

# L'électrodynamique d'Ampère

André Koch Torres Assis

Université de Campinas – UNICAMP

Brésil

[www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)



André-Marie Ampère  
(1775-1836)



Poleyieux - Lyon

Dans tous les livres de physique :

Théorème d'Ampère :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

Puis Maxwell corrige Ampère en introduisant le courant de déplacement :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2} \frac{d\phi_E}{dt}$$

## Cependant:

- Le théorème « d'Ampère », même sans courant de déplacement, a été obtenue pour la première fois par Maxwell!
- Puis Maxwell s'est corrigé lui même, et non Ampère, en introduisant le courant de déplacement.
- Ampère n'a jamais écrit le théorème « d'Ampère » !
- Ampère n'a jamais travaillé avec le concept de champ magnétique !
- Ampère s'est battu explicitement CONTRE tout ce qui circulait autour d'un fil porteur de courant !

## Lois de force :

Newton, masses gravitationnelles  
(1687):

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Coulomb, charges électriques  
(1785):

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Coulomb, pôles magnétiques  
(1785):

$$F \propto \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

**Ampère, éléments du courant (1822):**

$$F \propto \frac{i_1 i_2 d\ell_1 d\ell_2}{r^2} \left( \cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \alpha \cos \beta \right)$$

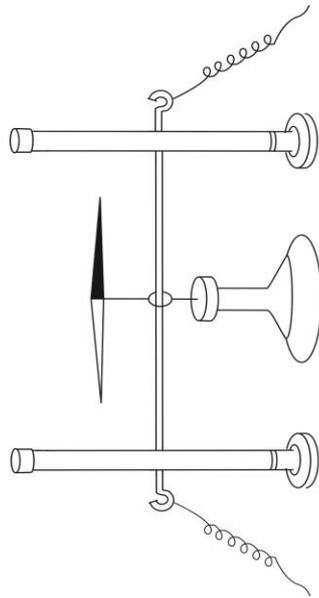
Coulomb's Memoirs on Torsion,  
Electricity, and Magnetism  
Translated into English



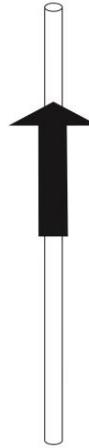
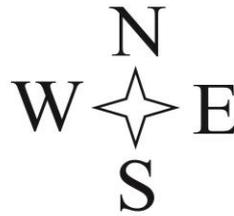
Andre Koch Torres Assis  
Louis L. Bucciarelli

Disponibile à: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)

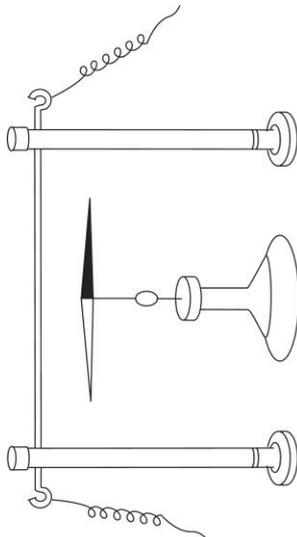
# L'expérience d'Oersted (1820)



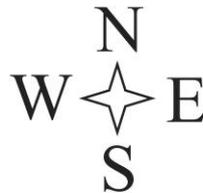
$$i = 0$$



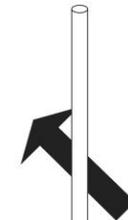
$$i \neq 0$$



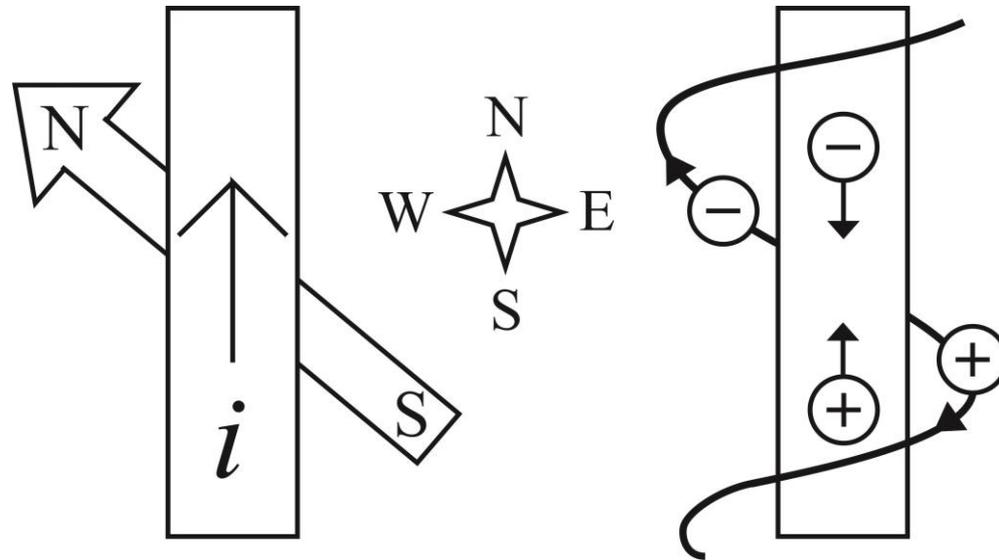
$$i = 0$$



$$i \neq 0$$

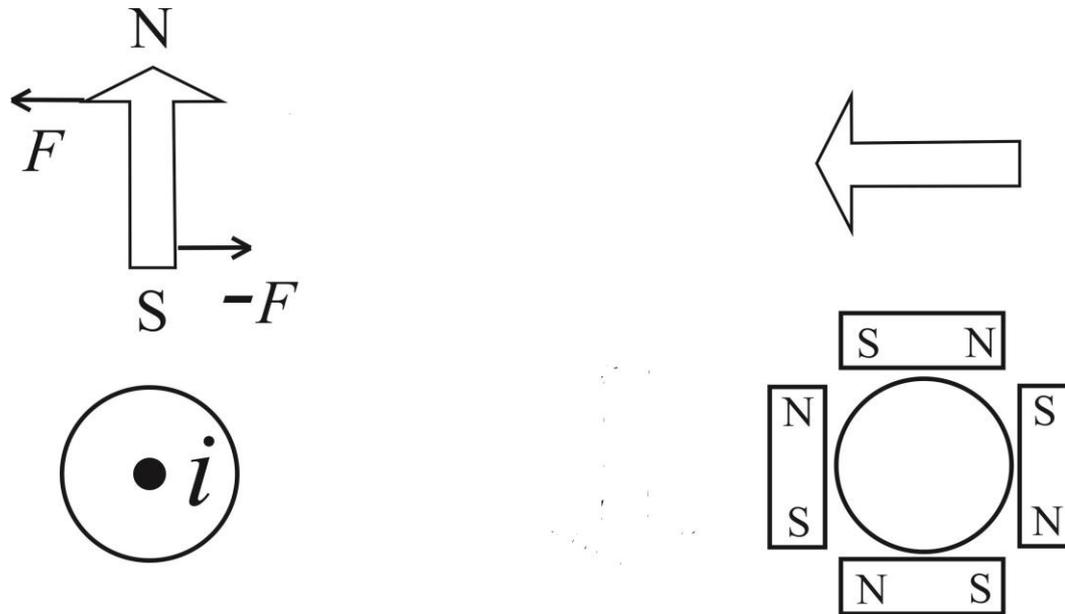


L'interprétation d'Oersted est basée sur le **flux hélicoïdal de particules électriques à l'extérieur des fils** porteurs de courant.



