

Le Soleil: cycle(s) d'activité

Jean Louis ZERBO

jeanlouis.zerbo@gmail.com

jeanlouis.zerbo@u-naziboni.bf

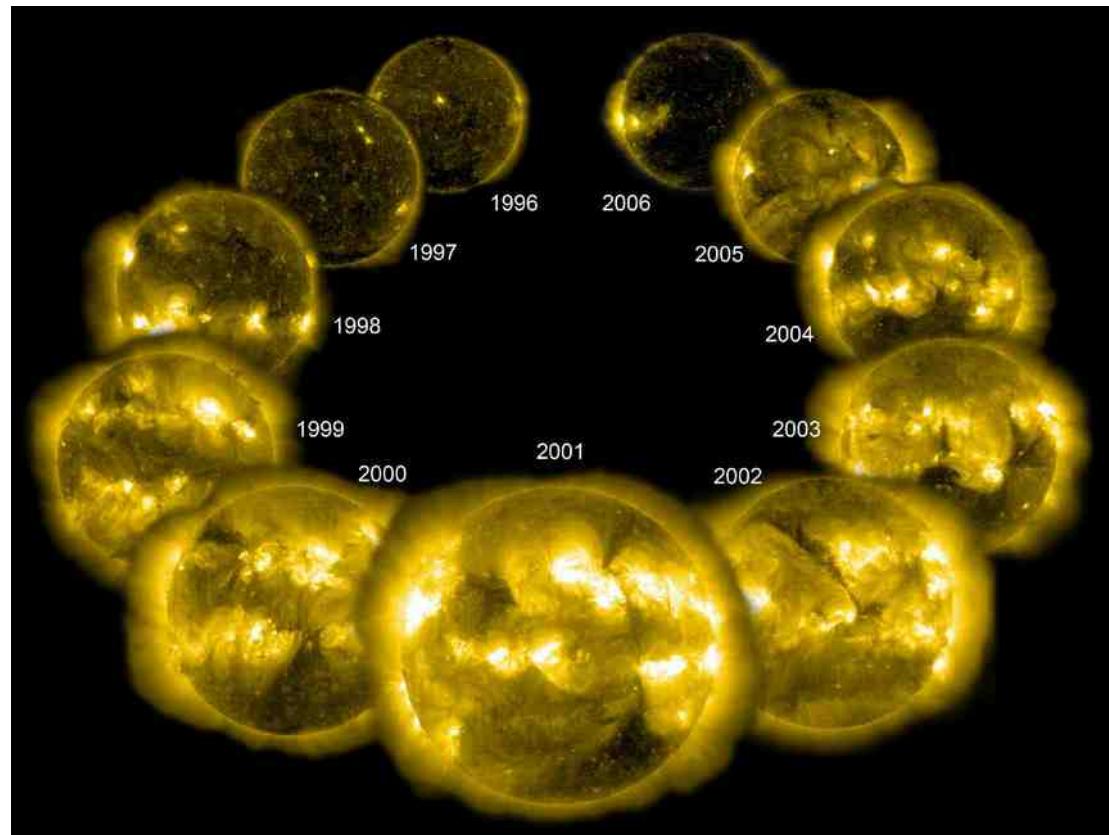
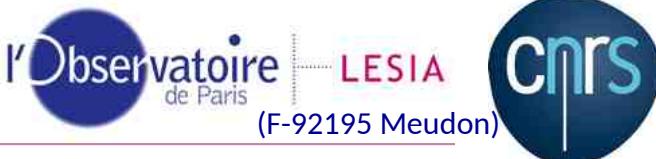
Université Nazi
BONI



Bobo-Dioulasso

- BURKINA FASO
Karl-Ludwig Klein

ludwig.klein@obspm.fr,



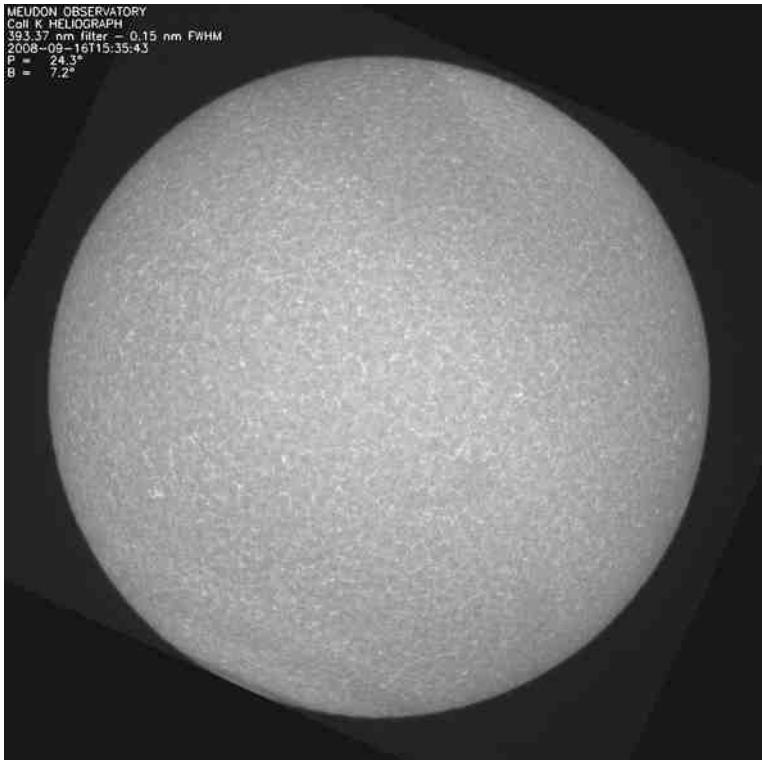
- Cycle d'activité: indice des taches, F10.7, forme de la couronne, champ magnétique héliosphérique
- Variation de l'activité solaire à long terme
- Régions actives et champ magnétique global du Soleil
- Un aperçu qualitatif d'un mécanisme dynamo (Babcock-Leighton)

Le cycle d'activité solaire

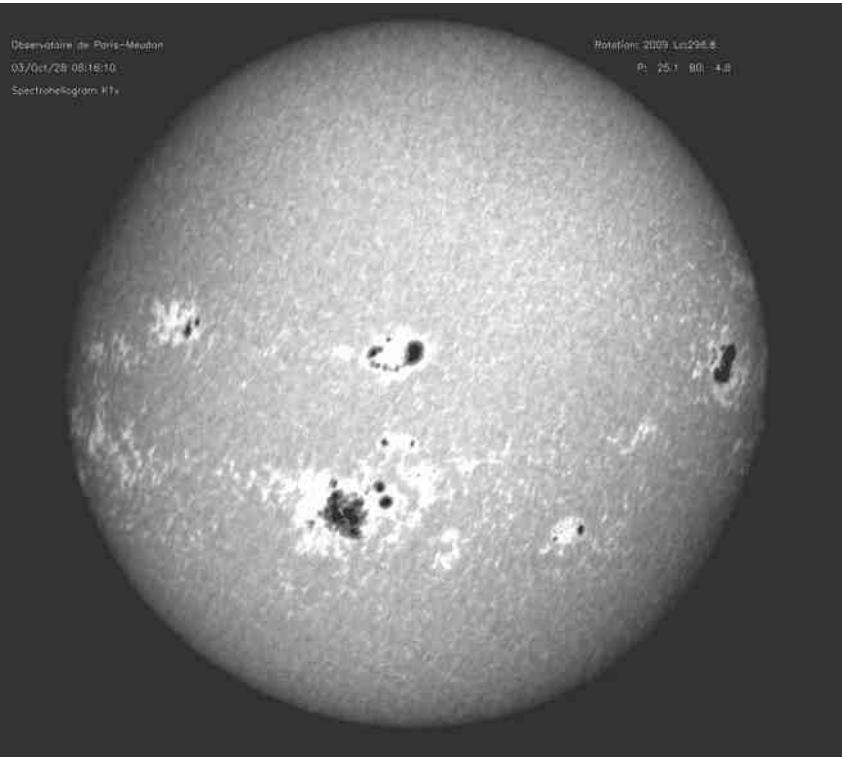
Cycle de taches – 11 ans

Le cycle d'activité solaire

L'indice des taches



Le Soleil le 16 Septembre 2008
(Ca II K1v, Meudon) ...



... et le 28 Octobre 2003

- Mesure quantitative du degré d'activité solaire: indice des taches R (« nombre de Wolf ») = nombre tenant compte des taches (f) et groupes de taches (g)
- $R = k (10g + f)$ (k =facteur de pondération selon observateur)

Le cycle d'activité solaire

L'indice des taches

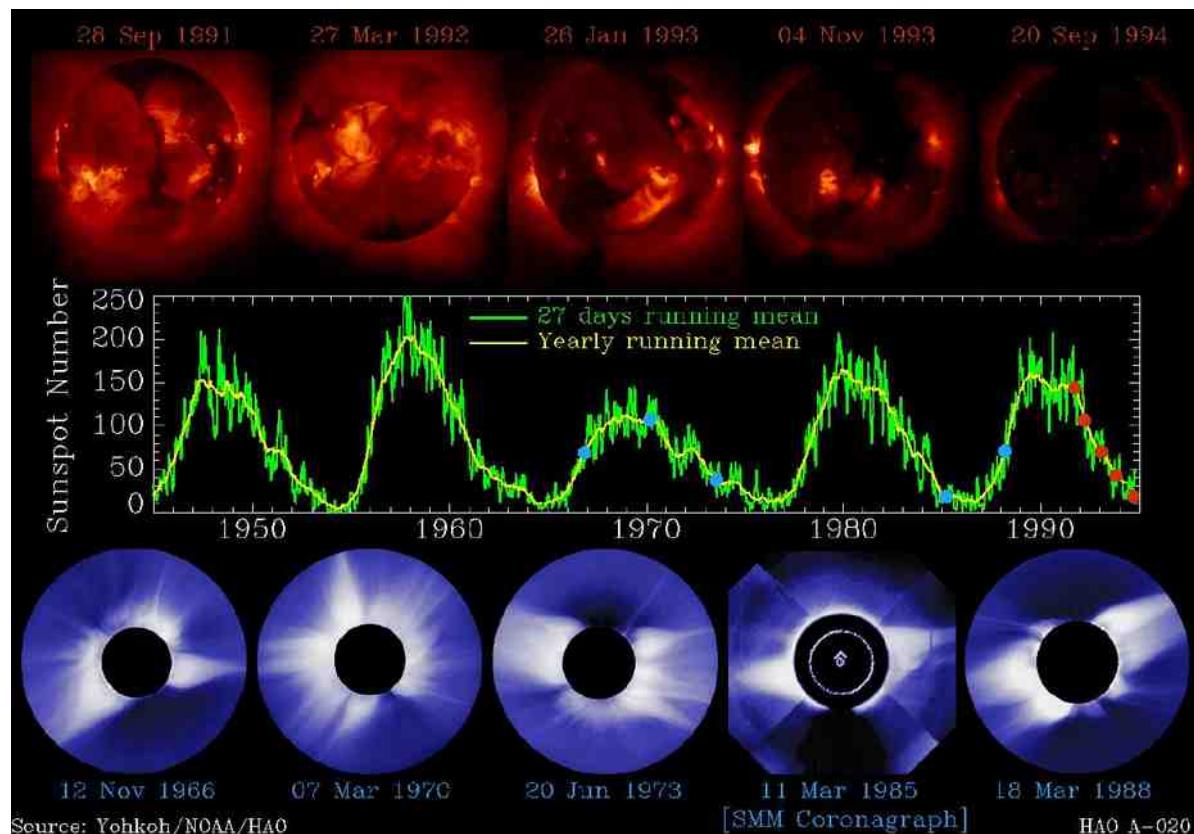
- Indice des taches (moyenne mensuelle et moyenne glissante sur 13 mois), 1954-2016
- Variation, période environ 11 ans

