

Prenons la clé des champs ... magnétiques !

Hubert Baty, Observatoire astronomique de Strasbourg

hubert.baty@unistra.fr



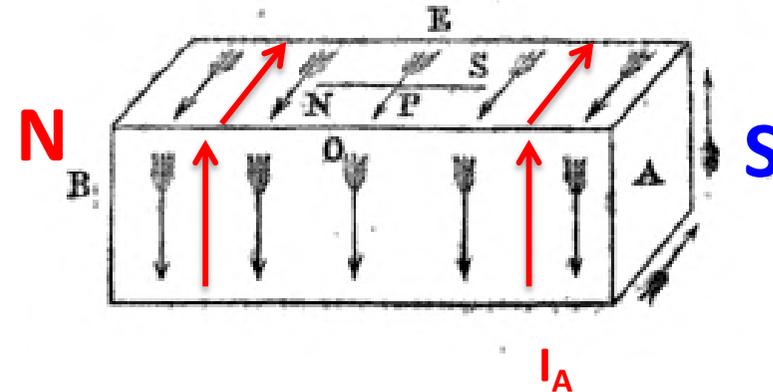
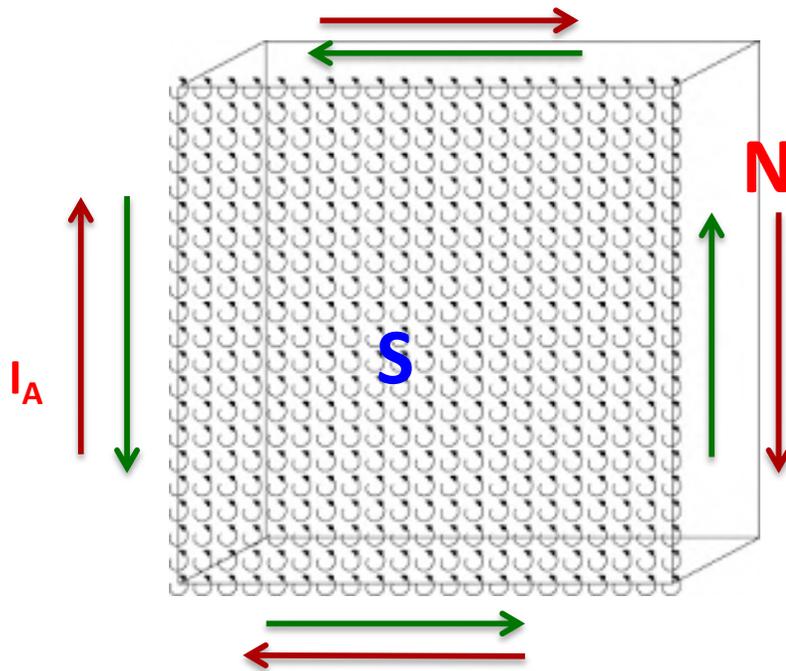
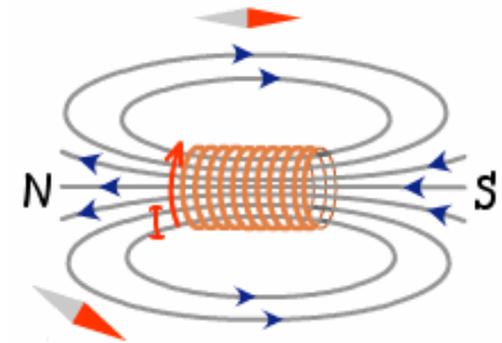
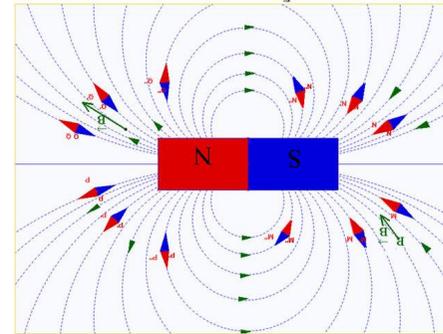
1. Les sources de champ magnétique
2. De l'expérience d'Oersted à la théorie d'Ampère
- 3. Champs magnétiques d'astres en rotation, et les colères du champ magnétique solaire**
4. La fusion thermonucléaire par confinement magnétique

Résumé du second cours

Sources de champ : aimants, courants électriques

⇒ Origine commune : le courant électrique virtuel ou réel

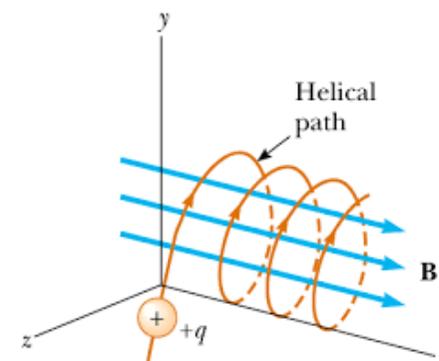
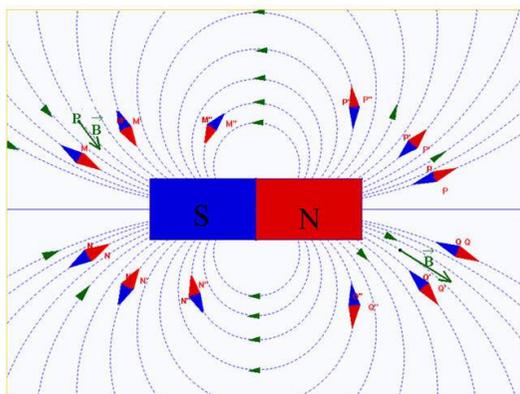
déplacement collectif des électrons
dans la source



Sources de champ : aimants, courants électriques

=> paramètre reliant la force et le champ: 'masse magnétique'

déplacement collectif des électrons dans la matière aimantée



'Masse magnétique' m^* = paramètre manquant entre force et champ magnétique

-> charge q

-> vitesse V

c'est donc le courant électrique (flux de charge) * longueur

$$[m^*] = [q] \cdot [V] = [I] \cdot [L] = A \cdot m \quad \text{car } A = C \cdot s^{-1}$$

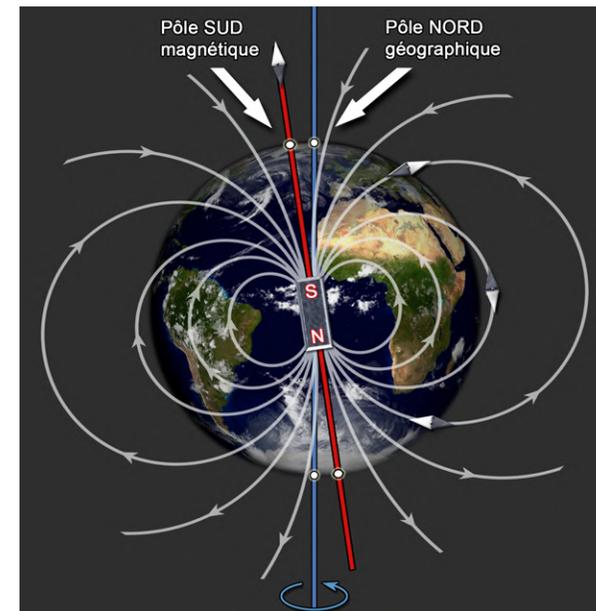
en accord avec l'unité pour B (le Tesla) -> $\text{Newton} \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ (car force = $m^* B$)

- 1. Evidence observationnelle de champs magnétiques d'astres**
- 2. Le cycle magnétique solaire**
- 3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo**
- 4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire**
- 5. Et les autres astres ?**

1. Evidence observationnelle de champs magnétiques d'astres

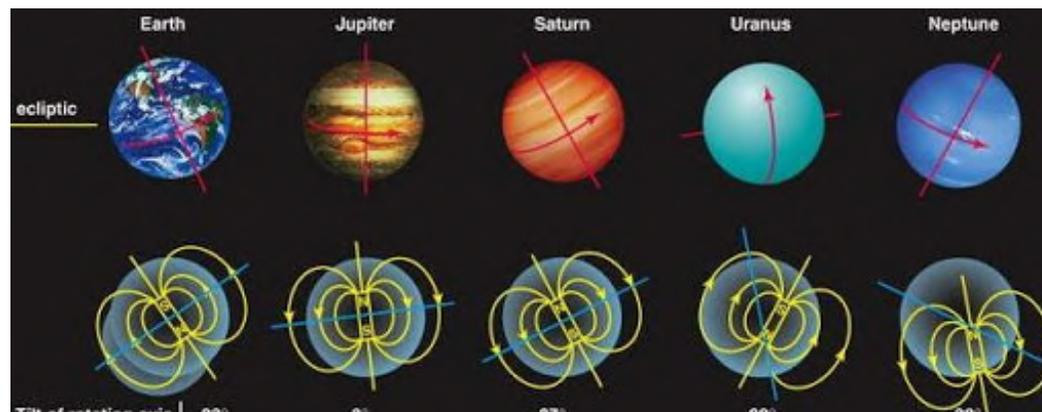


Planète Jupiter (aurore polaire)



La Terre

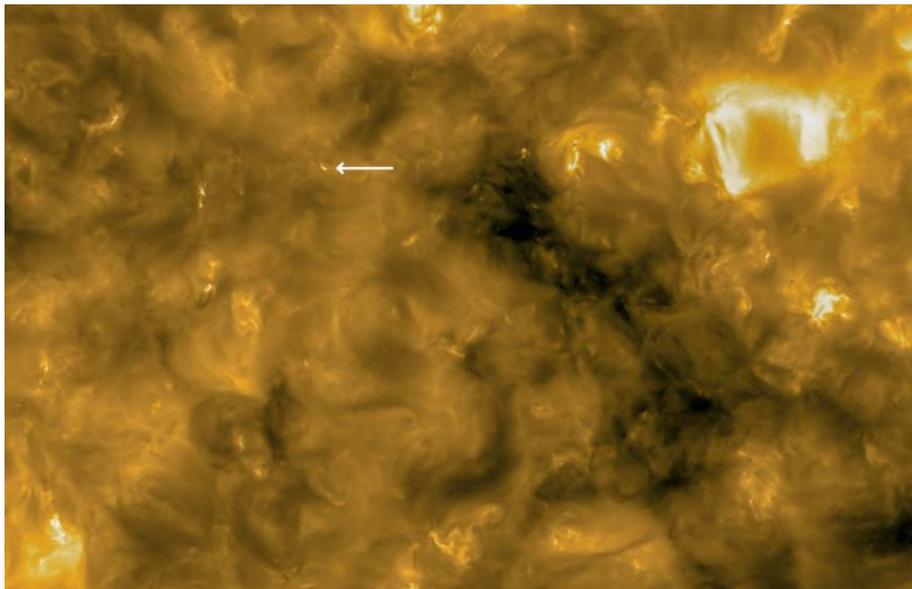
1. Evidence observationnelle de champs magnétiques d'astres



Planètes système solaires

Crédit : M. Abada-Simon/Arpèges/observatoire de Paris

1. Evidence observationnelle de champs magnétiques d'astres (Soleil)



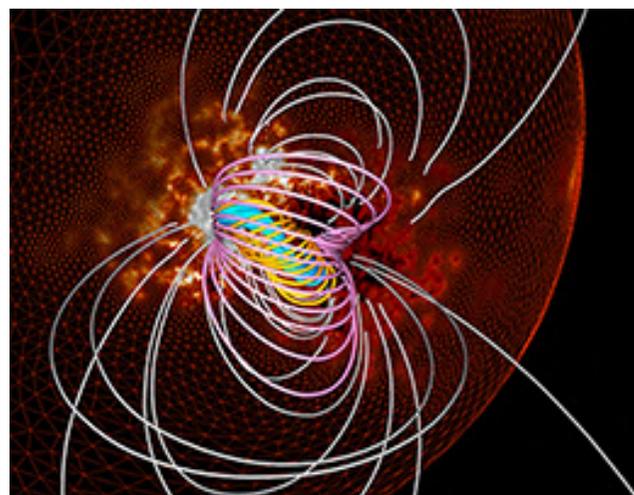
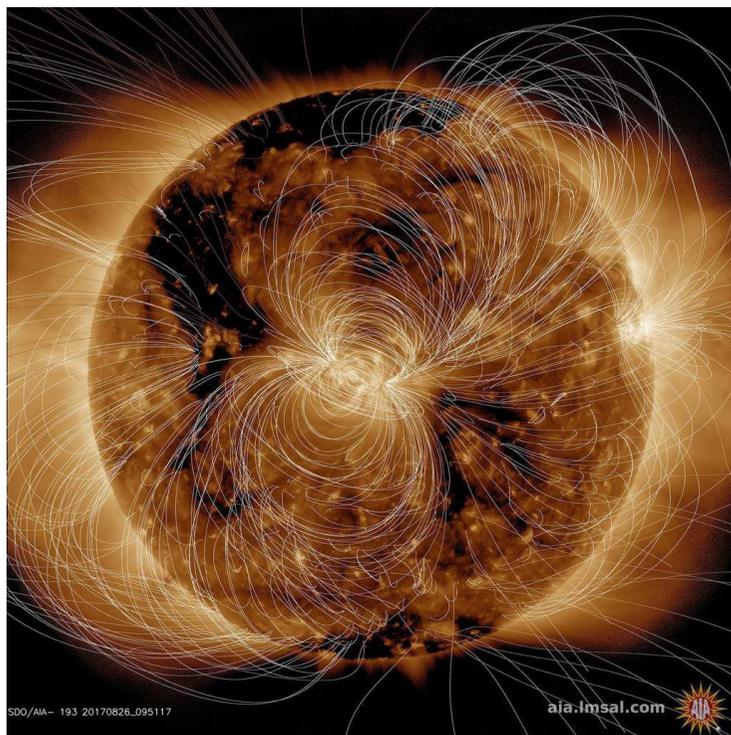
'Feux de camp' (sonde Solar Orbiter 2020)

images

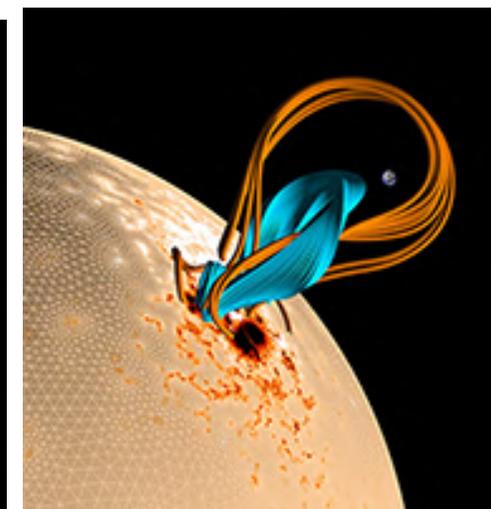


Soleil (éruptions solaires)

