

Le champ magnétique des étoiles

Coralie Neiner
Observatoire de Paris

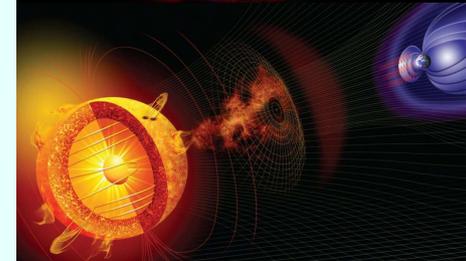
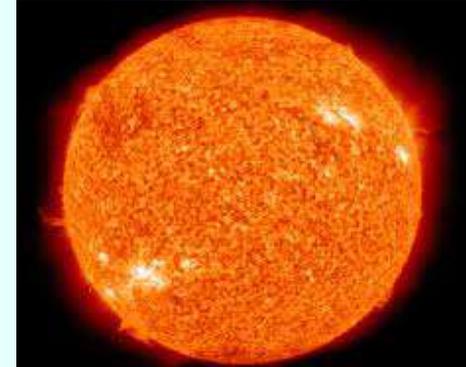
Sommaire

Mesurer le champ magnétique des étoiles

Les champs magnétiques des étoiles chaudes

Les champs magnétiques des étoiles froides

Impact sur la Terre



Mesurer le champ magnétique des étoiles

Mesurer le champ magnétique des étoiles

Il n'est pas possible d'envoyer des instruments sur une étoile pour mesurer son champ magnétique !

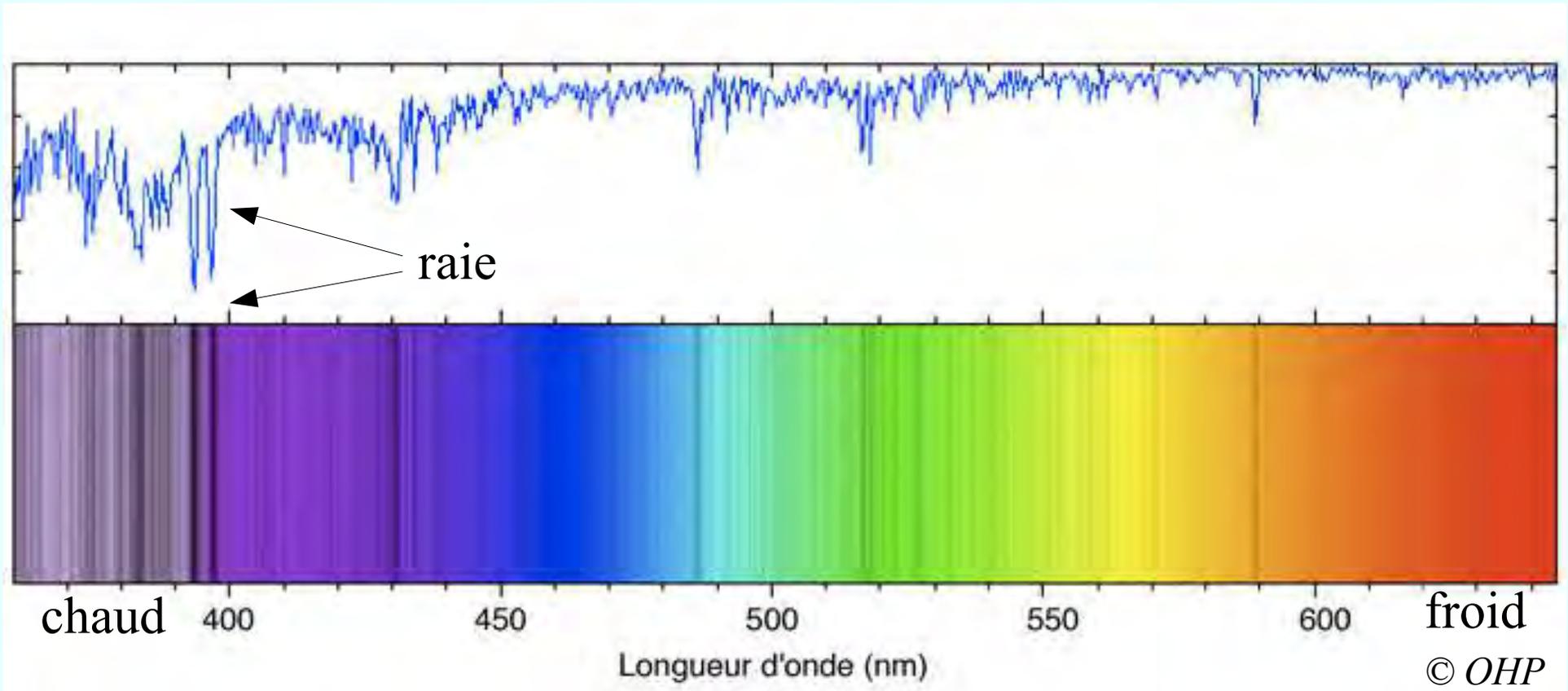
→ tout ce que nous pouvons mesurer c'est la lumière qui arrive de l'étoile jusqu'à la Terre :

- la quantité de lumière
- la variation de la lumière
- la couleur de la lumière
- le spectre de la lumière
- la polarisation de la lumière



Le spectre de la lumière

La lumière des étoiles est décomposée sous forme de spectre.

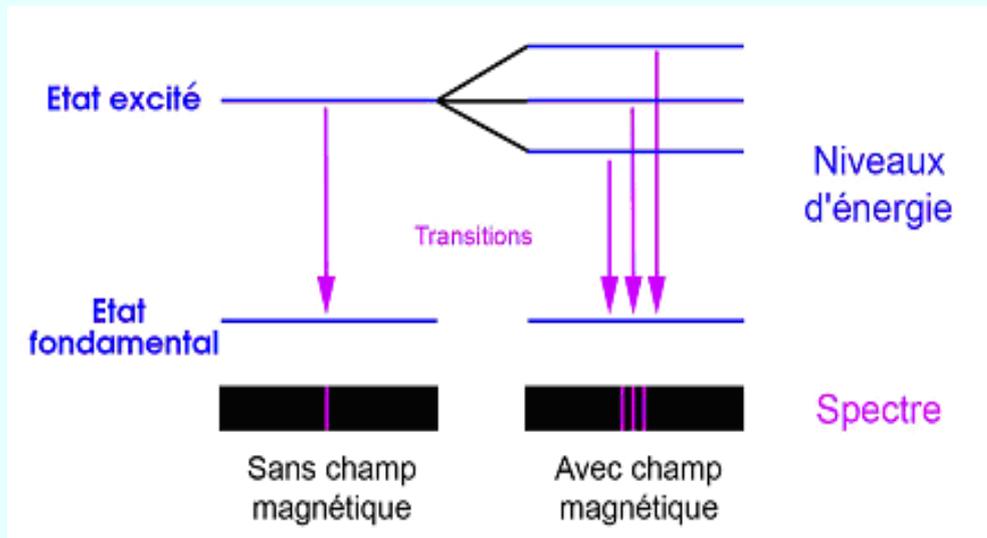


La couleur reflète la température de l'étoile.

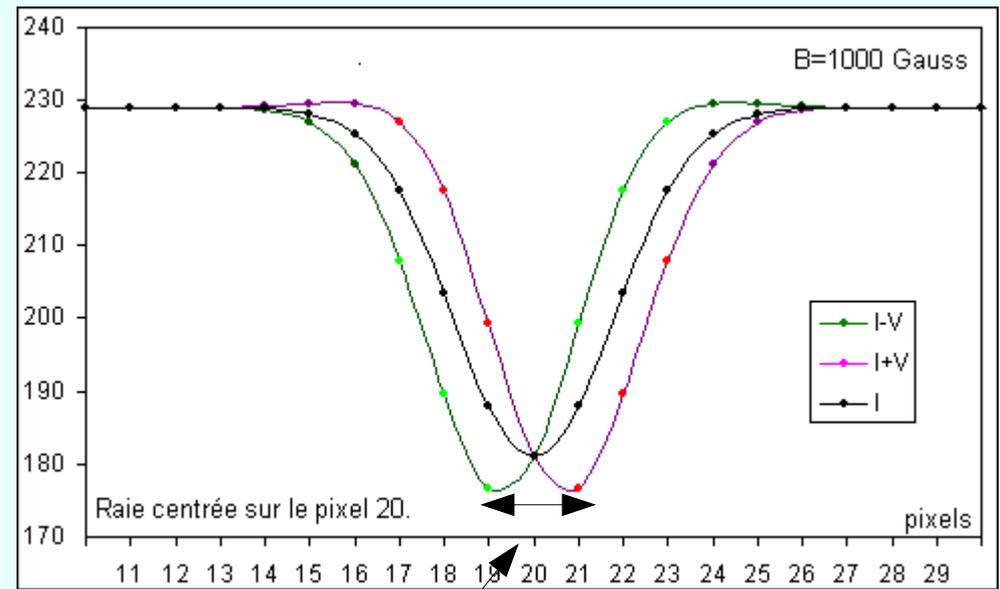
Ces spectres contiennent des raies qui dépendent de la composition chimique de l'étoile.

Effet Zeeman

En présence d'un champ magnétique, chaque raie est démultipliée en 3 raies.

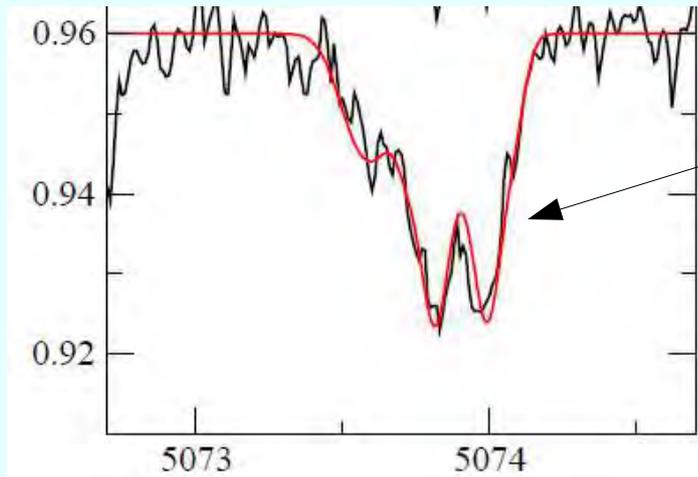


© Descotes-Genon



L'écartement des raies dépend de la force du champ magnétique

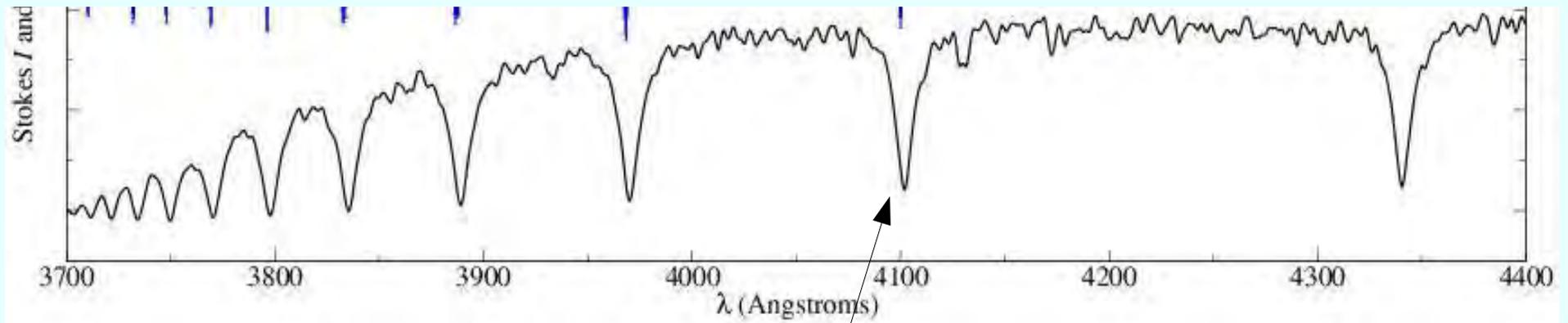
Exemple d'une étoile



3 raies visibles si le champ est fort (20000 G)

Terre < 1 G
IRM ~ 10000 G
LHC ~ 80000 G
(1 T = 10000 G)

Spectre



3 raies indistinguables si le champ est faible (2000 G)