“Tous les effets exposés tout-à-l’heure relativement au pôle nord de l’aiguille s’expliqueront aisément en supposant que la force, ou la matière négativement électrique, parcourt une spirale fléchée de gauche à droite; qu’elle pousse le pôle nord, et qu’elle n’agit pas sur le pôle sud.”

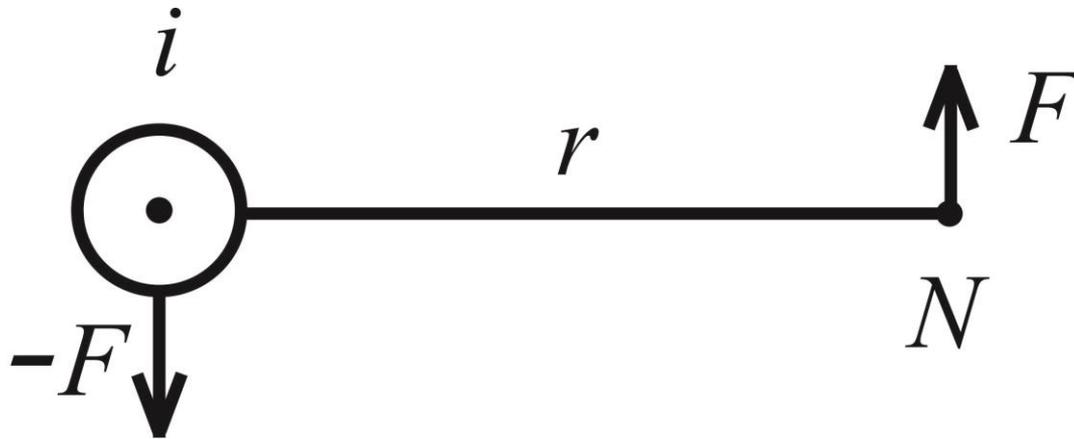
# Interprétation de Biot et Savart (1820) de l'expérience d'Oersted :



“Le fil est rendu magnétique par le courant voltaïque.”

Les aimants transversaux microscopiques à la surface du fil agiraient sur l'aiguille aimantée externe.

Interprétation par Faraday (1821) de l'expérience d'Oersted basée sur les forces transversales entre le courant et le pôle magnétique :



Ces forces transversales génèreraient un couple interne ou primitif sur le système.

En 1820 Ampère avait 45 ans. Lettre à son fils de septembre 1820 :

“J'ai eu bien tort et je me repens beaucoup de n'avoir pas fait partir cette lettre il y a trois jours; mais tous mes moments ont été pris par une circonstance importante de ma vie. Depuis que j'ai entendu parler pour la première fois de la belle découverte de M. Oersted, professeur à Copenhague, sur l'action des courants galvaniques sur l'aiguille aimantée, j'y ai pensé continuellement, je n'ai fait qu'écrire une grande théorie sur ces phénomènes et tous ceux déjà connus de l'aimant, et tenter des expériences indiquées par cette théorie, qui toutes ont réussi et m'ont fait connaître autant de faits nouveaux.”

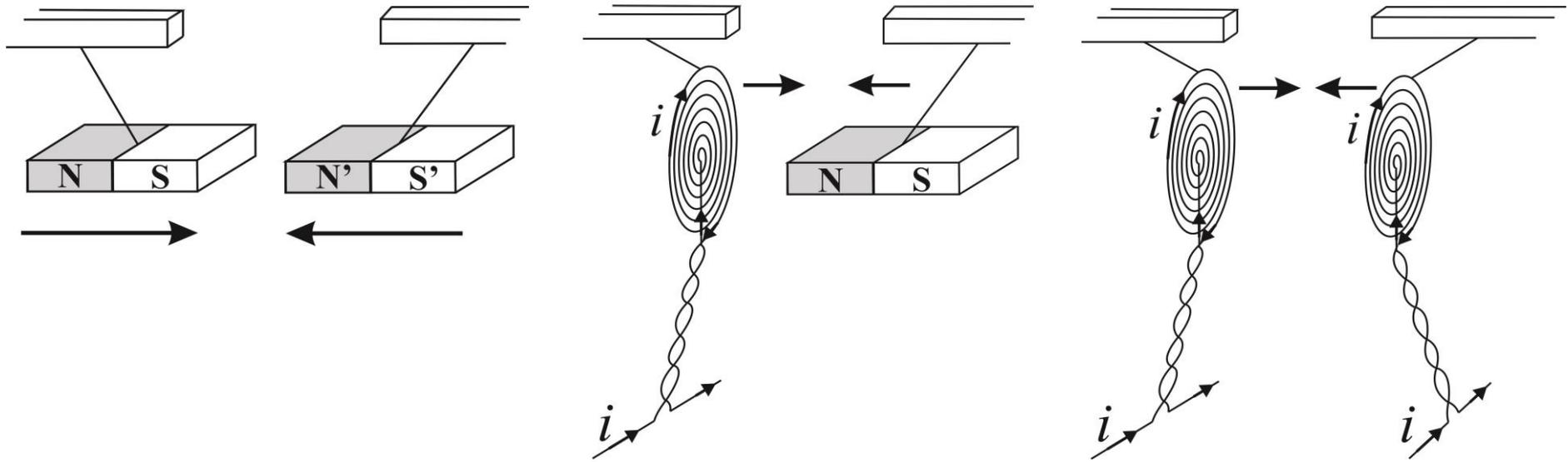
Ampère, avec sa vision novatrice, a avancé deux hypothèses cruciales :

- (1) Il a postulé l'existence de forces d'attraction et de répulsion entre les conducteurs de courant, une idée jamais évoquée auparavant.
- (2) Il a suggéré que des courants électriques existaient non seulement dans les fils conducteurs, mais également à l'intérieur des aimants et même au sein de la Terre.

Il a ensuite tenté de modéliser électrodynamiquement un aimant et la Terre par des fils appropriés transportant des courants électriques.

