

I1

Champ magnétique

Partie I

Source de champ magnétique

1 Un champ vectoriel

a) Détection avec une boussole

Les phénomènes magnétiques sont connus depuis très longtemps. On a constaté, dès l'antiquité, que le fer exerce une attraction sur un minéral naturel, la « pierre d'aimant » ou magnétite (Fe_3O_4). Un aimant libre à la surface de la terre s'oriente dans une direction privilégiée, d'où l'utilisation très ancienne des boussoles et de la dénomination Nord et Sud des pôles terrestres (voisin des pôles magnétiques).

Le champ magnétique est orienté du Sud vers le Nord (Rouge) de l'aiguille aimantée. Le champ magnétique « sort » donc du pôle Nord de l'aimant droit. Mais un circuit parcouru par un courant peut aussi agir sur une boussole (cf. figure 1.1).

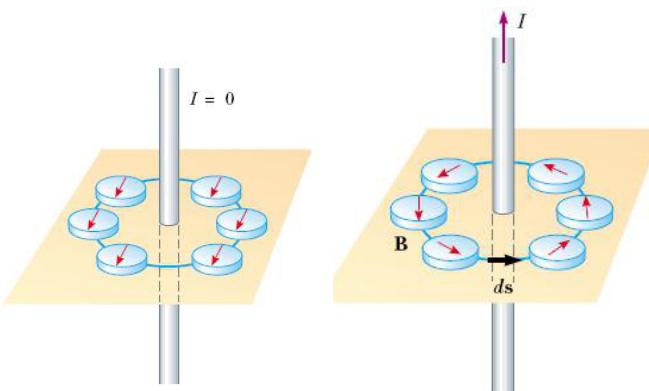


Figure 1.1 – Action d'un champ créé par un aimant (à gauche), mais aussi de celui créé par un fil parcouru par un courant (à droite). Lorsqu'il n'y a pas de courant, les boussoles s'orientent en direction du champ magnétique terrestre.

b) Définition en un point

En chaque point de l'espace, on peut ainsi définir un vecteur champ magnétique en ce point. On parle alors de champ vectoriel \vec{B} (M).

Néanmoins la boussole est un détecteur qui ne donne que grossièrement la direction et le sens du vecteur \vec{B} (M) du fait de sa taille trop importante. Une boussole n'est de toutes façons pas adaptée pour la détermination de la norme de \vec{B} (M).

2 Capteurs de champ magnétique

a) Cas d'un champ statique

Capteur à effet Hall On appelle effet Hall l'apparition d'un champ électrique transversal et, par suite, d'une différence de potentiel dans un métal ou un semi-conducteur parcouru par un courant électrique lorsqu'on l'introduit dans un champ magnétique. Concrètement une sonde à effet Hall se présente comme une plaquette dont on mesure la différence de potentiel entre les faces opposées. Cette tension est proportionnelle à la composante du champ magnétique orthogonale à la plaquette semi-conductrice (cf. figure 1.2).

SCHEMA

La réponse du capteur est maximale si le champ magnétique $\vec{B}(M)$ est orienté perpendiculairement à la surface du capteur. Le signe de la tension indique le sens du vecteur $\vec{B}(M)$. Pour mesurer les composantes de $\vec{B}(M)$, il faudrait donc trois plaquettes perpendiculaires deux à deux (ou réaliser trois mesures successives en changeant l'orientation de la plaquette).

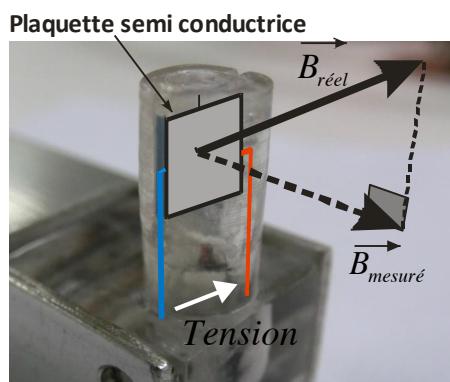


Figure 1.2 – Capteur à effet Hall. Seule la composante orthogonale à la place semi-conductrice peut être mesurée : il faut donc toujours vérifier l'orientation du « bitoniu » orientable à l'avant du capteur.

SQUID, Superconducting QuantUm Interference Device Le squid est un système électronique qui utilise un anneau supraconducteur dans lequel on a inséré une ou deux petites tranches isolantes (cf. figure 1.3). Il est sensible à la composante du champ magnétique perpendiculaire à la surface de l'anneau. Il permet ainsi une mesure fine du champ magnétique au voisinage d'un point :

- Par sa sensibilité : un SQUID est capable de détecter un champ de l'ordre de 10^{-15} T.
- Par sa taille (ici : 1 μm) il permet de dresser une cartographie spatiale précise.

Ce dispositif basé sur l'effet Josephson dans le sandwich supra-isolant-supra et sur la quantification du flux dans l'anneau le rend ultra-sensible à tout champ magnétique. Les squids sont ainsi les systèmes les plus performants pour mesurer très précisément les champs magnétiques, même ceux qui sont très très faibles. Par exemple, les squids sont suffisamment sensibles pour mesurer l'activité magnétique d'un cerveau humain en temps réel, permettant des études très fines de magnétoencéphalographie.

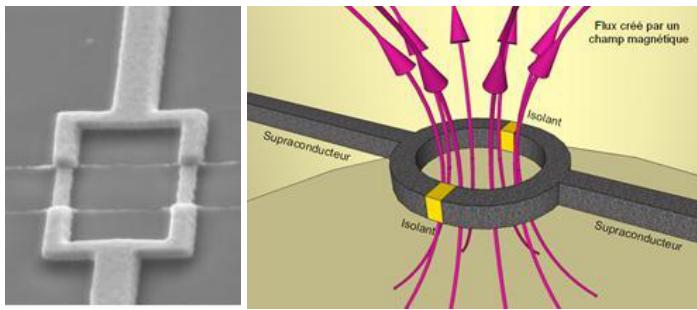


Figure 1.3 – Capteur SQUID réel (à gauche, taille de l'ordre du micromètre) et schématisé (à droite)

b) Cas d'un champ variable

Pour mesurer un champ magnétique variable dans le temps, il peut être judicieux d'utiliser une bobine aux bornes de laquelle on mesure une tension. Celle-ci dépend de la direction du champ magnétique, de sa norme mais aussi de la vitesse de changement du champ magnétique (voir chapitre 13 de l'induction).

3 Sources de champ magnétique

a) Aimants

Le ferromagnétisme est la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (les aimants, matériaux magnétiques durs) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur. Exemples : Fer, Nickel, Cobalt.