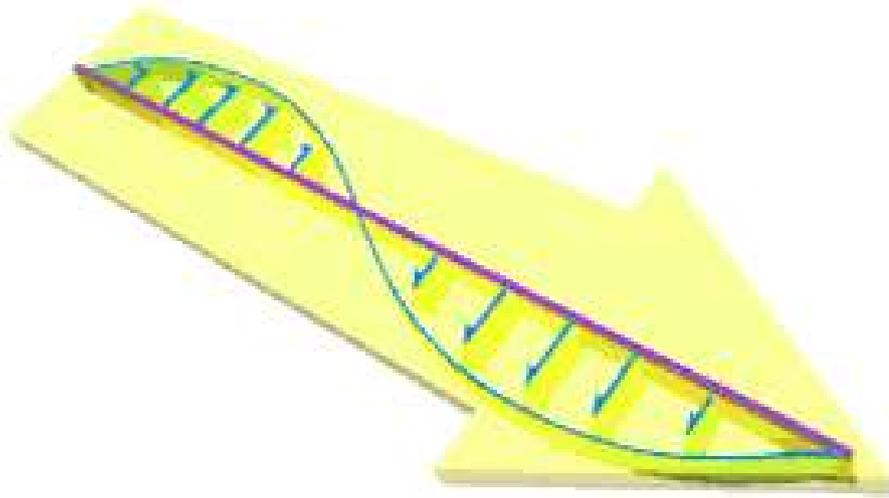
La polarisation de la lumière

Non polarisée = ondes de lumière oscillent dans toutes les directions

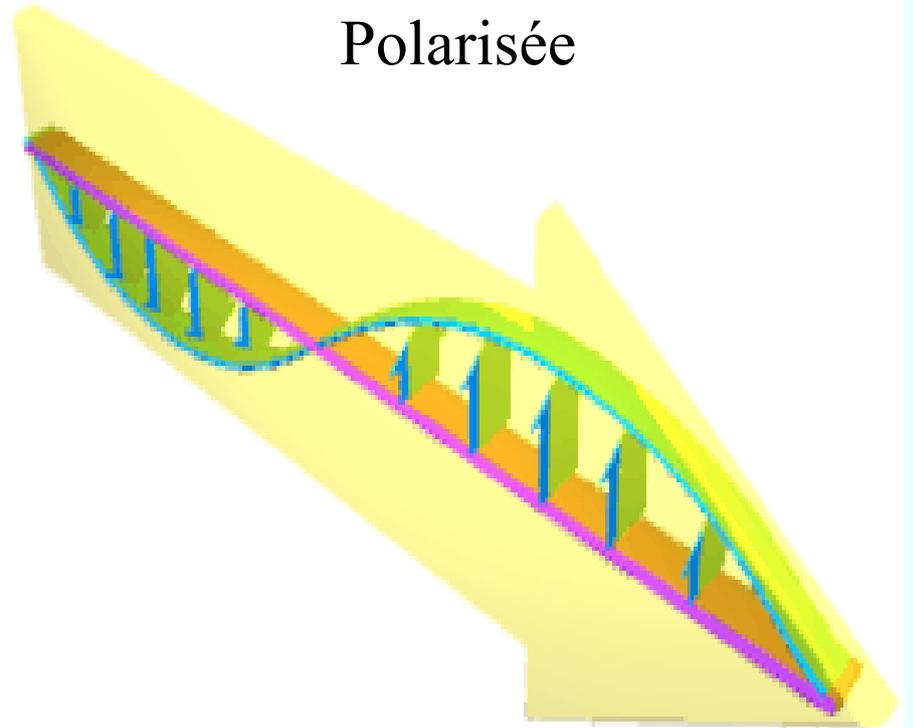
Polarisée linéairement = dans un plan fixe

Polarisée circulairement = dans un plan tournant

Non polarisée



Polarisée

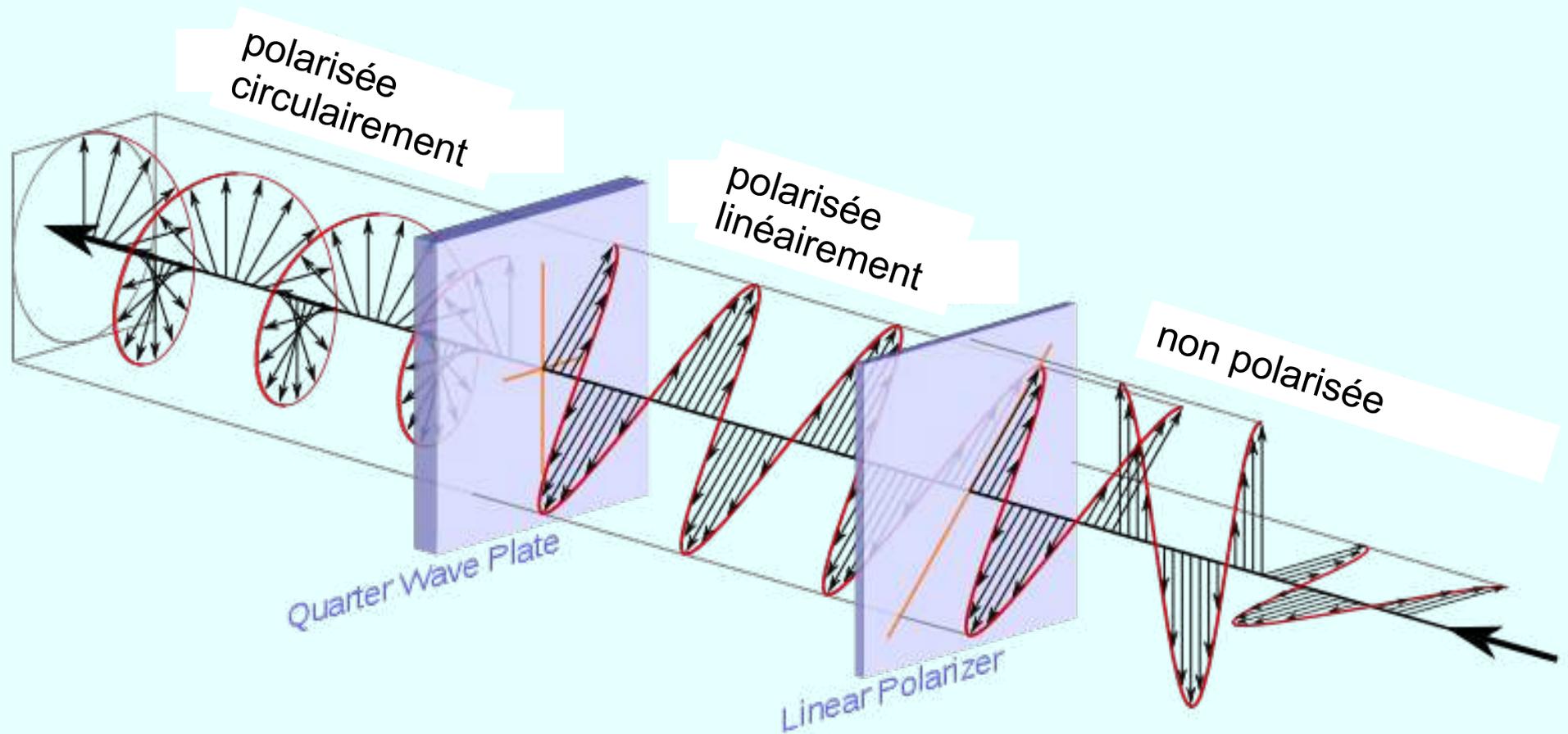


La polarisation de la lumière

Non polarisée = ondes de lumière oscillent dans toutes les directions

Polarisée linéairement = dans un plan fixe

Polarisée circulairement = dans un plan tournant

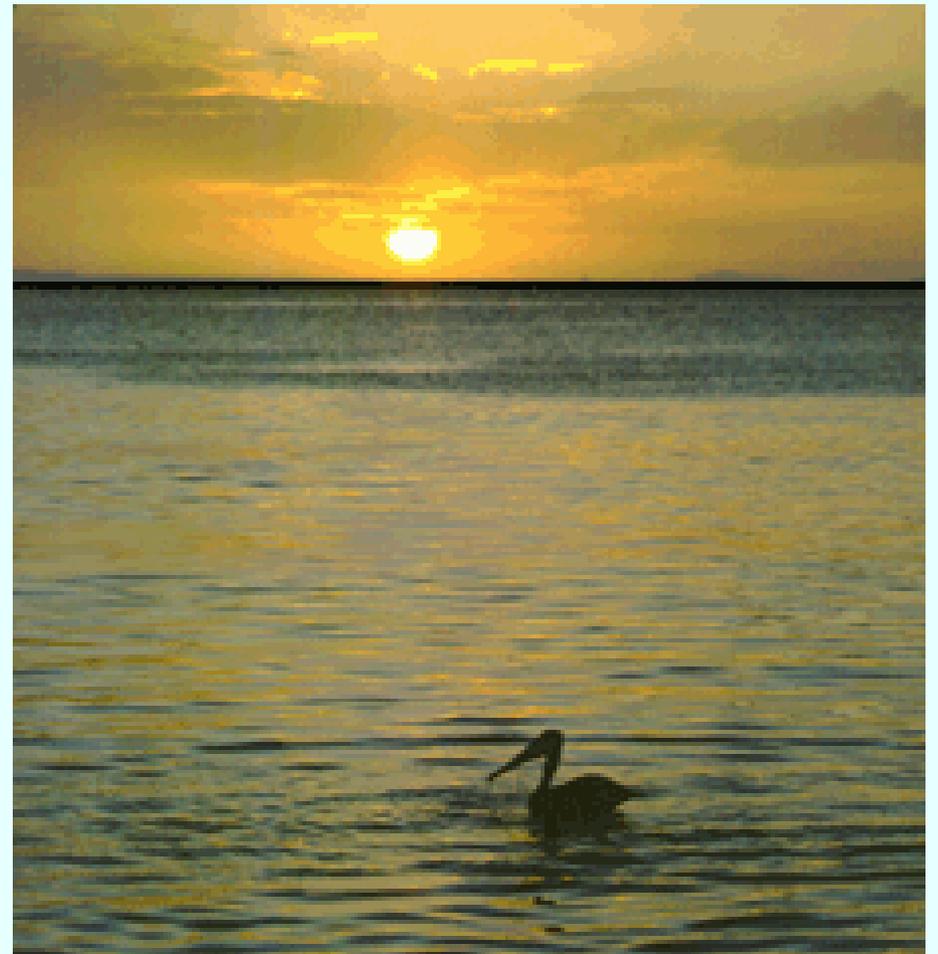


Voir la polarisation de la lumière

Toute la lumière



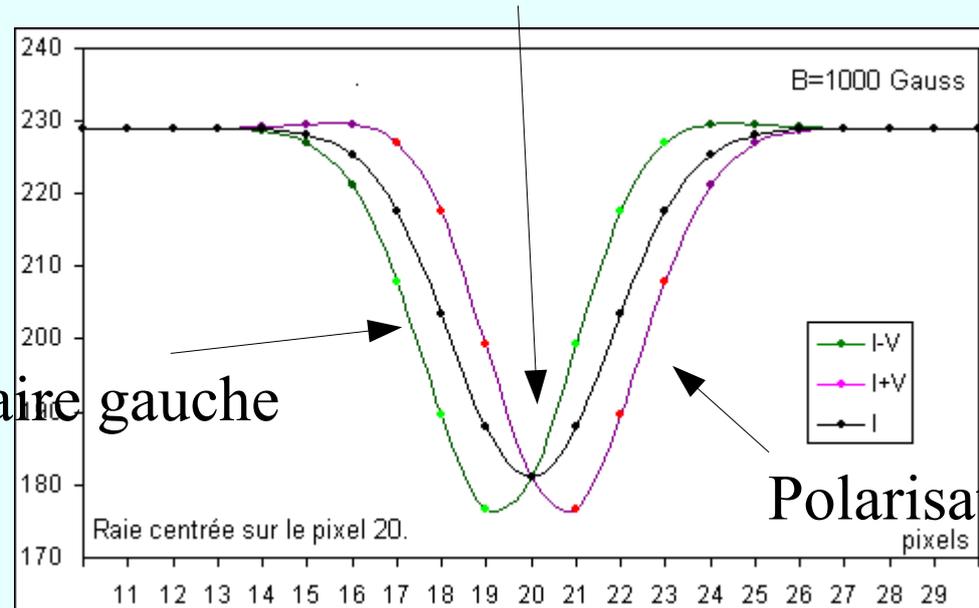
Sans la lumière polarisée



© UFRJ

Effet Zeeman

Non polarisée circulairement



Polarisation circulaire gauche

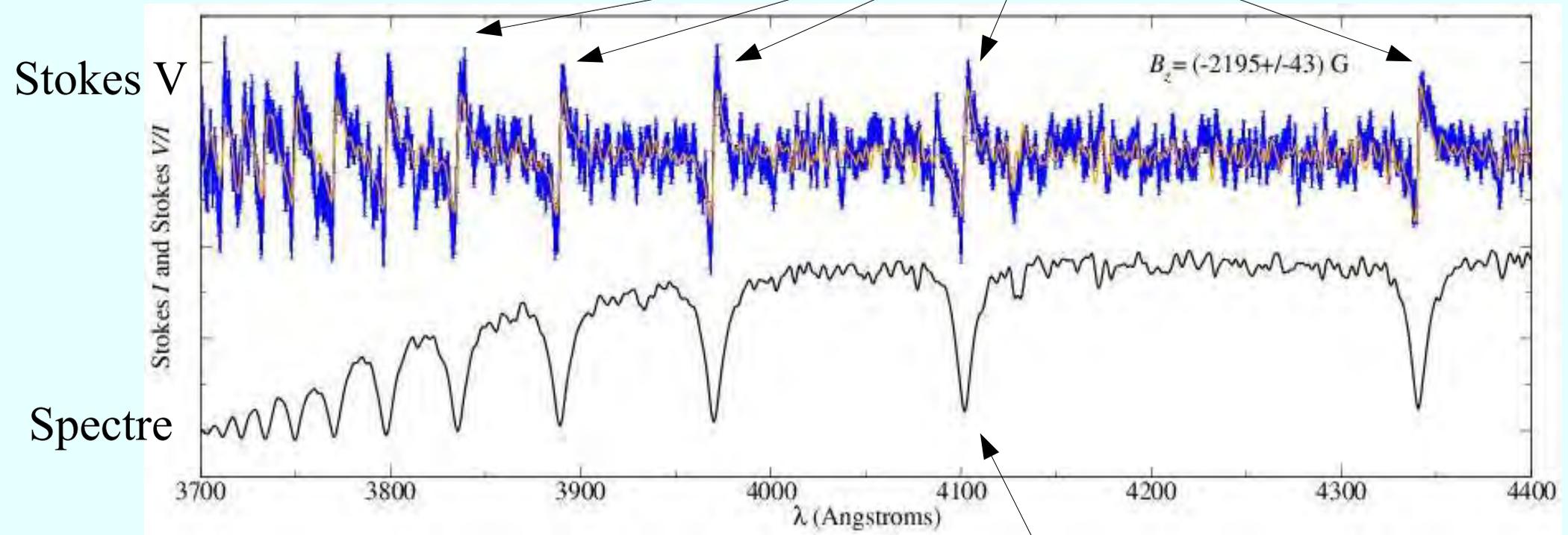
Polarisation circulaire droite

Un **spectropolarimètre** permet de mesurer chaque type de polarisation séparément. On peut donc mesurer les **2 raies extrêmes** indépendamment.

