Chapitre EM3. Dipôles électrostatique et magnétique

INTRO :
L'étude du **dipôle électrostatique**, ensemble de deux charges électriques opposées, revêt une grande importance notamment en **chimie**. Ce modèle décrit les **molécules polaires** ou polarisables et il permet notamment d'expliquer les **interactions ion-dipôle et de Van der Waals** qui existent à l'échelle microscopique.
Le **dipôle magnétique**, abordé en 1e année, est l'analogue en magnétostatique du dipôle électrostatique. On s'appuie sur cette **analogie** pour donner des résultats concernant le dipôle magnétique.
On va s'intéresser aux dipôles électrostatique et magnétique sous deux aspects : un **aspect actif** en étudiant le **champ que le dipôle crée à grande distance** (§ A.2 et B.2) et un **aspect passif** en étudiant les **actions subies par le dipôle dans un champ extérieur** (§ A.3 et B.3).

Buts de ce chapitre : Décrire / modéliser un dipôle électrostatique / magnétique ; expliciter l'approximation dipolaire ; déterminer le potentiel et le champ électrostatiques créés par un dipôle électrique ; étudier les actions subies par un dipôle placé dans un champ extérieur ; construire l'analogie entre dipôle électrostatique et dipôle magnétique.

Prérequis :
2e année : ChEM1 Electrostatique
1e année : Champ magnétique ; Structure des entités chimiques ; Interactions entre entités

Plan du chapitre :
A) Dipôle électrostatique 2
1) Définitions et approximation dipolaire 2
2) Potentiel et champ électrostatiques créés par un dipôle électrostatique 3
3) Action d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle électrostatique 5
B) Dipôle magnétique 8
1) Définitions et approximation dipolaire 8
2) Champ magnétique créé par un dipôle magnétique 10
3) Action d'un champ magnétostatique extérieur sur un dipôle magnétique 11
Annexe – Effet moteur d'un champ magnétique tournant 12

A) Dipôle électrostatique

1) Définitions et approximation dipolaire

a) Doublet de charges

DEFINITION :

Un **DIPOLE ELECTROSTATIQUE** est un **ensemble de deux charges opposées** $-q$ et q avec $q > 0$, assimilées à des charges ponctuelles : $\{N(-q); P(q)\}$.

Cela décrit un système **globalement neutre** de taille caractéristique a, tel que le **barycentre des charges positives P et celui des charges négatives N** ne sont **pas confondus.**

A l'échelle microscopique, ce modèle décrit notamment les molécules diatomiques **polaires**.

Ex : HCl est **neutre** mais, du fait de la différence d'électronégativité entre les atomes H et Cl, les électrons de la liaison sont attirés par l'atome le plus électronégatif et le **barycentre des charges positives P et celui des charges négatives N** ne sont **pas confondus**. On introduit alors les **charges partielles $\pm\delta e$** portées par chaque atome, avec δ le pourcentage ionique de la liaison :

$$^{+\delta}H - Cl^{-\delta}$$

b) Moment dipolaire - ODG

DEFINITION :

On caractérise un dipôle électrostatique par son **MOMENT DIPOLAIRE** :

$$\boxed{\vec{p} = q \cdot \overrightarrow{NP}}$$

⇨ dirigé selon la droite (NP) ;

⇨ orienté de N vers P i.e. de la charge négative vers la charge positive ;

⇨ de norme $\|\vec{p}\| = p = q.a$ avec $a = NP$.

USI de la norme $C.m$

Unité usuelle : **Debye** : $1\ D = 3{,}34.10^{-30}\ C.m$ (unité adaptée à l'échelle moléculaire).

➲ A savoir refaire : Justifier la pertinence de l'unité Debye pour des molécules.

Molécule	Moment dipolaire permanent (D)
chlorure d'hydrogène HCl	1,08
eau H_2O	1,85
monoxyde de carbone CO	0,11
ammoniac NH_3	1,49
acide nitrique HNO_3	2,17
propène CH_3CHCH_2	0,35
éthanol CH_3CH_2OH	1,70
éthanal CH_3CHO	2,70

NB : Pour une molécule composée de plus de 2 atomes, son moment dipolaire permanent(*) est égal à la **somme vectorielle des moments dipolaires de chaque liaison i**.

$$\vec{p} = \sum_i \overrightarrow{p_i}$$

Pour savoir si $\vec{p} = \vec{0}$ ou $\vec{p} \neq \vec{0}$, il faut connaître la géométrie de la molécule (Lewis + VSEPR).