Voici deux très bonnes vidéos de MinutesPhysics et Veritasium sur le sujet :

<https://www.youtube.com/watch?v=hFA0XdXZ5TM>

et

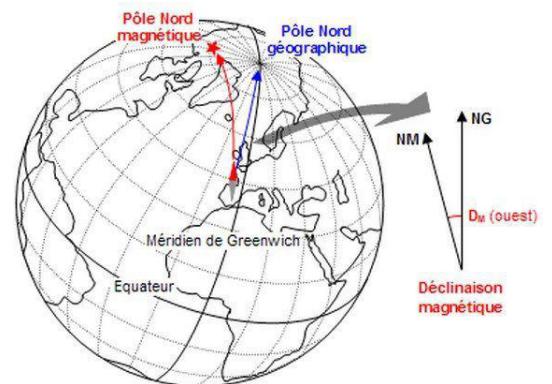
<https://www.youtube.com/watch?v=1TKSfAkWWNO>

? Le saviez-vous ?

À la question « pourquoi du magnétisme ? », Langevin répondait simplement : parce que les atomes eux-mêmes sont de minuscules aimants ! Cette réponse a également inspiré le jeune Otto Stern : « Les molécules sont des aimants ? Excellent ! J'ai une idée pour les manipuler. » Avec sa technique de faisceaux moléculaires, Stern est parvenu, pour la toute première fois, à mesurer les vitesses des molécules. Mais si Stern a obtenu le Nobel en 1944, c'est qu'il y avait encore autre chose. Otto Stern a fait des faisceaux moléculaires avec tout ce qui marchait, surtout les atomes qui faisaient les meilleures petites aiguilles aimantées (argent, lithium, sodium). Avec son assistant Walther Gerlach, ils ont analysé ces pinceaux avec des champs magnétiques bien agencés, et dès 1922, les deux compères exhibent la quantification du moment magnétique (donc du moment cinétique) des particules. Ce sera le début de l'aventure quantique !

b) Magnétosphère terrestre

La magnétosphère est la zone qui délimite l'activité du champ magnétique terrestre autour de la Terre (jusqu'à 10 fois le rayon terrestre). Le champ magnétique terrestre est caractérisé par \vec{B} ayant pour sens l'axe Sud-Nord d'une aiguille aimantée. Dans l'hémisphère Nord, le pôle Nord d'une aiguille pointe vers le sol. Dans l'hémisphère Sud, c'est le pôle Sud qui pointe vers le sol. A l'équateur magnétique, l'aiguille reste horizontale, et aux pôles l'aiguille est verticale. En pratique, l'aiguille d'une boussole est astreinte à rester horizontale, elle n'indique donc que la composante horizontale du champ terrestre.



c) Circuits parcourus par un courant

Expérience d'Ørsted En 1819, Hans Christian Ørsted réalise¹ qu'une boussole est influencée lorsqu'elle est située près d'un fil parcouru par un courant électrique. Il conclue alors qu'un fil transportant courant électrique I génère un champ magnétique \vec{B} autour de celui-ci (cf. figure 1.4).

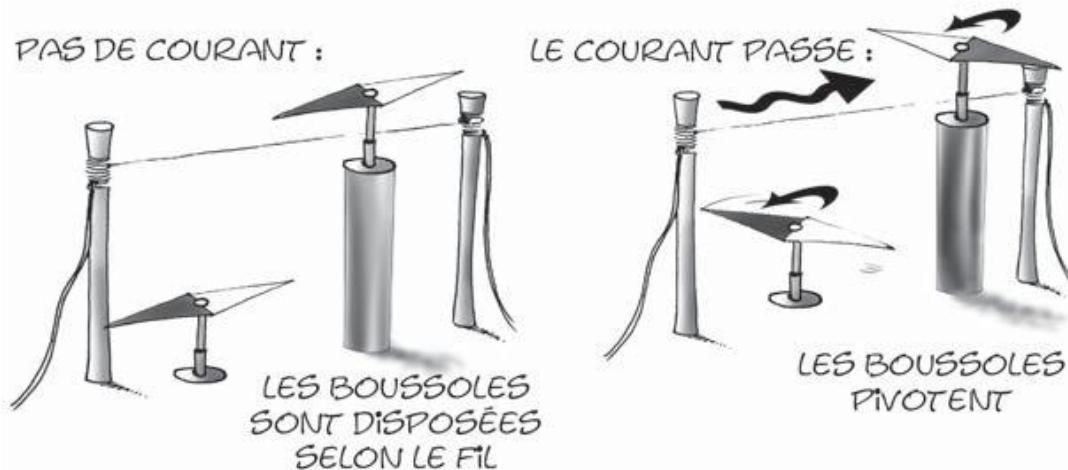


Figure 1.4 –
Expérience
d'Ørsted.
Pour maxi-
miser l'effet
visuel, le fil
est orienté
dans l'axe
Nord-Sud.

Avec cette expérience, Ørsted réalise que

1. Un courant électrique produit un champ magnétique.
2. La direction du champ magnétique est perpendiculaire à la direction du courant.
3. Le sens du champ magnétique dépend du sens du courant.

Influence de l'intensité dans le circuit sur la norme du champ Dans tous les cas la norme du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant circulant dans le circuit (cf. figure 1.5). En modifiant l'intensité du courant dans un circuit maintenu fixe, on n'agit que sur la norme de \vec{B} (M) mais pas sur la direction de ce vecteur. En inversant le sens du courant, on inverse le sens de \vec{B} (M).

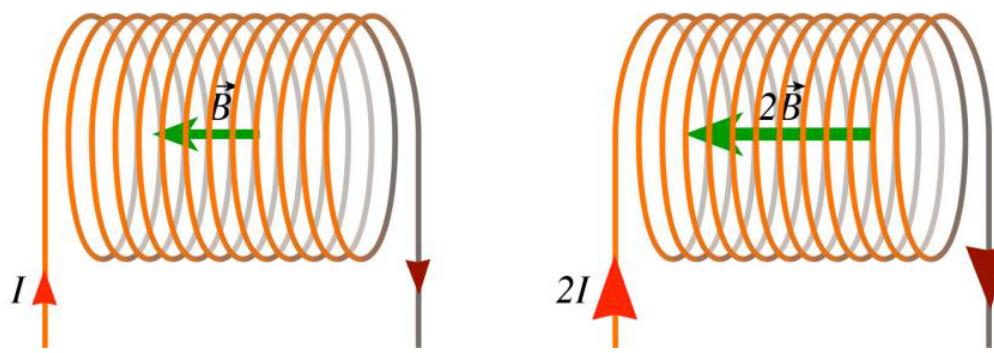


Figure 1.5 – Un dou-
blement du courant
induit un doublement
de la norme du champ
magnétique mais au-
cune modification de la
direction du vecteur.