La différence entre ces 2 raies extrêmes est appelé **profil de Stokes V**.

Exemple d'une étoile

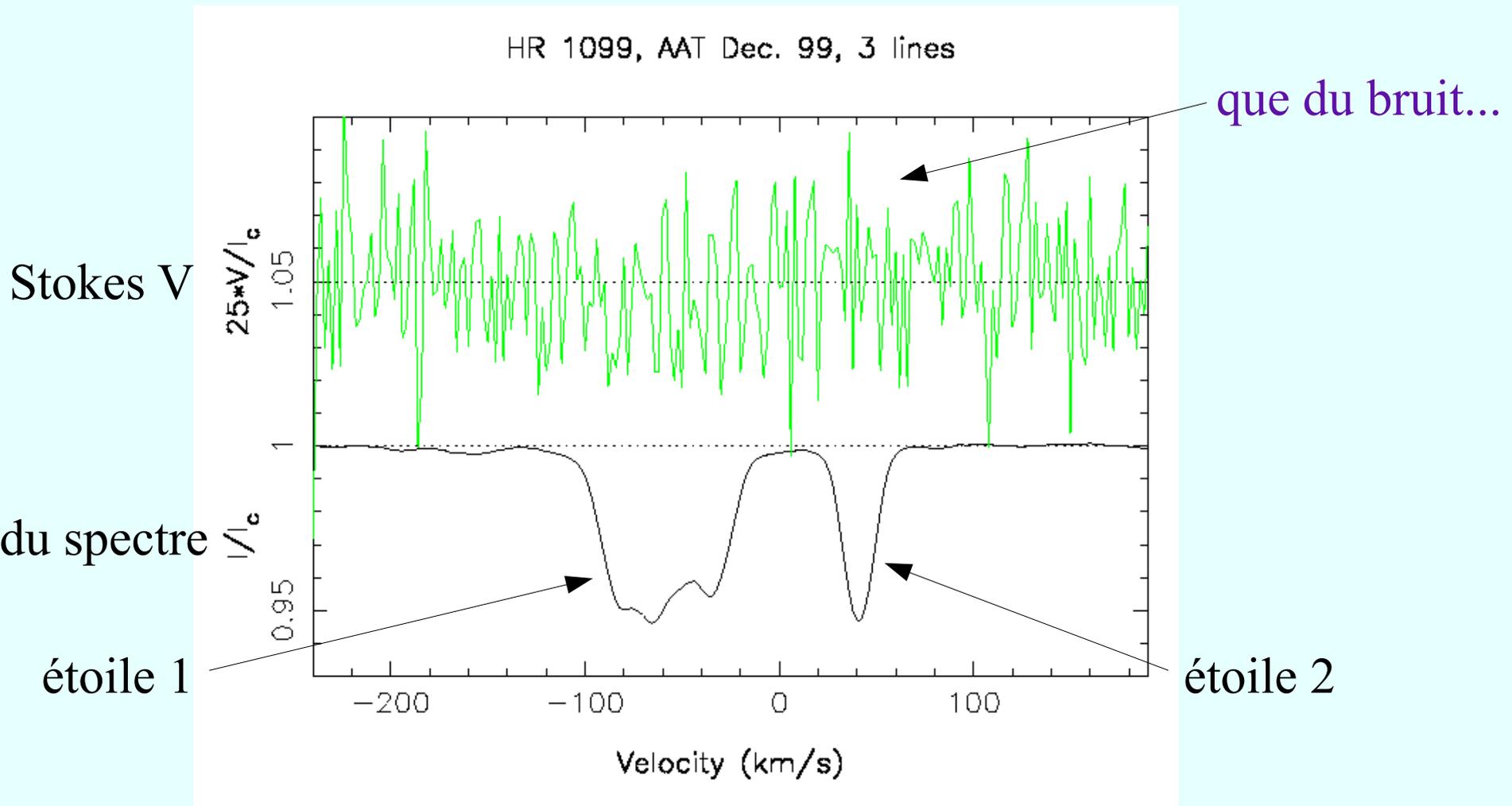
Stokes V pour chaque raie



3 raies indistinguables
($\sim 2000 \text{ G}$)

Technique LSD pour améliorer le signal

Observation d'une seule raie de 2 étoiles

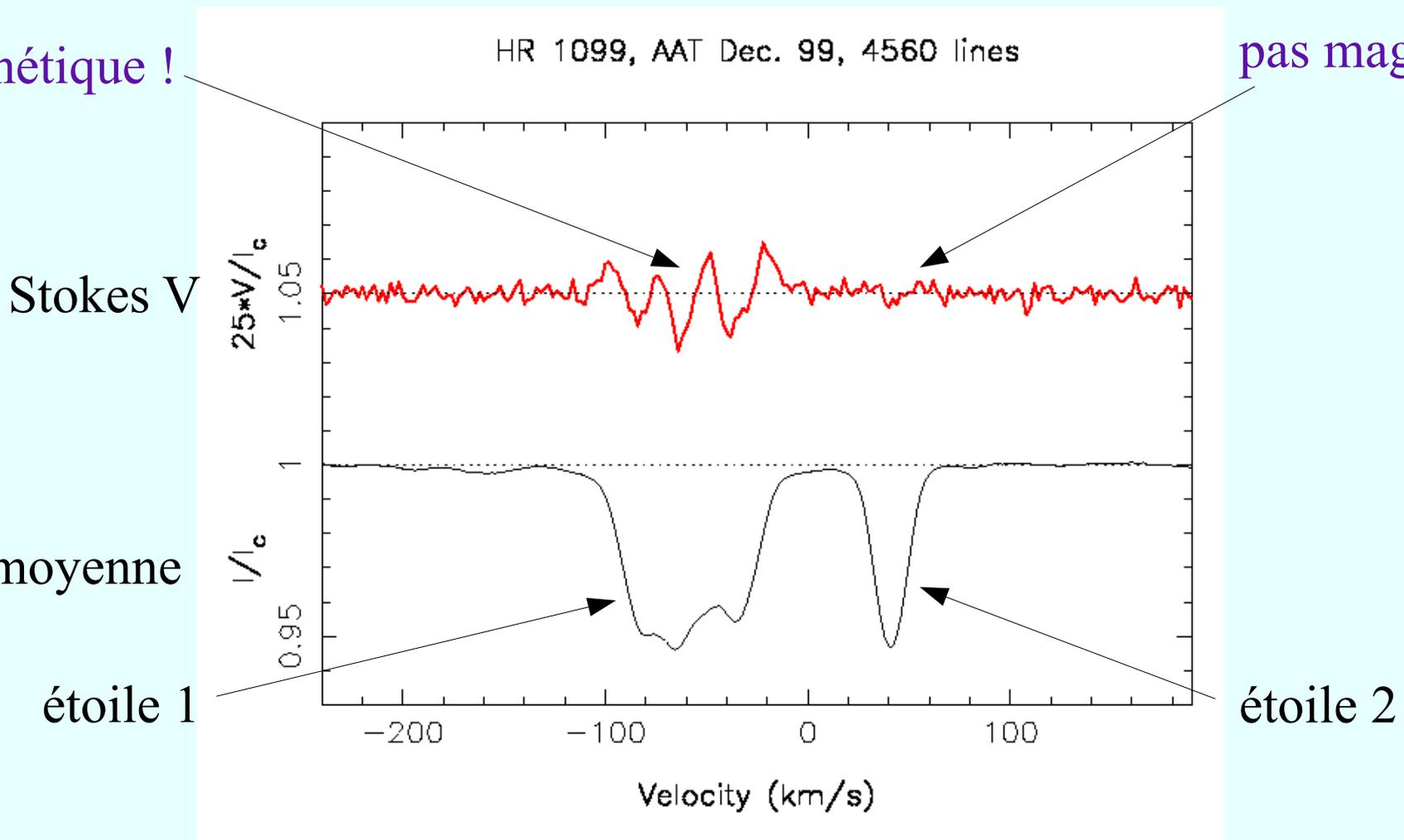


Technique LSD pour améliorer le signal

Observation de la **moyenne de toutes les raies** de chaque étoile

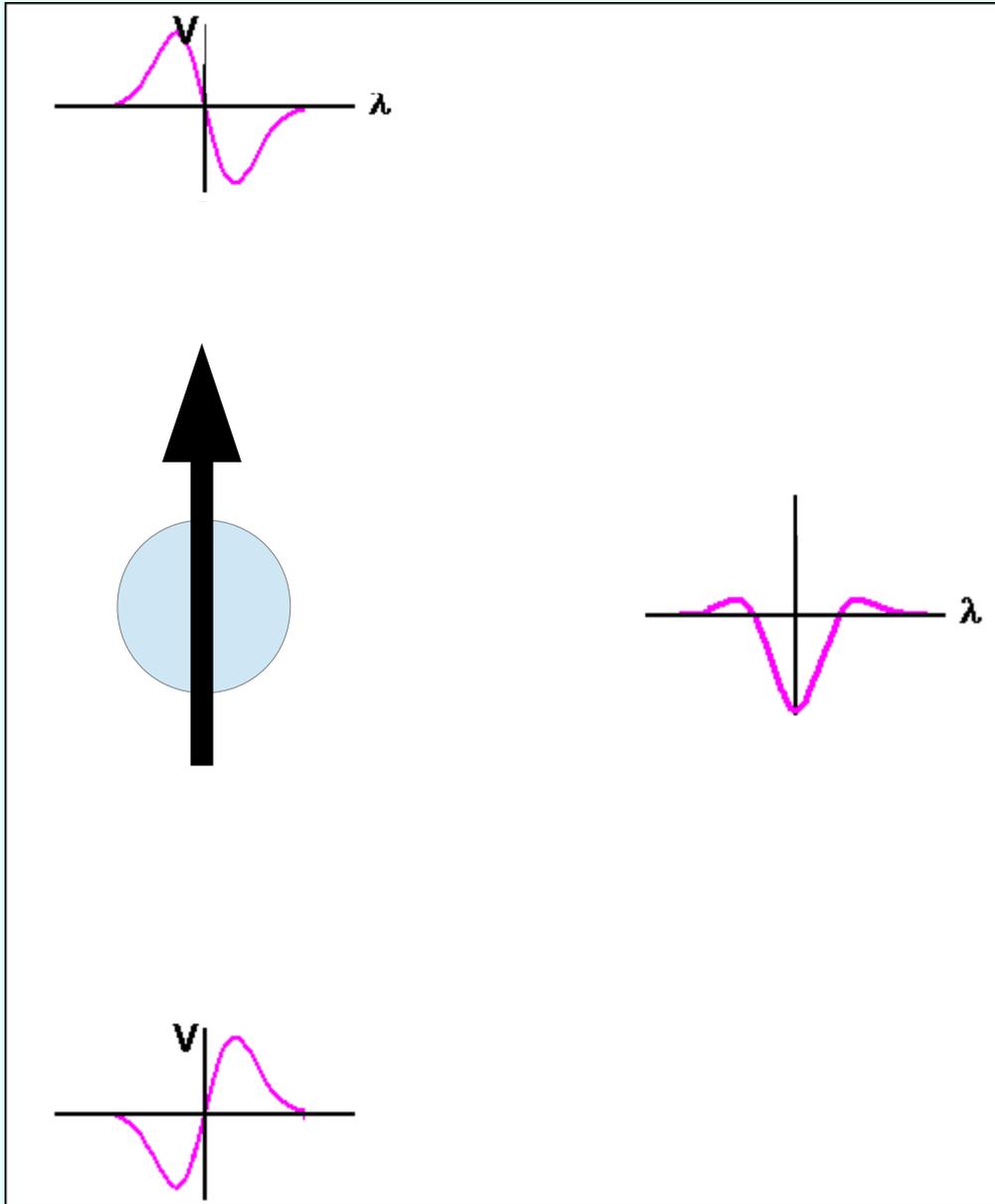
magnétique !

pas magnétique



→ permet de mesurer des champs faibles

Modulation rotationnelle

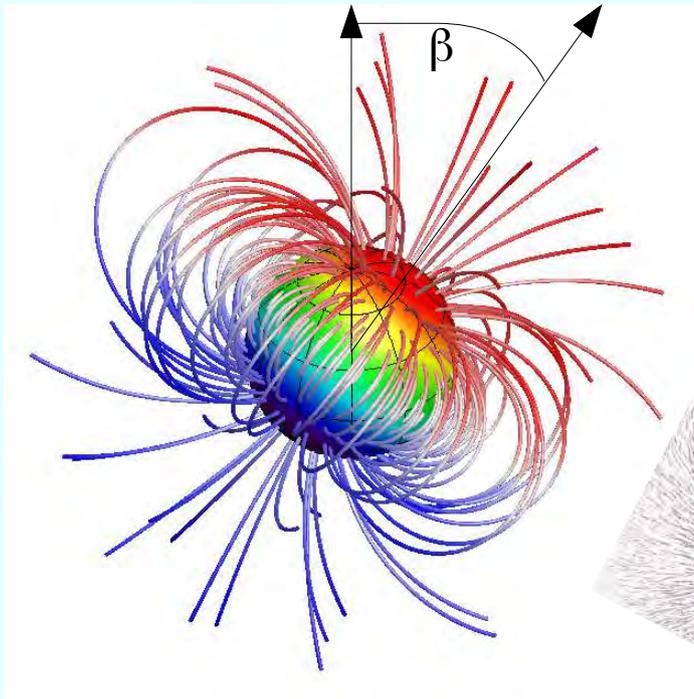


Selon l'angle sous lequel nous observons le champ magnétique, le profil de Stokes V est différent.