1. Evidence observationnelle de champs magnétiques d'astres (Soleil)



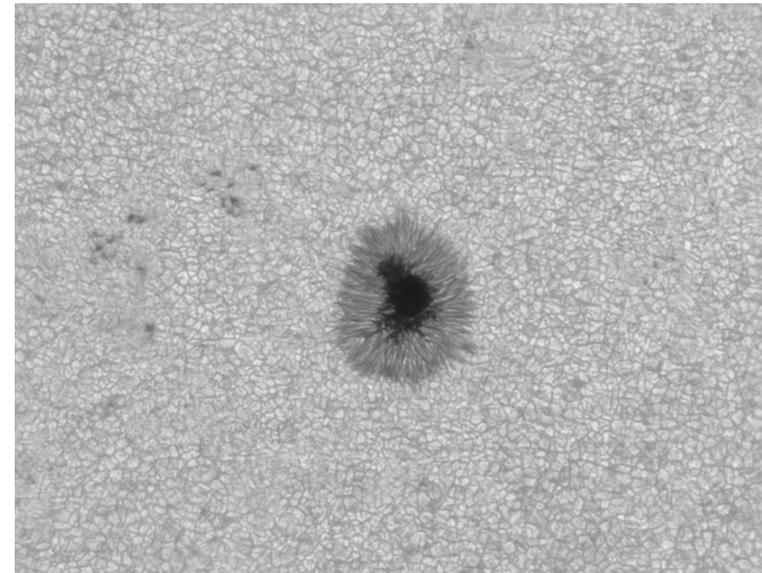
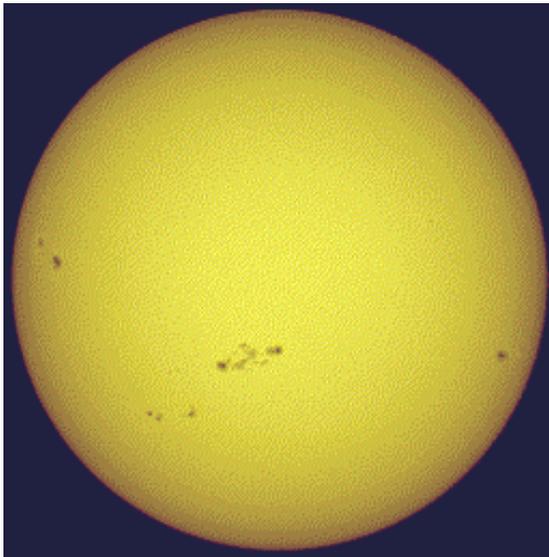
schéma



Les lignes de champ reconstruites à partir des tâches solaires (sont observables)

-> Le champ magnétique y est mesurable

2. Le cycle magnétique solaire

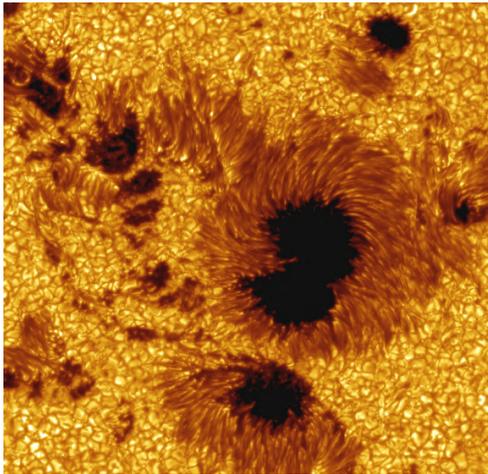


tâches solaires (qui sont observables dans le rayonnement visible)

Taille -> diamètre terrestre (10000 km environ)

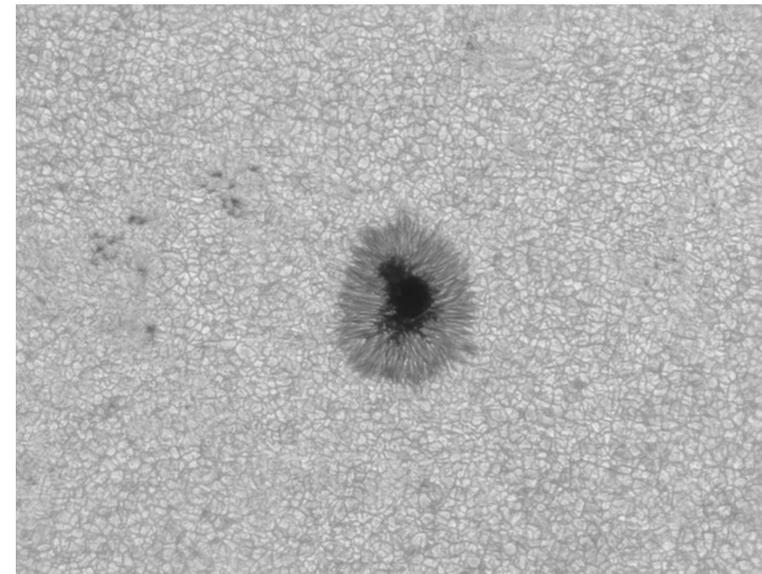
Froides et très magnétisées -> B de l'ordre du Tesla (alors que B vaut 0.01 T en moyenne)

2. Le cycle magnétique solaire



Observation autour
d'une raie (fréquence) du
domaine visible

=> **Observation plus fine**



tâches solaires (qui sont observables dans le visible) avec la granulation
sont souvent groupées à la surface du Soleil (région d'où provient la lumière visible)

2. Le cycle magnétique solaire



Éclipse de 1999



Coronographe-pic midi

Observation dans le domaine du visible (entier)

Éclipse naturelle ou artificielle avec un coronographe permettant de définir la surface

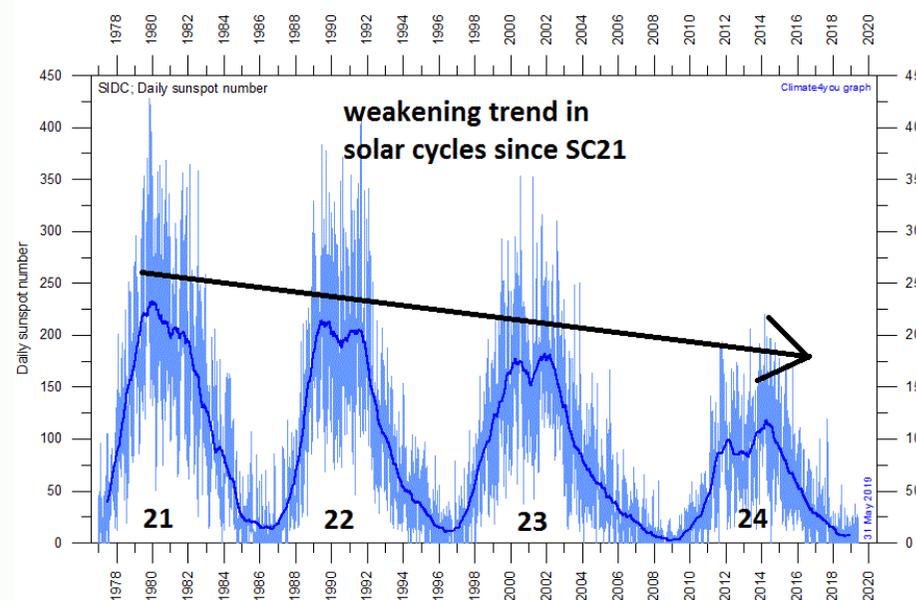
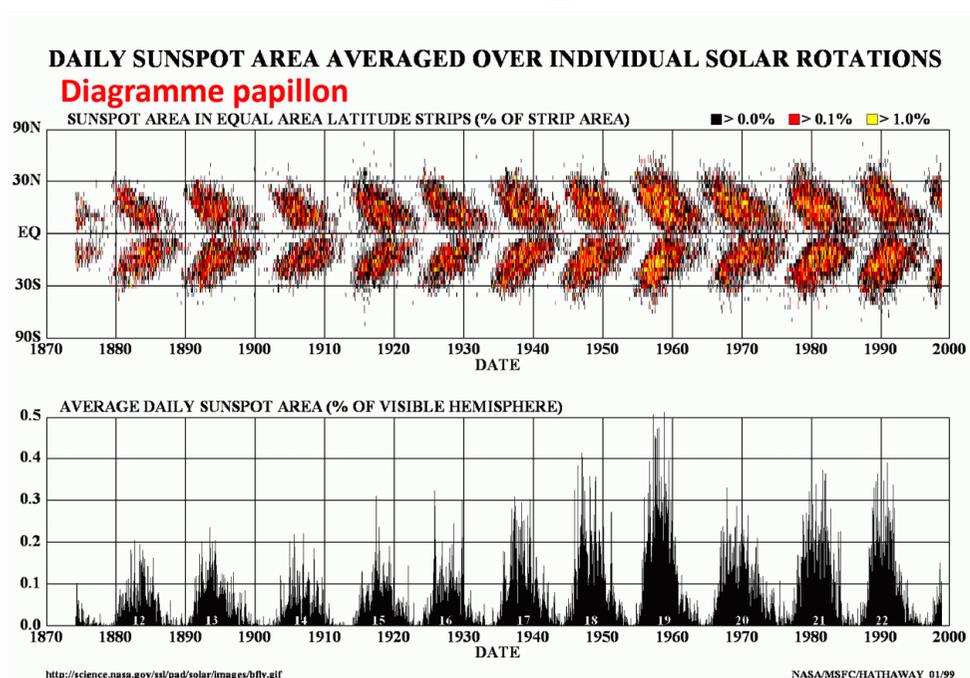
tâches solaires (qui sont observables dans le visible)
sont souvent groupées à la surface du Soleil (région d'où provient la lumière visible)

2. Le cycle magnétique solaire



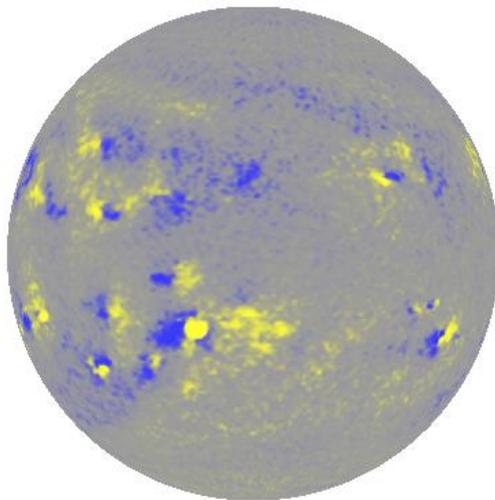
**Observatoire du pic du Midi de Bigorre (Hautes-Pyrénées)
situé à 2877 m => observation possible depuis la surface terrestre dans le visible !**

2. Le cycle magnétique solaire

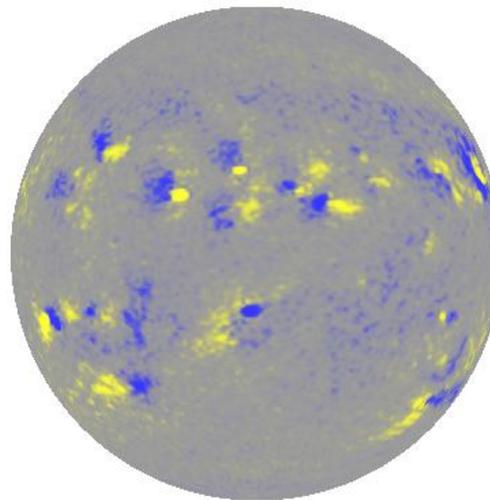


Les tâches solaires (qui sont observables) permettent de suivre l'activité magnétique (maximum tous les 11 ans) – Les tâches migrent lentement vers l'équateur pendant un cycle

2. Le cycle magnétique solaire



Cycle 22
1989 August 02



Cycle 23
2000 June 26

Couleurs indiquent
les pôlarités N et S

Cycle 24 similaire
au cycle 22

La polarité globale s'inverse d'un cycle à l'autre => cycle périodique avec une période magnétique de 22 ans !

