Induction &
Forces de Laplace

Objectifs :

- Topographie du champ magnétique. Réalisation de champs.
- Notion de Flux & induction : Loi de Lenz et Faraday.
- Application aux circuits & conversion : transformateur.
- Force de Laplace.
- Applications aux machines électriques.

Induction 2

Actions d'un champ magnétique

- expliquer l'origine de la force de Laplace
- Rail de Laplace (puissances mises en jeu)
- Spire rectangulaire (moment, couple etc...)
- généralisation à tout moment (aimant) equilibre et stabilité
- Expérience de champ tournant

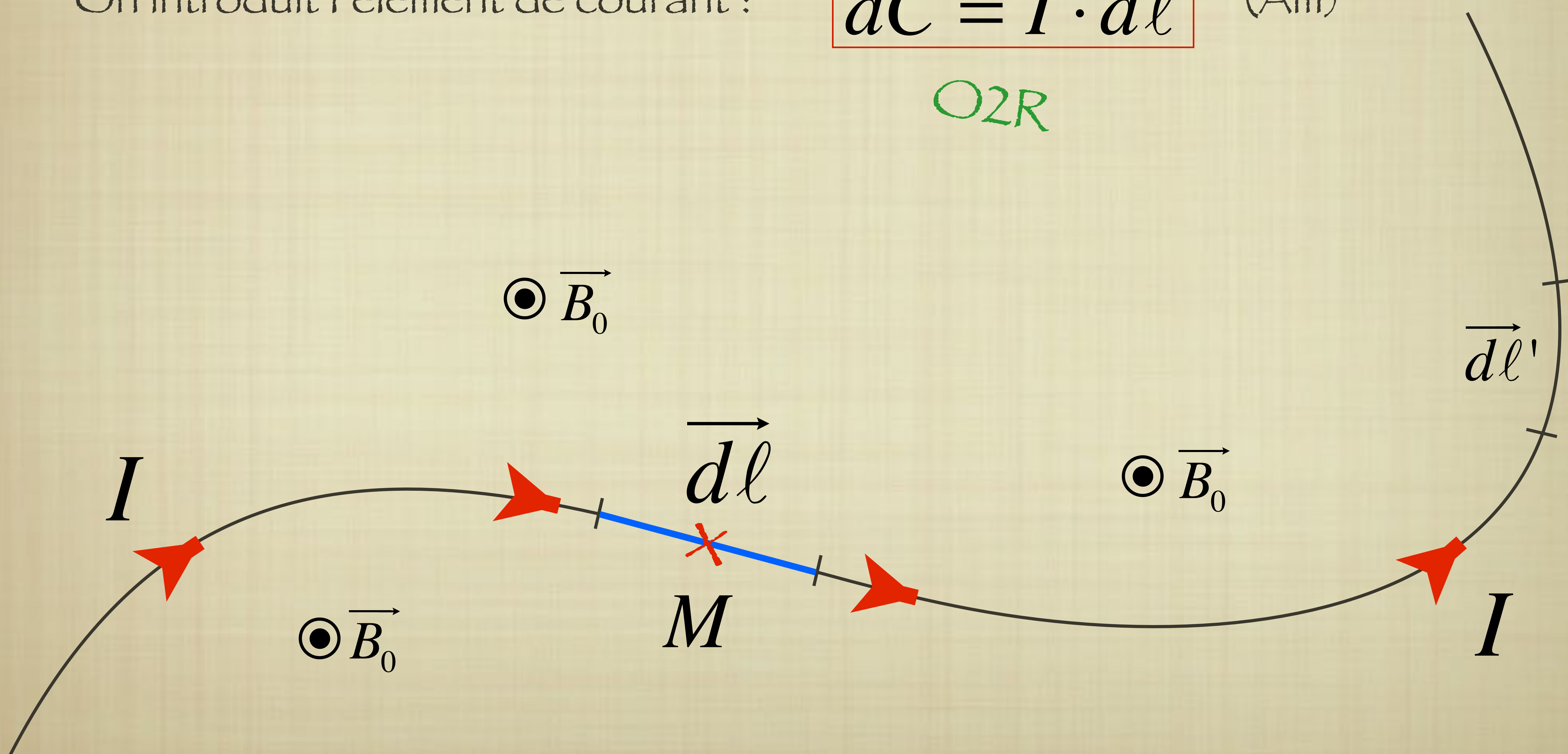
1 - La force de Laplace

α - champs magnétiques propre et extérieur

On considère ici un fil électrique «plongé» dans un champ magnétique extérieur $\overrightarrow{B_0}$. Soit $\overrightarrow{d\ell}$ un élément de fil parcouru par un courant I :

On introduit l'élément de courant : $$\boxed{d\vec{C} = I \cdot \overrightarrow{d\ell}}$$ (Am)

O2R



L'élément de fil «voit» le champ extérieur, mais également le champ magnétique créé par le fil ou champ propre, c-à-d le champ produit au point M par tous les autres éléments de courant $\vec{d\ell}'$ qui constituent le fil.

C2M

On considère qu'en M, l'élément de fil $\vec{d\ell}$ ne voit pas son propre champ.

Rq : En réalité, un fil (ligne) n'existe pas et il faut calculer le champ au sein d'un volume matériel. Un élément de courant ponctuel n'a pas de sens matériellement. C'est un modèle.

C2M

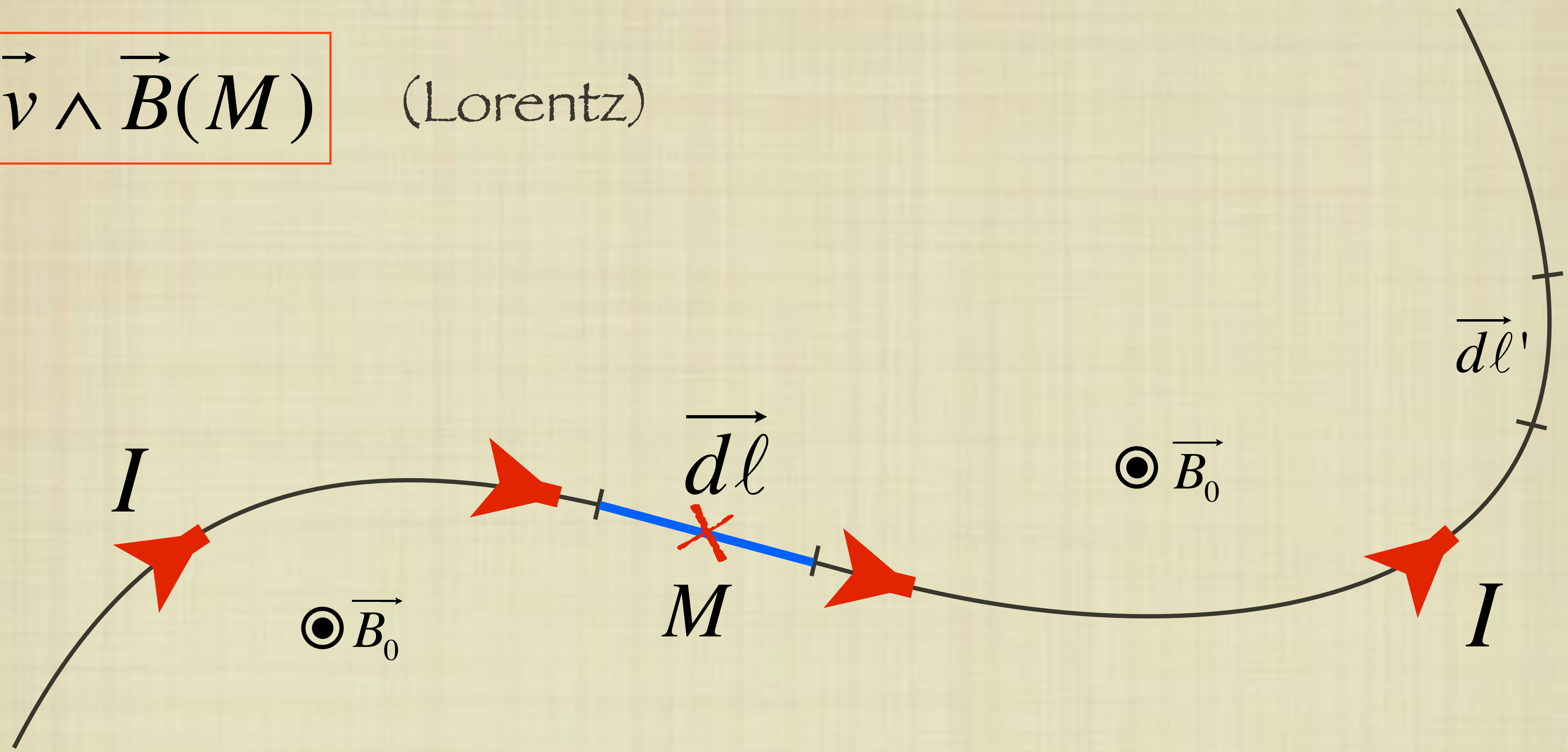
Le champ propre champ dépend de la forme du fil et varie dans l'espace. Différents points du fil ne voient donc pas le même champ propre produit par tous les autres éléments constitutifs du fil.

