

## I. Le champ magnétique

### I.1. Présentation

Sans en connaître l'origine, sans en savoir le fonctionnement, nous sommes déjà familiarisés aux manifestations du champ magnétique, par exemple les petites magnettes qui permettent de maintenir une feuille sur le réfrigérateur, les petits blocs qui permettent garder fermées les portes des meubles

Il y a d'autres phénomènes :

au quotidien - Champ magnétique terrestre

- Boussole

- Téléphone

- Moteur de petites voitures

- .../...

en laboratoire - RMN (résonance magnétique nucléaire)

- Spectrographie de masse

- Accélérateur courbe de particule

- .../...

#### • Historique

Antiquité: Le début de l'électromagnétisme se situe vers 600 av. J.-C., par l'observation d'interactions entre « aimants ». Les pierres de l'*île de Magnésie* avaient d'étranges propriétés de répulsion et d'attraction, d'où le nom de magnétisme et de champ magnétique.

Moyen-âge: A la fin du moyen-âge, on voit apparaître en Europe le début de l'utilisation de la boussole: une petite aiguille aimantée, mobile autour d'un axe, qui s'oriente différemment d'un point à l'autre de la terre. La terre elle-même agit donc comme un aimant, on en déduit l'existence d'un champ magnétique terrestre.

Remarque: Les chinois naviguaient déjà à la boussole depuis au moins le XI<sup>e</sup> siècle.

### I.2. Sources de champ magnétique

#### I.2.1. Action d'un aimant sur une charge

##### • Charges immobiles

Si on approche un aimant d'une charge immobile rien ne se passe.  
Le champ magnétique n'a pas d'action sur les charges immobiles

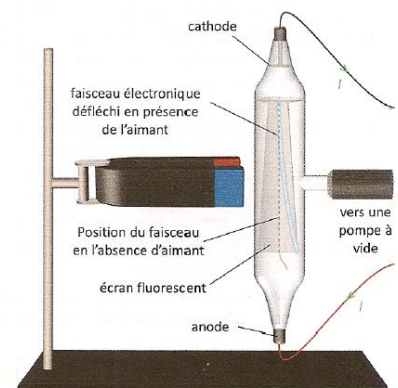
##### • Charges mobiles

Soit un faisceau d'électrons dans un tube cathodique

1. On observe à l'écran l'impact des électrons

2. On approche un aimant sur le côté du tube, on observe un déplacement de l'impact vers le haut.

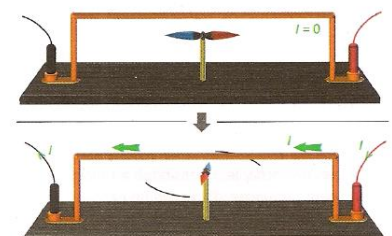
3. On approche le même aimant mais en changeant la face présentée, on observe un déplacement de l'impact vers le bas.



#### I.2.2. Action d'un courant sur un aimant

En 1820, Oersted observe par hasard qu'une boussole est déviée à proximité d'un fil parcouru par un courant  $I$ .

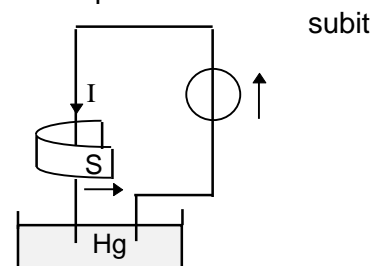
L'action d'un courant sur un aimant est analogue à l'action d'un autre aimant.



### I.2.3. Action d'un aimant sur un courant ou d'un courant sur un autre courant

Puis Ampère, Laplace, Biot et Savart ont poursuivi l'étude et dégagent les lois du phénomène.

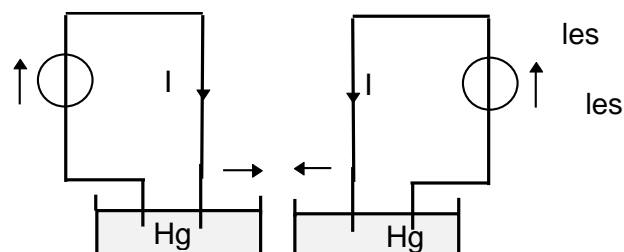
- Un fil parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique (lorsque cela est possible) un déplacement perpendiculaire au champ magnétique et au conducteur.



- Deux fils parcourus tous deux par des courants sont aussi en interaction.