Le cycle d'activité solaire

Manifestations dans le champ magnétique solaire

- Taches solaires = manifestations du champ magnétique
- Autres manifestations: structure de la couronne

Couronne en rayons X



Indice des taches

Couronne en lumière blanche

© Yohkoh, NOAA, High-Alt. Obs.

Le cycle d'activité solaire

Manifestations dans le champ magnétique solaire

Dudok de Wit et al. 2014 JSWSC 4, A06

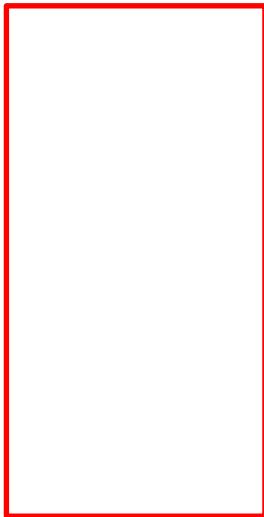
- Emission radio:
rayonnement de freinage
notamment du plasma des
régions actives
(confinement magnétique)
- Différentes λ , dont
« F10.7 » => proxy UV

Le cycle d'activité solaire

Manifestations dans le champ magnétique solaire

Dudok de Wit et al. 2014 JSWSC 4, A06

- Emission radio:
rayonnement de freinage
notamment du plasma des
régions actives
(confinement magnétique)
- Différentes λ , dont
« F10.7 » => proxy UV

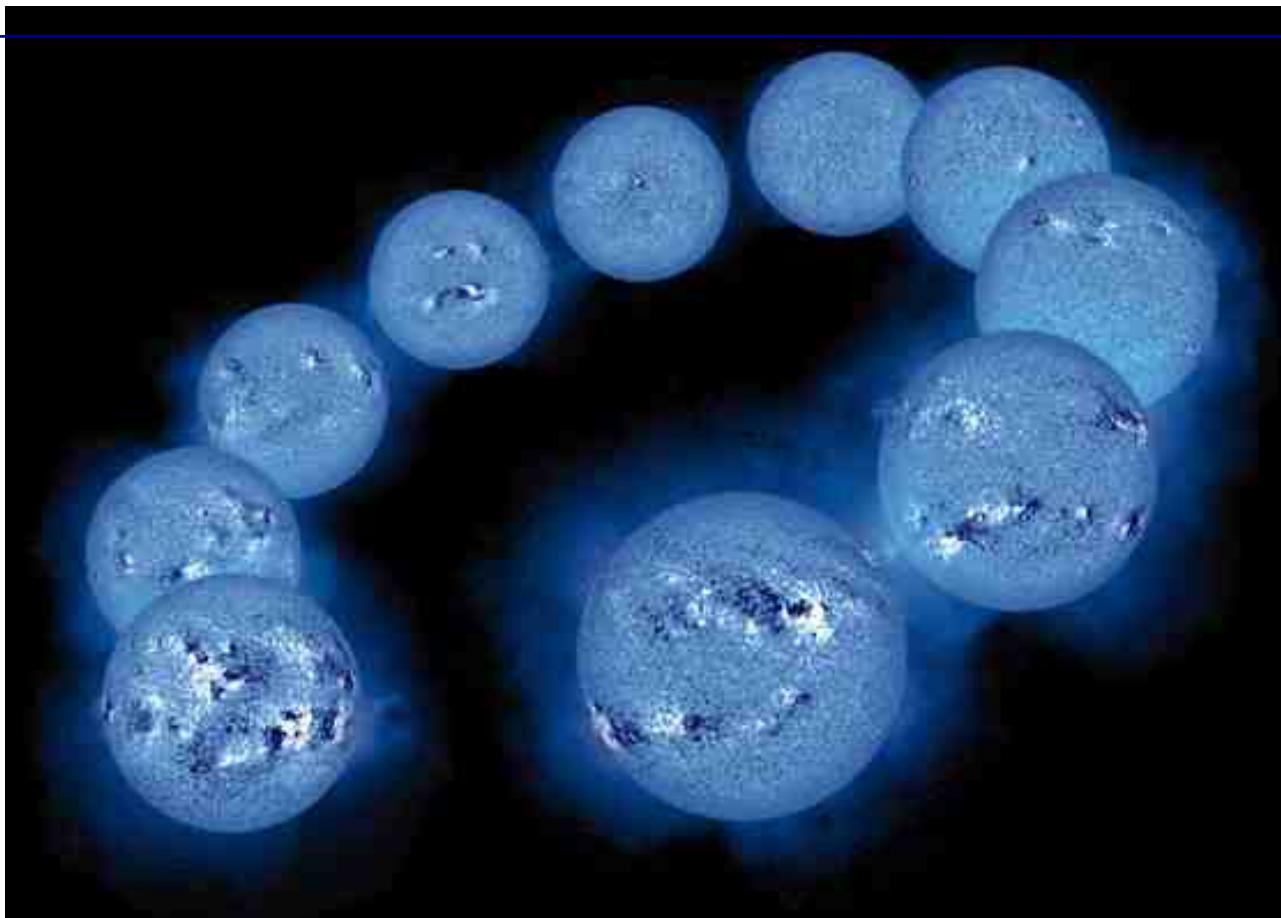


St. Hilaire et al. 2012 *Solar Phys.* **277**, 431 (Allen Telescope Array, SoHO/EIT)

$\lambda = 10.7 \text{ cm}$

Le cycle d'activité solaire

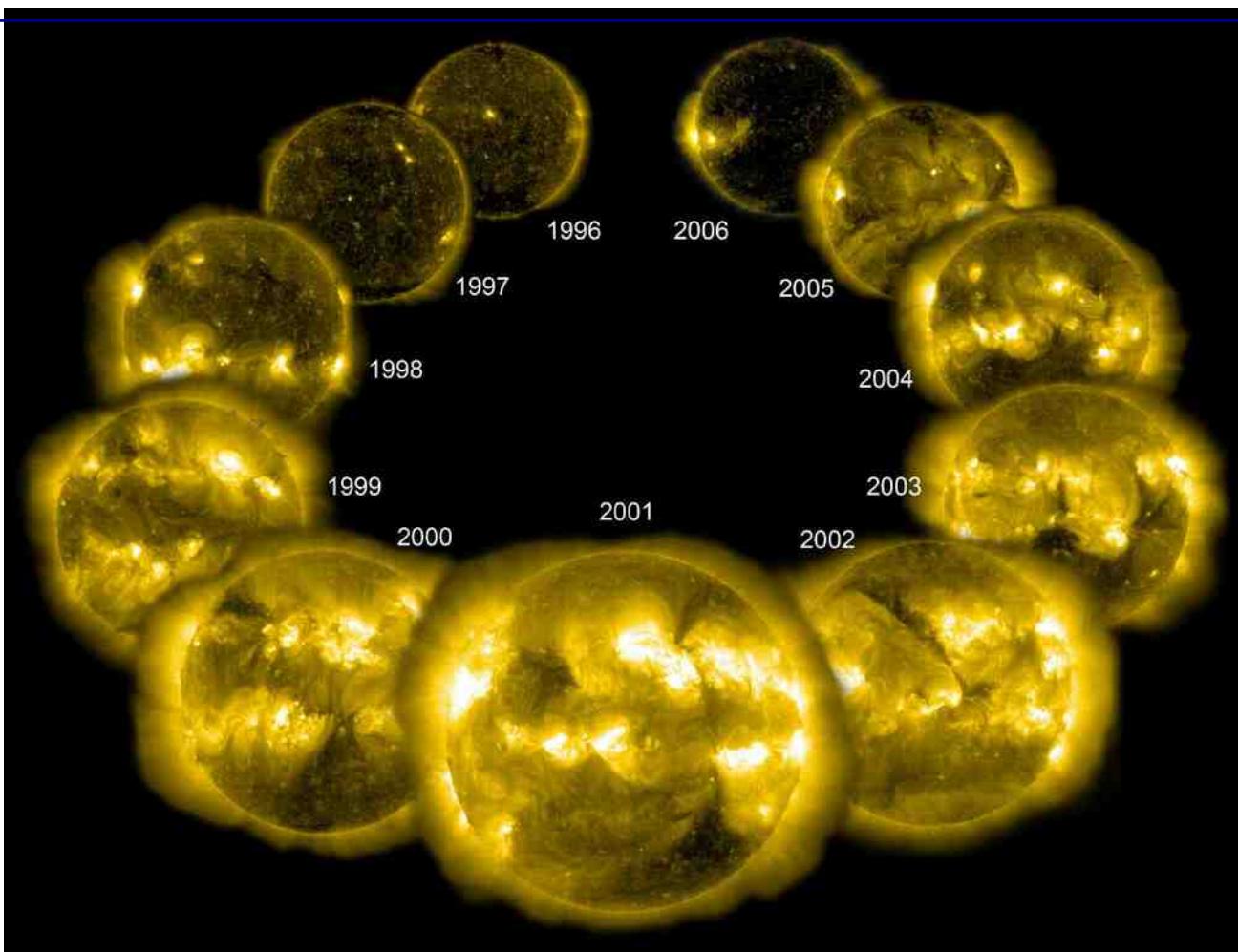
Variation du champ magnétique de la photosphère sur un cycle



- Champ magnétique longitudinal dans la photosphère au cours du cycle d'activité (SoHO/MDI – ESA/NASA)
- Champ magnétique complexe en période de forte activité (régions actives), simple autour du minimum

Le cycle d'activité solaire

Variation du champ magnétique de la couronne sur un cycle



- Champ magnétique complexe en période de forte activité (régions actives), simple (peu de structures coronales) autour du minimum – images EUV
- Dépendance du flux EUV/X du cycle d'activité

Le cycle d'activité solaire

L'activité éruptive au cours du cycle d'activité

- Ejections de masse: nombre et vitesse (1996-2008; Gopalswamy 2009, CAWSES Symp.)
- Eruptions, sursauts rayons X durs
- Evénements solaires à particules (qqs dizaines de MeV)

Gopalswamy 2009 CAWSES Symp.