Le plus souvent, le champ propre est faible, et il n'est pas pris en compte dans les calculs, du moins dans un premier temps.

β - Force de Laplace linéique

En présence d'un champ magnétique, les particules en mouvement dans le fil subissent la force magnétique de Lorentz. Soit dq une charge passant en M :

$$\boxed{d\vec{F} = dq\vec{v} \wedge \vec{B}(M)}$$ (Lorentz)



hyp : fil immobile

On peut en déduire la relation entre force, courant et champ magnétique, c-à-d l'expression de la force de Laplace :

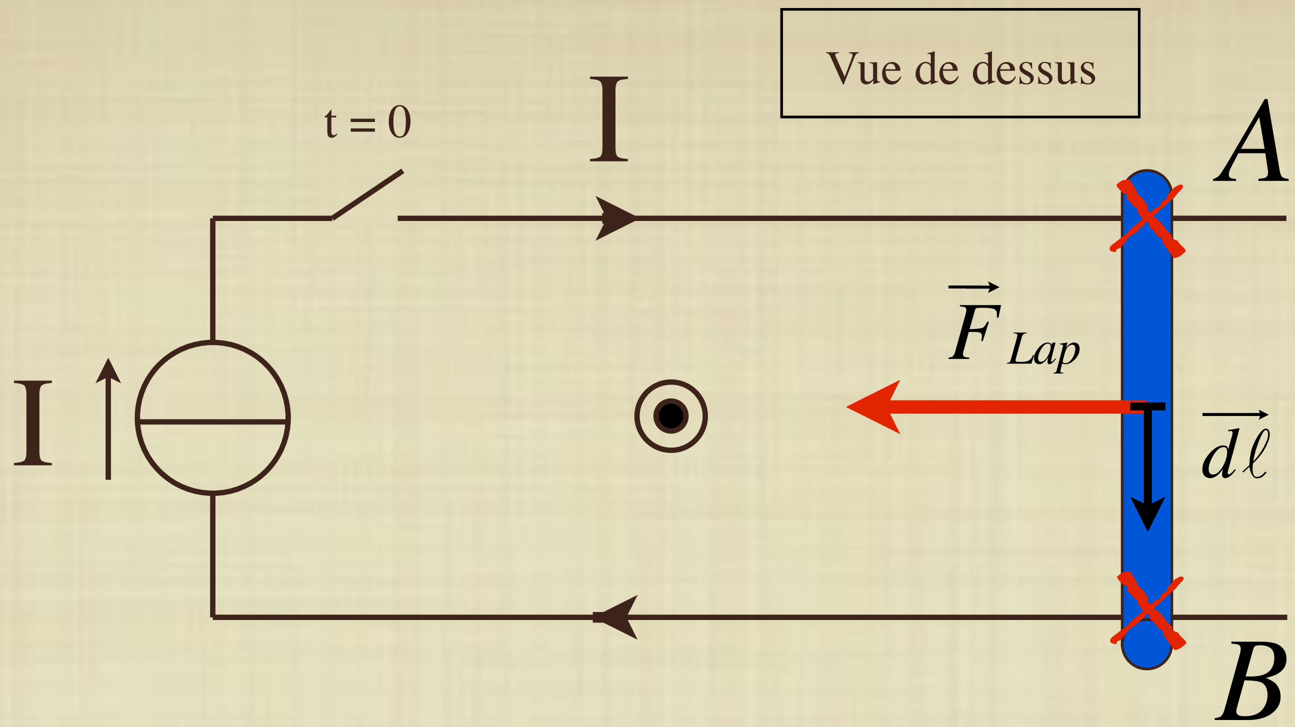
Ecrire que : $\vec{v} = \dfrac{d\vec{\ell}}{dt}$ $\qquad I = \dfrac{dq}{dt}$

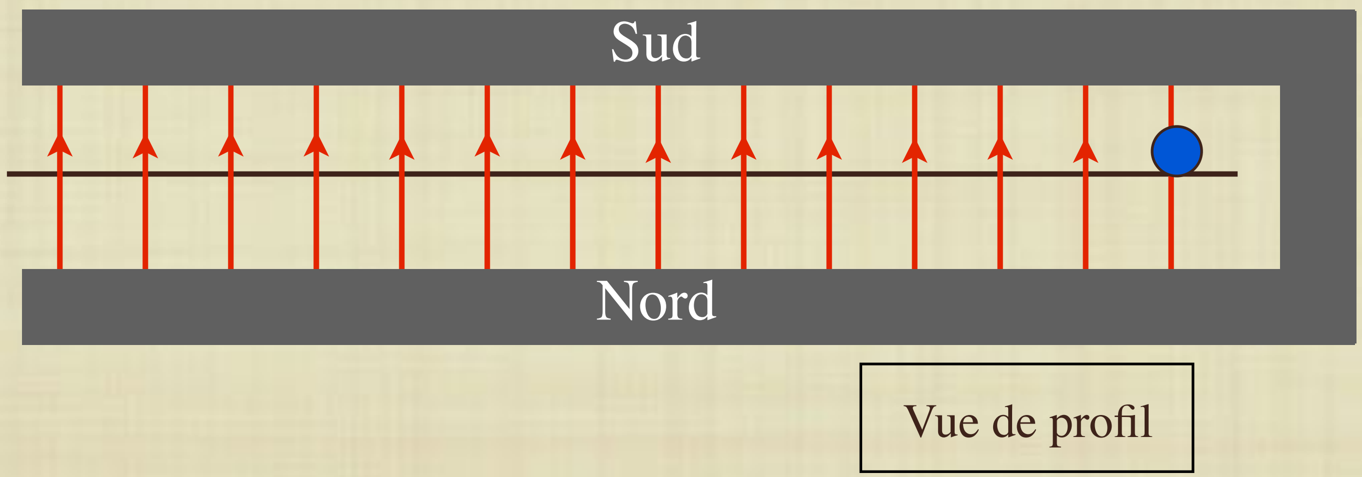
et obtenir : $\boxed{d\vec{F}_{Laplace} = I \; d\vec{\ell} \wedge \vec{B}}$

Pierre-Simon Laplace (1749–1827)

Dans la suite de notre étude, le champ propre sera négligé et on considérera le champ magnétique comme uniforme. Soit :

γ - Expérience des rails de Laplace





Observation : Le barreau accélère vers la gauche

=> Nous avons tous les éléments pour créer un moteur à l'électricité !

