

PHYS137

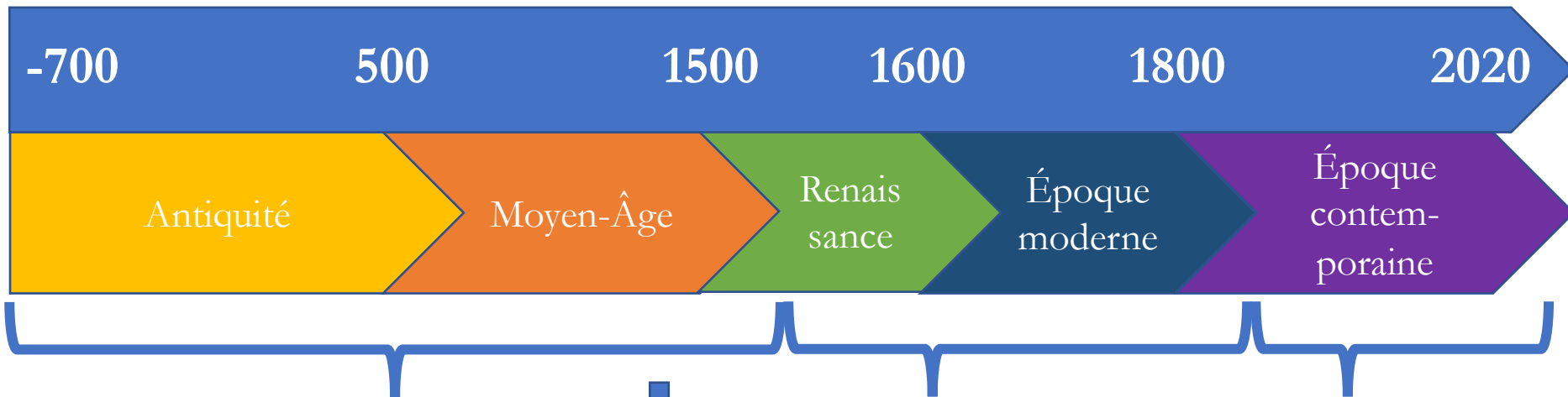
Cours 3 :

Du magnétisme à l'électromagnétisme aux champs magnétiques dans l'Univers

Dr. Barbara PERRI

barbara.perri@universite-paris-saclay.fr

Introduction



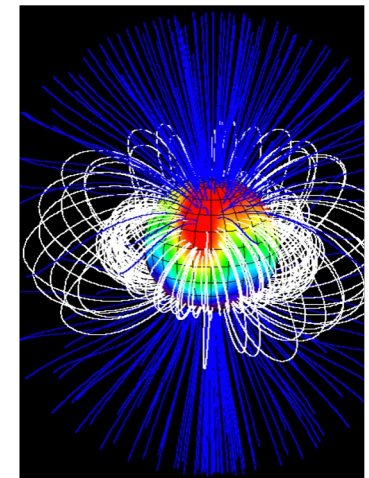
Magnétisme



Électricité



Électromagnétisme



The background of the slide is a detailed illustration of magnetic field lines. The lines are shown as a dense, textured pattern of fine, curved lines that flow from a North pole (labeled 'N' on the left) to a South pole (labeled 'S' on the right). The lines are more concentrated near the poles and spread out as they move away from them, creating a complex, swirling pattern that fills the entire frame.

Le magnétisme

Le magnétisme dans l'Antiquité

En Grèce et en Chine, on connaît deux matériaux qui ont des propriétés électromagnétiques :



La magnétite :

Pierre qui attire le fer

Extraite en Magnésie (Asie mineure)



L'ambre jaune :

Attire des petits objets quand frottée
(Thalès de Millet)

En grec, ambre jaune = êlektron

→ Pas d'explication au phénomène

500

Antiquité

-600

-700

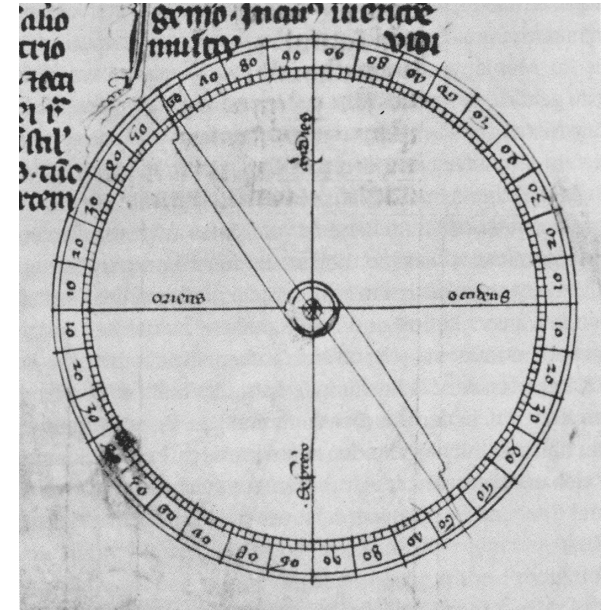
Le magnétisme au Moyen-Âge : La boussole

Invention de la boussole :



Orient :

Première boussole en 1044
Cuillère en magnétite sur de l'eau
(pointe vers le sud)



Occident :

Première boussole vers 1100-1200
Aiguille flottant sur l'eau
(*bussola* = petite boîte en italien)
→ Utilisé en navigation

1500

1200

1000

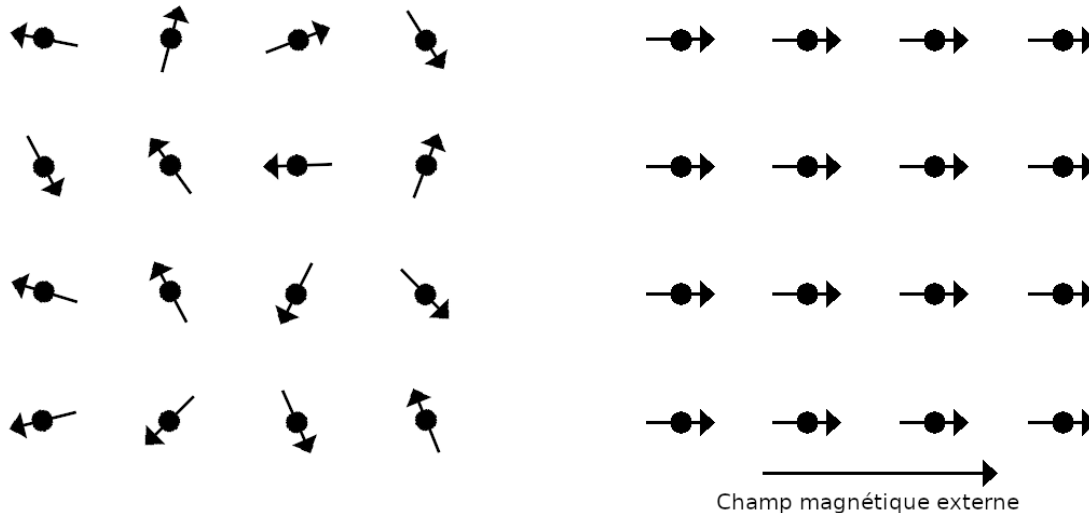
500

Moyen-Âge

PPT : L'aimantation des matériaux

On peut aussi créer une boussole,
soit en frottant une aiguille en fer contre une pierre d'aimant,
soit en chauffant une aiguille de fer avant de la plonger dans l'eau

→ pourquoi est-ce que ça marche ?



Matériaux paramagnétiques :

un champ magnétique externe est appliqué → le moment magnétique des électrons s'aligne de manière **temporaire**

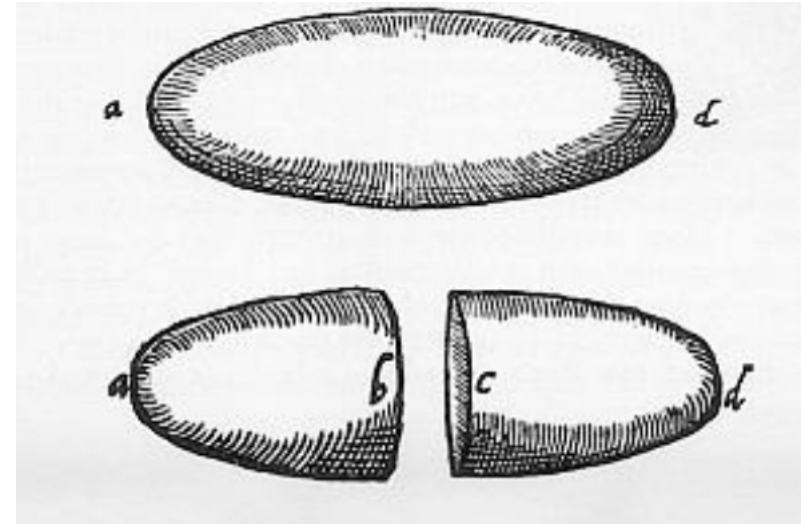
Matériaux ferromagnétiques :

un champ magnétique externe est appliqué → le moment magnétique des électrons s'aligne de manière **permanente**

→ On transforme un matériau paramagnétique en un matériau ferromagnétique !