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



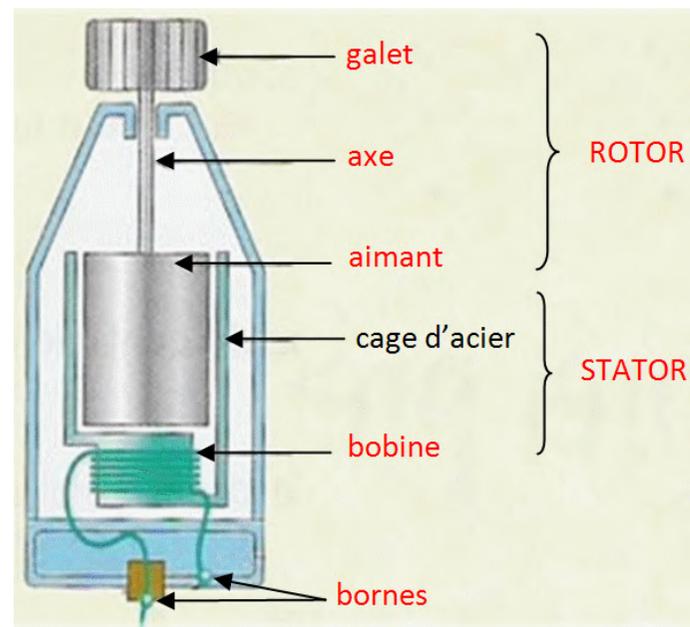
**La dynamo de vélo => courant électrique alimenté par la roue qui tourne
Energie mécanique est transformée en énergie électrique**

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



Aimant tournant/conducteur
fixe :

⇒ Champ magnétique variable
en temps induit un courant



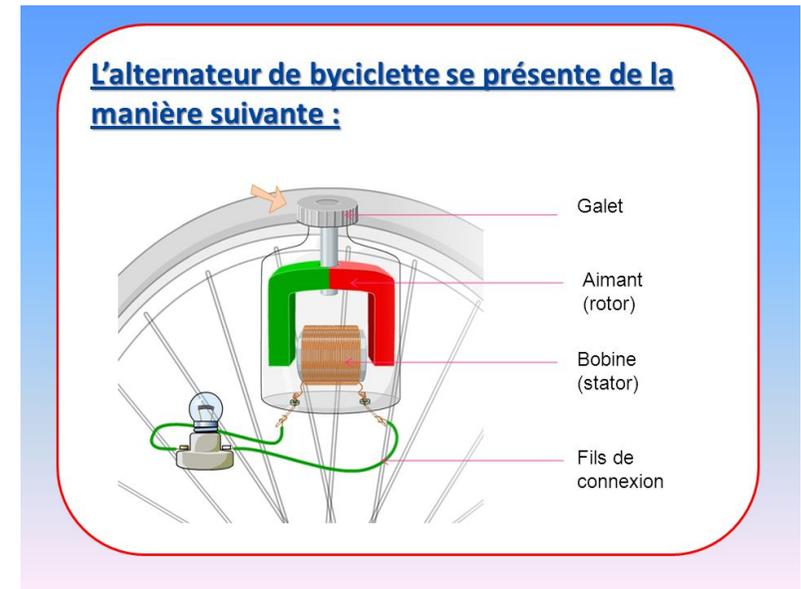
La dynamo de vélo => courant électrique alimenté par la roue qui tourne
Mouvement de rotation (énergie mécanique) est transformée en courant (énergie électrique)

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



Aimant tournant/conducteur fixe :

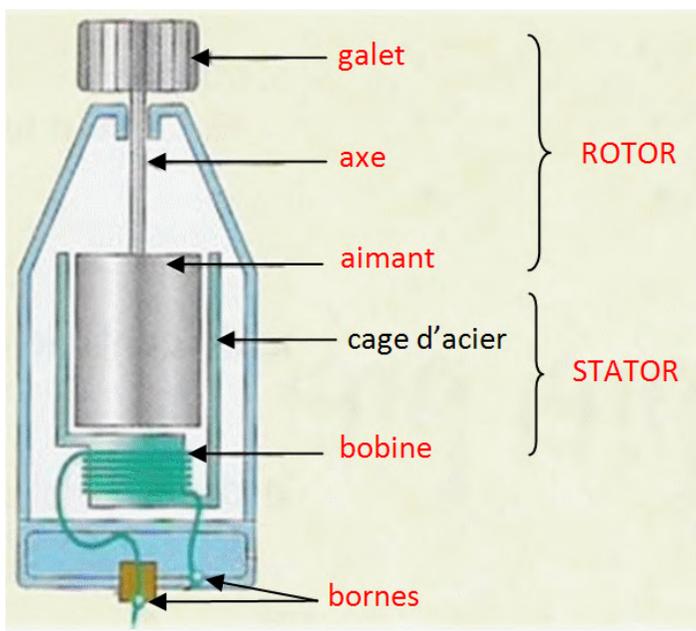
⇒ Champ magnétique variable en temps induit un courant



La dynamo de vélo => courant électrique alimenté par la roue qui tourne

Mouvement de rotation (énergie mécanique) est transformée en courant (énergie électrique)

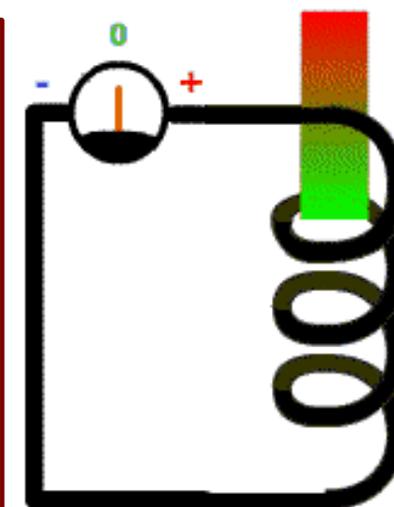
3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



Version linéaire de l'induction :

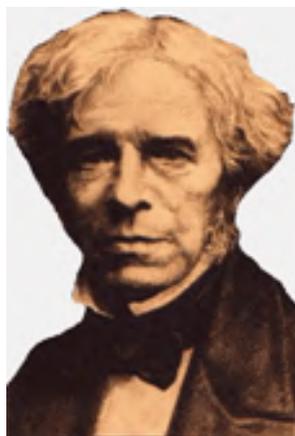
⇒ **Mouvement relatif**
d'un champ magnétique/
conducteur induit un courant
dans le conducteur!

Cliquez pour lancer



La dynamo de vélo => courant électrique alimenté par la roue qui tourne
Energie mécanique est transformée en énergie électrique

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



=>

1831: Michael Faraday (1791-1867)
Découverte de l'induction

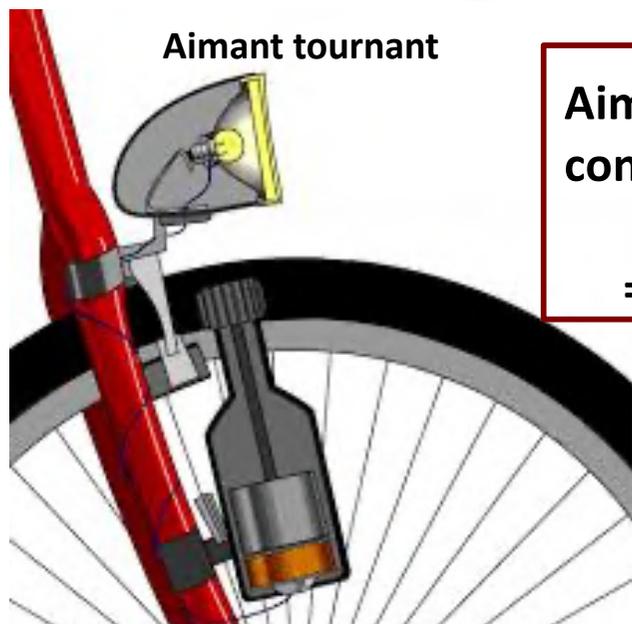


Dynamo de Zénobe Gramme
- 1868

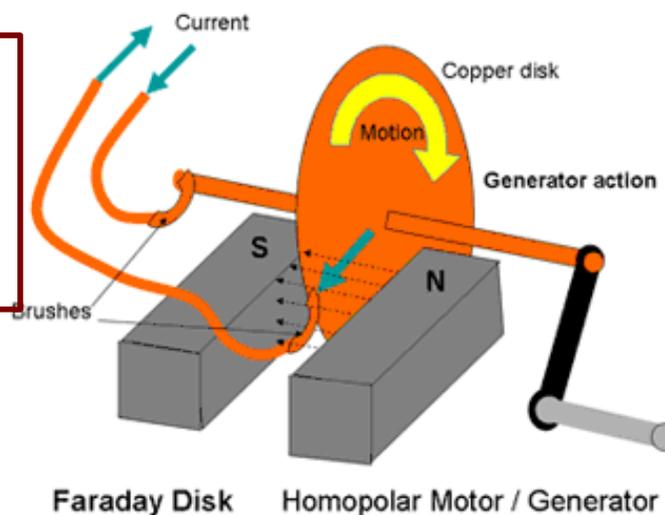


Alternateur
=> Production électricité

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



Aimant fixe mais disque
conducteur tournant:
=> courant induit



Dynamo homopolaire de Faraday-Bullard - 1955

La dynamo de vélo => courant électrique alimenté par la roue qui tourne

Mouvement de rotation (énergie mécanique) est transformée en courant (énergie électrique)

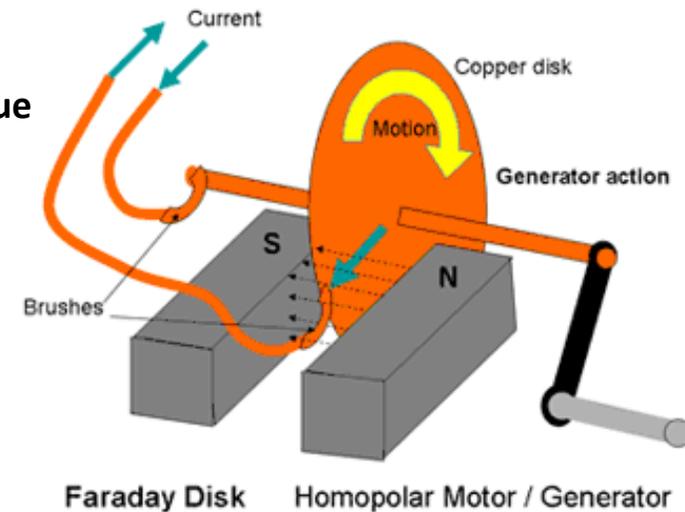
3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo

Animation
(site ENS)

<https://www.youtube.com/watch?v=vW5pEq7ZuEM>

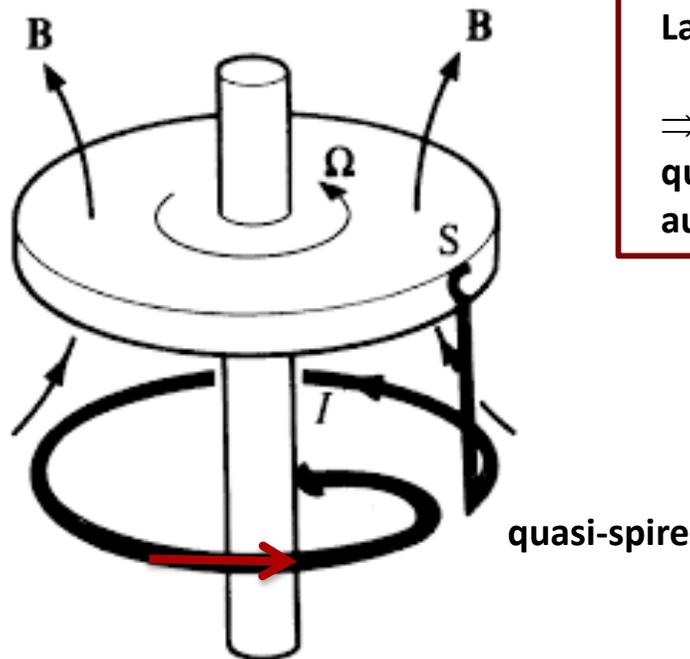
Aimant fixe mais disque
conducteur tournant

=> courant induit



Dynamo homopolaire de Faraday-Bullard - 1955

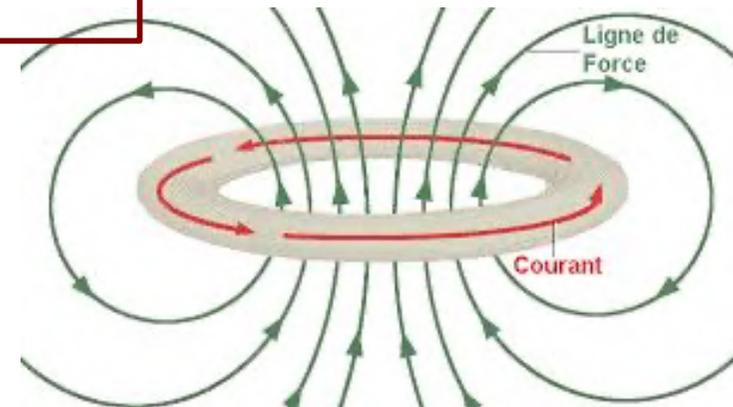
3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo



La spire de courant induit

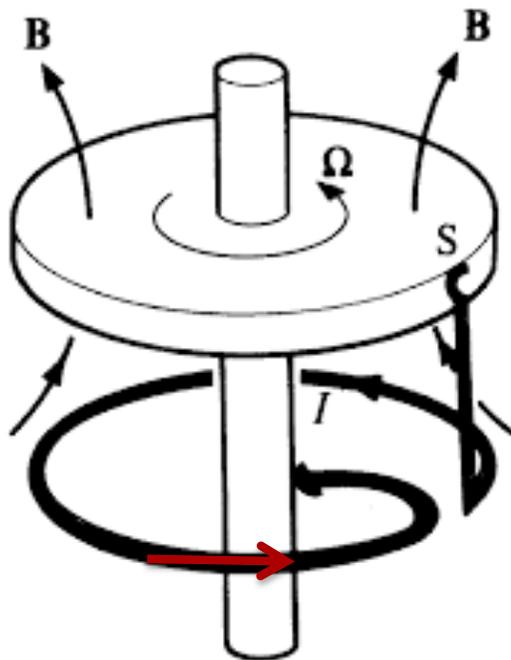
⇒ Crée un champ magnétique qui renforce le champ initial au centre

Besoin d'un champ magnétique initial pour amorcer seulement



Modèle de la dynamo homopolaire (principe inverse du moteur homopolaire)
=> Amplification du champ magnétique : **dynamo auto-excitée**

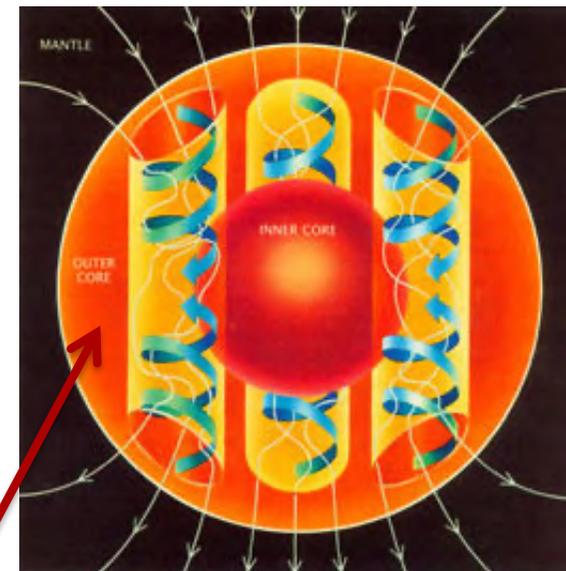
3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre



