

Electrotechnique - Magnétisme et Circuits Magnétiques

LP Infrastructure Ferroviaire : Signalisation

F. Kölbl

2019 - 2020



Table des matières

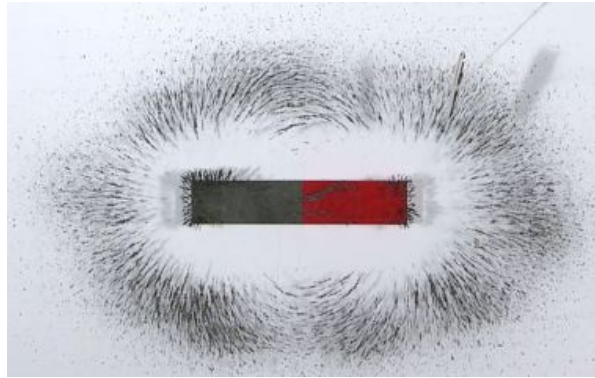
1	Cours : Magnétisme et Circuits Magnétiques	1
2	Travaux Dirigés	9

Electrotechnique - Magnétisme et circuits magnétiques

Pré-requis

- Lois générales de l'électricité,
- géométrie de base,
- rigueur sur les unités.

Chapitre facile pour le peu qu'on apprenne le cours !



phénomènes magnétiques \Rightarrow Utilisés très souvent en électrotechnique. Ils permettent de :

- de créer des composants inductifs,
- de convertir des puissances mécaniques en électrique ou l'inverse.

Programme du cours

- Grandeurs de base du magnétisme,
- Théorèmes de l'électromagnétisme,
- Analogie Circuits Magnétiques/Circuits Electriques,
- Inductance.

Grandeurs pour le magnétisme

On introduit 3 grandeurs engendrées par la circulation d'un courant :

- Le champ magnétique H ,
- l'induction B ,
- le flux Φ ,

sauf exception (écrit sur le slide), les formules sont à retenir !

Champ Magnétique : \vec{H}

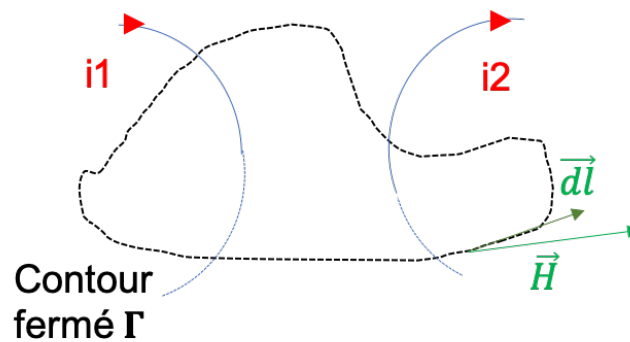
créé par circulant dans un conducteur.

Unité :

Calcul, (trop) complexe, par le théorème d'Ampère :

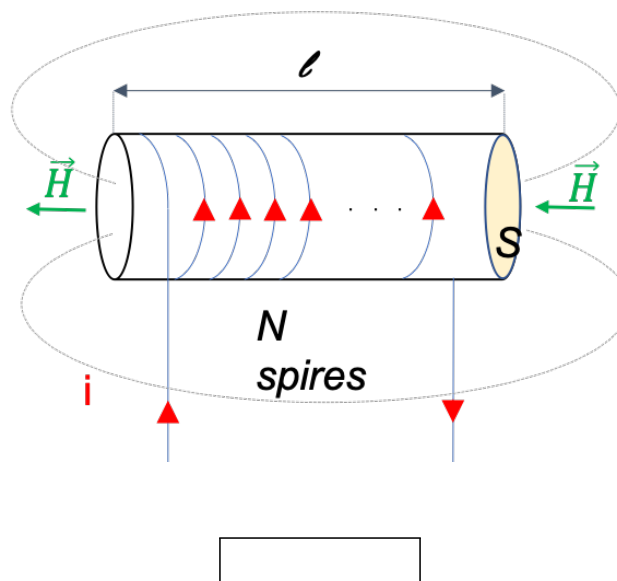
$$\int_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \Sigma$$

(il n'est pas obligatoire de retenir cette formule.)