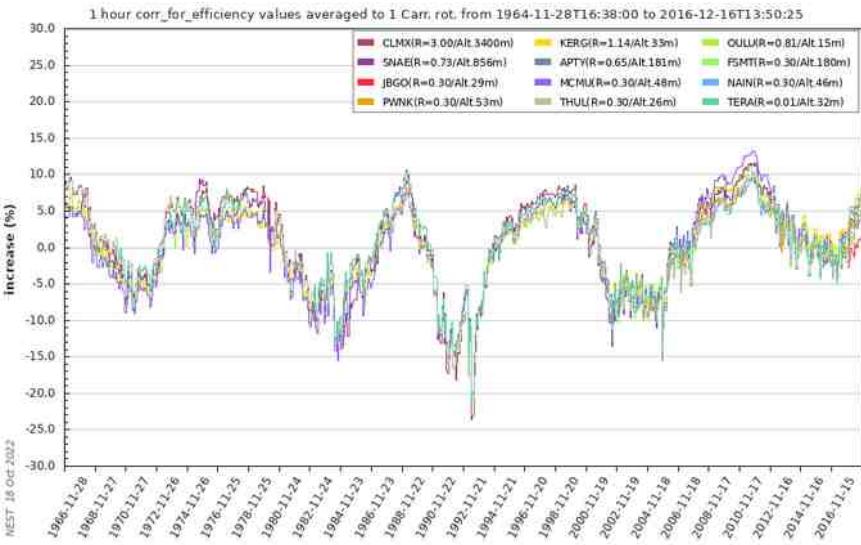
Lysenko et al. 2017

http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/wiki/index.php/KW-Sun:_The_Konus/WIND_Hard_X-ray_Solar_Flare_Database

Mewaldt et al. 2007 AIP CP 932, 277

Le cycle d'activité solaire

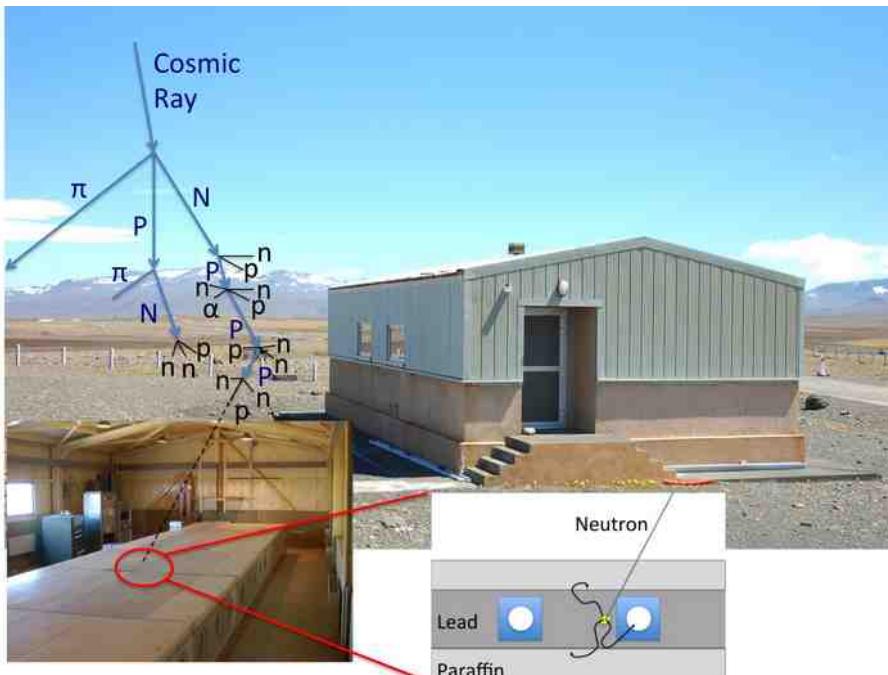
Manifestation dans le champ magnétique héliosphérique



- Mesures dans l'espace
- Modulation de l'intensité des rayons cosmiques dans l'Héliosphère par le champ magnétique héliosphérique (observations: moniteurs à neutrons)

Le cycle d'activité solaire

Excursion: rayons cosmiques, moniteurs à neutrons



© cliché IPEV et Obs Paris

- Particules de haute énergie incidents sur l'atmosphère terrestre
 - Production de particules secondaire
 - Si énergie initiale suffisamment élevée (> 430 MeV près des pôles), cascade jusqu'au sol
 - Détection de la gerbe cosmique (neutrons, protons) par des compteurs de particules au sol (« moniteurs à neutrons »)
-
- Radionucléides produits par la cascade atmosphérique: ^{14}C , ^{10}Be , dépôt dans sol et arbres

Variation de l'activité solaire à long terme

Le cycle d'activité solaire

Le cycle d'activité sur 400 ans

- période variable (9-14 ans), amplitude variable (cycle superposé d'une centaine d'années - voir Travaux de J.-L. Zerbo)

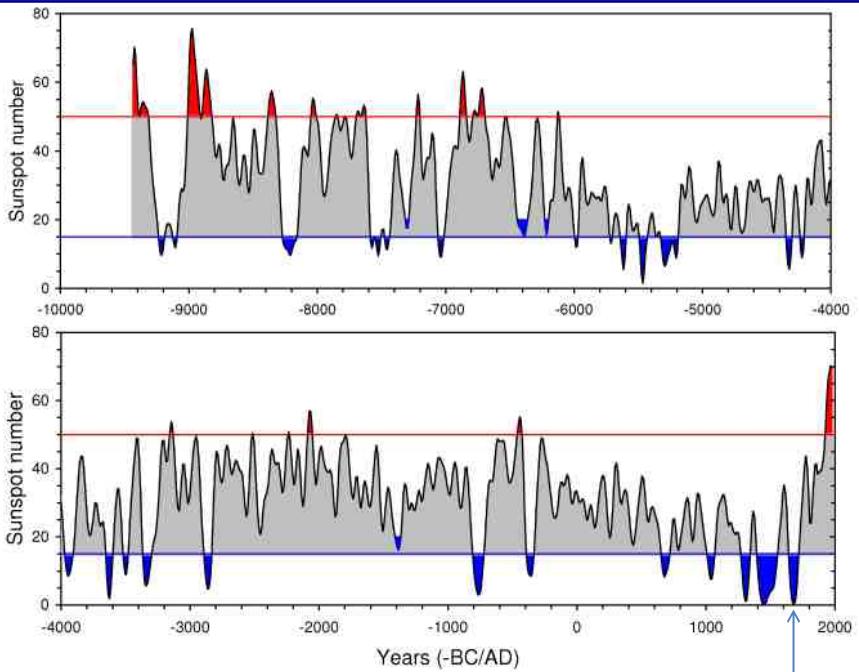
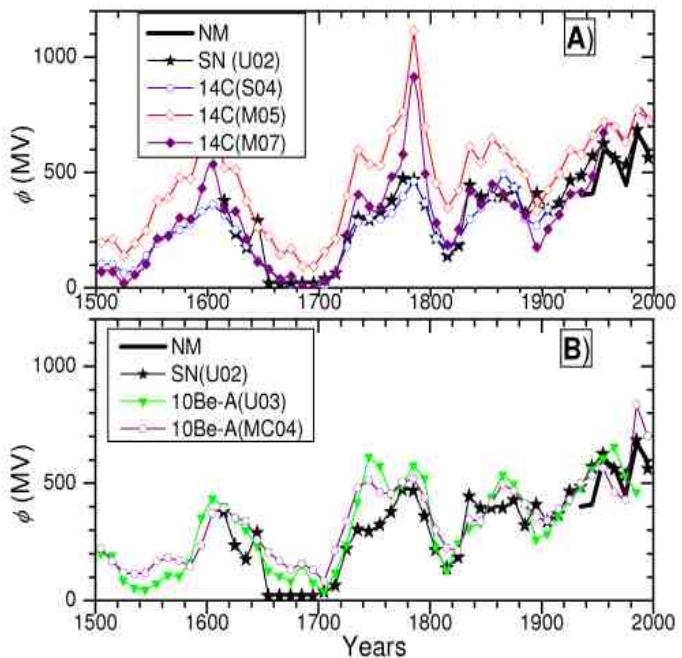
Le cycle d'activité solaire

Le cycle d'activité sur 400 ans – minimum de Maunder

- Absence de cycles notables pendant une période longue 1645-1715
("minimum de Maunder")