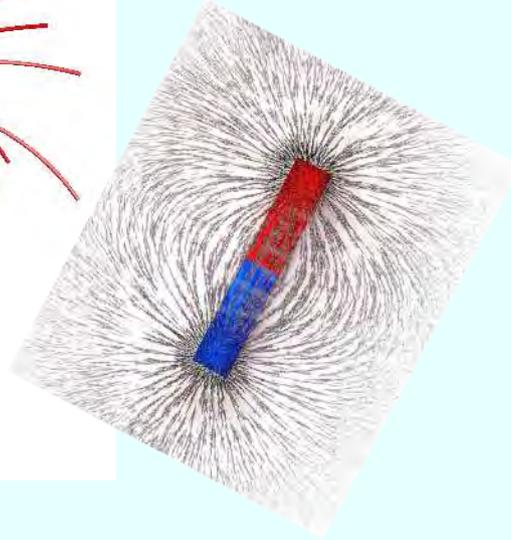
Pour connaître tout le champ magnétique il faudrait le mesurer de tous les côtés de l'étoile.

Mais nous ne pouvons mesurer que le champ magnétique de la lumière qui arrive jusqu'à nous...

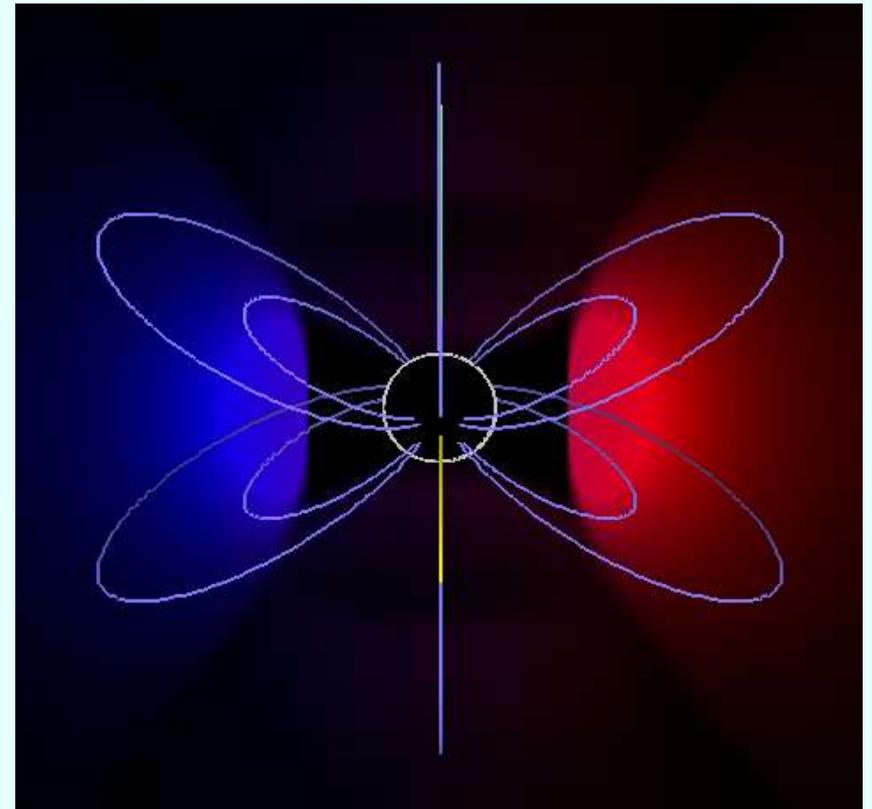
Modulation rotationnelle



L'axe du champ magnétique des étoiles n'est pas aligné avec l'axe de rotation.



Lorsque l'étoile tourne, nous pouvons voir le champ magnétique sous tous les angles.



Spectropolarimètres

Spectromètre = mesure du spectre

Polarimètre = mesure de la polarisation

Spectropolarimètre = mesure du spectre + polarisation

Haute résolution = beaucoup de pixels pour chaque raie

→ Seulement 3 spectropolarimètres haute résolution en lumière visible disponibles dans le monde

ESPaDOnS au CFHT à Hawaï



Télescope de 3.6m de diamètre appartenant à la France, au Canada et à Hawaï

Au sommet du Mauna Kea à 4200m d'altitude

ESPaDOnS disponible depuis fin 2005, mais temps partagé avec d'autres instruments



+ SPIRou en infra-rouge depuis 2019

Mauna Kea

Narval au TBL au Pic du Midi

Télescope de **2m** de diamètre appartenant à la France.

Au sommet du **Pic du Midi** à **2900m** d'altitude

Narval disponible depuis fin 2006 → instrument unique



HarpsPol à l'ESO à La Silla au Chili



Télescope de 3.6m de diamètre appartenant à une collaboration européenne (ESO)

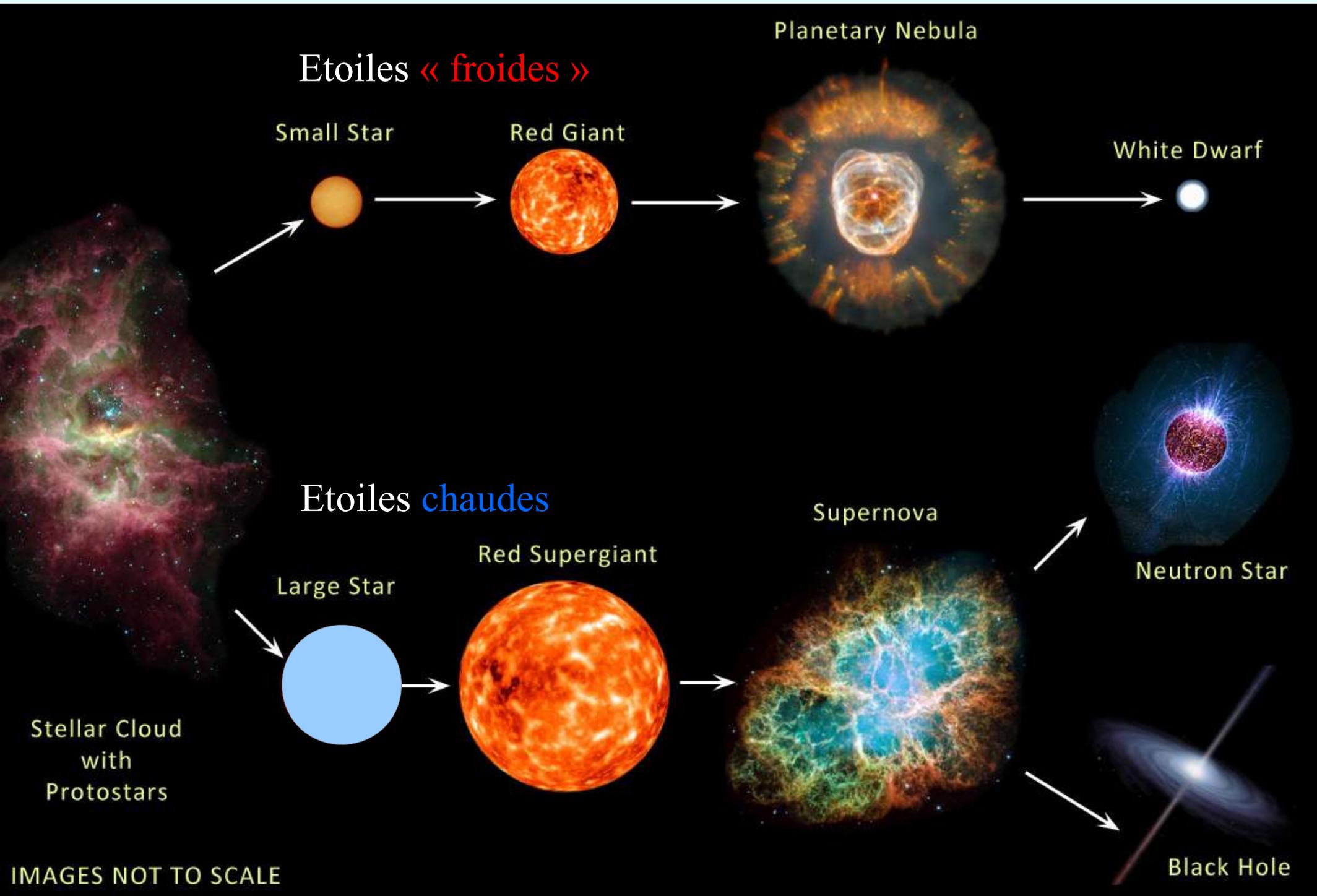
Sur le site de La Silla dans le désert de l'Atacama à 2400m d'altitude → hémisphère Sud



HarpsPol disponible depuis 2010, mais temps partagé avec d'autres instruments et notamment la recherche d'exoplanètes

Les étoiles chaudes et froides

L'évolution des étoiles



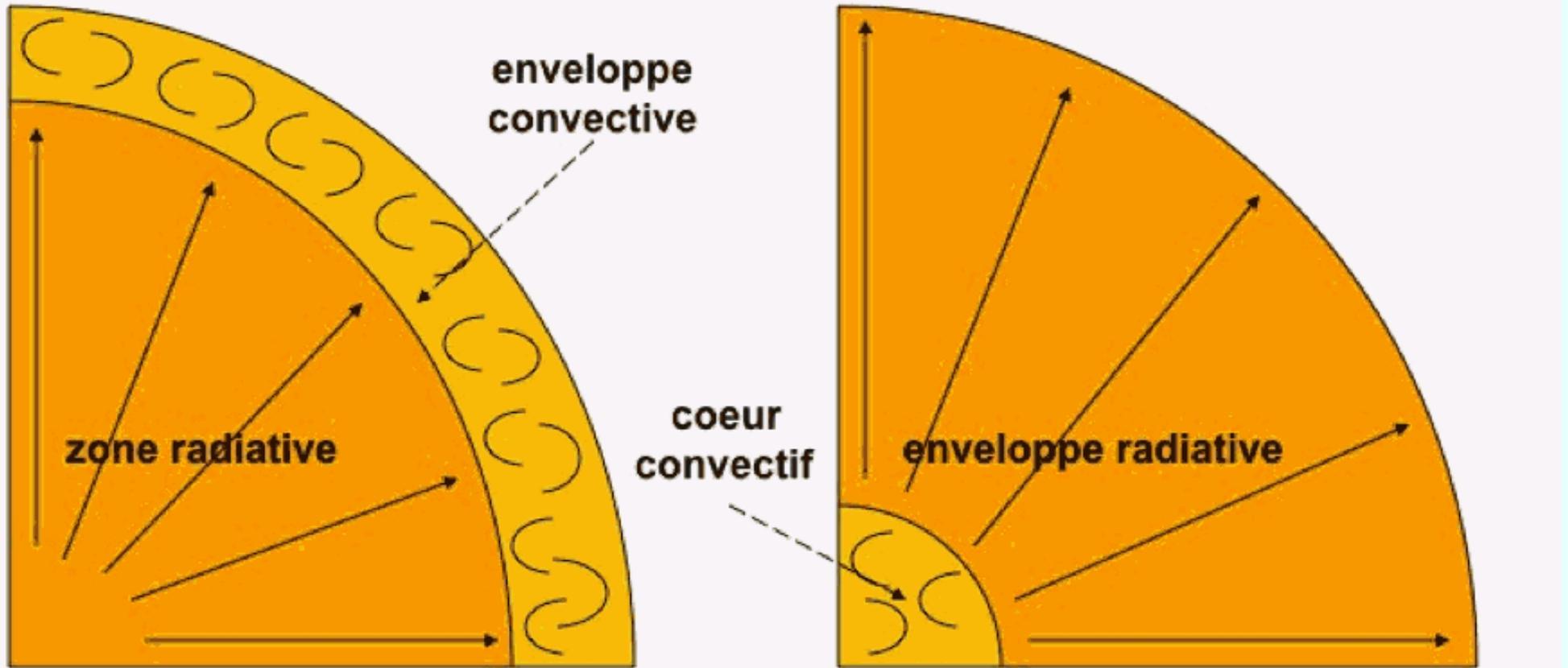
La structure des étoiles

Etoiles « froides »