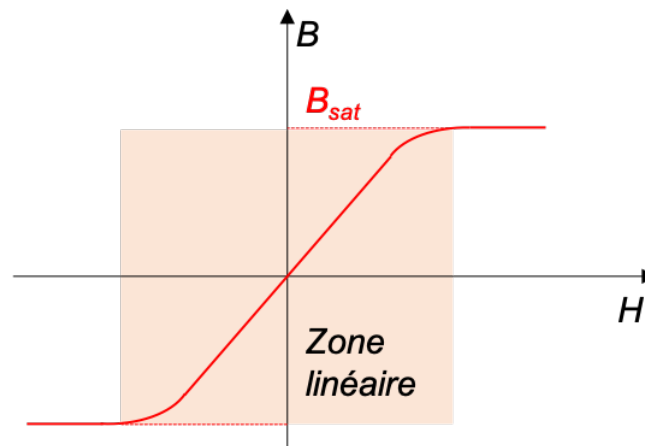


Champ Magnétique sur des géométries simples

MAIS, sur les circuits magnétiques :
Géométries \Rightarrow calculs s



Les matériaux ont une propriété magnétique : la notée



En zone , on peut calculer l'induction B en Tesla ($[T]$) par :

Perméabilité

On pose généralement

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

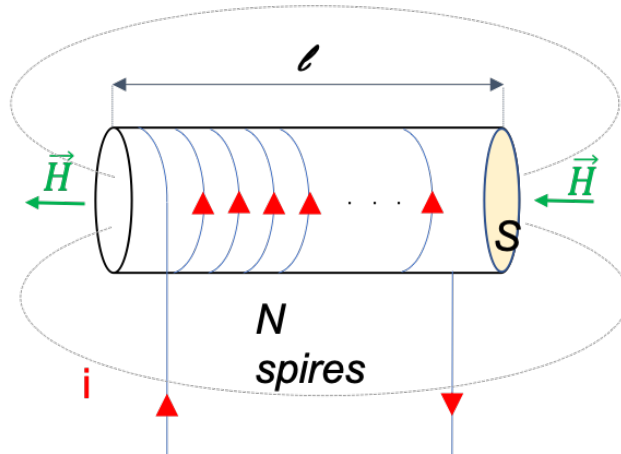
- $\mu_0 =$, la perméabilité du vide, une
- μ_r la perméabilité

En électrotechnique, on a tout intérêt à avoir un μ_r (forte induction, matériaux ferromagnétiques). Ordres de grandeur :

matériau	μ_r
air	
cobalt	
nickel	
fer	

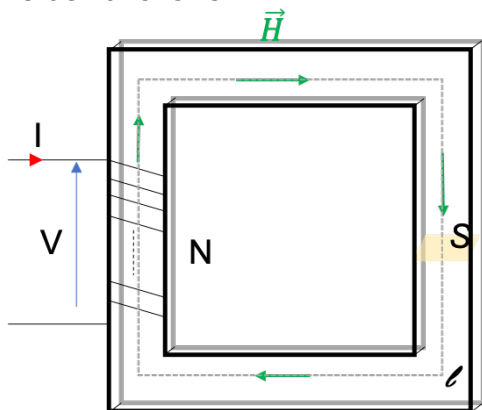
On définit le flux Φ :

en (), par la quantité d'induction traversant une surface :



Notion de Reluctance

faisons le bilan :



On peut calculer le champ magnétique avec le théorème d'Ampère :

$$H =$$

Dans la zone de linéarité du matériau, l'induction vaut donc :

