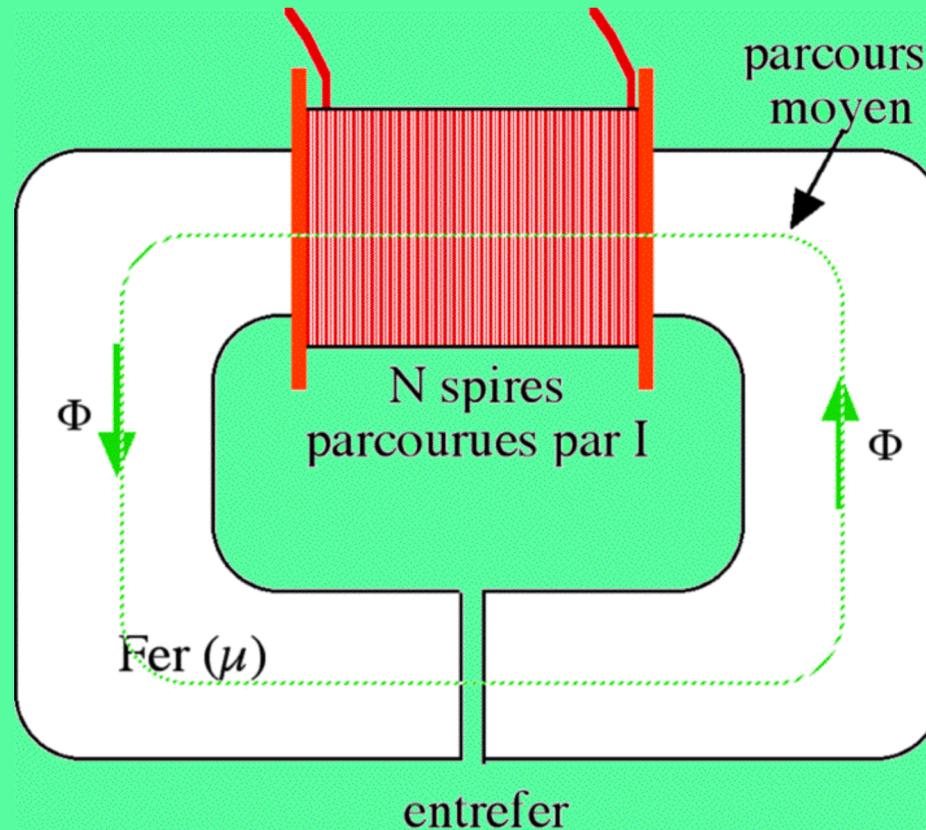


## Généralités

*Comme dans un circuit électrique où l'origine de la circulation d'un courant entre deux points est due à l'existence d'une différence de potentiel, dans un circuit magnétique, la circulation d'un flux magnétique  $\Phi$  est due à l'existence d'un bobinage parcouru par un courant; on parle d'une f.m.m. (force magnéto-motrice) =  $N.I$  exprimée en Ampère.tours (A-t).*

*Comme la valeur d'un courant électrique est liée à la différence de potentiel et à l'aptitude du milieu à conduire ce courant (loi d'Ohm), la valeur du flux magnétique est liée à la f.m.m. et à l'aptitude du milieu à conduire ce flux. On définit ainsi la **Réductance** de tout ou partie d'un circuit magnétique et on parle de la **relation d'Hopkinson** .*

## Généralités



*Un circuit magnétique comporte donc :*

- *une source, la **f.m.m.** constituée de N spires parcourues par un courant I,*
- *un ensemble de composants (en matériaux ferromagnétiques) destinés à **canaliser le flux,***
- *une ou plusieurs zones d'air, nommées **entrefers,** où on utilise le flux.*

## Généralités

### Relation d'Hopkinson

On assimile un circuit magnétique à un tube d'induction, de section droite  $S$ , tel que l'induction  $B$  soit la même en tout point de  $S$ . Le flux  $\Phi$  est alors constant et on a :  $\Phi = BS = \mu H S \Rightarrow H = \frac{\Phi}{\mu S}$

Le théorème d'Ampère le long de la ligne d'induction moyenne donne alors :

$$\oint H \cdot dl = NI \Rightarrow \Phi \oint \frac{dl}{\mu S} = NI$$

On définit alors la **Réductance** de ce tube d'induction par :  $\mathcal{R} = \oint \frac{dl}{\mu S}$  d'unité : **Henry<sup>-1</sup> (H<sup>-1</sup>)**

Ou tout aussi bien sa **Perméance** :  $\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}}$

On définit par extension la **Réductance** d'un circuit ou d'une partie homogène par :  $\mathcal{R} = \frac{L}{\mu S}$

D'où la **relation d'Hopkinson** :  $\mathcal{R} \Phi = \sum NI$  = somme algébrique des f.m.m.