Le magnétisme au Moyen-Âge : Les aimants

Il faudra attendre Pierre de Maricourt et son traité *Epistola de Magnete* (1269) pour avoir les premières expériences



Il suppose l'existence de **pôles magnétiques** à l'aide d'une sphère de magnétite → les pôles seraient dans la voûte céleste

Il démontre les propriétés **d'attraction/répulsion** des pôles + formation quand **aimant brisé**

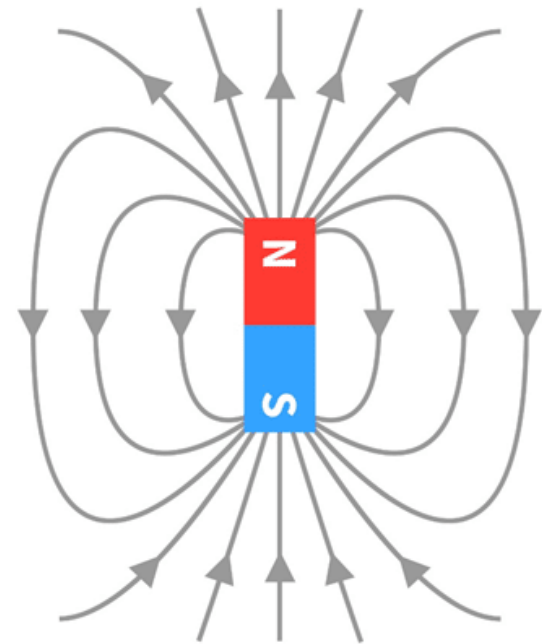
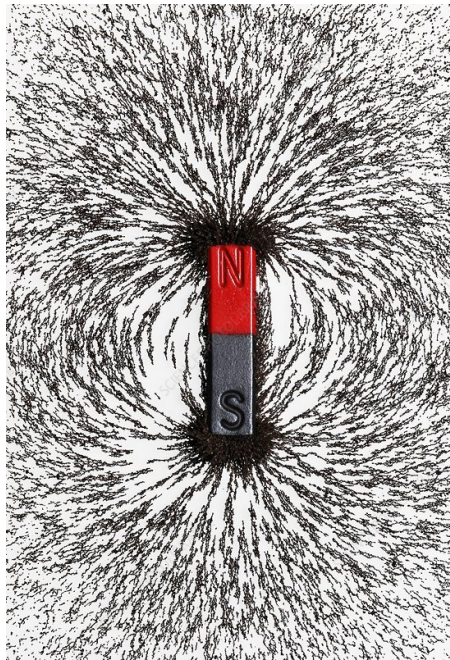
1300 1500

Moyen-Âge

500

PPT : Lignes de champ magnétique

À quoi ressemble le champ magnétique produit par un aimant ?



Si on met de la limaille de fer autour d'un aimant, on voit des lignes apparaître

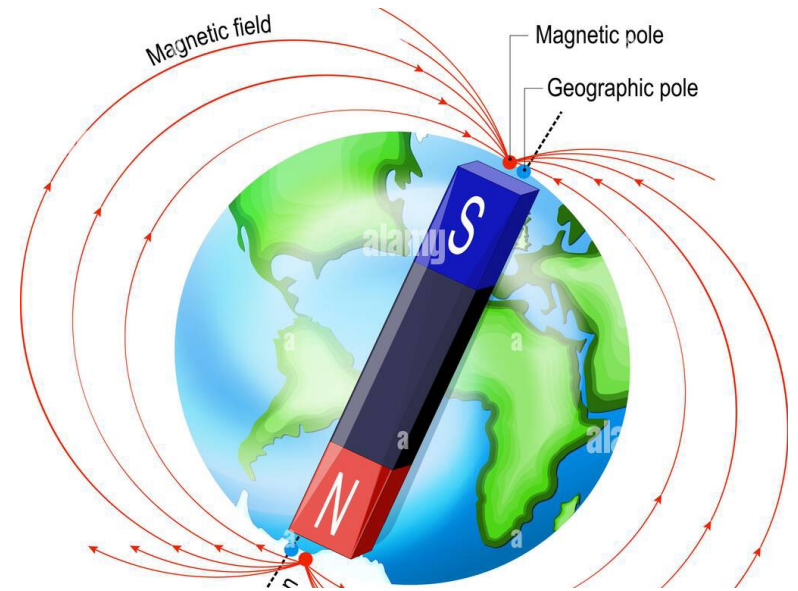
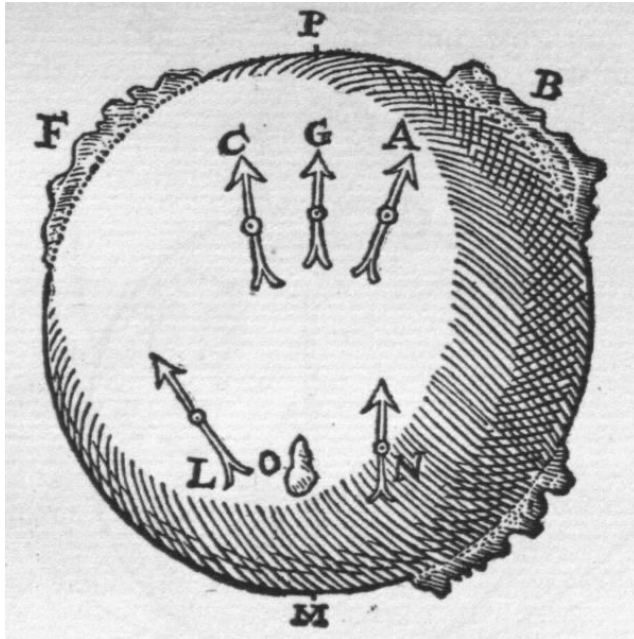
→ **Lignes de champ magnétique**

→ Toujours **orientée** du pôle Nord magnétique **vers le pôle Sud magnétique**

→ Lignes fermées vs. lignes ouvertes (mais pas vraiment)

Le magnétisme à la Renaissance : Les pôles

William Gilbert va reprendre les expériences de Maricourt dans son traité *De Magnete* avec la méthode scientifique



Ce n'est pas le ciel qui est magnétique, mais la Terre ! → la sphère de Maricourt est renommée *terrela*, et il est admis que la Terre est un aimant géant

Il définit les conventions magnétiques des pôles → pôle nord est en fait un pôle sud magnétique !

1600

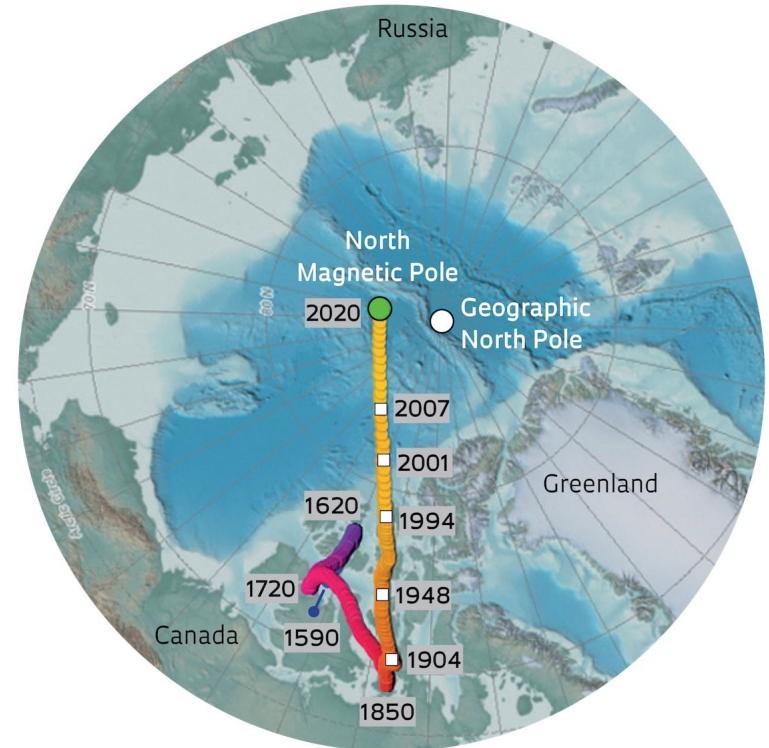
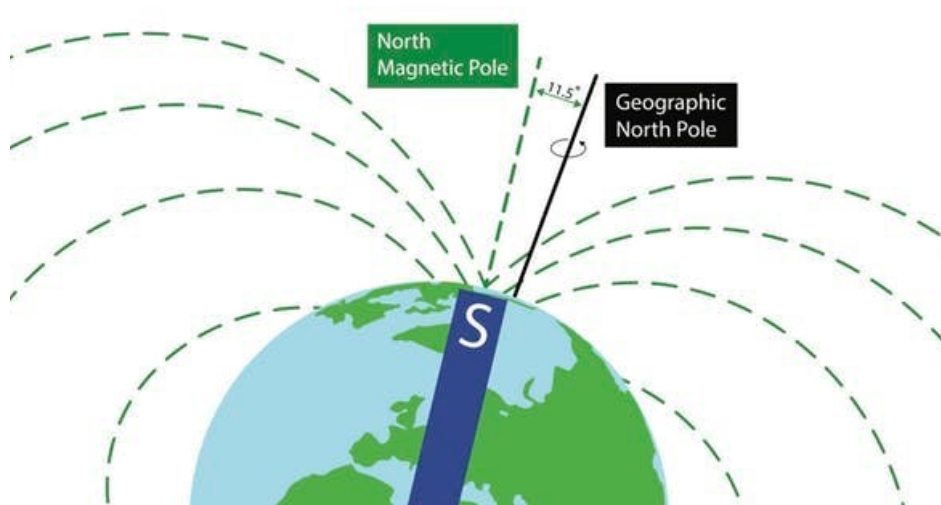
Renaissance

1500

PPT : Déplacement du pôle nord magnétique

Non seulement le pôle nord est en fait un pôle sud magnétique...

Petit Point Technique (PPT)



... mais en plus il est décalé par rapport au pôle nord géographique et il se déplace !
 → Comme on le verra plus loin, c'est à cause de son mécanisme de génération

Le magnétisme à la Renaissance : Résumé

William Gilbert dans son traité *De Magnete* reprend aussi les différences entre magnétite et ambre jaune de manière plus précise



Magnétite	Ambre jaune
n'attire que le fer	attire des petits objets (paille, papier...)
sans frottement	avec frottement
seul matériau à attirer le fer	d'autres matériaux ont les mêmes propriétés (verre, résine...)
traverse un écran en bois	est bloqué par un écran en bois
pas influencée par l'humidité	influencée par l'humidité