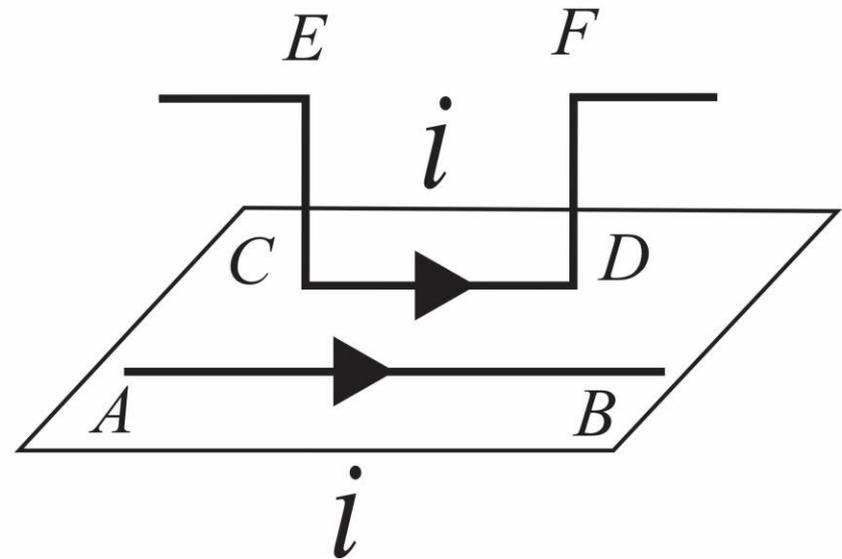
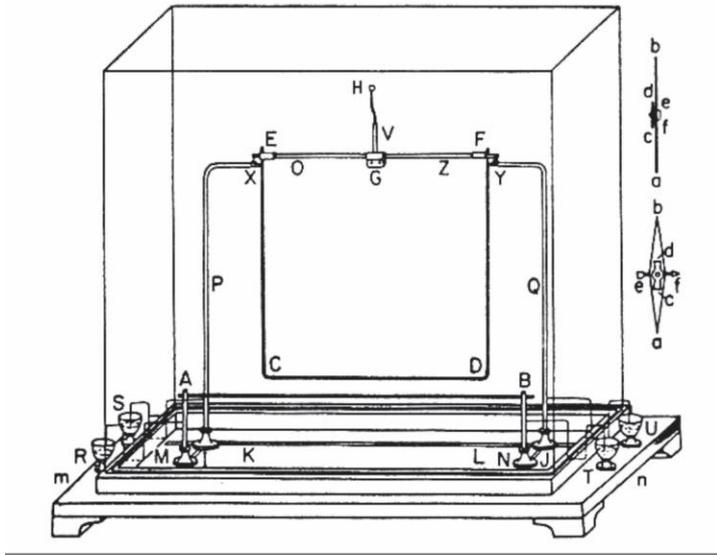
Il a également tenté de trouver la loi de la force agissant entre deux éléments du courant.

Ampère a initialement modélisé un aimant comme un conducteur plan en spirale transportant un courant électrique :



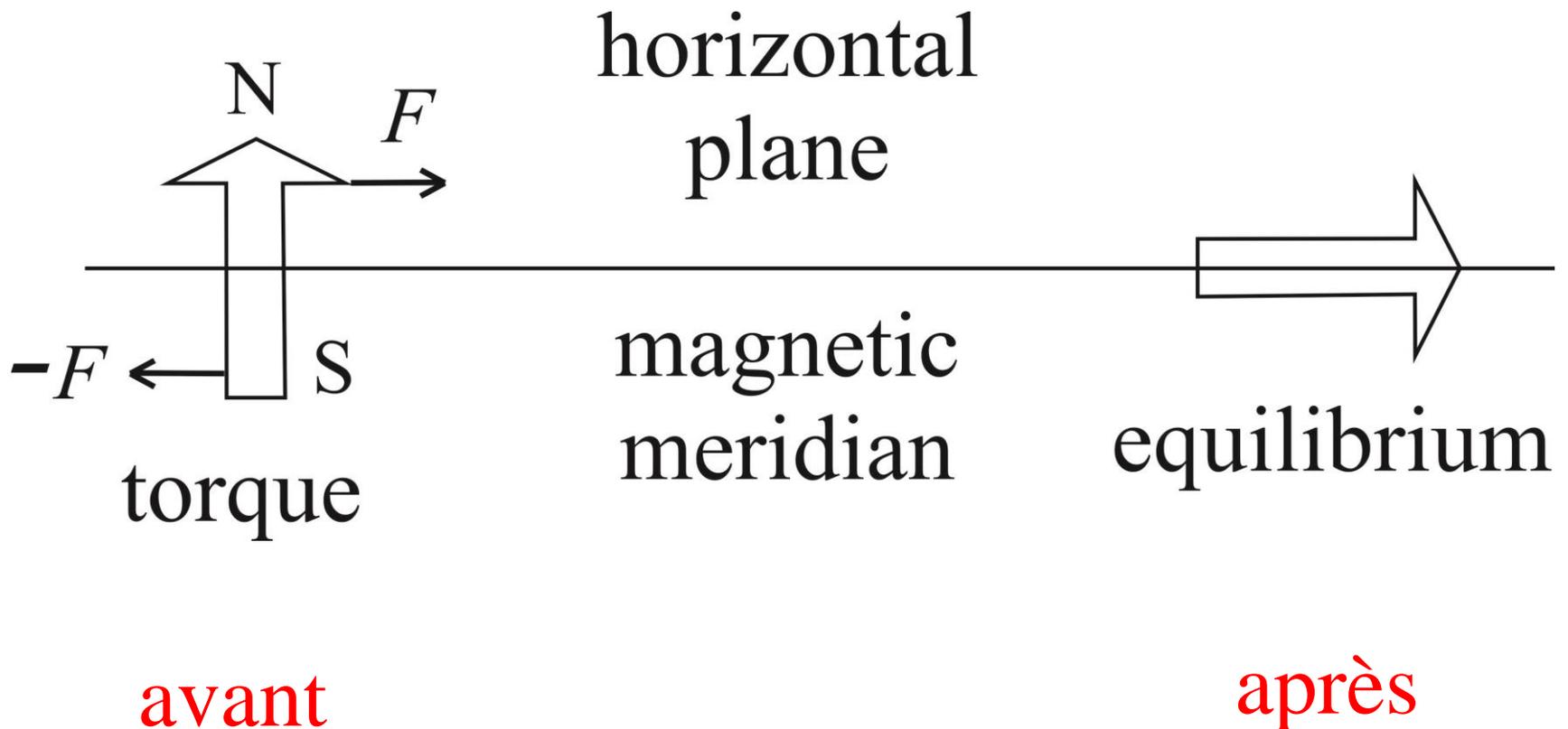
“C'est ainsi que j'ai découvert que deux courants électriques s'attirent lorsqu'ils circulent dans le même sens et se repoussent dans l'autre cas.”

Il réalise ensuite son expérience la plus célèbre montrant l'attraction et la répulsion entre deux fils droits parallèles transportant des courants constants.