Etude dynamique simple

- Posez une base cartésienne (x vers la droite)
- Calculez le produit vectoriel
- intégrez le différentiel de Force

Pour obtenir :

$$\boxed{\overrightarrow{F}_{Laplace} = \int_A^B d\overrightarrow{F}_{Laplace} = -B_0 IL\overrightarrow{e_x}}$$

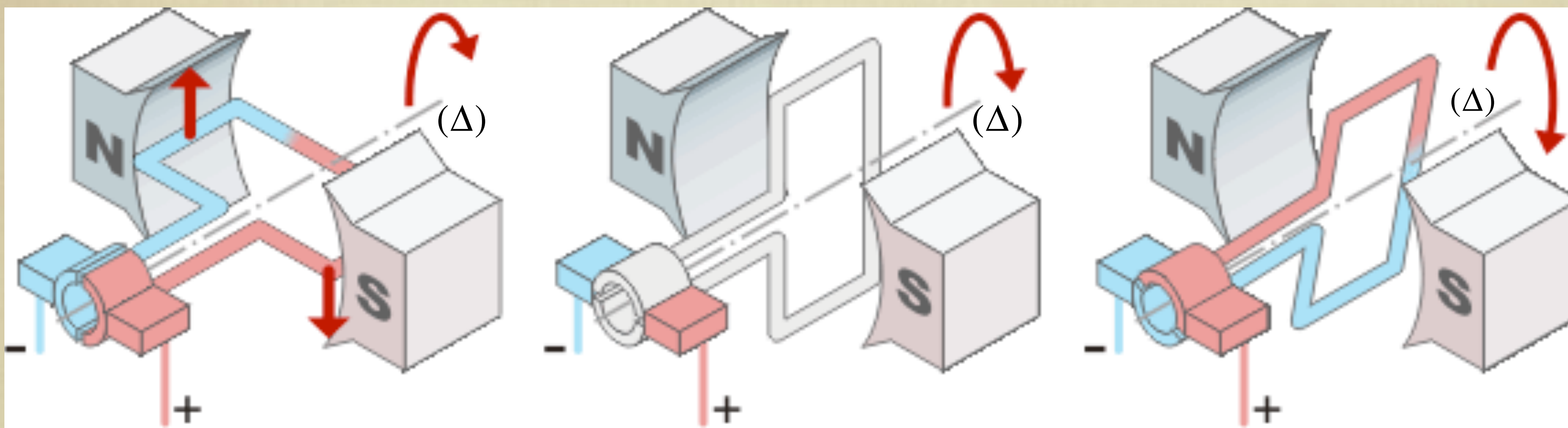
$$\boxed{W_{\overrightarrow{F}_{Lap}} = \overrightarrow{F}_{Laplace} . \left(-d\ d\overrightarrow{e_x}\right) = +B_0 ILd}$$

2 - Etude d'une spire de courant

α - Modélisation simple d'un moteur à courant continu

Réalisation du dispositif :

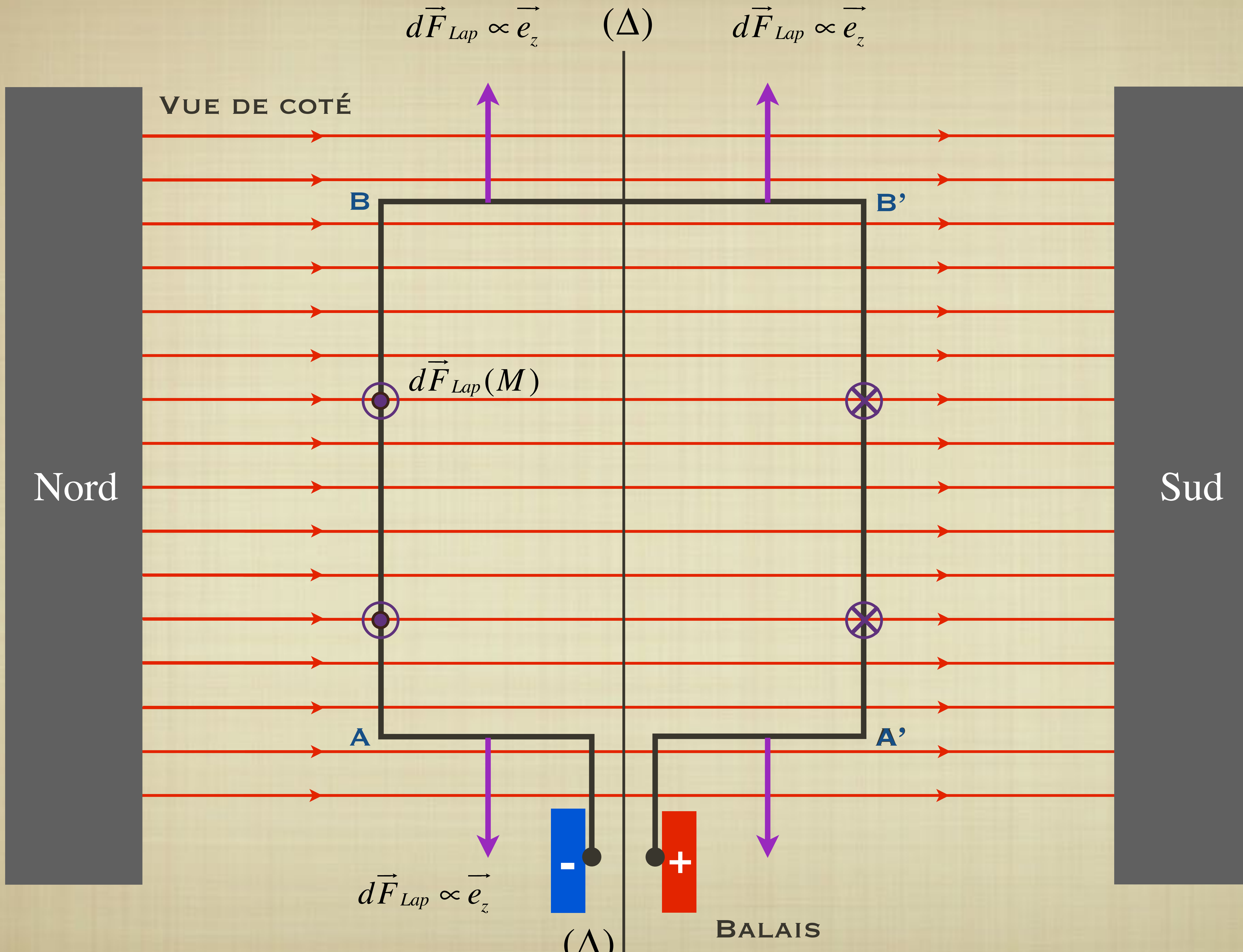
— Sera fait en classe —



Le dispositif, simple, est réalisé ici au moyen d'une spire rectangulaire tournant autour d'un axe Δ et parcourue par un courant I apporté par les balais + et -