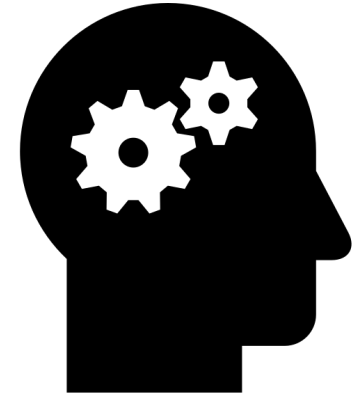
= Magnétisme

= Électricité

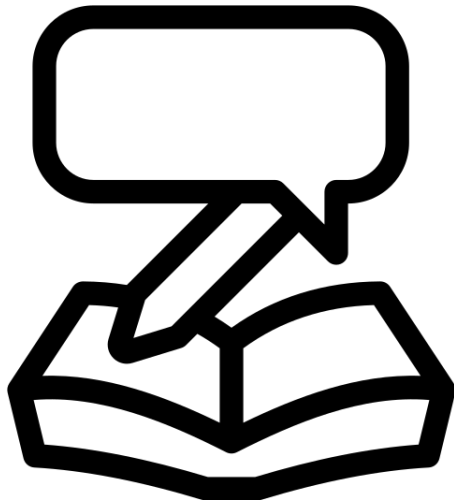
1600

Renaissance

1500



Exercices et TDs

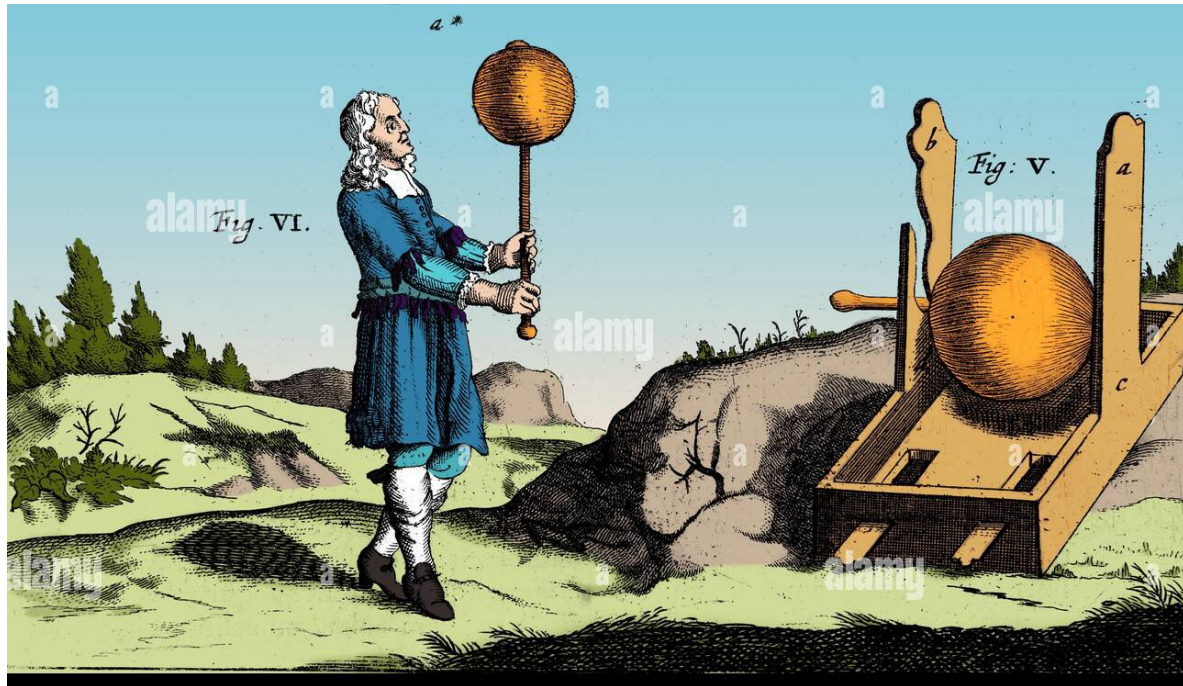




Les premières recherches sur l'électricité

von Guericke et la machine à friction

Otto von Guericke invente la première machine à friction



Boule de soufre frottée pour attirer les objets autour

Il voulait démontrer que c'était la même force que la gravité

- Mais quand les objets touchent la sphère, ils sont **repoussés** !
- Il vient en réalité d'inventer la première **machine électrostatique**

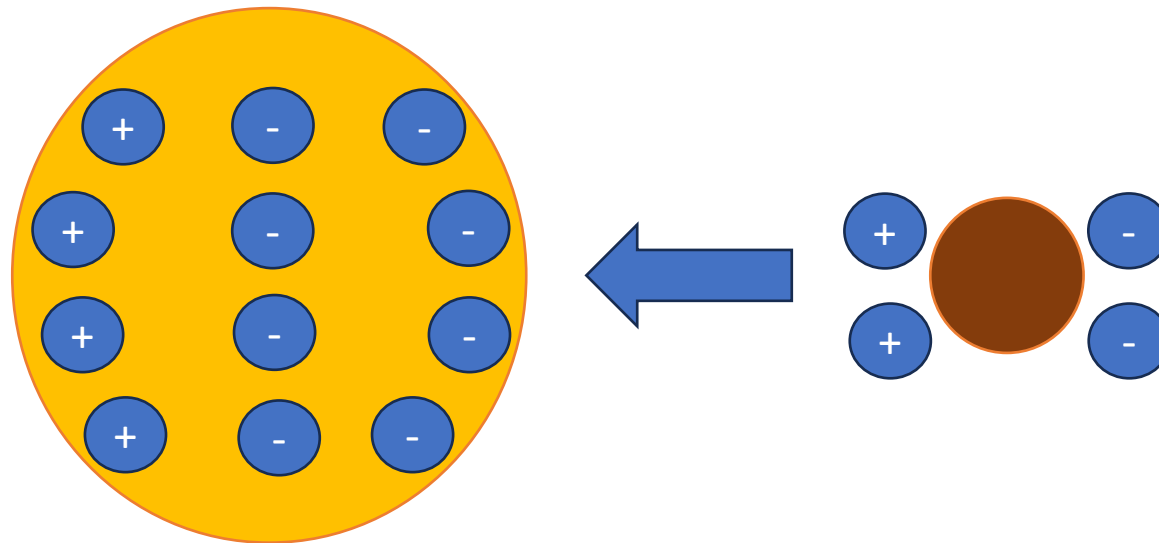
1800

Époque moderne

1600 1670

PPT : L'électricité statique

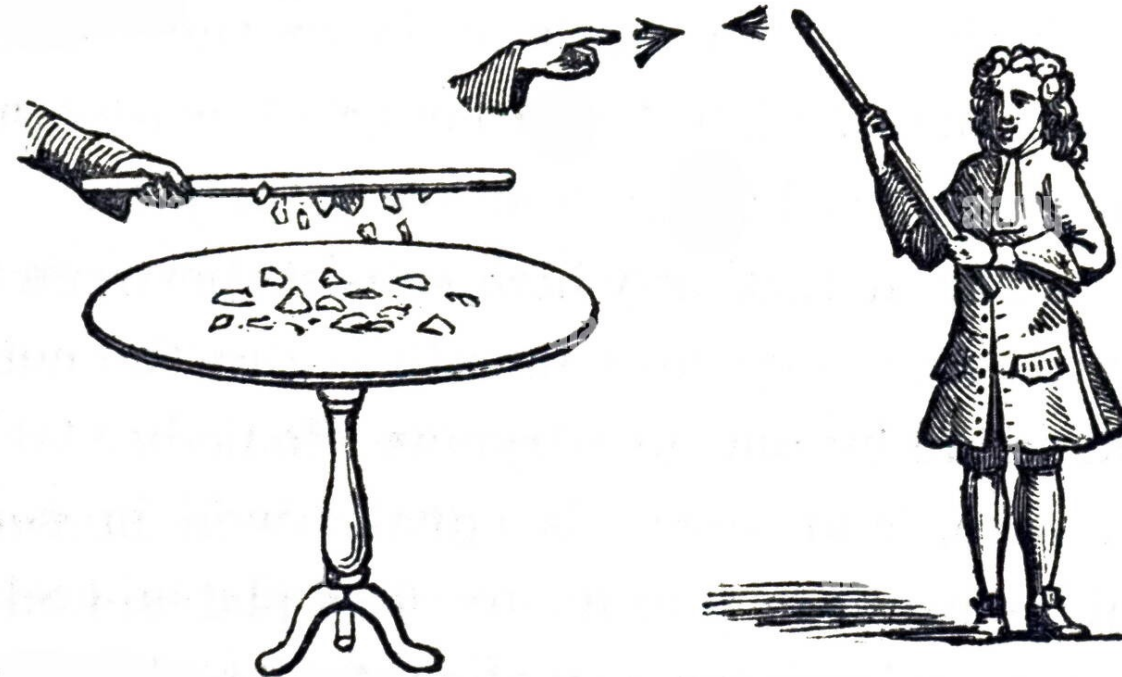
Que se passe-t-il lors d'une expérience d'électricité statique ?



1. Quand on frotte la boule de soufre, on la charge négativement
2. La partie positive des autres objets autour est donc attirée
3. Quand il y a contact, les charges en excès sont transférées
4. Du coup on se retrouve avec du négatif sur du négatif, ce qui crée un rejet

Gray et les conducteurs

Stephen Gray réalise des expériences sur les matériaux



- Il réalise que l'électricité (capacité d'attirer les matériaux) **peut se transmettre**
- Il réalise que certains matériaux transmettent cette capacité mieux que d'autres = **conducteurs et isolants** (John Theophilus Desaguliers)

1730 1800

1600

Époque moderne

Du Fay et les corps électrisés

Charles du Fay reprend ces travaux sur le frottement des corps électrisés



- Tous les corps peuvent être électrisés (frottement ou contact)
- Il existerait deux types d'électricité (vitrée et résineuse) qui se repoussent mutuellement (intuition des charges)

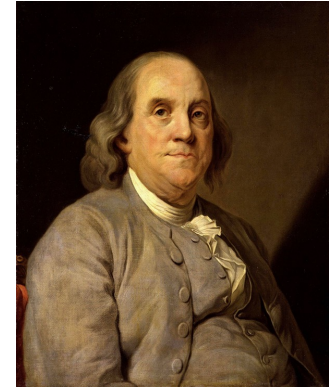
1730 1800

Époque moderne

1600

Franklin et le fluide unique

Benjamin Franklin est l'inventeur du paratonnerre



Il pense au contraire qu'il n'y a qu'un seul type d'électricité, mais avec plusieurs charges (positive et négative)