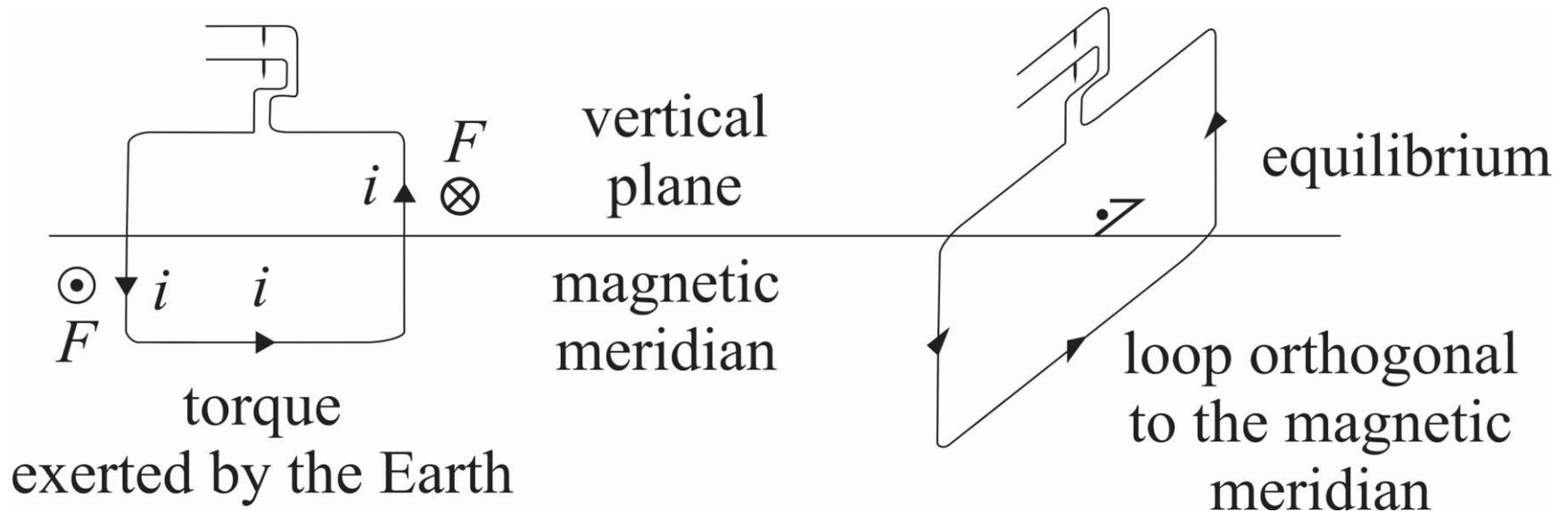


Cet appareil constitue la base des balances de courant disponibles dans tous les laboratoires de physique.

Couple directif exercé **magnétiquement** par la Terre sur l'aiguille d'une boussole :



Expérience d'Ampère de 1820 montrant un **analogue électrodynamique** du couple directeur exercé **magnétiquement** par la Terre sur l'aiguille d'une boussole. Le conducteur peut tourner autour de son axe de symétrie vertical. La Terre exerce un couple électrodynamique sur le conducteur.



**avant**

**après**

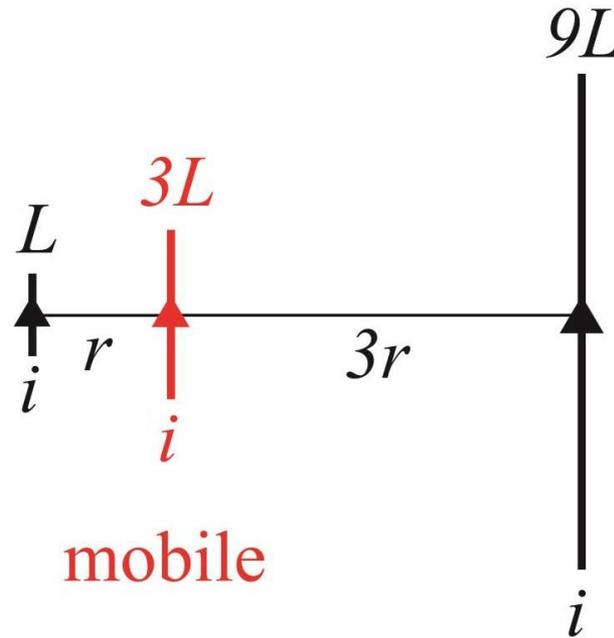
Une nouvelle méthode se met en place : le recours à des "cas d'équilibre". Ampère forge ainsi ce qu'on a appelé depuis la "**méthode de zéro**". L'idée est de faire agir simultanément deux circuits fixes, parcourus par un même courant, sur un conducteur mobile, de sorte que les forces créées par les deux circuits sur le conducteur mobile s'opposent exactement.

En analysant ces cas d'équilibre, Ampère obtient en 1822 l'expression définitive de sa loi de force entre deux éléments courants.

Hypothèse:

$$F \propto \frac{i_1 i_2 d\ell_1 d\ell_2}{r^n} f(\alpha, \beta, \varepsilon)$$

$$F_{left} \propto \frac{L \cdot 3L}{r^n}$$



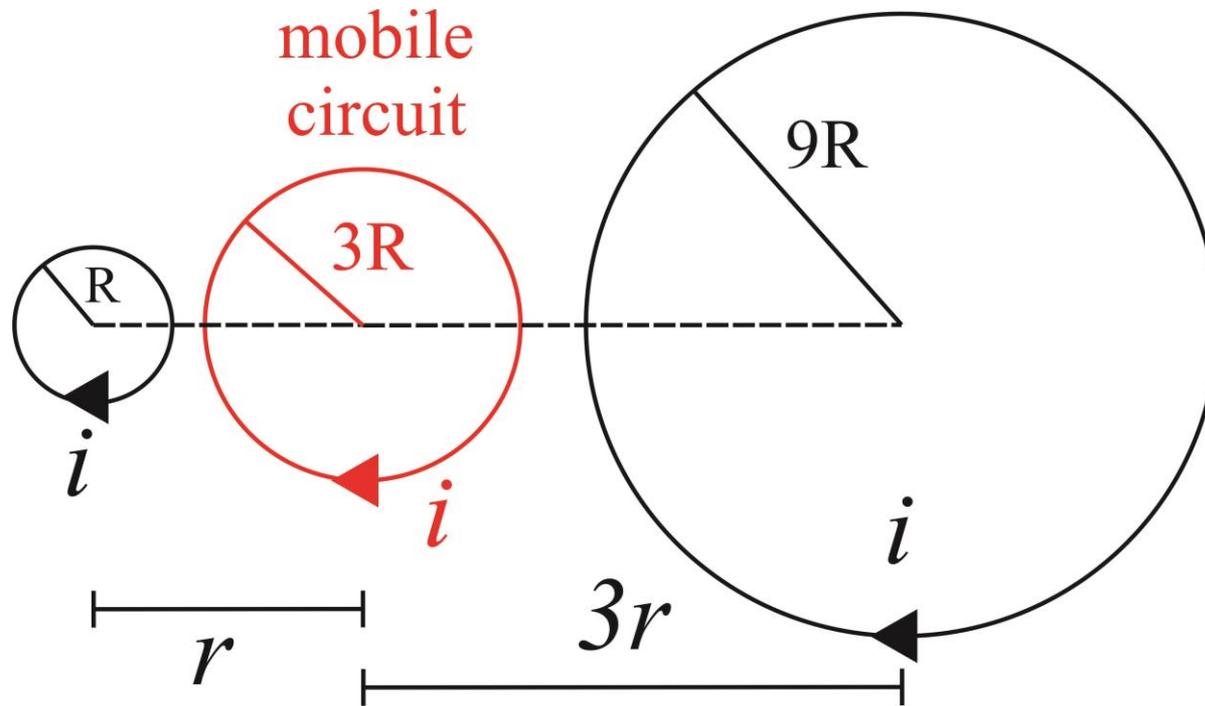
$$F_{right} \propto \frac{3L \cdot 9L}{(3r)^n}$$

Si  $n < 2$  le circuit mobile se déplace vers la droite.

Si  $n = 2$  le circuit mobile reste au repos.

Si  $n > 2$  le circuit mobile se déplace vers la gauche.

