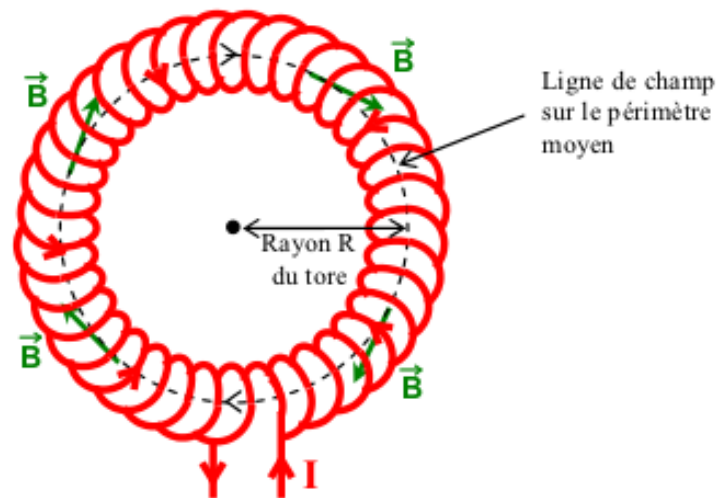


Exercice de magnétostatique : le tokamak

Le tokamak est une machine de laboratoire dont le but est de parvenir à la fusion de noyaux de Deutérium ou de Tritium (isotopes de l'Hydrogène présents dans l'eau) en Hélium. La réaction est exothermique. La fusion se produit au coeur des étoiles (on part de 4 protons pour former un noyau d'Hélium). Cependant la réaction de fusion nécessite des températures élevées pour s'amorcer (10^7 K). Dans le Soleil, cette condition est remplie au coeur de l'étoile, de façon naturelle, par le confinement gravitationnel puissant lié à la masse énorme de l'étoile (pression centrale 10^{16} Pa). Dans une machine de laboratoire, le confinement ne peut pas être gravitationnel, mais magnétique ; le Tokamak fonctionne avec une pression magnétique de 10^8 Pa et contient un gaz ionisé (plasma) de faible masse volumique (10^{-5} kg m⁻³). Le confinement magnétique est réalisé par une bobine torique (rouge) comportant N spires jointives parcourues par un courant électrique d'intensité I. Le rayon moyen du tore est noté R.



- 1) le champ magnétique est tangent à l'axe du tore. Il porte le nom de champ toroïdal. Exprimer la circulation du champ magnétique \mathbf{B} sur un contour circulaire de rayon R orienté dans le sens de la figure, en fonction de B (valeur du champ) et de R.
- 2) exprimer l'intensité totale enlacée par ce contour (c'est à dire l'intensité totale qui traverse le disque appuyé sur ce contour de rayon R) en fonction de N et de I.
- 3) déduire du théorème d'Ampère le champ magnétique B en fonction de N, I et R.
- 4) la pression magnétique interne au tore est $P = 10^8$ Pa. Sachant qu'elle dépend du champ magnétique par la relation $P = B^2 / 2\mu_0$, en déduire la valeur numérique de B.
- 6) la bobine torique possède $N = 10^4$ spires et son rayon est $R = 2$ m; en déduire la valeur de l'intensité I du courant électrique qui la parcourt.
- 7) Si la conductivité de la bobine est $\gamma = 5 \cdot 10^7$ Sm⁻¹, et que le rayon de chaque spire qui la constitue est $a = 0.50$ m, quelle est la longueur totale L du conducteur enroulé, et que vaut sa résistance $R_e = L / (\gamma S)$, $S = 100$ mm² étant la section de ce conducteur ?
- 8) Quelle serait la puissance Joule dissipée dans ce conducteur exprimée en MW pour l'intensité de la question 6 ? Cela vous semble t-il raisonnable ?

Note : pour annihiler l'effet Joule, qui détruirait l'installation par échauffement, on doit abaisser la résistance donc augmenter la conductivité du milieu. On réalise cette opération en plongeant la bobine dans une enceinte d'Hélium liquide à 4 K de température (-269°C !), de sorte que le matériau devienne supra-conducteur (c'est-à-dire que les électrons qui circulent ne rencontrent plus aucune collision, la conductivité étant proportionnelle au temps moyen entre deux collisions, qui tend vers l'infini). Un matériau en état de supra-conductivité a une résistance nulle, qui lui permet de supporter un courant permanent d'intensité très élevée.

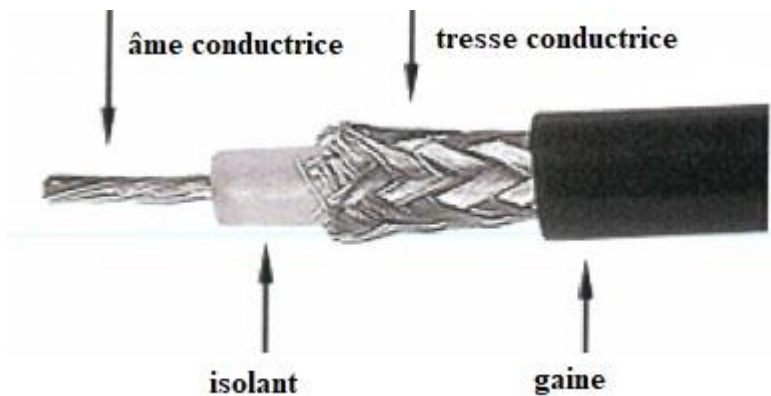
Exercice de magnétostatique : câble coaxial

On considère un câble conducteur infini et rectiligne comportant :

- une âme filiforme, infiniment mince, dans laquelle circule un courant d'intensité I
- une surface cylindrique autour de l'âme composée d'une tresse conductrice (appelée gaine), dans laquelle circule le courant de retour, dans le sens contraire ($-I$). Cette gaine a pour rayon R , elle est maintenue en général au potentiel nul (masse).

1) Rappeler comment on calcule le champ magnétique dans l'espace compris entre l'âme et la gaine ($r < R$) à l'aide du théorème d'Ampère, après avoir précisé sa direction

2) On se place maintenant dans l'espace $r > R$, donc à l'extérieur du câble coaxial. Que vaut le champ magnétique dans cette région ?



Note : il n'y a pas de champ magnétique autour du câble coaxial, il ne perturbe pas son environnement. Inversement, il ne peut y avoir aucun champ électrique à l'intérieur de la gaine car elle se comporte comme une cage de Faraday. L'âme n'est pas perturbée par l'environnement extérieur. L'utilisation des câbles coaxiaux est ainsi très fréquente.