

Corrigé N° 14 — Semaine du 15 Décembre 2025  
**Thermique, propriétés fonctionnelles**

1. Vrai ou faux ?

- |  | Vrai                                | Faux                                |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| a. Selon le diagramme d'Ashby donné en cours, un barreau d'alliage de titane de 1m de long s'allongera de 1mm si j'élève sa température de 100°C. <i>Vrai : son coefficient de dilatation thermique est de 10 micromètres par mètre par degré K, donc il s'allongera bien de <math>10 \cdot 100 = 1000</math> micromètres, soit 1mm.</i>   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| b. Un alliage de titane à 200°C est moins dense qu'à la température ambiante. <i>Vrai : puisqu'il se dilate à masse constante, son volume augmente et donc sa densité diminue.</i>   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| c. Plus un matériau a une grande conductivité thermique, plus il y aura, en valeur absolue, un grand flux de chaleur lorsqu'il est soumis à un même gradient de température. <i>Vrai : c'est bien la définition du flux de chaleur qui est lié de façon linéaire à la conductivité thermique et au gradient de température.</i>  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| d. A l'exception de quelques matériaux comme le diamant, les céramiques et les polymères sont en général bien meilleurs conducteurs de la chaleur que les métaux. <i>Faux : les métaux conduisent la chaleur grâce aux phonons (vibration des liaisons atomiques) mais aussi, et surtout à basse température, par l'intermédiaire des électrons libres en grande concentration. Ceci leur permet d'avoir des conductivités thermiques plus importantes que les céramiques ou les polymères.</i>  | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| e. Plus la constante diélectrique d'un matériau isolant est grande, plus la charge que peut accumuler un condensateur qui contient ce matériau comme couche isolante peut être grande. <i>Vrai : voir les transparents du cours. Ceci se voit dans la formule de la capacité mais plus physiquement, plus une constante diélectrique est grande, plus la polarisation est importante. Celle-ci s'oppose au champ électrique dans le matériau imposé par le potentiel, ce qui induit une plus grande quantité de charges aux bornes du condensateur pour compenser.</i> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |

- |   | Vrai                                | Faux                                |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| f. Les métaux ont une forte conductivité électrique du fait de leur grande densité d'électrons libres, et celle-ci augmente avec la température. <i>Faux : la première partie de la phrase est vraie, mais la deuxième est fausse car la conductivité n'augmente pas avec la température, au contraire elle diminue car l'agitation thermique des atomes rend le passage des électrons plus difficile.</i>                                | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| g. Un matériau magnétique qui à un champ coercitif très grand sera considéré comme un aimant dur. <i>Vrai : c'est la définition d'un aimant dur, il est difficile à aimanter mais ensuite, il est difficile à désaimanter, et donc peut travailler comme aimant permanent.</i>  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| h. Un matériau ferroélectrique cristallise dans une structure qui n'est pas centro-symétrique, cela permet la présence d'une polarisation spontanée qui peut être inversée par l'application d'un champ électrique. <i>Vrai : ils doivent avoir une structure non symétrique pour séparer le barycentre des charges de signe opposé et permettre la présence de dipôles et donc d'une polarisation spontanée.</i>                         | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| i. La valeur de l'aimantation rémanente pour un matériau ferromagnétique permet de distinguer un aimant doux d'un aimant dur. <i>Faux : les deux types d'aimants peuvent avoir une aimantation rémanente faible ou forte, cela conduira à des énergies dissipées différentes. C'est plutôt le développement de nouveaux matériaux qui a permis d'augmenter l'aimantation rémanente et qui donne accès à des aimants plus performants.</i> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |

## 2. Isolation thermique au chalet

Vous voici enfin en vacances de Noël dans un chalet de montagne construit il y a fort longtemps, avec des planches en bois ( $k = 0.15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). La température extérieure est de  $-20^\circ\text{C}$ . Vous voudriez pour pouvoir être confortable garder la température dans le chalet à  $20^\circ\text{C}$ . Nous supposons que la paroi est d'épaisseur 5 cm, que la surface des 4 murs externes du chalet est de  $S = 80 \text{ m}^2$ , et que la chaleur peut sortir seulement par les murs (le toit est super bien isolé!).