Cas d'équilibre de la loi de similarité :



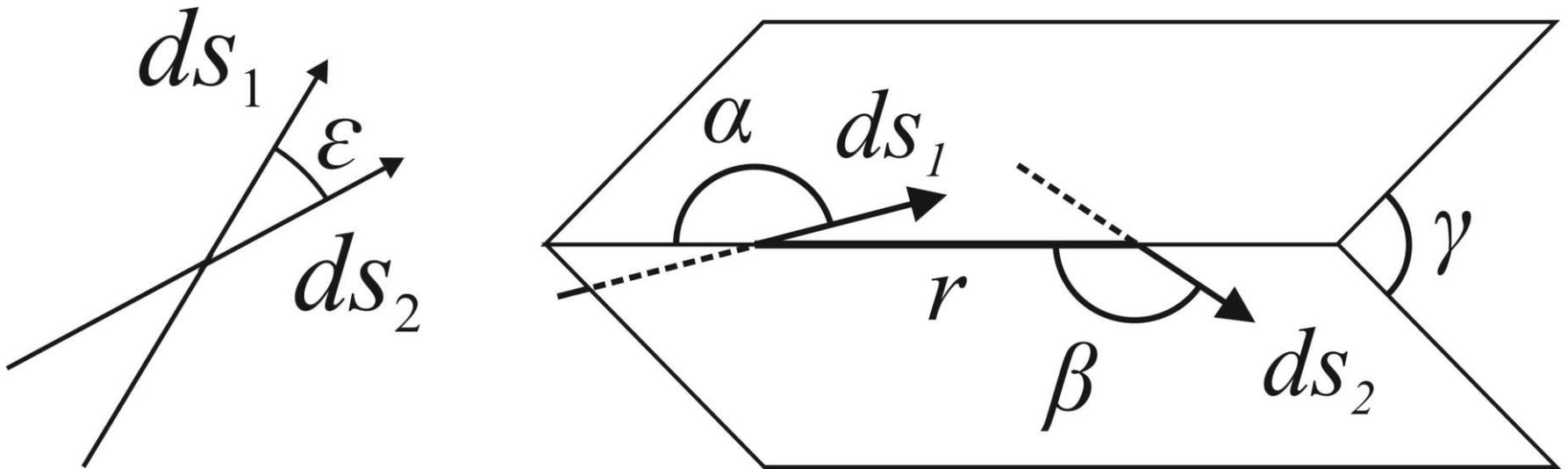
Observation expérimentale: Le circuit mobile reste au repos.

Conclusion d'Ampère: La force entre deux éléments de courant est inversement proportionnelle au carré de leur distance.

## Loi de force finale d'Ampère (1822)

$$F \propto \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} \left( \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \beta \right)$$

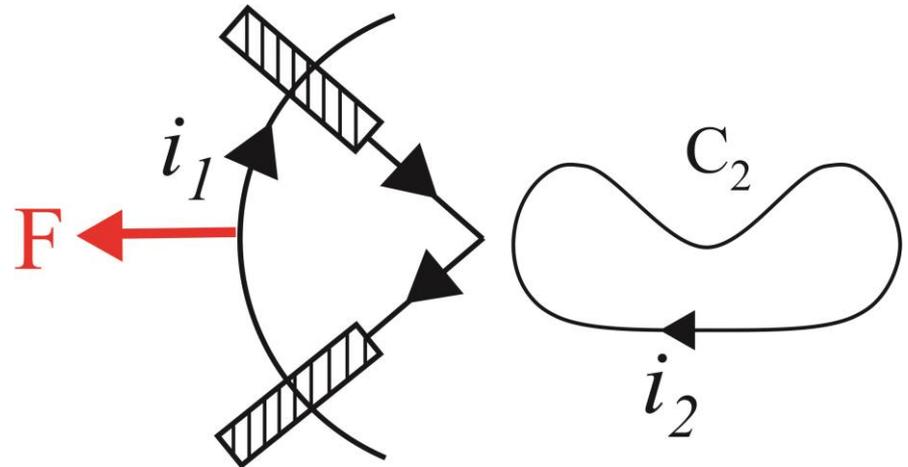
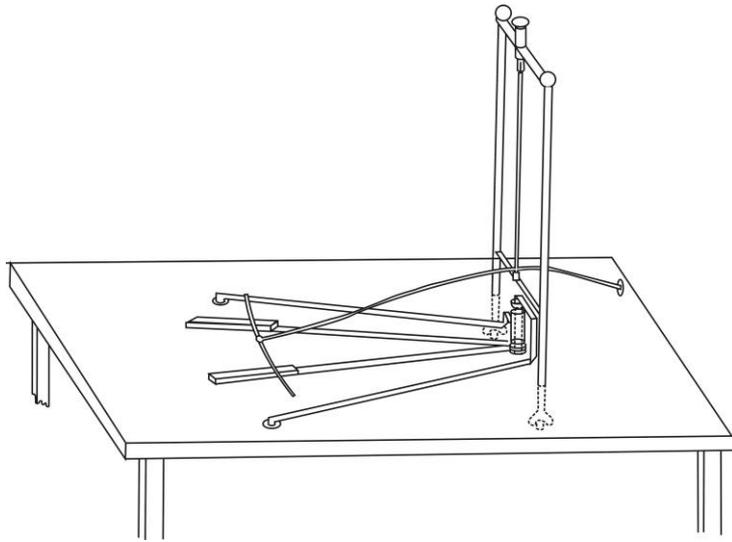
$$= \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} \left( \cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \alpha \cos \beta \right)$$



Loi de force d'Ampère en notation vectorielle moderne et dans le Système International d'Unités, MKSA :

$$F_{2 \text{ on } 1}^A = -\frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{\hat{r}}{r^2} \left[ 2(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) - 3(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_1)(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_2) \right]$$

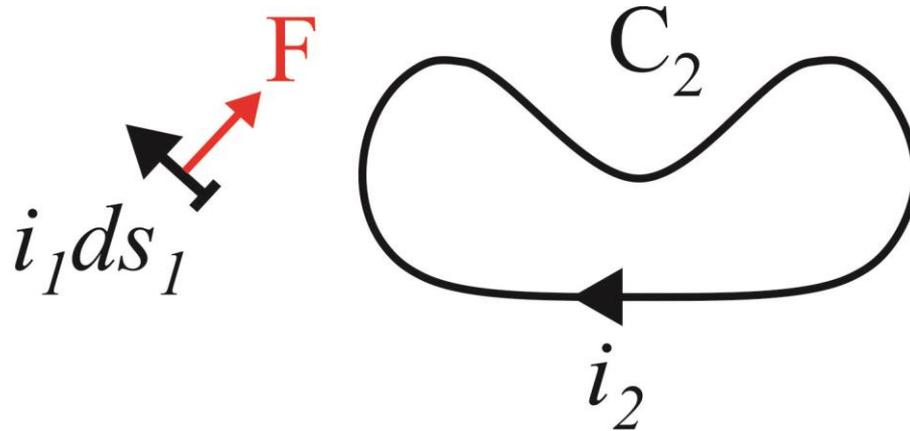
Cas **expérimental** d'équilibre de non-existence de force tangentielle :



Conclusion d'Ampère :

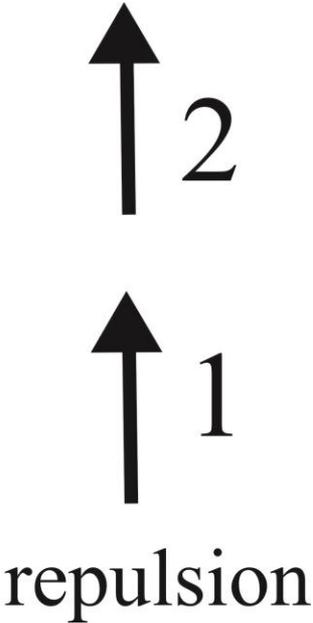
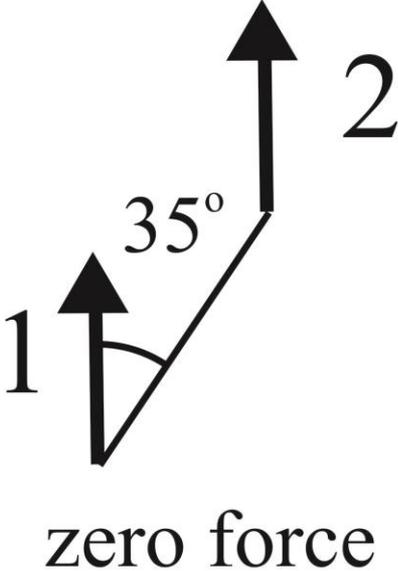
La force exercée par un circuit fermé de forme quelconque, agissant sur un élément de courant extérieur d'un autre circuit, est toujours orthogonale à la direction de cet élément.