$1 M_{\odot}$

Etoiles chaudes

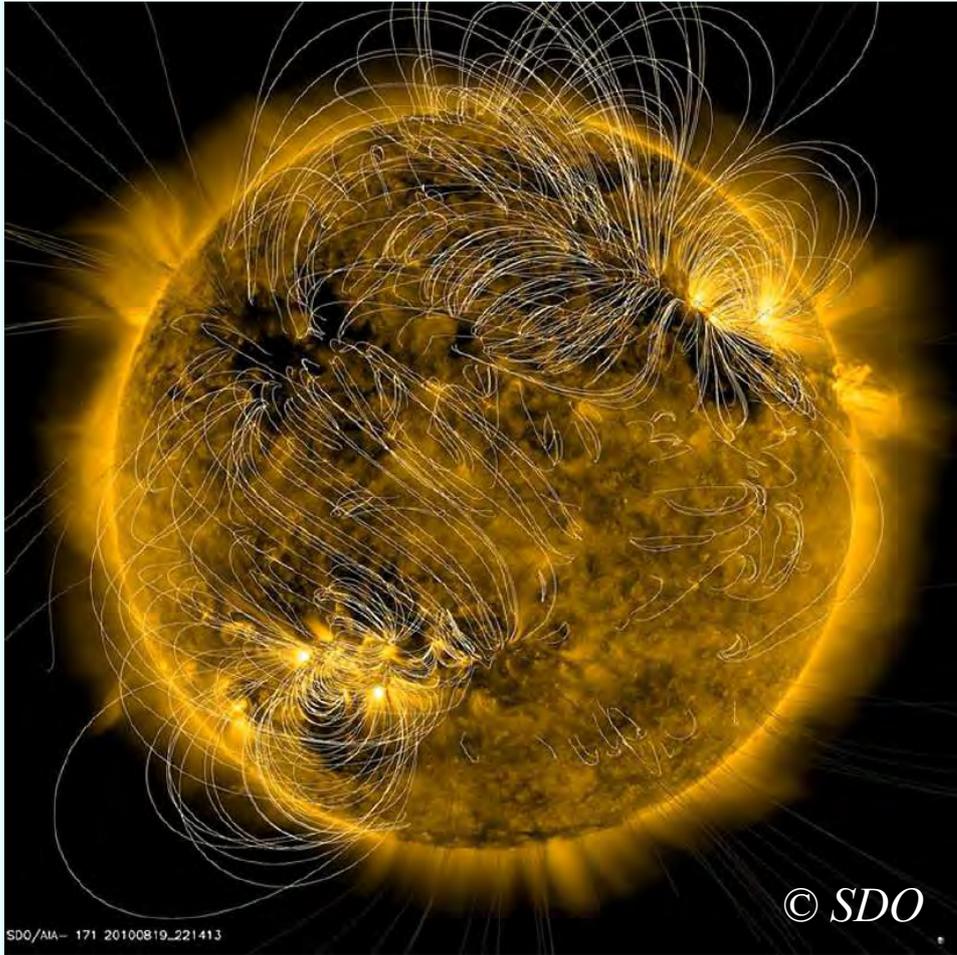
$9 M_{\odot}$



$R=0$	180000 ($0.52M_{\odot}$)	539000	696000 km	$R=0$	553000 ($0.97M_{\star}$)	1 500 000	2 540 000 km
$T_{\text{e}}=15.5$	7.5	1.5	$T=5800\text{K}$	$T_{\text{e}}=30.5$	21	5.3	$T=24000\text{K}$
$\rho=160$	19	0.09	g.cm^{-3}	$\rho=10.1$	5.4	0.08	g.cm^{-3}

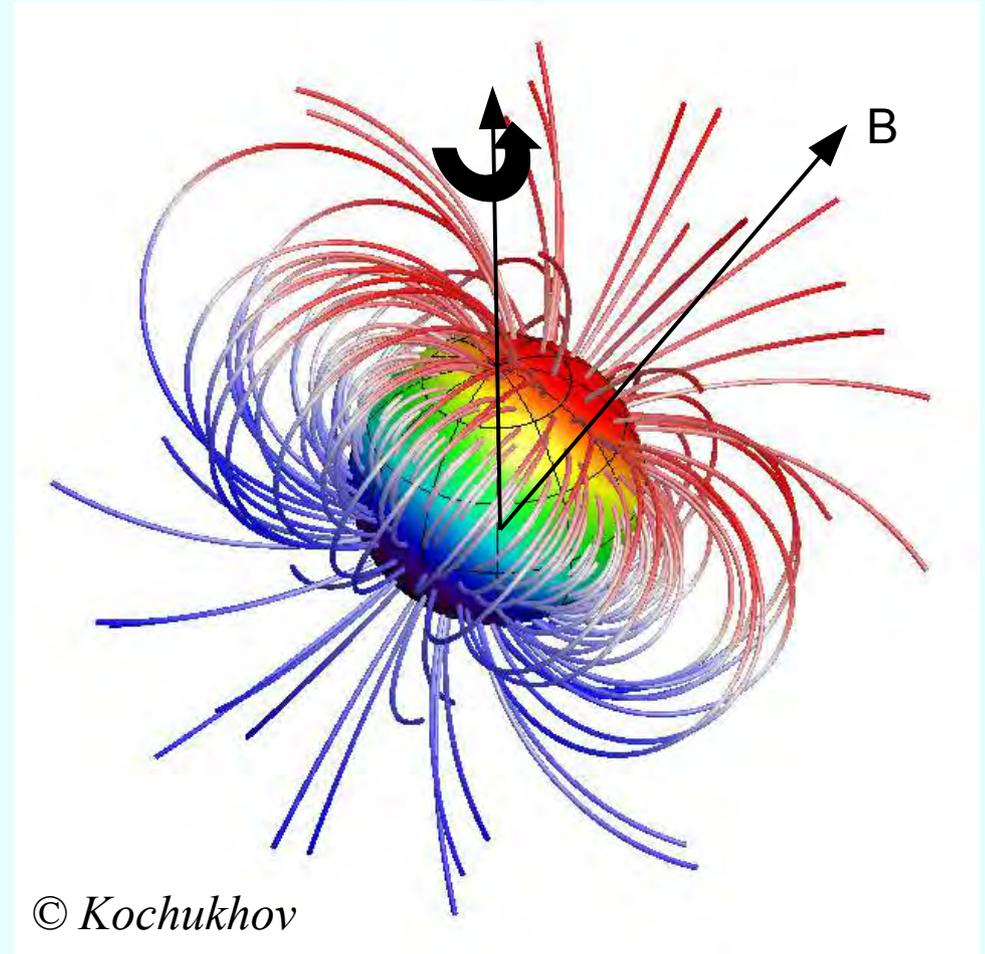
Le champ magnétique des étoiles

Etoiles **froides** (F \rightarrow M)



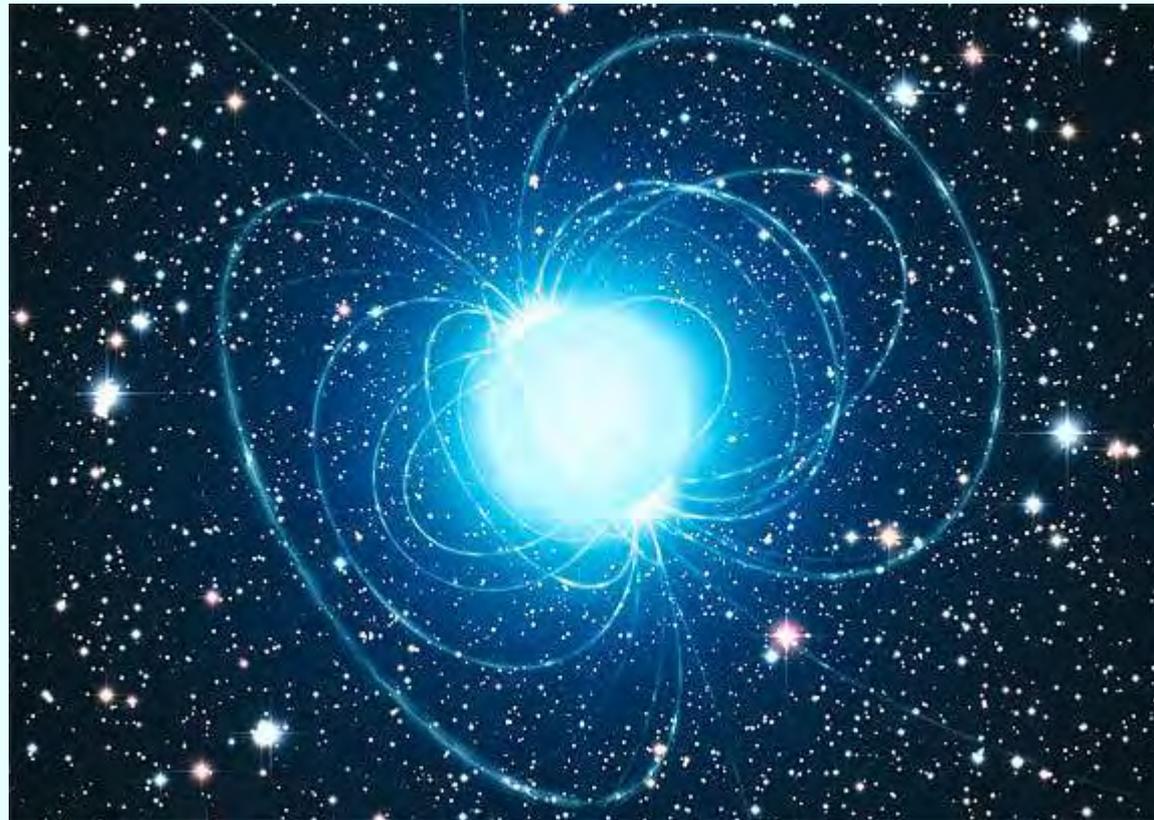
\rightarrow Champs dynamos

Etoiles **chaudes** (O \rightarrow F)

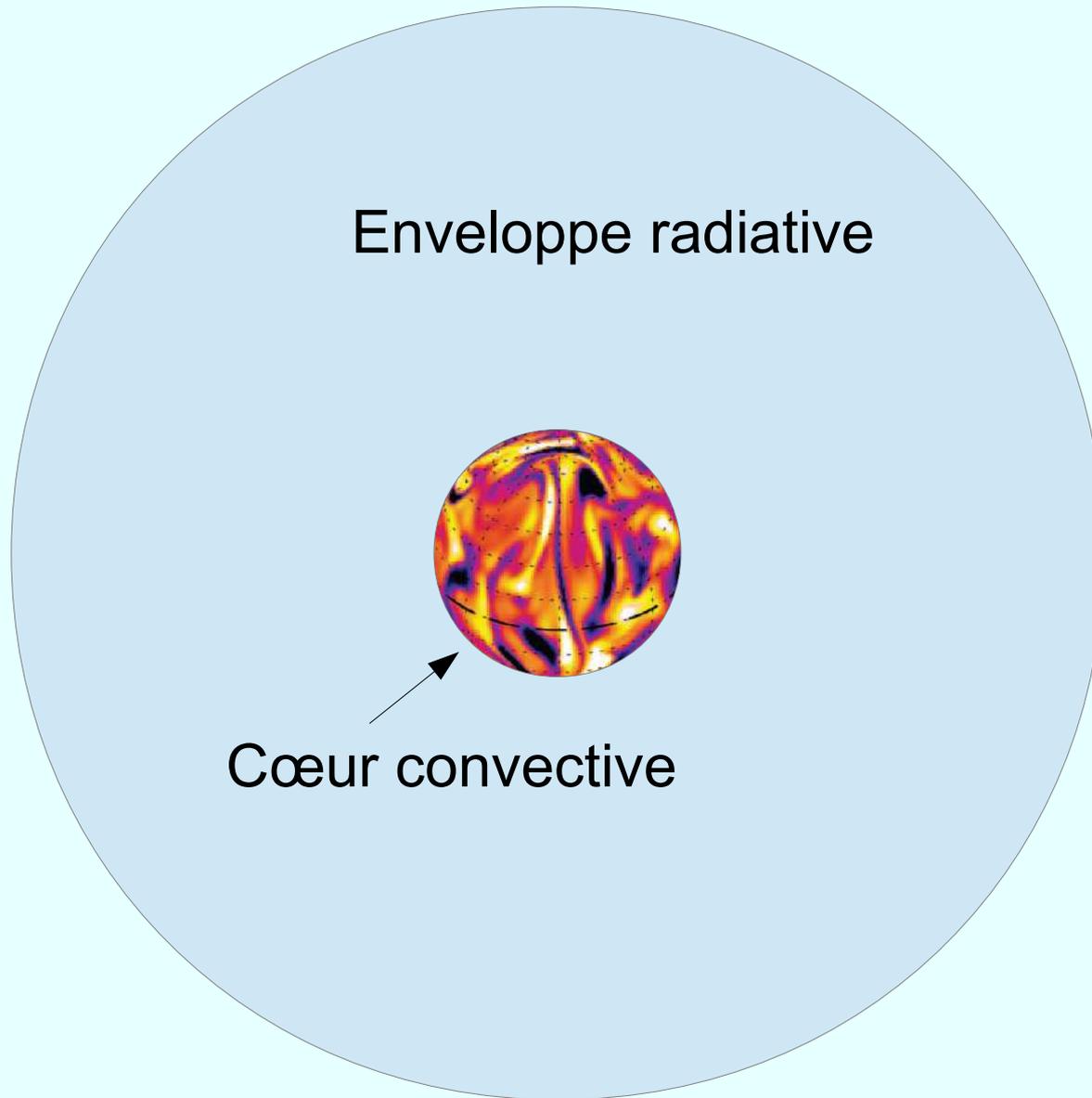


\rightarrow Champs fossiles

Les champs magnétiques des étoiles chaudes



Un champ dynamo dans le cœur ?