Le cycle d'activité solaire

Le cycle d'activité solaire montré par les rayons cosmiques

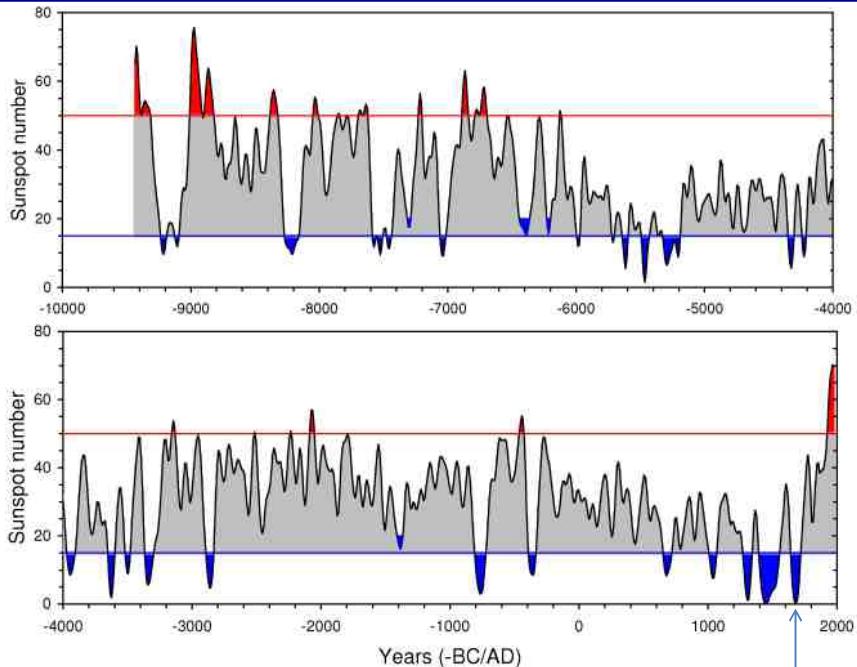
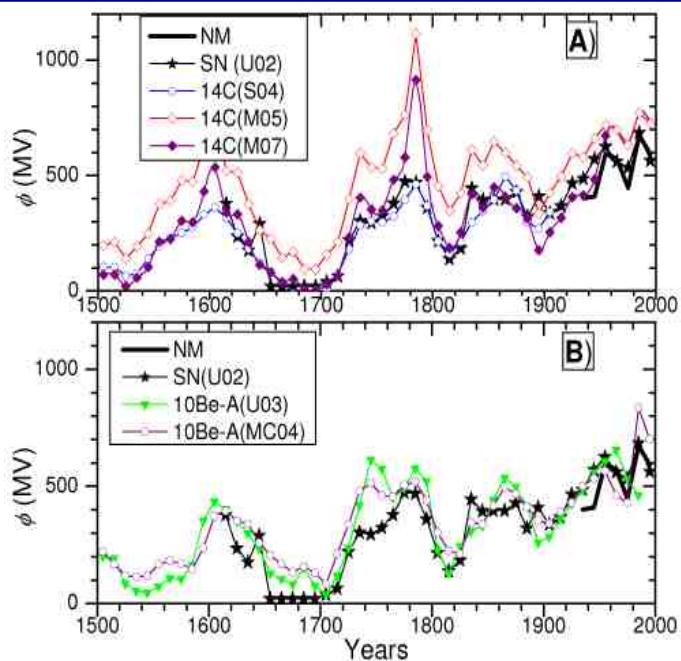


Usoskin, <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2013-1>

- Gauche: reconstruction du « potentiel de modulation » décrivant la répulsion variable du rayonnement cosmique, par des mesure de radionucléides
- Droite: reconstruction de l'indice des taches solaires par la mesure des radionucléides sur 10 000 ans

Le cycle d'activité solaire

Le cycle d'activité solaire montré par les rayons cosmiques



Usoskin, <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2013-1>

Maunder

- Vue cohérente avec l'indice des taches de l'évolution de l'activité solaire depuis 1600 – y compris minimum de Maunder
- Plusieurs périodes de faible activité et de forte activité dans le passé
- Très forte activité au 20^{ème} siècle

Le cycle d'activité solaire

Un premier résumé

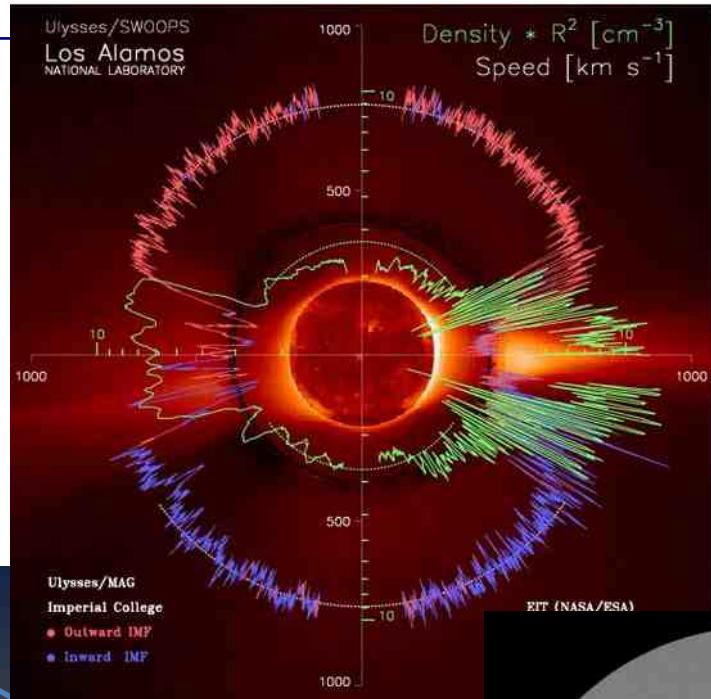
- Les indicateurs de l'activité magnétique du Soleil montrent une variabilité avec une période d'environ 11 ans (cycle d'activité du Soleil).
 - taches solaires, puis toutes les manifestations transitoires: flux EUV et radio (provenant des régions actives), nombre d'éruptions, éjections de masse, événements à particules ...
 - morphologie de la couronne (lumière blanche, EUV, X, radio)
- => révélateur de l'évolution du champ magnétique du Soleil

Le cycle d'activité solaire

Régions actives et
champ magnétique global du Soleil

Le cycle d'activité solaire

Champ magnétique global du Soleil et régions actives



- Indications d'un champ magnétique global:
 - morphologie de la couronne (régions polaires)
 - mesures dans le milieu IP

- Relation avec les champs magnétiques dans la photosphère (petite échelle) ?

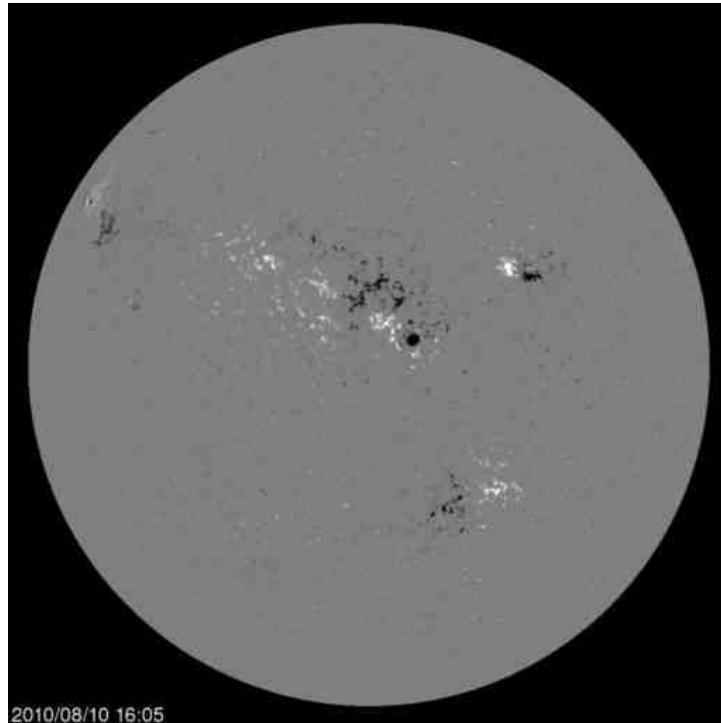
<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives

- Magnétogramme de la photosphère solaire
(SoHO/MDI 10/08/2010)

10/08/2010
↓



<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

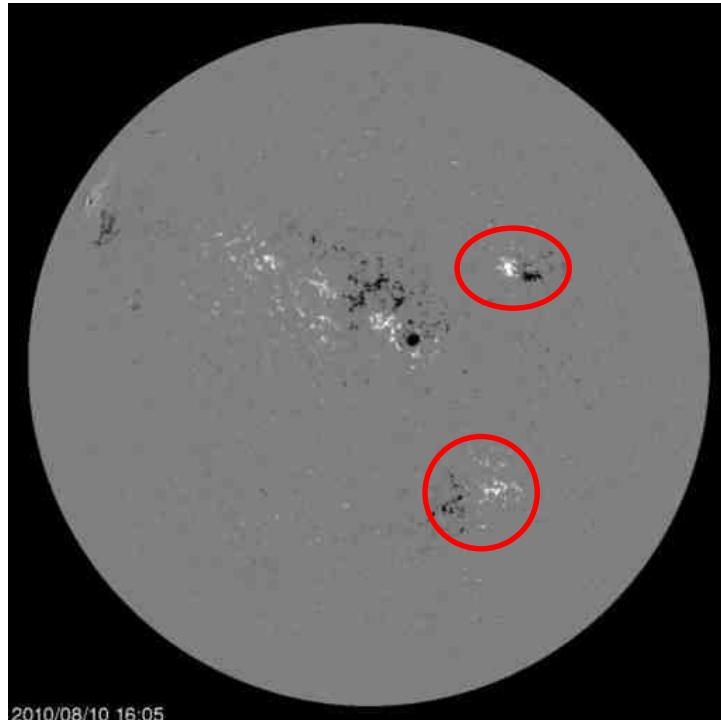
Orientation du champ magnétique:

- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives

- Magnétogramme de la photosphère solaire
(SoHO/MDI 10/08/2010)
- A noter:
 - même ordre des polarités dans un hémisphère
 - ordre opposé dans l'hémisphère opposé
 - tête de la région active plus près de l'équateur que queue



