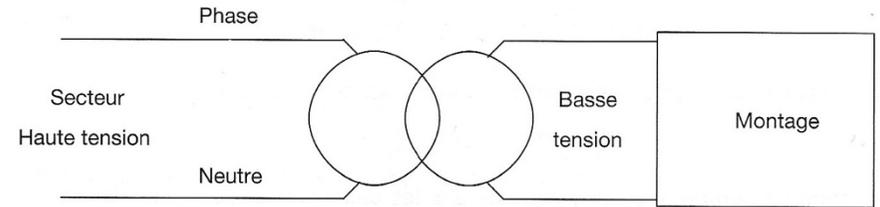


Figure 9

ATTENTION — On se gardera toutefois de manipuler **à partir du secteur** sans avoir une connaissance précise des régimes de neutre et des conséquences sur la **protection** des personnes et des équipements.

Sécurité et protection par isolation, mesure de tension à masse flottante

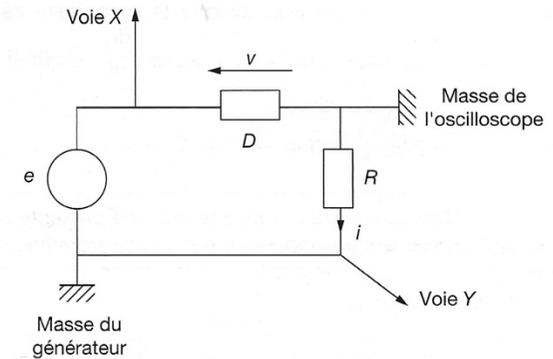


Figure 10

Il est possible de surmonter la difficulté en utilisant un transformateur d'isolement (Fig. 11).

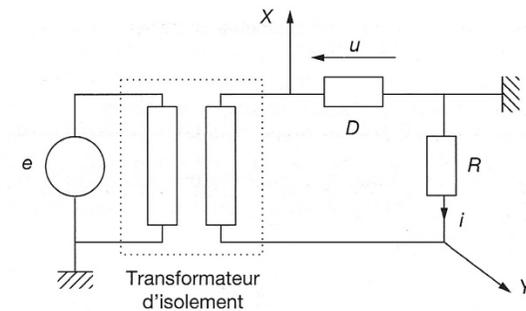
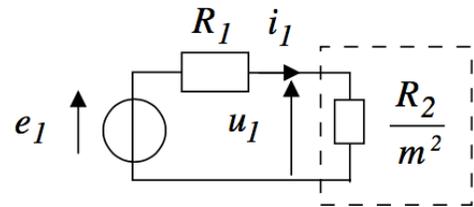
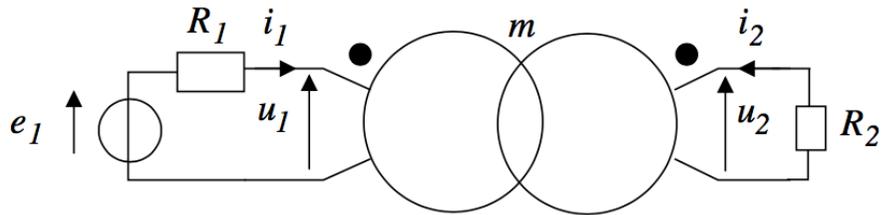


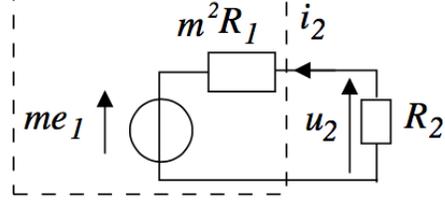
Figure 11

REMARQUE — Un autotransformateur, dont l'enroulement secondaire est une partie de l'enroulement primaire, ne peut être utilisé comme transformateur d'isolement.

→ Transfert d'impédance



secondaire ramené au primaire



primaire ramené au secondaire

→ Transport d'énergie électrique

Considérons d'abord la situation où l'énergie électrique est transportée à basse tension (voir la figure 18.6). La puissance moyenne \mathcal{P}_{BT} dissipée par effet Joule du fait de son transport dans la ligne s'écrit :

$$\mathcal{P}_{BT} = \frac{1}{2} R_{\text{ligne}} |I_{BT}|^2 = \frac{R_{\text{ligne}} E^2}{2(R + R_{\text{ligne}})^2}$$

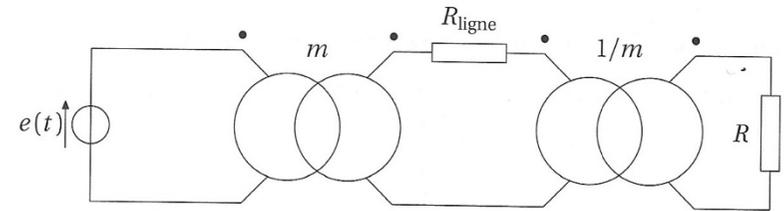
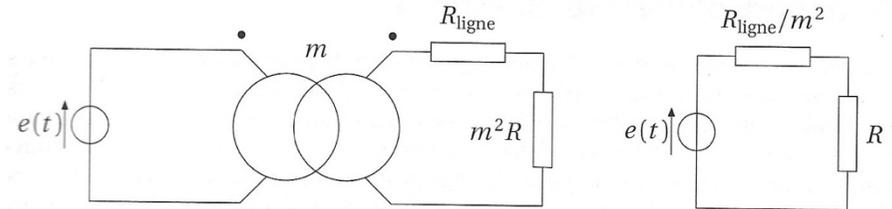


Figure 18.7. Circuit modélisant le transport haute tension de l'énergie électrique avec un transformateur élévateur de tension et un transformateur abaisseur de tension.

Considérons ensuite la situation où l'énergie électrique est transportée à haute tension, ce qui signifie qu'on place un transformateur élévateur de tension à la sortie de la source (rapport de transformation $m > 1$), avant transport de l'énergie, et qu'on place un transformateur abaisseur de tension en amont de l'installation électrique de l'utilisateur, après transport de l'énergie (voir la figure 18.7).



a. Transfert d'impédance du secondaire vers le primaire du transformateur abaisseur de tension. **b.** Transfert d'impédance du secondaire vers le primaire du transformateur élévateur de tension.

Figure 18.8.