Une molécule **POLAIRE** est une molécule telle que $\vec{p} \neq \vec{0}$ (ex : H_2O est coudée et polaire).

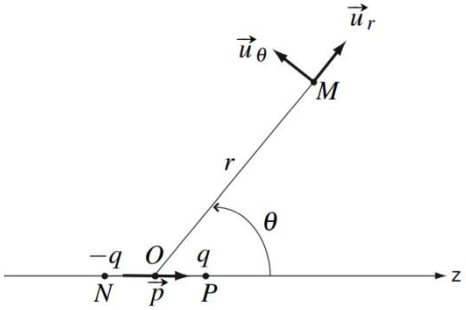
Une molécule **APOLAIRE** est une molécule telle que $\vec{p} = \vec{0}$ (ex : CO_2 est linéaire et apolaire).

(*) On parle de moment dipolaire ***permanent***, à distinguer des moments dipolaires ***induits*** et ***instantanés*** mis en jeu dans les interactions de Van der Waals de type Debye et London, cf 1e année.

c) Cadre de l'étude : approximation dipolaire

On note O le milieu du segment $[NP]$ et $a = NP$.

Dans la suite, on étudie les propriétés du dipôle en **coordonnées sphériques** de centre O et tel que l'axe (Oz) est de même direction et de même sens que $\vec{p}$.



On étudie le dipôle dans le cadre de l'**APPROXIMATION DIPOLAIRE** i.e. qu'on étudie les propriétés du dipôle en des points M tels que $\boldsymbol{r = OM \gg a}$.

Autrement dit, on étudie le dipôle à une distance r grande devant sa taille caractéristique a.

2) Potentiel et champ électrostatiques créés par un dipôle électrostatique

a) Potentiel électrostatique créé

Dans le cadre de l'approximation dipolaire, le potentiel créé par le dipôle électrostatique s'écrit :

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{p.cos\theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{\vec{p}.\overrightarrow{OM}}{OM^3}$$

➲ Démonstration à connaître : Démontrer ces expressions pour M tel que $r = OM \gg a$.

Etapes : théorème de superposition ; potentiel créé par une charge ponctuelle ; relation de Chasles pour exprimer $\overrightarrow{PM}$ et $\overrightarrow{NM}$; DL à l'ordre 1 en $\frac{a}{r}$ pour exprimer PM^{-1} et NM^{-1} ; identifier $\vec{p} = q\overrightarrow{NP}$ et $\overrightarrow{OM} = r\overrightarrow{u_r}$.

Commentaires :

- L'expression $V(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{\vec{p}.\overrightarrow{OM}}{OM^3}$ ne dépend pas du système de coordonnées choisi, on parle d'expression intrinsèque, notamment utile pour superposer les effets de plusieurs dipôles.
- L'expression $V(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{p.cos\theta}{r^2}$ montre que le **potentiel est indépendant de la coordonnée φ**. Ceci est cohérent avec le fait que la **distribution de charges est invariante par rotation autour de l'axe (Oz)**.
- $V(M)$ varie en $\frac{1}{r^2}$ **pour un dipôle** alors qu'il varie en $\frac{1}{r}$ **pour une charge ponctuelle unique** : le potentiel s'atténue donc plus « vite » pour un dipôle.

b) Champ électrostatique créé

Dans le cadre de l'approximation dipolaire, le champ créé par le dipôle électrostatique s'écrit :

$$\vec{E}(M) = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(2cos\theta\overrightarrow{u_r} + sin\theta\overrightarrow{u_\theta}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 OM^5}(3(\vec{p}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\vec{p})$$

➲ Démonstration à connaître : Démontrer la 1e égalité pour M tel que $r = OM \gg a$.

Etapes : expression de $\vec{E}$ en fonction de V ; en coordonnées sphériques, on a $\overrightarrow{gradf} = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,\varphi}.\vec{u}_r + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,\varphi}.\vec{u}_\theta + \frac{1}{rsin\theta}\left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right)_{r,\theta}.\vec{u}_\varphi$; on vérifie que les 2 expressions coïncident avec $\vec{p} = q\overrightarrow{NP}$ et $\overrightarrow{OM} = r\overrightarrow{u_r}$.