En supposant une diffusion de chaleur à l'état stationnaire :

- Schématisez le profil de température à travers la paroi d'un des murs. Le profil de température à travers la paroi est linéaire, et varie de  $20^\circ\text{C}$  à  $-20^\circ\text{C}$  dans l'épaisseur. On va prendre le mur intérieur de la maison

comme origine de l'axe  $z$ .

- b. Calculez la perte thermique (en  $W=J/s$ ) sur la surface  $S$  du chalet (pour cela, calculez d'abord la densité de flux thermique). Le flux stationnaire  $j_i$  à travers une couche d'épaisseur  $\delta_i$  est calculé par :

$$j_i = \frac{-k_i \Delta T_i}{\delta_i}$$

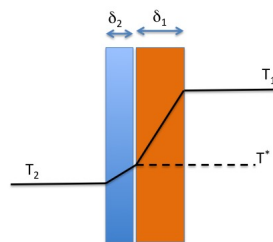
avec  $\Delta T_i$  la différence de température qui se développe à travers l'épaisseur  $\delta_i$  et  $k_i$  la conductibilité thermique du matériau considéré. La différence de température interne-externe valant  $T_{\text{out}} - T_{\text{in}} = -20 - 20 = -40$  K, on aura donc

$$j_i = \frac{-0.15 \cdot -40}{0.05} = 120 \text{ W/m}^2.$$

La perte totale est donc

$$P = j \cdot S = 120 \text{ W/m}^2 \cdot 80 \text{ m}^2 \simeq 9.6 \text{ kW}$$

- c. On cherche à réduire cette perte thermique en mettant une isolation en laine de roche ( $k = 0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), collée contre le bois (à l'intérieur du chalet). Schématisez le nouveau profil de température quand on a deux matériaux en série. Calculez l'épaisseur de laine de roche à poser pour réduire la perte thermique de moitié. Le nouveau profil de température quand on a deux matériaux en série est donné sur la figure.



Pour réduire la perte thermique de moitié, dans le cas du problème en question avec deux matériaux en série, nous avons conservation du flux (régime stationnaire) et donc  $j_1 = j_2$ , avec les indices 1,2 indiquant respectivement les deux couches. En plus, la somme des variations de

température à travers les couches est égale à la variation de température totale  $\Delta T$  :

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T$$

donc, en remplaçant avec chaque expression du flux :

$$\Delta T = j \cdot \left( \frac{-\delta_1}{k_1} + \frac{-\delta_2}{k_2} \right)$$

et donc on trouve que :

$$\delta_1 = -k_1 \left( \frac{\Delta T}{j} + \frac{\delta_2}{k_2} \right)$$

Pour réduire la perte de moitié, on fait l'application numérique avec

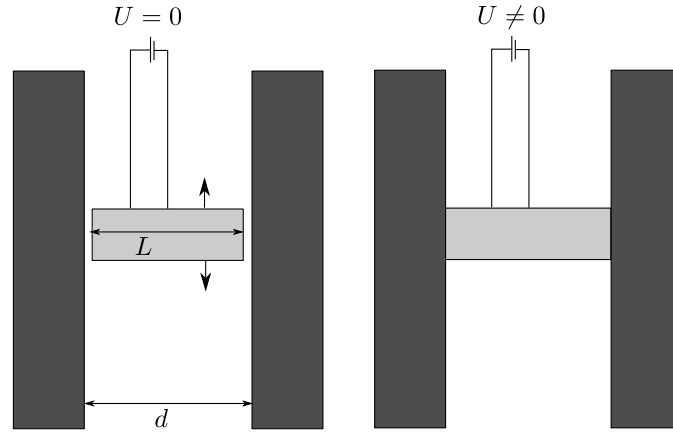
$$J_{tot} = 60 \text{W/m}^2$$

on trouve alors que l'épaisseur requise est de  $\delta_i = 0.0133 \text{ m}$ , soit environ 13mm.

- d. Sachant que le poêle à bois présent dans le chalet a une puissance maximale de 5kW, est-ce que vous allez passer des vacances confortables dans ce chalet ? Oui, on va passer des vacances confortables, pour autant qu'on aie eu le temps de mettre la laine de roche, car on sera en dessous de 5kW de pertes, et pour autant qu'il n'y ait pas d'autres pertes non prises en compte dans ce calcul très simplifié ( par exemple les fenêtres et les portes, les courants d'air, etc...).