## Généralités

### *Analogie avec un circuit électrique*

*On peut considérer les analogies ci-dessous :*

*Relation d'Hopkinson :  $\sum NI = \mathcal{R} \Phi \Rightarrow E = R.I$  Loi d'Ohm*

*f.m.m. (force magnéto motrice)  $N.I \Rightarrow E$  Dif. de potentiel ou f.e.m. (force électromotrice)*

*Réductance  $\mathcal{R} = \oint \frac{dl}{\mu S} \Rightarrow R = \oint \rho \frac{dl}{S} = \oint \frac{dl}{\gamma S}$  Résistance électrique*

*Flux magnétique  $\Phi \Rightarrow I$  intensité (= flux de charges)*

*Ainsi, si les réductances de portions de circuit sont définies, les lois d'association des résistances*

*électriques sont utilisables :  $R_{\acute{e}q} = R_1 + R_2$  (en série) et  $R_{\acute{e}q} = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2}$  (en parallèle).*

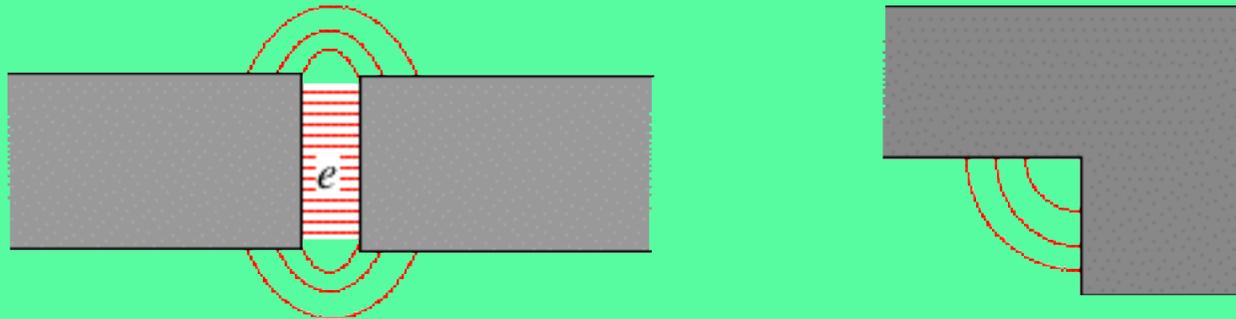
## Généralités

### Les fuites magnétiques

**Circuit magnétique parfait :** Les lignes d'induction sont parfaitement canalisées par le fer  $\mu_r \rightarrow \infty$  donc  $\mathcal{R} \rightarrow 0$ . Dans l'air, les lignes d'induction n'existent que dans l'entrefer (zone d'utilisation) où elles sont parallèles. On dit qu'il n'y a pas de fuites magnétiques. Les Ampères-tours produits se retrouvent en totalité dans la zone utile de l'entrefer.

**Circuit magnétique réel :** Il existe des lignes d'induction qui se referment en dehors de la zone utile : Il y a des fuites magnétiques.

- **Autour de l'entrefer :** «épanouissement» des lignes de champ.  $S_{air} > S_{fer}$  ( $\Rightarrow B_{air} < B_{fer}$ )
- **Au niveau des bobinages :** Zone entre les conducteurs et le fer.
- **Tout le long du circuit :**  $\mu_r \neq \infty$  Il existe un flux résiduel dans l'air au voisinage du circuit.
- **Au niveau des passages d'angles :** Des lignes présentent une partie de leur trajet dans l'air.



