

# Chapitre - 3 Bobines à noyau de fer

1- Analogies électrique/magnétique

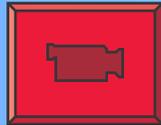
2- Bobines monophasées

2.1- Circuits magnétiques

2.2- Allure du courant absorbé

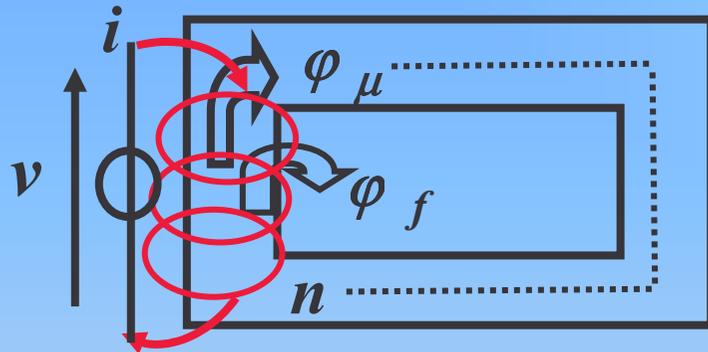
2.3- Schéma équivalent

3- Bobines triphasées



## Éléments de la bobine à noyau de fer en approximation linéaire

Bobines à noyau de fer



$$v = ri + n \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\varphi = \varphi_\mu + \varphi_f$$

$\varphi$  Flux crée par la bobine ou flux principal

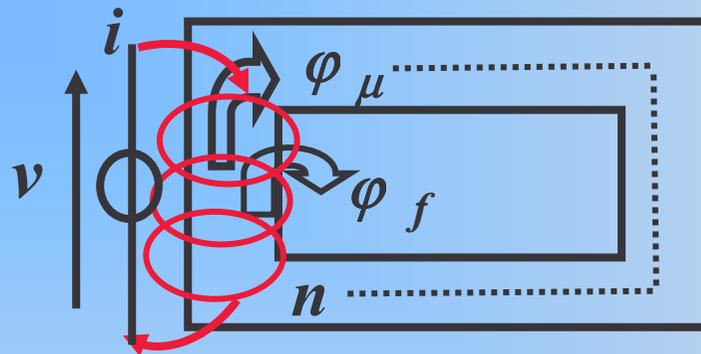
$\varphi_\mu$  Flux traversant le circuit magnétique

$\varphi_f$  Flux de fuite



## Éléments de la bobine à noyau de fer en approximation linéaire

Bobines à noyau de fer



Résistance de l'enroulement:  $r = \rho \frac{l}{s}$

Conducteur de longueur  $l$ , de section  $s$ , matériau de résistivité  $\rho$

Inductance propre:  $L_{\mu} = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} = n \frac{\varphi_{\mu}}{i}$

Enroulement de  $n$  spires, circuit magnétique de réluctance  $\mathfrak{R}$

Inductance de fuite:  $l_f = n \frac{\varphi_f}{i}$

Enroulement de  $n$  spires, circuit magnétique de réluctance  $\mathfrak{R}$



# 1-Relation entre les grandeurs magnétiques et électriques Bobines à noyau de fer

## Relations entre le flux (ou induction) et la tension

$$v(t) = V\sqrt{2} * \cos \omega t = n \frac{d}{dt} \varphi \quad \text{et} \quad \varphi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} * \sin \omega t = B(t)S$$

## Expression de $B_{max}$

$$B(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega S} * \sin \omega t \quad \text{D'où} \quad B_{max} = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega S}$$

## Relations entre le flux et le courant

$$ni(t) = \mathcal{E}(t) = \Re \varphi(t) \quad \Re = \frac{n^2}{L_\mu}$$
$$i(t) = \frac{V\sqrt{2}}{\omega L_\mu} * \sin \omega t$$

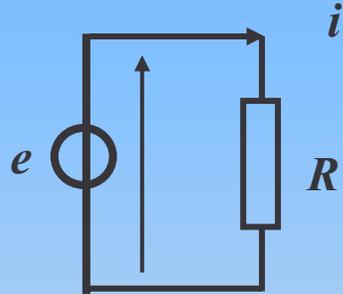




## 1- Analogies électrique/magnétique

Bobines à noyau de fer

Circuit électrique:



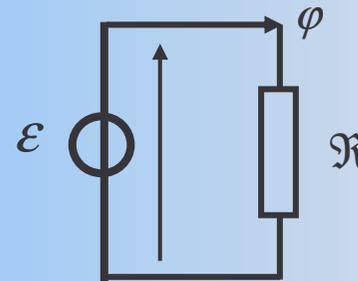
$$\text{Expression: } e = Ri$$

Force électromotrice :  $e$  (V)

Résistance électrique :  $R(\Omega)$

Courant électrique :  $i$  (A)

Circuit magnétique:

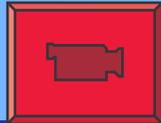


$$\text{Expression: } \varepsilon = \mathfrak{R}\phi$$

Force magnétomotrice :  $\varepsilon$  (At)

Réductance magnétique:  $\mathfrak{R}(At * Wb^{-1})$

Flux magnétique :  $\phi$  (Wb)



1- Analogies électrique/magnétique

Bobines à noyau de fer

<i>circuit électrique</i>		<i>circuit magnétique</i>	
$e$	D d p ou tension (V)	$\mathcal{E} = ni$	force magnétomotrice (A t)
$i$	courant (A)	$\phi$	flux (W b)
$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$	résistance ( $\Omega$ ) $\sigma$ conductivité	$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$	réductance ( $A t W b^{-1}$ ) $\mu$ perméabilité
$j = \sigma E$	densité de courant ( $A.m^{-2}$ )	$B = \mu H$	induction magnétique (T)
$E$	champ électrique ( $V.m^{-1}$ )	$H$	champ magnétique ( $A.m^{-1}$ )
$e = Ri = \int E dl$	loi d'Ohm	$\mathcal{E} = \mathcal{R}\phi = \int H dl$	théorème d'Ampère
$i = \iint j dS$	conservation du courant	$\phi = \iint B dS$	conservation du flux