1. Pour la petite histoire (à prendre avec des pincettes, parfois les physiciens aiment bien embellir la vérité), il paraît que la découverte se fait fortuitement pendant que Christian Ørsted fait son cours à l'université de Copenhague. Il est occupé à montrer l'effet calorifique (soit l'effet Joule) dans le fil joignant les deux bornes d'une pile de Volta. Au moment où la pile est mise en action, l'un de ses élèves lui fait remarquer qu'une aiguille aimantée placée sur la table, reste d'un précédent cours sur le magnétisme, se met à osciller. Une fois le cours terminé, Ørsted s'empresse de répéter l'expérience : l'aiguille aimantée dévie d'autant plus qu'elle est proche du fil reliant les deux bornes de la pile.

4 Quelques ordres de grandeur

Champ magnétique terrestre :

- Composante horizontale : $2 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 20 \mu\text{T}$
- Norme totale : $5 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 50 \mu\text{T}$

Aimant permanent ordinaire : $10^{-2} \text{ T} = 10 \text{ mT}$

Electroaimant : 0,1 T dans un volume restreint

Aimant permanent puissant : 0,3 T

Résonance magnétique : 20 T

Pulsar «jeune» : $10^9 \text{ T} = 1 \text{ GT}$

Partie II

Cartes de champ magnétique

1 Représentation d'un champ vectoriel dans l'espace

a) Lignes de champ

Définition Les lignes de champ sont des courbes orientées telles que leur tangente, en chaque point, ait la même direction et le même sens que le champ.

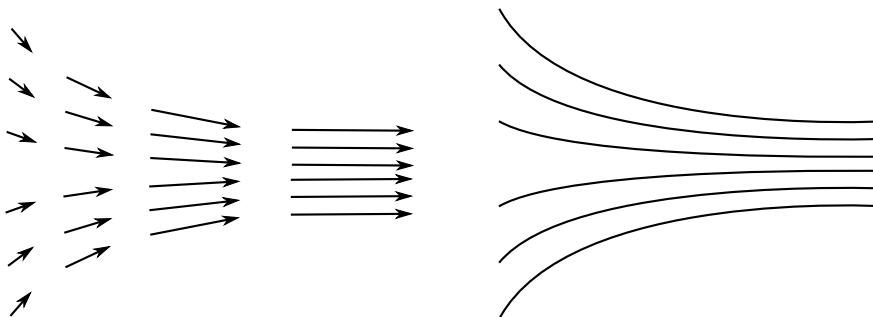


Figure 1.6 – Vecteurs représentatifs du champ magnétique (à gauche) en quelques points et lignes de champ associées (à droite)

Équation des lignes de champ Pour mettre en équation la définition précédente, il suffit de se rappeler que deux vecteurs sont colinéaires si et seulement si leur produit vectoriel est nul. Ainsi, si on considère un petit déplacement \overrightarrow{dOM} le long d'une ligne pour un champ vectoriel \vec{A} , alors ce petit déplacement est tel que

$$\vec{A} \wedge \overrightarrow{dOM} = \vec{0}$$

puisque c'est mathématiquement équivalent à dire que le petit déplacement \overrightarrow{dOM} est colinéaire au champ \vec{A} en ce point.

b) Carte de champ dans un plan de coupe

Le champ magnétostatique étant une fonction à valeur vectorielle, on peut aisément le visualiser à l'aide de ces lignes de champ. Les lignes de champ magnétique ont des caractéristiques spécifiques qui les distinguent aisément des lignes de champ électrique par exemple. Ces propriétés essentielles sont les suivantes :

- Une ligne de champ magnétique est une courbe fermée.
- Une ligne de champ entoure les conducteurs parcourus par des courants.

c) Invariances possibles

SCHEMAS

2 Exemple de cartes de champ magnétique

Les cartes de champ magnétique peuvent se dessiner en saupoudrant de la limaille de fer sur le système. En effet, les particules de limaille de fer se comportent comme de petites boussoles et s'orientent naturellement en suivant la direction locale du champ magnétique.

D'un autre côté, la connaissance du champ en chaque point de l'espace permet en principe de tracer une ligne de champ quelconque. Il suffit d'utiliser une méthode d'intégration de type Euler pour se déplacer le long de la ligne qui se doit d'être fermée, comme c'est le cas dans le code informatique 1.1

a) Aimant droit

Un aimant droit est un aimant « traditionnel » en forme de batonnet. Ses lignes de champ sont à connaître : elles sortent par le Nord et se referment du côté Sud. Il conviendra de faire un comparatif avec les lignes de champ pour une bobine longue.

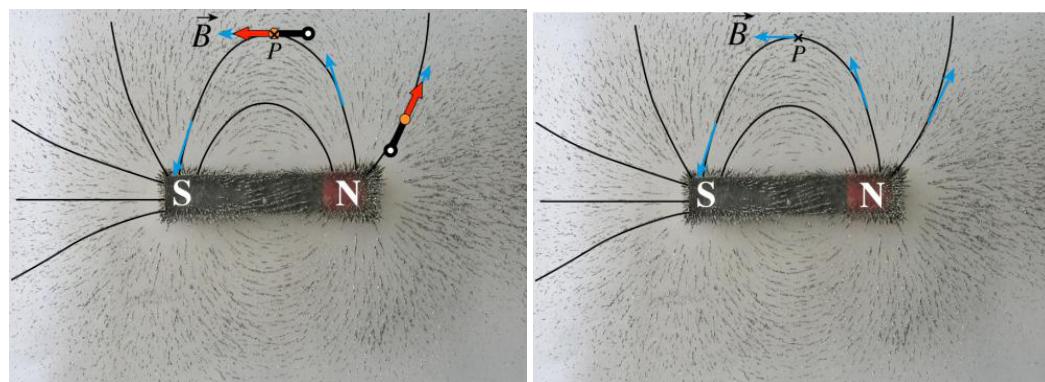


Figure 1.7 – Visualisation des lignes de champ pour un aimant droit à l'aide de limaille de fer

b) Spire circulaire

Une spire circulaire de courant est un circuit (fictif) fermé en forme de cercle. En pratique, on enroule plusieurs fois du fil sur un support de sorte à pouvoir négliger l'action des fils qui vont s'éloigner de cette géométrie pour partir vers le générateur présent dans le circuit.

