جامعة هواري بومدين للعلوم والتكنولوجيا
U S T H B

L. M. D S4

Licence de Physique Appliquée: Electricité

Module : ***Electrotechnique* 1**

Chapitre III

Circuits magnétiques

1. Les circuits magnétiques

1.1. Rappels

Un conducteur parcouru par un ***courant*** ***I*** de densité $\vec{J}$ ⇒

- un ***champ magnétique*** $\vec{B}$
- une ***excitation magnétique*** $\vec{H}$

$\vec{B}$ satisfait à la conservation du flux magnétique :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \,.\, d\vec{S} = 0$$

$\vec{H}$ au théorème d'Ampère :

$$\int_C \vec{H} \,.\, d\vec{l} = \sum_n I_n \qquad \text{soit} \qquad \int_C \vec{H} \, d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \, d\vec{S}$$

1.2. Relations entre *H* et *B*

Dans le VIDE $\vec{B}$ & $\vec{H}$ sont ***proportionnels***

$$\boxed{\vec{B} = \mu_o \vec{H}}$$

μ_o perméabilité magnétique du vide

$\mu_o = 4\,\pi\,10^{-7}$ Henry/mètre

Dans les MILIEUX

$$\vec{B} = \mu_o \left[\vec{H} + \vec{J} \right] \Rightarrow \vec{J}$$ Intensité d'aimantation

Milieux l . h. i $\vec{J}$ & $\vec{H}$ sont ***proportionnels***

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

χ susceptibilité magnétique du milieu

$$\boxed{\vec{B} = \mu_o \left[1 + \chi\right] \vec{H}} \Rightarrow \begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_o \left[1 + \chi\right] \end{cases}$$

☛ $\boxed{\text{Milieux } \textit{diamagnétiques}}$

$\vec{\boldsymbol{H}}$ & $\vec{\boldsymbol{J}}$ sont de sens contraires $\boxed{\chi < 0}$

C'est le cas de la ***plupart des substances***

☛ $\boxed{\text{Milieux } \textit{paramagnétiques}}$

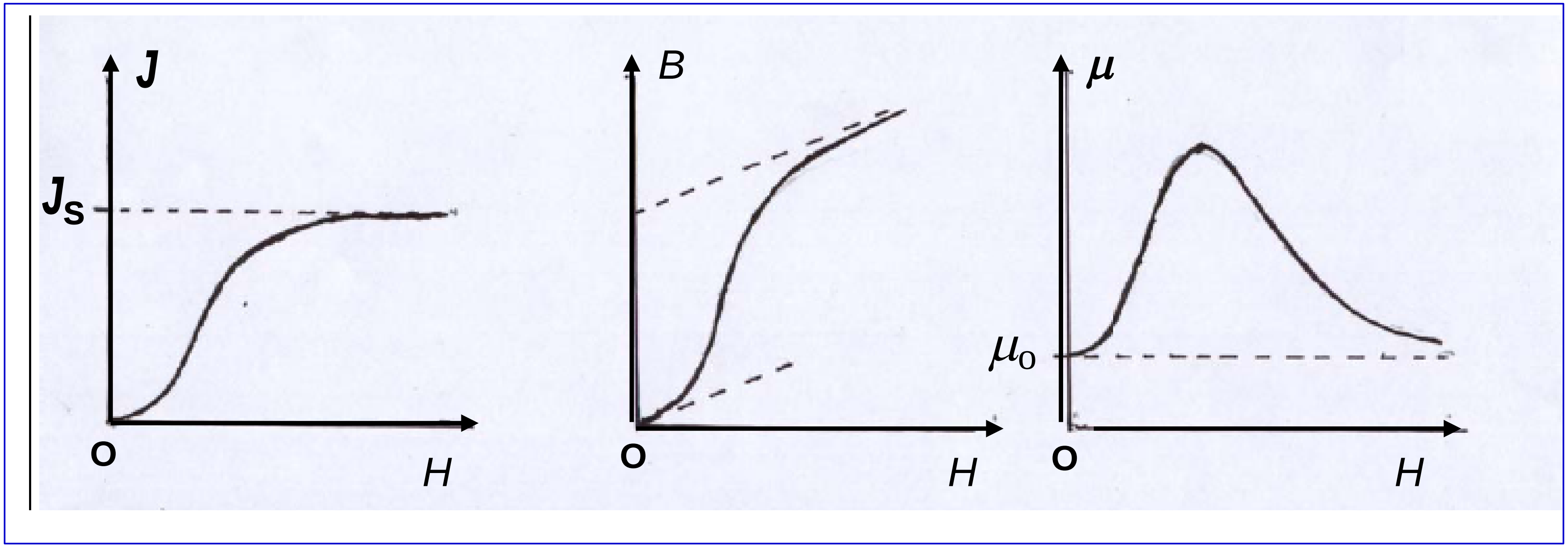
$\vec{\boldsymbol{H}}$ & $\vec{\boldsymbol{J}}$ sont de même sens $\boxed{\chi > 0}$