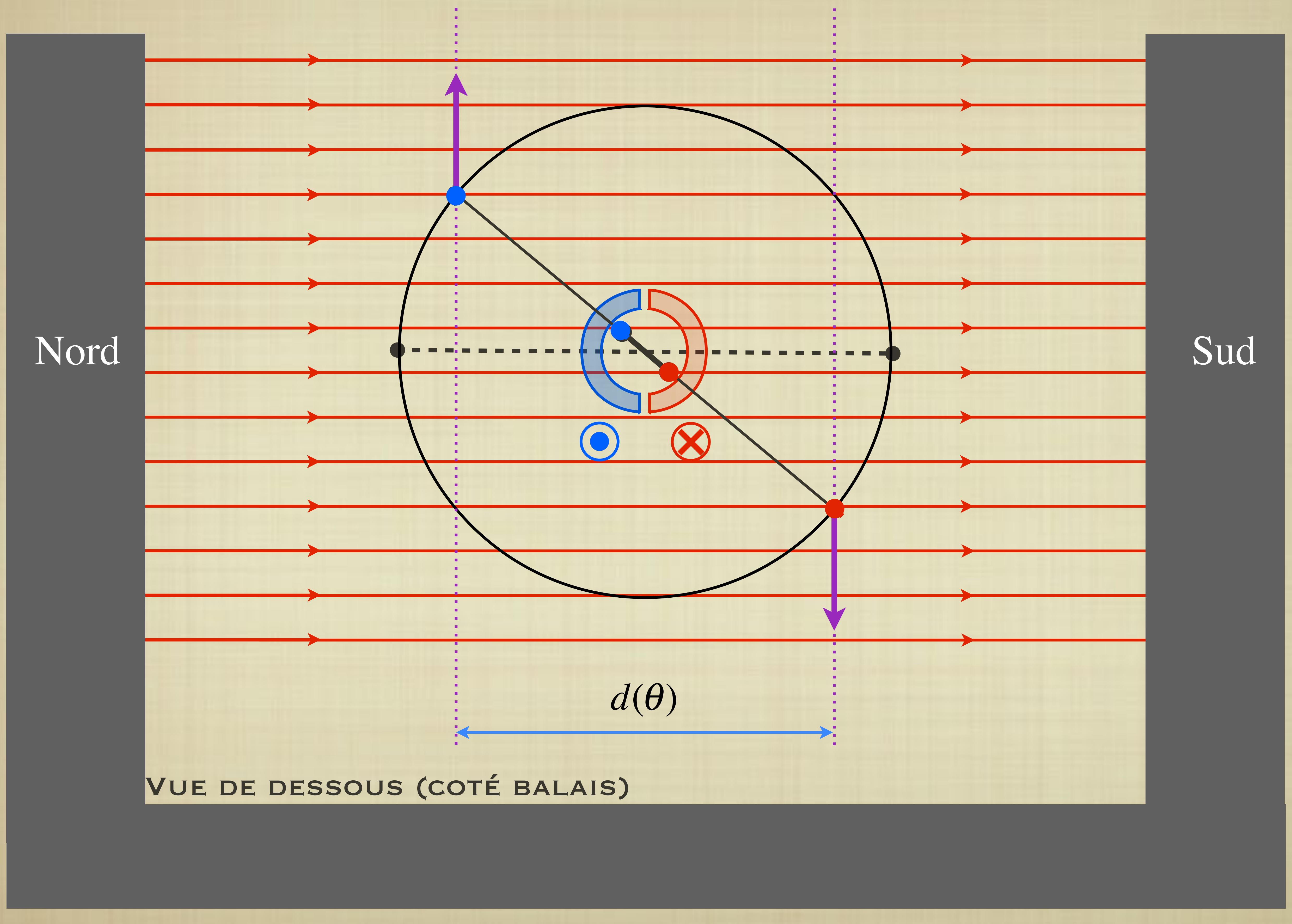
A chaque demi-tour, le contact électrique des balais est modifié pour que le sens du courant se renverse et que chaque pôle magnétique voit toujours le même courant.

Le champ magnétique est supposé ici uniforme entre les deux pôles.

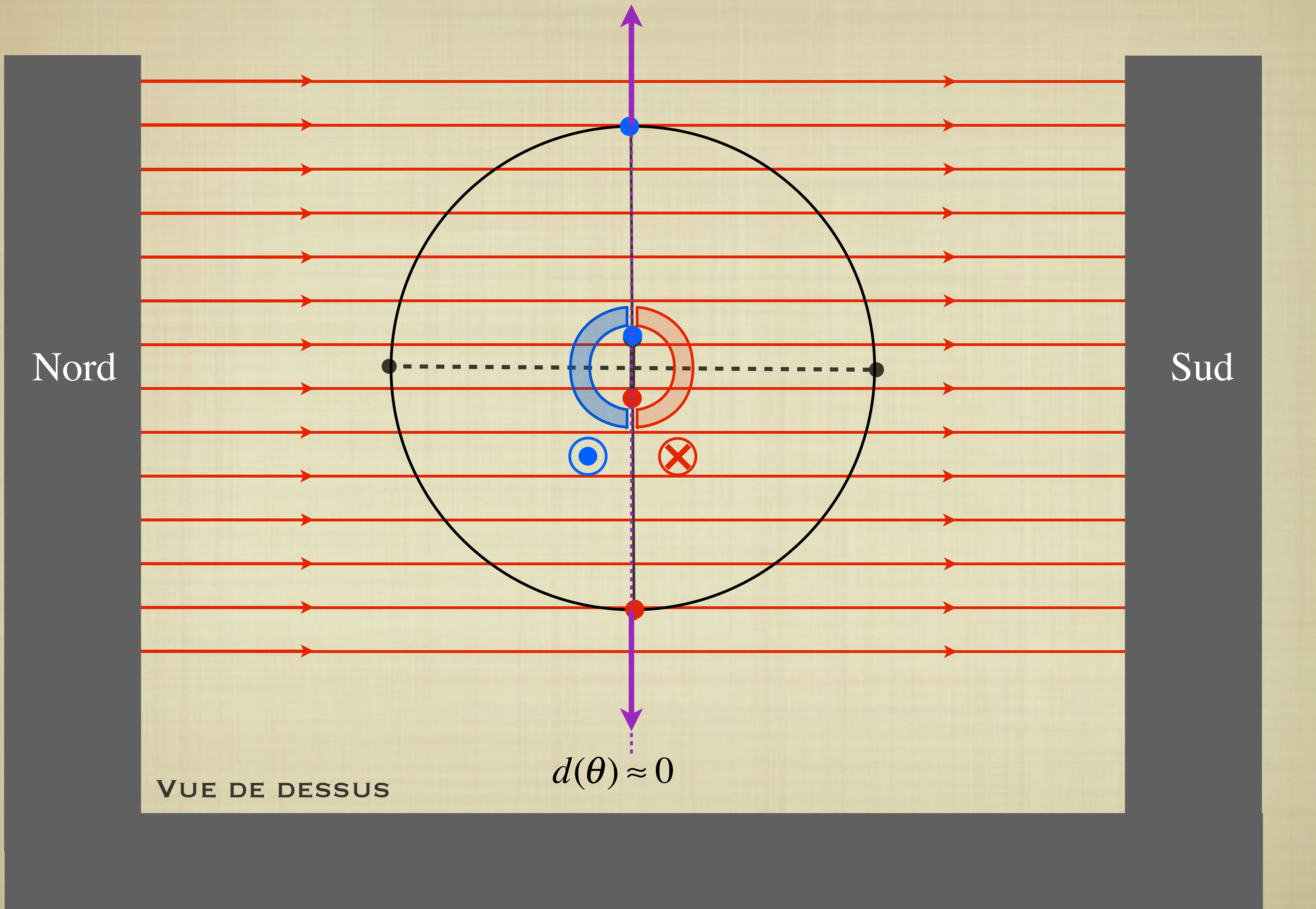


$d\vec{F}_{Lap} \propto \vec{e}_z$
(Δ)
$d\vec{F}_{Lap} \propto \vec{e}_z$
Vue de coté
B
B'
$d\vec{F}_{Lap}(M)$
Nord
Sud
A
A'
-
+
$d\vec{F}_{Lap} \propto \vec{e}_z$
(Δ)
Balais