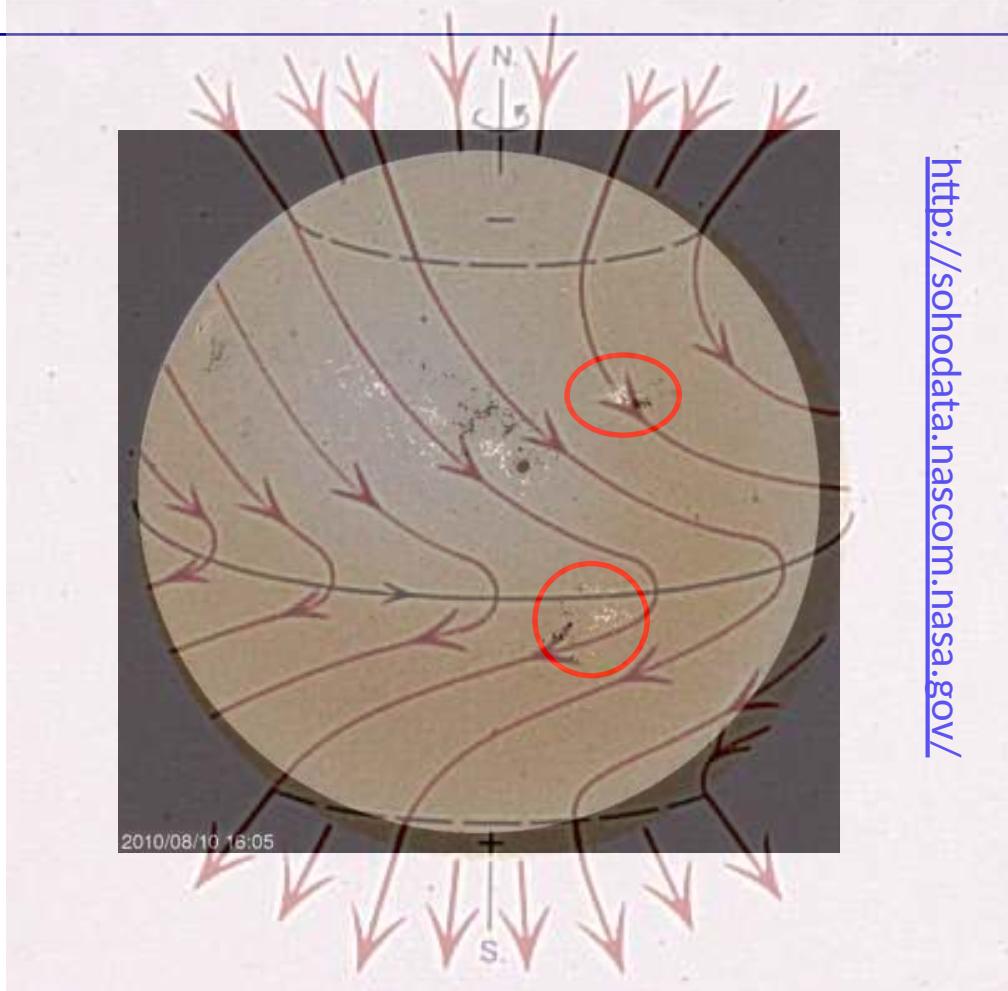
<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

- Orientation du champ magnétique:
- blanc vers l'observateur
 - noir vers le Soleil

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives

- Magnétogramme de la photosphère solaire
(SoHO/MDI 10/08/2010)
- A noter:
 - même ordre des polarités dans un hémisphère
 - ordre opposé dans l'hémisphère opposé
 - tête de la région active plus près de l'équateur que queue



Orientation du champ magnétique:

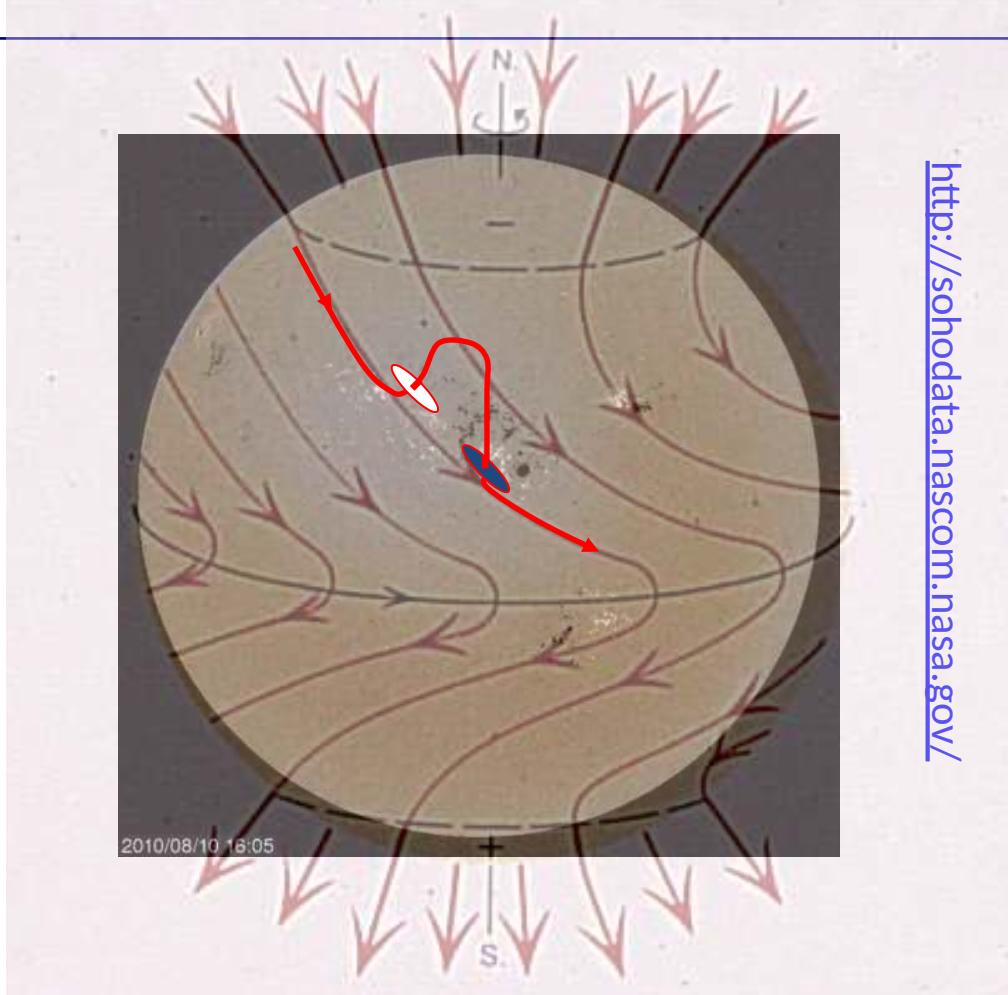
- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives

- A noter:
 - même ordre des polarités dans un hémisphère;
 - ordre opposé dans l'hémisphère opposé
 - tête de la région active plus près de l'équateur que queue
- Les régions actives sont les parties émergées d'un champ magnétique global du Soleil (originaire de la zone convective)

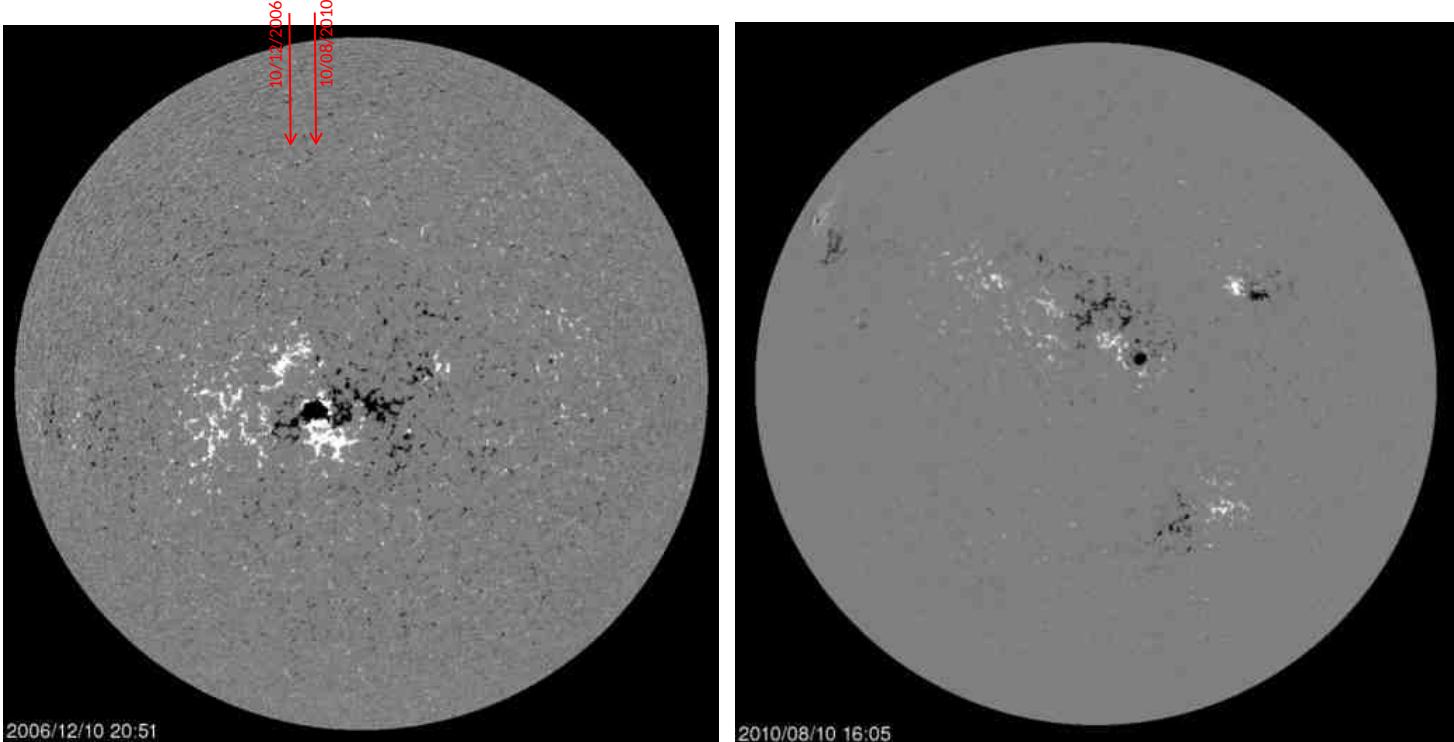


Orientation du champ magnétique:

- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives: migration en latitude