Dynamo terrestre
(vortex)

⇒ Champ poloidal
dipolaire

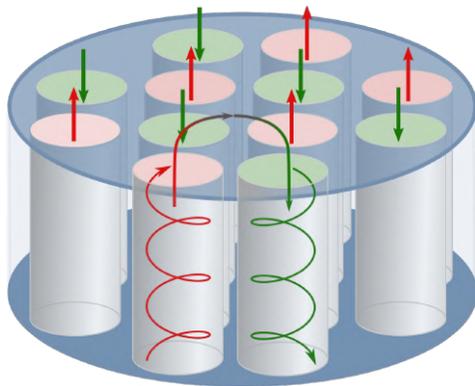
Noyau liquide est conducteur



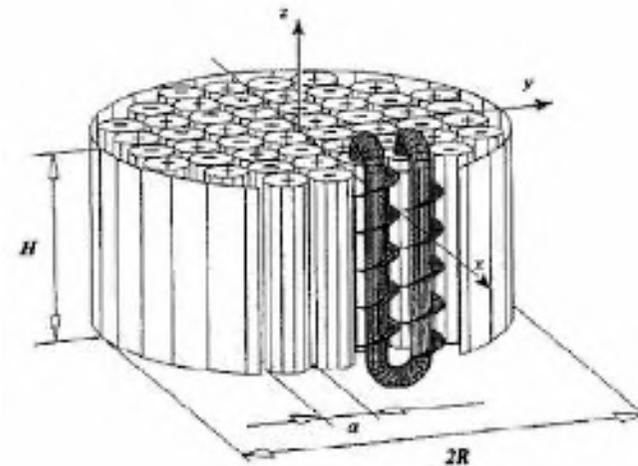
Structure interne de
la Terre

Modèle de la dynamo homopolaire

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre



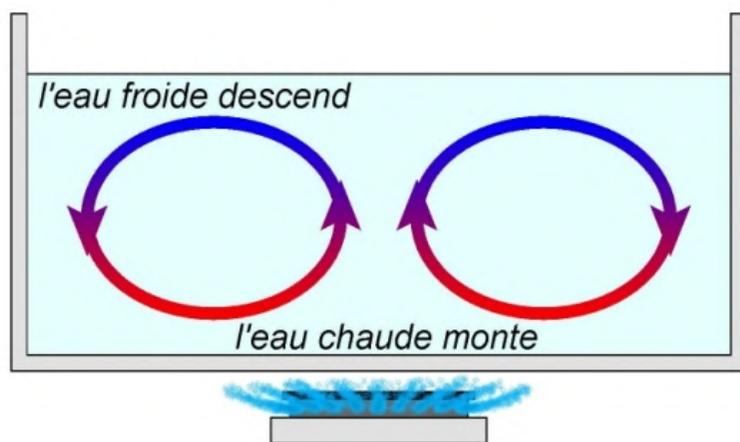
Sodium liquide



Expérience de Karlsruhe

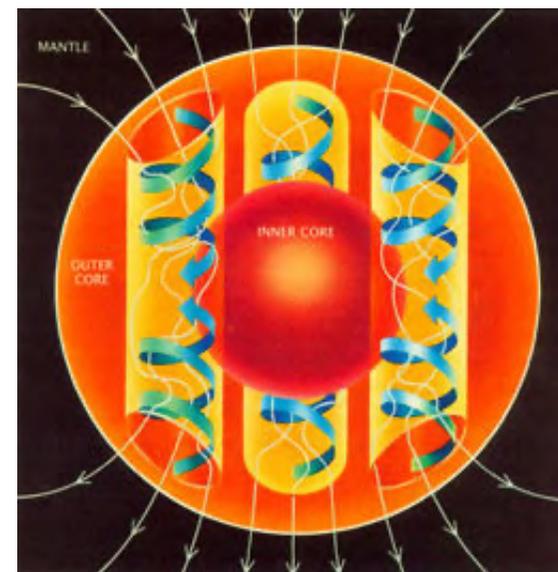
Expériences en laboratoire démontrant l'effet Dynamo

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre



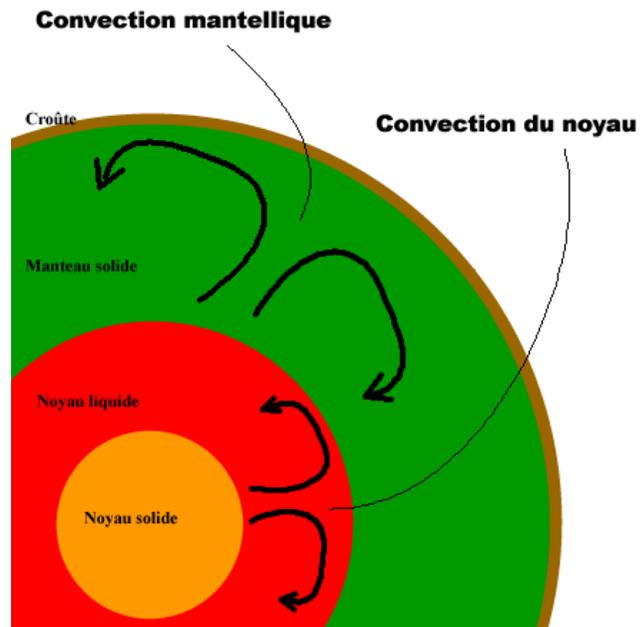
La convection thermique

Vortex résultent de la convection thermique
dans la région noyau liquide



Structure interne de
la Terre

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre

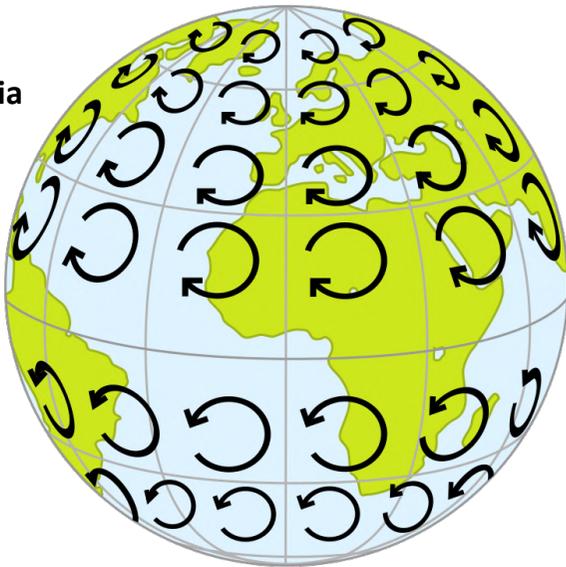


Noyau liquide de la Terre: liquide métallique conducteur (à base de Fer)

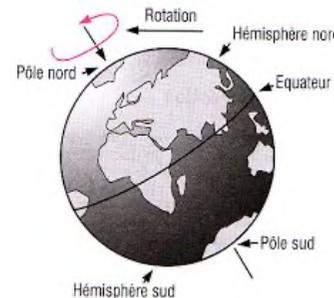
Vortex : résulte du mouvement de convection thermique (cellules) déformé par la rotation de la Terre à cause de la force de Coriolis

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre

Source wikipédia



Terre tourne
(ouest en est)

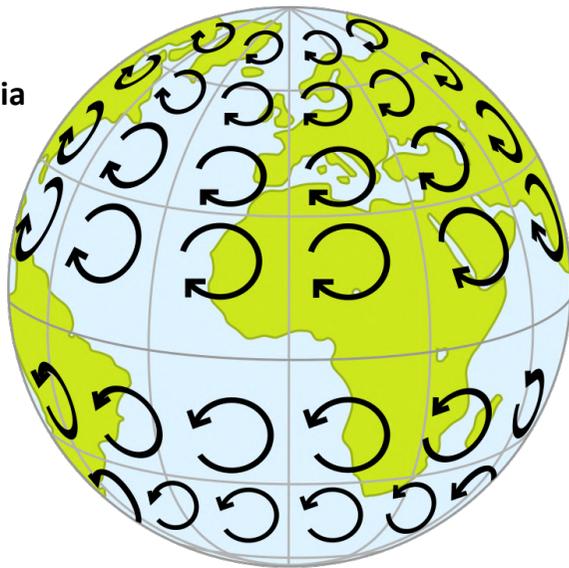


Déviaton pour un corps ascendant (vers l'ouest – hémisphère nord))
(le sens sera inversé pour un corps descendant : $h = 150 \text{ m} \Rightarrow 4 \text{ cm}$ de déviation à l'équateur)

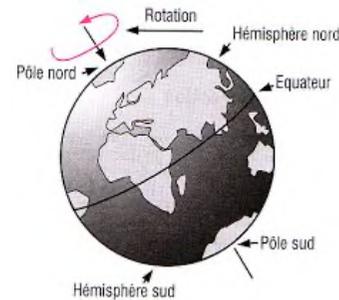
Force de Coriolis

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo terrestre

Source wikipédia



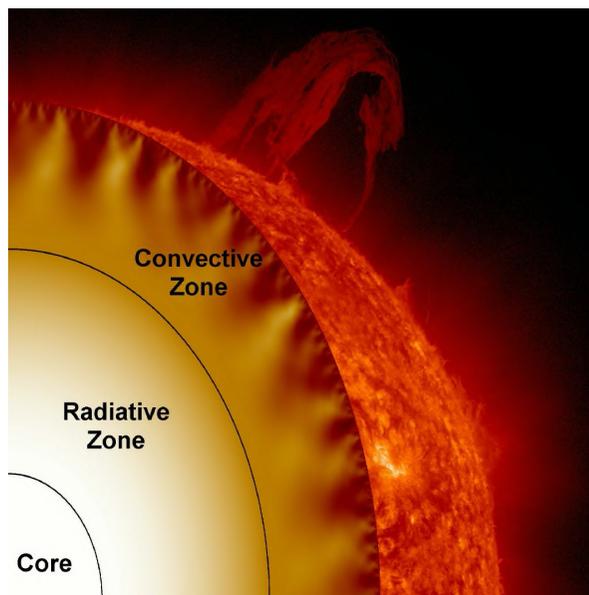
Terre tourne
(ouest en est)



Déviaton pour un corps ascendant (vers l'ouest – hémisphère nord))
(le sens sera inversé pour un corps descendant : $h = 150 \text{ m} \Rightarrow 4 \text{ cm}$ de déviation à l'équateur)

Force de Coriolis

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo solaire



15 MK

6000 K

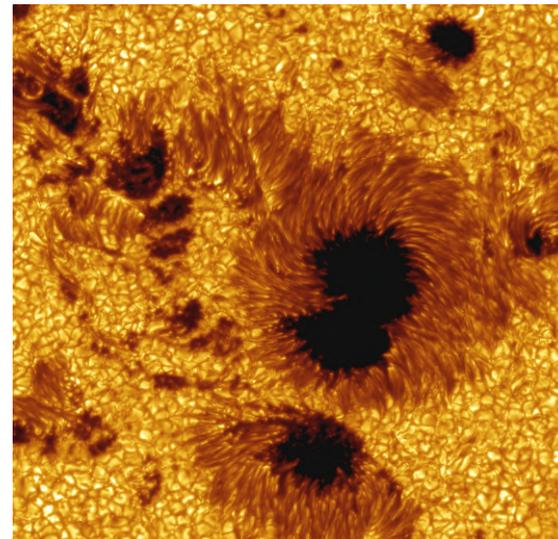
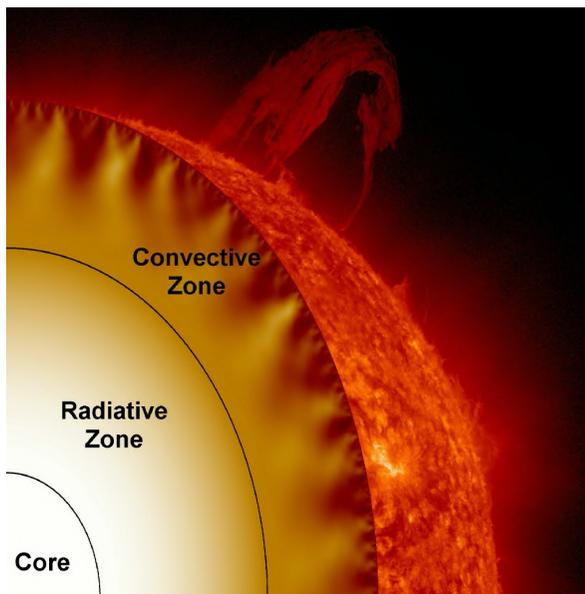
Energie évacuée du centre

On a aussi de la convection thermique
(de plasma) sous la surface

-> zone de convection

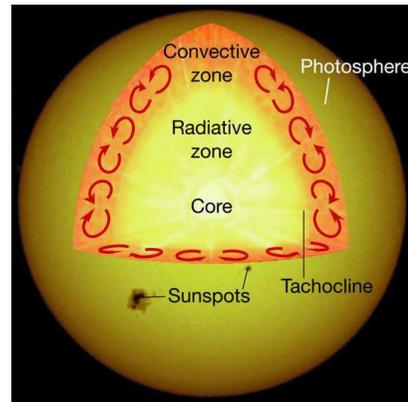
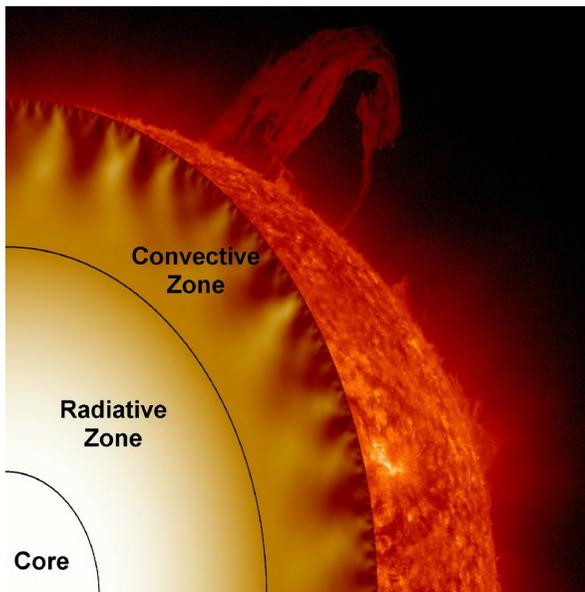
Plasma = milieu très conducteur