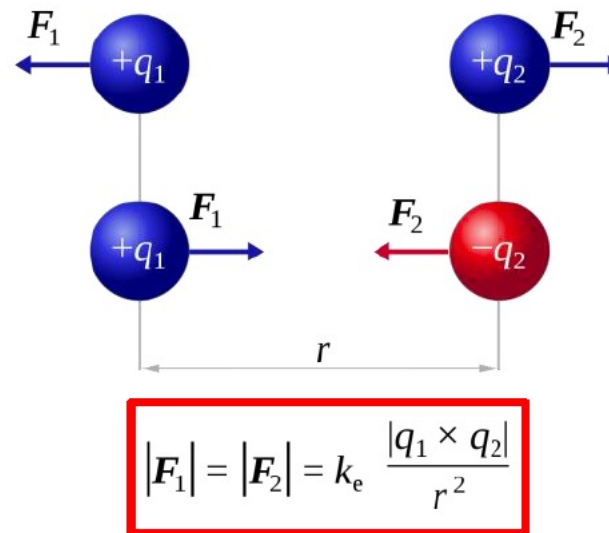
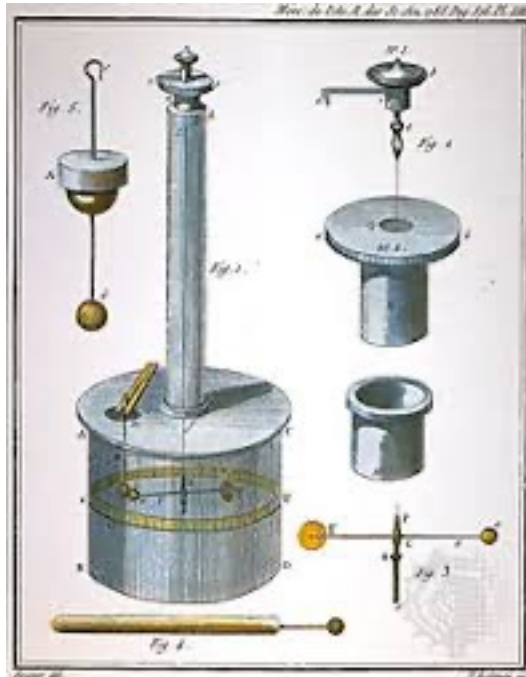
1750 1800

Époque moderne

1600

Coulomb et la loi d'attraction électrique

Charles Augustin Coulomb mesure
l'attraction des corps électrisés



- Il est le premier à écrire une formule mathématique pour la décrire !
- Mais comme il a utilisé une machine qu'il a construite lui-même, les résultats sont longtemps contestés...

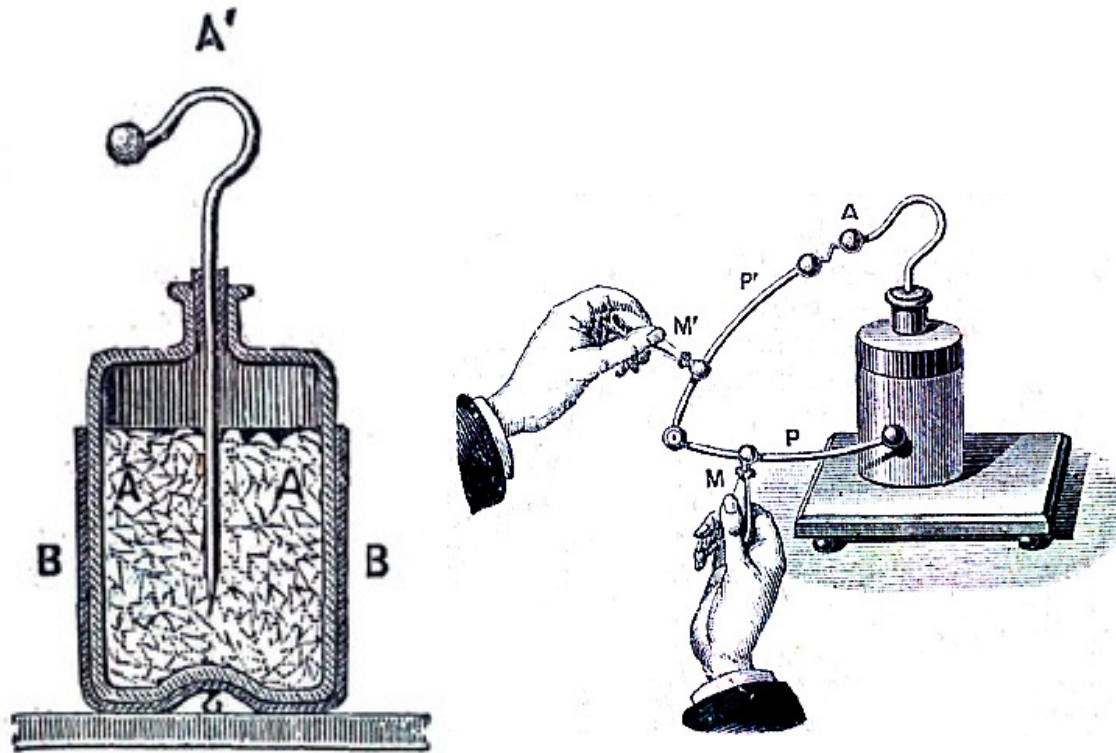
1780 1800

Époque moderne

1600

Musschenbroek et la bouteille de Leyde

Peter van Musschenbroek invente la bouteille de Leyde



- Un clou est chargé à l'aide d'une machine à friction, puis mis dans une bouteille
- Avec une feuille métallique autour de la bouteille on se prend une décharge !
 - Il s'agit du premier **condensateur** (deux conducteurs séparés par un isolant)

1740 1800

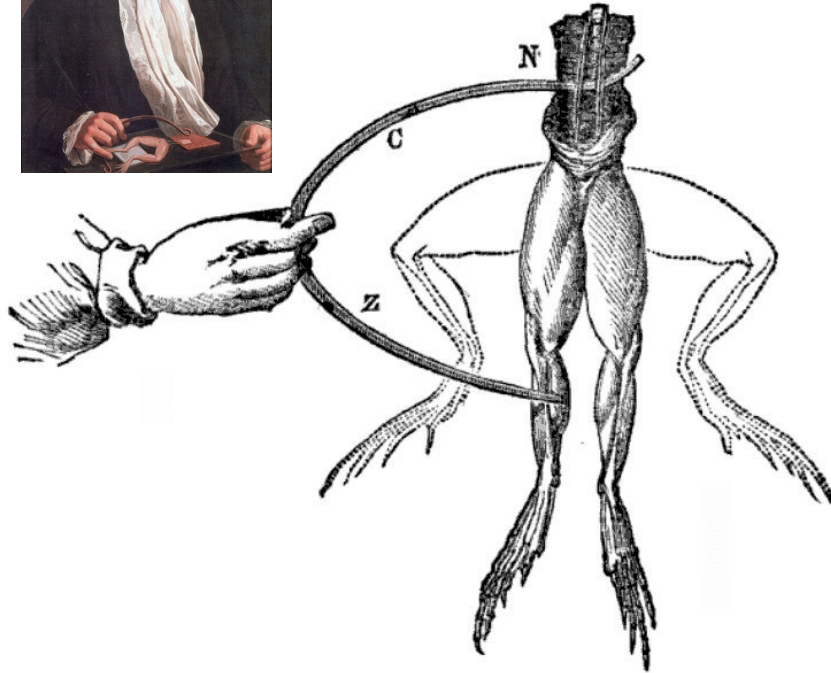
Époque moderne

1600

Galvani, Volta et la pile électrique



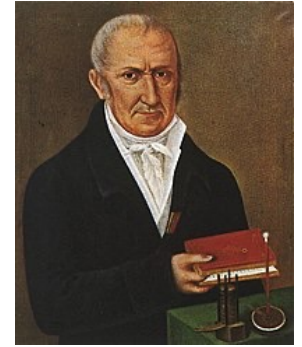
L'invention de la pile :



Luigi Galvani :

Expérience des cuisses de grenouille

→ **électricité animale ?**



Alessandro Volta:

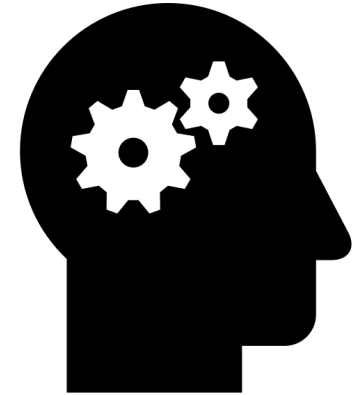
électricité métallique transmise par les fluides corporels

→ construction de la **première pile**

1800

Époque moderne

1600



Exercices et TDs

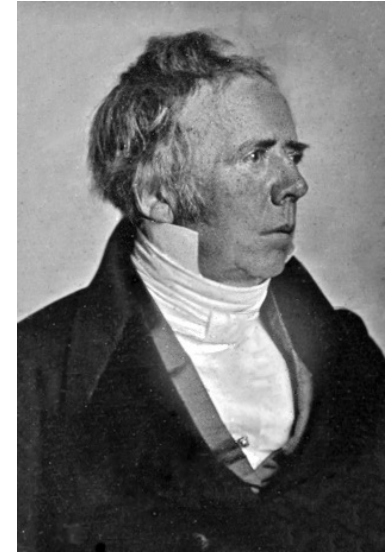
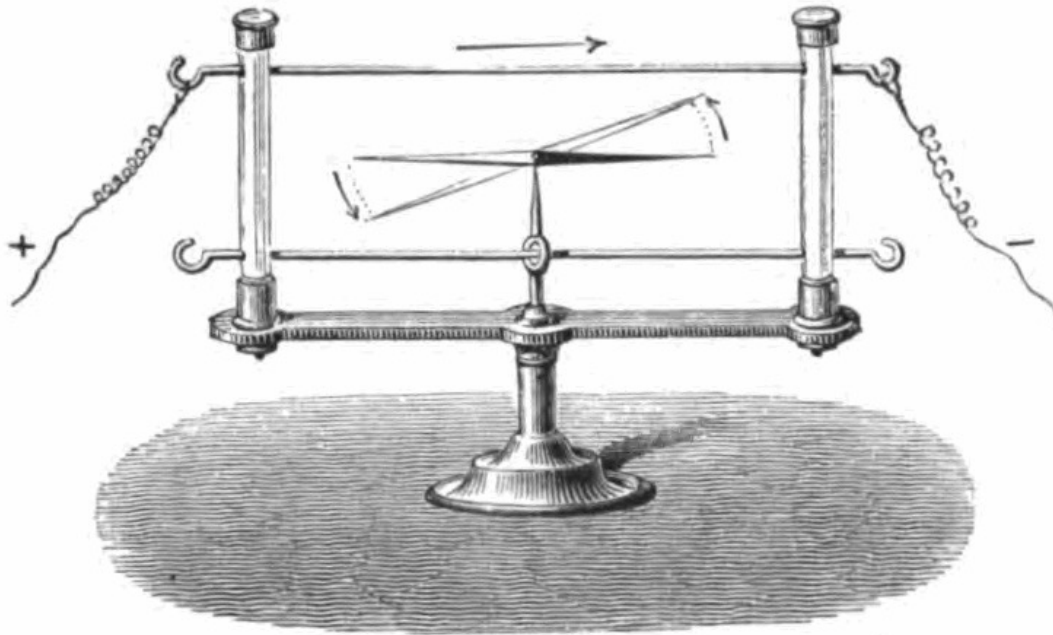




Naissance de l'électromagnétisme

Oersted et le lien entre magnétisme et électricité

L'expérience d'Oersted :



Oersted observe la déviation d'une aiguille aimantée à proximité d'un fil conducteur branché à une pile

→ lien entre magnétisme et électricité !