## Généralités

### *Les fuites magnétiques*

*De façon empirique et expérimentale, ou grâce à des modèles mathématiques, on évalue le niveau de fuites d'un circuit.*

*On le caractérise notamment au moyen du **coefficient d'Hopkinson** :*

$$k = \frac{\Phi_t}{\Phi_u} = \frac{\text{flux total créé}}{\text{flux utile}}$$

*Pratiquement :  $1,01 \leq k \leq 1,25$*

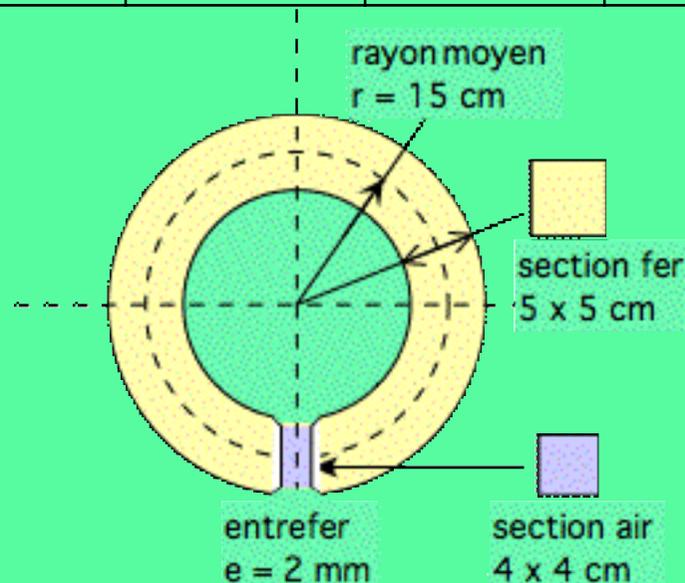
- Limitation des fuites :
- entrefer le plus mince possible
  - éviter les entrefers parasites
  - utiliser un matériau à  $\mu_r$  élevé
  - bobinages au plus près de la zone d'utilisation

## Calculs des circuits magnétiques

### *Problèmes directs*

*Partant du flux ou de l'induction souhaitée dans l'entrefer, on détermine les A-t nécessaires*

Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section S (cm <sup>2</sup> )	Induction B (T)	champ H (A/m)	longueur L (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer						
entrefer						
<b>A-t totaux</b>						



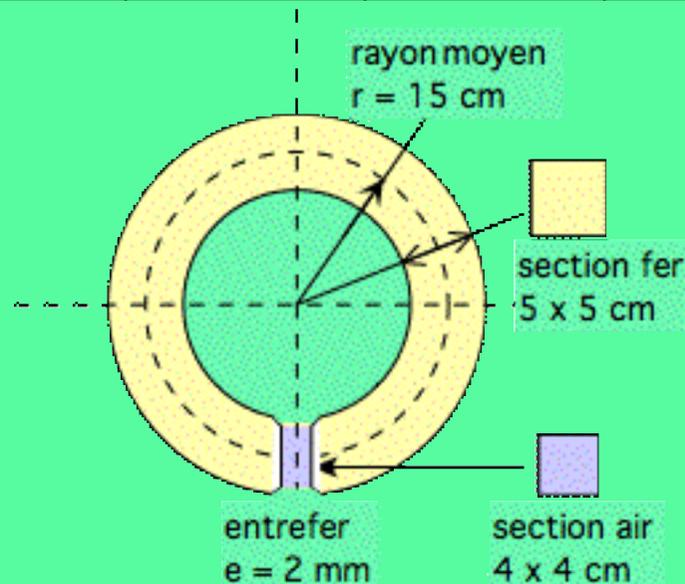
**Exemple 1 :** Soit le circuit ci-contre. Déterminer les A-t nécessaires pour obtenir une induction de 1,5 T dans l'entrefer.

## Calculs des circuits magnétiques

### Problèmes directs

Partant du flux ou de l'induction souhaitée dans l'entrefer, on détermine les A-t nécessaires

Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section S (cm <sup>2</sup> )	Induction B (T)	champ H (A/m)	longueur L (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer	2,4	25	0,96	550	0,940	517
entrefer	2,4	16	1,5	1.193.662	0,002	2387
<b>A-t totaux</b>						<b>2904</b>