→ Les deux courants sont dans le même sens, deux fils ont tendance à se rapprocher.

→ Les deux courants sont en sens inverses, deux fils ont tendance à s'éloigner.



**Conclusion** : Les courants et les aimants modifient les propriétés de l'espace. Ce sont les sources de champ magnétique. (Les aimants peuvent être considérés comme parcourus par des courants microscopiques).

### I.3. Unités et ordres de grandeur

- Unités du champ magnétique

Relations connues :  $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = m\vec{a}$

$MLT^{-2} = A \cdot TL \cdot T^{-1} [B]$

$[B] = M \cdot T^{-2} \cdot A^{-1}$

Ainsi 1 Tesla correspond à  $1 kg \cdot s^{-2} A^{-1}$

- Ordre de grandeur

Champ magnétique créé par une spire simple	$\approx 1 \mu T$
Champ magnétique terrestre	$\approx 50 \mu T$
Champ magnétique créé par aimant permanent usuel	$\approx 10 mT$
Champ magnétique créé par bobine utilisée en TP	$\approx 10 mT$
Champ magnétique utilisé en imagerie IRM	$\approx 10 T$
Champs magnétiques les plus intenses créés par des bobines supraconductrices	$\approx 50 T$

## II. Champ scalaire et champ vectoriel

### II.1. Définitions

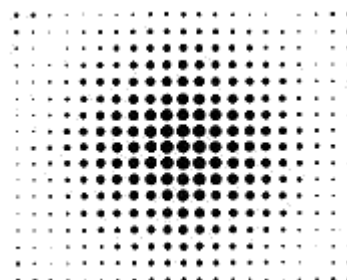
Soit  $\mathcal{D}$  une région de l'espace physique à 3 dimensions.

A chaque point M de  $\mathcal{D}$  on associe une grandeur scalaire ou vectorielle  $G(M)$ :

Champ :  $\forall M \in \mathcal{D}, M \rightarrow G(M)$

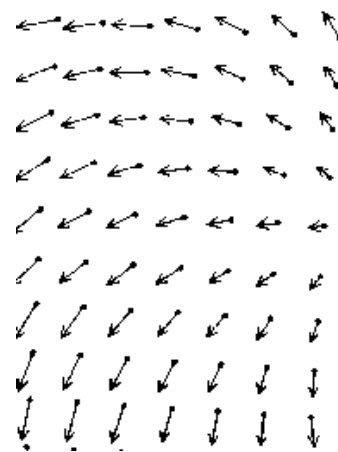
Si  $G(M)$  est un scalaire on a ainsi défini un champ scalaire.

Exemples : la pression atmosphérique, la température dans une zone donnée de l'espace...



Si  $G(M)$  est un vecteur on a ainsi défini **un champ vectoriel**.

Exemples : champ de pesanteur terrestre, champ des vitesses d'un solide



La définition d'un champ exige que l'on précise les limites de l'espace concerné ainsi que la valeur de la grandeur  $G$  à ces limites (conditions aux limites).

## II.2. Champ uniforme-Champ stationnaire

Soit  $G(M,t)$ , la valeur prise par le champ en  $M(\vec{r})$  à l'instant  $t$ .

**Champ uniforme** : si à  $t$  donné,  $G(M,t)$  a la même valeur en tout point  $M(x,y,z)$  de  $\mathcal{D}$ .

*Ce qui traduit la non-dépendance en variables d'espace*

**Champ stationnaire** : si en un point  $M$  donné,  $G(M,t)$  a la même valeur à tout instant  $t$ .

*Ce qui traduit la non-dépendance en variable temps*

On dit aussi champ constant ou permanent.

## II.3. Lignes de champ

Soit  $\vec{a}(M)$  un champ de vecteurs.