### 3. Freinage électrothermomécanique

Un système électromécanique utilise un dispositif de freinage qui permet de faire glisser un barreau en forme de parallélépipède en alliage Cu-Be ( $\alpha = 17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $E = 200 \text{ GPa}$ ), entre deux parois rigides à température ambiante. Lorsque le passage d'un courant fait augmenter la température du barreau de  $\Delta T = 187^\circ\text{C}$  par effet Joule, celui-ci se dilate et le système est bloqué. Initialement, dans la configuration qui permet au barreau de glisser, sa longueur vaut  $L = 10 \text{ cm}$ , sa section  $S = 1 \text{ cm}^2$  (surface de contact avec les parois), une surface externe  $S_{ext} = 40 \text{ cm}^2$  et la distance entre les parois est  $d = 10.02 \text{ cm}$ .



- a. Calculez l'allongement  $L'$  que le barreau aurait avec  $\Delta T = 187^\circ\text{C}$  s'il n'y avait pas les parois. Cette variation de température induit une dilatation thermique  $\epsilon_{th}$ , qu'on obtient avec :

$$\epsilon_{th} = \alpha \Delta T = 17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 187 \text{ K} = 3.17 \times 10^{-3} \simeq 0.317\%$$

et donc un allongement de  $\Delta L = L \times 0.00317 = 317 \times 10^{-6} \text{ m} = 317 \mu\text{m}$ .  
 Et donc  $L' = 10.0317 \text{ cm}$ . A noter que  $\Delta T$  est donné dans l'énoncé en degré Centigrades, et que c'est la même chose que  $\Delta T$  en degré K, puisqu'il s'agit d'une différence de température.

- b. Le système est cependant contraint. Quelle est la contrainte de compression dans le barreau et la force qui agit sur les parois ? Pour cela, évaluez la déformation élastique dans le matériau sachant que la déformation totale est limitée par la distance entre les parois, puis estimez la contrainte résultante.

La déformation totale est donnée par :

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{th} + \epsilon_{el} = \frac{d - L}{L}$$

$$\epsilon_{el} = \frac{d - L}{L} - \alpha \Delta T = \frac{10.02 - 10}{10} - 0.00317 = 0.002 - 0.00317 = -0.00117 \simeq -0.117\%$$

La contrainte  $\sigma$  de compression vaudra alors :

$$\sigma = \epsilon E = -0.00117 \times 200 \text{ GPa} = -234 \text{ MPa}.$$

Cette contrainte résultera en deux forces, qui exercent sur les parois, de module  $|F| = \sigma S = 234 \text{ MPa} \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 23.4 \text{ kN}$ . Notez qu'on suppose que la section reste constante (on néglige le fait que le section peut aussi se dilater un peu...).

Note que l'on pourrait aussi résoudre ce problème différemment, en constatant que la déformation élastique correspond à la différence entre

la déformation thermique calculée au premier point, et la déformation imposée par les parois. Cela donne un résultat similaire :

$$\varepsilon = \frac{d - L'}{L'} = \frac{d - (L + \Delta L)}{L + \Delta L} =$$

$$\frac{10.02 \text{ cm} - 10.0317 \text{ cm}}{10.0317 \text{ cm}} = -0.00116 = -0.116\%$$

La contrainte  $\sigma$  de compression vaudra alors :

$$\sigma = \varepsilon E = -0.00116 \times 200 \text{ GPa} = -233 \text{ MPa.}$$

- c. Sachant que le coefficient de friction statique entre barreau et parois est  $\mu_s = 0.2$ , quelle masse pourrait-on suspendre au barreau une fois qu'il est bloqué, sans que celui-ci glisse ? La force calculée est perpendiculaire à la force de gravité qui agirait sur le barreau si l'on ajoute une masse  $m$ . Cette force, multipliée par le coefficient de friction statique ( $F_f = F \cdot \mu_s$ ), sera la force au delà de laquelle le barreau glisserait.

$$F_{totale} = 2 \cdot F_f = 2 \cdot \mu_s \cdot F = 9.36 \text{ kN}$$

Ce qui correspond à suspendre une masse de 936 kg.