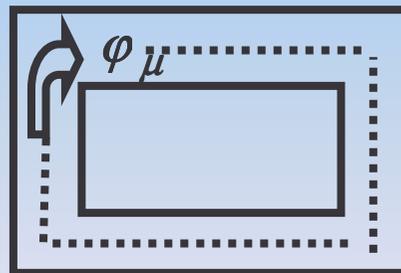


## 2.1- Circuits magnétiques

## Bobines à noyau de fer

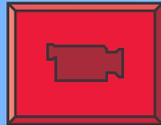
Un circuit magnétique est la partie ferromagnétique guidant le flux magnétique d'un système électrique:

Exemples: le noyau d'un transformateur ou le corps d'un moteur



- 
- 
- 

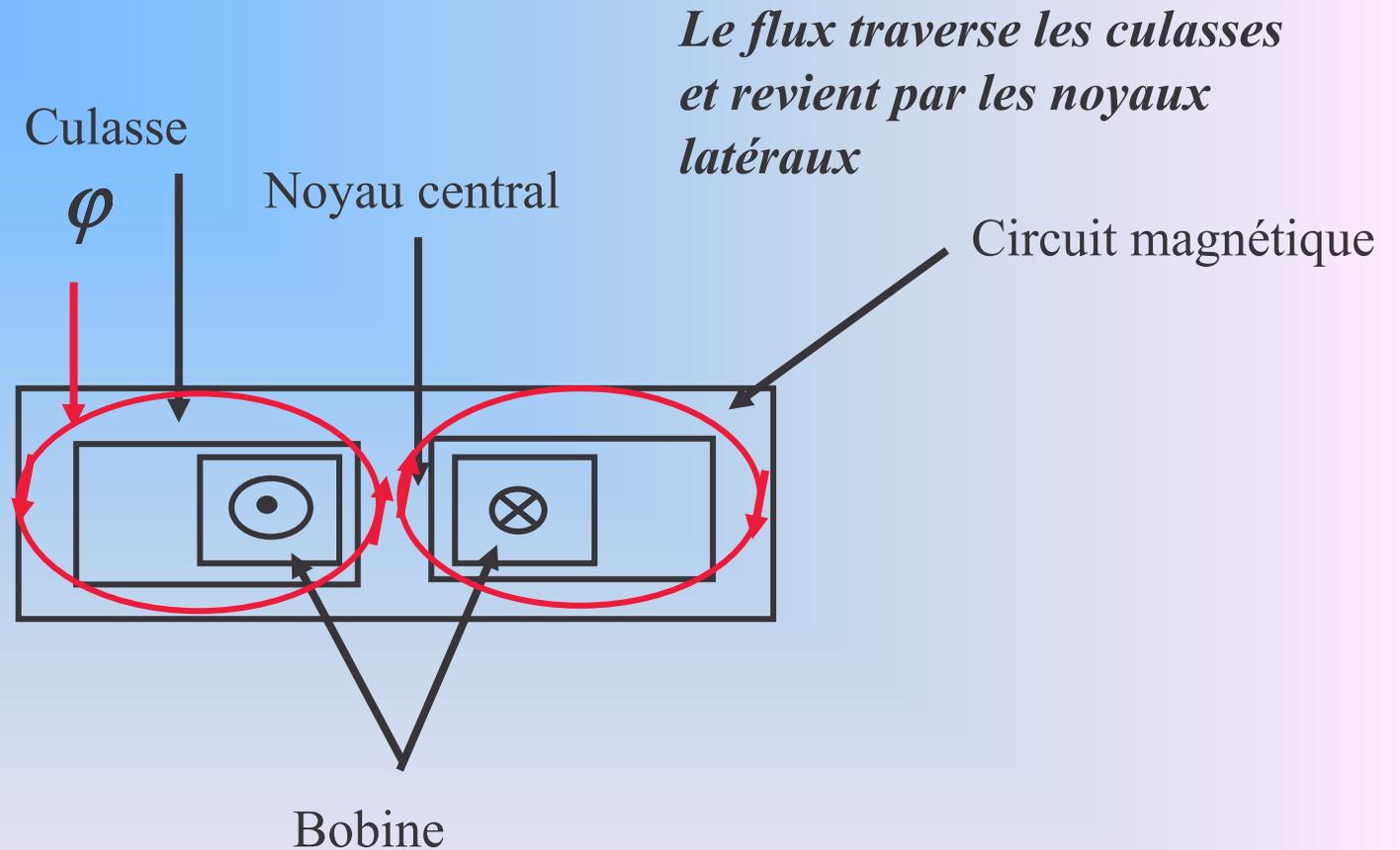
↳ ...20



## 2.1- Circuits magnétiques

## Bobines à noyau de fer

*Circuit magnétique à un noyau bobiné*





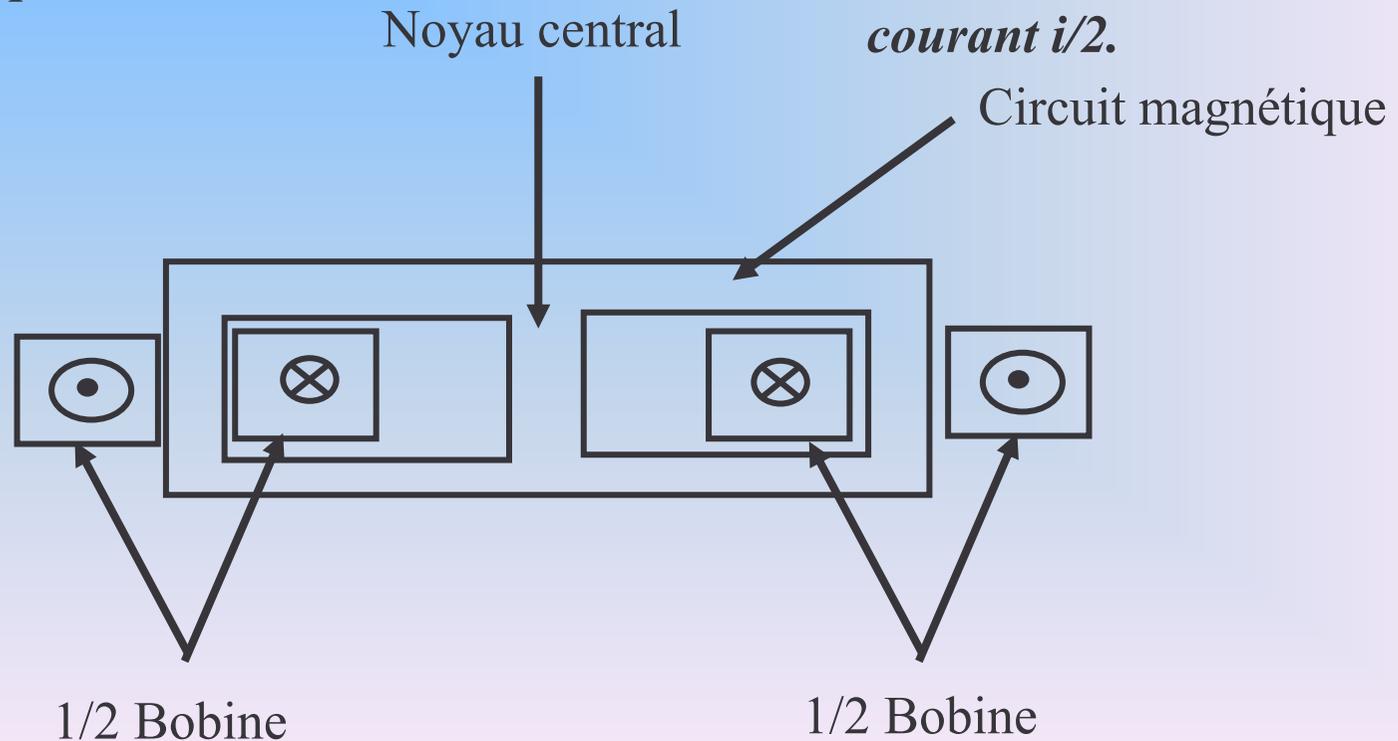
## 2.1- Circuits magnétiques

## Bobines à noyau de fer

*Si les deux bobines sont connectées en série alors chaque bobine comporte  $n/2$  spires parcourues par un courant  $i$ .*

**Circuit magnétique à deux noyaux bobinés**

*Si les deux bobines sont connectées en parallèle alors chaque bobine comporte  $n$  spires parcourues par un courant  $i/2$ .*



## 2.2- Allure du courant absorbé

Bobines à noyau de fer

On passe de B à H au moyen du cycle d'hystérésis ou un tableau de constructeur B(H), car cette relation est non linéaire

$$B = \mu H \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_0 \times \mu_r \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$\mu$  Perméabilité absolue