Ampère a également prouvé **théoriquement** que la force exercée par un circuit fermé de forme arbitraire, agissant sur un élément de courant externe d'un autre circuit, est toujours orthogonale à cet élément :



$$\begin{aligned}
 F_{2 \text{ in } 1}^A &= -\oint \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \left[ 2(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - 3(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_1)(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} \right] \\
 &= I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right)
 \end{aligned}$$

Grassmann en 1845 n'aimait pas la propriété suivante de la force d'Ampère :



Ampère avait prouvé que la force exercée par un **circuit fermé** de forme arbitraire agissant sur un élément de courant extérieur est toujours orthogonale à cet élément :

$$F_{C2 \text{ in } 1}^A = I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right)$$

Grassmann a alors supposé que cette expression devait être valable pour la force entre **deux éléments du courant**. Il créa ainsi en 1845, **théoriquement (il n'a jamais réalisé aucune expérience)**, sa loi de force :

$$F_{2 \text{ in } 1}^G = I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right)$$

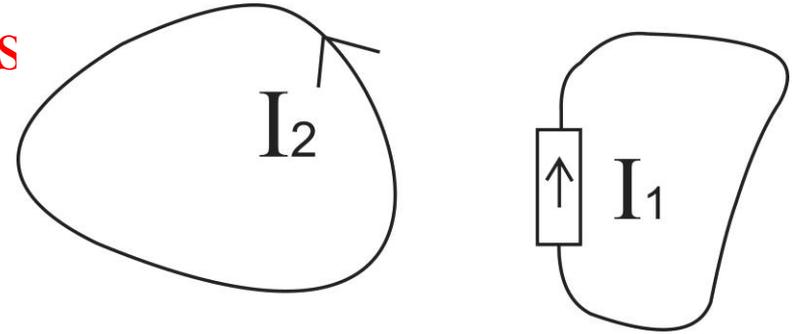
Différences entre les lois de force de  
Ampère (1822) et Grassmann (1845) :

$$\vec{F}_{2\text{in}1}^A = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \left[ 2(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - 3(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_1)(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} \right]$$

---

$$\begin{aligned} \vec{F}_{2\text{in}1}^G &= I d\vec{\ell}_1 \times d\vec{B}_2 = I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right) \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \left[ (d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - (d\vec{\ell}_1 \cdot \hat{r}) d\vec{\ell}_2 \right] \end{aligned}$$

Equivalence entre les forces  
d'Ampère et Grassmann :



$$F_{C2 \text{ in } ds1}^A = F_{C2 \text{ in } ds1}^G = I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right)$$

Par conséquent, nous ne pouvons pas distinguer ces deux forces en effectuant des expériences avec deux ou plusieurs circuits fermés.

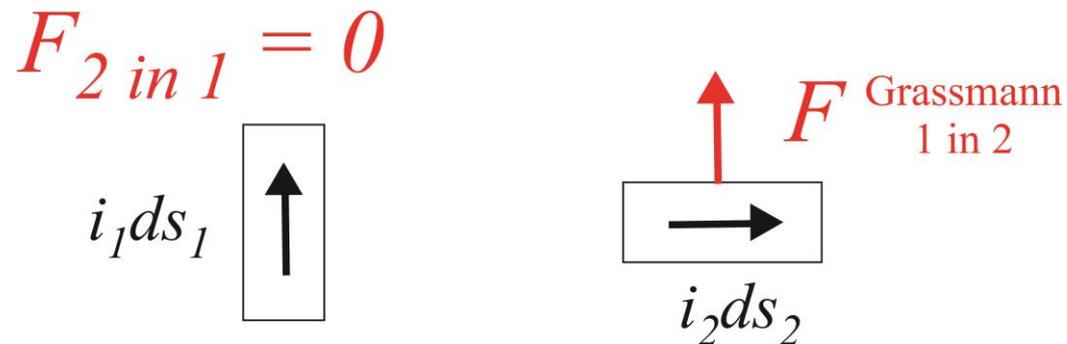
# Ampère versus Grassmann avec éléments de courant orthogonaux

$$F_{1 \text{ in } 2} = F_{2 \text{ in } 1} = 0$$

avec la force  
d'Ampère:



avec la force  
de Grassmann:



Par conséquent, la force de Grassmann n'est pas conforme à la loi d'action et de réaction de Newton.

Ampère versus Grassmann avec des éléments de courant parallèle et colinéaire :

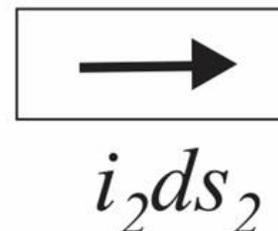
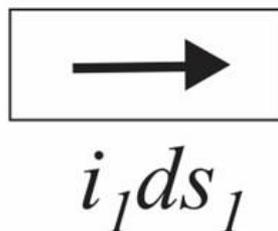


## Répulsion avec Ampère

---

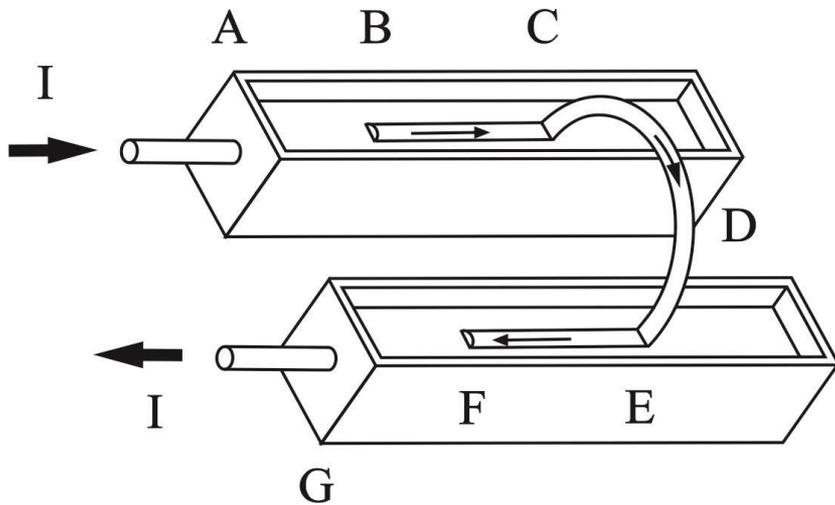
Avec Grassmann, ces deux éléments n'exercent pas de force l'un sur l'autre:

$$F_{1 \text{ in } 2} = F_{2 \text{ in } 1} = 0$$



## Ampère X Grassmann:

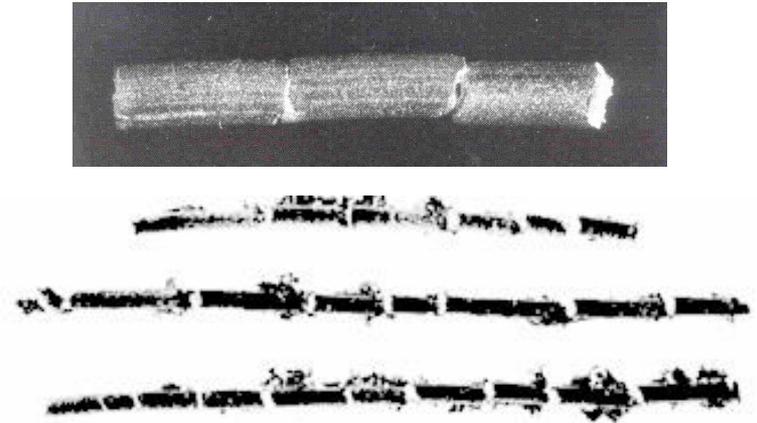
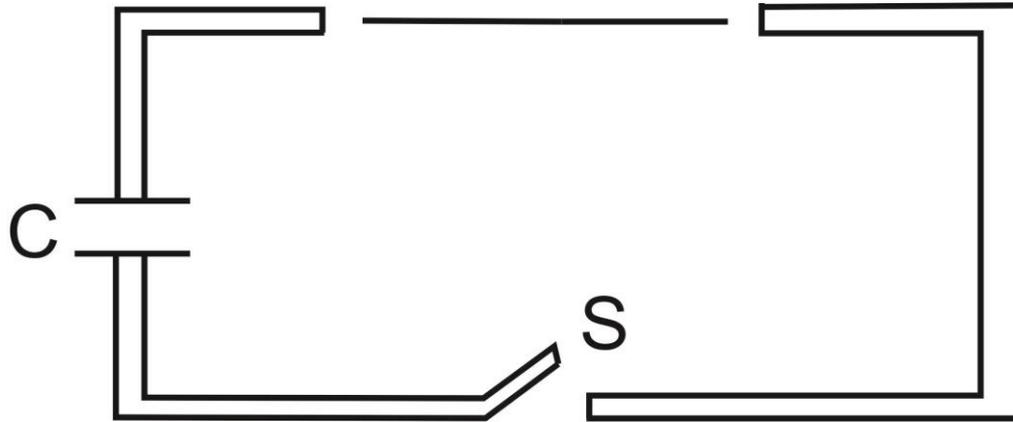
Ampère fut tellement surpris de ce résultat, qu'en 1822 il conçut une expérience pour tester cette prédiction :



Selon Ampère, la force observée sur le pont pointant vers la droite est due à la répulsion entre les portions AB et BC, ainsi qu'à la répulsion entre les portions EF et FG.

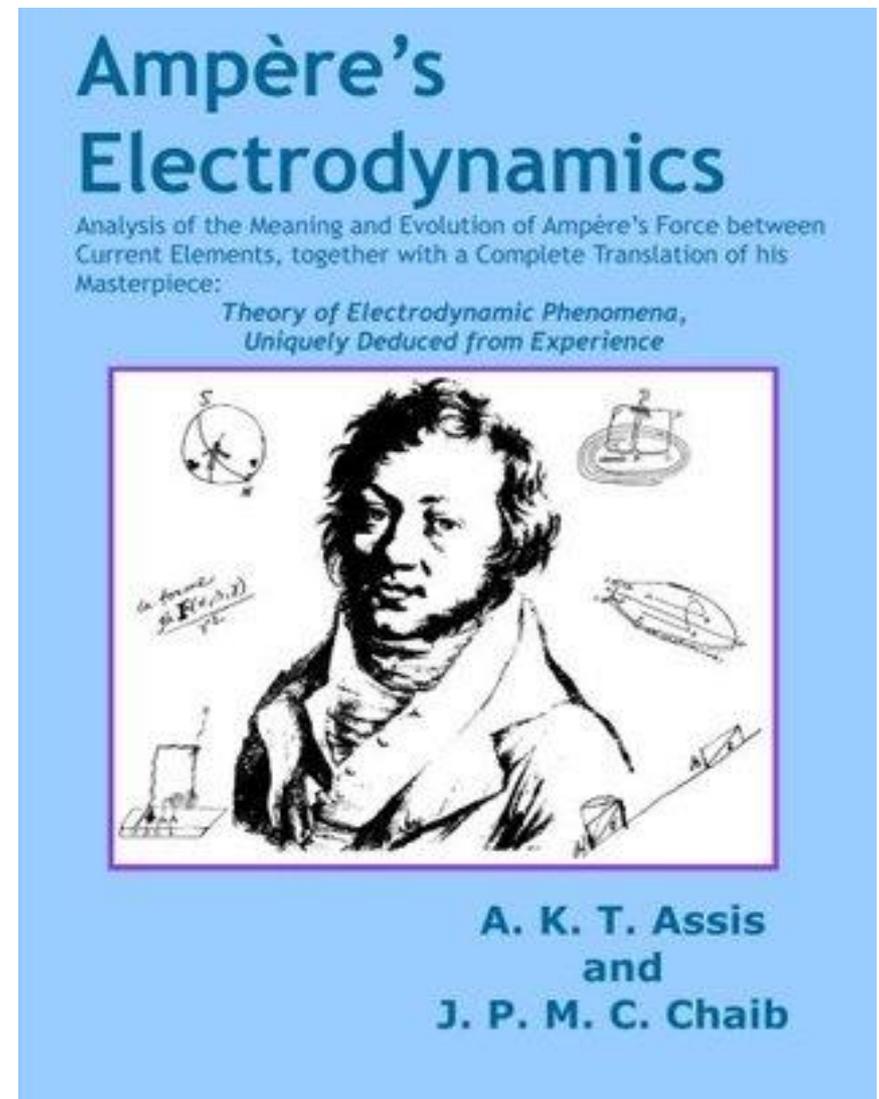
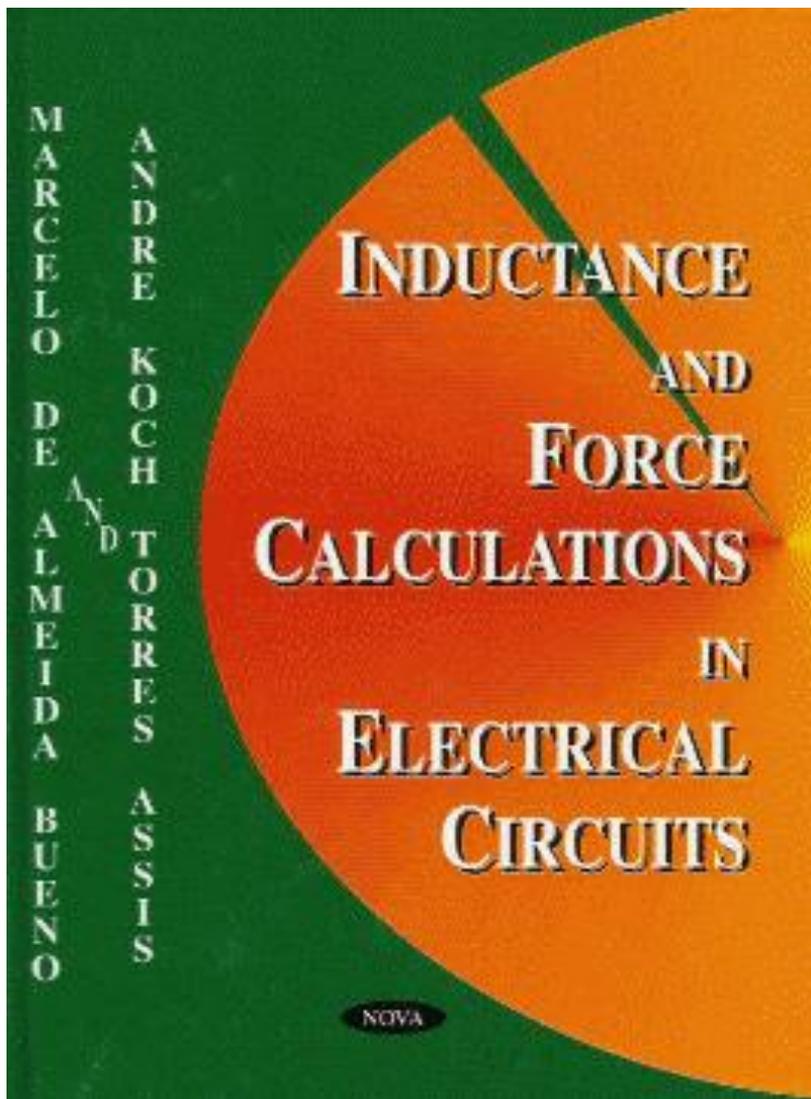
Ces répulsions n'existent pas avec la force de Grassmann. Pour expliquer cette expérience avec Grassmann, il faut considérer la force exercée par le pont sur lui-même !