Conservation du flux :  $B_f S_f = B_e S_e$

Champ dans l'air :  $H_e = \frac{B_e}{\mu_0}$

Champ dans le fer lu sur la courbe d'aimantation

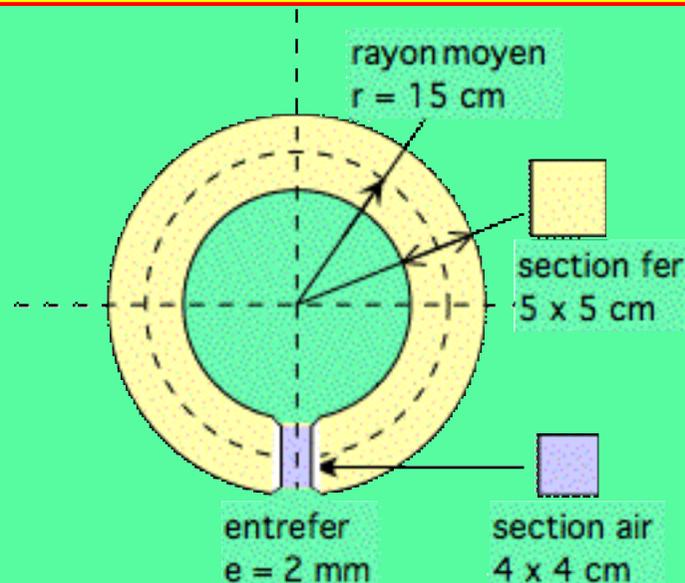
f.m.m. :  $N.I = H.L$

## Calculs des circuits magnétiques

### Problèmes inverses

Partant des Ampères-tours totaux fournis, on détermine l'induction dans l'entrefer.

On procède par approximations successives car le lien  $H_f \longleftrightarrow B_f$  ne se fait que par la courbe d'aimantation. Il existe une solution graphique si on peut réduire le circuit à 2 zones, le fer et l'entrefer. Le théorème d'Ampère donne alors l'équation d'une droite que l'on trace dans le même repère que la courbe d'aimantation.  $B_f = -\mu_0 \frac{S_e L_f}{S_f e} H_f + \mu_0 \frac{S_e NI}{S_f e}$



Exemple 2 : Soit le circuit ci-contre. Déterminer l'induction obtenue dans l'entrefer si les A-t fournis sont de 3500 A-t .