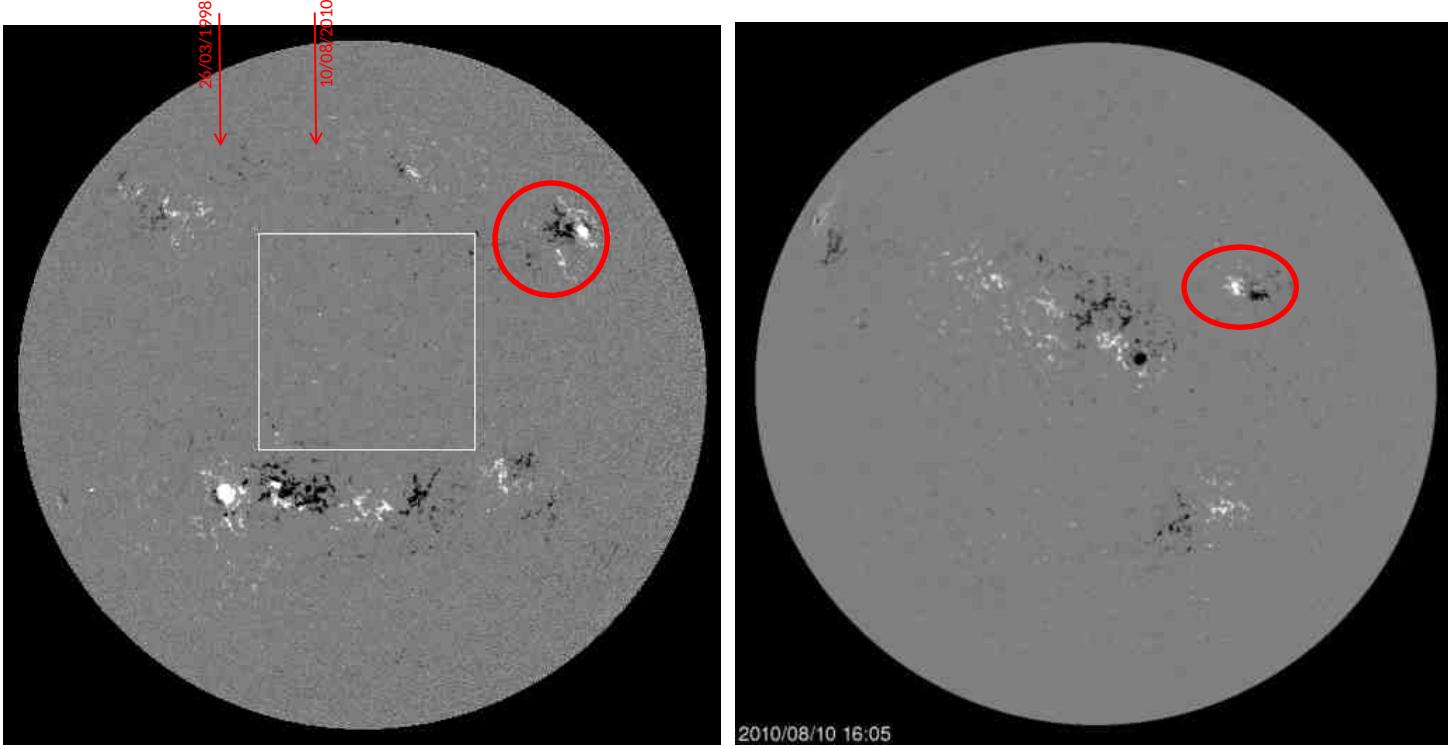


<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

- Magnétogrammes (SoHO/MDI) à la fin du cycle 23 (gauche: 10/12/2006) et dans la phase montante du cycle 24 (droite: 10/08/2010)
- Différences: latitudes des régions actives; apparition à haute latitude au début d'un cycle, migration vers l'équateur au cours du cycle d'activité.

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives: orientation



<http://sohodata.nascom.nasa.gov/>

- Magnétogrammes (SoHO/MDI) dans les phases montantes des cycles 23 (gauche: 26/03/1998) et 24 (droite: 10/08/2010)
- Différences: orientations du champ magnétique des régions actives; inversion d'un cycle de 11 ans au suivant

Le cycle d'activité solaire

Le champ magnétique des régions actives: migration en latitude

- Magnétogramme synoptique: axe horizontal année, axe vertical latitude solaire; Kitt Peak & SoHO (Hathaway 2015, Liv. Rev. Solar Phys. 12, 4)
- Le champ magnétique est moyenné sur une circonférence solaire (donc B très petit p/r aux taches solaires !)

11 ans



- Migration queues des RA -> pôles solaires, inversion de la polarité du champ magnétique polaire aux alentours du maximum d'activité.
- Les régions actives émergent vers 40° au début du cycle, puis à des latitudes de plus en plus basses (« diagramme papillon »).

Le cycle d'activité solaire

Inversion cyclique du champ magnétique global du Soleil

- Structure du champ magnétique solaire \approx dipolaire aux minima du cycle solaire (fig. gauche et droite), multipolaire aux maxima (milieu)
- Inversion du champ magnétique entre deux minima successifs

Le cycle d'activité solaire

Résumé des observations dans la photosphère

- Les champs magnétiques à petite échelle dans la photosphère sont des parties d'un champ magnétique global du Soleil.
- Le suivi des taches et des champs magnétiques dans la photosphère montre des évolutions régulières au cours du cycle d'activité du Soleil :
 - orientations opposées du champ magnétique toroïdal (le long des parallèles) dans les deux hémisphères
 - inversion après un cycle de 11 ans (donc: cycle de 22 ans)
 - migration des polarités de queue des régions actives vers les pôles, inversion du champ magnétique polaire (aux alentours du maximum du cycle)
 - migration des régions actives vers l'équateur au cours du cycle.
- => évolution du champ magnétique global du Soleil au cours du cycle d'activité

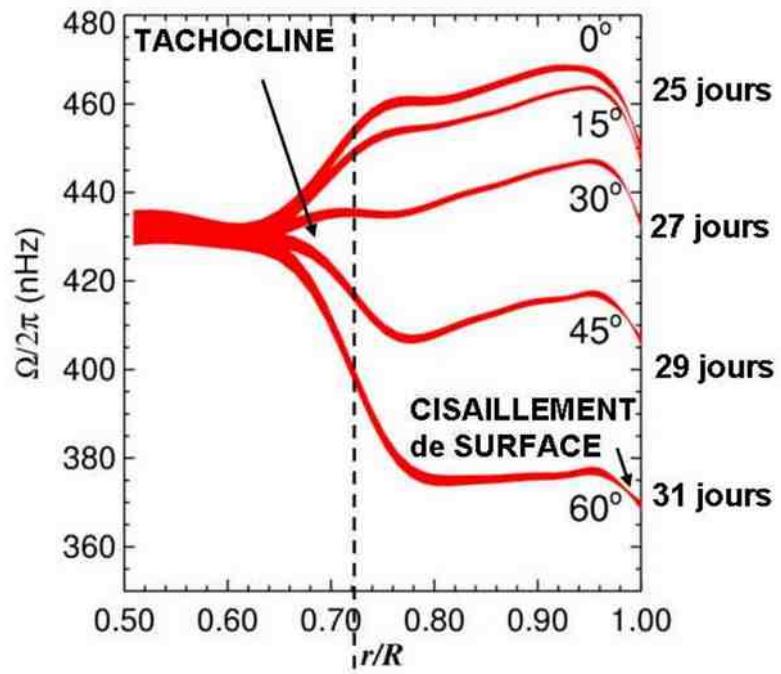
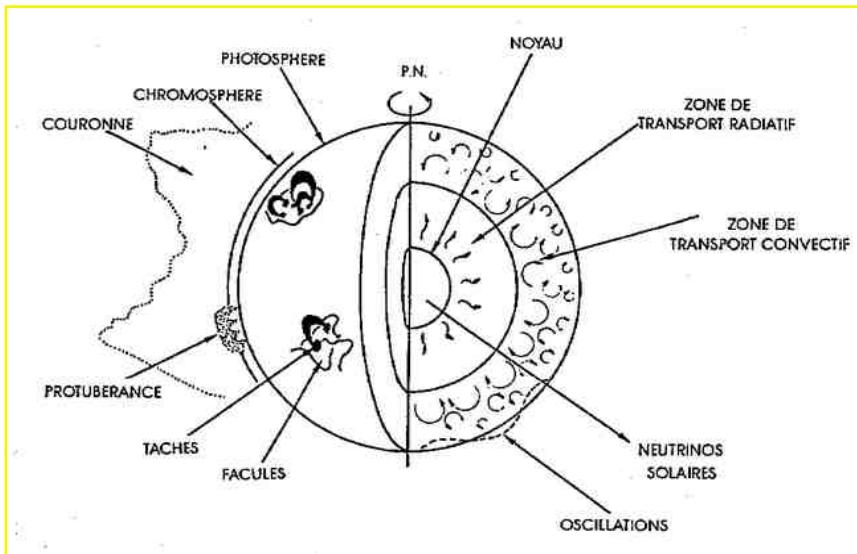
Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Mécanisme de Babcock et Leighton

Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Rotation différentielle du Soleil

- Evolution du champ magnétique du Soleil:
 - champ magnétique global, les régions actives sont les parties émergées
 - émergence du champ magnétique depuis la zone convective
 - rotation différentielle de la zone convective du Soleil (plus rapide à l'équateur qu'au voisinage des pôles)

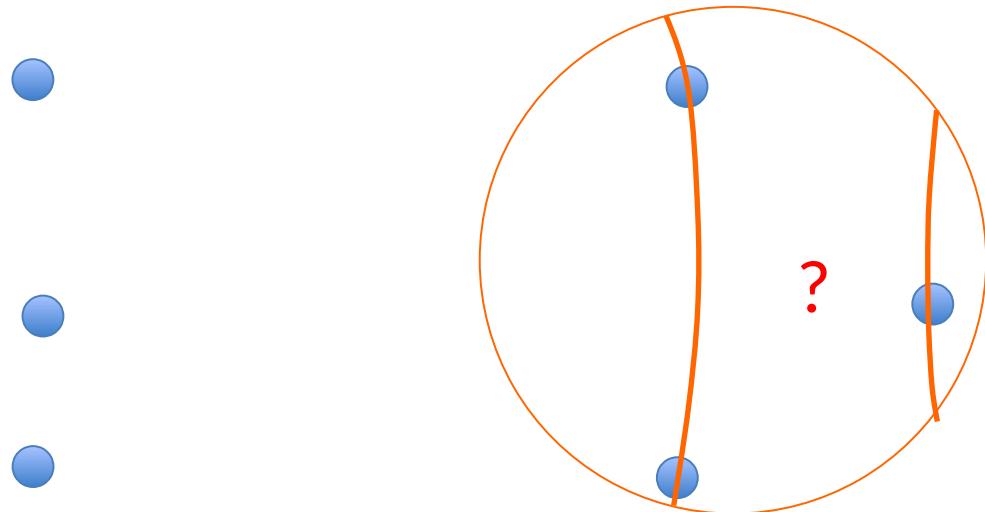


http://irfu.cea.fr/Sap/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=1283

Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

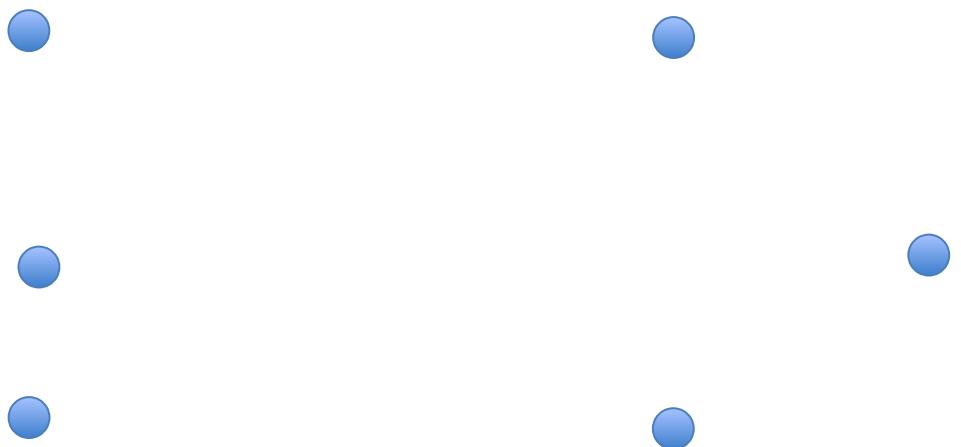
Rotation différentielle du Soleil et théorème du gel

- Trois parcelles fluides qui symbolisent le mouvement de rotation du Soleil.
- Déplacement au cours de la rotation différentielle.
- Selon vous, qu'est-ce que cela implique pour l'allure des lignes de force du champ magnétique si la MHD idéale est respectée ?