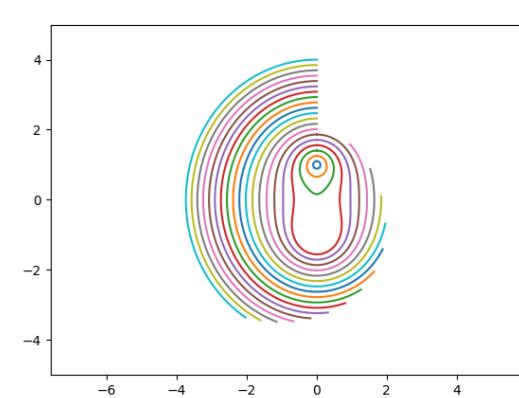


Figure 1.8 – Réalisation pratique d'une spire circulaire (à gauche) et dessin des lignes de champ associées.

PROG. 1.1 Code informatique permettant le tracé de lignes de champ. Les premières lignes décrivent le champ voulu. Par la suite, comme on ne veut pas une évolution temporelle, on n'utilise le champ magnétique que pour déterminer la direction de déplacement. On utilise alors un intégrateur de type « Heun » qui regarde la solution donnée par Euler et corrige la direction en fonction de la direction d'où on partait via la prédiction d'Euler. Il y aurait encore bien des choses à améliorer (notamment regarder ce qui se passe selon $-B$ pour les lignes qui ne se referment pas), mais cela donne déjà l'idée.

```

1 # Pour tout ce qui concerne les complexes, histoire de bosser tranquillement
2 # en utilisant le plan complexe comme espace vectoriel.
3 from cmath import *
4 import numpy as np
5
6 mu0 = 4*np.pi*1e-7 # Valeur de la perméabilité magnétique du vide
7
8 def Bfil(pos,I,pos_fil):
9     """ Champ créé en 'pos' par un fil infini positionné en 'pos_fil' """
10    r = pos - pos_fil # Vecteur position par rapport au fil
11    etheta = r/abs(r) * 1j # Rotation de pi/2 du vecteur er pour avoir etheta
12    return mu0*I/(2*np.pi*abs(r)) * etheta
13
14 def B(pos): # On considère deux fils infini en regard
15     """ Fonction à modifier si on veut modifier la carte tracée."""
16    vB = Bfil(pos,1,1j) + Bfil(pos,1,-1j)
17    return vB/abs(vB) # On ne renvoie que la direction du champ, pas sa norme
18
19 def next_point(depart,direction,pas):
20     return depart + direction * pas # On avance d'un pas dans la direction donnée.
21
22 def fais_LdC(depart,xlim=5,ylim=5,eps=1e-2,max_step=1000,pas=1e-2):
23     L = [depart]
24     while abs(depart.real) < xlim and abs(depart.imag) < ylim and \
25         (abs(depart - L[0]) > eps or len(L) < 10) and len(L) <= max_step:
26         dir1 = B(depart) # Direction initiale
27         euler= next_point(depart,dir1,pas) # On regarde où on irait
28         dir2 = B(euler) # de là, on corrige la direction
29         depart = next_point(depart,(dir1+dir2)/2,pas) # et on prend la moyenne
30         L.append(depart)
31     return np.array(L)
32
33 import matplotlib.pyplot as plt
34 # On dessine quelques lignes de champ
35 for d in np.linspace(1.1*1j,4*1j,20):
36     LdC = fais_LdC(d)
37     plt.plot(LdC.real,LdC.imag)
38 plt.axis('equal')
39 plt.ylim(-5,5)
40 plt.savefig('PS/I1_resultat_LdC.png')
```



c) Bobine longue

Une bobine (aussi appelée « solénoïde ») est constituée d'un ensemble de spires juxtaposées les unes aux autres et parcourues par un même courant. Le champ magnétique étant additif, on se retrouve avec la somme des contributions des différentes spires qui ont tendance à se renforcer sur l'axe pour que le champ « passe dans le tunnel » avant de ressortir de l'autre côté. On retrouve un dessin de lignes de champ qui, à l'extérieur des bobines, est très proche de celui d'un aimant droit.

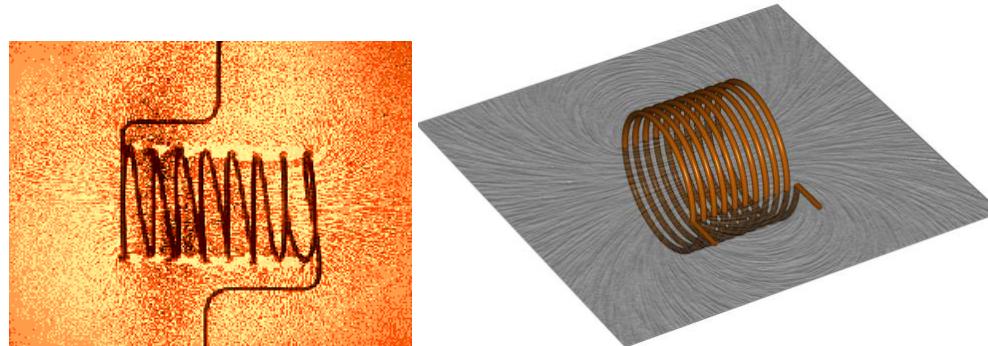


Figure 1.9 – Visualisation des lignes de champ pour une bobine à l'aide de limaille de fer.

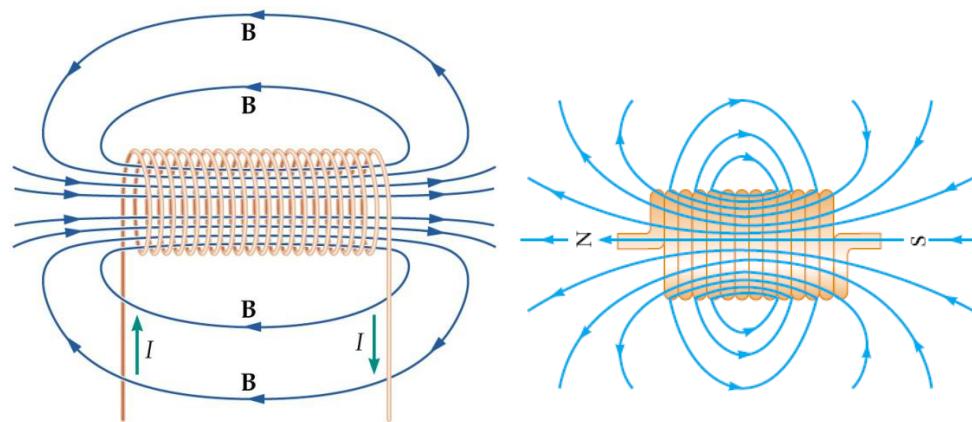


Figure 1.10 – Lignes de champ pour une bobine longue.