## Calculs des circuits magnétiques

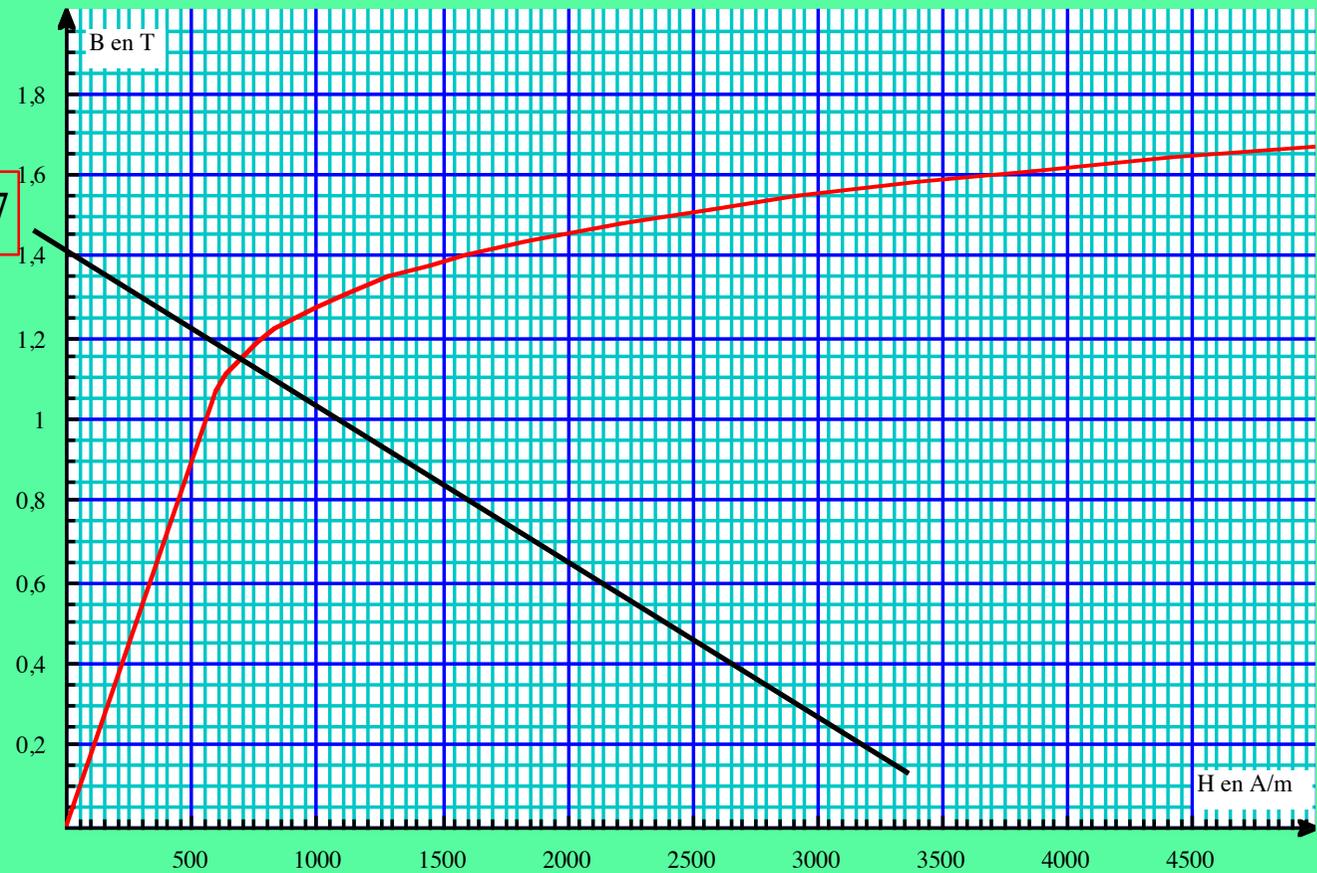
### Problèmes inverses

Partant des Ampères-tours totaux fournis, on détermine l'induction dans l'entrefer.

Equation de la droite :

$$B_f = -3,78 \times 10^{-4} H_f + 1,407$$

On obtient environ :  
 $H_f = 700 \text{ A/m}$   
 $B_f = 1,15 \text{ T}$   
d'où  $B_e = 1,8 \text{ T}$

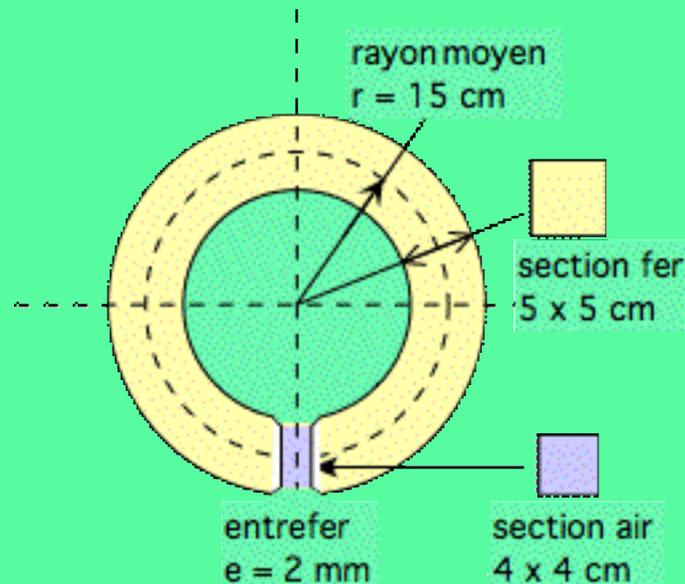


COURBE D'AIMANTATION DU FER DOUX

## Calculs des circuits magnétiques

### *Vérification*

Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section $S$ (cm <sup>2</sup> )	Induction $B$ (T)	champ $H$ (A/m)	longueur $L$ (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer	2,875	25	1,15	700	0,940	658
entrefer	2,875	16	1,8	1.430.000	0,002	2860
<b>A-t totaux</b>						<b>3518</b>



*Résultat très satisfaisant compte tenu de l'approximation graphique.*

## Calculs des circuits magnétiques

### *Cas de plusieurs enroulements autour du même circuit*

*Deux cas se présentent :*

*- les bobinages créent des flux de même sens, on parle alors de «flux additifs» ; les A-t s'additionnent.*

*- les bobinages créent des flux de sens opposés, on parle alors de «flux soustractifs» ; les A-t se retranchent.*

Exemple 3 : Soit 2 bobinages de 2500 A-t et 1500 A-t sur le circuit précédent.

Traisons graphiquement les deux cas de câblage

## Calculs des circuits magnétiques

### Cas de plusieurs enroulements autour du même circuit

#### flux additifs :

-A-t totaux = 4000 A-t, d'où :

$$B_f = -3,78 \times 10^{-4} H_f + 1,608$$

On trouve graphiquement :