$\mu_0$  Perméabilité du vide

$\mu_r$  Perméabilité relative

## 2.2- Allure du courant absorbé

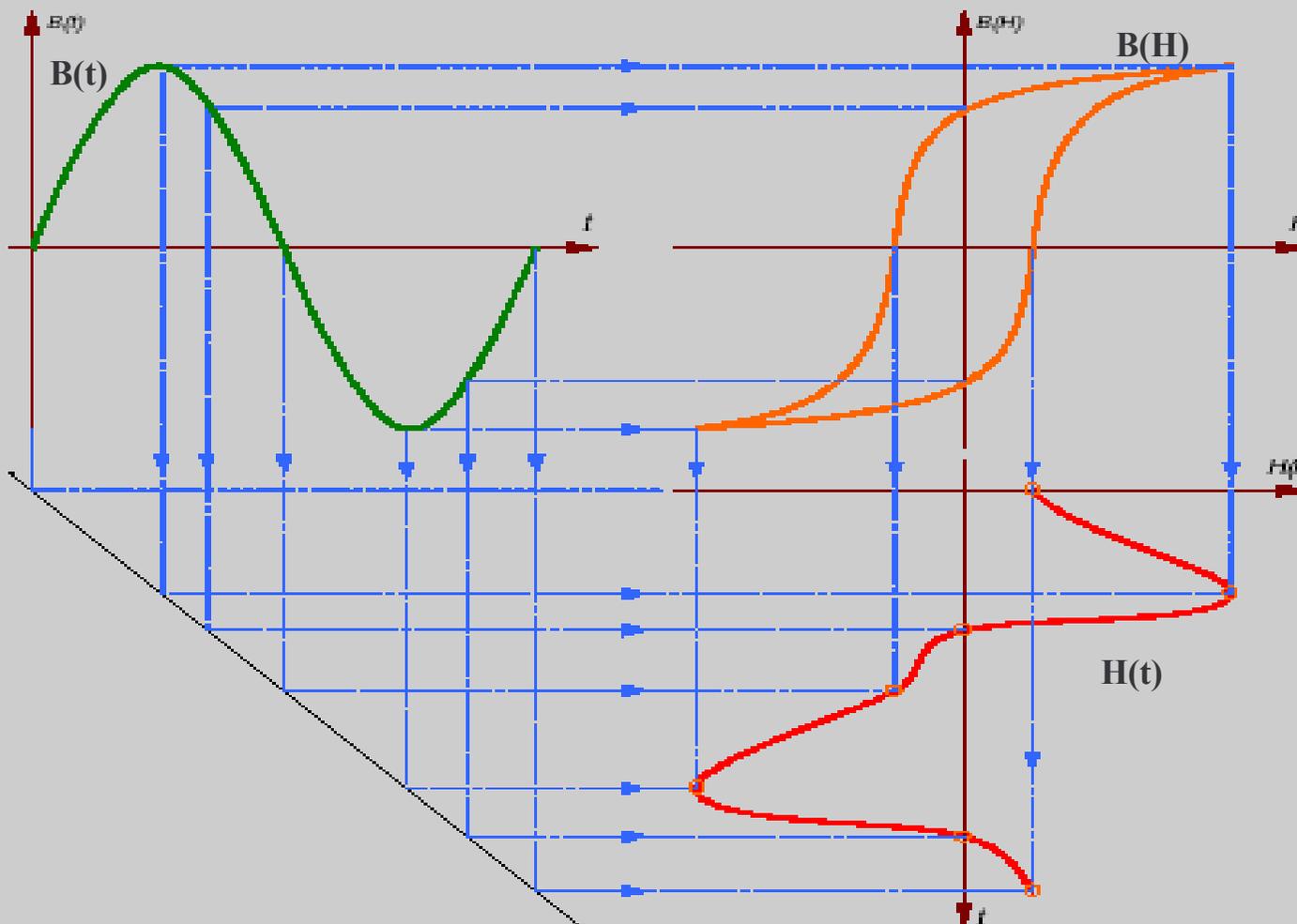
Bobines à noyau de fer

De H on en déduit  $i$   $\iff i = \frac{Hl}{n}$

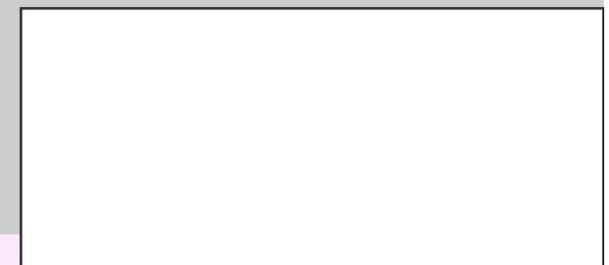


## 2.2- Allure du courant absorbé

Bobines à noyau de fer



- Courant périodique non sinusoïdal.
- D'autant plus « déformé » que le circuit magnétique est saturé.
- Distorsion du signal marquée par le taux d'harmoniques.
- Pour une déformation faible : approximation au premier harmonique.
- On ne travaille qu'avec le courant fondamental.



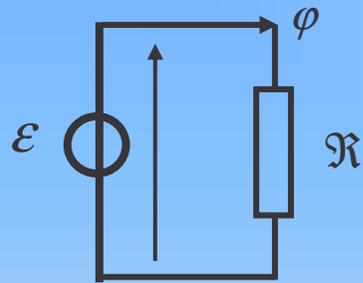
- 
- 
- 

↳ ...22



## 2.3- Schéma équivalent d'une bobine à noyau de fer

*Bobines à noyau de fer*



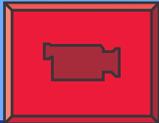
$$\varphi = \varphi_{\mu} + \varphi_f$$

$\varphi$  *Flux crée par la bobine*

$\varphi_{\mu}$  *Flux traversant le circuit magnétique*

$\varphi_f$  *Flux de fuite*

$$v = ri + n \frac{d}{dt} \varphi$$



### 2.3- Schéma équivalent d ' une bobine à noyau de fer

Bobines à noyau de fer

$$X_{\mu} = L_{\mu} * \omega$$

$$x_f = l_f * \omega$$

*Le circuit magnétique est représenté par une réactance  $X_{\mu}$*

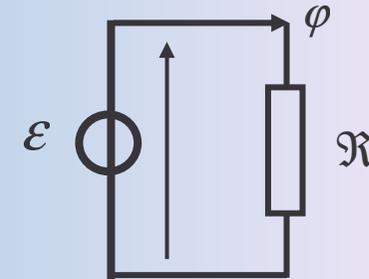