On

$$B =$$

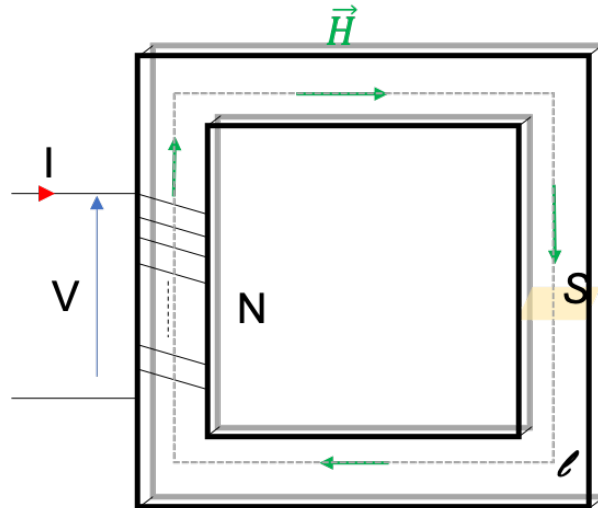
Et le flux vaut :

$$\Phi =$$

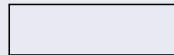
pose \mathcal{R} la (en $[H^{-1}]$) la grandeur :

$$\mathcal{R} =$$

qui ne dépend que des propriétés géométriques et de matériau du circuit magnétique.



On peut écrire la relation flux - force magné-tomotrice (NI)



c'est la

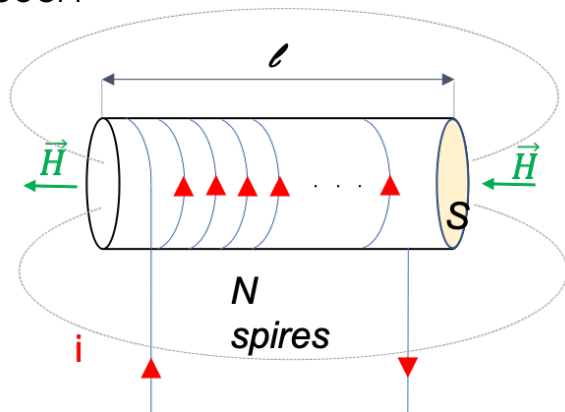
Analogie Circuits Magnétiques/Electriques

Il est possible de dresser une analogie Circuits Magnétiques/Electriques et de simplifier l'étude :

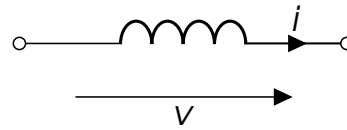
Circuit électrique	Circuit magnétique
$U :$	$NI :$
Résistance : R ($[\Omega]$)	Reluctance : \mathcal{R} ($[Wb]$)
Loi d'Ohm :	Loi d'Hopkinson :
Associations de Résistances (R_1, R_2)	Associations de Réductances ($\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$)
Série :	Série :
Parallèle :	Parallèle :

Circuit magnétique = composant électrique inductif

ceci :



Est exactement ce qui se cache derrière ce dipôle :



Rappel :

$$V =$$

L en Henry ($[H]$)
et l'énergie enmagasinée est :

$$E =$$

Question : comment calculer l'inductance propre (L) à partir du circuit magnétique

inductance

La tension V et la somme des fem e , qui est la fem par spire :

$$V =$$

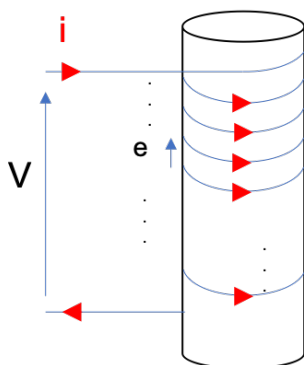
e peut se calculer en fonction du flux à partir de la loi de Lenz :

$$e =$$

il n'est pas nécessaire de retenir cette formule A
Donc :

$$V =$$

En utilisant le théorème d'Ampère :