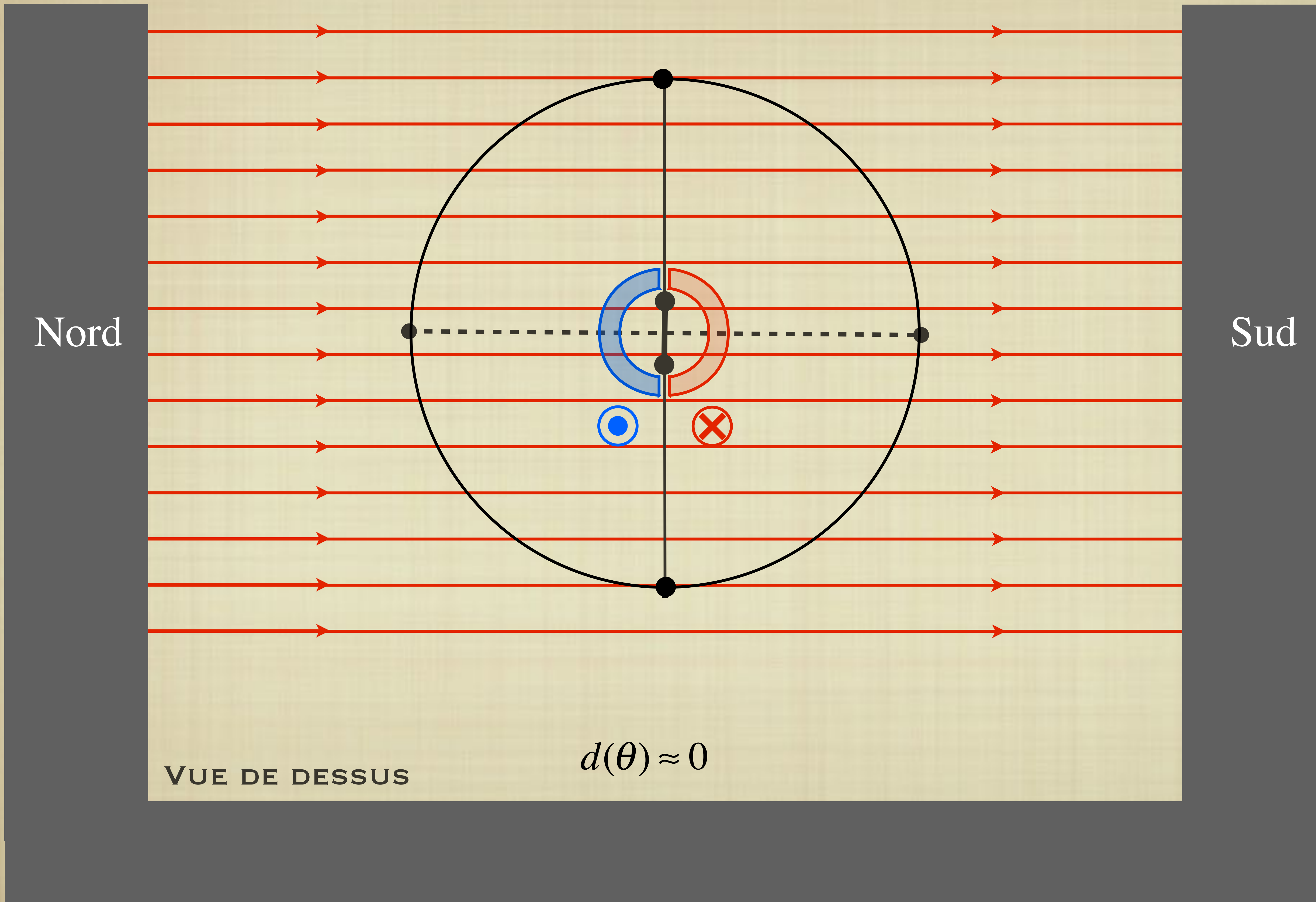
Principe du moteur à courant continu



Principe du moteur à courant continu



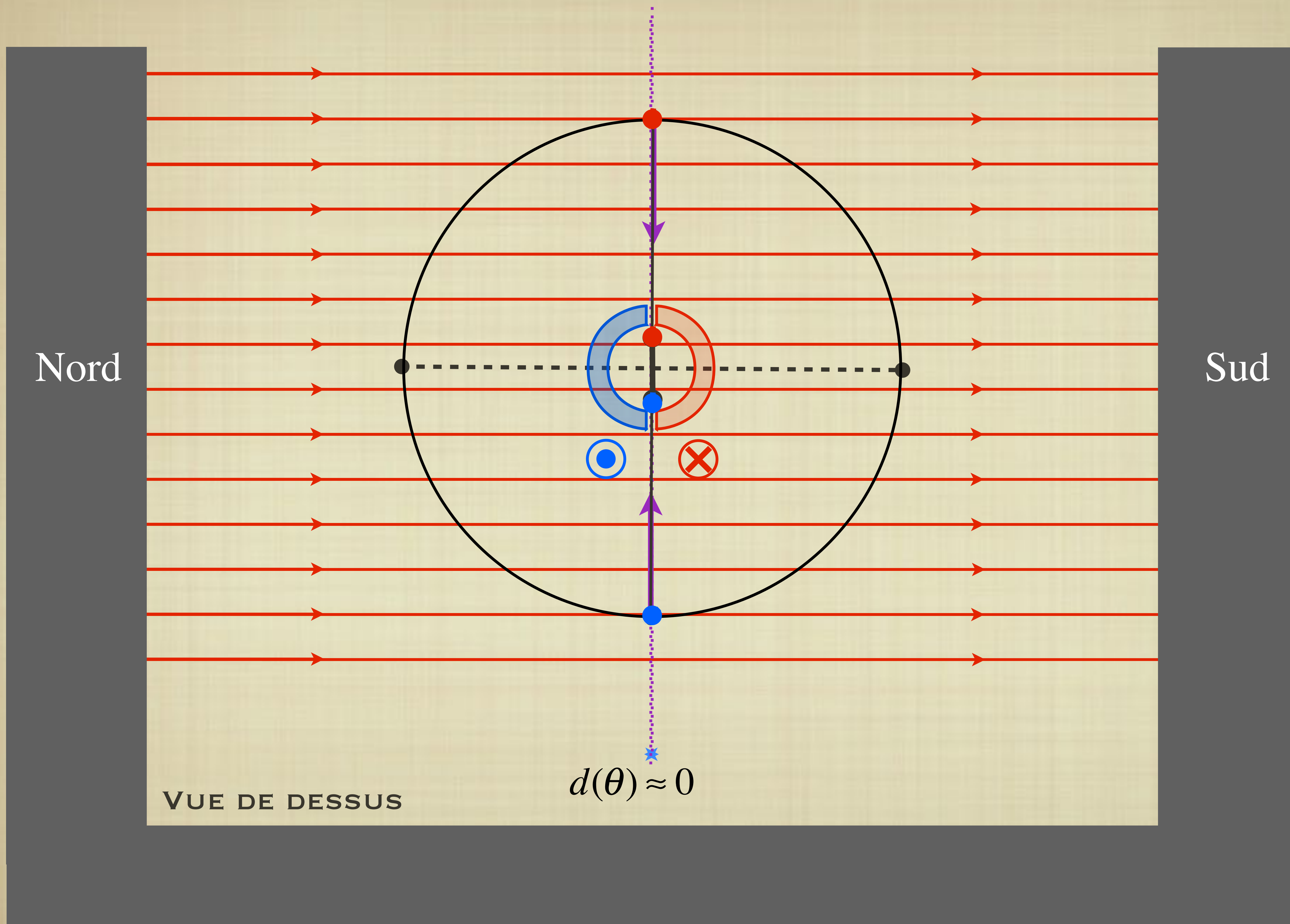
Inversion des contacteurs



Vue de dessus

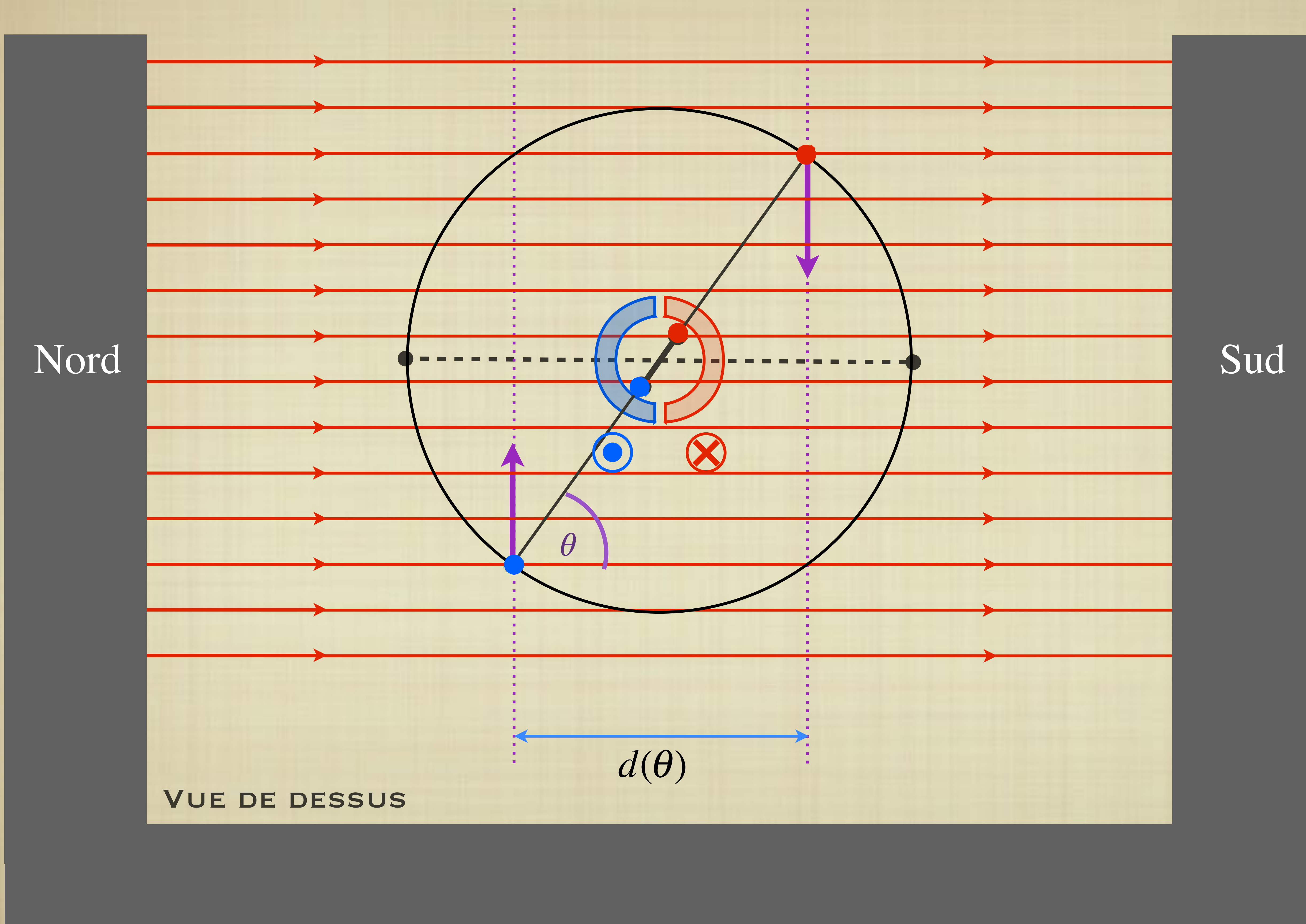
$$d(\theta) \approx 0$$

Principe du moteur à courant continu



Principe du moteur à courant continu

(—> schéma couple)



Calcul du couple moteur

— Sera fait en classe —

Version « chemin de traverse » : sans intégrale ni produit vectoriel
(Ou comment trouver la réponse au brouillon)

Sachant que la force de Laplace vaut toujours BIL dans un champ uniforme,