*Les pertes fer sont représentés par une résistance  $R_{\mu}$*

- 
- 
- 



### 2.3- Schéma équivalent d ' une bobine à noyau de fer

### Bobines à noyau de fer



Prise en compte des imperfections de la bobine

*Les pertes joules sont représentés par une résistance  $r$*

*La contribution de l 'inductance de fuite est:  $l_f$*

Prise en compte du circuit magnétique

*Les pertes fer sont représentés par une résistance  $R_\mu$*

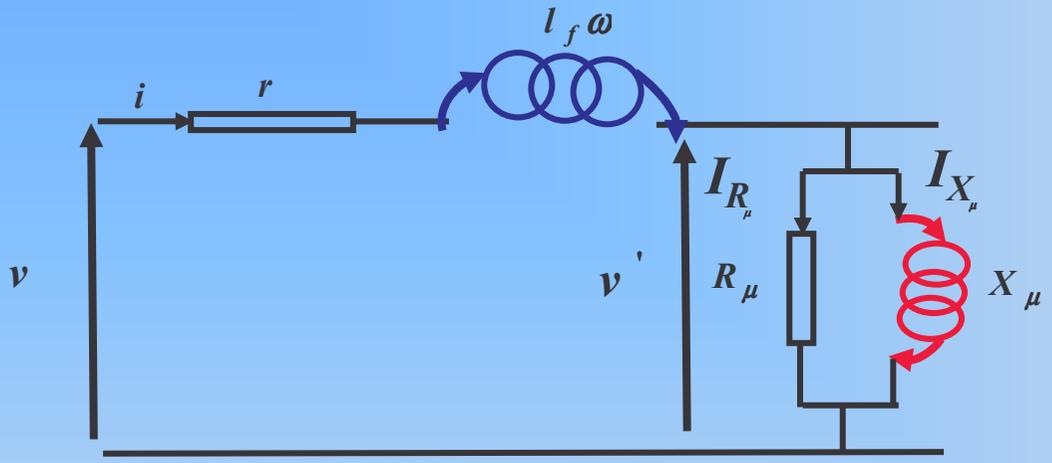
*Le circuit magnétique est représenté par une réactance  $X_\mu$*

- 
- 
- 

↳ ...23



2.3- Schéma équivalent à une bobine à noyau de fer Bobines à noyau de fer



Pertes joules:

$$p_j = ri^2$$

Puissance magnétique stockée:

$$Q_{fer} = \frac{V'^2}{X_\mu}$$

Pertes fer:

$$p_f = \frac{V'^2}{R_\mu}$$



- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-



# Pertes fer

Bobines à noyau de fer

La puissance active consommée par le circuit magnétique est appelée pertes fer et s'exprime en fonction du facteur de qualité des tôles magnétiques  $q$ , de la masse des tôles  $M$ , de la fréquence d'utilisation  $f$  et de l'induction magnétique maximale  $B_{\max}$  dans le circuit magnétique :

$$P_f^W = q^{W/kg} \times M^{kg} \times \left[ \frac{f^{Hz}}{50} \right] \times \left[ \frac{B_{\max}^T}{1} \right]^2$$