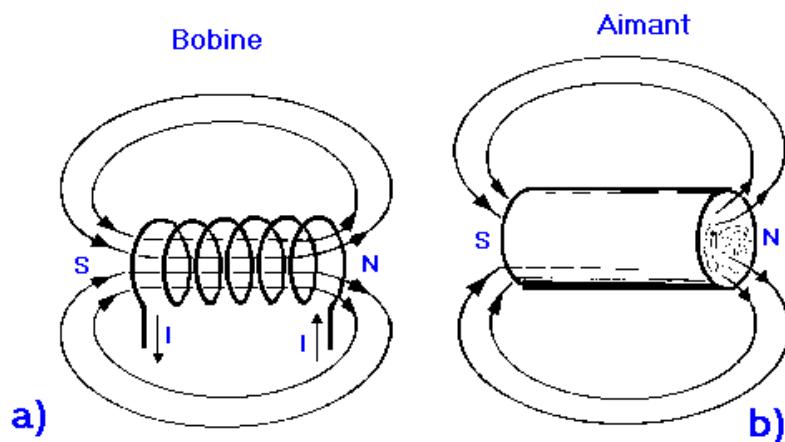


Figure 1.11 – Comparaison entre les lignes de champ issues d'une bobine (à gauche) et celle issues d'un aimant droit (à droite). Les deux tracés sont similaires à l'extérieur.

3 Exploitation des cartes de champ magnétique

a) Emplacement des sources

Une ligne de champ magnétique est une courbe fermée entourant un ou plusieurs conducteurs parcourus par des courants (cf. figure 1.12).

Le champ magnétique circule autour des sources.

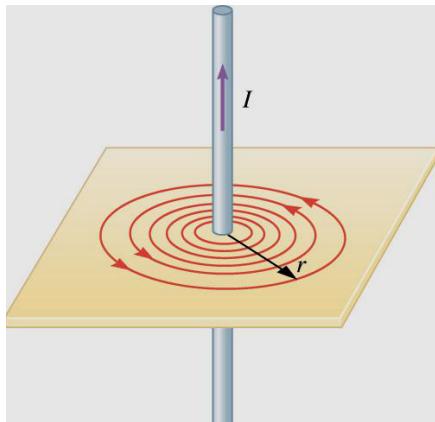


Figure 1.12 – Orientation des lignes de champs créées par un fil perpendiculaire au plan de coupe. Un calcul classique de magnétostatique de seconde année donne pour un fil supposé infini, avec I compté positivement si le courant est dirigé suivant $+\vec{e}_z$, $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\theta$

b) Recherche du sens du courant (orientation connue de la ligne de champ)

Règle de la main droite Si la main *droite* s'enroule autour de la ligne de champ étudiée, le pouce indique le sens du courant dans le fil entouré par cette ligne (figure 1.13). À noter que cette règle est facilement réutilisable car dans une bobine, si on entoure la main selon le sens du courant dans les spires, alors le pouce indique la direction du champ magnétique sur l'axe de la bobine (figure 1.14).

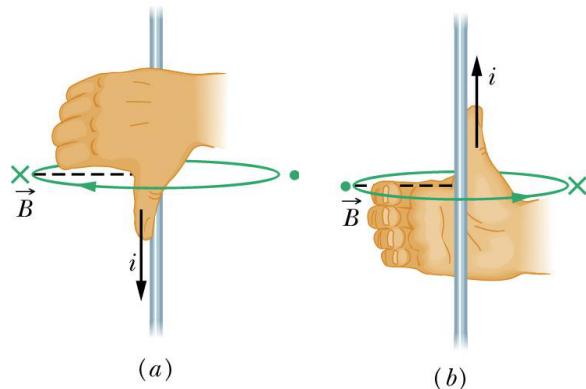


Figure 1.13 – Règle de la main droite pour les lignes de champ : le pouce montre le sens du courant quand la main s'enroule autour des lignes de champ.

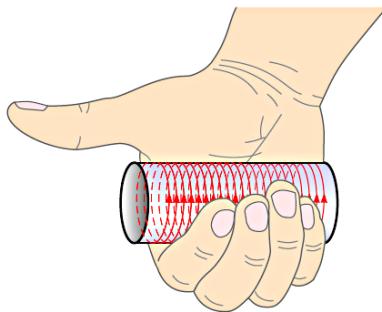


Figure 1.14 – Règle de la main droite pour le champ à l'intérieur d'une bobine : si la main s'enroule autour de la bobine dans le sens du courant, le pouce indique la direction du champ à l'intérieur de la bobine.

c) Norme du champ magnétique

Sur une carte de champ magnétique,

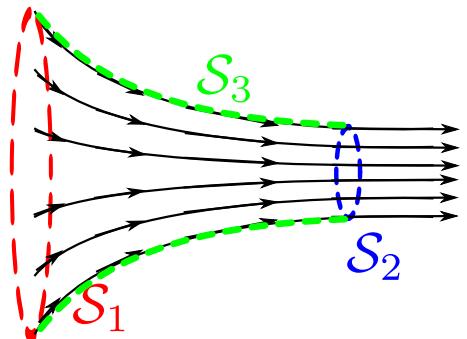
Quand les lignes de champ magnétique se resserrent la norme du champ magnétique augmente.

Démonstration

Le champ magnétique est un champ qui est dit « à flux conservatif », c'est-à-dire que toute ligne rentrant dans un volume donné doit en ressortir ou, de manière mathématiquement plus exacte, le flux du champ \vec{B} au travers d'une surface fermée est nul

$$\Phi_{\mathcal{S}} = \oint_{\mathcal{S}} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Considérons le cas suivant où l'on voit que les lignes de champ se resserrent. On définit une surface fermée \mathcal{S} associée à un « tube de champ », c'est-à-dire telle que la surface latérale \mathcal{S}_3 soit en tout point tangente aux lignes de champ et que les surfaces de fermeture \mathcal{S}_1 et \mathcal{S}_2 soient orthogonales au champ. Alors, le flux de \vec{B} au travers de cette surface fermée orientée vers l'extérieur est donné par



$$0 = \underbrace{\Phi_{(\mathcal{S}_1 + \mathcal{S}_2 + \mathcal{S}_3)}}_{\text{flux conservatif}} = \underbrace{\Phi_{\mathcal{S}_1} + \Phi_{\mathcal{S}_2} + \Phi_{\mathcal{S}_3}}_{\text{linéarité de l'intégrale}} = \underbrace{-}_{\text{orientation}} \underbrace{\langle B_1 \rangle \mathcal{S}_1}_{\text{surface normale}} + \underbrace{\langle B_2 \rangle \mathcal{S}_2}_{\text{surface tangente}} + 0$$

4 Réalisation d'une zone de champ uniforme

L'uniformité du champ se traduit par la présence de lignes de champ parallèles. Trois dispositifs présentent un intérêt particulier dans la réalisation d'une zone de champ magnétique quasi-uniforme.

a) Aimant en U

Dans l'entrefer d'un aimant « en U », le champ est quasiment uniforme.