et que la distance entre les axes de forces d(θ) a calculer (cf schéma couple)

Trouver le couple moteur géométriquement : $\boxed{\Gamma_m = 2B_0ILR\cos(\theta)}$

Expression du couple en fonction du moment

— Sera fait en classe —

Ecrire le moment magnétique en fonction de S et I et du vecteur e_theta en M

Montrer que la formule suivante est correcte en 0 et pi/2

Pour theta qcq, montrer que la formule est valide en norme, direction et sens

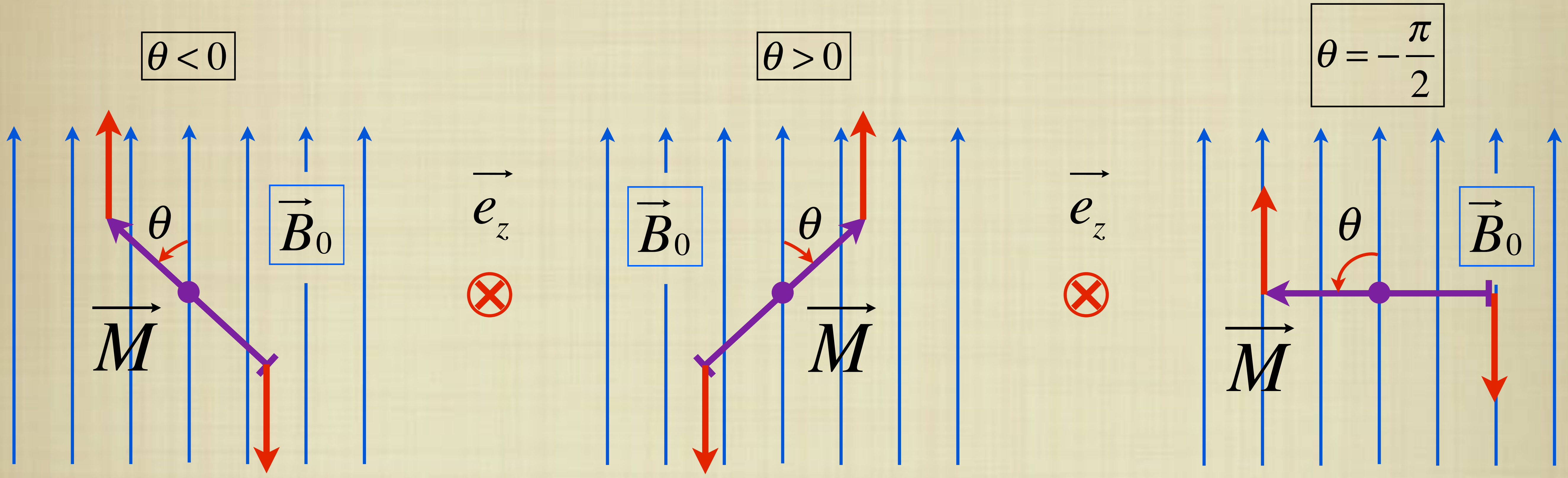
$$\boxed{\vec{\Gamma} = \overrightarrow{M} \wedge \vec{B}}$$

3 - Action d'un champ uniforme sur un moment

On généralise l'expression précédente à tout moment magnétique.