## Pertes par courants de Foucault

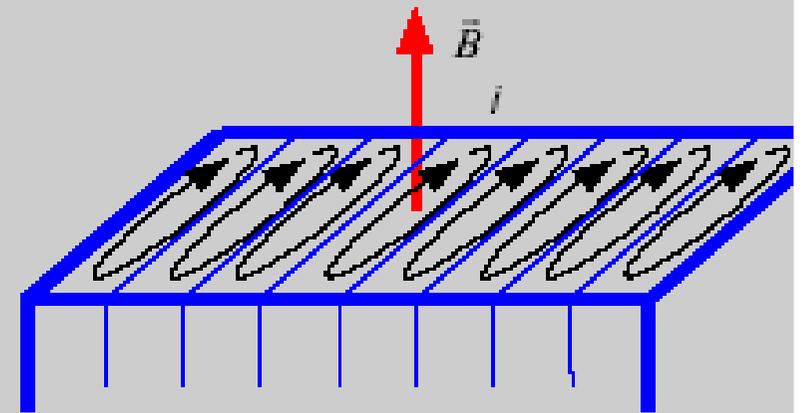
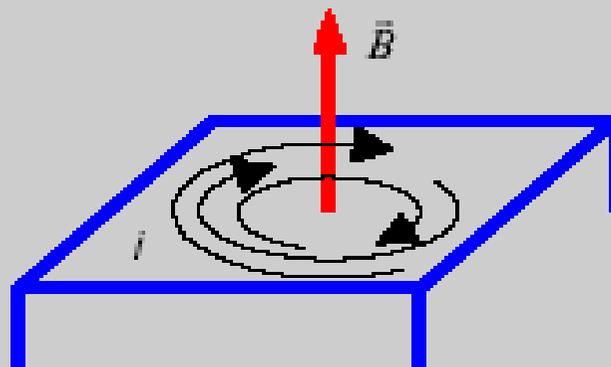
### Origine et expression

- Circulation de courants induits dans les masses métalliques conductrices,
- Dépendent de l'induction maximale  $B_M$ , de la fréquence  $f$  et de la résistivité du matériau  $\rho$

$$P_F = k \frac{B_M^2 \cdot f^2}{\rho}$$

### Réduction des pertes

- Utilisation d'un matériau plus résistif : fer avec addition de silicium, ferrite.
- Feuilletage pour augmenter la résistance globale.



- 
- 
- 



## Pertes par hystérésis

Bobines à noyau de fer

### Origine et expression



- Dépendent de l'induction maximale  $B_M$ , de la fréquence  $f$ , du volume matériau  $V$  et de l'énergie attachée au matériau (aire du cycle  $\mathcal{A}_H$ ) regroupés dans un coefficient :

$$P_H = k_H \cdot f \cdot B_M^2$$

### Réduction des pertes

- Utilisation d'un matériau à cycle d'hystérésis étroit : matériau doux.

### Globalisation des pertes : pertes fer

- Somme des pertes par courant de Foucault et par hystérésis :  $P_{\text{fer}} = P_F + P_H$



Aspects Pratiques

Technologie

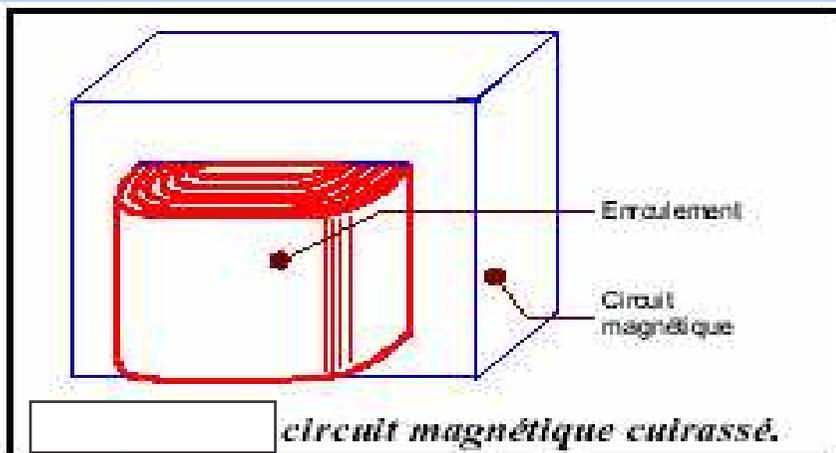
Bobines à noyau de fer

L'apparence d'une bobine à noyau de fer est différente suivant l'utilisation .

La disposition pratique consiste à utiliser soit un circuit magnétique cuirassé, soit torique.

En basse fréquence, le circuit magnétique est feuilleté pour limiter les pertes par courants de Foucault.

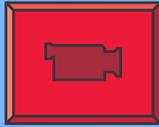
Pour les utilisations à des fréquences plus élevées, on a recours à la ferrite dont la résistance électrique est importante





En Électrotechnique, on rencontre les bobines à noyau de fer dans les électroaimants ( relais, contacteurs, levage ), les bobines d 'usage courant, les plateaux magnétiques de machines - outil ou les paliers magnétiques.

En Électronique, on les trouvent dans les inductances de filtrage, les selfs HF ajustables ou non. Dans ces cas, les noyaux en ferrite sont de mise.

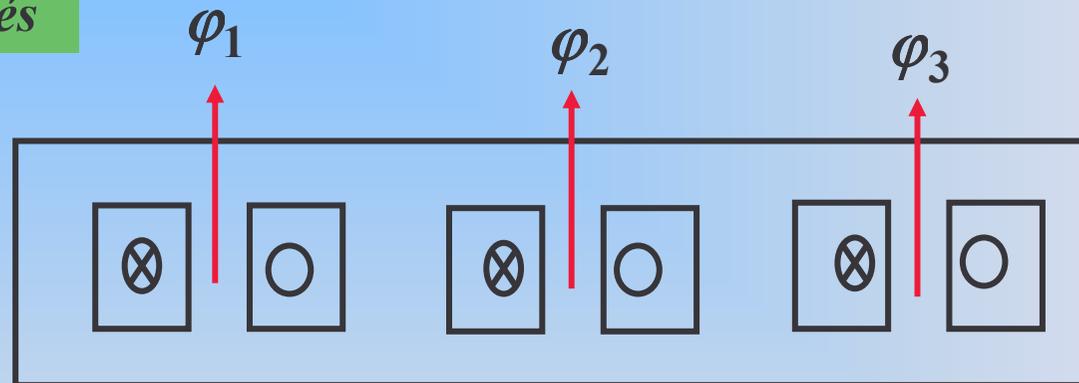


### 3- Bobines triphasées

Bobines à noyau de fer

Les trois enroulements sont montés sur un même circuit magnétique.