**Ligne de champ** c'est une courbe orientée tangente en chaque point  $M$  au vecteur  $\vec{a}(M)$

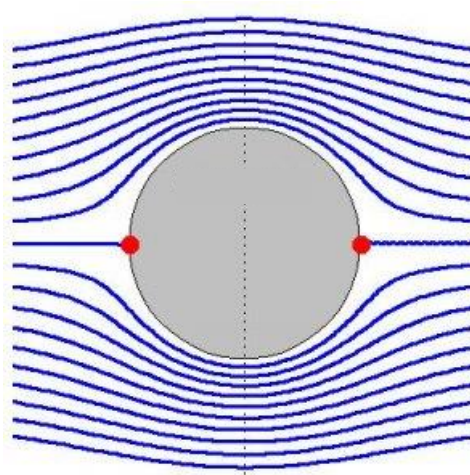
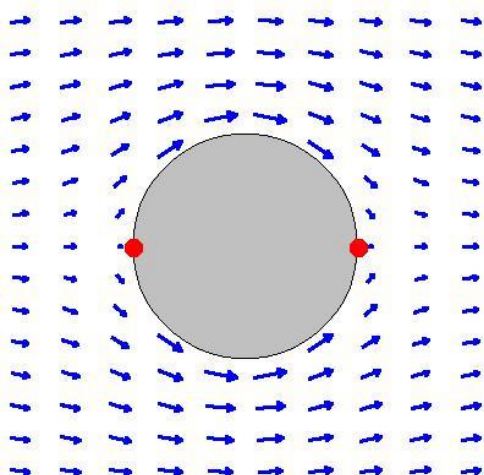
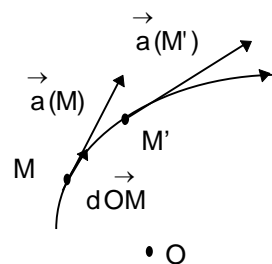
Soit  $M$  un point d'une ligne de champ et  $O$  l'origine du repère choisi :

$$d\vec{OM} = k\vec{a}(M) \text{ ou encore } d\vec{OM} \wedge \vec{a}(M) = \vec{0};$$

En coordonnées cartésiennes l'équation des lignes de champ est obtenue à partir de :

$$d\vec{OM} = k\vec{a}(M) \Rightarrow k = \frac{dx}{a_x} = \frac{dy}{a_y} = \frac{dz}{a_z} \text{ (on identifie les composantes des deux vecteurs)}$$

Ligne de champ = courbe orientée en chaque point  $M$  par  $\vec{a}(M)$ .



### III. Quelques cartes de champ magnétique

#### III.1. Topologie du champ magnétique

- Obtention expérimentale d'une carte de champ

On peut tracer les lignes d'un champ magnétique grâce à de la limaille de fer dont chaque petit grain constitue une aiguille aimantée.



On pose sur un barreau aimanté une plaque de plexiglass sur lequel on saupoudre la limaille



Un aimant droit longueur 6 cm et diamètre 1 cm, entouré de limaille dans une éprouvette à gaz d'huile ; l'aimant est retenu par une collerette de matière plastique trouée, de même diamètre que celui de l'éprouvette soit 38 mm

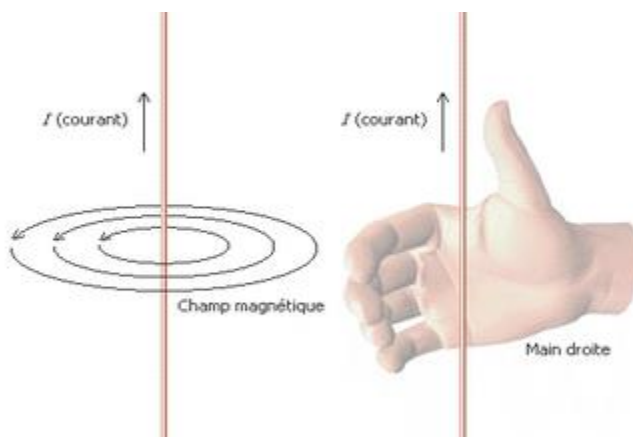
- Propriétés

On admet ici deux propriétés importantes qui sont illustrées par les exemples qui suivent.

→ Première propriété

Les lignes de champs magnétiques sont dans la plus part des cas des courbes fermées qui s'enroulent autour des courants électriques qui créent le champ magnétique.

L'orientation de la ligne de champ et le sens du courant sont liés par la règle de la main droite : si on met le pouce en direction du courant les doigts de la main droite tournent dans le sens de la ligne de champ et inversement.