Le couple de rappel s'écrit :

$$\boxed{\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}}$$



$\Gamma = -MB_0 \sin(\theta) > 0$ $\qquad$ $\Gamma = -MB_0 \sin(\theta) < 0$ $\qquad$ $\Gamma_{MAX} = +MB_0$

$$\boxed{\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B} = -MB_0 \sin(\theta) \vec{e}_z}$$

Attention : la définition de θ a changé

Propriété :

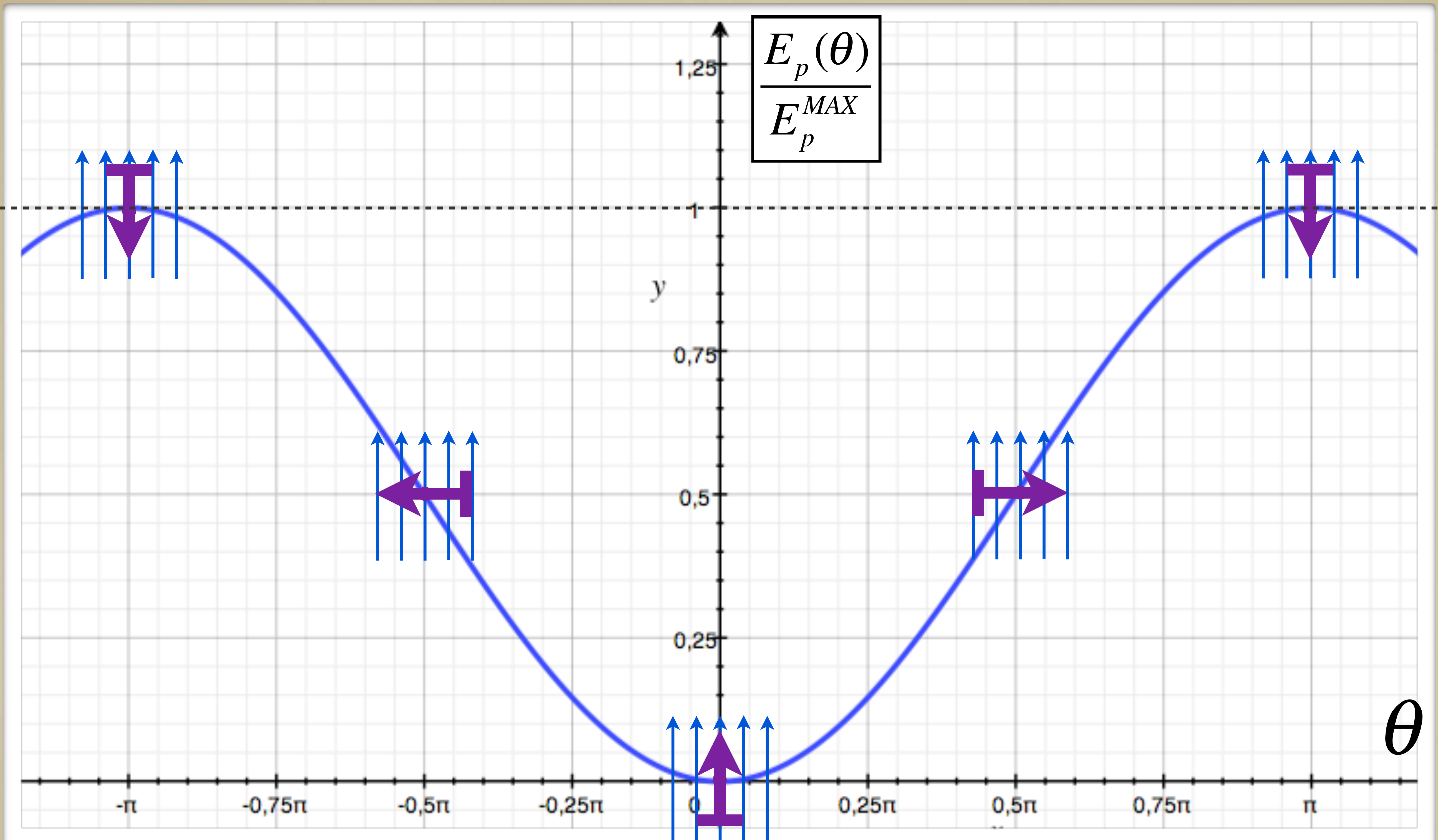
Le couple a pour conséquence de toujours ramener l'aimantation dans la direction du champ magnétique.

Construction de l'énergie potentielle

On peut relier cette propriété à l'énergie potentielle du dipôle ou de l'aimant, dans le champ magnétique :

$$dE_P = ?$$

Ecrire que : $dE_p = -dW = -\vec{\Gamma} \cdot d\theta \vec{e_z}$



$\frac{E_p(\theta)}{E_p^{MAX}}$
1,25
1
y
0,75
0,5
0,25
θ
-π
-0,75π
-0,5π
-0,25π
0
0,25π
0,5π
0,75π
π

Equilibre et stabilité :

1 - Recherche des positions d'équilibre

Utilisez les critères d'équilibre et de stabilité en fonction des dérivées de Ep

2 - Stabilité de l'équilibre ?