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo solaire



Granulation => haut des cellules de convection

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo solaire



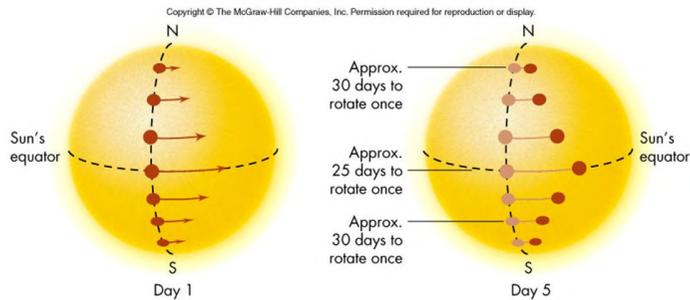
**Convection sous la surface
+
Forte rotation différentielle**

Plasma = milieu très conducteur

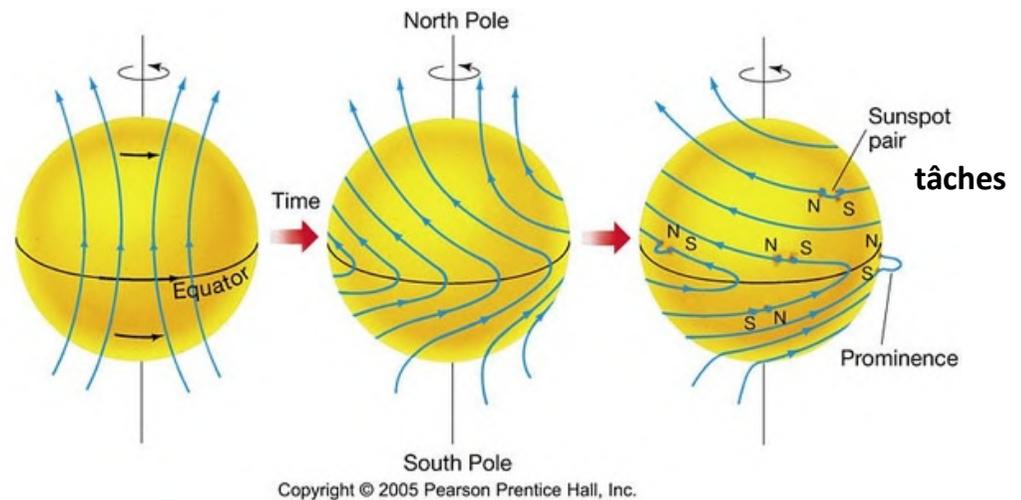
Modèle de la dynamo 'plus complexe'

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo solaire

Differential Rotation



- The Sun undergoes differential rotation, 25 days at the equator and 30 at the poles



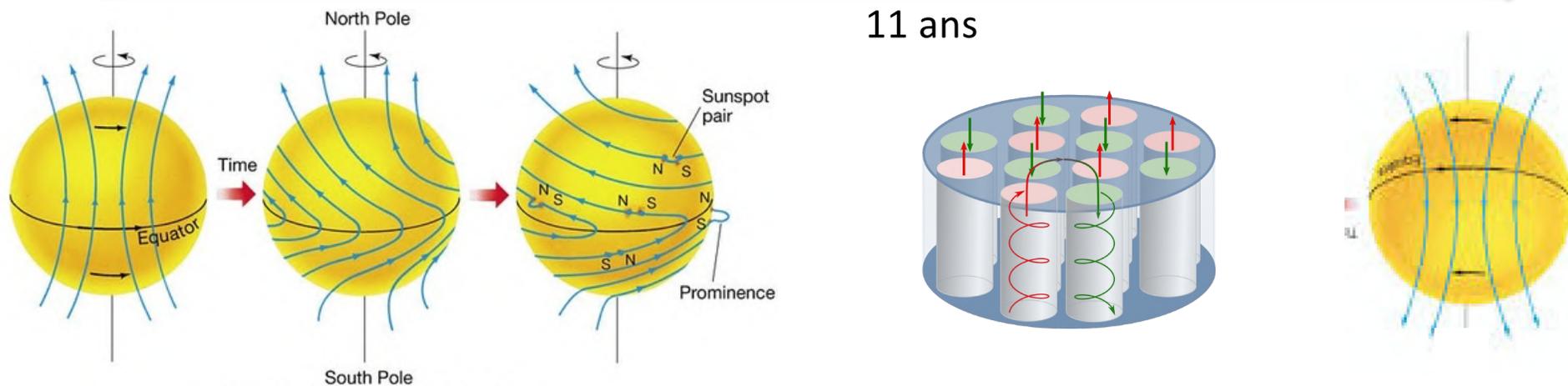
(rotation différentielle) Effet omega => création de champ multipolaire toroidal

Modèle de la dynamo 'plus complexe'

3. Le mécanisme de production du champ magnétique : l'effet dynamo solaire

Minimum cycle

Minimum cycle

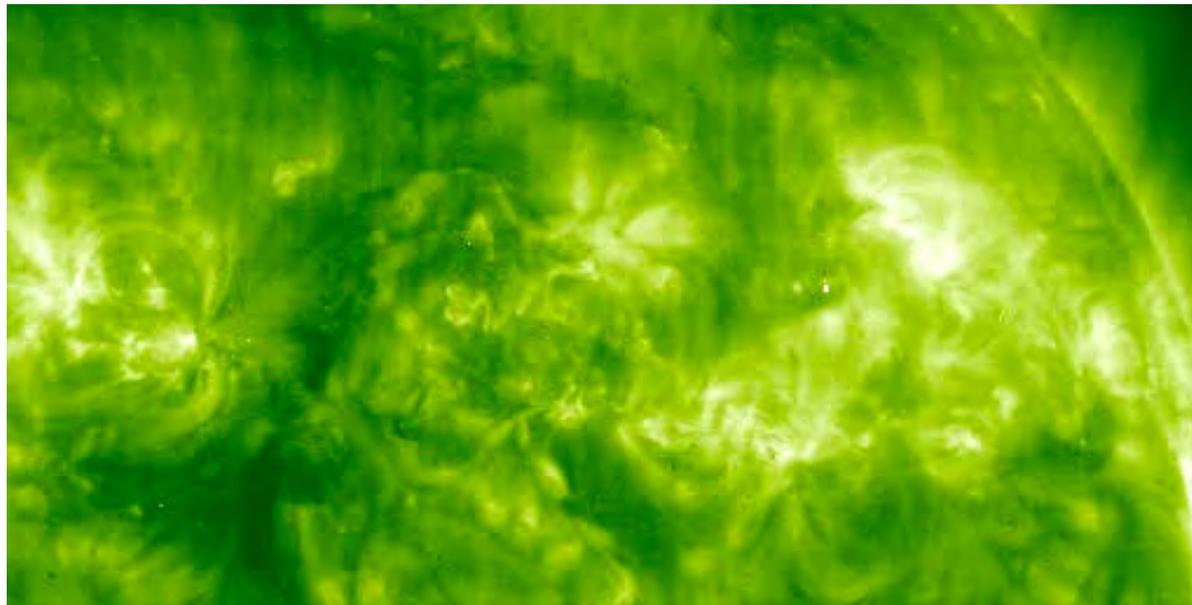


(Rotation différentielle) Effet omega
=> création de champ multipolaire toroidal

(Convection thermique) Effet alpha
=> création de champ dipolaire poloidal

Modèle de la dynamo alpha-omega (de type périodique)

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



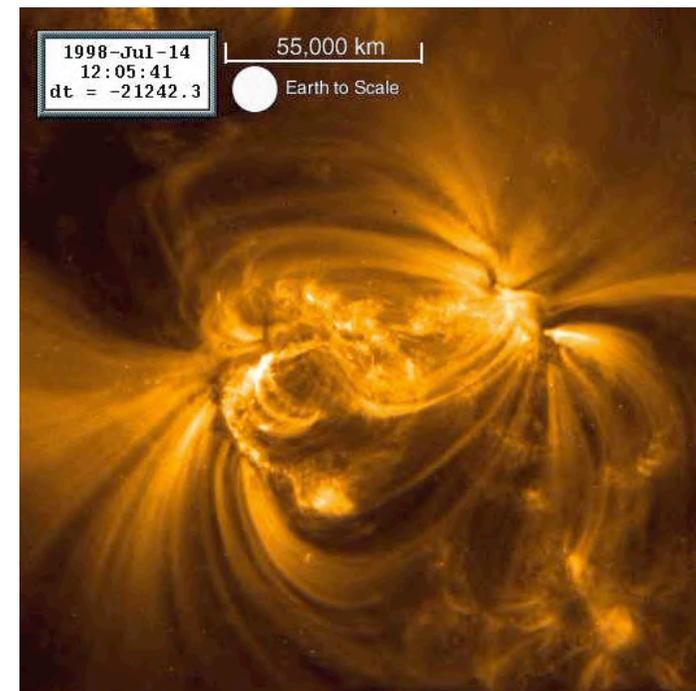
Au dessus de la surface solaire (couronne) => éruptions qui sont des embrillancements particulièrement visibles en UV et X qui durent une 20aine de minutes !

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

Energie est libérée qui permet de chauffer
la couronne jusqu'à plusieurs millions
de degrés

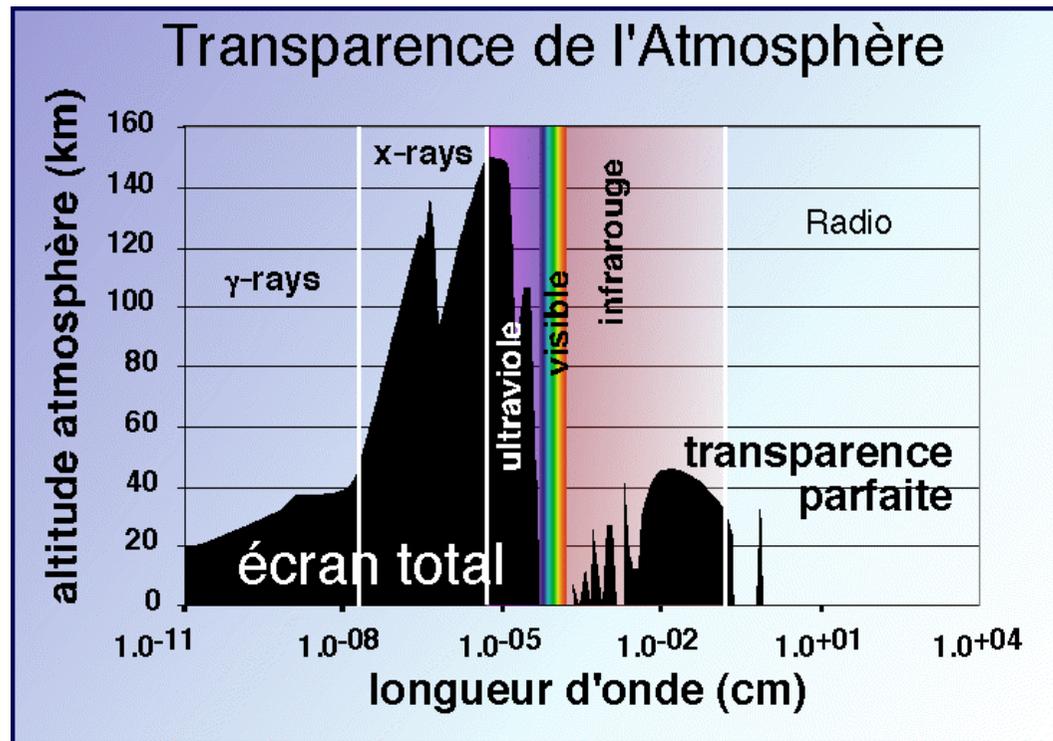
Température surface -> 6000 K
Température au centre -> 15 MK

Des milliards de fois Hiroshima
par éruption standard !



