

## Série n°13 – 22 mai 2025

## Propriétés électriques, magnétiques et optiques

## Exercice 1 :

Répondez par vrai ou faux aux questions suivantes :

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Vrai                     | Faux                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| a. Les conducteurs ont une résistivité électrique qui augmente avec la température alors que c'est l'inverse pour les semi-conducteurs.                                                                                                                                                          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b. Lorsque l'on applique une différence de potentiel à un métal, le courant électrique circule presque instantanément car les électrons libres qu'il contient ont une vitesse très élevée, proche de celle de la lumière.                                                                        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c. L'ajout d'éléments de soluté tels que l'étain dans le cuivre (bronze) diminue sa résistivité électrique.                                                                                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d. La bande de conduction d'un semi-conducteur non-dopé est toujours occupée quelle que soit la température.                                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e. Le potentiel disruptif d'un matériau isolant est la tension au-delà de laquelle un claquage a lieu dans le matériau, créant un canal de ionisation dans lequel circule un courant, de manière analogue à un éclair dans l'atmosphère.                                                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f. Un dipôle électrique est le produit d'une charge par une distance (As m), la polarisation d'un matériau correspondant à une densité de dipôles électriques (As/m <sup>2</sup> ).                                                                                                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g. La permittivité diélectrique $\epsilon_0$ et la perméabilité magnétique du vide $\mu_0$ sont liées à la vitesse de la lumière.                                                                                                                                                                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| h. Le moment magnétique d'un atome est uniquement dû au spin des électrons.                                                                                                                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| i. Un ferroélectrique pour les dipôles électriques d'un matériau est l'analogue d'un ferromagnétique pour les moments magnétiques : tous deux possèdent un cycle d'hystérèse qui dissipe de l'énergie lors d'un cycle (du champ électrique pour le premier, du champ magnétique pour le second). | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| j. Pour qu'un matériau soit ferromagnétique, il suffit que chaque atome possède un moment magnétique.                                                                                                                                                                                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| k. Le magnéton de Bohr, mesuré en Am <sup>2</sup> , est une grandeur caractéristique qui permet d'évaluer les moments magnétiques associés au spin et au mouvement orbital d'un électron.                                                                                                        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

- l. Un matériau paramagnétique peut garder son aimantation hors d'un champ magnétique. ☐ ☐
- m. Dans un domaine de Weiss d'un matériau ferromagnétique, l'aimantation est égale à l'aimantation à saturation. ☐ ☐
- n. Le rouge ayant une longueur d'onde plus grande que le bleu, le photon rouge a une énergie plus élevée que le photon bleu. ☐ ☐
- o. Le coefficient d'absorption d'un matériau transparent ou semi-transparent mesure l'intensité transmise dans le matériau divisée par l'intensité du faisceau incident. ☐ ☐
- p. L'indice de réfraction d'un matériau transparent ou semi-transparent est proportionnel à  $\epsilon_r^{1/2}$ . ☐ ☐
- q. Un métal est quasiment opaque pour un large spectre de longueurs d'onde car la bande de conduction est occupée par des électrons. ☐ ☐
- r. Une vitre est en verre car les joints de grains qu'elle contient sont très peu diffusants, la rendant ainsi transparente. ☐ ☐
- s. Le silicium est opaque à la lumière parce que son gap d'énergie entre bande de valence et bande de conduction est faible, alors que la silice ( $\text{SiO}_2$ ) a un coefficient d'absorption faible parce que son gap d'énergie est élevée. ☐ ☐
- t. Des photons peuvent induire une transition des électrons de la bande de valence à la bande de conduction d'un diélectrique quelle que soit leur fréquence, pour autant qu'ils soient suffisamment nombreux, i.e. que l'intensité soit suffisamment élevée. ☐ ☐