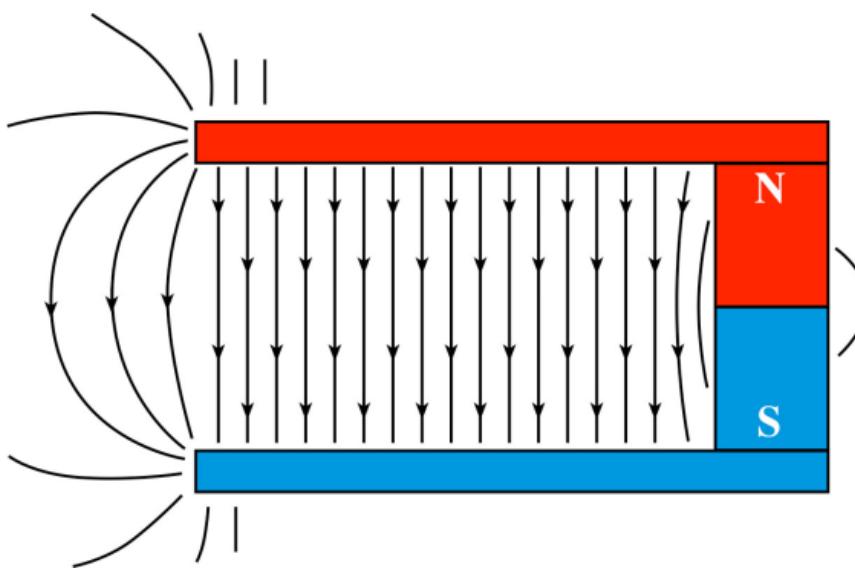


Figure 1.15 – Lignes de champ pour un aimant « en U ». On reconnaît la zone de champ uniforme au fait que les lignes de champ sont parallèles entre elles, ce qui est bien le cas tant qu'on ne se rapproche pas trop du bord de la zone délimitée par l'aimant.

b) Bobine de très grande longueur

Influence de la longueur Plus une bobine est longue (par rapport à son rayon) et plus les lignes de champ magnétique deviennent parallèles dans le volume intérieur de la bobine. Le champ à l'extérieur devient de plus en plus faible si on augmente la longueur (figure 1.16).

Notez que l'orientation du champ à l'intérieur de la bobine est aussi donnée par la « règle de la main droite » : si on enroule la main autour de la bobine dans le même sens que le courant, le pouce indique la direction du champ magnétique (figure 1.14).

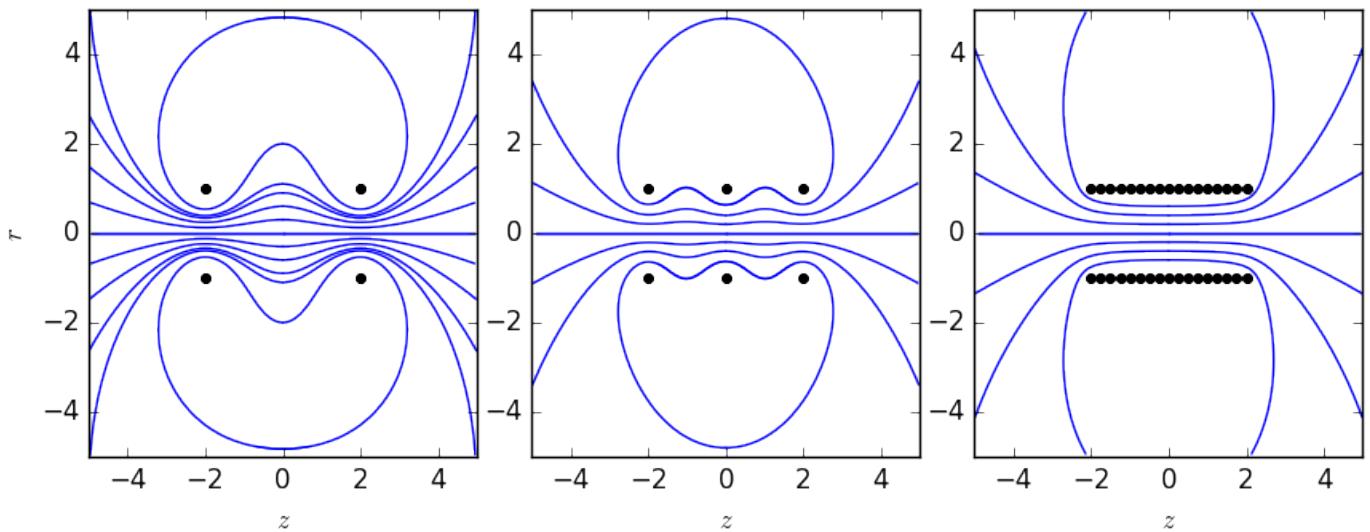


FIGURE 1.16 – La juxtaposition de plus en plus de spires de même rayon montre que le champ dans la bobine devient de plus en plus uniforme (les lignes deviennent de plus en plus parallèles) alors que le champ à l'extérieur de la bobine est de plus en plus faible.

Champ créé par une bobine infinie Si on note (Oz) l'axe de la bobine et si celle-ci peut être considérée comme infinie (c'est-à-dire que sa longueur ℓ est bien supérieure à son rayon R), alors le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est uniforme et s'écrit

$$\vec{B} = \mu_0 n I \vec{e}_z = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \vec{e}_z$$

où I est le courant parcourant chaque spire (et compté positivement dans le sens trigonométrique autour de (Oz)), N est le nombre total de spires réparties sur la longueur ℓ de la bobine et donc $n = N/\ell$ est la « densité linéique de spires » caractérisant la bobine.