4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

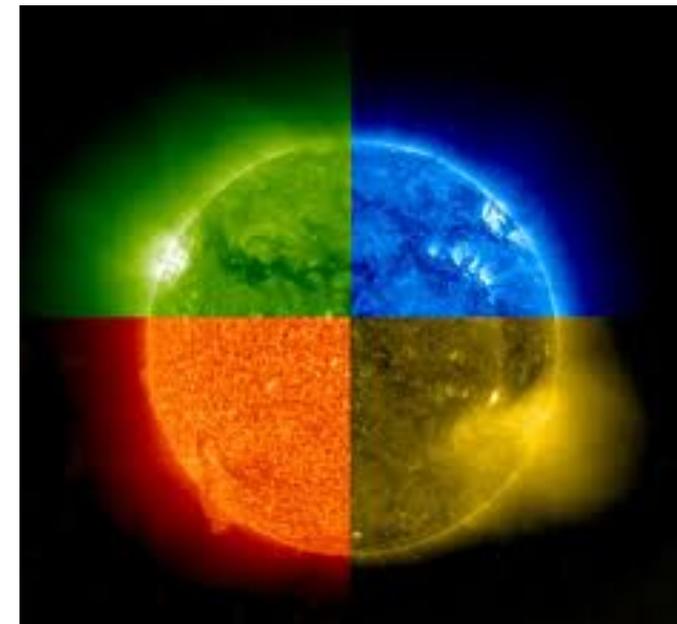
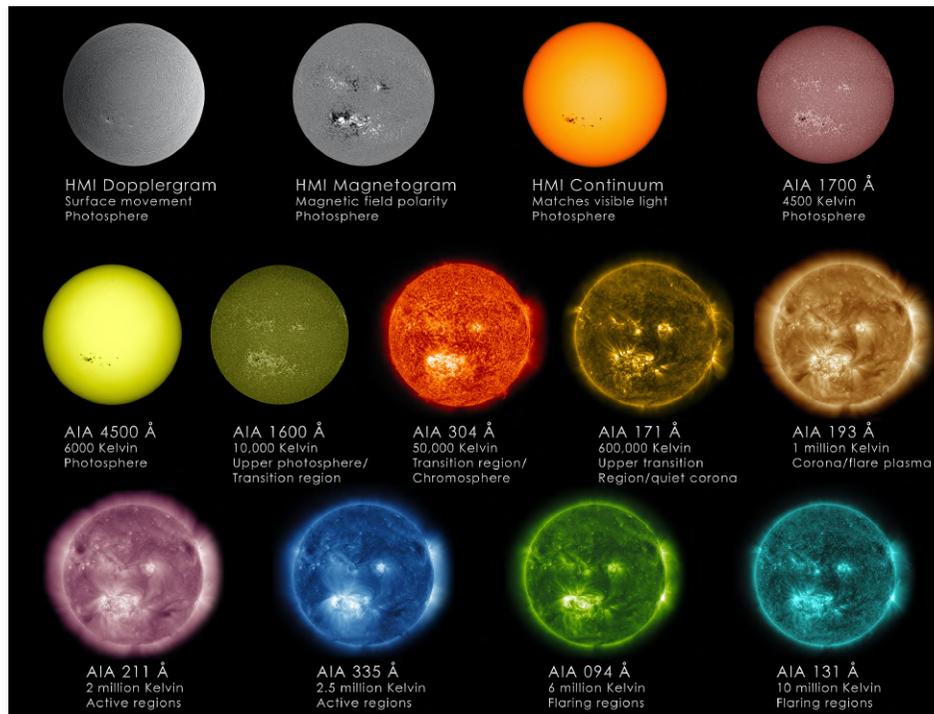
de la Terre



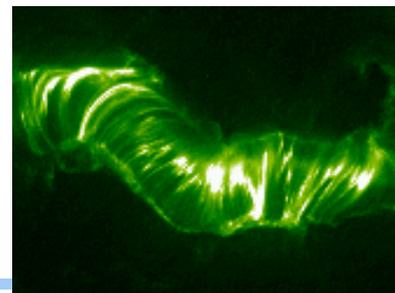
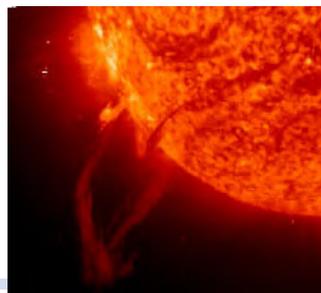
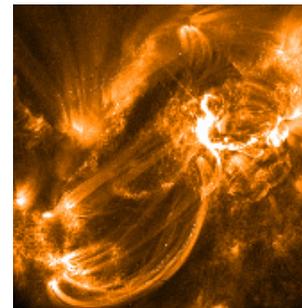
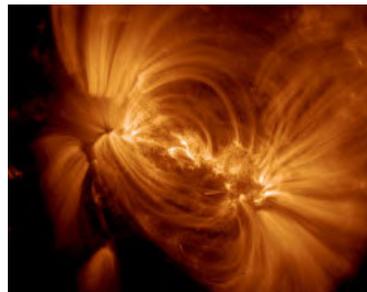
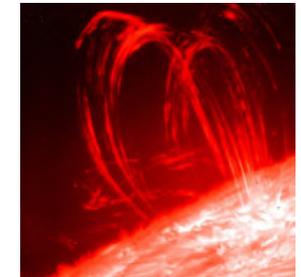
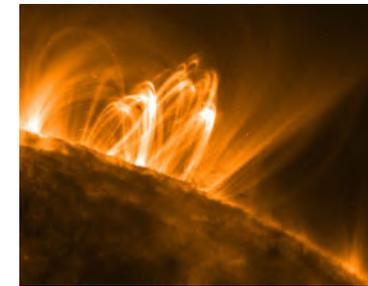
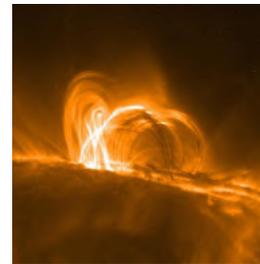
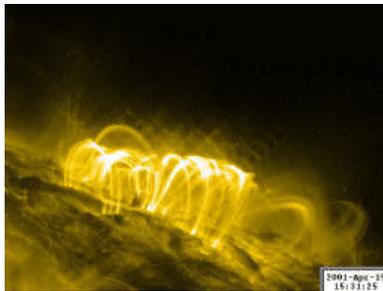
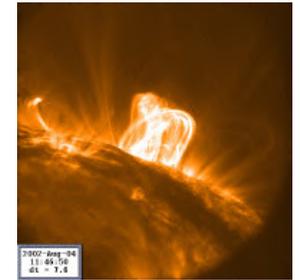
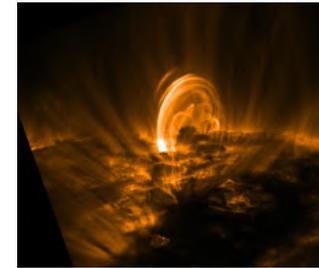
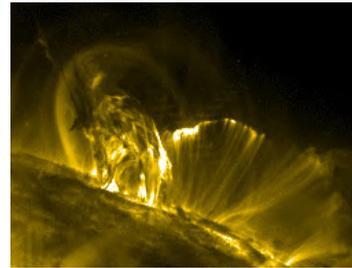
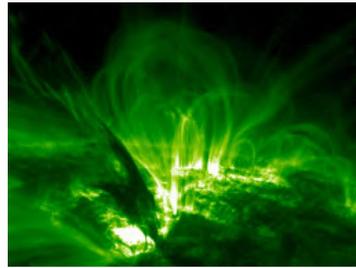
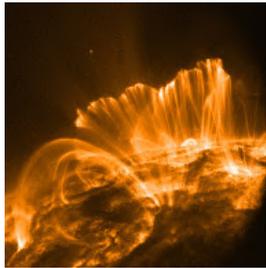
**L'observation depuis la Terre est difficile !
(absorption du rayonnement sauf dans
visible et radio)**

-> satellites nécessaires en X et UV

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

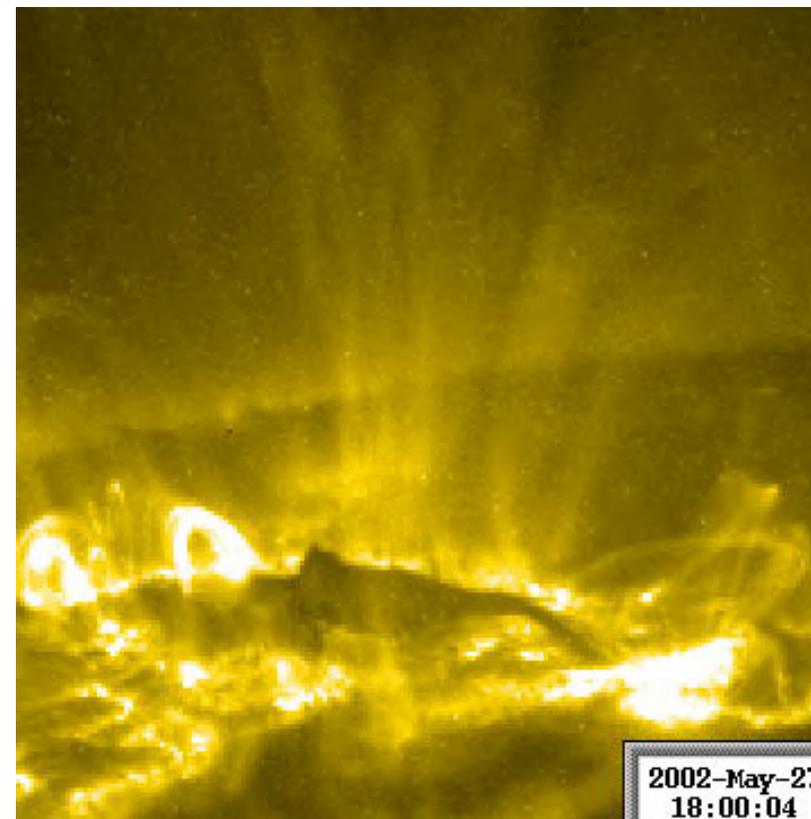


La couronne solaire => phénomènes éruptifs variés !



4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

Les éruptions peuvent s'accompagner d'éjections localisées de gaz/plasma qui retombent sur la surface

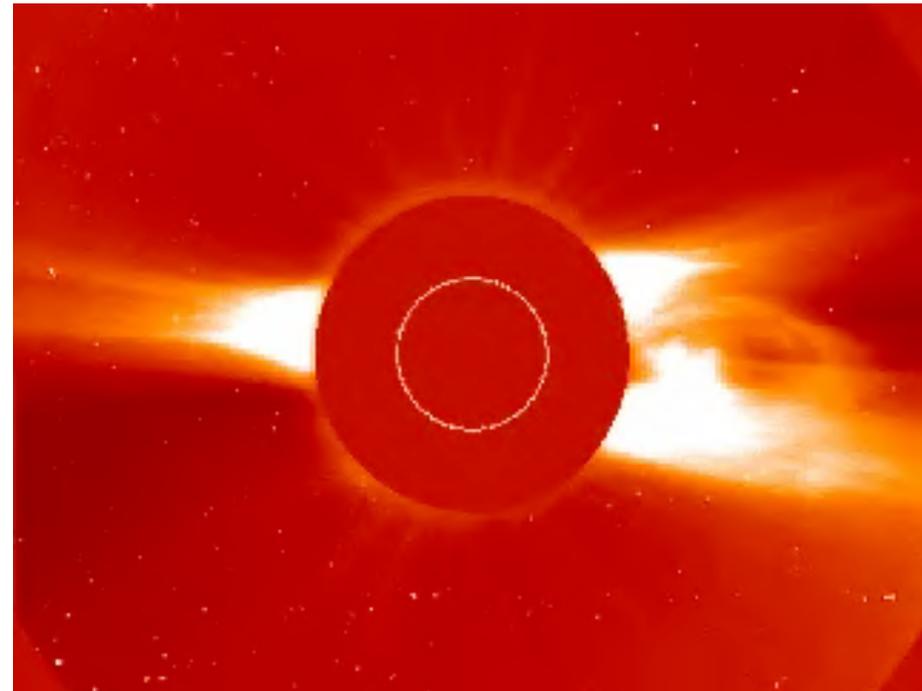


4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

Les éruptions peuvent parfois s'accompagner d'éjections généralisées de plasma qui s'échappent de la couronne

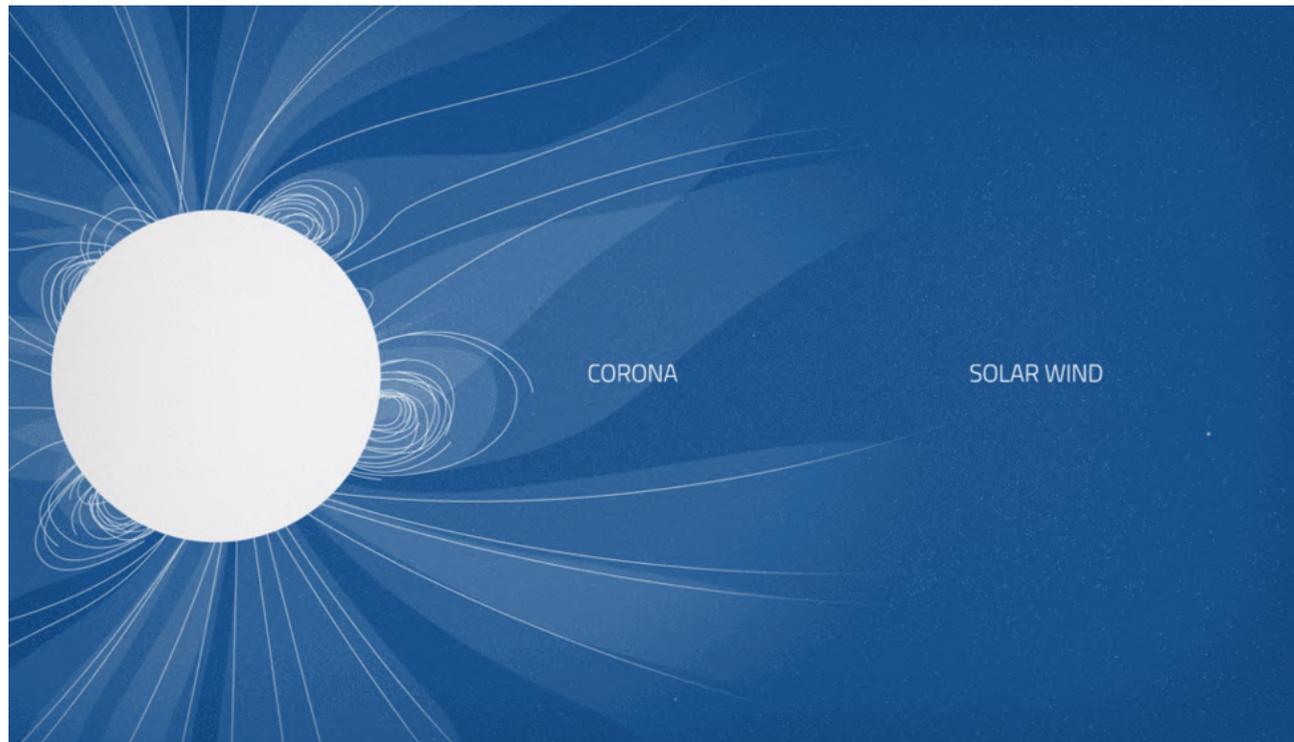
⇒ éjections coronales de masse (CME)

Résultent de lignes de champ fermées qui 's'ouvrent'



Eclipse / visible

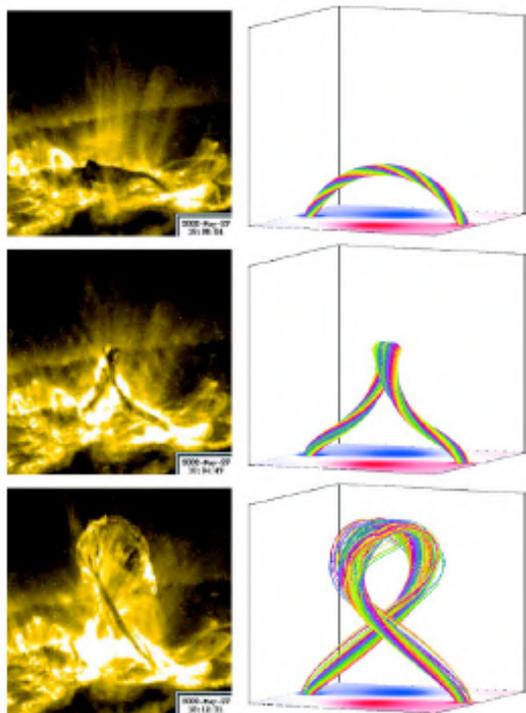
4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



**CME viennent
alimenter le vent solaire
(particules s'échappant le
long des lignes ouvertes)**

**Vent solaire
décrit par Eugene Parker
(1955)**

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



Comment ça marche ?