#### 4. Trempe d'un acier

La trempe est une opération métallurgique qui consiste à tremper rapidement une pièce métallique qui a préalablement été chauffée, dans de l'eau ou un autre liquide comme de l'huile, afin de la refroidir rapidement, ce qui peut entraîner des changements de phase intéressants. Elle est par exemple utilisée depuis longtemps par les fabricants de sabres Samurais, ce qui permettait d'avoir des lames d'acier avec un tranchant très dur. Votre cousin historien s'intéresse aux techniques ancestrales des samurais (en effet, vous l'avez invité à prendre le thé dans votre chalet bien isolé...), et vous demande s'il est plus efficace de tremper le métal dans de l'huile ou dans de l'eau. Vous allez pouvoir estimer la réponse à sa question.



Pour cela, considérons donc une pièce en acier (indice "s" pour "steel") chauffée à 520°C, qui est soudainement plongée dans un bain de liquide (donnez lui l'indice "l") à température ambiante. On négligera la convection (on ne considèrera donc que la diffusion thermique dans les deux milieux) et on fait l'hypothèse d'un contact thermique parfait entre les deux milieux. Vous avez aussi trouvé les données nécessaires pour le calcul :

$$k_s = 45 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}, (\rho c_p)_s = 5 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

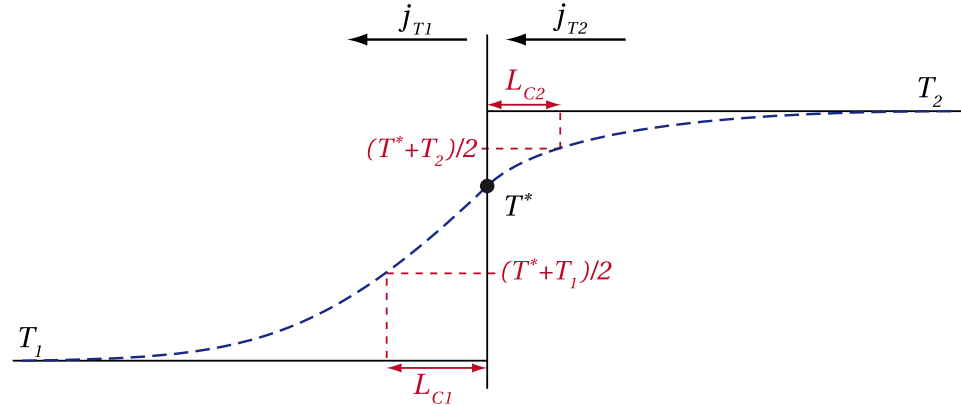
$$k_{huile} = 0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}, (\rho c_p)_{huile} = 1.8 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$k_{eau} = 0.56 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}, (\rho c_p)_{eau} = 4.18 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

- Calculez les coefficients de diffusivité thermique du métal, de l'huile et de l'eau.  $a = \frac{k}{\rho c_p}$ , donc on trouve  $a_s = 9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $a_{huile} = 0.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $a_{eau} = 0.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,
- Calculez la taille des couches limites de diffusivité thermique ( $L_c$ ) après 1 seconde, dans chacun de ces éléments (eau ou huile, métal).  $l_{ci} = \sqrt{a_i t}$ , on a donc  $l_{c.s} = 3\text{mm}$ ,  $l_{c.huile} = 0.33\text{mm}$ ,  $l_{c.eau} = 0.36\text{mm}$ .
- Calculez la température d'interface  $T^*$  entre deux corps mis en contact parfait. Ces deux "matériaux" ont respectivement une température initiale  $T_1$  et  $T_2$ , une chaleur spécifique volumique  $(\rho c_p)_1$  et  $(\rho c_p)_2$  et une conductibilité thermique  $k_1$  et  $k_2$ . On utilisera pour cela le fait que :
  - les flux de chaleur dans les deux corps à l'interface sont égaux ;
  - dans chacun des matériaux, les couches limites thermiques à un instant  $t$  ont l'épaisseur calculée précédemment. On peut donc simplifier le gradient de température ( $dT/dz$ ) par la différence entre la température d'interface  $T^*$  et la température à la position  $L_c$  (dans chaque matériau) divisée par  $L_c$ .