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

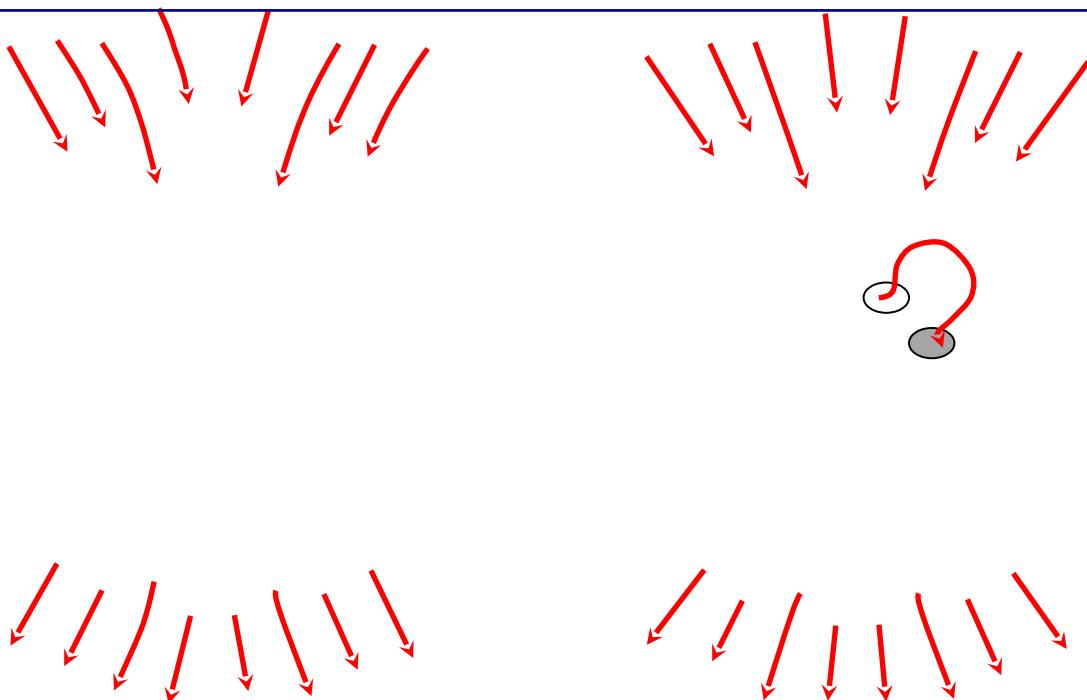
Rotation différentielle du Soleil et théorème du gel

- Magnétohydro-dynamique « idéale » (sans pertes): parcelles fluides liées par lignes de champ magnétique
 - La rotation différentielle déforme le champ magnétique: création d'une composante toroïdale (= le long des parallèles) à partir du champ poloïdal (=le long des méridiens}
- 

Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

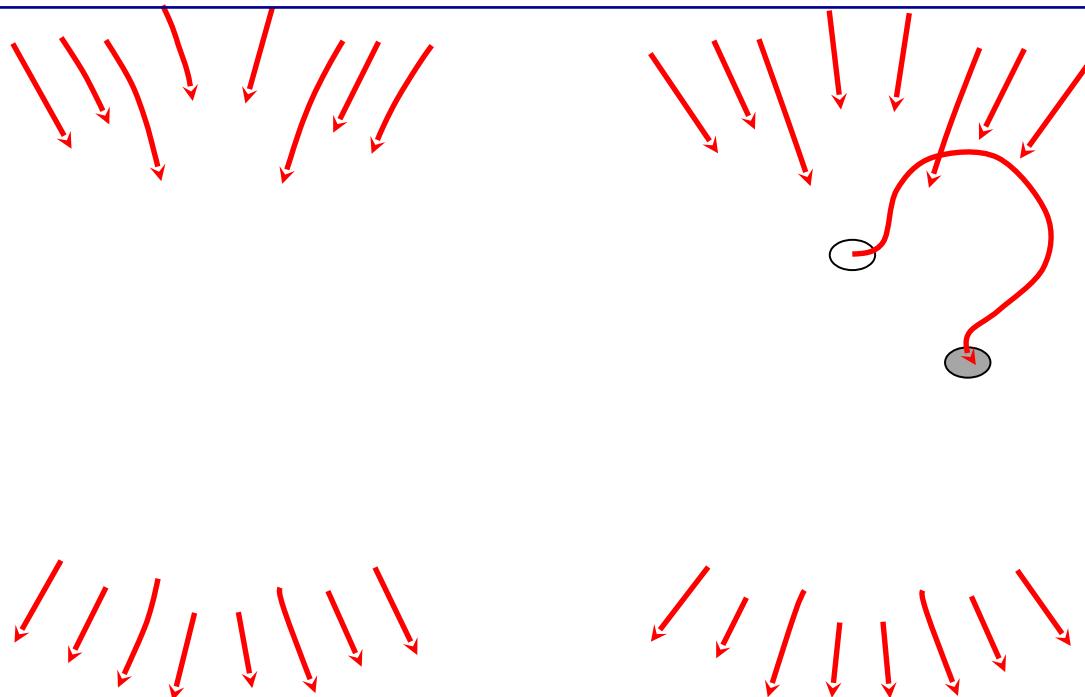
- Point de départ:
champ magnétique
poloïdal (le long des
méridiens)
- Rotation
différentielle:
création d'une
composante toroïdale
(le long des
parallèles)
- Intensification du champ toroïdal et émergence de flux magnétique



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

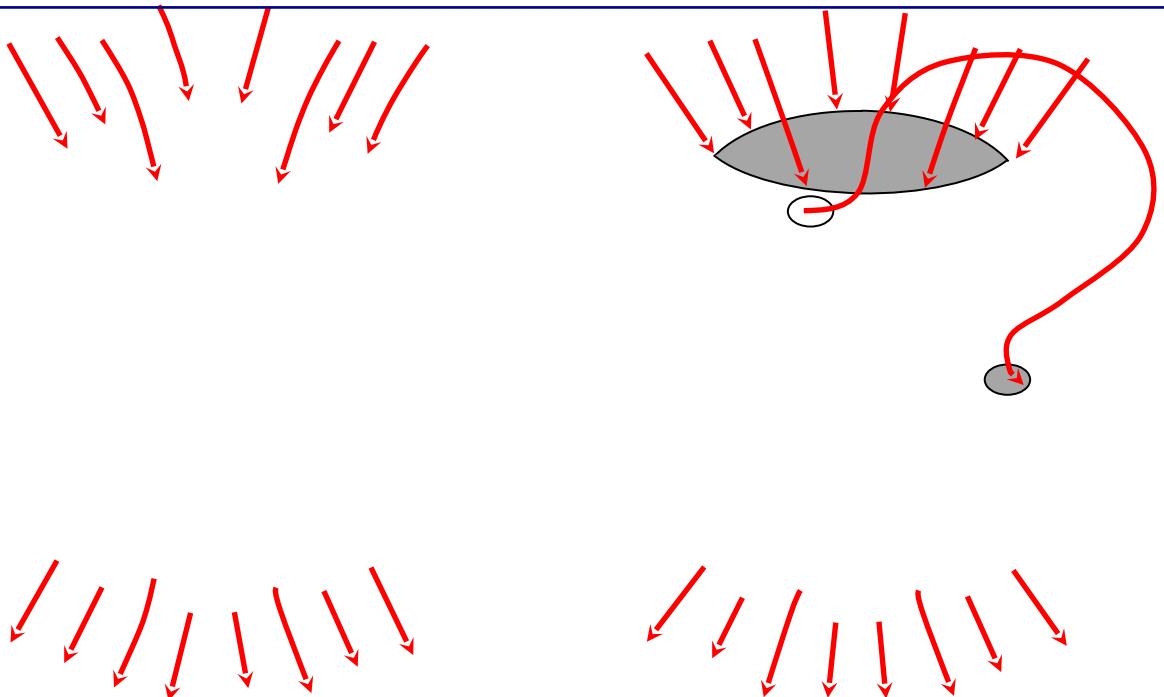
- Point de départ:
champ magnétique
poloïdal (le long des
méridiens)
- Rotation
différentielle:
création d'une
composante toroïdale
(le long des
parallèles)
- Intensification du champ toroïdal et émergence de flux magnétique