Les milieux *paramagnétiques* sont plus rares (aluminium lithium etc.),

Milieux *ferromagnétiques*

$\vec{H}$ & $\vec{J}$ ne sont plus ***proportionnels***

On a toujours: $\boxed{\vec{B} = \mu \vec{H}}$ mais: $\boxed{\mu = f\,(H)}$

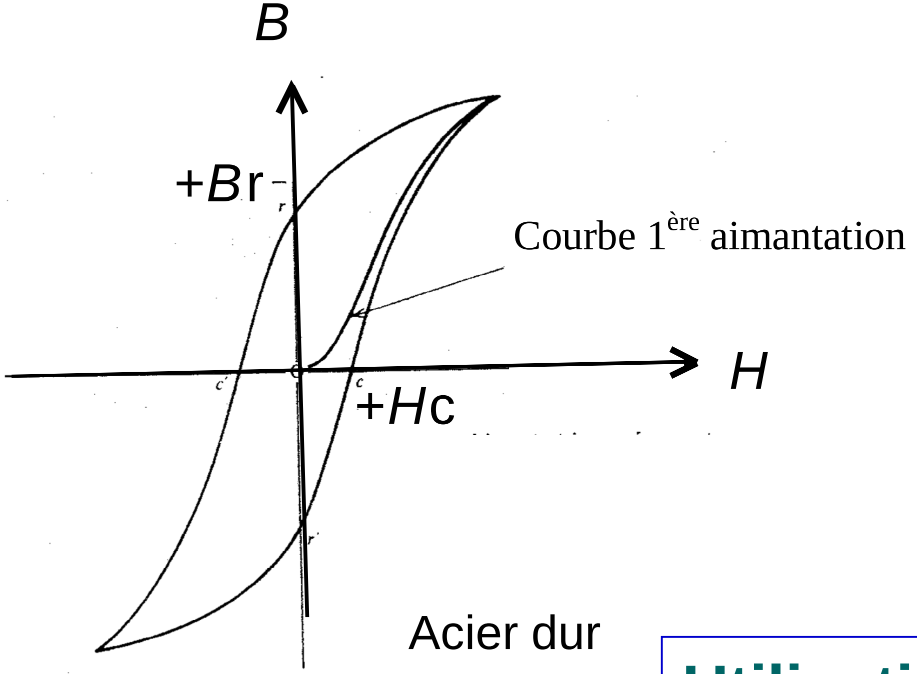


Courbe 1 J_s : ''***aimantation à saturation***''.

