

V.3 .0.1 Du microscopique au macroscopique.

Les effets magnétiques à l'échelle macroscopique sont dues :

- ★ A des circuits électriques parcourus par des courants. Il est nécessaire de faire circuler des forts courants sur des longs bobinages pour créer de forts champs magnétiques. Cela rend de tels dispositifs délicats à créer (effet Joule, pression magnétique...).
- ★ A l'accumulation de dipôles magnétiques. En effet, le champ magnétique total est la résultante de l'action de chaque moment magnétique (attention, c'est une somme vectorielle!). Dans le cadre de l'approximation dipolaire, on peut considérer que l'ensemble de moments magnétiques se situent approximativement au même endroit, loin de l'endroit où l'on calcule le champ magnétique. Il suffit donc de calculer le moment magnétique total en les sommant.

Lorsqu'on passe à l'échelle mésoscopique, on va définir une grandeur intensive associée au dipôle magnétique résultante (somme des dipôles du système et donc une grandeur extensive). C'est l'aimantation \vec{M} : il s'agit d'une grandeur vectorielle représentant le moment dipolaire magnétique résultante *par unité de volume*. Ainsi, dans un volume $d\tau$, le moment dipolaire magnétique résultant *overrightarrow{dm}* sera :

$$\overrightarrow{dm} = \vec{M} d\tau \quad (1)$$

.0.2 Types de milieux magnétiques

Le fait que la somme précédente soit vectorielle implique une possibilité d'avoir une aimantation nulle à l'échelle macroscopique, autrement dit un matériau non aimanté. A l'inverse si l'aimantation est non nulle, le matériau sera aimanté. Il crée alors un champ magnétique.

Partons de l'échelle microscopique. A cette échelle, les atomes et molécules possèdent un grand nombre d'électrons en orbite et leur moment magnétique se somment. Dans la plupart des atomes, les moments magnétiques résultant de tous les moments magnétiques orbitaux et intrinsèques s'annulent, il n'y a donc pas d'aimantation au repos à l'échelle microscopique comme macroscopique. A l'inverse, certains matériaux possèdent un moment magnétique résultant non nul qui peut donc créer une aimantation à l'échelle macroscopique (mais pas forcément).

En effet, même avec des dipôles magnétiques non nuls à l'échelle microscopique, deux effets s'opposent :

- ★ Si l'on impose un champ magnétique sur un dipôle magnétique, il tend à s'orienter dans le sens du champ magnétique (principe de la boussole étudié au prochain chapitre). Il vient qu'un ensemble de dipôles vont avoir tendance à s'aligner les uns avec les autres augmentant ainsi l'aimantation totale (cela minimise l'énergie potentielle totale).
- ★ L'agitation thermique tend à désordonner la matière donnant ainsi aux moments magnétiques une orientation aléatoire et donc à annuler l'aimantation.¹

On distingue alors trois cas :

- ★ Il n'y a de toute façon pas d'aimantation à l'échelle microscopique, donc pas plus à l'échelle macroscopique. On parle de matériaux **diamagnétiques**.
- ★ L'agitation thermique est trop forte et empêche l'organisation de la manière. L'aimantation au repos est alors très faible (négligeable) et le matériau n'est pas aimanté au repos. On parle de matériaux **paramagnétiques**.

1. On a déjà vu cette compétition en statique des fluides : l'étude complète d'un matériau magnétique ferait d'ailleurs apparaître un facteur de Boltzmann.

-
- ★ Les interactions dipolaires sont suffisamment fortes pour prendre le pas sur l'agitation thermique. Une aimantation permanente à grande échelle peut alors exister. On parle de matériaux **ferromagnétiques**. C'est grâce à ces matériaux qu'on crée des aimants permanents.

Cette compétition montre que si l'on augmente suffisamment la température, un matériau ferromagnétique va se désaimanter et devenir paramagnétique. C'est ce qu'on observe en pratique². L'effet est assimilable à une transition de phase. La température de transition de phase est appelée température de Curie. $T_{\text{Curie}}(\text{Fer}) = 770^\circ\text{C}$.

.0.3 Réaction à un champ magnétique extérieur

Si l'on place un matériau dans un champ magnétique extérieur (on parle d'excitation magnétique), son aimantation va réagir (à cause des forces magnétiques). L'évolution de l'aimantation va dépendre du type de matériaux :

- ★ Dans tous les matériaux, l'application d'une excitation magnétique va créer un phénomène d'induction (cf. chapitre ultérieur). Ce phénomène suit une loi de modération, c'est-à-dire que l'aimantation créée va s'opposer à l'excitation pour créer diminuer le champ total. On parle de **diamagnétisme**. Ce phénomène (création d'une aimantation opposée) est de très faible amplitude.
- ★ Dans les matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques, l'application d'une excitation magnétique tend à aligner les moments dipolaires existants dans le sens de l'excitation magnétique, augmentant le champ magnétique total. Ce phénomène est alors bien plus important que le phénomène de modération qui devient négligeable. On peut donc aimanter ces matériaux. La différence notable entre matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques est que les premiers ne gardent pas une aimantation lorsque éteint l'excitation magnétique alors que les seconds conservent une aimantation permanente (effet mémoire, on parle d'hystérésis et c'est grâce à cela qu'on crée les aimants permanents).

Question : La température de Curie du fer est au dessus de la température ambiante et pourtant de nombreux morceaux de fer ne sont pas aimantés. Pourquoi ?

.0.4 Champ magnétique terrestre

L'origine du champ magnétique terrestre est délicate à expliquer. On sait qu'il est dû aux noyaux ferreux de la Terre mais les températures énormes sont bien au-delà de la température de Curie. C'est la partie extérieure du noyau, sous forme de fer liquide qui permet, grâce aux mouvements de convection de générer le champ magnétique terrestre. On parle de dynamo auto-excité car le champ magnétique créé tend à créer des courants qui vont eux-mêmes induire un champ magnétique dans le même sens que le champ exciteur. Ce champ est primordial pour la vie sur Terre car il dévie les particules dangereuses issues du soleil. L'intensité moyenne du champ terrestre est $5 \times 10^{-5}\text{T} = 0.5\text{gauss}$.

Un modèle dipolaire pour le champ magnétique terrestre en surface est un modèle descriptif relativement correct (à 80%). Si l'on veut être plus précis, on peut procéder à un "développement multipolaire" en décrivant ce champ comme un dipôle auquel se superpose un quadripôle, auquel se superpose... À noter que la structure du champ n'est pas constante (les "pôles" se sont ainsi inversés une centaine de fois en 80 millions d'années). Au passage, le pôle Sud magnétique est à l'heure actuelle proche du pôle Nord géographique et inversement.

2. http://www.canal-u.tv/video/tele2sciences/temperature_de_curie_du_fer.8992