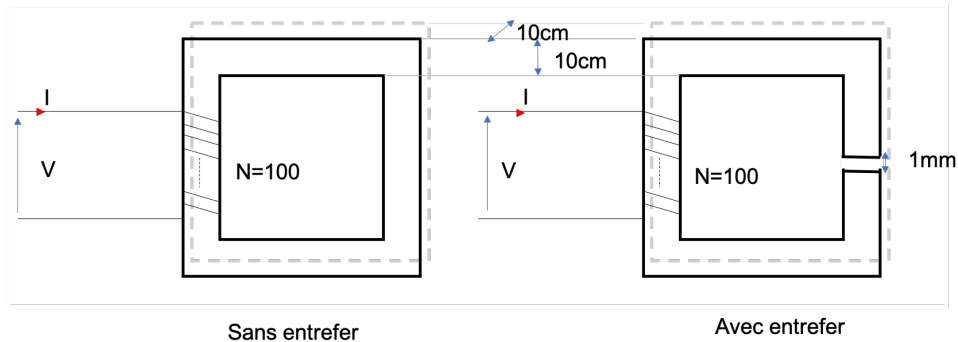
retenir :

$$L =$$

Circuits magnétiques - Travaux Dirigés

1 Exercice 1 :

On bobine $N = 100$ spires de fil de cuivre sur le circuit magnétique représenté sur la figure suivante :



Le matériau utilisé est du fer de perméabilité magnétique relative $\mu_R = 528,6$. La longueur moyenne du circuit est de $L = 80\text{cm}$

1. Calculer la valeur en m^2 de la surface d'une section droite du circuit magnétique au milieu d'un des barreaux horizontaux ou verticaux.
2. Faire les schémas équivalents des deux circuits magnétiques, avec ou sans entrefer, et donner des noms aux différentes reluctances.
3. Calculer les différentes valeurs de reluctances placées à la question précédente.
4. Simplifier le schéma du circuit magnétique avec entrefer, et calculer la reluctance équivalente du circuit magnétique.
5. En déduire, pour les deux circuits, la valeur d'inductance ainsi réalisée pour 100 spires. Comparez ces deux valeurs. Quel rôle joue l'entrefer ?
6. Calculer, avec et sans entrefer, la valeur du courant efficace I absorbé par l'inductance formée par les 100 spires si l'inductance est sous la tension

$$v(t) = 230\sqrt{2}\sin(2\pi 50t)$$

Quelle serait cette valeur si on avait choisi de ne bobiner que 10 spires ?

7. En déduire, avec et sans entrefer, la section minimale des conducteurs permettant de ne pas dépasser une densité de courant de $5\text{A}/\text{mm}^2$.

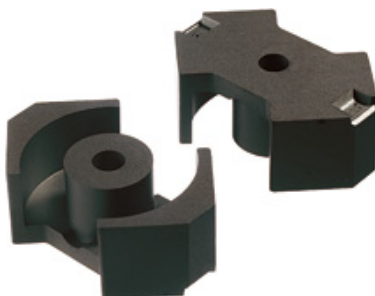
Exercice 2 : Matériau magnétique saturé

On réalise une inductance en utilisant un matériau sur lequel on a préalablement fait une mesure du champ magnétique H et de l'induction magnétique B . Les résultats de mesure sont donnés dans le tableau suivant :

B (T)	0	0,5	1	1,25	1,35	1,45	1,5
H (A/m)	0	250	500	750	1000	1500	1200

1. Tracer le graphe correspondant à cette mesure (B en fonction de H) et commenter la forme de la courbe obtenue.
2. Calculer la perméabilité magnétique relative de ce matériau dans sa partie non saturée.
3. Calculer la perméabilité magnétique relative de ce matériau si on l'utilise avec une induction de $1,5T$.
4. On décide d'utiliser ce matériau pour créer un circuit magnétique de longueur $l = 30cm$ et de section $S = 4cm^2$. On réalise un bobinage de 100 spires.
 - (a) Calculer la réluctance du circuit dans sa partie non saturée.
 - (b) En déduire la valeur attendue d'inductance.
 - (c) Pour une induction de $1,5T$, calculer la réluctance du circuit, puis son inductance. Que pouvez vous en conclure.
 - (d) A partir de quelle valeur de courant ce que vous venez d'observer va-t'il arriver ?
5. On rajoute un entrefer d'épaisseur $e = 1mm$.
 - (a) Représenter le schéma équivalent du circuit magnétique.
 - (b) Calculer la réluctance équivalent du circuit.
 - (c) On souhaite retrouver la première valeur d'inductance obtenue (lorsque le circuit est non saturé). Calculer le nombre de spires nécessaires.
 - (d) Calculer le courant maximal avant saturation. Que peut-on en déduire ?