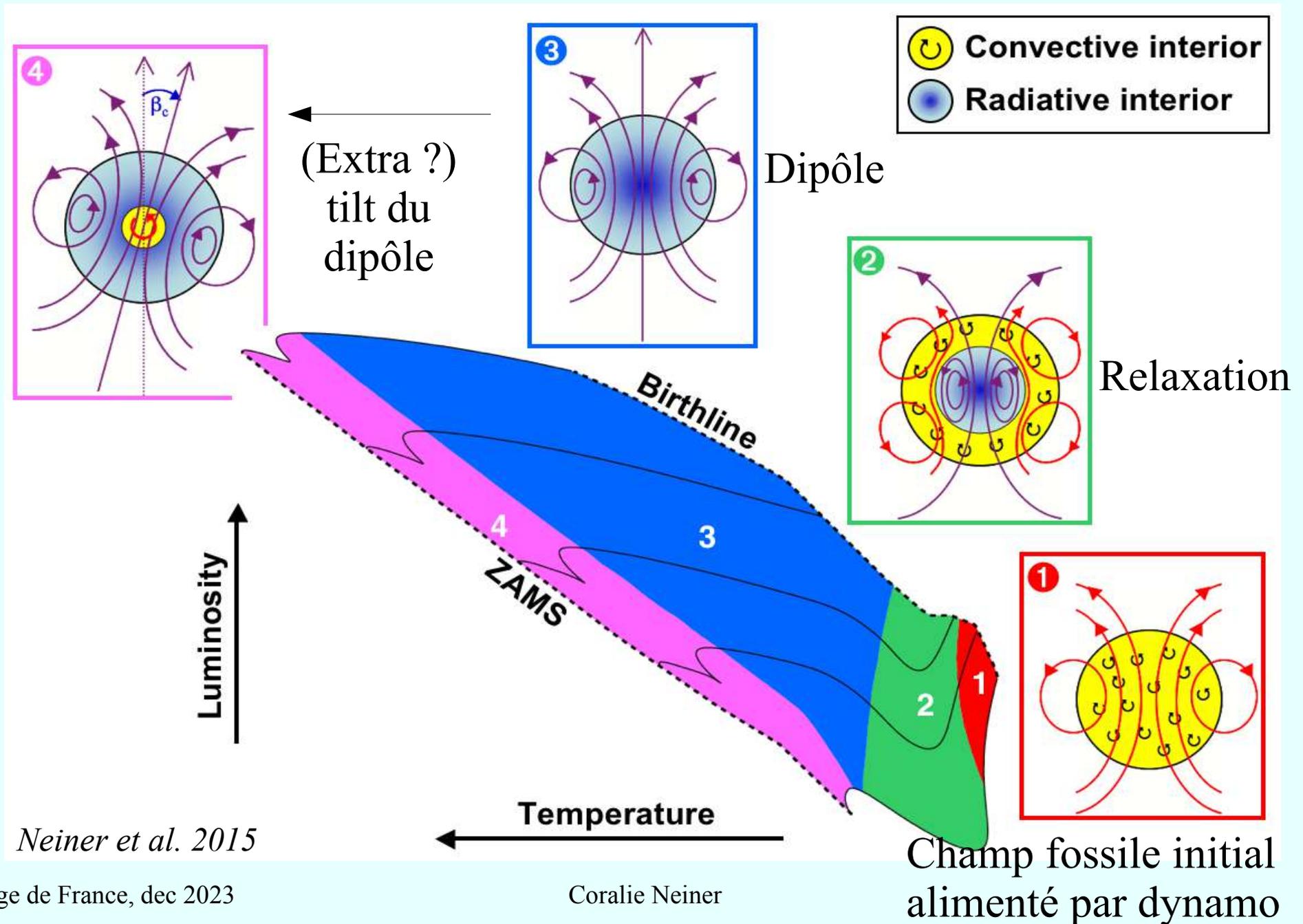
Le cœur des étoiles chaudes est convectif
→ une dynamo peut s'y développer

→ le temps pour que ce champ dynamo devienne visible à la surface est **plus long** que la vie de l'étoile

(Charbonneau & MacGregor, 2001, Brun et al. 2005)

Les champs magnétiques fossiles

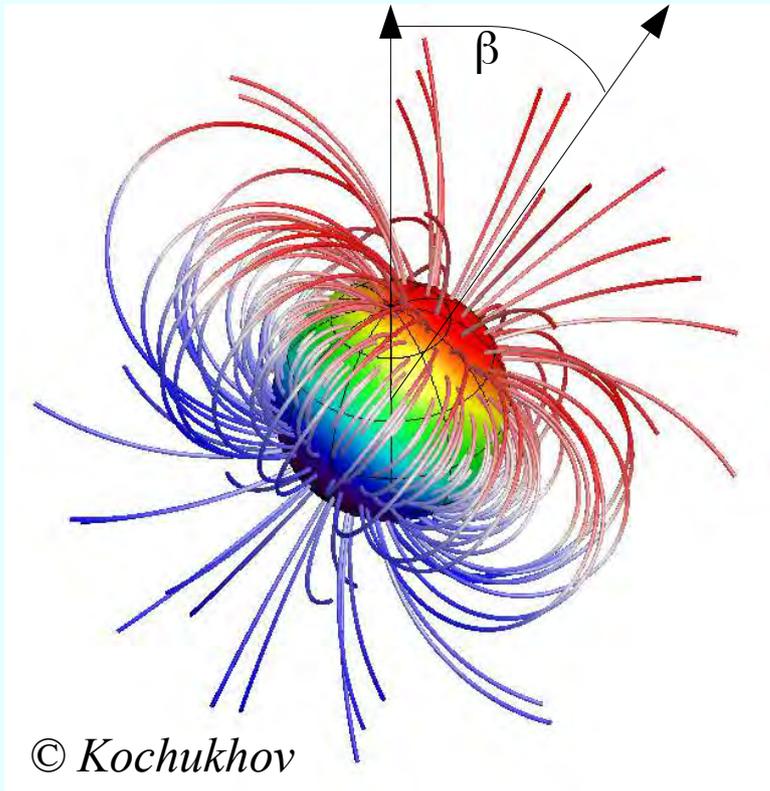
Champ magnétique du nuage moléculaire capturé pendant la formation stellaire



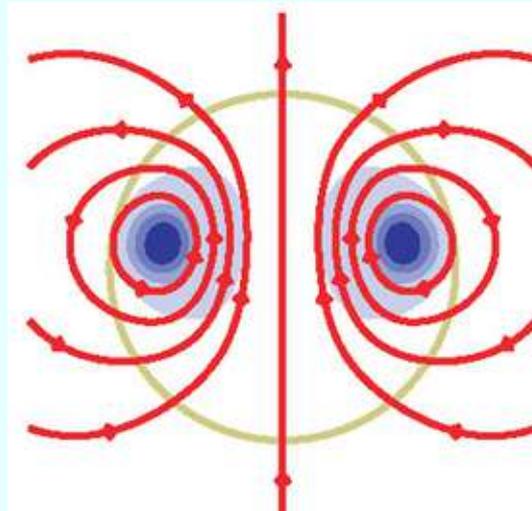
Les champs magnétiques fossiles

- Structure visible simple : **dipôle incliné**
- Champ fort dans l'étoile mais **faible à la surface** (~ 3000 Gauss)
- **Stable** sur des décennies

Dipôle à la surface



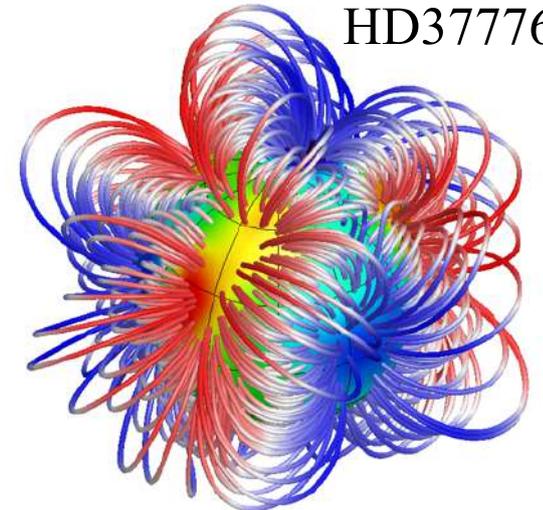
Coupe de l'intérieur



© Mathis

Quelques cas plus complexes...