Commentaires :

- L'expression $\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 OM^5}(3(\vec{p}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\vec{p})$ ne dépend pas du système de coordonnées choisi : expression intrinsèque.
- L'expression $\vec{E}(M) = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(2cos\theta\overrightarrow{u_r} + sin\theta\overrightarrow{u_\theta})$ montre que le **champ est dans le plan** $(\boldsymbol{M}, \overrightarrow{\boldsymbol{u_r}}, \overrightarrow{\boldsymbol{u_\theta}})$, ce qui est cohérent avec le fait que ce plan est un **plan de symétrie de la distribution de charges**. De plus, les composantes du **champ sont indépendantes de la coordonnée $\boldsymbol{\varphi}$,** ce qui est cohérent avec le fait que la **distribution de charges est invariante par rotation autour de l'axe** $(\boldsymbol{Oz})$.
- $\left\|\vec{E}(M)\right\|$ varie en $\frac{1}{r^3}$ **pour un dipôle** alors qu'il varie en $\frac{1}{r^2}$ **pour une charge ponctuelle unique** : le champ s'atténue donc plus « vite » pour un dipôle.

NB § A.2.a-b : Le **potentiel et le champ créés par le dipôle** s'expriment en fonction du **moment dipolaire $\vec{p}$**, c'est donc bien la grandeur caractéristique du dipôle.

c) Topographie du champ créé par un dipôle électrostatique

Pour $r = OM \gg a$, on a obtenu :

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.\frac{p.cos\theta}{r^2} \quad et \quad \vec{E}(M) = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(2cos\theta\overrightarrow{u_r} + sin\theta\overrightarrow{u_\theta})$$

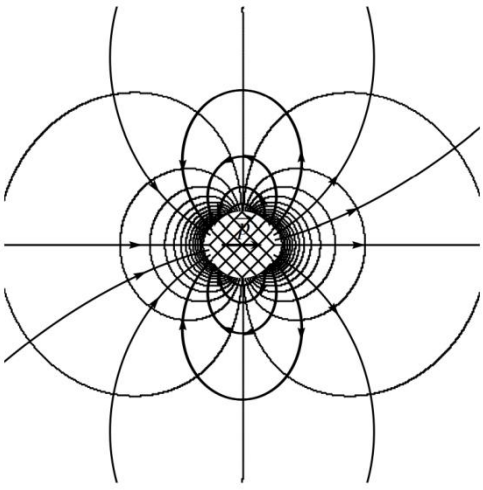
- Etant donné la décroissance du potentiel et du champ en fonction de r, **les effets d'un dipôle se font ressentir à moins grande distance que ceux d'une charge seule**.

- Equipotentielles et lignes de champ obtenues dans le cadre de l'approximation dipolaire *(la zone hachurée correspond à la zone où l'approximation n'est pas valable)*.

→ Visualisation grâce à Python :
Cf Cahier de Prépa

➲ Exercice classique : Vérifier la compatibilité des l.d.c avec les symétries et/ou les invariances de la distribution de charges. Remarquer la direction et le sens des l.d.c vis-à-vis des équipotentielles.

Figure à savoir reproduire ! →



3) Action d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle électrostatique

On s'intéresse ici à l'effet d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle électrostatique permanent / rigide i.e. que la ***norme de son moment dipolaire est constante*** *(indépendante du champ électrostatique appliqué).*

a) Cas d'un champ électrostatique extérieur UNIFORME : $\vec{E}_{ext}$ identique en tout point

◆ **Résultante des forces électriques : couple de forces**

La **résultante** des actions, **subies par un dipôle** dans un **champ électrostatique extérieur** $\vec{E}_{ext}$ **uniforme**, est **nulle**. Il s'agit donc d'un **couple** de forces.

➲ Démonstration à connaître.

Etapes : expression des forces électriques $\overrightarrow{F_e}(N)$ et $\overrightarrow{F_e}(P)$ subies par $\{N(-q)\}$ et par $\{P(q)\}$; résultante en tenant compte de l'uniformité du champ électrique.

◆ **Moment résultant du couple de forces**

Les actions subies **par un dipôle** dans un **champ électrostatique extérieur** $\vec{E}_{ext}$ **uniforme** forment un **couple de moment** $\vec{\Gamma}$:

$$\boxed{\vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{ext}}$$

💣 **Ne pas confondre moment dipolaire et moment du couple de forces !**

➲ Démonstration à connaître.

Etapes : expression de $\overrightarrow{\Gamma_O}\left(\overrightarrow{F_e}(N)\right)$ et $\overrightarrow{\Gamma_O}\left(\overrightarrow{F_e}(P)\right)$; moment résultant et identifier $\vec{p} = q\overrightarrow{NP}$.

NB : Le moment est indépendant du point où on le calcule.

◆ **Energie potentielle**

L'énergie potentielle du dipôle dans le champ extérieur est la somme des énergies potentielles de chacune de ses charges :

$$\boxed{E_p = -\vec{p}.\vec{E}_{ext}}$$

➲ Démontrer cette expression.