*Circuit magnétique à trois noyaux bobinés*



$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$



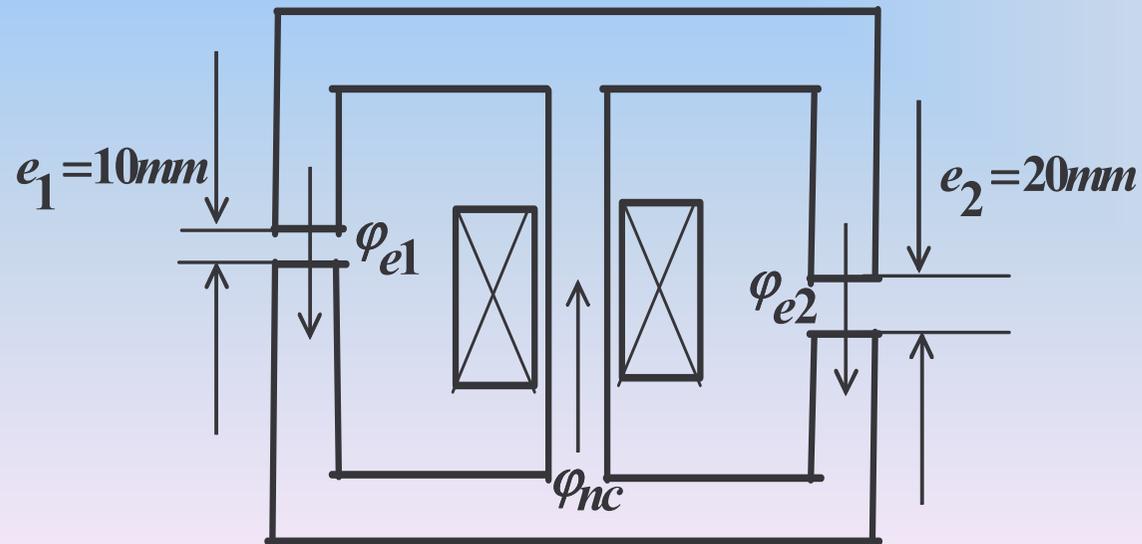
### Exo 13

## Exercice 13

Le circuit magnétique de la figure ci dessous est excité au moyen d'une bobine comportant 1000 spires, parcourues par un courant de 0.2 A .

On suppose la réluctance du fer négligeable.

Le circuit magnétique de section carrée 100\*100 mm<sup>2</sup>

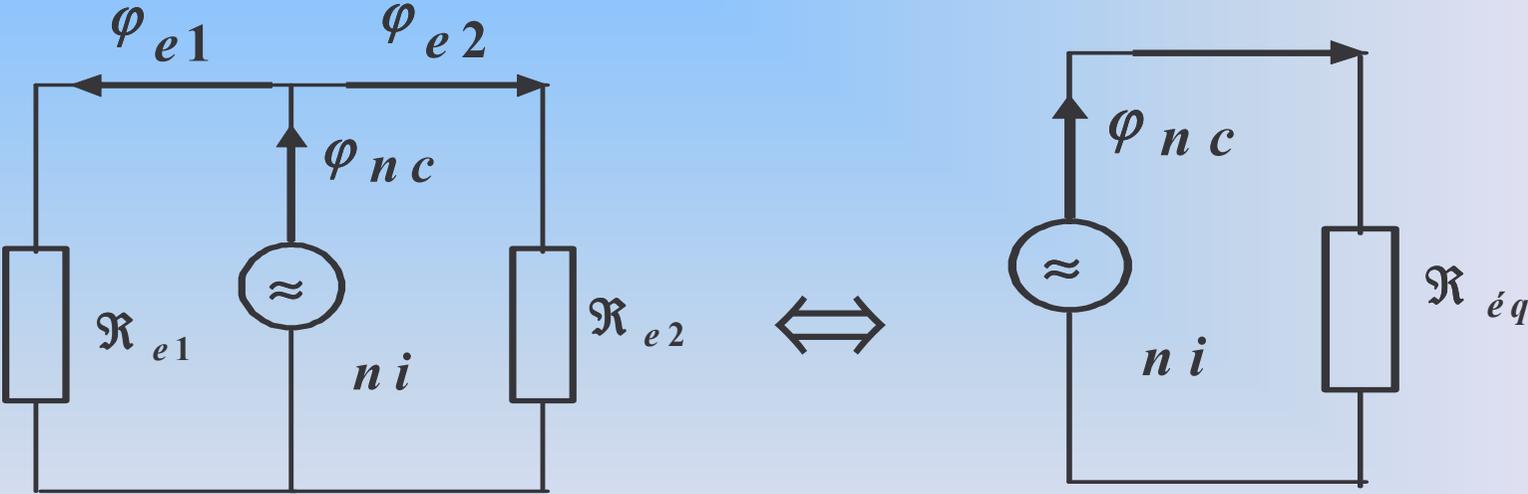




Exo 13

# Exercice 13

1. Faire un schéma électromagnétique équivalent du circuit magnétique





### Exo 13

## Exercice 13

2. Calcul du flux traversant le noyau central ?

Expression des réluctances :

$$\mathcal{R}_{e1} = \frac{e_1}{\mu_0 * S} = \frac{10 * 10^{-3}}{4 * \pi * 10^{-7} * 100 * 100 * 10^{-6}} = 796 * 10^3 H^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{e2} = \frac{e_2}{\mu_0 * S} = \frac{20 * 10^{-3}}{4 * \pi * 10^{-7} * 100 * 100 * 10^{-6}} = 1592 * 10^3 H^{-1} = 2 * \mathcal{R}_{e1}$$

$$\mathcal{R}_{\acute{e}q} = \frac{\mathcal{R}_{e1} * \mathcal{R}_{e2}}{\mathcal{R}_{e1} + \mathcal{R}_{e2}} = \frac{\mathcal{R}_{e1} * 2\mathcal{R}_{e1}}{\mathcal{R}_{e1} + 2\mathcal{R}_{e1}} = \frac{2}{3} \mathcal{R}_{e1} = 531 * 10^3 H^{-1}$$



### Exo 13

## Exercice 13

Expression de la force magnétomotrice :

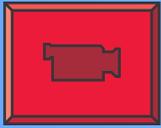
$$ni = \varphi_{nc} * \mathcal{R}_{\acute{e}q} \quad \varphi_{nc} = \frac{ni}{\mathcal{R}_{\acute{e}q}} = \frac{1000 * 0.2}{531 * 10^3} = 0.000377 Wb$$