$$H_f = 925 \text{ A/m} ; B_f = 1,25 \text{ T}$$

d'où  $B_e = 1,95 \text{ T}$

#### flux soustractifs :

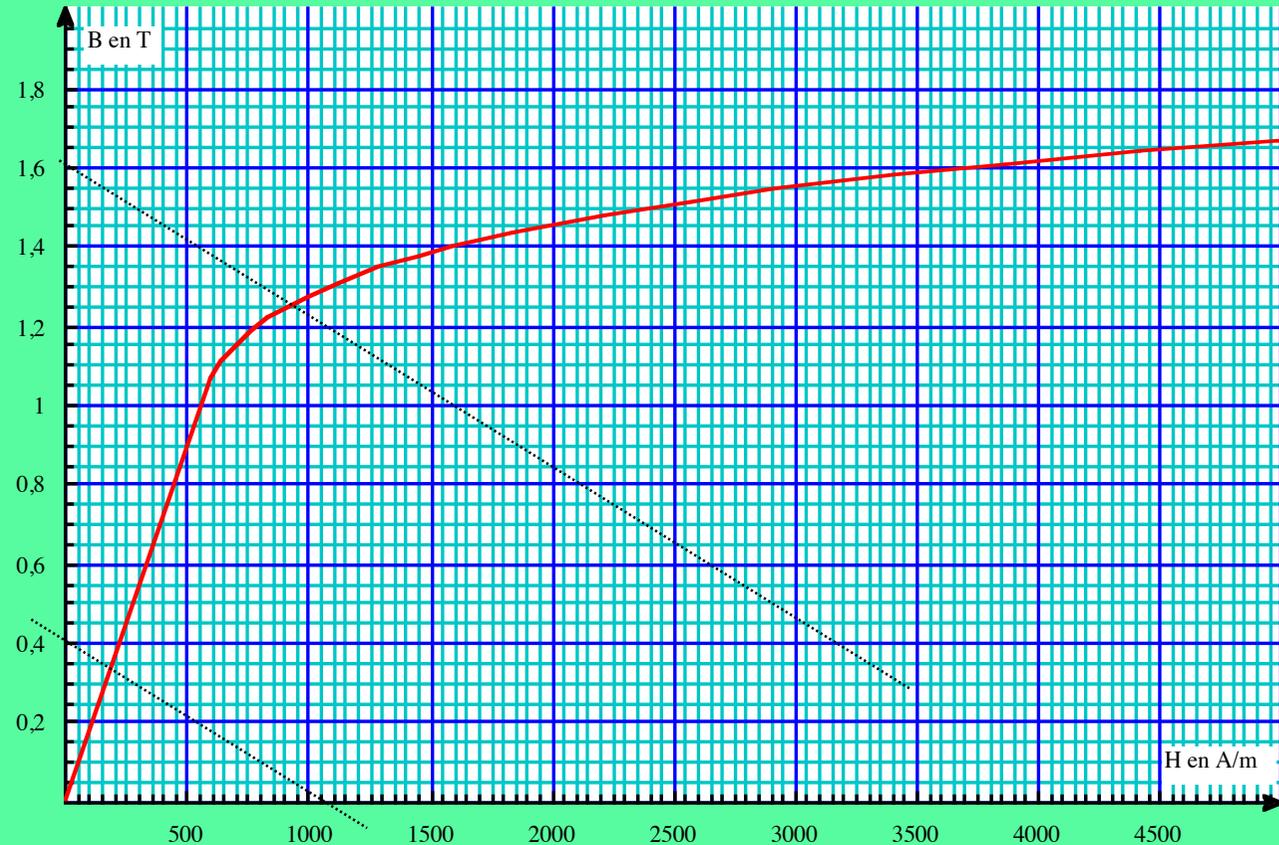
-A-t totaux = 1000 A-t, d'où :

$$B_f = -3,78 \times 10^{-4} H_f + 0,402$$

On trouve graphiquement :

$$H_f = 180 \text{ A/m} ; B_f = 0,34 \text{ T}$$

d'où  $B_e = 0,53 \text{ T}$



COURBE D'AIMANTATION DU FER DOUX

*On constate que 4 fois plus d'A-t ne donnent pas 4 fois plus de Teslas dans l'entrefer.*