Etapes : expression des énergies potentielles électriques $E_p(N)$ et $E_p(P)$ de chaque charge ; somme en exploitant la relation entre le potentiel et le champ électrique.

◆ **Effet d'orientation : positions d'équilibre et stabilité**

➲ Exercice classique : Déterminer les positions d'équilibre du dipôle. Discuter de leur stabilité.

Le couple des actions subies par le dipôle dans un champ $\vec{E}_{ext}$ **uniforme** tend à **ORIENTER** le moment dipolaire selon la direction de $\vec{E}_{ext}$.
L'équilibre stable correspond à la situation où le **moment dipolaire** est **colinéaire** et de **même sens** que le champ $\vec{E}_{ext}$.

b) Cas d'un champ électrostatique extérieur NON UNIFORME

◆ **Résultante des forces électriques**

La **résultante** des actions, **subies par un dipôle** dans un **champ électrostatique extérieur** $\vec{E}_{ext}(M)$ **non uniforme,** est non nulle et s'écrit :

$$\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\vec{p}.\vec{E}_{ext})$$

Rq : on retrouve $\vec{F} = \vec{0}$ pour un champ électrostatique extérieur uniforme.
L'expression de cette force est admise et elle sera fournie dans les exercices.

Les expressions du moment et de l'énergie potentielle établies pour un champ électrique extérieur uniforme se généralisent au cas d'un champ électrique extérieur non uniforme dans le cadre de l'approximation dipolaire: ***a faible devant la distance caractéristique de variation de $\vec{E}_{ext}(M)$*** .
On repère la **position du dipôle par le point O** : **milieu** du segment $[NP]$.

◆ **Moment résultant**

Le **moment** des actions, **subies par un dipôle** dans un **champ électrostatique extérieur $\vec{E}_{ext}$ non uniforme,** s'écrit :

$$\vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{ext}(O)$$

Rq : Le moment est indépendant du point où on le calcule.

◆ **Energie potentielle**

L'énergie potentielle du dipôle dans le champ extérieur s'écrit :

$$E_p = -\vec{p}.\vec{E}_{ext}(O)$$

◆ **Effets qualitatifs À RETENIR : effet d'orientation et effet de déplacement**

D'après l'expression de **l'énergie potentielle** ou du **moment résultant** :

L'effet principal d'un champ extérieur, uniforme ou non, sur un dipôle est de l'orienter suivant les lignes de champ : on parle d'**EFFET D'ORIENTATION**.

Quand le champ n'est pas uniforme, on prend en compte l'effet de la **résultante** $\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\vec{p}.\vec{E}_{ext})$.
Prenons l'exemple :

- d'un champ électrostatique $\vec{E}_{ext} = E(x)\overrightarrow{u_x}$ avec $E(x) > 0$
- et d'un dipôle de même direction et de même sens que ce champ : $\vec{p} = p\overrightarrow{u_x}$ avec $p > 0$

Dans ce cas, $\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\vec{p}.\vec{E}_{ext}) = \overrightarrow{grad}(p.E(x)) = p.\frac{dE}{dx}\overrightarrow{u_x}$.

La composante $\vec{F}.\overrightarrow{u_x}$ est du signe de $\frac{dE}{dx}$: la force est orientée dans le sens des champs croissants.

Un dipôle orienté dans le sens du champ est attiré vers les zones de champ intense : on parle d'**EFFET DE DEPLACEMENT**.

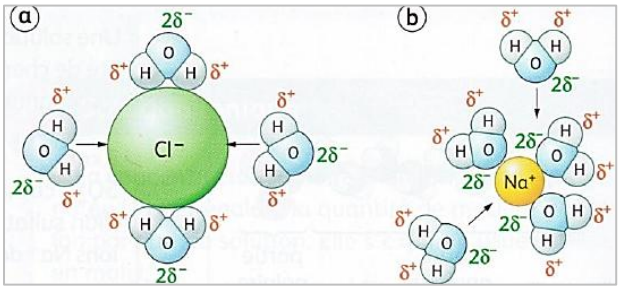
→ *Exploitation de l'expression de l'énergie potentielle $E_p = -\vec{p}.\vec{E}_{ext}(O)$ pour justifier les effets d'orientation et de déplacement.*

Le mouvement du dipôle s'effectue dans le **sens de diminution de l'énergie potentielle**.

E_p est minimale lorsque $\vec{p}$ est dans la direction et le sens de $\vec{E}_{ext}(O)$ (1) et lorsque $\left\|\vec{E}_{ext}(O)\right\|$ est maximal (2).