→ scandale à l'époque !

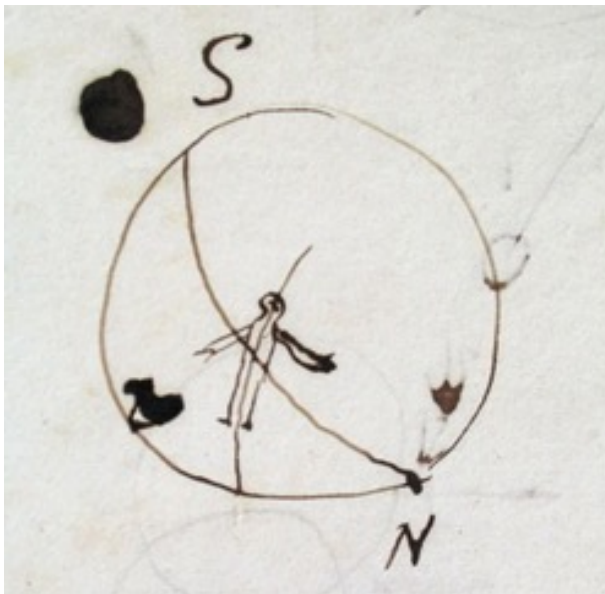
2020

Époque contemporaine

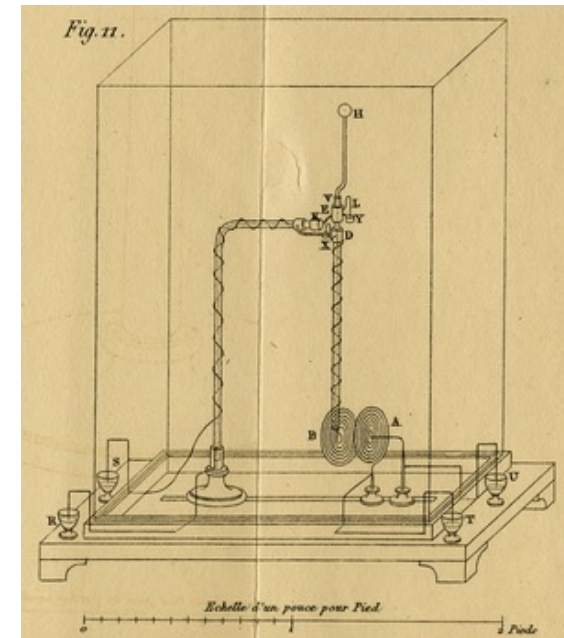
1800 1820

Ampère et le courant

Ampère va chercher à interpréter l'expérience d'Oersted



Le bonhomme d'Ampère
 → il invente la notion de **courant électrique** + principe du **galvanomètre**



L'expérience d'Ampère
 → il est capable de prédire l'attraction ou la répulsion des corps en fonction du **sens du courant**

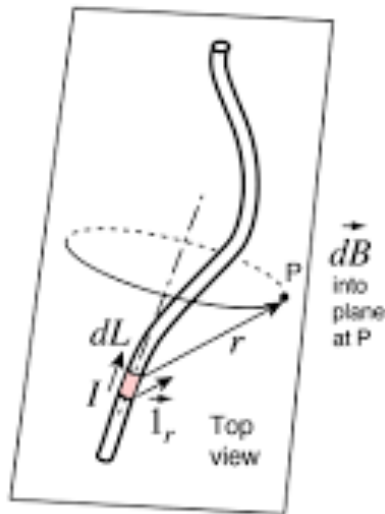
2020

1800 1820

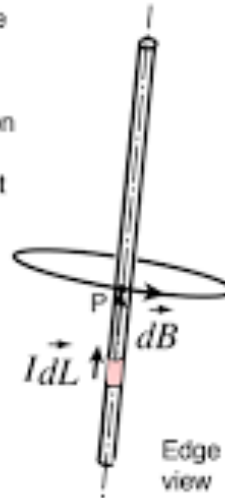
Époque contemporaine

Biot et Savart et la force électrique

Biot et Savart



$d\vec{B}$ is the
magnetic
field
contribution
at P from
the current
element
 $I d\vec{L}$



Expérience pour calculer la force exercée
par un très long fil électrique sur un aimant :

→ force en $1/r$

→ force élémentaire en $1/r^2$

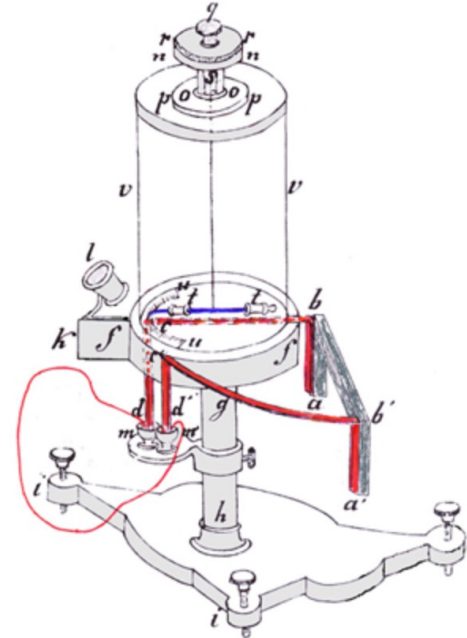
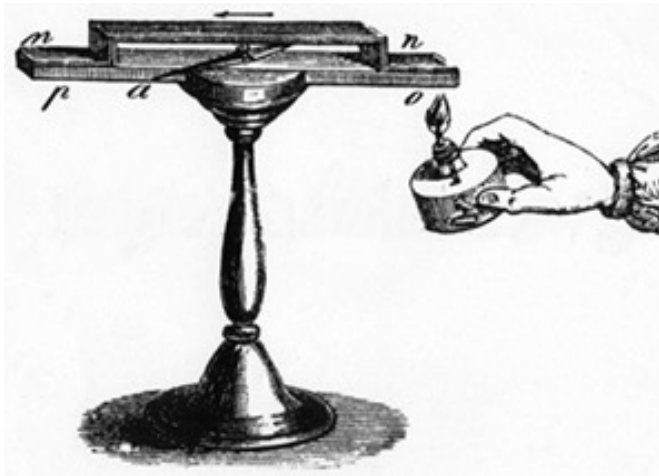
2020

Époque contemporaine

1800 1820

Ohm et la tension électrique

Ohm veut chercher à quantifier la déviation de l'aiguille dans l'expérience d'Oersted

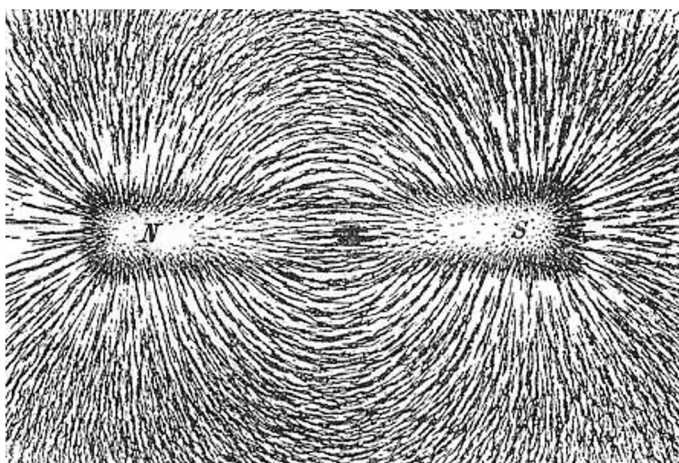


Il définir les notions de :

- **tension électrique** U (différence d'accumulation de charge),
 - **intensité du courant** I (force du courant),
 - **résistance** du matériau R (qualité de conduction)
- on peut les relier avec la **loi d'Ohm** : $U=RxI$

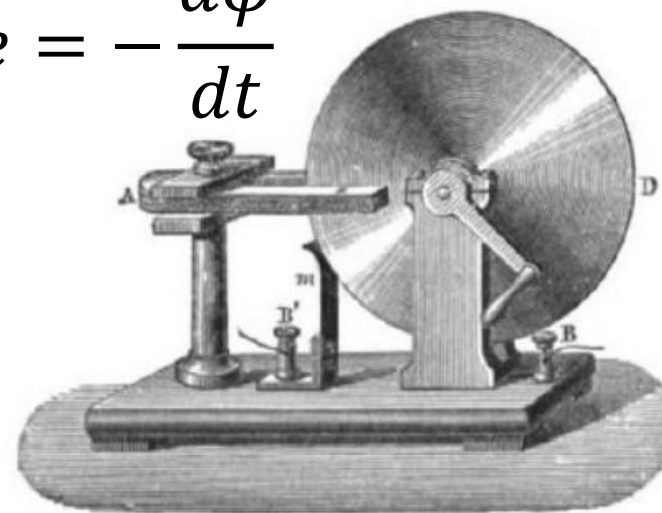
Faraday et l'induction

On peut donc produire du magnétisme à partir d'électricité
 → Faraday veut montrer qu'on peut produire de l'électricité à partir du magnétisme



Il introduit la notion de **lignes de champ magnétiques** (qu'on peut voir avec de la limaille de fer autour d'un aimant)

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$



Il démontre qu'on peut créer un courant à partir d'un **aimant en mouvement**
 → Il faudra attendre Lenz et Neumann pour formuler la **loi d'induction**

2020

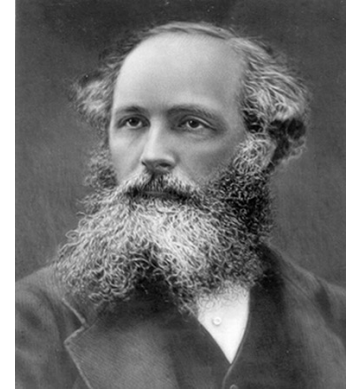
1830

1800

Époque contemporaine

Les équations de Maxwell

Maxwell publie 4 équations qui vont résumer tous les travaux précédents :



Loi de Gauss : $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ → les champs électriques résultent de la présence de charges