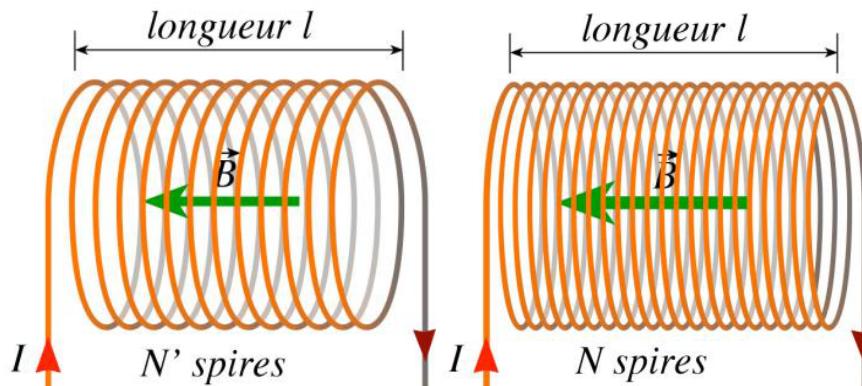


Figure 1.17 – Le champ magnétique est, à longueur totale ℓ fixée, proportionnel au nombre N de spires, il est donc plus intense dans le cas de droite. Ce qui importe est en fait la valeur de la densité linéique de spires $n = N/\ell$ que l'on voit bien plus importante dans le second cas.

c) Bobines de Helmholtz

C'est un dispositif qui crée un champ magnétique presque uniforme dans un volume suffisamment important pour que l'on puisse faire des expériences. On considère deux spires de rayons R parcourues par un courant I dans le même sens. Si les deux spires sont séparées de R (c'est-à-dire placées en $z = \pm R/2$), alors B

est uniforme au voisinage de $z = 0$ au 4^e ordre en z/R sur l'axe. L'avantage principal du système est de pouvoir créer une zone de champ uniforme sans être à l'intérieur d'un solénoïde géant.

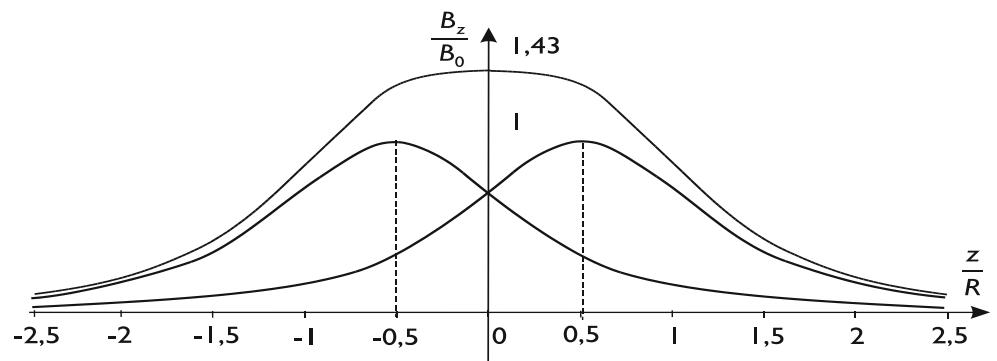


FIGURE 1.18 – Montage de Helmholtz et profil du champ créé sur l'axe par superposition de celui des deux spires

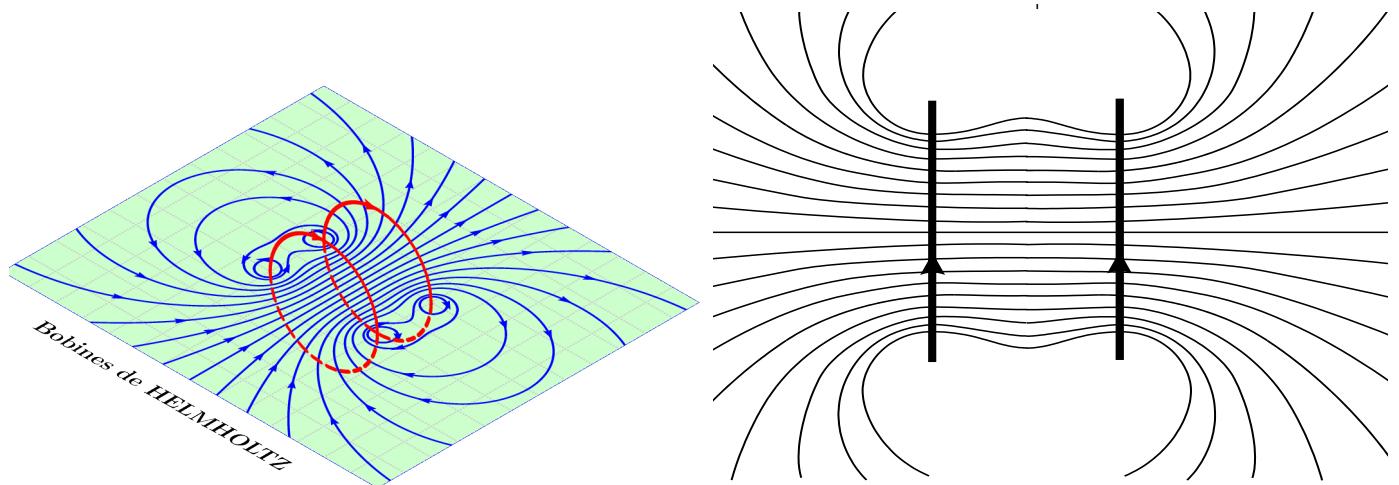


FIGURE 1.19 – Lignes de champ de la configuration de Helmholtz : le champ est quasi-uniforme dans la zone centrale.

Partie III —

Moment magnétique

1 Moment magnétique associé à une boucle de courant plane

a) Orientation d'une surface délimitée par un contour fermé

Pour une surface plane, il faut expliciter la direction d'un vecteur \vec{n} qui oriente la normale (synonyme de droite orthogonale) à cette surface. Le sens du vecteur surface $\vec{\mathcal{S}} = \mathcal{S} \vec{n}$ est donné par la règle de la main droite (encore!).