(1) correspond à l'effet d'orientation
(2) correspond à l'effet de déplacement : le dipôle doit se trouver en O où le champ est intense.

→ Effets d'orientation et de déplacement appliqués à la chimie : **solvatation des ions**, cf 1e année.



NB § A.3 : **L'action d'un champ électrostatique extérieur** (énergie potentielle, résultante des forces, moment) subie par un dipôle s'exprime en fonction du **moment dipolaire** $\vec{p}$, c'est donc bien la grandeur caractéristique du dipôle.

B) Dipôle magnétique

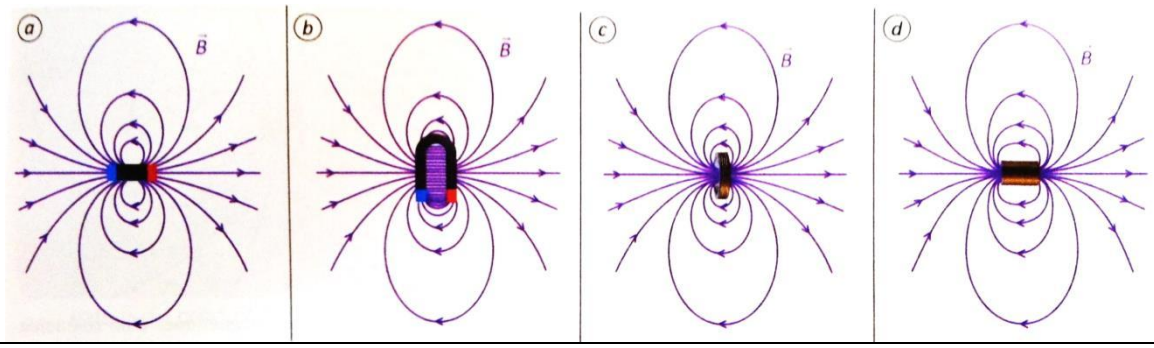
1) Définitions et approximation dipolaire

a) Similitudes entre les cartes de champs magnétiques à grande distance *(rappels MPSI)*

Voici les **cartes de champs magnétiques « vus de loin »** d'un aimant droit (a), d'un aimant en U (b), d'une bobine plate (c) et d'un solénoïde (d).

Quoique très différentes au voisinage des sources de champ magnétique, **les lignes de champ forment à grande distance des boucles parfaitement similaires**.

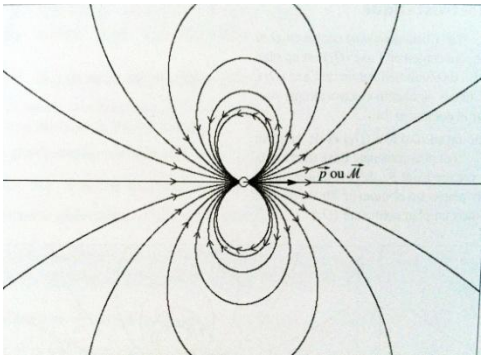
Par ailleurs, ces lignes de champ ressemblent également aux lignes de champ électrostatique à grande distance d'un dipôle électrostatique.



En somme, tous ces dispositifs sont équivalents à grande distance à un dispositif de base : une boucle de courant plane.

Afin de comparer ces dispositifs, on introduit leur **moment magnétique** $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$.





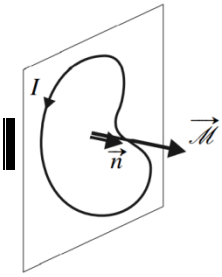
b) Moment dipolaire – ODG *(rappels MPSI)*

◆ **Moment magnétique d'une boucle de courant plane**

Soit une boucle plane parcourue par un courant I constant.

On oriente la boucle dans le sens de I.

On définit le **MOMENT MAGNETIQUE D'UNE BOUCLE DE COURANT PLANE :**



$$\boxed{\overrightarrow{\mathfrak{M}} = I.S\,\vec{n} = I.\vec{S}}$$

où le vecteur surface $\vec{S} = S\,\vec{n}$

avec S la surface délimitée par la boucle

et $\vec{n}$ le vecteur unitaire normal à cette surface et orienté selon la règle de la main droite.