3. Calcul des flux traversant les entrefers

$$\varphi_{e1} = \frac{\mathcal{R}_{e2}}{\mathcal{R}_{e1} + \mathcal{R}_{e2}} * \varphi_{nc} = \frac{2\mathcal{R}_{e1}}{\mathcal{R}_{e1} + 2\mathcal{R}_{e1}} * \varphi_{nc} = \frac{2}{3} * \varphi_{nc} = \frac{2}{3} * 0.000377 = 0.000251 Wb$$

$$\varphi_{e2} = \frac{\mathcal{R}_{e1}}{\mathcal{R}_{e1} + \mathcal{R}_{e2}} * \varphi_{nc} = \frac{\mathcal{R}_{e1}}{\mathcal{R}_{e1} + 2\mathcal{R}_{e1}} * \varphi_{nc} = \frac{1}{3} * \varphi_{nc} = \frac{1}{3} * 0.000377 = 0.000125 Wb$$

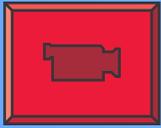
- 
- 
- 



Exo 13bis

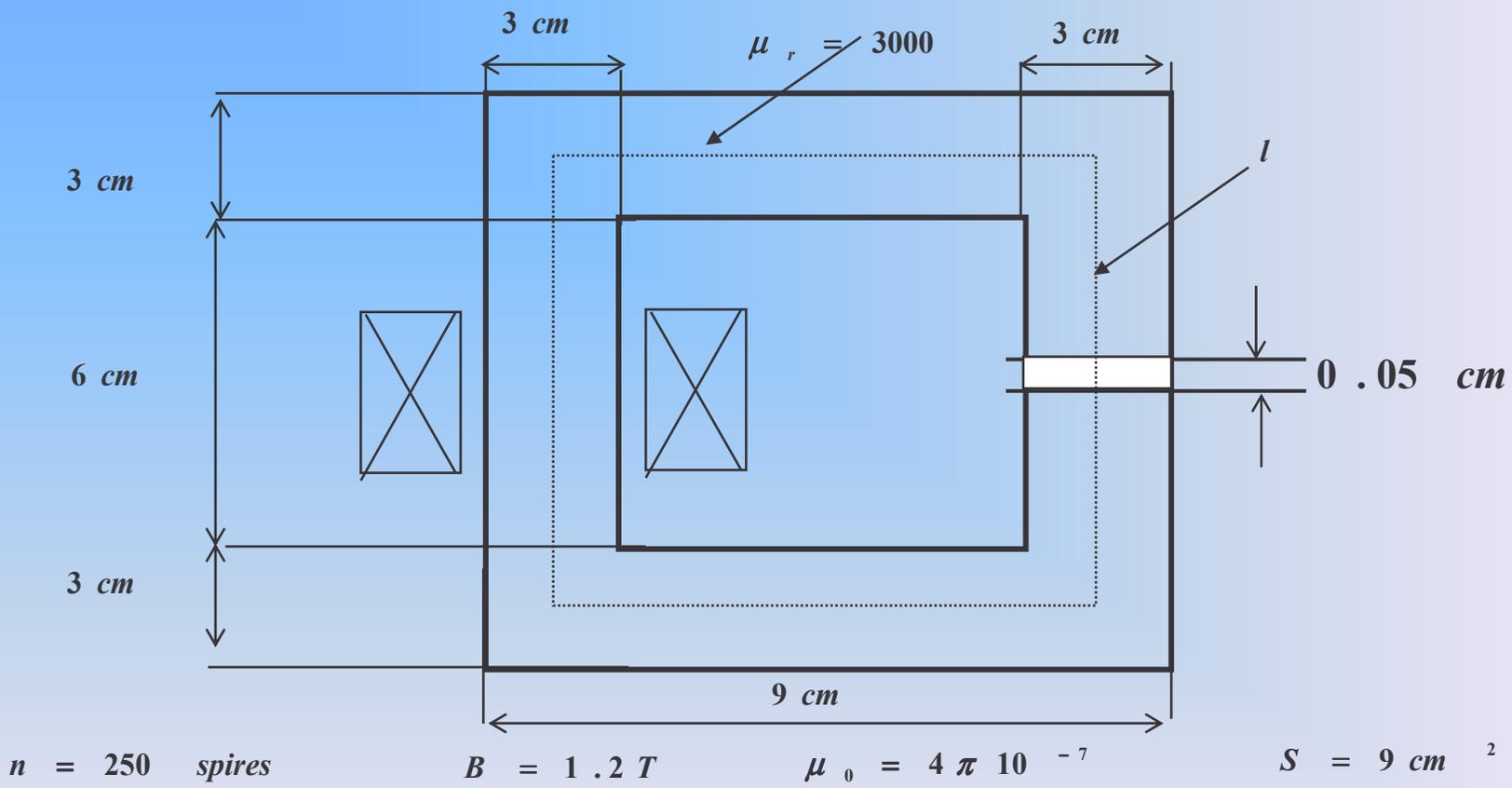
## Exercice 13 bis

Un système électromagnétique est destiné à placer une induction magnétique de 1.2 T dans un entrefer. Le circuit magnétique de section carrée est de  $3 \times 3 \text{ cm}^2$



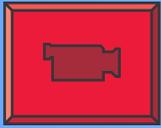
Exo 13bis

Exercice 13bis Bobines à noyau de fer



Les côtes sont données en centimètres

- 
- 
- 



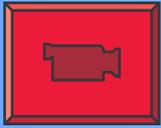
Exo 13bis

# Exercice 13 bis

Calculez la réluctance du circuit magnétique ?



- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-



### Exo 13bis

## Exercice 13bis

Bobines à noyau de fer

*Réductance du circuit magnétique*

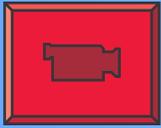
$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{fer} + \mathcal{R}_{air} = \frac{l}{\mu * S} + \frac{e}{\mu_0 * S}$$
$$\mathcal{R} = \frac{0.3}{3000(4\pi * 10^{-7})(9 * 10^{-4})} + \frac{0.05 * 10^{-2}}{(4\pi * 10^{-7})(9 * 10^{-4})}$$

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{fer} + \mathcal{R}_{air} = 8.842 * 10^4 + 4.42 * 10^5 = 5.305 * 10^5 \text{ At.Wb}^{-1}$$

Calculez l'inductance de la bobine ?