# Ampère contre Grassmann avec le phénomène du fil explosif



Peter et Neal Graneau expliquent la fragmentation du fil lorsque l'on ferme le circuit comme étant due à la tension d'Ampère.

C'est-à-dire, les forces répulsives d'Ampère agissant entre des éléments porteurs de courant parallèles et colinéaires.



Disponível à: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)

## Tricker, Early Electrodynamics (1965):

“Dans la théorie de la gravitation, Newton possédait déjà une connaissance de toute une série de phénomènes, principalement grâce aux lois de Kepler.

Ampère devait découvrir les lois, ainsi que fournir la théorie, et ainsi faire le travail de Tycho Brahe, Kepler et Newton réunis en un seul.”

Maxwell en 1873 en comparant les forces entre les éléments du courant d'Ampère (1822), de Grassmann (1845) et de deux autres expressions créées par Maxwell lui-même :

*Treatise on Electricity and Magnetism, Article 527:*

“De ces quatre hypothèses différentes, **celle d'Ampère est sans doute la meilleure**, puisqu'elle est la seule qui rende les forces sur les deux éléments non seulement égales et opposées, mais dans la droite qui les joint.”

# Évaluation générale de Maxwell sur le travail d'Ampère :

## Treatise on Electricity and Magnetism, Article 528:

“Les recherches expérimentales par lesquelles Ampère a établi les lois de l'action mécanique entre les courants électriques sont l'une des réalisations les plus brillantes de la science. L'ensemble, théorie et expérience, semble avoir surgi, pleinement développé et pleinement armé, du cerveau du «Newton de l'électricité ». Elle est parfaite dans la forme, inattaquable dans l'exactitude, et **elle se résume dans une formule d'où tous les phénomènes peuvent être déduits, et qui doit toujours rester la formule la plus importante de l'électrodynamique.**”

$$F_{2 \text{ in } 1}^A = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \left[ 2(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - 3(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_1)(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} \right]$$

Malgré ces évaluations positives, la force d'Ampère entre les éléments du courant a disparu des manuels de physique.

Je pense que la raison principale de ce fait, est que la théorie électromagnétique moderne est basée non seulement sur les équations de Maxwell, mais aussi sur la loi de force de Lorentz, qui est compatible avec la théorie de la relativité d'Einstein.

En partant de la force de Lorentz on déduit uniquement la force de Grassmann, mais pas la force d'Ampère.

Par contre, en partant de la force de Weber, on en déduit uniquement la force d'Ampère, mais pas la force de Grassmann.

Grassmann (1845)  $\Leftrightarrow$  Lorentz (1895)

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_{2\text{in}1}^G = I d\vec{\ell}_1 \times d\vec{B}_2 = I_1 d\vec{\ell}_1 \times \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{\ell}_2 \times \hat{r}}{r^2} \right)$$

---

Ampère (1822)  $\Leftrightarrow$  Weber (1846)

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{r}}{r^2} \left( 1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} + \frac{r \ddot{r}}{c^2} \right)$$

$$F_{2\text{in}1}^A = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \left[ 2(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - 3(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_1)(\hat{r} \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} \right]$$

**Wilhelm Weber's Main Works on  
Electrodynamics Translated into English**

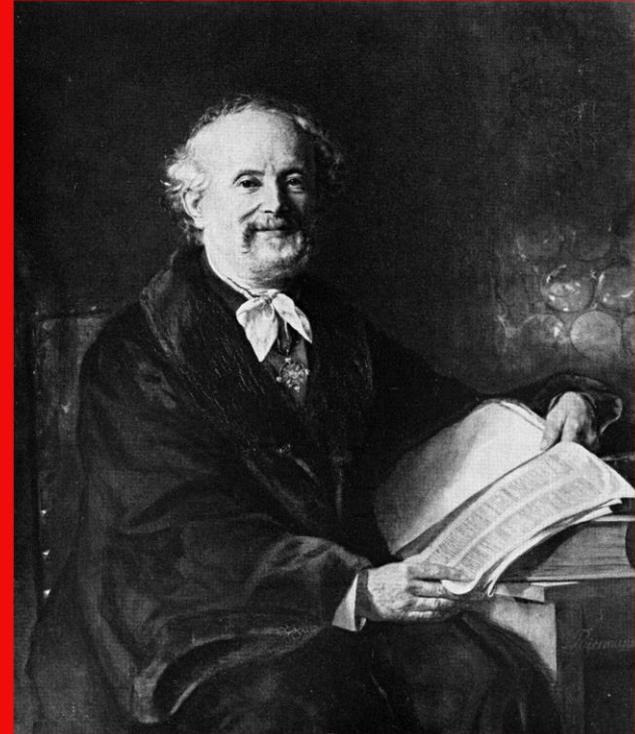
**Volume II: Weber's Fundamental Force  
and the Unification of the Laws of Coulomb,  
Ampère and Faraday**



**Edited by Andre Koch Torres Assis**

**Wilhelm Weber's Main Works on  
Electrodynamics Translated into English**

**Volume IV: Conservation of Energy,  
Weber's Planetary Model of the Atom and the  
Unification of Electromagnetism and Gravitation**



**Edited by Andre Koch Torres Assis**

4 tomes disponibles à:  
[www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)

# Conclusion

L'électrodynamique d'Ampère est extrêmement puissante.

Ces dernières années, l'électrodynamique d'Ampère a suscité un regain d'intérêt en raison de nouvelles expériences et de nouveaux développements théoriques.

[www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)