## Calculs des circuits magnétiques

### *Vérifications*

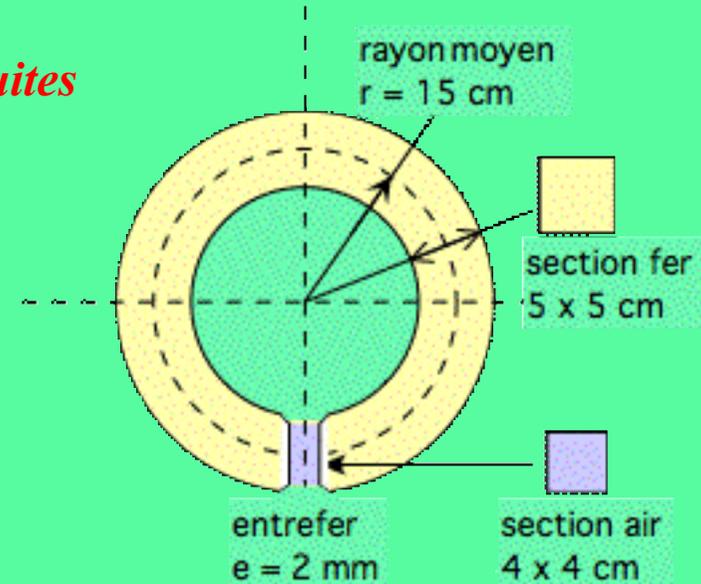
Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section S (cm <sup>2</sup> )	Induction B (T)	champ H (A/m)	longueur L (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer	3,125	25	1,25	925	0,940	870
entrefer	3,125	16	1,95	1.552.000	0,002	3104
					<i>A-t totaux</i>	<b>3974</b>

Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section S (cm <sup>2</sup> )	Induction B (T)	champ H (A/m)	longueur L (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer	0,85	25	0,34	180	0,940	169
entrefer	0,85	16	0,53	421.760	0,002	843
					<i>A-t totaux</i>	<b>1012</b>

## Calculs des circuits magnétiques

### *Prise en compte des fuites*

Exemple 4 : Soit le circuit ci-contre.  
 Déterminer les A-t nécessaires pour obtenir une induction dans l'entrefer  
 $B_e = 1,5 \text{ T}$  en prenant un coefficient d'Hopkinson  $k = 1,15$



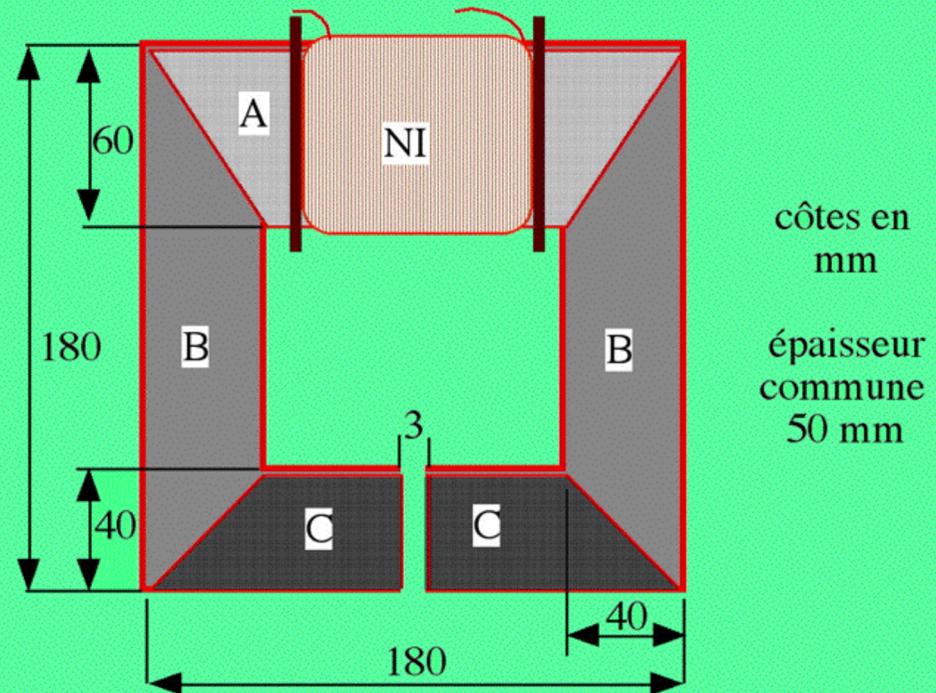
Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section $S$ (cm <sup>2</sup> )	Induction $B$ (T)	champ $H$ (A/m)	longueur $L$ (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
fer	<b>2,76</b>	25	1,104	620	0,940	583
entrefer	2,4	16	<b>1,5</b>	1.193.662	0,002	2387
<b>A-t totaux</b>						<b>2970</b>

*On constate le peu de différence avec l'exemple 1*

## Calculs des circuits magnétiques

### *Prise en compte des fuites*

Exemple 5 : Soit le circuit ci-contre. Déterminer les A-t nécessaires pour obtenir une induction dans l'entrefer  $B_e = 1,2 \text{ T}$  en prenant un coefficient d'Hopkinson global  $k = 1,2$ . Les fuites sont réparties pour 25 % à chaque passage d'angle et 50 % au niveau de l'entrefer