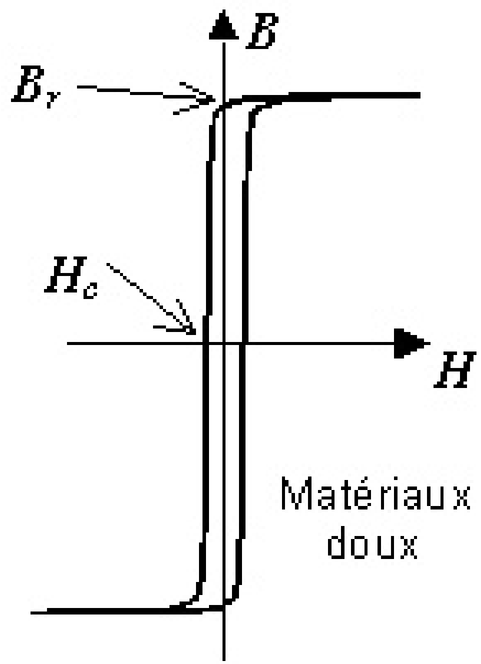
Courbe 2 : Asymptote d'équation $B = \mu_0\,[H + J_s]$

Cycle d'hystérésis

L'excitation varie sinusoïdalement en *f(t)*



Acier dur



Utilisation

Aimants

Circuits magnétiques des Machines électriques

Influence de la température.

$\vec{B}$ varie avec la température.

Ferromagnétique T_c Paramagnétique

T °

T_c Température de CURIE

Fer : T_c = 775°C

Influence des contraintes mécaniques.

Une contrainte modifie l'***aimantation*** du matériau

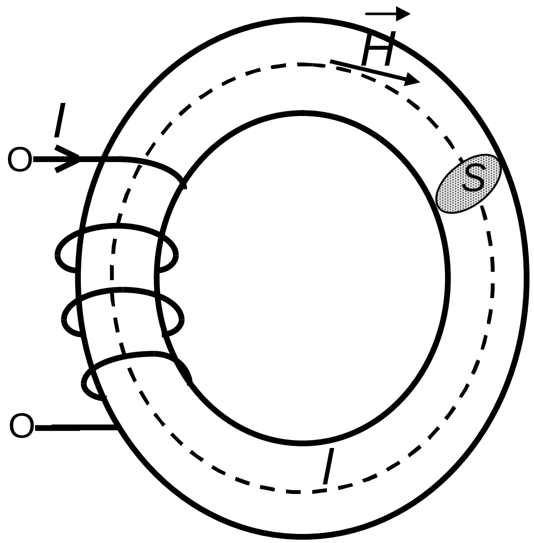
réciproquement

Si $\vec{B}$ varie les ***dimensions de l'échantillon*** varient

Allongement du ***fer*** $\Delta l = 2\,\mu$ *si* $B : 0 \rightarrow 1{,}5$ T

2. LES CIRCUITS MAGNETIQUES LINEAIRES.

2. 1. Circuit à section constante fermé sur lui-même : TORE

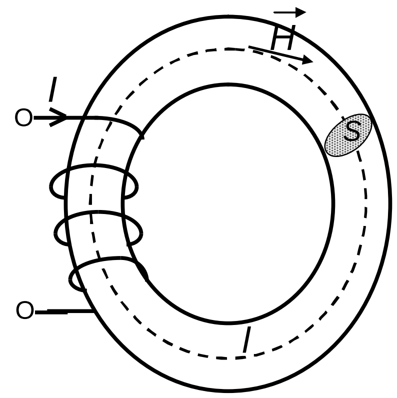


Circuit de perméabilité μ constante, de section *S* et de longueur moyenne *l*

Il est excité par un enroulement de *N* spires parcourues par un courant électrique *I* .

Toutes les lignes de champ sont canalisées dans le fer, il n'y a donc pas de fuites magnétiques.
la section S est constante, la valeur moyenne du champ, dans une section droite, est constante.

Tore à section constante



Théorème d'Ampère $H\, l = N\, I$

Equation du milieu $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Conservation du flux $\Phi = B.S$

$$\Rightarrow NI = \frac{B}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu S} l$$

On pose: $\boxed{E = N\, I}$ E : *force magnétomotrice*

On a: $\boxed{E = R\, \Phi}$ *Loi de Kapp Hopkinson*

$$R = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$$

R = *Réluctance du circuit magnétique*

Analogie *R = Résistance d'un circuit électrique*

2. 2. Circuit à section variable

Théorème d'Ampère $\int_C \vec{H} \,.\, d\vec{l} \;=\; N\,I$ soit $\int_C \frac{B}{\mu} \,.\, dl \;=\; N\,I$