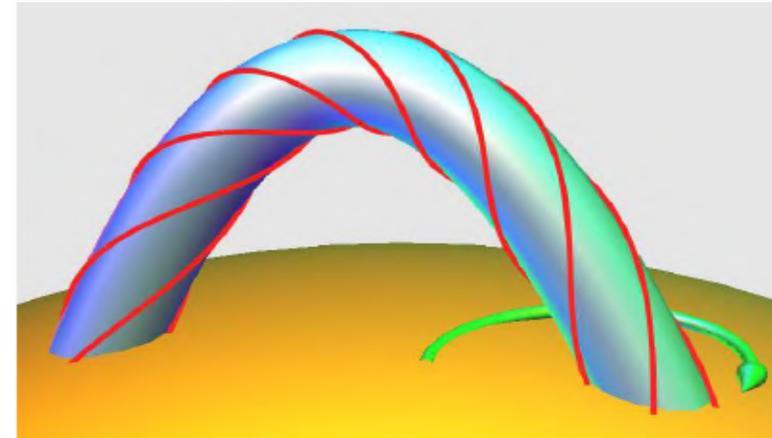
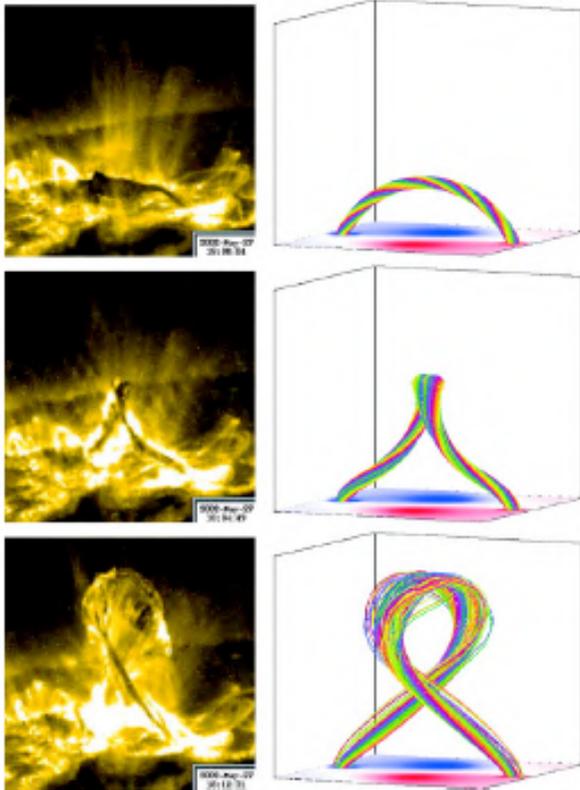
Observations

versus

simulations sur ordinateur
-théorie MHD ou Magnétohydrodynamique
(interaction entre champ magnétique et le
plasma coronal)

Török & K. 2005, ApJ 630, L97

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

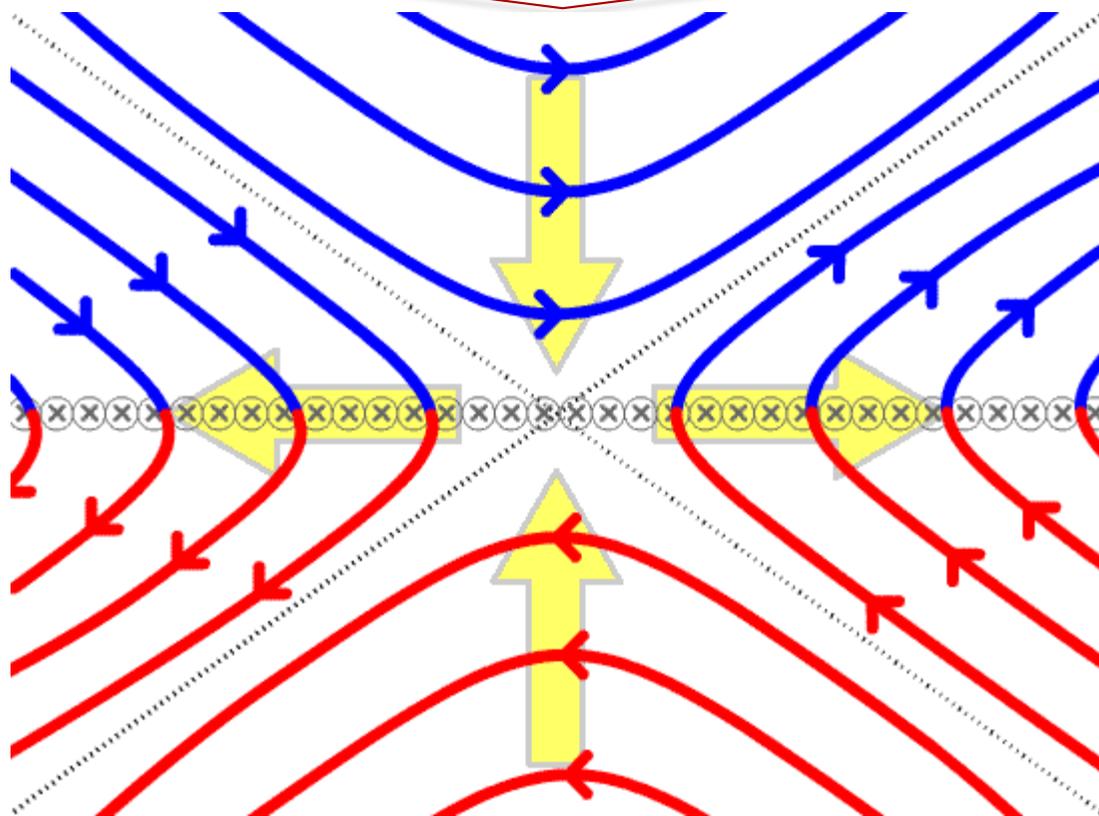


Instable quand le 'twist' des lignes de champ magnétique dépasse une valeur critique ...

- > 1. désentortille comme un élastique
- > 2. modifie la topologie magnétique

Török & K. 2005, *ApJ* 630, L97

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



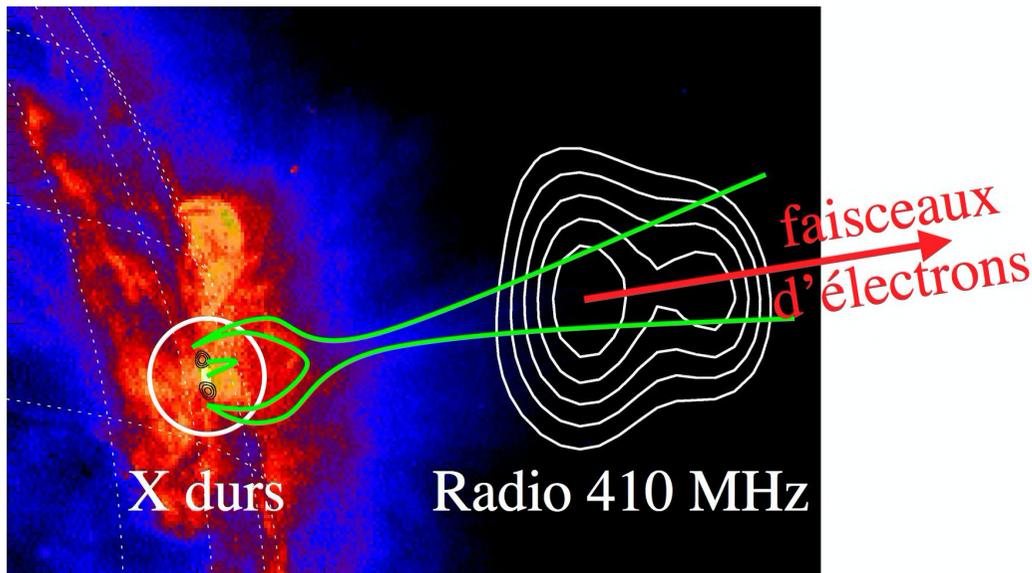
Reconnexion magnétique

⇒ Topologie magnétique est modifiée
et s'accompagne d'une diminution
de l'énergie magnétique

qui se transforme ainsi en chaleur !
-> embrillancements

Credit wikipédia

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



Pariat et al.

Reconnexion magnétique

⇒ Topologie magnétique est modifiée et s'accompagne d'une diminution de l'énergie magnétique

qui se transforme ainsi en chaleur !
-> embrillancements

- . Lignes fermées peuvent s'ouvrir
- . Accélération de particules

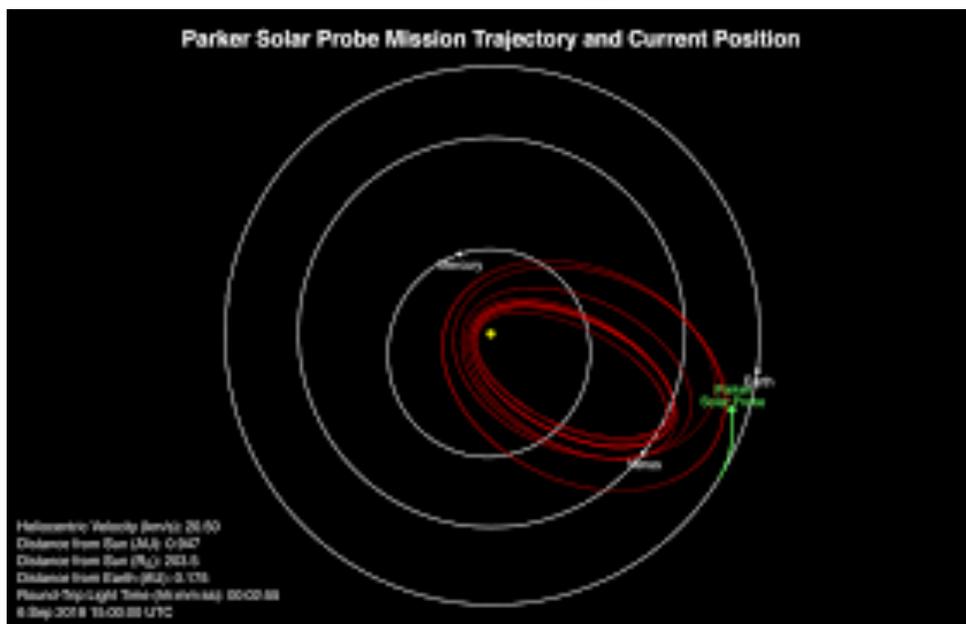
4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

- > Modèles théoriques et numériques
- ⇒ Comprendre et prédire les éruptions et éjections (météo de l'espace)
- > Il faut aussi 'aller voir' les structures magnétiques (2 missions récentes Solar Orbiter et Parker Solar Probe)



Credit Eric Priest home page
St Andrews University

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



24 crossings in during 7 years (less than 10 times the solar radius)

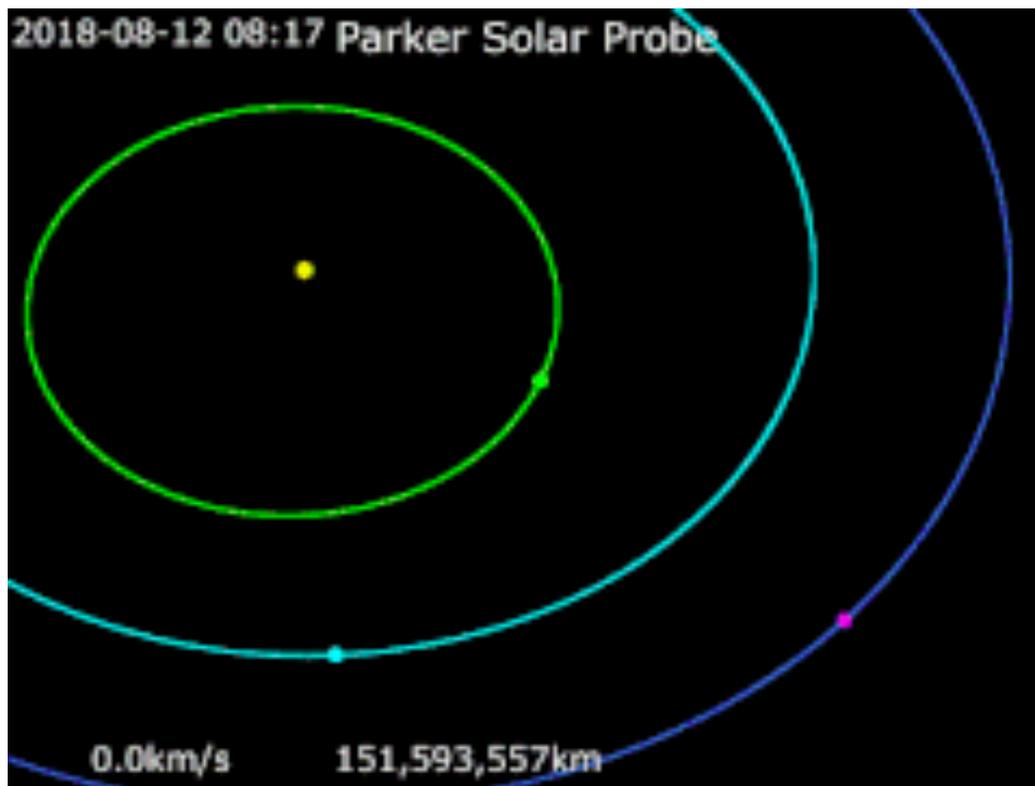
2018-2025



L'astrophysicien Eugene N. Parker, qui a découvert le vent solaire en 1955, assiste au lancement de la sonde qui porte son nom.