Ce calcul fait apparaître ce que l'on appelle l'*effusivité* d'un matériau, donnée par  $(k_i \rho_i c_{pi})^{0.5}$ . Faites ensuite l'application numérique avec les propriétés de l'acier et de l'eau. Même calcul pour l'acier et l'huile. Quel refroidissement est donc le plus efficace ?

Le schéma ci-dessous représente la situation pour laquelle on cherche à calculer  $T^*$ .



On sait que le flux de chaleur doit être le même des deux côtés de l'interface :

$$j_{T1} = j_{T2}$$

$$-k_1 \left( \frac{dT}{dz} \right)_1 = -k_2 \left( \frac{dT}{dz} \right)_2$$

Sachant que les couches limites thermiques  $L_c$  sont données ci-dessus, on peut écrire que :

$$-k_1 \frac{T^* - (T_1 + T^*)/2}{L_{c1}} = -k_2 \frac{-T^* + (T_2 + T^*)/2}{L_{c2}}$$

$$-k_1 \frac{T^* - T_1}{2L_{c1}} = -k_2 \frac{T_2 - T^*}{2L_{c2}}$$

$$-k_1 \frac{T^* - T_1}{\sqrt{a_1 t_c}} = -k_2 \frac{T_2 - T^*}{\sqrt{a_2 t_c}}$$

Si on résout cette équation pour un temps  $t_c$  quelconque, et en utilisant la relation  $a = \frac{k}{\rho c_p}$ , on obtient :

$$-(\sqrt{k\rho c_p})_1 (T^* - T_1) = -(\sqrt{k\rho c_p})_2 (T_2 - T^*)$$

On a ainsi fait apparaître l'effusivité ( $e = \sqrt{k\rho c_p}$ ) propre à chaque matériau. En réarrangeant les termes on trouve finalement :

$$T^* = \frac{e_1 T_1 + e_2 T_2}{e_1 + e_2}$$

Donc

$$T_{acier-huile}^* = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

et

$$T_{acier-eau}^* = 473 \text{ }^\circ\text{C}$$

L'eau est donc plus efficace.

- d. Question facultative pour les curieux : Pourquoi sur la photo donnée aperçoit-on un dessin un peu sinusoïdal à la surface du katana (ou sabre samouraï) ? Il s'agit d'un ligne de trempe connue sous le nom de Hamon en Japonais. Elle résulte du fait que les maîtres forgerons se sont rendus compte que l'acier trempé devient dur, mais aussi plus fragile. Pour éviter de rendre tout le katana fragile, ils protègent le dos de la lame en le recouvrant d'argile, pour ralentir le refroidissement sauf sur le fil de la lame, qui sera très dur. Et cette couverture faite à la main peut être un peu ondulée, comme on voit sur cette figure, et cela donne aussi un aspect intéressant. Pour plus d'info, les photos données ici sont tirées de <https://www.terressens.com/samourais-katanas-sabres-japonais-arts-martiaux/lexique-rapide-metallurgie-katana.aspx>.

#### 5. Bobine d'induction

Une bobine constituée de 500 spires de fil de cuivre de diamètre  $d$  ( $\rho_e = 1.7 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ ) bobinées sur 50 cm, avec un diamètre  $D$  de la bobine qui vaut 2 cm est mise sous tension de 100 V.

- a. Quel est le courant dans le fil de cuivre ? La première étape pour connaître le courant dans le fil de cuivre est de déterminer sa résistance et donc sa longueur. Pour un fil enroulé sur un cylindre :

$$L = N \cdot \pi D = 500 \cdot 3.14 \cdot 2 \times 10^{-2} \text{ m} = 31.4 \text{ m}$$

Comme donné au cours, la résistance s'obtient par :

$$R = \rho_e \frac{L}{S} = \rho_e \frac{L}{\pi d^2/4} = 1.7 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m} \frac{31.4 \text{ m}}{3.14 \cdot (1 \times 10^{-3} \text{ m})^2/4} = 0.68 \text{ } \Omega$$

Et finalement pour le courant :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100 \text{ V}}{0.68 \text{ } \Omega} = 147 \text{ A}$$