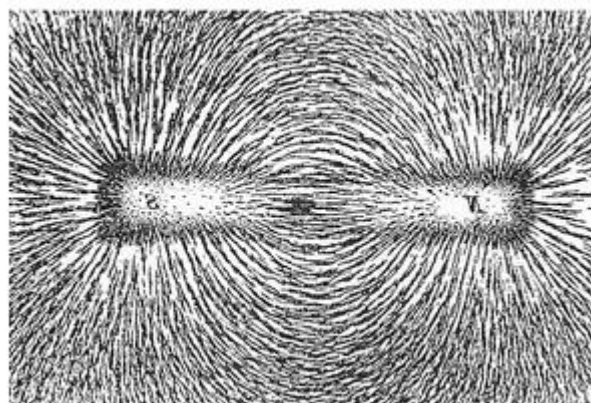
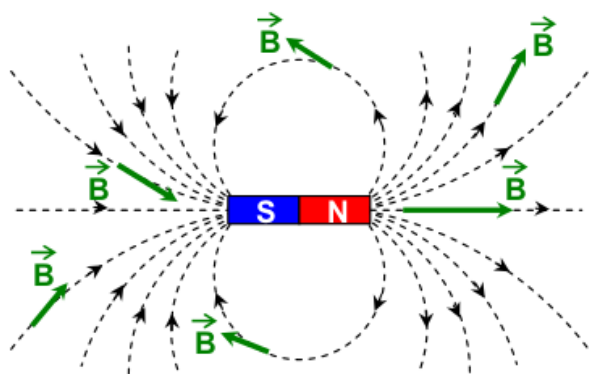
### → Deuxième propriété

Sur une carte de ligne de champ magnétique, le champ magnétique est le plus intense là où les lignes de champ se resserrent.

Les zones les plus actives d'un aimant sont appelées ses pôles (nord et sud). Deux pôles de même nature se repoussent, deux corps de nature différente s'attirent.

### III.2. Champ créé par un aimant droit

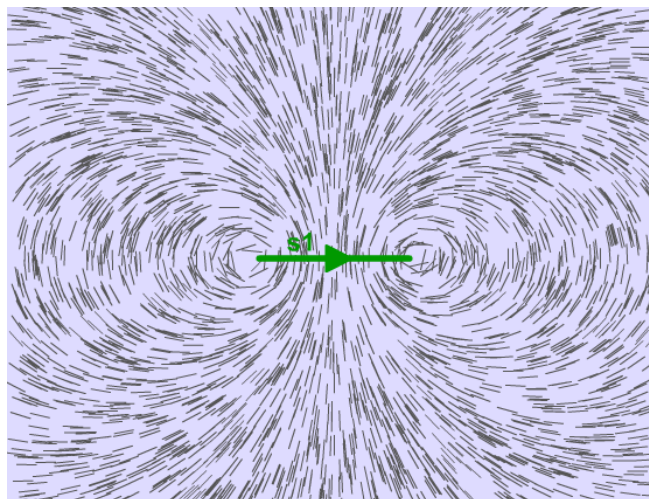
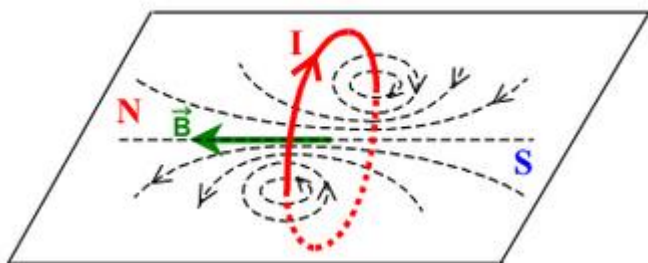
Sur le dessin de gauche, on a représenté le champ magnétique à l'aide de lignes de champ. Leur espacement révèle l'intensité relative du champ magnétique. De plus, ce sont des lignes qui s'orientent toujours du pôle nord vers le pôle sud.

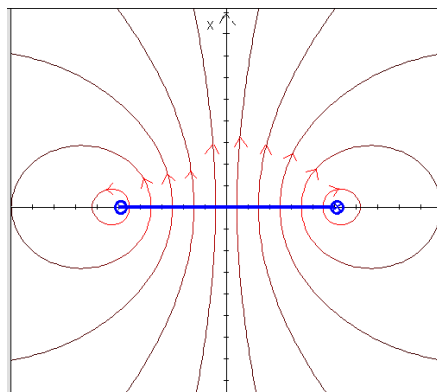


### III.3. Champ créé par une spire circulaire

- Modèle : spire = cercle de centre O et de rayon a parcouru par un courant I. On oriente l'axe de la spire par la règle de la main droite.