© Nasa

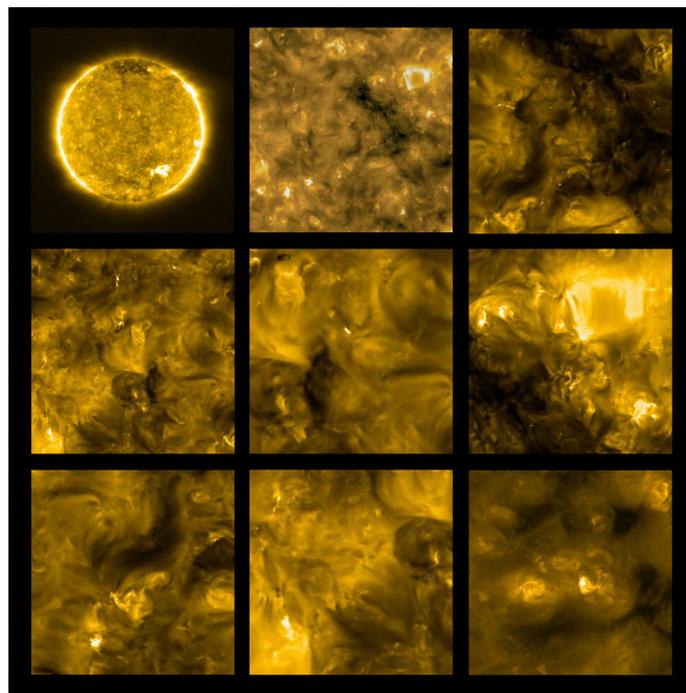
4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



24 crossings in during 7 years (less than 10 times the Solar radius)

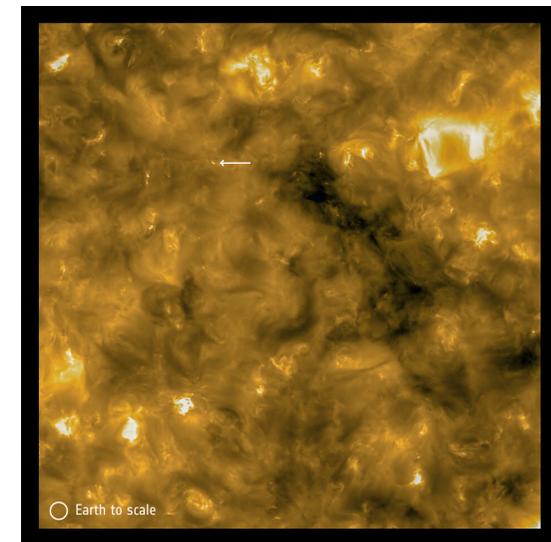
-> étudier couronne solaire

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire



Solar orbiter mission (2020 -> 2030)
Mini-éruptions ou 'feux de camps'

-> étudier couronne
et vent solaire (pôles)

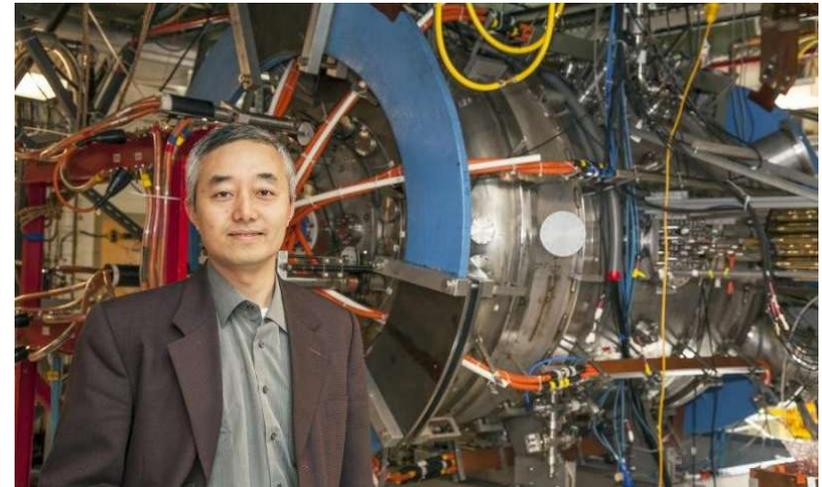


https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/07/Solar_Orbiter_s_first_view_of_the_Sun

4. Les colères du champ magnétique dans la couronne solaire

MRX experiment (Princeton, USA)

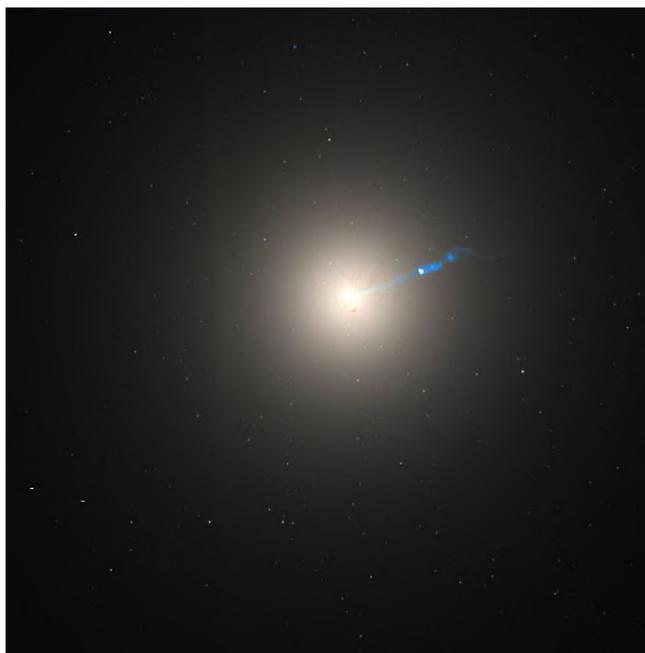
- > Modèles théoriques et numériques
- ⇒ Comprendre et prédire les éruptions et éjections (météo de l'espace)
- > Il faut aussi 'aller voir' les structures magnétiques (2 missions récentes Solar Orbiter et Parker solar Probe)
- > Expériences en laboratoire



PPPL physicist Hantao Ji in front of the Magnetic Reconnection Experiment.
Credit: Elle Starkman

<https://mrx.pppl.gov/>

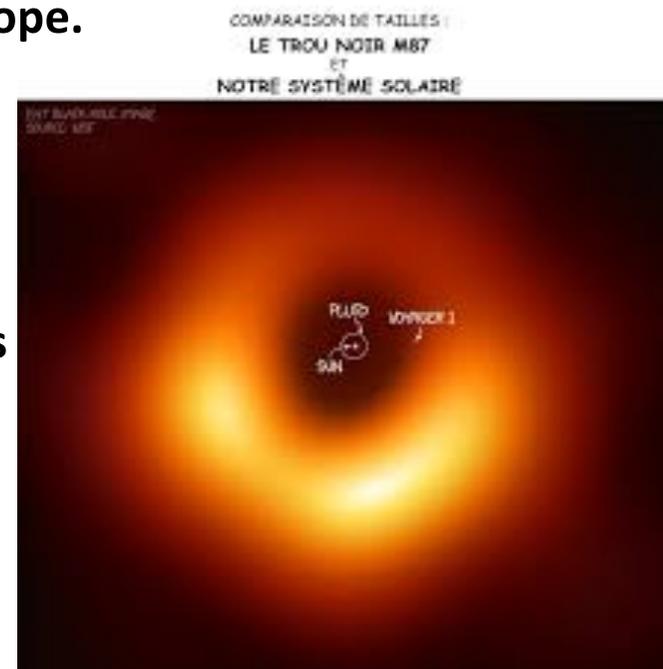
5. Et les autres astres (autour des trous noirs)



M87, NGC 4486, ou radiogalaxie Virgo A
situé à 50 millions AL

Le disque d'accrétion du trou noir M87* imagé par
l'Event Horizon Telescope.

Masse du trou noir
 $6,5 \times 10^9$ masses solaires



5. Et les autres astres (autour des trous noirs)

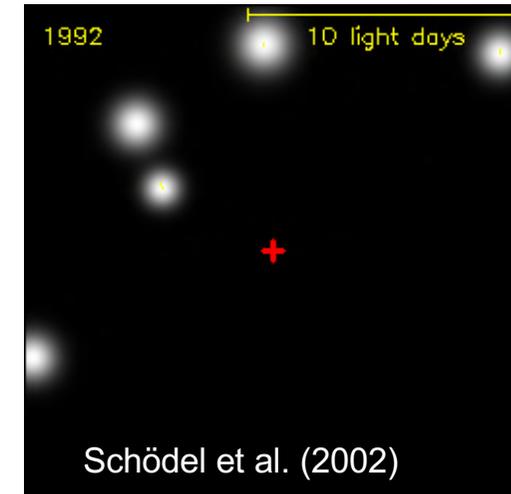
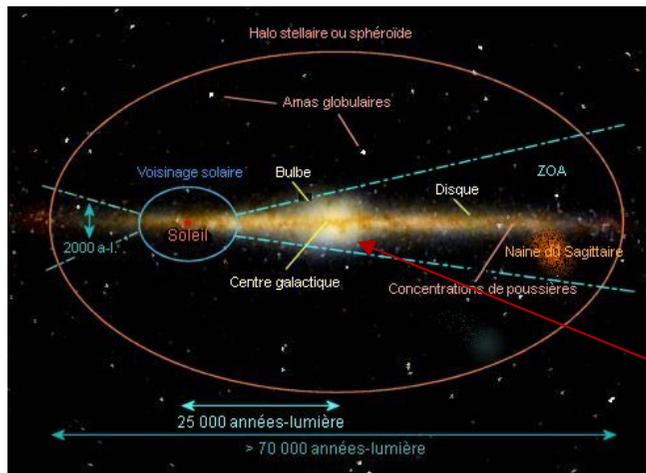
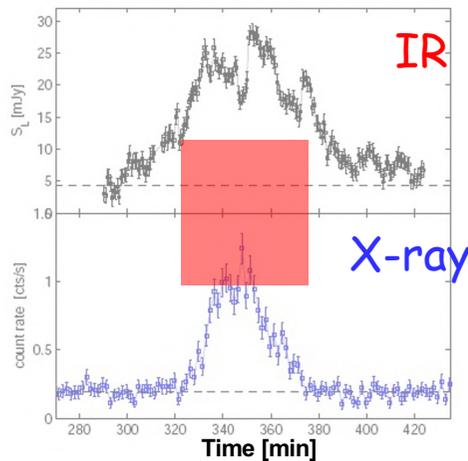
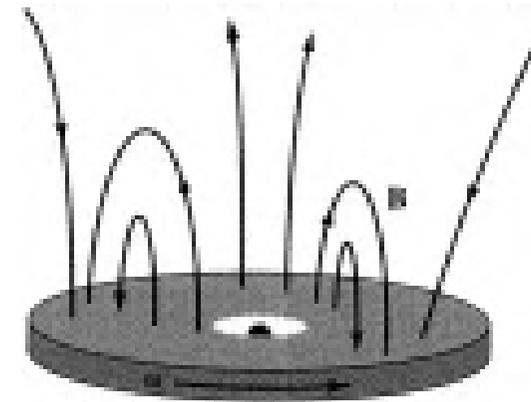
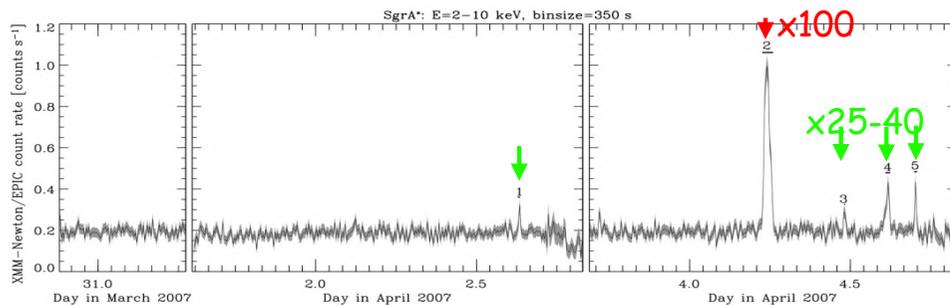


Schéma (coupe vue par la tranche)
200 milliards d'étoiles

Centre galactique
(voie lactée): Sgr A*

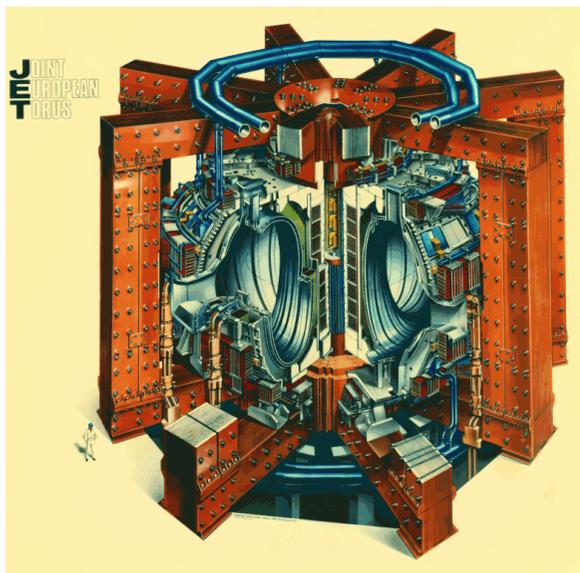
Trou noir super-massif de
3 millions de masses solaires !

5. Et les autres astres (autour des trous noirs)



Éruptions 'magnétiques' du disque
autour du trou noir ?

Prochain cours: La fusion thermonucléaire par confinement magnétique



Tokamak aujourd'hui →
JET (UK)

Demain
ITER (France)