⇨ $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$ est perpendiculaire au plan de la boucle ;

⇨ $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$ est orienté selon la règle de la main droite à partir de l'orientation de I ;

⇨ $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\| = \mathfrak{M} = |I|.S.$

USI de $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\|$: $A.m^2$

NB : Dans le cas d'un enroulement de fil, le moment magnétique est la somme des moments magnétiques des spires constituant l'enroulement. En particulier, le moment magnétique d'une bobine comportant N spires identiques de surface S est : $\overrightarrow{\mathfrak{M}} = N.I.S\,\vec{n}$

◆ **ODG**

- L'ODG du moment magnétique d'un atome est le magnéton de Bohr : $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} \approx \mathbf{10^{-23}\ A.m^2}$

➲ Exercice classique : Détermination de l'expression du magnéton de Bohr

On considère le modèle semi-classique de l'atome de Bohr, dans lequel, un électron a un mouvement circulaire de rayon r et uniforme de vitesse V, autour d'un noyau ponctuel fixe, situé en O.

i) Établir l'expression du moment cinétique $\overrightarrow{L_O}$ de l'électron par rapport à O et le moment magnétique $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$ associé à son mouvement orbital (pour cela, on associe au mouvement orbital de l'électron une boucle de courant d'intensité I à exprimer en fonction de e, r et V).

ii) Montrer que $\overrightarrow{\mathfrak{M}} = \gamma\overrightarrow{L_O}$ en donnant l'expression de γ (appelé rapport gyromagnétique).

Bohr a introduit une hypothèse de quantification du module du moment cinétique $\overrightarrow{L_O}$:

$$\left\|\overrightarrow{L_O}\right\| = n\hbar$$

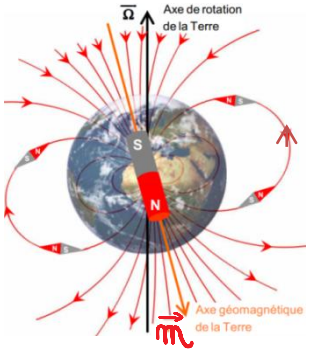
avec $n \in \mathbb{N}^*$ et $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05.10^{-34}$ J. s est la constante de Planck réduite.

iii) En déduire que la quantification du moment cinétique conduit à définir un moment magnétique élémentaire μ_B : il s'agit du magnéton de Bohr.

- Pour une spire de 10 cm de diamètre parcourues par 1 A, on a $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\| \approx \mathbf{8\ mA.m^2}$.
- Pour un aimant de 1 cm^3, $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\| \approx \mathbf{1\ A.m^2}$.

Ce moment magnétique est grand, si on le compare à celui d'une bobine plate de dimensions équivalentes comportant 10 spires. Par exemple, pour un produit surface × épaisseur = 2 cm^2 × 0,5 cm, la bobine devrait être parcourue par 500 A pour avoir le même moment magnétique que l'aimant de même volume.

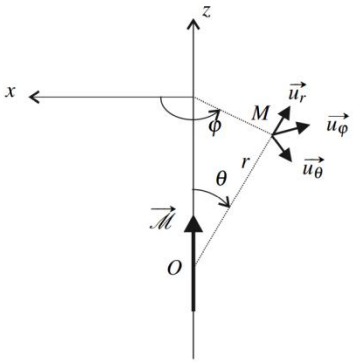
- Du point de vue magnétique, la Terre se comporte comme un dipôle magnétique qui serait situé en son centre, de moment $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}_{Terre}}\right\| \approx \mathbf{8.10^{22}\ A.m^2}$.



Pour un circuit parcouru par un courant électrique, $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\|$ dépend de l'intensité I du courant et de la surface du circuit. Pour un aimant, $\left\|\overrightarrow{\mathfrak{M}}\right\|$ dépend du matériau et de son volume *(cf détails en TD)*.

c) Cadre de l'étude : approximation dipolaire

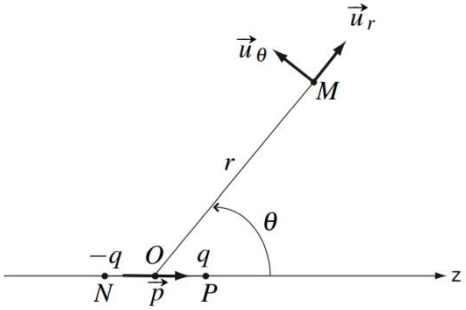
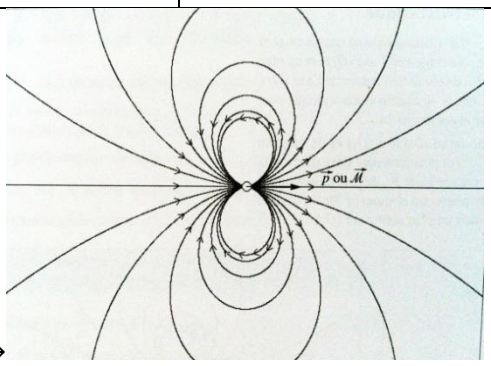
On considère un dipôle magnétique, de moment magnétique $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$, placé en O.
On note a la taille caractéristique du dipôle magnétique.
Dans la suite, on étudie les propriétés du dipôle en **coordonnées sphériques** de centre O et tel que l'axe (Oz) est de même direction et de même sens que $\overrightarrow{\mathfrak{M}}$.