## Exercice 2 : Conductivité du cuivre et du bronze

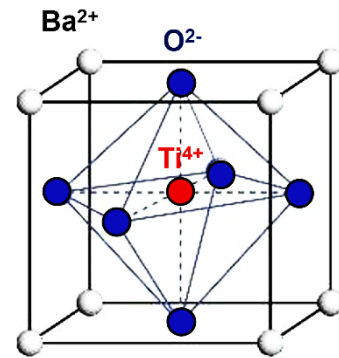
La résistivité électrique  $\rho_e$  du cuivre à température ambiante vaut  $1.7 \mu\Omega \text{ cm}$  et augmente avec la température avec un coefficient  $\alpha_{\rho_e} = \rho_e^{-1} (d\rho_e/dT) = 3.9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . On demande de calculer :

- a. le temps caractéristique  $\tau$  d'interaction des électrons libres dans le réseau des ions de cuivre, à température ambiante et à  $100^\circ\text{C}$ , sachant que chaque atome met à disposition 1 électron de conduction.
- b. la vitesse actuelle moyenne des électrons pour la densité maximum de courant admissible dans des fils de cuivre ( $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ) ?

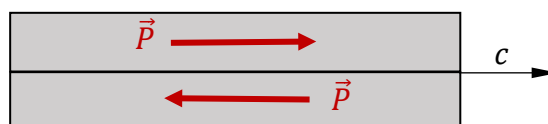
Densité du cuivre :  $8'960 \text{ kg/m}^3$ , masse molaire du cuivre :  $63.5 \text{ g/mole}$ , structure cfc.

### Exercice 3 : Titanate de baryum

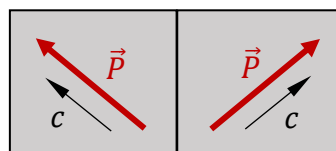
Le titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) est une céramique ferroélectrique dont la maille élémentaire est donnée ci-dessous dans sa forme cubique non-polarisée (stable au-dessus de sa température de Curie,  $120 - 130^\circ\text{C}$ ). À température ambiante, le cation  $\text{Ti}^{4+}$  quitte le centre de la maille et se déplace de  $0.25 \text{ \AA}$  en direction de l'un des atomes d'oxygène, rendant la maille tétragonale : la base carrée de la maille cubique reste la même alors que le côté perpendiculaire du cube s'allonge légèrement. Cette rupture de symétrie dans la répartition des charges crée un dipôle électrique dans chacune des mailles élémentaires du cristal, dont les paramètres de maille sont  $a = 3.904 \text{ \AA}$  et  $c = 4.150 \text{ \AA}$ .



- Quel est alors le dipôle électrique apparaissant dans chaque maille de la structure tétragonale ?
- En-dessous de sa température de Curie, quelles sont les orientations possibles que la phase tétragonale de ce matériau peut adopter à partir d'un cristal de structure cubique ? Qu'en est-il des orientations de la polarisation ?
- Dans un domaine de Weiss où les dipôles sont tous orientés de la même manière, quelle est la polarisation résultante ? Comment est reliée cette polarisation à la polarisation à saturation du matériau ?
- Deux domaines appelés « domaines à  $180^\circ$  » ont le même axe  $c$ , mais avec des polarités inversées (voir dessin). Si les domaines ont la même taille, quelle est la polarisation de l'ensemble de ces deux domaines ? Quelle est la polarisation de ces deux domaines si l'on applique un champ électrique beaucoup plus grand que le champ coercitif  $E_C$  ?



- Deux domaines ferroélectriques peuvent avoir leur polarisation à  $90^\circ$ . l'une de l'autre. Comment pouvez-vous accoler les deux mailles tétragonales de ces deux domaines pour qu'une telle situation existe ?



- A température ambiante, lorsque le cycle d'hystérèse est bien établi, on mesure un champ coercitif  $E_C \approx 2.2 \times 10^5 \text{ V/m}$ . La polarisation rémanente  $P_R \approx 0.1 \text{ As/m}^2$ . Approximez la densité d'énergie dissipée lors d'un cycle d'hystérèse en utilisant le

champ coercitif et deux approximations pour la polarisation : la polarisation rémanente et la polarisation à saturation.