Comme: $B = \frac{\Phi}{S}$ $\Rightarrow$ $\int_C \frac{\Phi}{\mu\, S} \,.\, dl \;=\; N\,I$

Φ et μ constants $\rightarrow$ $N\,I = \left[\frac{1}{\mu} \int_C \frac{dl}{S} \right] \Phi$ et $E = N\,I$

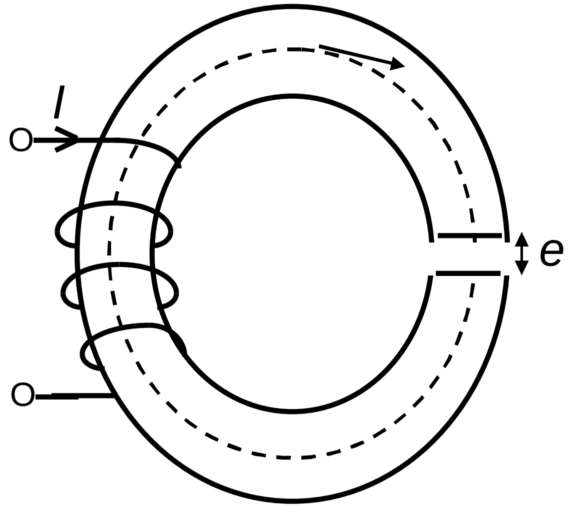
On pose:

$$\boxed{R = \frac{1}{\mu} \int_C \frac{dl}{S}}$$

R : Réluctance

On retrouve $\boxed{E = R\,\Phi}$ Loi de Kapp Hopkinson

2.3. Circuit magnétique avec un entrefer



Deux circuits ***associés en série***

- Le 1er : matériau ferromagnétique, de perméabilité μ et de longueur $l - e$

- Le 2ème par de l'air de perméabilité μ_o, d'épaisseur e (entrefer).

Equation de conservation du flux: $\Rightarrow$ $B_F\, S_F = B_a\, S_a$

si $S_F \# S_a \longrightarrow B_F \# B_a$

Théorème d'Ampère $\Rightarrow$ $H_F\,(l - e) + H_a\, e = N\, I = R\, \Phi$

Comme $H_F = \dfrac{B_F}{\mu}$ & $H_a = \dfrac{B_a}{\mu_o}$ $\longrightarrow$ $\boxed{R = \dfrac{1}{\mu}\dfrac{l - e}{S} + \dfrac{1}{\mu_o}\dfrac{e}{S}}$

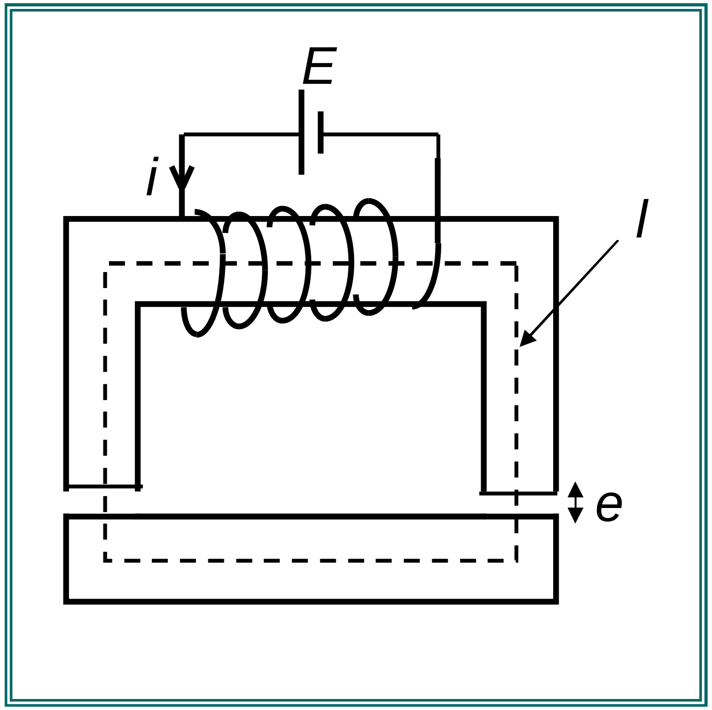
Analogie { ***Loi d'Ohm*** / ***Loi de Kapp***

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i$$ Association série

2.4. Circuit magnétique déformable: Electroaimant.

Circuit magnétique:
- un noyau, de section S, entouré de

N spires parcourues par un courant i
- une armature mobile
- et un entrefer d'épaisseur e.