4 - Réalisation de champs tournants

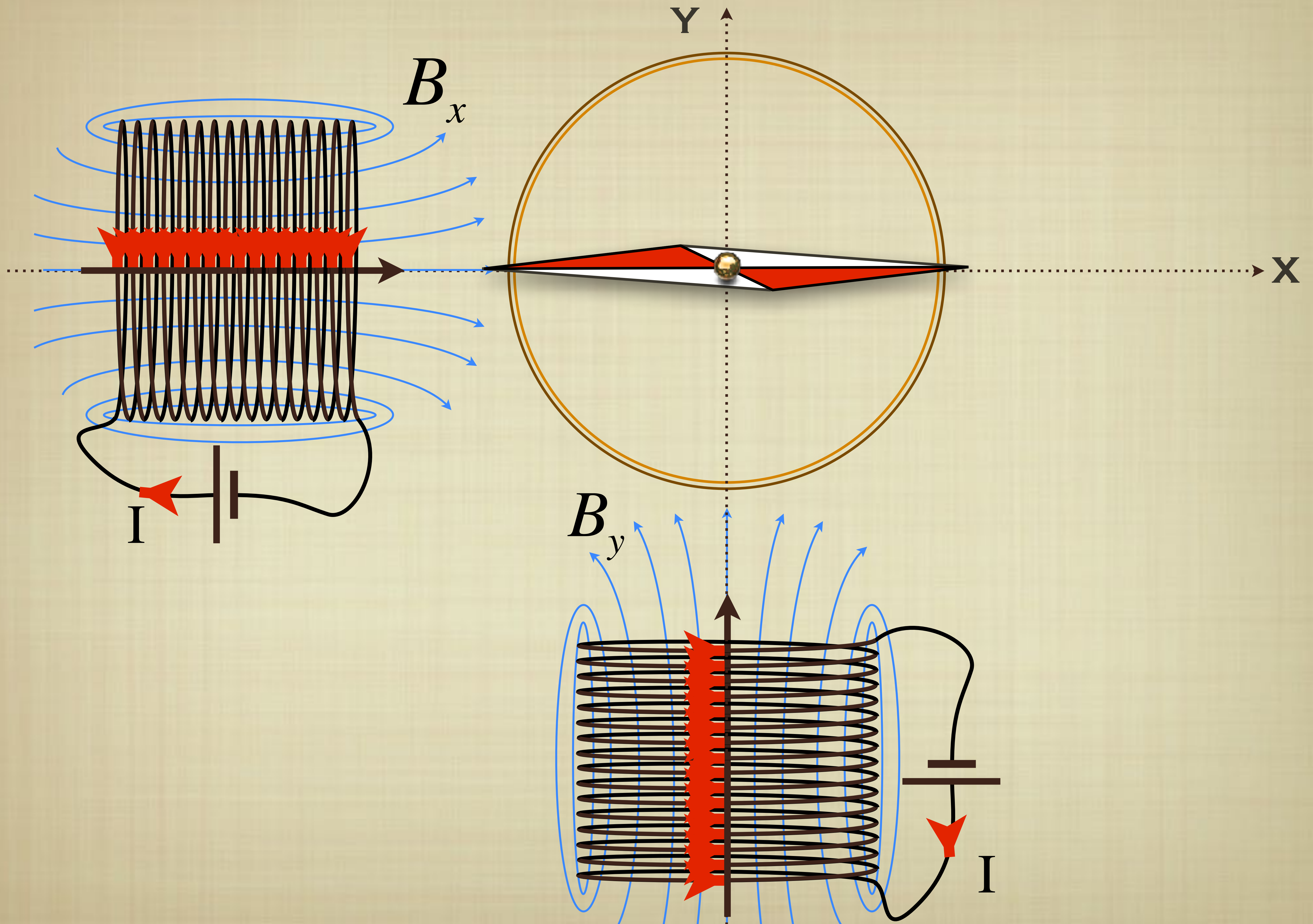
Il s'agit ici d'entraîner un rotor, sous la forme d'une aimantation [boussole, aimant, bobine], à l'aide d'un champ magnétique tournant :

On peut supposer d'après l'étude précédente que si le champ tourne, et puisque le moment tente toujours de s'aligner sur le champ B, l'aimantation produisant ce moment sera obligé de suivre le champ dans sa rotation.

On suppose donc pour simplifier que le moment produit par le champ sur le moment est suffisamment important pour vaincre l'inertie du rotor et lui imposer sa rotation.

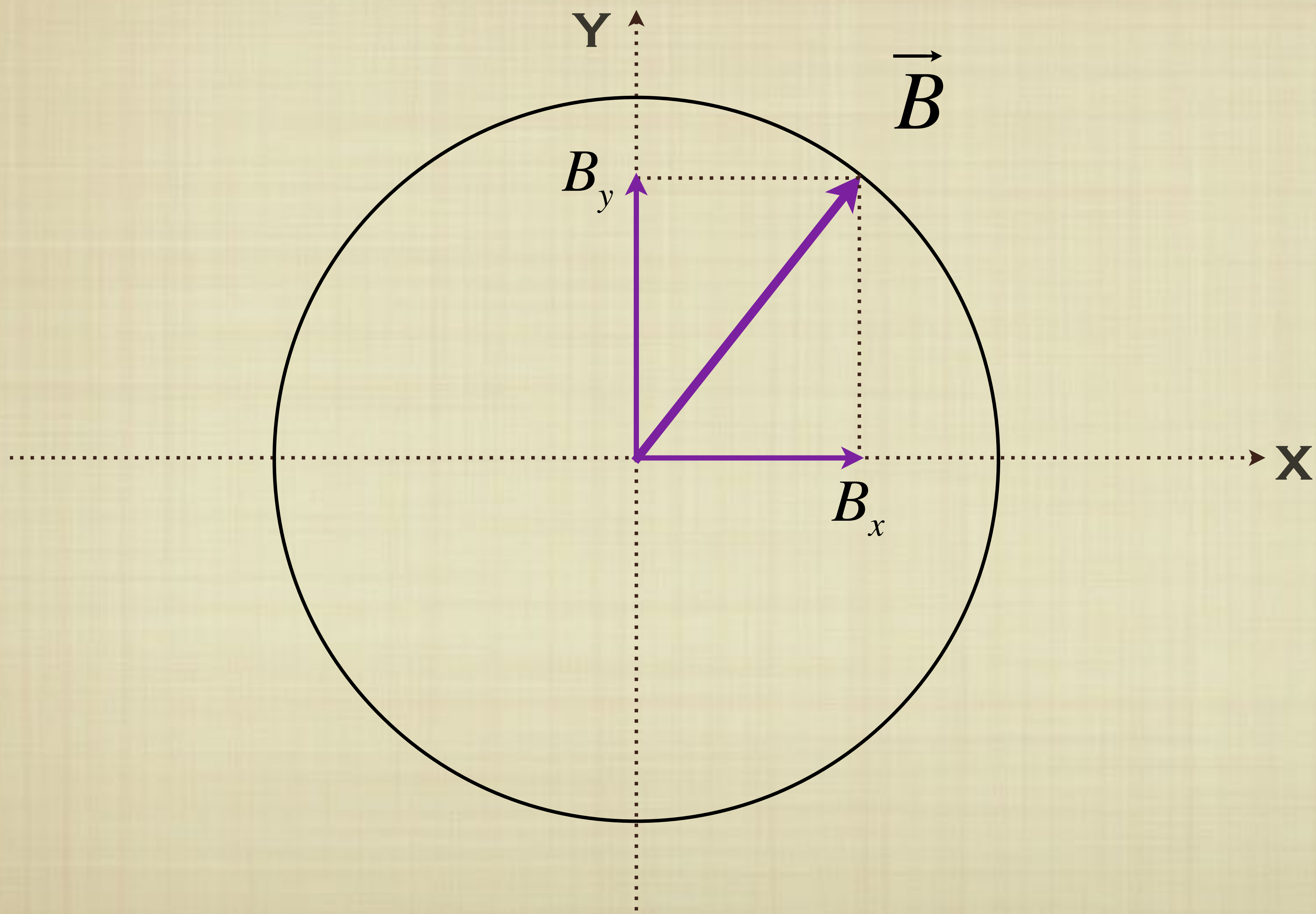
L'étude complète peut toutefois être faite simplement en posant le TMC.

Expérience :



Calcul du champ B :

Trouver Bx et By pour que B_0 tourne à la vitesse angulaire oméga



On comprend que la réalisation d'un champ tournant nécessite :

- une quadrature spatiale avance [B_y tourné de 90° par rapport à B_x]
- une quadrature retard de phase [B_y en retard de 90° par rapport à B_x]

Le champ ainsi obtenu tourne dans le sens direct à vitesse angulaire ω.