Exercice 3 : Dimensionnement d'une inductance pour un convertisseur de puissance



On désire réaliser une inductance de valeur $L = 2,5mH$. Cette inductance sera utilisée à une fréquence $f = 50kHz$. On utilise un circuit magnétique en ferrite disponible dans le commerce de type RM14-3F3 comme illustré dans l'image ci-dessus. La datasheet du composant est donnée en annexe.

On pose :

- le courant d'utilisation max : $I = 1A$,
 - la densité de courant dans le conducteur du bobinage : $J = 5A/mm^2$,
 - l'induction maximale dans le circuit magnétique : $B_{max} = 200mT$,
 - N le nombre de spires du circuit magnétique.
1. Déterminer la longueur moyenne du circuit magnétique sans entrefer.
 2. Déterminer la section centrale.
 3. En déduire la perméabilité relative du circuit sans entrefer.
 4. Déterminer la réluctance et la perméance du circuit magnétique sans entrefer.
 5. Comparez vos résultats aux chiffre donnés dans la datasheet.
 6. Calculer l'énergie W emmagasinée par l'inductance.
 7. On montre que cette énergie est emmagasinée principalement dans un entrefer. L'énergie volumique est donnée par la relation suivante :

$$W_{volumique} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

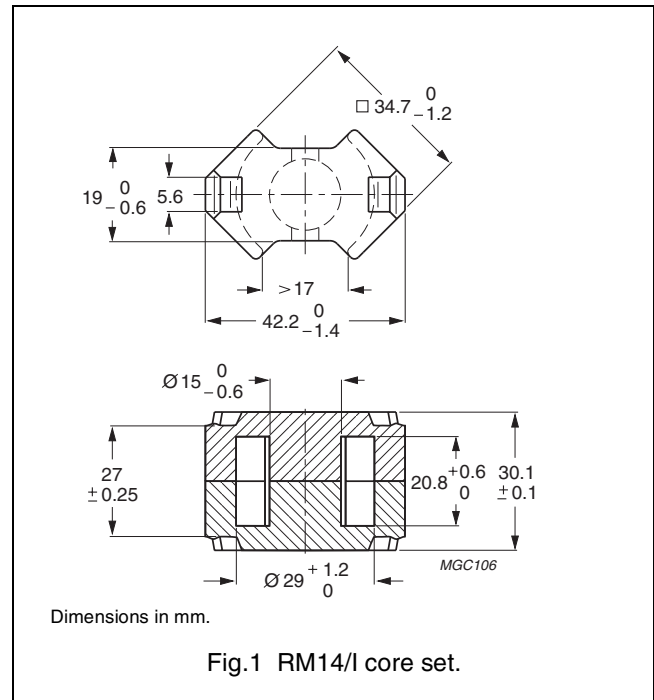
en J/m^3 Déterminer l'entrefer normalisé nécessaire.

8. Pour cet entrefer, en déduire la réluctance du circuit magnétique.
9. Déterminer le nombre de spires nécessaire pour réaliser l'inductance souhaitée.
10. Soit S_c la section d'un conducteur électrique. Exprimer S_c en fonction de I et J (vous pouvez vous aider d'un raisonnement sur les unités).
11. En utilisant la documentation, déterminer la surface bobineable notée S_B (la surface contenant tous les conducteurs électriques).
12. Le bobinage tiendra-t'il entièrement dans le circuit magnétique ? Justifiez votre réponse.
13. Déterminer le diamètre du fil que l'on utilisera pour réaliser le bobinage.