But **Force d'attraction ?**

Loi d'Ohm: $E = R\,i + \dfrac{d\Phi}{dt}$

On multiplie par ***i dt*** les 2 membres

$$E\,i\,dt = R\,i^2\,dt + i\,d\Phi$$

Énergie fournie par la source	Énergie dissipée effet Joule	Énergie servant à :

- Accroitre l'En dans le fer $d\left(\dfrac{1}{2} L\, i^2\right)$
- produire du travail mécanique $F\,dx$

Avec $\Phi = L\,i$

$$i\,d\Phi = i\,d\left(L\,i\right) = d\left(\frac{1}{2} L\, i^2\right) + F\,dx$$

$$i\,d(L\,i) = d\left(\frac{1}{2}L\,i^2\right) + F\,dx$$

$$i\,\cancel{L}\,d\,i + i^2\,dL = \frac{1}{2}i^2 dL + \frac{1}{2}\cancel{L}\,2i\,di + F\,dx \Rightarrow \boxed{F = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dx}}$$

ou

$$\left.\begin{aligned} L &= \mu\frac{N^2}{l}S \\ \mathbf{R} &= \frac{1}{\mu}\frac{l}{S}\end{aligned}\right\} L = \frac{N^2}{R} \rightarrow \boxed{F = \frac{1}{2}i^2 N^2\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{R}\right)}$$

ou

avec

$$N\,i = \mathbf{R}\,\Phi \rightarrow \boxed{F = -\frac{1}{2}\Phi^2\frac{d\mathbf{R}}{dx}}$$