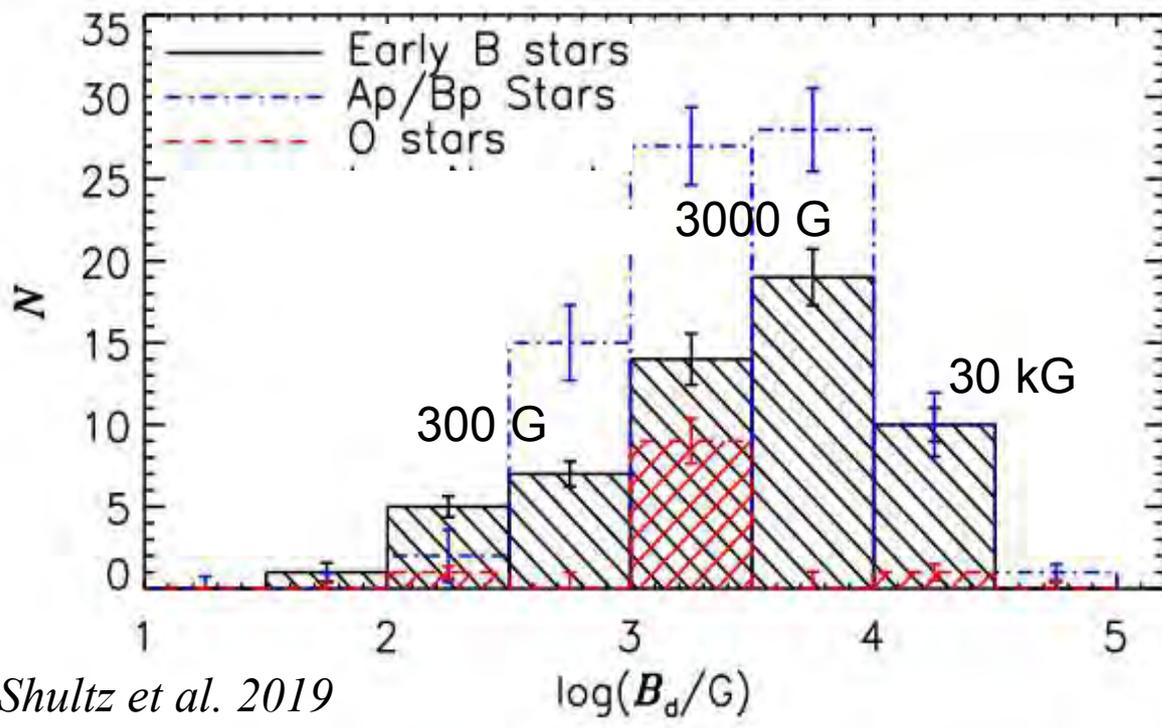
HD37776



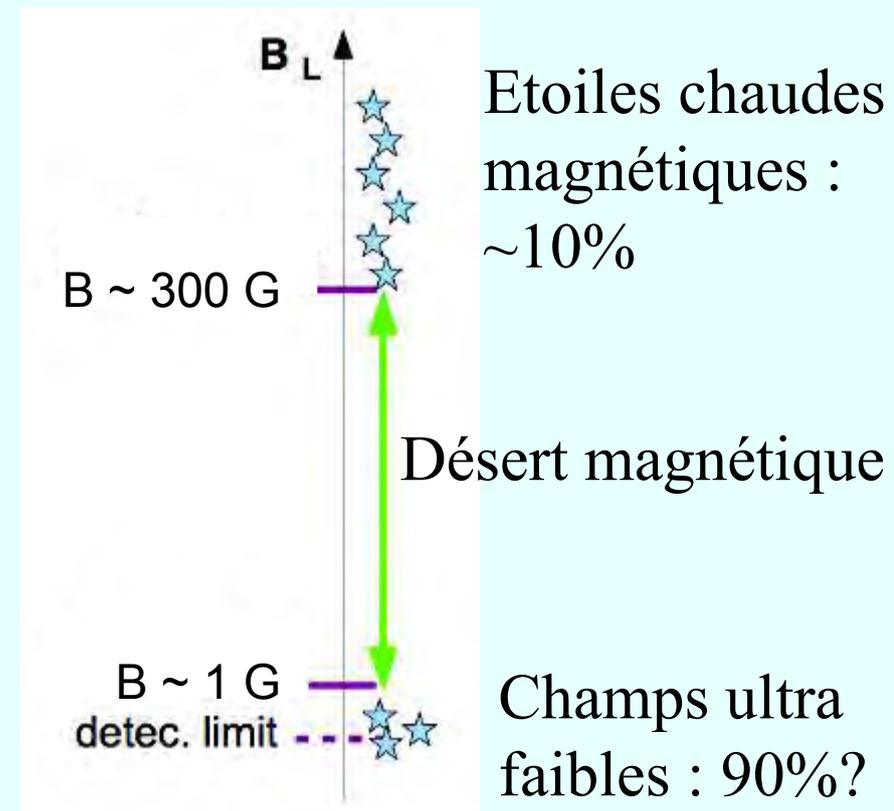
© Kochukhov

Les champs magnétiques fossiles

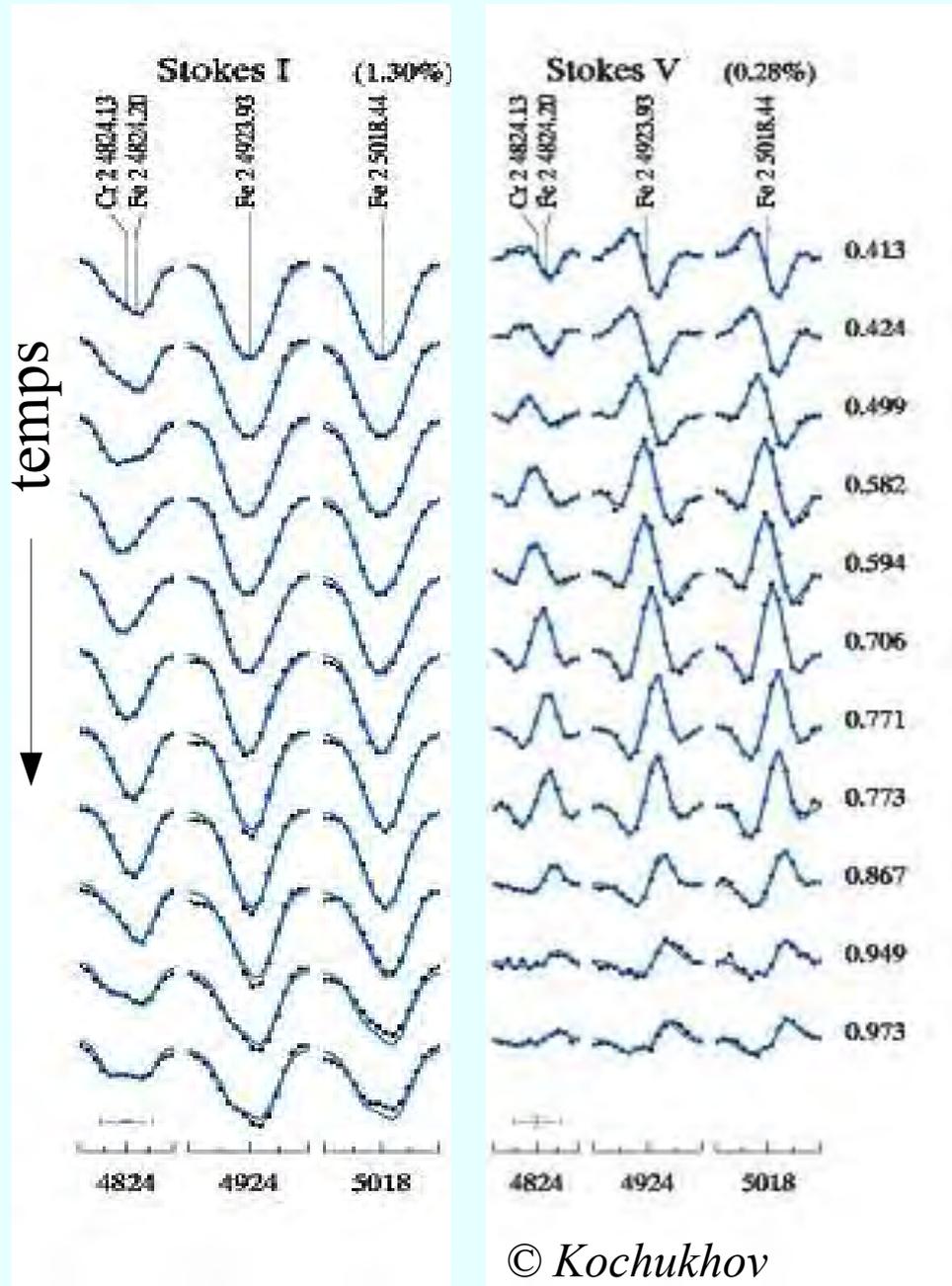
Seulement $\sim 10\%$ des étoiles chaudes (OBA) sont magnétiques.



Pour les quelques étoiles où nous avons cherché des **champs très faibles** (< 1 G), nous les avons trouvés ! (Petit et al. 2010, Blazère et al. 2016)

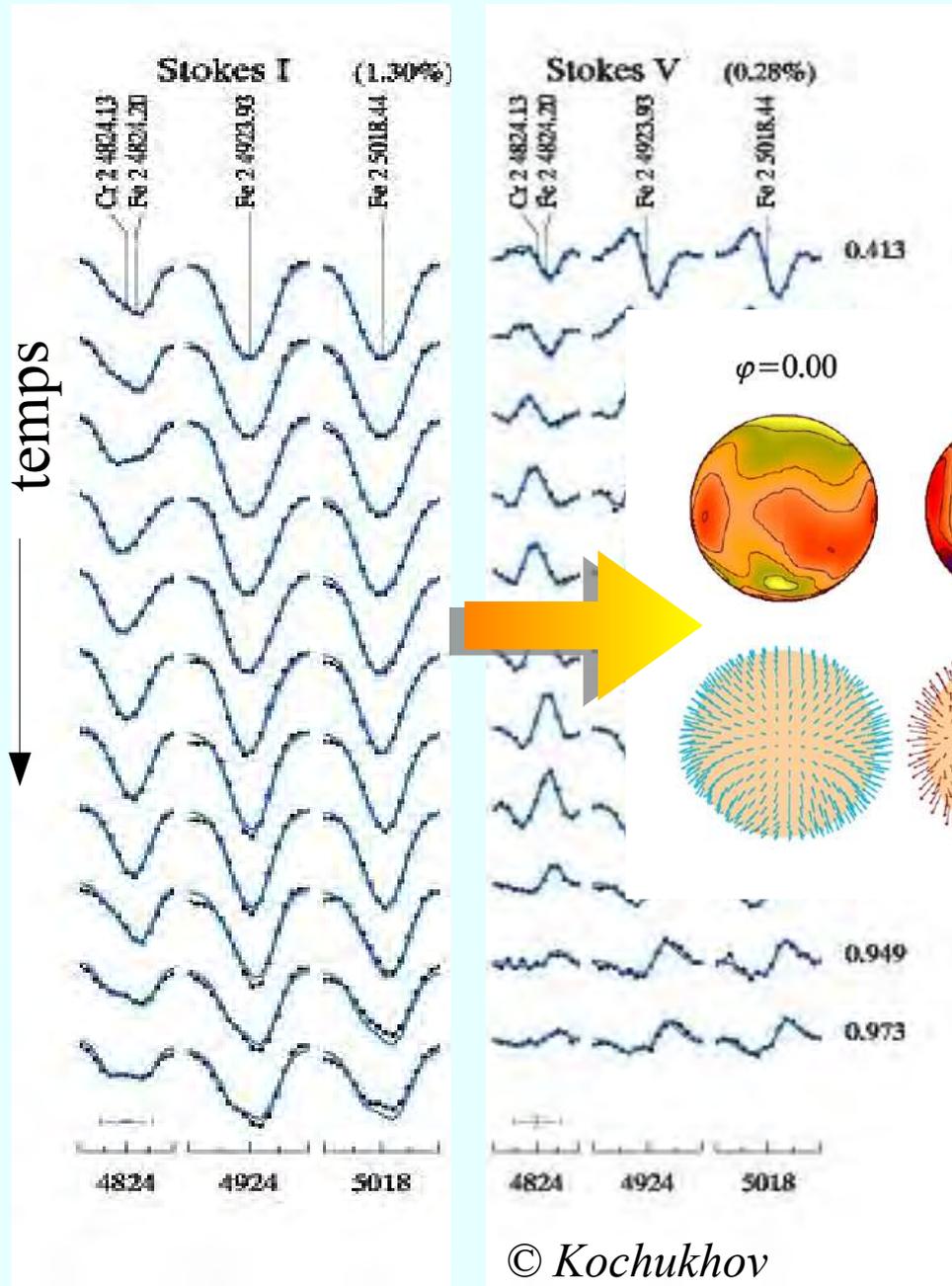


Mesure du champ magnétique

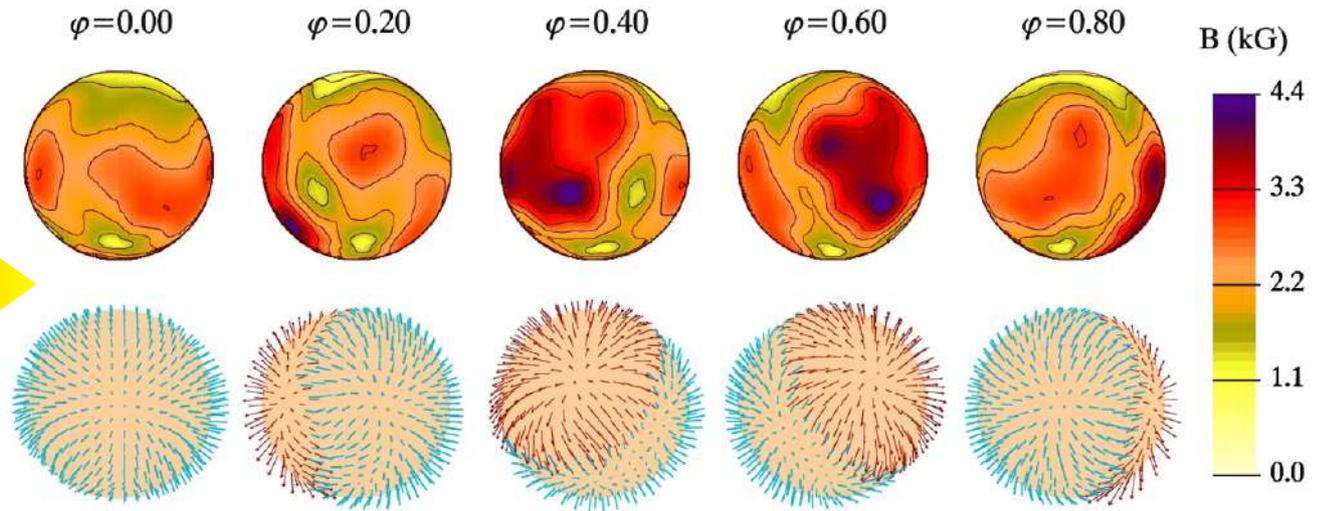


Observations des raies et des profils de Stokes V au fur et à mesure que l'étoile tourne.

Mesure du champ magnétique



Observations des raies et des profils de Stokes V au fur et à mesure que l'étoile tourne.