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

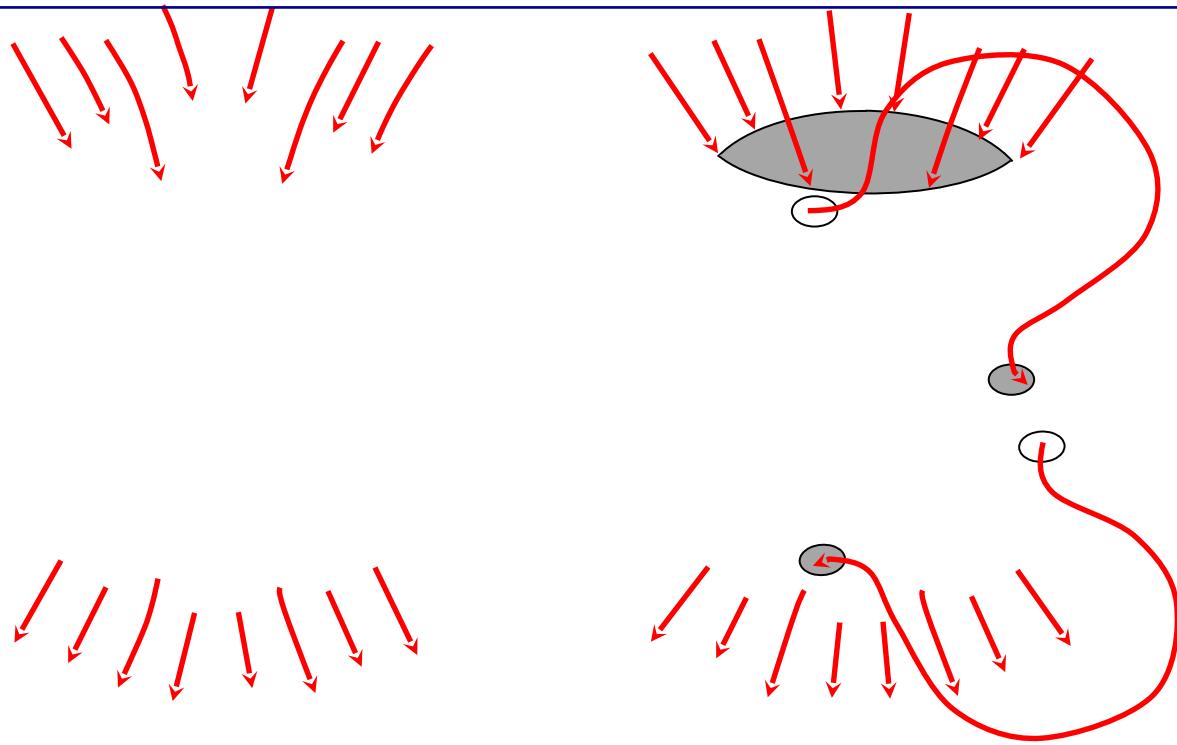
- Point de départ:
champ magnétique
poloïdal (le long des
méridiens)
- Rotation
différentielle:
création d'une
composante toroïdale
(le long des
parallèles)
- Intensification du champ toroïdal et émergence de flux magnétique
- Migrations:
 - partie de queue vers les pôles => inversion du champ polaire



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

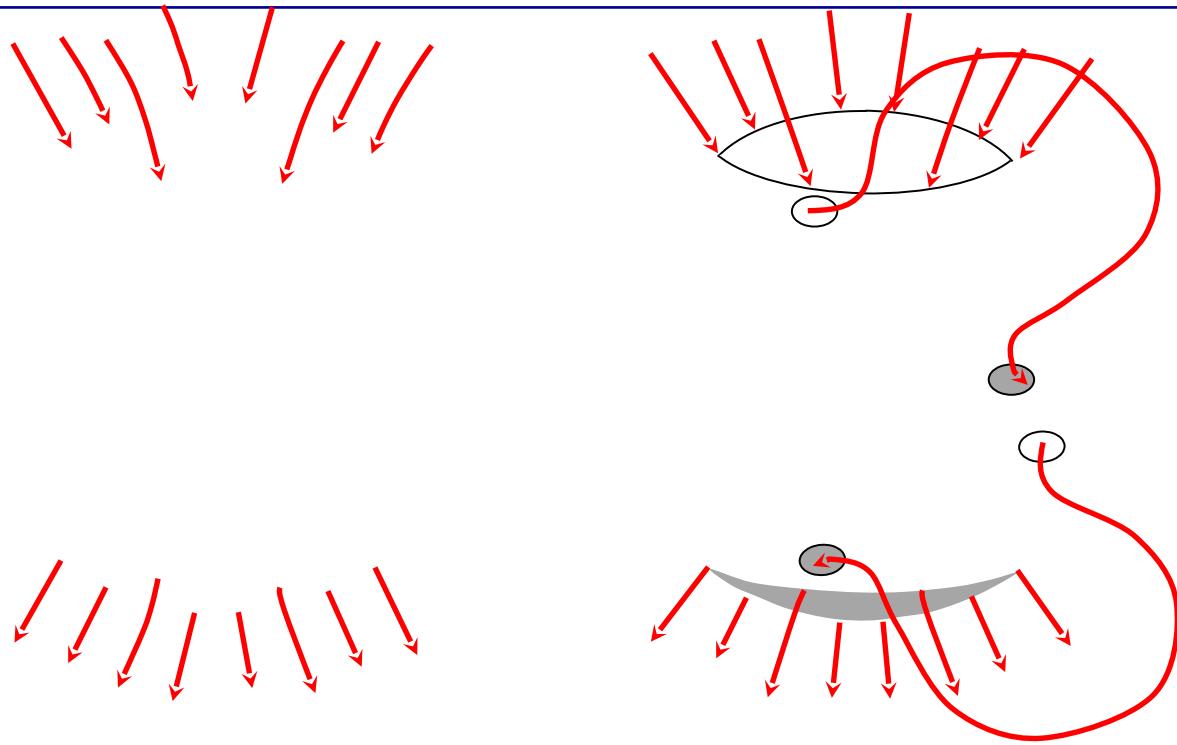
- Point de départ:
champ magnétique
poloïdal (le long des
méridiens)
- Rotation
différentielle:
création d'une
composante toroïdale
(le long des
parallèles)
- Intensification du champ toroïdal et émergence de flux magnétique
- Migrations:
 - partie de queue vers les pôles => inversion du champ polaire
 - partie de tête vers l'équateur => annihilation des composantes toroïdales,
reconstitution du champ magnétique poloïdal (orientation opposée !)



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

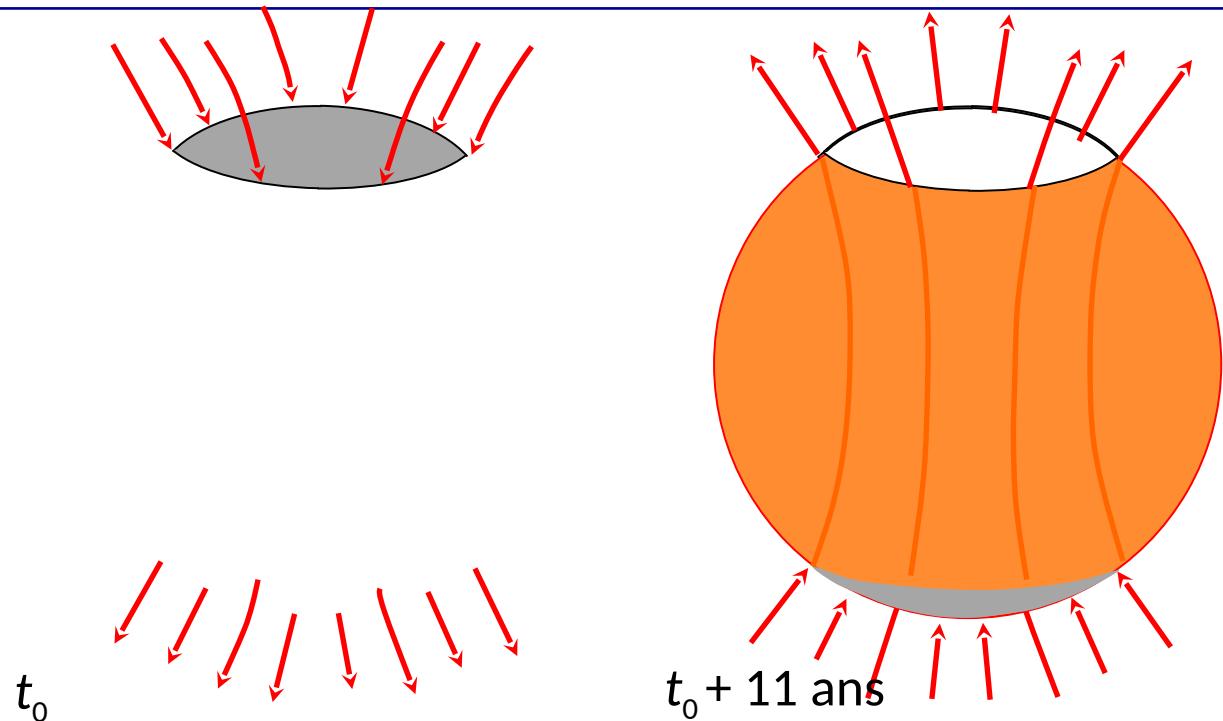
- Point de départ:
champ magnétique
poloïdal (le long des
méridiens)
- Rotation
différentielle:
création d'une
composante toroïdale
(le long des
parallèles)
- Intensification du champ toroïdal et émergence de flux magnétique
- Migrations:
 - partie de queue vers les pôles => inversion du champ polaire
 - partie de tête vers l'équateur => annihilation des composantes toroïdales,
reconstitution du champ magnétique poloïdale (orientation opposée !)



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation, émergence, dispersion des régions actives

- Point de départ: champ magnétique poloïdal (le long des méridiens)
- Point final (~ 11 ans plus tard): champ magnétique poloïdal inversé



Un aperçu qualitatif du mécanisme dynamo

Formation et émergence des régions actives

- Illustration animée



- Babcock-Leighton n'est pas la seule approche à la théorie dynamo: voir revue Charbonneau, Living Reviews in Solar Physics 17, 4 (2020)

Le cycle d'activité solaire

Résumé : mécanisme dynamo

- Le Soleil possède un champ magnétique initial, condensé lors de la contraction du nuage de gaz, lorsqu'il commençait à être ionisé (théorème du gel).
- Le champ magnétique du Soleil est localisé dans la zone convective.
- La rotation différentielle dans la zone convective déforme les lignes de force du champ magnétique : elle crée un champ magnétique toroïdal à partir du champ poloïdal (dipolaire) initial.
- L'émergence localisée du flux magnétique a lieu quand le champ magnétique commence à être suffisamment intense. Elle crée les régions actives visibles dans la photosphère et la couronne.
- La migration des parties émergées du champ magnétique vers les pôles conduit à l'inversion du champ magnétique polaire. La migration des parties de tête vers l'équateur conduit à la destruction de la composante toroïdale du champ magnétique.
- Le résultat est le rétablissement d'un champ magnétique bipolaire, avec l'orientation du dipôle opposée.