Loi de Thomson : $\nabla \cdot B = 0$ → il n'existe pas de monopole magnétique

Loi de Faraday : $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ → les champs électriques sont générés par la variation de champs magnétiques (induction)

Loi d'Ampère : $\nabla \times B = \mu_0 j + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$ → les champs magnétiques sont générés par des courants électriques OU des variations de champs électriques

2020

1860

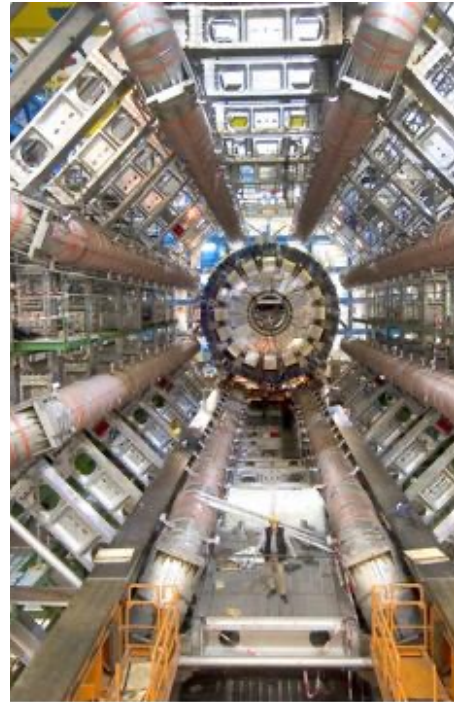
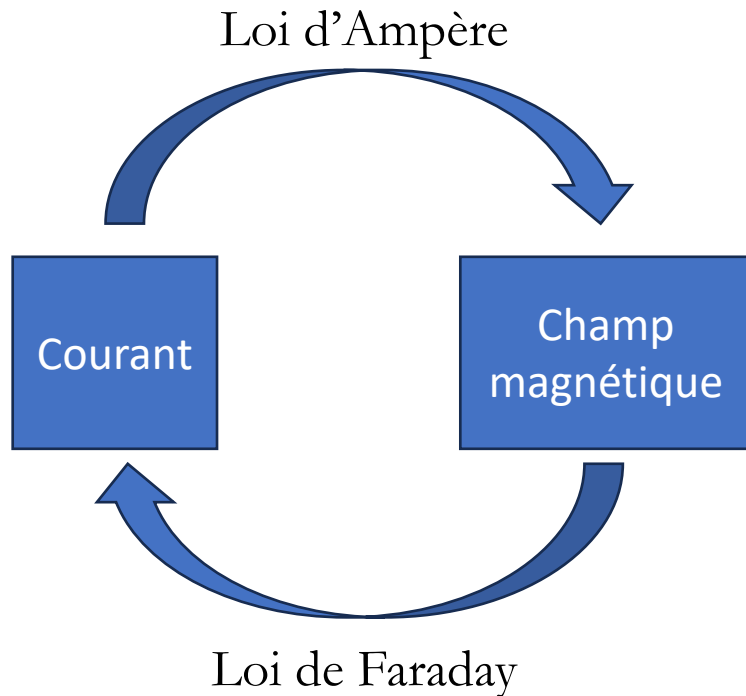
1800

Époque contemporaine

PPT : L'induction et ses applications

Pourquoi l'induction est-elle si utile ?

Petit Point Technique (PPT)

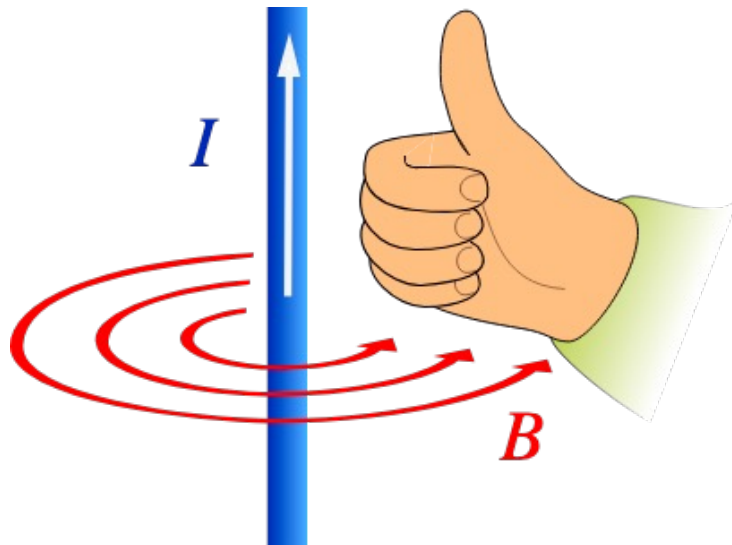


Elle permet :

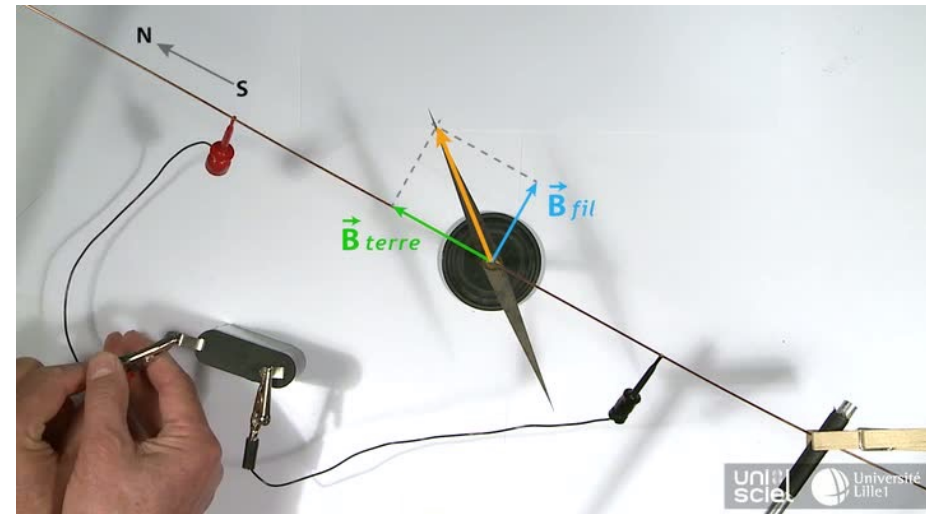
- de créer des champs magnétiques intenses à partir de courants (ex : aimants supraconducteurs pour IRM),
- de créer de la chaleur par dissipation de courants induits (ex : plaques à induction)

PPT : Interprétation de l'expérience d'Oersted

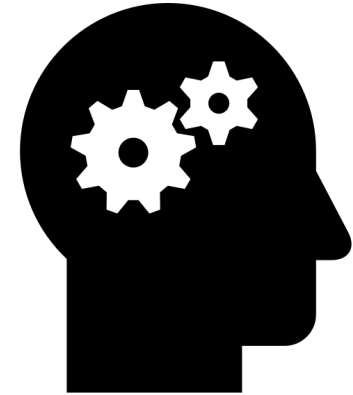
Ce qui se passe lors de l'expérience d'Oersted :



Loi d'Ampère :
Le courant dans le fil crée un
champ magnétique
(règle de la main droite)



Boussole :
Elle est déviée selon un angle qui
est la somme du champ
magnétique terrestre et du champ
créé par le fil



Exercices et TDs





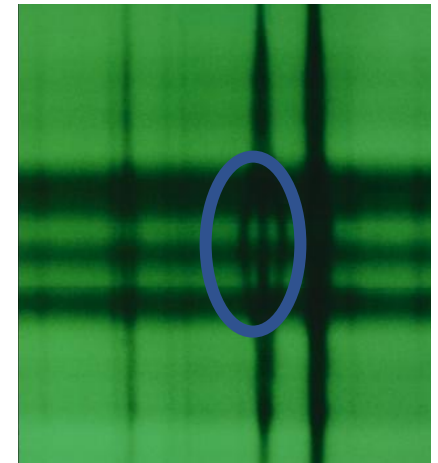
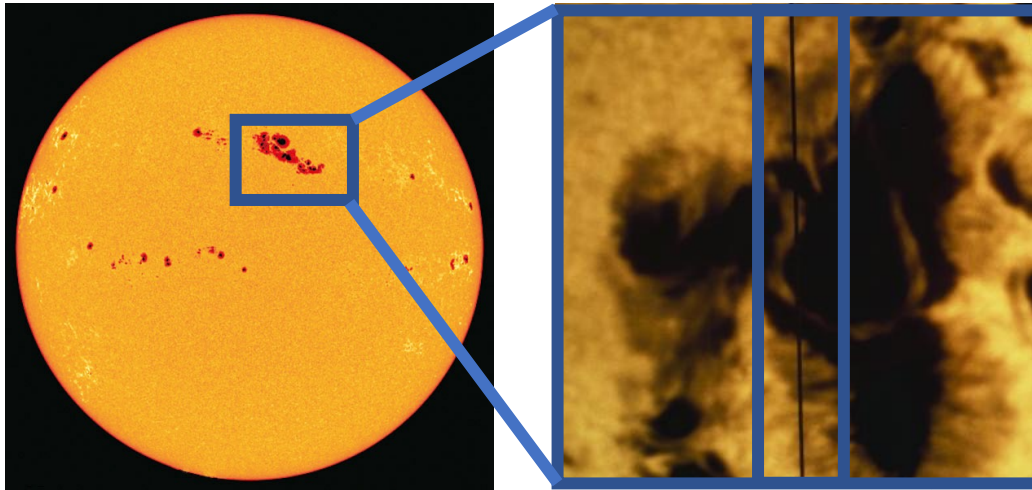
Les champs magnétiques dans l'Univers

Le champ magnétique du Soleil

D'où viennent les taches solaires ?

[SOHO, NASA]

[Kitt Peak National Observatory]



George Ellery Hale observe la lumière qui vient de ces taches, et constate un effet qu'on ne peut expliquer qu'en présence de champ magnétique (effet Zeeman)

→ le Soleil est également un aimant !