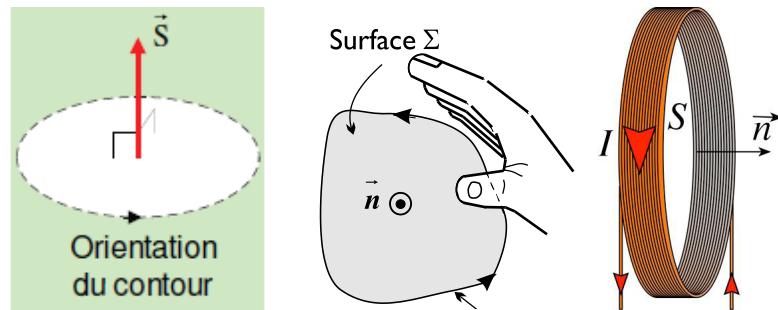


Figure 1.20 – La règle de la main droite (encore elle) permet de mettre en lien l'orientation du contour (autour duquel s'enroule la main droite) et la direction du vecteur surface (donnée par le pouce de ladite main). À noter que du coup, on oriente toujours le contour en suivant le sens conventionnel positif choisi pour le courant comme indiqué dans le schéma de droite, cela permettra d'éviter énormément d'erreurs de signes.

b) Moment magnétique d'un circuit

Soit un circuit filiforme plan parcouru par un courant d'intensité $i(t)$, éventuellement variable mais ayant même valeur en tout point du circuit à une date donnée (cadre de l'ARQS). Ce circuit est représenté par un contour fermé \mathcal{C} , qui délimite une surface \mathcal{S} (ouverte!). Orientons le contour \mathcal{C} par le courant i (figure 1.20, à droite) : le vecteur normal $\vec{\mathcal{S}} = \mathcal{S} \vec{n}$ est alors parfaitement défini (règle de la main droite). Le moment magnétique du circuit est le vecteur $\vec{\mathcal{M}}$, défini par

$$\vec{\mathcal{M}} = i \mathcal{S} \vec{n} = i \vec{\mathcal{S}}$$

Par exemple pour une boucle circulaire de rayon R , on a $\vec{\mathcal{M}} = i \pi R^2 \vec{n}$.

c) Notion de dipôle magnétique

Lorsqu'on se place « suffisamment loin » de la source du champ magnétique pour ne plus voir le détail des objets qui le produisent, toutes les cartes de champ se mettent à ressembler à celle d'un dipôle magnétique seulement caractérisé par la valeur de son moment $\vec{\mathcal{M}}$.

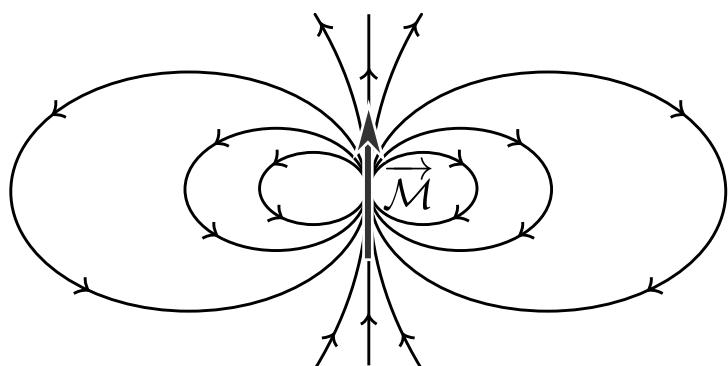


Figure 1.21 – La direction et le sens de $\vec{\mathcal{M}}$ donne la direction et le sens de \vec{B} au niveau du dipôle alors que sa norme renseigne sur la norme du champ magnétique. La boucle de courant (ou l'aimant) responsable des lignes de champ ci-contre n'est pas représentée car elle est ponctuelle à l'échelle de la distance d'observation.

2 Analogie bobine/aimant

a) Cartes de champ

Comme on l'a vu à la figure 1.11, un aimant droit présente une carte de champ analogue à celle d'une bobine de même longueur. Par analogie, on peut donc définir la face Nord d'une bobine comme étant le côté d'où sort le champ magnétique produit à l'intérieur de la bobine (cf. figure 1.22).

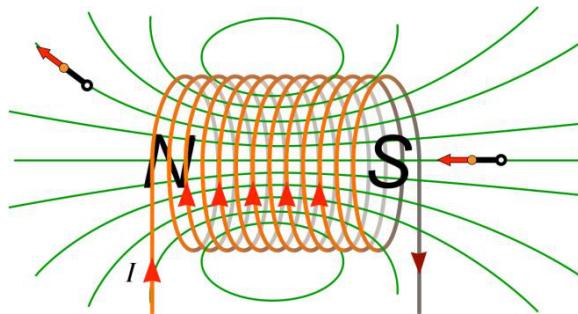


Figure 1.22 – Pour placer les pôles magnétiques de l'aimant équivalent à une bobine ou une spire, il suffit de placer votre main droite sur la bobine pour l'entourer dans le sens de circulation du courant. Votre pouce vous indiquera la face Nord de la bobine.

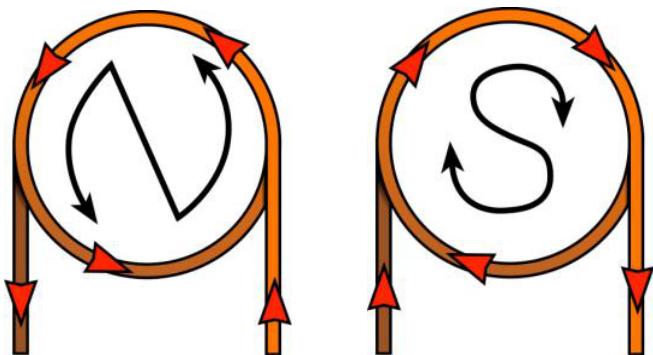


Figure 1.23 – Une autre façon pour déterminer les pôles d'une bobine est de la placer selon son axe et d'observer le sens de rotation du courant.

b) Moment magnétique associé à un aimant

Cette analogie va plus loin. On appelle dipôle magnétique toute distribution de courants localisés, de moment magnétique non nul et dont les dimensions sont petites vis-à-vis de la distance à laquelle on étudie le champ ainsi créé. Cette étude suppose de travailler dans le cadre de l'ARQS pour pouvoir définir le courant $i(t)$ dans le circuit. On notera que toute distribution de courants permanents ou lentement variables, à vue de loin \vec{z} , est assimilable à un dipôle magnétique. Dans ce contexte un aimant peut donc être remplacé par une petite spire parcourue par un courant et vice versa.

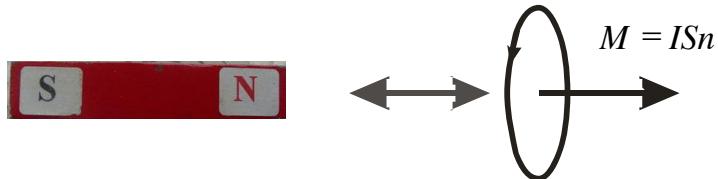


Figure 1.24 – Tout aimant peut être assimilé à une boucle de courant de moment magnétique donné

Un ordre de grandeur du moment magnétique d'un aimant est de quelques $\text{A} \cdot \text{m}^2$. Pour la Terre, ce moment magnétique est de l'ordre de $10^{23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ alors que le moment magnétique d'un électron est de l'ordre de $10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$.