- b. Quel est le champ magnétique dans la bobine ? Pour une bobine en solénoïde, le champ magnétique est :

$$H = \frac{NI}{\ell} = \frac{500 \cdot 147 \text{ A}}{0.5 \text{ m}} = 147\,000 \text{ A m}^{-1}$$

- c. Et l'induction magnétique ? L'induction magnétique associée est :

$$B = \mu_0 H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{Vs A}^{-1} \text{m}^{-1} \cdot 1.47 \times 10^5 \text{A m}^{-1} = 1.85 \times 10^{-1} \text{Vs m}^{-2} \\ = 0.185 \text{ Tesla}$$

- d. On place maintenant un noyau de fer doux ( $\chi_M = 10\,000$ ) dans la bobine. Quelle est son aimantation ? A-t-on atteint la saturation ? Pour vous aider, utilisez les cartes d'Ashby pour estimer l'aimantation à saturation du fer.

Une fois le noyau inséré, l'aimantation se calcule en multipliant le champ magnétique par la susceptibilité magnétique :

$$M = \chi_M \cdot H = 10\,000 \cdot 147\,000 \text{A m}^{-1} = 1.47 \times 10^9 \text{A m}^{-1}$$

En vérifiant sur la carte d'Ashby du cours No 14, le fer doux a une aimantation rémanente maximale d'environ  $5 \times 10^5 \text{A m}^{-1}$ . L'aimantation rémanente  $M_R$  étant très proche de l'aimantation à saturation  $M_S$ , on constate que le champ magnétique imposé saturera donc l'aimantation qui ne dépassera pas cette valeur de  $5 \times 10^5 \text{A m}^{-1}$ .

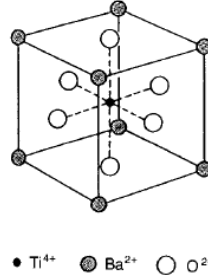
- e. Calculez le voltage qui serait suffisant pour atteindre la saturation du fer doux. Pour atteindre  $M=5 \times 10^5 \text{A m}^{-1}$ , il faut donc

$$U = \frac{MR\ell}{\chi_M N} = 0.034 \text{V}.$$

On trouve cela en posant que :  $M = \chi_M \cdot H$ , et  $H = \frac{NU}{R\ell}$ , il suffit alors d'extraire U.

## 6. Titanate de baryum

Le titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) est une céramique ferro-électrique dont la maille élémentaire est donnée ci-dessous dans sa forme non-polarisée (stable à haute température). A température ambiante, le cation  $\text{Ti}^{4+}$  quitte le centre de la maille et se déplace de  $0.25 \text{Å}$  en direction de l'un des six atomes d'oxygène. Cette rupture de symétrie dans la répartition des charges crée un dipôle électrique dans chacune des mailles élémentaires du cristal. La structure devient alors tétra-gonale avec des paramètres de maille  $a = 3.904 \text{Å}$  et  $c = 4.150 \text{Å}$  (on supposera pour les calculs que  $a = c = 4 \text{Å}$ ).



- a. Calculer le dipôle électrique associé à une maille. Dans la maille élémentaire de BaTiO<sub>3</sub>, le dipôle est créé par le déplacement d'un cation Ti<sup>4+</sup> avec une charge  $z = 4e$  sur une distance  $\delta = 0.25 \text{ \AA}$ . Le moment dipolaire correspondant est donc :

$$p = z\delta = 4e \cdot 0.25 \text{ \AA} = 1.6 \times 10^{-29} \text{ As m}$$

- b. Quelle est la polarisation à saturation de ce matériau? A saturation, tous les cations sont déplacés dans la même direction. On calcule alors la polarisation comme la densité volumique des moments dipolaires. Comme il y en a un par maille, on obtient :

$$P = \frac{p}{a_0^3} = 0.25 \text{ As/m}^2$$

- c. Quelle est la constante diélectrique (permittivité relative) du matériau si lors de la première polarisation on mesure une polarisation  $P = 0.1 \text{ As/m}^2$  pour un champ  $E = 0.7 \text{ MV/m}$ . Si l'on considère la première polarisation, décrite par la relation  $P = \varepsilon E$  avec  $\varepsilon = \varepsilon_0 \chi_e$  et  $\chi_e = \varepsilon_r - 1$ , la constante diélectrique pour  $P = 0.1 \text{ As/m}^2$  et  $E = 0.7 \times 10^6 \text{ V/m}$  vaudra :