(cf. cours sur la lumière et la spectroscopie le 23 novembre)

2020

1900

1800

Époque contemporaine

Les champs électromagnétiques dans l'Univers

Recherche de champ magnétique dans les autres objets célestes :

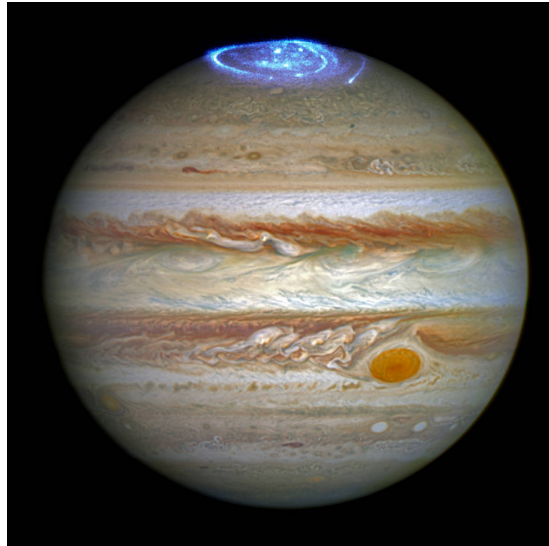
2020

1950

Époque contemporaine

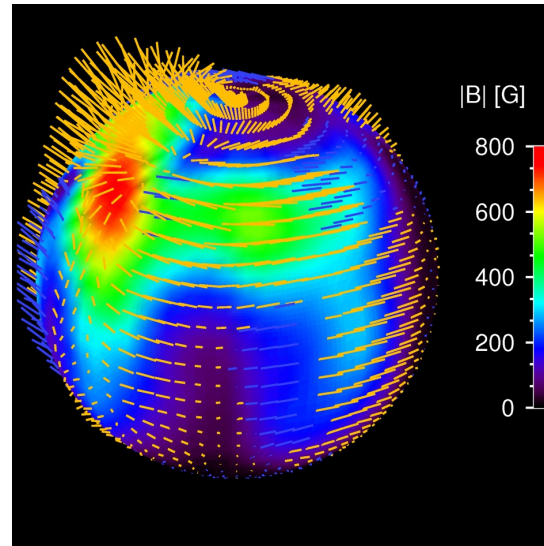
1800

[NASA]



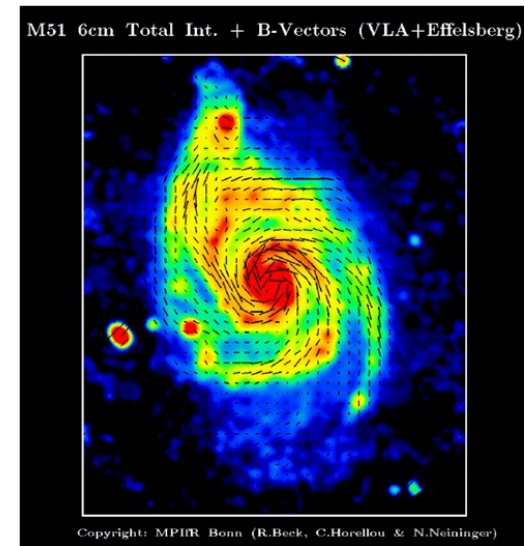
Planètes ($\sim 10^{-3} - 1G$)
(ex : Jupiter)

[Carroll+2007]



Étoiles ($\sim 1 - 10^3 G$)
(ex : II Pegasi)

[Beck, Horellou & Neininger]

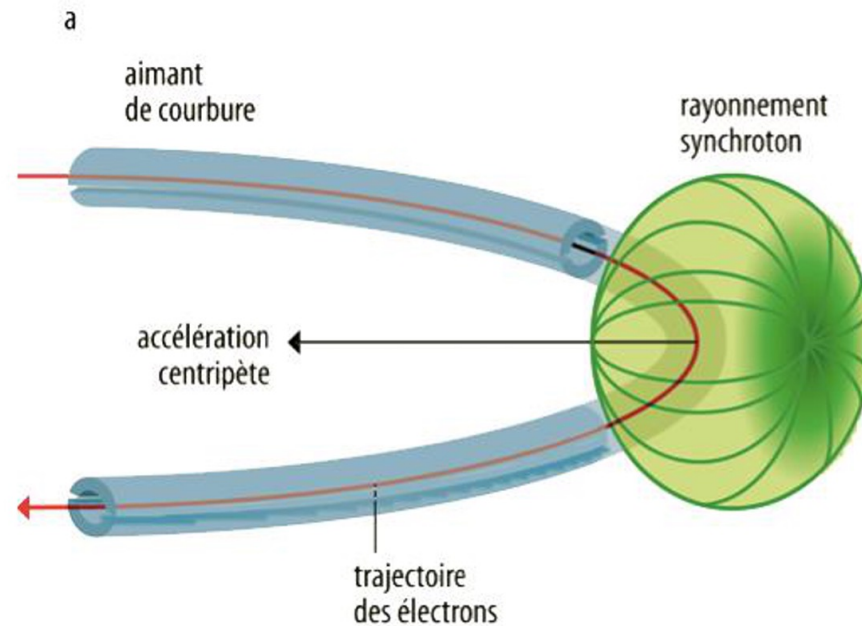


Galaxies ($\sim \mu G$)
(ex : Galaxie du
Tourbillon)

→ Tous les objets astrophysiques peuvent posséder un champ magnétique !

La détection du magnétisme : synchrotron

On détecte le champ magnétique des galaxies avec une méthode différente
 → le rayonnement synchrotron



Quand une particule accélérée est en présence d'un champ magnétique, elle subit une déviation sous la forme d'une courbure et émet une onde électromagnétique