## Calculs des circuits magnétiques

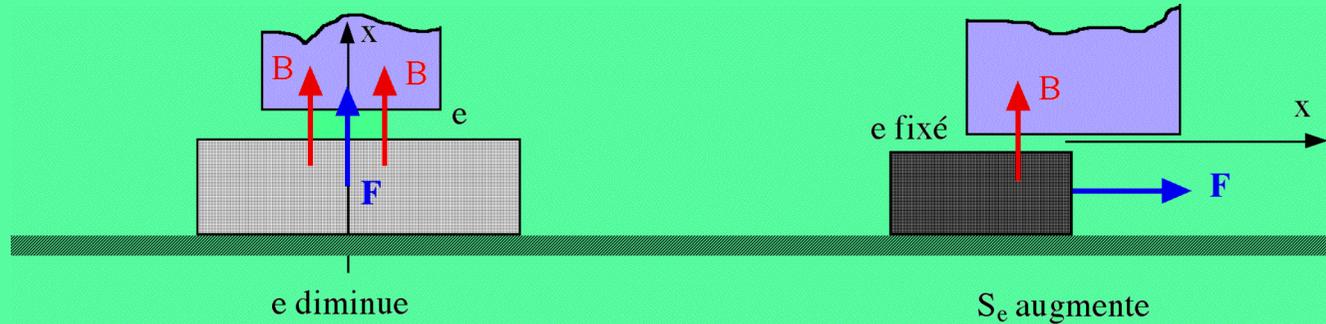
### *Prise en compte des fuites*

Parties homogènes	Flux $\Phi$ (mWb)	Section S (cm <sup>2</sup> )	Induction B (T)	champ H (A/m)	longueur L (m)	f.m.m. «N.I» (A-t)
entrefer	2,4	20	1,2	954.930	0,003	2865
Zones C	2,64	20	1,32	1150	0,137	158
Zones B	2,76	20	1,38	1470	0,260	382
Zones A	2,88	30	0,96	550	0,140	77
					A-t totaux	3482

Remarques :

- Il convient de répartir les 0,48 mWb de fuites tel que précisé.
- Attention au changement de section de la zone A
- On constate le peu d'influence des A-t consommés dans le fer et donc des fuites.

## Forces d'attraction magnétique



- Elles tendent à provoquer un déplacement qui **maximalise le flux**.

Autrement dit, elles tendent à :

- réduire le volume de l'entrefer,

- diminuer sa réluctance :  $\mathcal{R}_e = \frac{e}{\mu_0 S_e}$

- raccourcir les lignes d'induction dans l'air.

- Elles sont indépendantes du sens du courant.

## Forces d'attraction magnétique

### Formule générale de Picou

$$|F| = \frac{1}{2} (NI)_{air}^2 \frac{\partial P_{air}}{\partial x} \quad \text{avec}$$

$(NI)_{air}^2$  : A-t consommés dans l'entrefer

$P_{air}$  : Perméance de l'entrefer

$x$  : variable du déplacement

*Cas particulier de la force portante (B et F colinéaire)*

$$F = \frac{B_{air}^2 \cdot S_{air}}{2\mu_0} \approx 400.000 B_{air}^2 \cdot S_{air}$$

## Forces d'attraction magnétique

### *Alimentation d'un électroaimant*

- **En courant continu** : Un courant important est nécessaire pour obtenir le collage mais il n'est pas utile de le maintenir une fois le collage atteint. Il est recommandé d'insérer alors une résistance pour le limiter et ainsi éviter de faire chauffer la bobine.

- **En courant alternatif** : Le terme  $L\omega$  est prépondérant dans l'impédance et l'inductance augmente quand l'entrefer  $e$  diminue. Cela réalise une sorte d'auto-régulation du courant.

## Forces d'attraction magnétique

### Alimentation d'un électroaimant

- **En courant alternatif** : Pour une alimentation à 50 Hz, la force d'attraction, proportionnelle à  $B^2$  varie à la fréquence de 100 Hz. Cela peut provoquer un ronflement très sonore inacceptable.

Pour l'atténuer, on utilise le principe de la «**spire de Frager**». Une spire en court-circuit est disposée autour d'une partie du circuit magnétique. Le courant induit ainsi créé, génère une force secondaire déphasée qui vient s'ajouter à la force principale. La résultante présente une amplitude de variation plus faible.