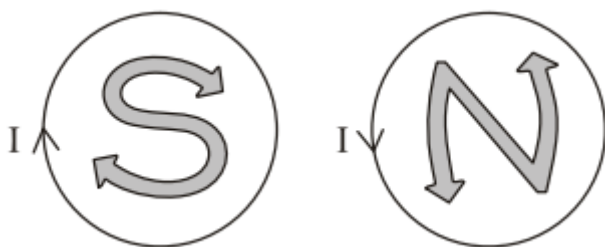
On examine les lignes de champ créées par le circuit le plus simple : une spire circulaire parcourue par un courant d'intensité constante dû à un générateur non représenté.





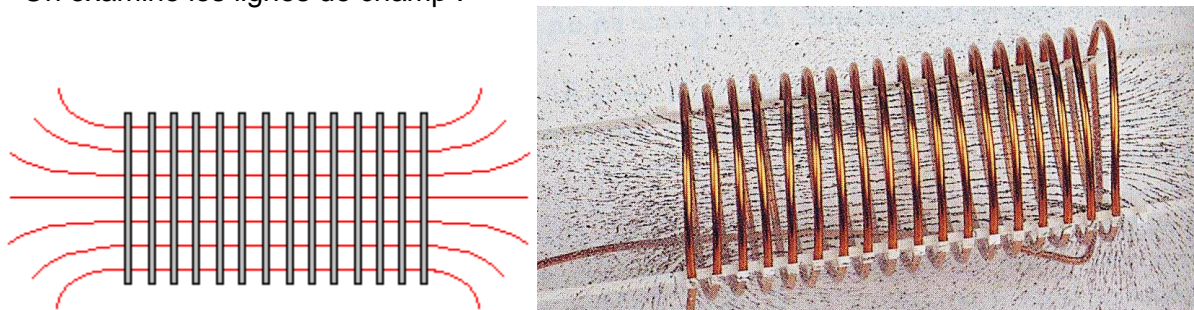
#### • Observations

- Le champ magnétique n'est pas uniforme, les lignes de champ sont resserrées sur la surface de la spire, où le champ est le plus intense.
  - Les lignes de champ s'enroulent autour du courant et sont orientées selon la règle de la main droite. Les doigts de la main droite s'enroulent dans le sens du courant autour de la spire le pouce ouvert indique l'orientation de la ligne de champ.
  - La norme du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant.
- Application numérique:  $a = 10 \text{ cm}$  ;  $I = 10 \text{ A}$ , le champ magnétique est maximal au centre de la spire  
 $B_{\text{max}} \approx 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  ordre de grandeur de celui du champ terrestre.
- Les lignes de champ traversent la spire dans le sens sud nord.

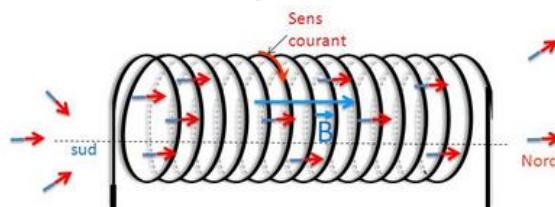


### III.4. Champ créé par une bobine longue

- On appelle solénoïde un fil enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine longue. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant, il crée des effets magnétiques analogues à ceux créés par un aimant droit : le solénoïde parcouru par un courant est une source de champ magnétique.
- On examine les lignes de champ :



- Méthode pour déterminer le sens du vecteur champ magnétique :  
 Le vecteur champ magnétique sort toujours par la face ou pôle Nord de la source de champ magnétique. En empoignant la bobine avec la main droite, dans le sens du courant, on écarte le pouce des autres doigts de la main ; le pouce ainsi écarté indique la face Nord, autrement dit la face par laquelle sort le vecteur champ magnétique.



- Intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde :

Activité : Faire les activités demandées sur l'animation proposée sur le site de la classe.

On considère un fil bobiné à spires jointives sur un cylindre (solénoïde).

On remarque que le champ magnétique est quasi-uniforme à l'intérieur de la bobine, les lignes de champ restent parallèles sans se resserrer ni s'éloigner.

Pour un solénoïde très long ( $L/R > 10$ ), bobiné avec  $n$  spires par unité de longueur, parcourues par un courant d'intensité  $I$ , on montre que l'induction magnétique à l'intérieur est pratiquement uniforme et que son intensité est donnée par la relation

$$B = \mu_0 n I$$

$n$  est le nombre de spires par unité de longueur ; si le solénoïde a une longueur  $L$  et est constitué de  $N$  spires (boucle) alors,  $n = N/L$

La constante  $\mu_0$  est la perméabilité du milieu dans lequel baigne le solénoïde. Dans le vide elle vaut:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ .

La formule est valable partout sauf tout près des extrémités des enroulements

Application numérique :  $n = 1000 \text{ spires/m}$   $I = 1 \text{ A}$  alors  $B = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ .

## IV. Le moment magnétique

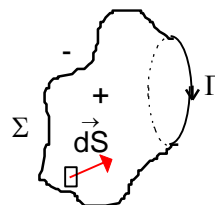
### IV.1. Vecteur surface

- Soit  $\Sigma$  une surface s'appuyant sur un contour fermé  $\Gamma$ . Le sens de la normale en un point  $M$  de la surface est lié de façon conventionnelle au sens de circulation positif sur le contour.

#### Règles pratiques

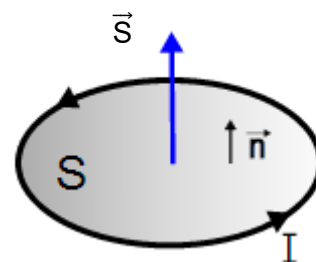
➤ « **Le tirebouchon de Maxwell** » On fait tourner le tirebouchon dans le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ . Le sens de translation du tirebouchon donne le sens de la normale positive.

➤ « **La règle de la main droite** » Les doigts de la main droite épousent le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ , le pouce ouvert donne le sens de la normale positive.



- Vecteur élément de surface : Soit  $M$  un point de  $\Sigma$  entouré d'un élément de surface  $dS$  :  $\vec{dS} = dS \vec{n}$  avec  $\vec{n}$  normale positive.

Dans le cas d'une spire de courant c'est le sens de parcours du courant qui donne l'orientation de la spire et donc le sens du vecteur de surface.



### IV.2. Le moment magnétique

Un dipôle magnétique est une boucle de courant de petite dimension, dont on étudie les effets à grande distance (par rapport aux dimensions de la boucle). Leur importance théorique est considérable pour un grand nombre de raisons :

- Un circuit localisé se comporte comme un dipôle magnétique pour tous les effets à grande distance.
- On n'a jamais pu mettre en évidence des charges magnétiques, qui seraient le pendant des charges électriques. Les sources ultimes du magnétisme de la matière sont les dipôles magnétiques correspondant aux petites boucles de courant dues aux électrons orbitant autour des noyaux.
- Les particules élémentaires, habituellement considérées comme des points matériels (électron, proton, neutron), portent en général un moment magnétique. Le champ magnétique créé par ces particules est celui d'un dipôle magnétique ponctuel.
- Enfin, un dipôle magnétique sert de base à la description du champ magnétique terrestre.

Soit une boucle parcourue par un courant d'intensité  $I$  constante.

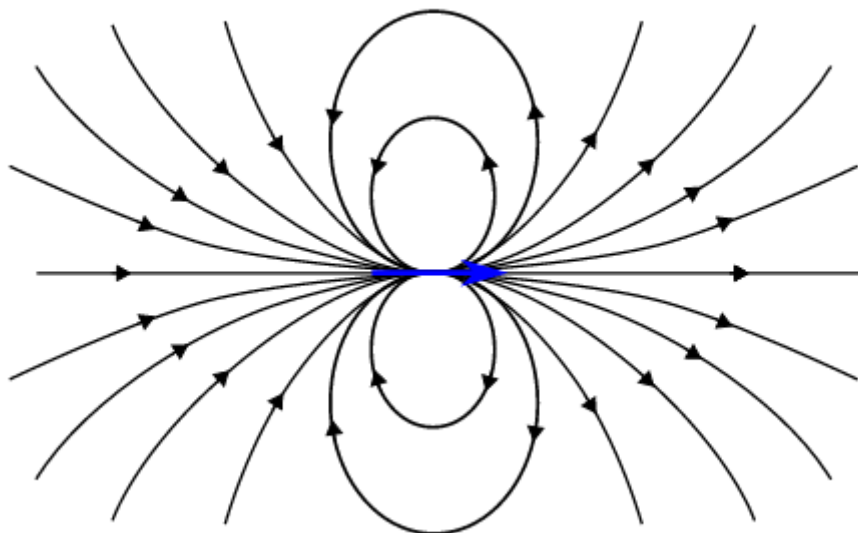
Si cette distribution de courant est étudiée à grande distance (la distance séparant  $M$  de la distribution est grande devant les dimensions caractéristiques de celle-ci) alors elle constitue un dipôle magnétique caractérisé par son moment magnétique noté  $\vec{m}$  définie par

$$\vec{m} = I\vec{S}$$

$m$  s'exprime en  $A.m^2$ .