ou

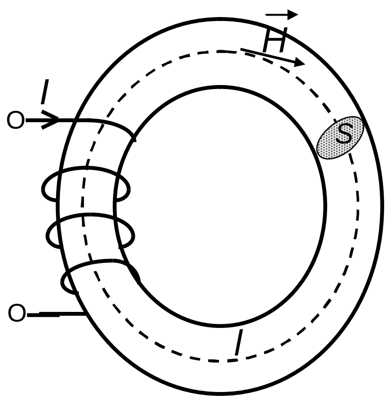
$$R = R_N + R_A + R_E$$

$$R \# R_E$$

$$\boxed{|F| = \frac{B^2 S}{2\mu_o}}$$

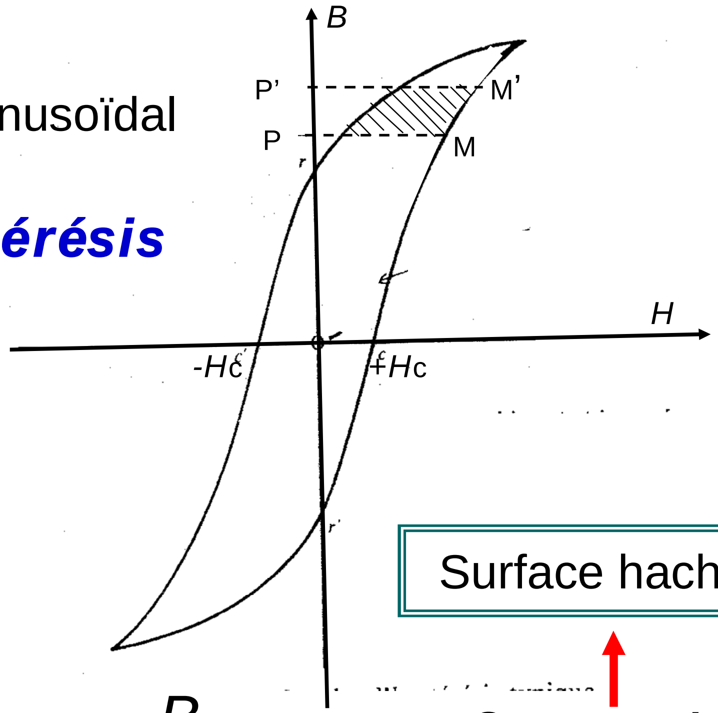
3. CIRCUITS MAGNETIQUES EN COURANT ALTERNATIF

3. 1. Pertes par hystérésis



I sinusoïdal → $\vec{H}$ sinusoïdal

$\vec{B}$ décrit ***cycle d'hystérésis***



Densité d'énergie
localisée dans le fer

$$\boxed{w = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu}}$$

Si B varie de δB → $\delta w = \frac{B}{\mu}\,\delta B$ → $\delta w = H\,\delta B$

Surface hachurée

⇒ $$\boxed{w = \oint H\,\delta B}$$

La densité d'énergie dissipée au cours d'une période est égale à la surface S du cycle

Puissance dissipée

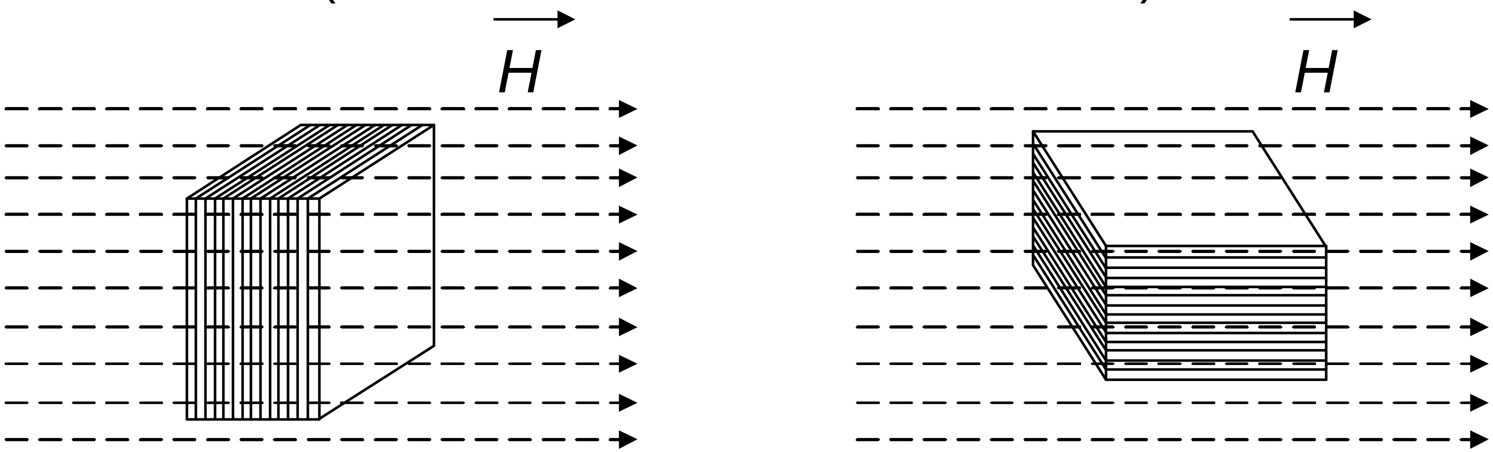
$$\boxed{P_H = S\,f\,V}$$

f fréquence en Hz

V volume en m^3

3. 2. Pertes par courants de Foucault.

Lorsqu’un conducteur subit une *excitation magnétique H variable*, des courants électriques induits, appelés *"courants de Foucault"*, prennent naissance dans la masse de ce conducteur, en vertu de la loi de Lenz (Voir le cours d’électricité de S2)



Dans les machines électriques (les transformateurs par exemple), on diminue les pertes par courants de Foucault par l’emploi de circuits magnétiques feuilletés. Les feuilles métalliques (tôles en fer doux) sont séparées les unes des autres par un vernis isolant