*Inductance de la bobine*

$$L = \frac{n^2}{\mathcal{R}} = \frac{250^2}{5.305 * 10^5} = 0.1178 \text{ H}$$



Exo 13bis

Exercice 13bis

Bobines à noyau de fer

Calculez la valeur du courant  $i$  qui doit circuler dans la bobine?

*Flux magnétique dans le noyau*

$$\Phi = B * S = 1.2 * 9 * 10^{-4} = 1.08 * 10^{-3} \text{ Wb}$$

On a:  $ni = \mathcal{R}\Phi$

Alors: 
$$i = \frac{\mathcal{R}\Phi}{n} = \frac{5.305 * 10^5 * 1.08 * 10^{-3}}{250} = 2.29 \text{ A}$$

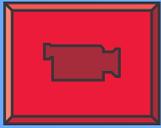


## Exercice 14

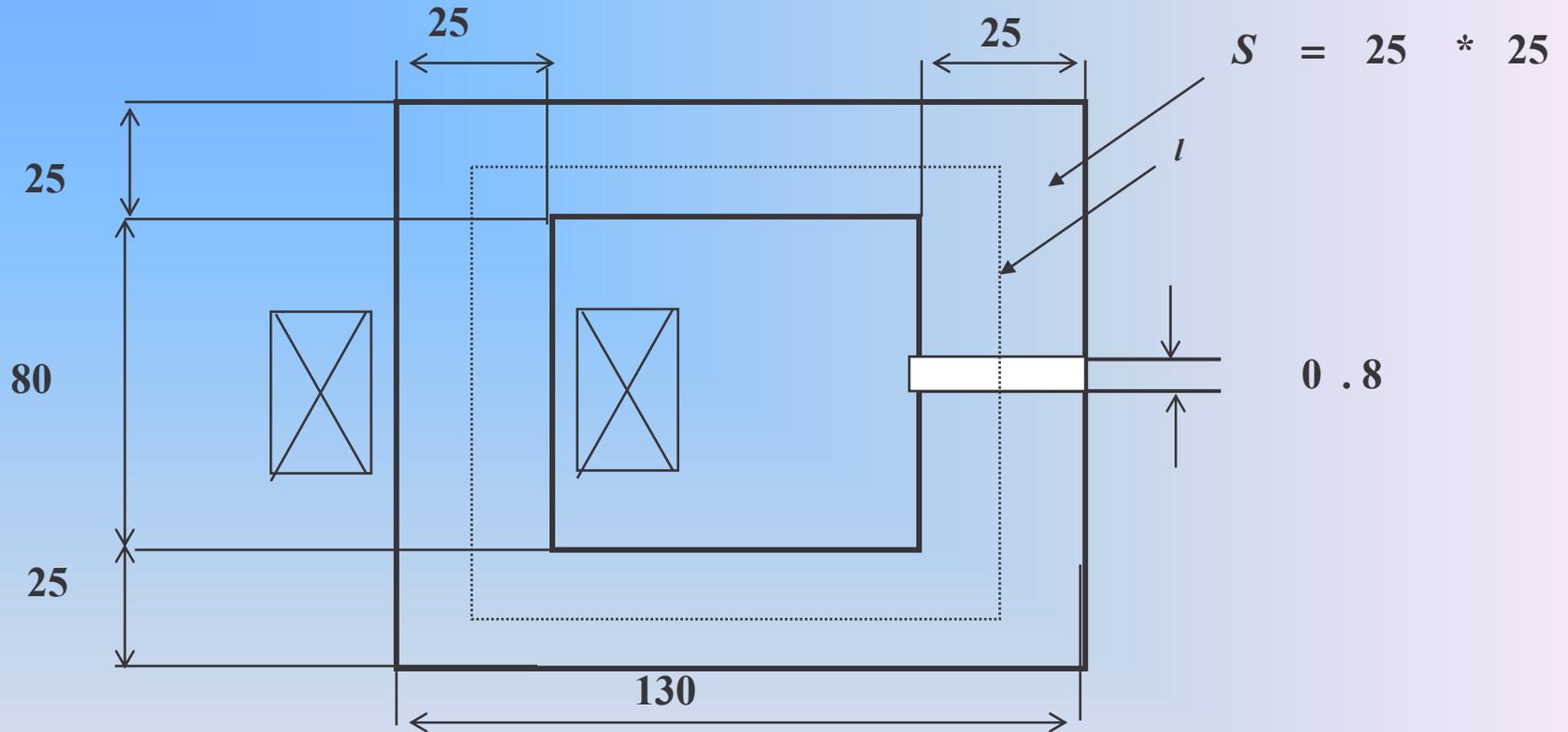
Un système électromagnétique est destiné à placer une induction magnétique de 1.4 T dans un entrefer. Le circuit magnétique de section carrée est fait d'un matériau ferromagnétique dont la loi d'aimantation est la suivante

$B$ (T)	0	0.50	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
$H$ (A/m)	0	220	490	760	1300	2450	4700	11500

Calculez la valeur du courant  $i$  qui doit circuler dans la bobine?



# Exercice 14



$n = 1200$  spires     $B = 1.4 T$      $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$

Les côtes sont données en millimètres



## Exercice 14

*Flux magnétique dans le noyau et dans l'entrefer*  $\phi = B * S$

*Champs magnétique d'excitation dans l'entrefer*  $H_e = \frac{B}{\mu_0}$

*Champs magnétique d'excitation dans le fer H Voir courbe de B(H)*

*Force magnétomotrice dans l'entrefer*  $(f.m.m)_e = H_e * e$

*Force magnétomotrice dans le fer*  $(f.m.m)_{fer} = H * l$



## Exercice 14

	$\phi(wb)$	$S(m^2)$	$B(T)$	$H(A/m)$	$l(m)$	$f.m.m(AT)$
<i>entrefer</i>	$1.4 * 25 * 25 * 10^{-6}$	$25 * 25 * 10^{-6}$	1.4	$\frac{B}{\mu_0} = 1.11 * 10^6$	$0.8 * 10^{-3}$	891
<i>fer</i>	$1.4 * 25 * 25 * 10^{-6}$	$25 * 25 * 10^{-6}$	1.4	2450(tableau)	$(80 + 25) * 4 * 10^{-3}$	1029

$$(f.m.m)_{total} = 891 + 1029 = 1920AT = n * i = 1200 * i$$

$$i = \frac{1920}{1200} = 1.6A$$