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(I/A)$	core factor (C1)	0.353	mm ⁻¹
V_e	effective volume	13900	mm ³
l_e	effective length	70.0	mm
A_e	effective area	198	mm ²
A_{min}	minimum area	168	mm ²
m	mass of set	≈ 69	g



Core sets for general purpose transformers and power applications

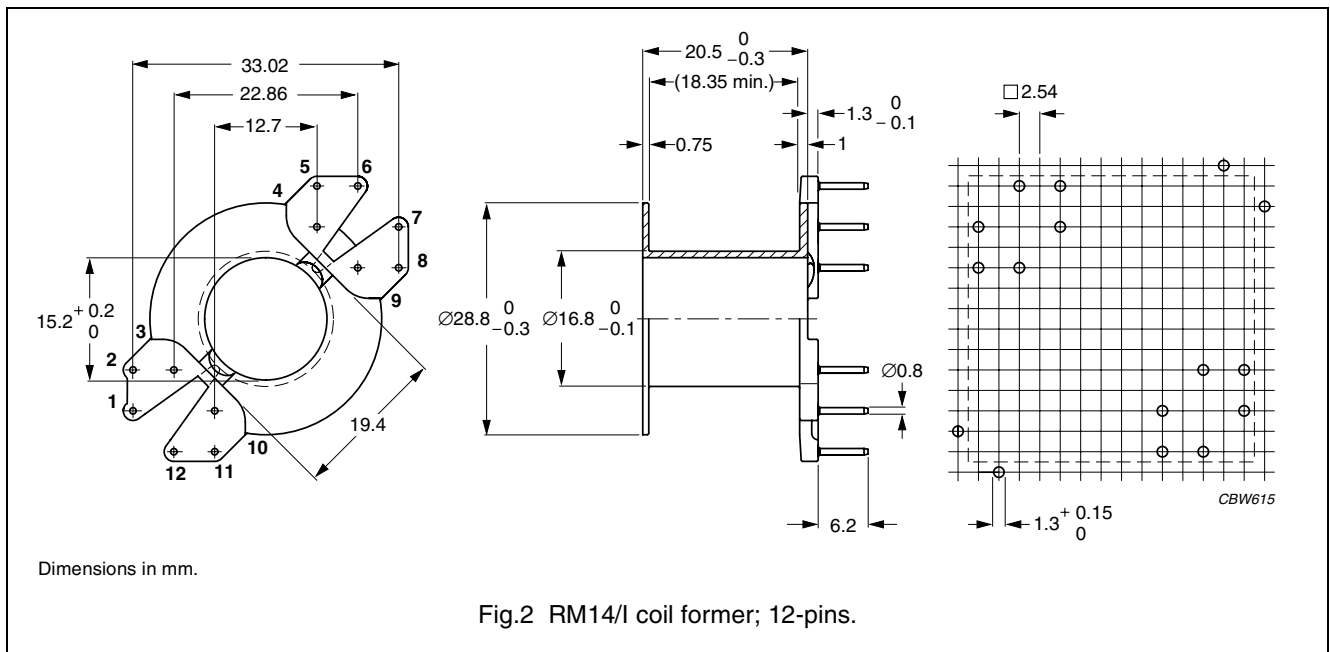
Clamping force for A_L measurements, 80 ±20 N.

GRADE	A_L (nH)	μ_e	AIR GAP (μ m)	TYPE NUMBER
3C90	250 ±3%	≈ 70	≈ 1270	RM14/I-3C90-A250
	315 ±3%	≈ 89	≈ 950	RM14/I-3C90-A315
	400 ±3%	≈ 113	≈ 710	RM14/I-3C90-A400
	630 ±5%	≈ 177	≈ 410	RM14/I-3C90-A630
	1000 ±5%	≈ 281	≈ 240	RM14/I-3C90-A1000
	6600 ±25%	≈ 1850	≈ 0	RM14/I-3C90
3C94	250 ±3%	≈ 70	≈ 1270	RM14/I-3C94-A250
	315 ±3%	≈ 89	≈ 950	RM14/I-3C94-A315
	400 ±3%	≈ 113	≈ 710	RM14/I-3C94-A400
	630 ±5%	≈ 177	≈ 410	RM14/I-3C94-A630
	1000 ±5%	≈ 281	≈ 240	RM14/I-3C94-A1000
	6600 ±25%	≈ 1850	≈ 0	RM14/I-3C94
3C95 des	8130 ±25%	≈ 2290	≈ 0	RM14/I-3C95
3C96 des	5700 ±25%	≈ 1600	≈ 0	RM14/I-3C96
3F3	250 ±3%	≈ 70	≈ 1270	RM14/I-3F3-A250
	315 ±3%	≈ 89	≈ 950	RM14/I-3F3-A315
	400 ±3%	≈ 113	≈ 710	RM14/I-3F3-A400
	630 ±5%	≈ 177	≈ 410	RM14/I-3F3-A630
	1000 ±5%	≈ 281	≈ 240	RM14/I-3F3-A1000
	5700 ±25%	≈ 1600	≈ 0	RM14/I-3F3