#### Exercice 4 : Magnétisme

- La différence entre un aimant doux et un aimant dur est-elle liée à : (i) leur susceptibilité magnétique ; (ii) leur aimantation résiduelle ; (iii) leur champ coercitif ?
- Sachant que l'énergie associée au magnétisme est du type :

$$\Delta w_{cycle} = \int_{cycle} \vec{B} d\vec{H}$$

quelle est l'unité de  $\Delta w_{cycle}$  et que représente cette grandeur lorsque l'aimant est caractérisé par une boucle d'hystérèse ? Où passe cette énergie lors d'un cycle ?

- A l'aide des données fournies par les cartes d'Ashby, calculez la puissance dissipée dans un aimant en fer doux utilisé pour un transformateur à 50 Hz, le noyau en fer doux ayant un volume de  $10 \text{ cm}^3$  ? On assimilera la boucle d'hystérèse à un rectangle pour simplifier l'intégration.

#### Exercice 5 : Bobine d'induction

Une bobine de cuivre est constituée de 1000 spires sur une longueur de 10 cm. Le diamètre des spires est de 6 cm et la section du fil de cuivre est de  $2 \text{ mm}^2$ .

- Sachant que la résistivité du cuivre est  $\rho_e = 1.7 \mu\Omega\text{cm}$ , calculez la résistance de la bobine et la source de tension à laquelle il faut la brancher pour avoir un courant de 8 A.
- Calculez le champ magnétique  $H$  et l'induction magnétique  $B$  à vide au sein de la bobine.
- Vous placez un petit barreau de silicium ( $\chi_M = -0.41 \times 10^{-5}$ ) dans la bobine. Quels sont le champ magnétique et l'induction magnétique dans le silicium ? Quel est le type magnétique de ce matériau ? Que deviennent ces valeurs lorsque le barreau est sorti de la bobine ?
- Vous placez un petit barreau d'oxide de manganèse ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\chi_M = 1.77 \times 10^{-2}$ ) dans la bobine. Quels sont le champ magnétique et l'induction magnétique dans cet oxide ? Quel est le type magnétique de ce matériau ? Que deviennent ces valeurs lorsque le barreau est sorti de la bobine ?
- Vous placez un petit barreau d'un alliage Fe-Si dont les caractéristiques sont les suivantes :  $H_C = 20 \text{ A/m}$ ,  $M_S = 1.2 \times 10^6 \text{ A/m}$  et  $M_R = 7 \times 10^5 \text{ A/m}$ . Quel est le champ magnétique et l'induction magnétique dans ce barreau ? Quel est le type magnétique de ce matériau ?
- Vous sortez le barreau de Fe-Si de la bobine. Que deviennent l'aimantation, le champ magnétique et l'induction magnétique dans le barreau ? Et à l'extérieur du barreau ?
- Vous placez un petit barreau d'un alliage de  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  dont les caractéristiques sont les suivantes :  $H_C = 1.25 \times 10^6 \text{ A/m}$ ,  $M_S = 7.2 \times 10^5 \text{ A/m}$  et  $M_R = 5 \times 10^5 \text{ A/m}$ . Le

barreau étant supposé avoir une magnétisation initiale nulle, quel est le champ magnétique et l'induction magnétique dans ce barreau ? Pour faire le calcul lors de cette première magnétisation, faites l'hypothèse que la susceptibilité magnétique est donnée par le rapport  $M_R/H_C$ . Quel est le type magnétique de ce matériau ?

- h. Vous sortez le barreau de  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  de la bobine. Que deviennent l'aimantation, le champ magnétique et l'induction magnétique dans le barreau ? Et à l'extérieur du barreau ?