→ On peut alors détecter cette lumière émise et remonter au champ magnétique

2020

1950

Époque contemporaine

1800

L'origine du magnétisme : la dynamo

2020

1970

Époque contemporaine

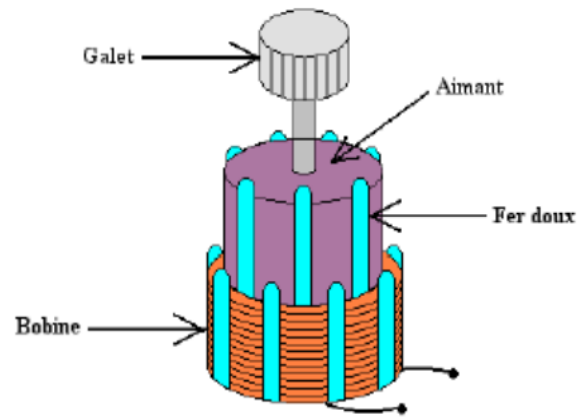
Energie cinétique
= pédalage



Energie
électromagnétique
= courant



Schéma d'une dynamo de vélo



Champ magnétique
initial
= aimant

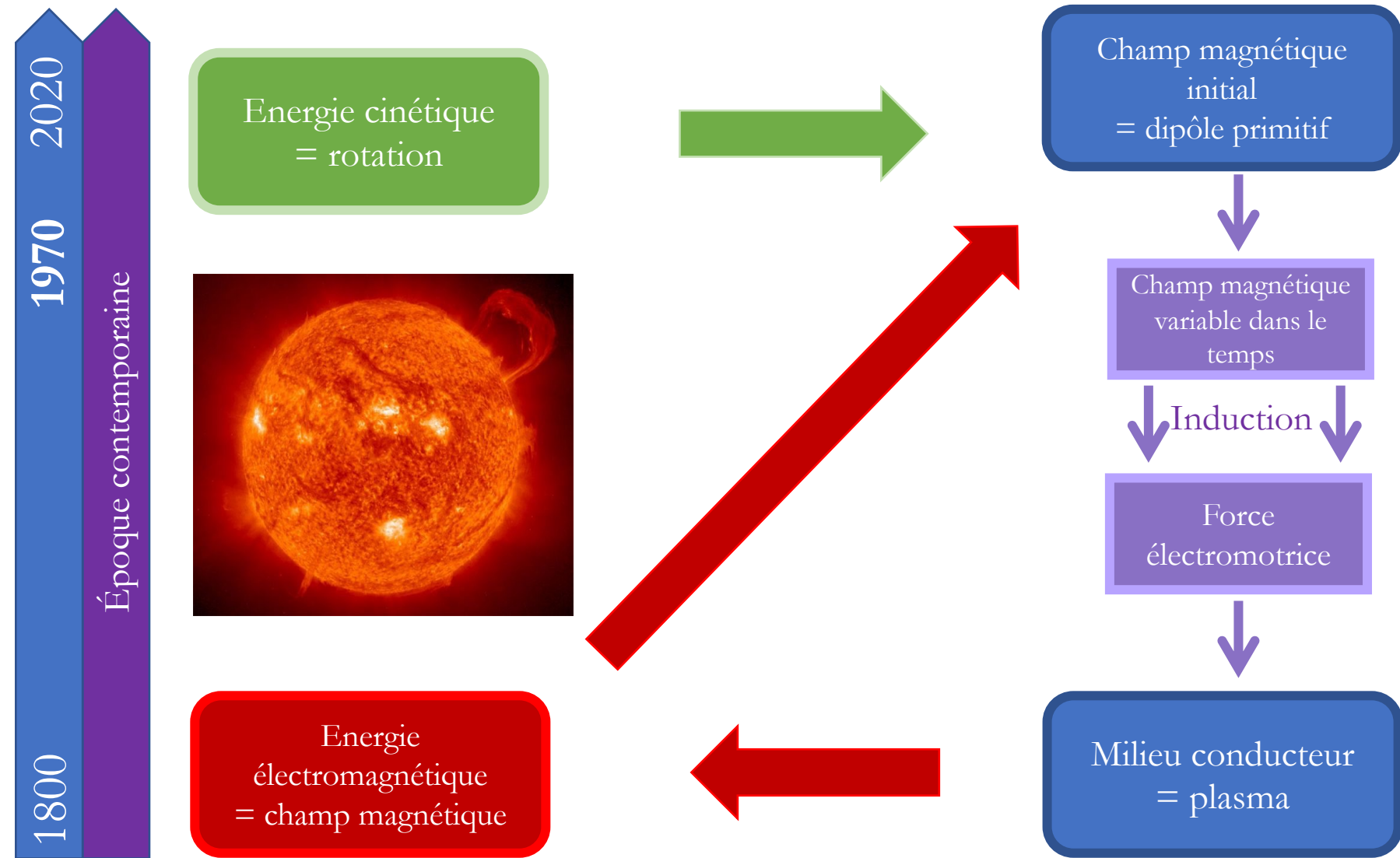
Champ magnétique
variable dans le
temps

Induction

Force
électromotrice

Milieu conducteur
= bobine de cuivre

L'origine du magnétisme : la dynamo



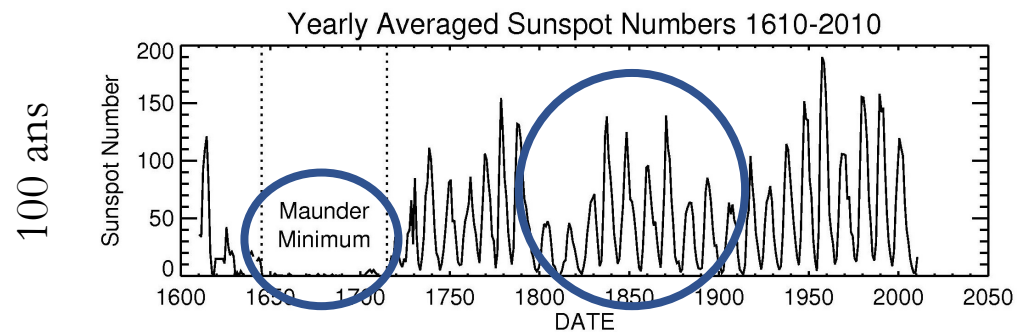
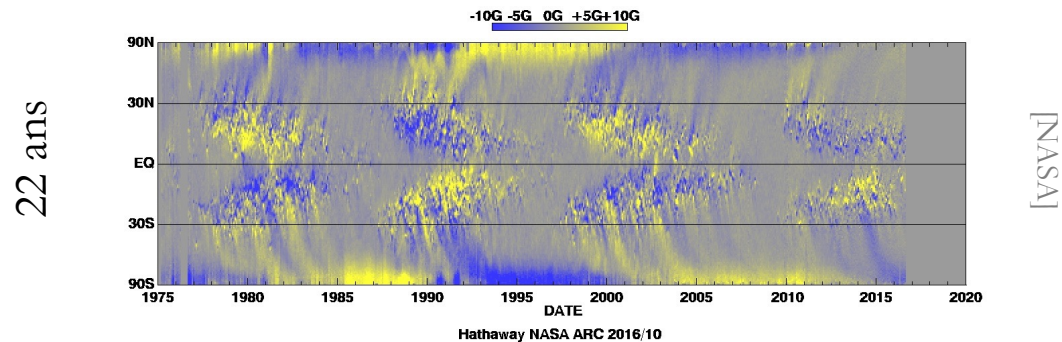
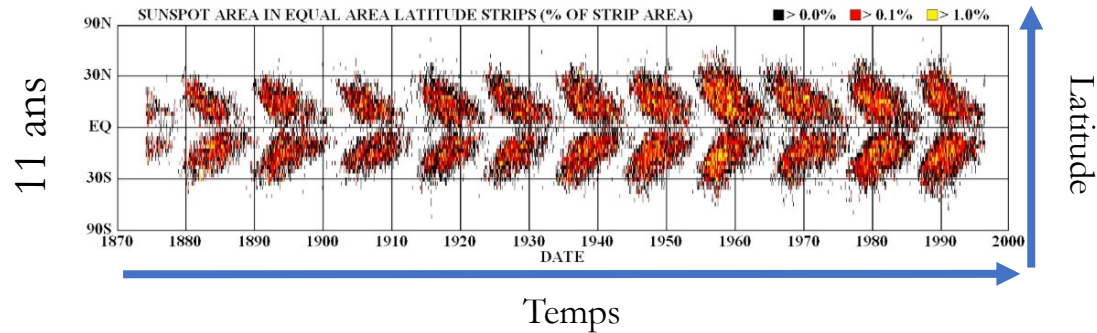
La variabilité solaire

Ces champs magnétiques sont également variables dans le temps ! (ex : Soleil)

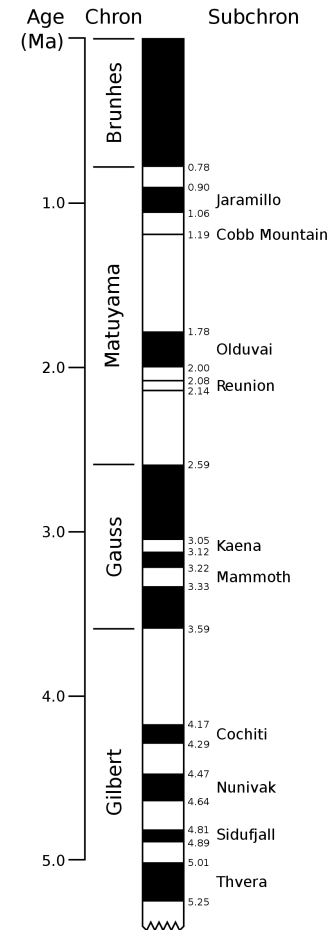
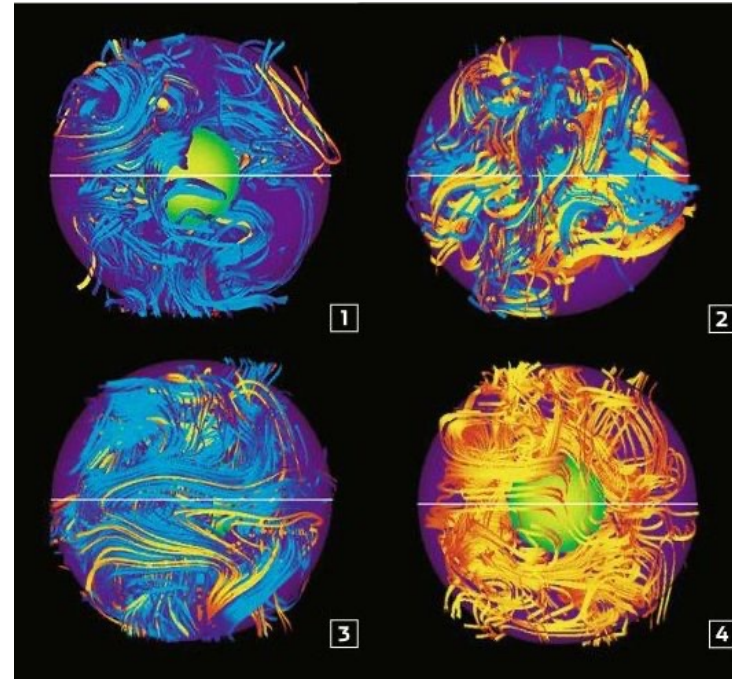
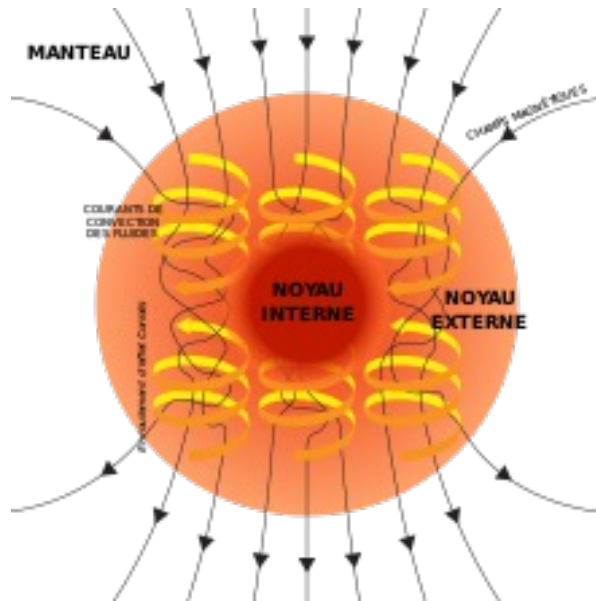
1880 2020

Époque contemporaine

1800



La dynamo terrestre



Le champ magnétique sur Terre

trouve son origine dans son noyau de fer liquide

→ tout comme le champ magnétique du Soleil, il se renverse régulièrement (300 fois en 200 millions d'années, ~1000 ans)

1880 2020

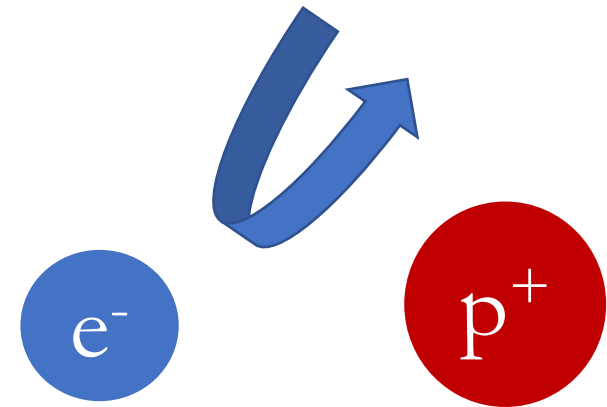
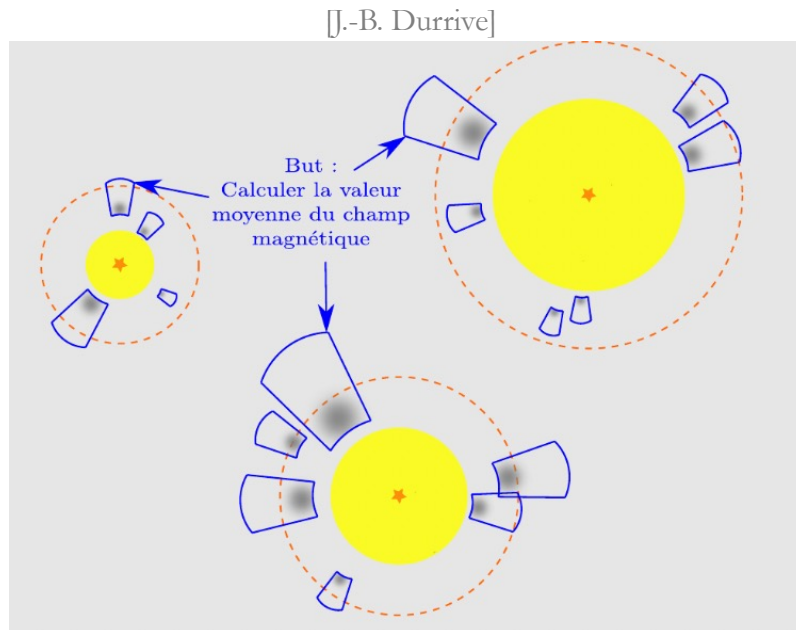
Époque contemporaine

1800

L'origine du magnétisme : Au commencement

Mais d'où vient le champ magnétique de l'Univers ?

→ plusieurs théories :



Les premières galaxies :

Quand les premières galaxies ont émis de la lumière, elles ont créé des champs électriques, et donc du champ magnétique!

L'ionisation de l'Univers :

Quand les électrons et les ions se sont créés, leurs mouvements relatifs suffit à créer du champ magnétique

2000 2020

Époque contemporaine

1800