COIL FORMERS

General data

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	phenolformaldehyde (PF), glass reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E167521(M)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin (Sn) plated
Maximum operating temperature	180 °C, "IEC 60085", class H
Resistance to soldering heat	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3.5 s
Solderability	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Ta, method 1

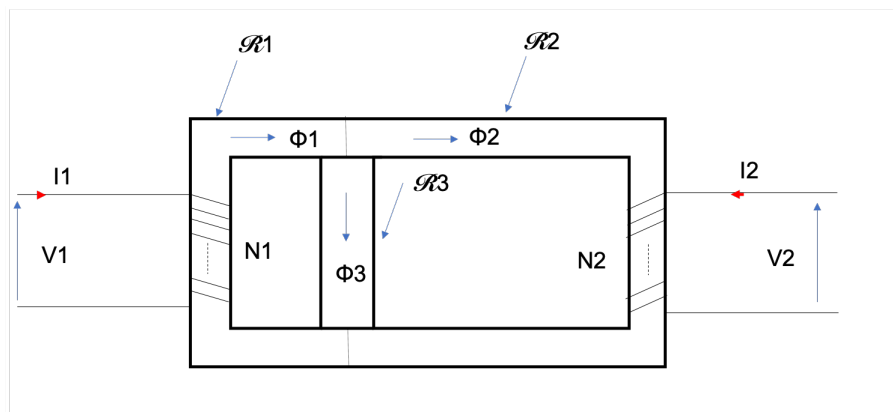


Winding data and area product for 12-pins RM14/I coil former

NUMBER OF SECTIONS	NUMBER OF PINS	PIN POSITIONS USED	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	WINDING AREA (mm ²)	WINDING WIDTH (mm)	AREA PRODUCT Ae x Aw (mm ⁴)	TYPE NUMBER
1	10	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12	71	112	18.4	22200	CSV-RM14-1S-10P
1	12	all	71	112	18.4	22200	CSV-RM14-1S-12P

2 Exercice 4 : Circuit couplés et inductances de fuite

On s'intéresse au circuit magnétique, représenté en coupe ci dessous, sur lequel sont bobinés deux enroulements de fil de cuivre. les reluctances des tronçons sont directement annotées sur le schéma.



Le tronçon 3 représente les fuites du bobinages (ses imperfections, du point de vue du magnétisme) : c'est à dire l'ensemble des trajets de lignes de champ traversant le bobinage 1 mais qui n'arrivent pas au bobinage 2.

1. Représenter le schéma équivalent de ce circuit magnétique.
2. Ecrire la relation liant Φ_1 , Φ_2 et Φ_3 .
3. En considérant que le bobinage 2 est ouvert ($I_2 = 0$), calculer l'expression littérale du flux Φ_2
4. De même, calculer l'expression littérale du flux Φ_3 .
5. Calculer l'expression de l'inductance mutuelle M du bobinage 1 sur le bobinage 2.
6. Calculer également l'expression de l'inductance L_f qui représente le facteur de proportionnalité entre le flux Φ_3 et le courant I_1 .
7. On admettra qu'on peut ramener cette inductance L_f en amont du tronçon où est enroulé le conducteur 1. Dans ce cas, redessiner le schéma et calculer l'inductance L vue du bobinage 1.
8. Calculer la valeur du rapport $m = \frac{V_2}{V_1}$, puis représenter le schéma électrique équivalent au montage global formé.