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{P}{E} = 1 + \frac{1}{8.85 \times 10^{-12} \text{ As(Vm)}^{-1}} \times \frac{0.1 \text{ Asm}^{-2}}{0.7 \times 10^6 \text{ V/m}} = 16143$$

**7. Répondez aux questions suivantes, exercice bonus pour réviser le cours propriétés fonctionnelles**

- a. Quel type d'aimant faut-il choisir pour un transformateur? Pour quelle raison?  
L'aimant dans un transformateur est choisi de telle sorte à minimiser la perte d'énergie (sous forme de chaleur). Or, la dissipation énergétique (par unité de volume du ferromagnétique),  $e$  est calculée par :

$$e = \int BdH$$

$$= \int \mu_0(H + M)dH$$

où  $M$  est l'aimantation,  $B$  est l'induction magnétique,  $H$  le champ magnétique et  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide. Pour les matériaux ferromagnétiques utilisés dans un transformateur, l'aimantation est beaucoup plus grande que le champ magnétique,  $M \gg H$ , et l'équation ci-dessus peut être écrite comme  $e \approx \mu_0 \int MdH$ . La quantité  $\int MdH$  correspond à l'aire de la boucle d'hystérèse d'un aimant (surface grisée dans la figure ci-dessous) et la solution idéale serait d'avoir une droite au lieu d'un cycle d'hystérèse. Cette situation idéale étant impossible dans la réalité, la meilleure solution sera d'avoir un cycle d'hystérèse le plus fin possible, mais avec une bonne aimantation, c'est-à-dire avec de petites valeurs de champ coercitif et d'aimantation résiduelle. C'est par conséquent un aimant doux qui réduira la perte énergétique sous forme de chaleur.

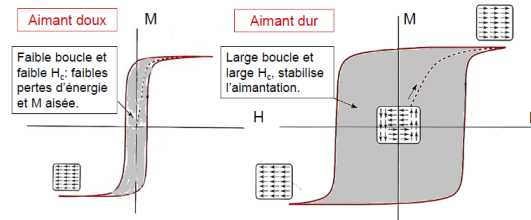


FIGURE 1 – Courbes d'hystérèse d'un aimant doux et d'un aimant dur.

- b. Essayer de proposer pourquoi la conductivité électrique d'un métal diminue-t-elle avec la présence d'éléments d'alliage en solution solide ?

Les éléments de soluté substitutionnels ont un rayon atomique et une structure électronique différents des éléments de solvant de l'alliage. Ils perturbent ainsi le mouvement des électrons et augmentent donc la résistivité électrique.

- c. Et pourquoi augmente-t-elle pour ce même alliage lorsque l'on fait un traitement de précipitation ?

La formation des précipités (par exemple  $Al_2Cu$  dans l'alliage Al-Cu ou  $Al_3Mg$  dans l'alliage Al-Mg) va enlever des éléments de soluté (Cu et Mg dans les exemples cités) en substitution dans la matrice pour les localiser dans les précipités : bien qu'ayant alors

un matériau non homogène formé de la matrice et des précipités, dont la conductibilité électrique peut être inférieure à celle de la matrice pure, leur fraction est généralement peu importante (quelques %). De ce fait, l'effet majeur est une réduction de la perturbation du mouvement des électrons dans la matrice et donc une conductibilité électrique qui augmente par rapport au cas précédent ( mais qui reste inférieure à celle du métal pur).

- d. Quelle épaisseur minimale de téflon devez-vous utiliser pour isoler électriquement un fil conducteur à 100 kV de la terre ?

L'épaisseur minimale qui garantit l'isolation est calculée comme le rapport entre la différence de potentiel  $V$  et le champ électrique disruptif du matériau, qui vaut  $60 \text{ MVm}^{-1}$  pour le téflon. On a donc :

$$\delta = \frac{V}{E_{\text{disr}}} = \frac{100 \times 10^3 \text{ V}}{60 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}} = \frac{1}{600 \text{ m}^{-1}} \simeq 1.67 \text{ mm}$$