On étudie le dipôle dans le cadre de l'**APPROXIMATION DIPOLAIRE** i.e. qu'on étudie les propriétés du dipôle en des points M tels que $\boldsymbol{r = OM \gg a}$.
Autrement dit, on étudie le dipôle à une distance r grande devant sa taille caractéristique a.

*Dans les § suivants, on s'appuie sur l'**analogie** entre dipôle électrostatique et dipôle magnétique pour donner des résultats concernant le dipôle magnétique.*

2) Champ magnétique créé par un dipôle magnétique

	Dipôle électrostatique	Dipôle magnétique
Moment dipolaire	$\boldsymbol{\vec{p} = q\overrightarrow{NP}}$ 	$\boldsymbol{\overrightarrow{\mathfrak{M}} = I.\vec{S}}$
Constante associée	$\frac{1}{\varepsilon_0}$	μ_0
Approximation dipolaire = $(*)$	$\boldsymbol{r = OM \gg a}$	
Champ créé dans $(*)$	$\vec{E}(M) = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(2cos\theta\overrightarrow{u_r} + sin\theta\overrightarrow{u_\theta})$ $\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 OM^5}(3(\vec{p}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\vec{p})$	$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0\mathfrak{M}}{4\pi r^3}(2cos\theta\overrightarrow{u_r} + sin\theta\overrightarrow{u_\theta})$ $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi OM^5}(3(\overrightarrow{\mathfrak{M}}.\overrightarrow{OM})\overrightarrow{OM} - OM^2.\overrightarrow{\mathfrak{M}})$
Topographie du champ créé dans $(*)$	Figure à savoir reproduire ! → 	

L'expression du champ magnétique créé par un dipôle est admise et elle sera fournie dans les exercices.

3) Action d'un champ magnétostatique extérieur sur un dipôle magnétique

	Dipôle électrostatique	**Dipôle magnétique**
Moment dipolaire	$\vec{p} = q\overrightarrow{NP}$ **placé en** O	$\overrightarrow{\mathfrak{M}} = I.\vec{S}$ **placé en** O
Approximation dipolaire = $(*)$	***distance caractéristique de variation du champ extérieur*** $\gg a$	
a) Actions d'un champ extérieur **uniforme**		
→ Résultante	Nulle ⇨ **Couple de forces**	
→ Moment	$\vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{ext}$	$\vec{\Gamma} = \overrightarrow{\mathfrak{M}} \wedge \vec{B}_{ext}$ *Cf 1e année (spire rectangulaire)*
→ Energie potentielle	$E_p = -\vec{p}.\vec{E}_{ext}$	$E_p = -\overrightarrow{\mathfrak{M}}.\vec{B}_{ext}$
→ Effet qualitatif	**D'orientation : orientation du dipôle selon les l.d.c extérieur**	
b) Actions d'un champ extérieur **non uniforme** dans $(*)$		
→ Energie potentielle	$E_p = -\vec{p}.\vec{E}_{ext}(O)$	$E_p = -\overrightarrow{\mathfrak{M}}.\vec{B}_{ext}(O)$
→ Résultante	$\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\vec{p}.\vec{E}_{ext})$	$\vec{F} = \overrightarrow{grad}(\overrightarrow{\mathfrak{M}}.\vec{B}_{ext})$
→ Moment	$\vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{ext}(O)$	$\vec{\Gamma} = \overrightarrow{\mathfrak{M}} \wedge \vec{B}_{ext}(O)$
→ Effets qualitatifs	**D'orientation : orientation du dipôle selon les l.d.c extérieur** **De déplacement : dipôle attiré vers les zones de champ extérieur intense**	
Applications	⇨ Solvatation des ions	⇨ Principe de la boussole Expérience d'Oersted https://phymain.unisciel.fr/deux-experiences-a-la-facon-dorsted/index.html *arrêt au bout d'une minute* ⇨ Effet moteur d'un champ magnétique tournant, cf annexe ⇨ Précession

L'expression de la force magnétique subie par un dipôle est admise et elle sera fournie dans les exercices.