### IV.3. Les lignes de champ d'un moment magnétique

Un moment magnétique représente tout aussi bien une boucle de courant qu'un aimant. Il présente de manière unifié le champ magnétique créé à grande distance.

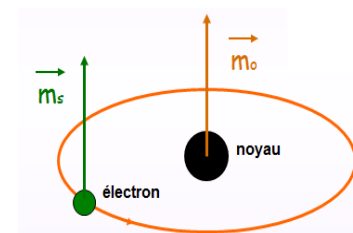


### IV.4. La matière et le magnétisme

- Au niveau atomique :

- un électron tournant autour du noyau crée un moment magnétique orbital:  $\vec{m}_o$
- un électron tournant sur lui-même (spin) crée un moment magnétique de spin :  $\vec{m}_s$

Le moment magnétique (atomique)  $\vec{m}$  tient compte des deux contributions:



- Tous les atomes ont-ils un moment magnétique ?

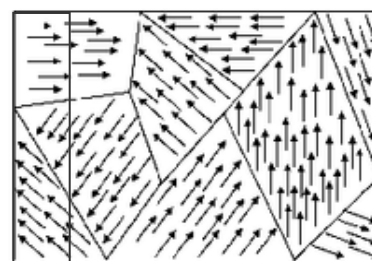
Non pas tous, il est nécessaire d'avoir des couches non saturées : les gaz rares sont donc exclus. En effet, pour simplifier, les  $e^-$  se regroupent par paires de spins opposés et lorsque la couche est complète les moments magnétiques s'annulent 2 à 2.

Si les atomes possèdent des couches incomplètes alors ils possèdent un moment magnétique atomique.

Le remplissage des couches électroniques devient complexe après les 18 premiers éléments et en particulier pour les métaux de transition: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu ... Ils possèdent des couches incomplètes.

- Les matériaux ferromagnétiques

Lorsque l'on regarde, au niveau microscopique la structure de la matière d'un matériau ferromagnétique, on remarque l'existence de petits domaines d'aimantation homogène c'est à dire des lieux où les moments atomiques « jouent » collectifs, ils sont orientés dans une même direction. On appelle ces domaines les domaines de Weiss. Pierre Weiss (1865-1940) , physicien, membre de l'académie des sciences .

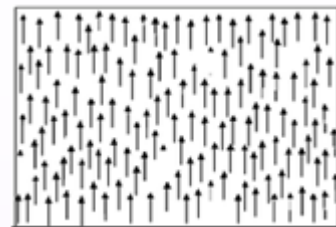




→ L'aimant droit :

C'est un aimant permanent: un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un état très ordonné des moments magnétiques atomiques. Le moment magnétique permanent macroscopique:

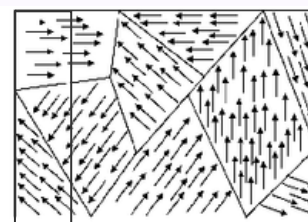
$$\vec{m} = \sum \vec{m}_{atomiques} \text{ (qui sont tous parallèles)}$$



→ Le clou

C'est un corps ferromagnétique qui peut s'aimanter.

$$\text{Le moment magnétique macroscopique: } \vec{m} = \sum \vec{m}_{atomiques} = \vec{0}$$



Si l'aimant s'approche du clou, il « excite » le clou:

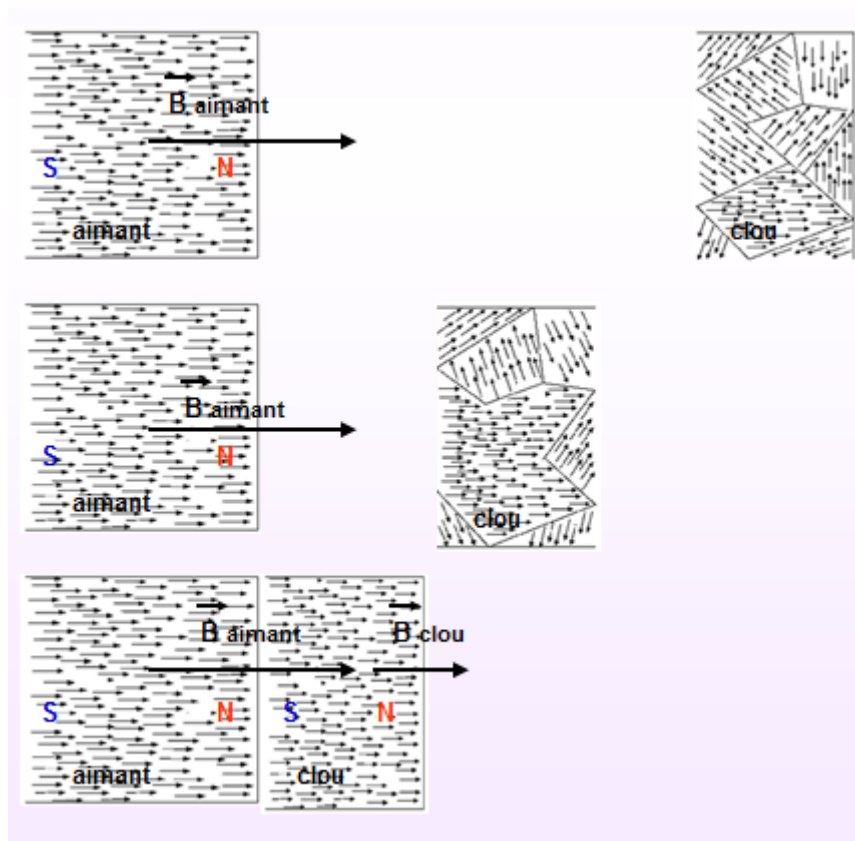
Le champ magnétique produit par l'aimant devient une excitation magnétique.

Les moments magnétiques des atomes du clou s'ordonnent

parallèlement à l'excitation magnétique. Le clou s'aimante, il produit alors lui aussi son propre champ magnétique.

Des pôles nord et sud sont apparus sur le clou, il y a attraction.

Au final, le champ magnétique créé par l'ensemble est la somme vectorielle des deux champs.



#### IV.5. Ordres de grandeur

Au niveau atomique ou nucléaire, les moments magnétiques sont quantifiés par :

- le magnéton de Bohr  $m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$  correspondant au moment magnétique de l'électron,
- le magnéton de nucléaire  $m_{BN} = 5.05 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$  correspondant au moment magnétique du proton.

Le moment magnétique d'un aimant dépend de sa taille. L'ordre de grandeur magnétique d'un aimant usuel est d'environ  $10 \text{ A.m}^2$ , le moment magnétique de la Terre vaut  $7.9 \cdot 10^{22} \text{ A.m}^2$

<u>I. Le champ magnétique</u> .....	<u>1</u>
<u>I.1. Présentation</u> .....	<u>1</u>
<u>I.2. Sources de champ magnétique</u> .....	<u>1</u>
I.2.1. Action d'un aimant sur une charge .....	1
I.2.2. Action d'un courant sur un aimant .....	1
I.2.3. Action d'un aimant sur un courant ou d'un courant sur un autre courant.....	2
<u>I.3. Unités et ordres de grandeur</u> .....	<u>2</u>
<u>II. Champ scalaire et champ vectoriel</u> .....	<u>2</u>
<u>II.1. Définitions</u> .....	<u>2</u>
<u>II.2. Champ uniforme-Champ stationnaire</u> .....	<u>3</u>
<u>II.3. Lignes de champ</u> .....	<u>3</u>
<u>III. Quelques cartes de champ magnétique</u> .....	<u>4</u>
<u>III.1. Topologie du champ magnétique</u> .....	<u>4</u>
<u>III.2. Champ créé par un aimant droit</u> .....	<u>5</u>
<u>III.3. Champ créé par une spire circulaire</u> .....	<u>5</u>
<u>III.4. Champ créé par une bobine longue</u> .....	<u>6</u>
<u>IV. Le moment magnétique</u> .....	<u>7</u>
<u>IV.1. Vecteur surface</u> .....	<u>7</u>
<u>IV.2. Le moment magnétique</u> .....	<u>7</u>
<u>IV.3. Les lignes de champ d'un moment magnétique</u> .....	<u>8</u>
<u>IV.4. La matière et le magnétisme</u> .....	<u>8</u>
<u>IV.5. Ordres de grandeur</u> .....	<u>9</u>