Rq : Si le dipôle magnétique est un circuit parcouru par un courant alors l'action magnétique correspond aux forces de Laplace.

Annexe – Effet moteur d'un champ magnétique tournant

Obtention d'un champ magnétique tournant

◆ Ex avec deux bobines :

On réalise le dispositif ci-contre (le circuit permettant de créer les deux courants n'est pas représenté).

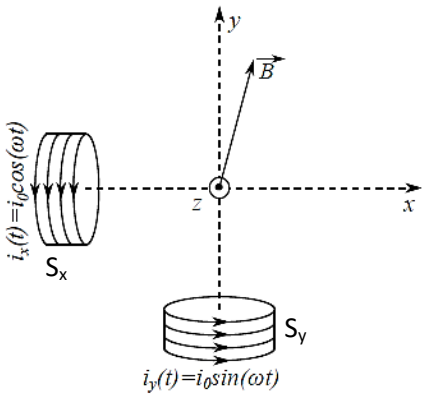
Deux solénoïdes S_x et S_y identiques d'axes orthogonaux entre eux, créent chacun un champ magnétique en O.

Les intensités circulant dans les deux bobines varient sinusoïdalement dans le temps, avec la même amplitude i_0 et la même pulsation ω mais les deux courants sont en quadrature de phase.

S_x crée le champ $\overrightarrow{B_x} = Ki_0\cos(\omega t)\overrightarrow{u_x}$

et S_y crée le champ $\overrightarrow{B_y} = Ki_0\sin(\omega t)\overrightarrow{u_y}$

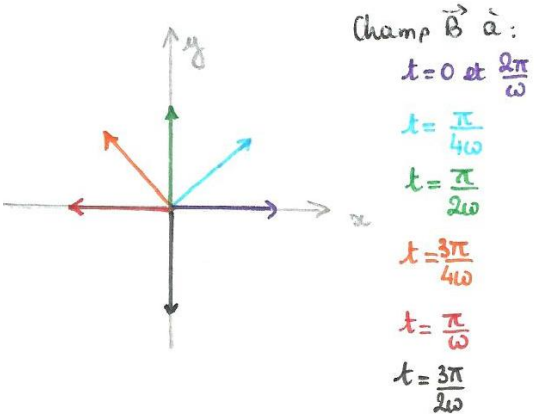
avec K un facteur qui dépend de la géométrie des solénoïdes.



Le champ résultant $\vec{B}$ est la somme vectorielle $\overrightarrow{B_x} + \overrightarrow{B_y}$ (principe de superposition).

On comprend que le champ ainsi créé est un champ tournant en le représentant aux instants suivants :

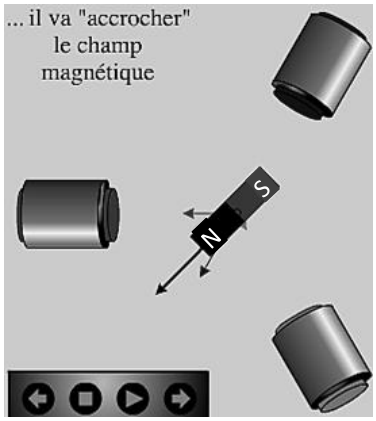
$$t = 0, \frac{\pi}{4\omega}, \frac{\pi}{2\omega}, \frac{3\pi}{4\omega}, \frac{\pi}{\omega}, \frac{3\pi}{2\omega}, \frac{2\pi}{\omega}$$



◆ On peut aussi réaliser un champ tournant avec 3 bobines dans lesquelles circulent des courants déphasés de 120° (soit 2π/3 rad) : déphasage de i_2 par rapport à i_1 = 120° ; déphasage de i_3 par rapport à i_2 = 120° et déphasage de i_1 par rapport à i_3 = 120°. On parle de courant triphasé qu'EDF délivre dans le secteur industriel.

Effet moteur

La tendance à l'alignement du moment magnétique avec le champ qu'il subit est utilisée pour les moteurs à courant alternatif dans lesquels un **stator crée un champ $\vec{B}$ tournant** autour d'un axe. Le rotor du moteur est un dipôle magnétique (aimant ou bobine alimentée en continu). Soumis au couple des forces de Laplace agissant sur son moment magnétique, le **rotor tourne en suivant $\vec{B}$** et **entraîne un arbre moteur**. C'est le principe des **moteurs synchrones**.



Cf vidéo de l'expérience avec trois bobines sont alimentées en courant triphasé de fréquence f = 50 Hz : www.youtube.com/watch?v=xwRPAGrgYSM