Reconstruction 3D du champ magnétique à la surface

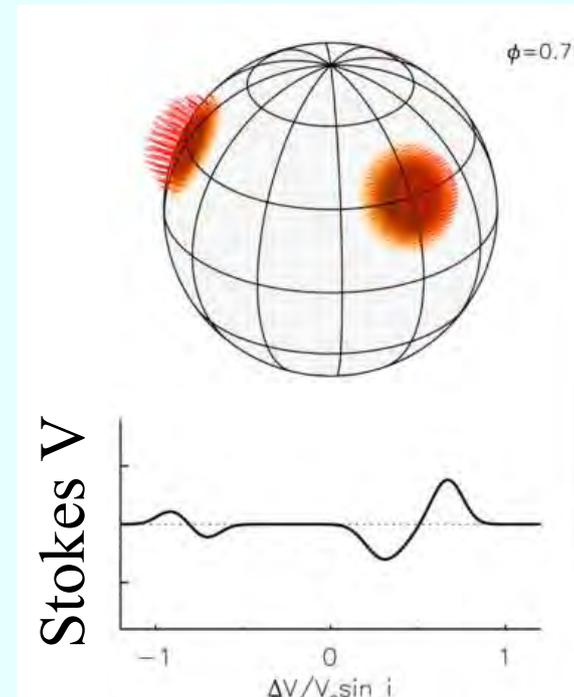
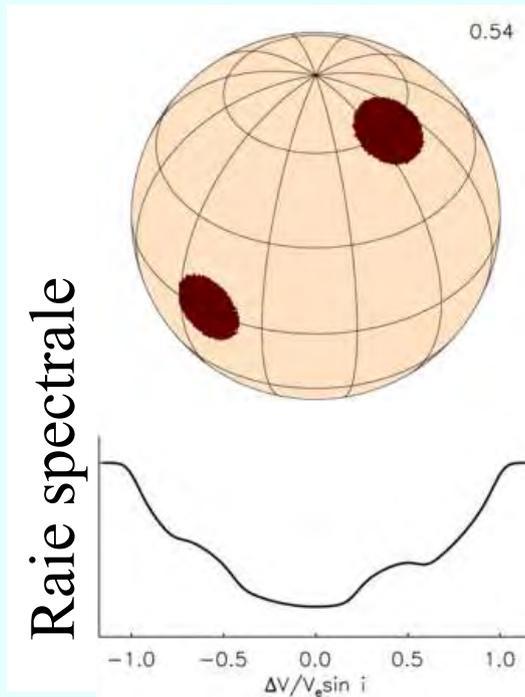
© Kochukhov

Effets du champ magnétique sur l'étoile

Effet du champ magnétique dans l'étoile

Le champ magnétique empêche les éléments chimiques de se mélanger dans l'étoile, car ils sont bloqués dans les lignes du champ magnétique.

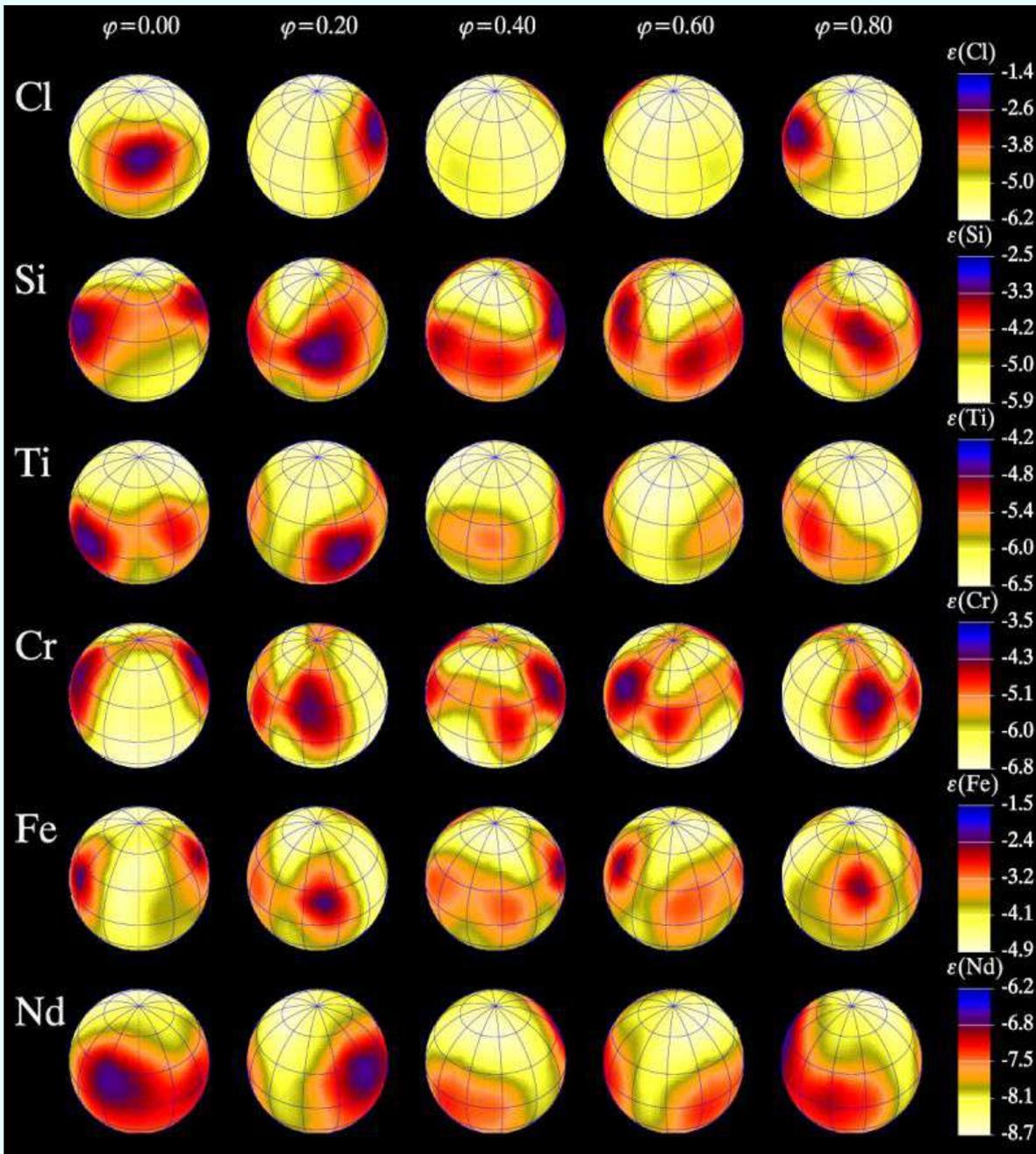
Cela crée des surabondances locales → des **taches** visibles à la surface, détectables dans les raies du spectre et dans les profils de Stokes V.



© Kochukhov

→ Les **étoiles Ap et Bp** sont des étoiles magnétiques avec des **abondances particulières et des taches bien visibles** car leur champ magnétique est assez fort (10000 Gauss).

Reconstruction des cartes de surface

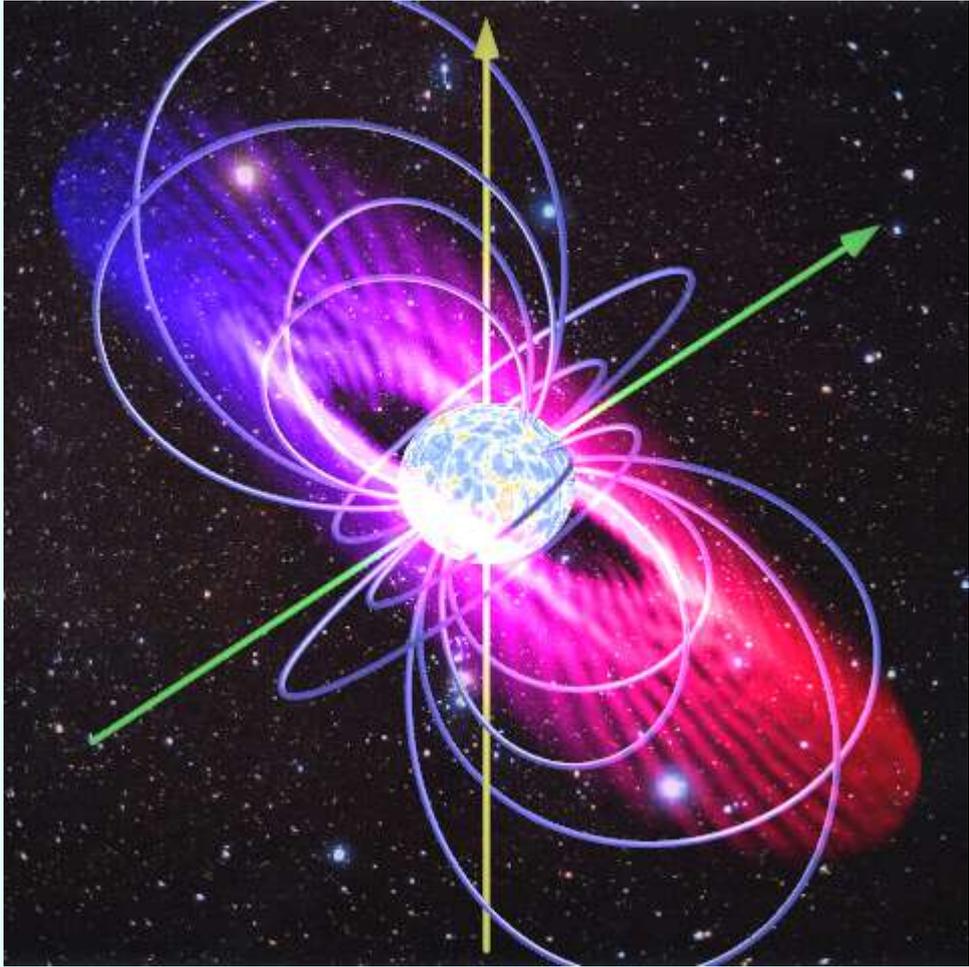


Reconstruction de la carte
pour chaque élément
chimique

→ seulement à partir de la
lumière de l'étoile !

© Kochukhov

Effet du champ magnétique autour de l'étoile : la magnétosphère



Les **particules du vent stellaire** s'échappent par les pôles magnétiques et suivent les lignes du champ magnétique.

Cette matière autour de l'étoile forme la **magnétosphère**.

© *Townsend*

Magnétosphères dynamique ou centrifuge

1. La matière reste piégée dans les lignes de champ magnétique **seulement si le champ est assez fort par rapport au vent** :

$$\eta_* = B^2 R^2 / \dot{M} V_\infty$$

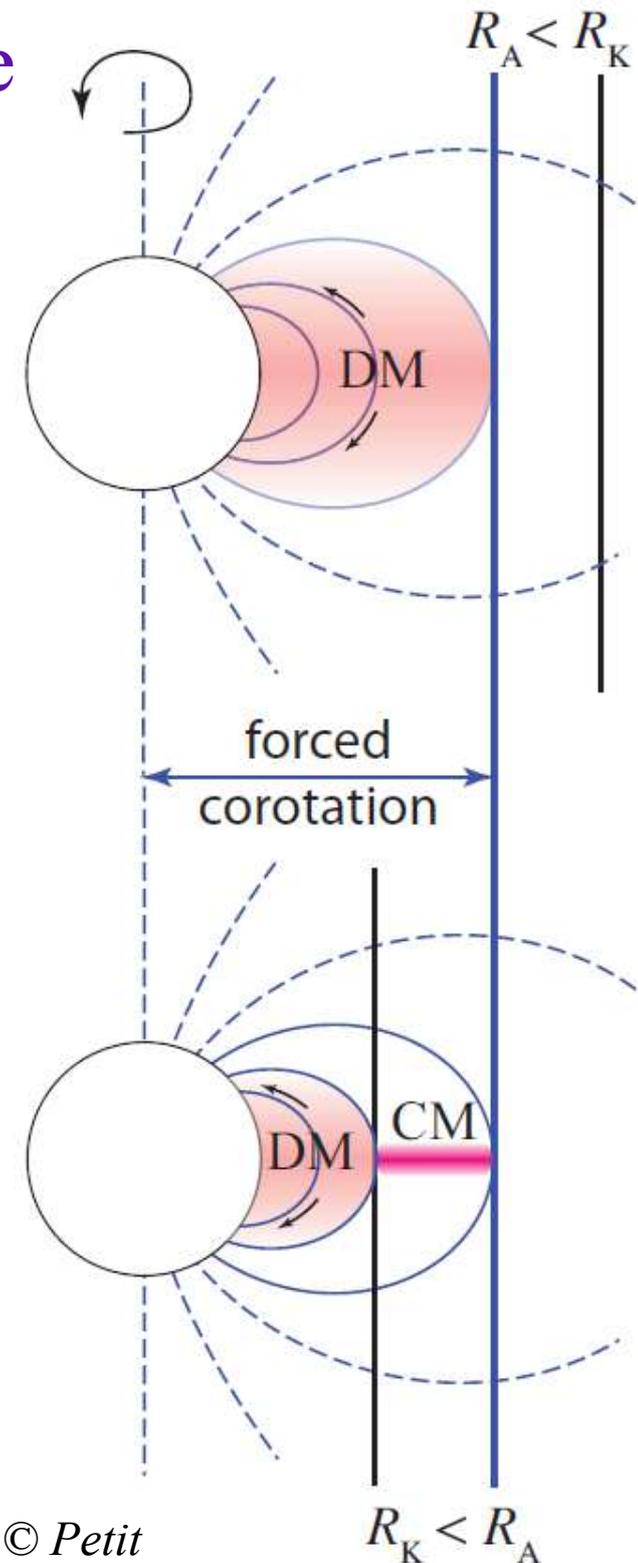
$r < R_A$ et $\eta_* > 1 \rightarrow$ confinement magnétique

2. Si la force centrifuge due à la rotation est faible, la matière retombe le long des lignes de champ \rightarrow magnétosphère dynamique : $r < R_K$

Si la force centrifuge est grande, la matière reste bloquée \rightarrow magnétosphère centrifuge : $r > R_K$

R_K = rayon de co-rotation Keplerien ($g =$ centrifuge),

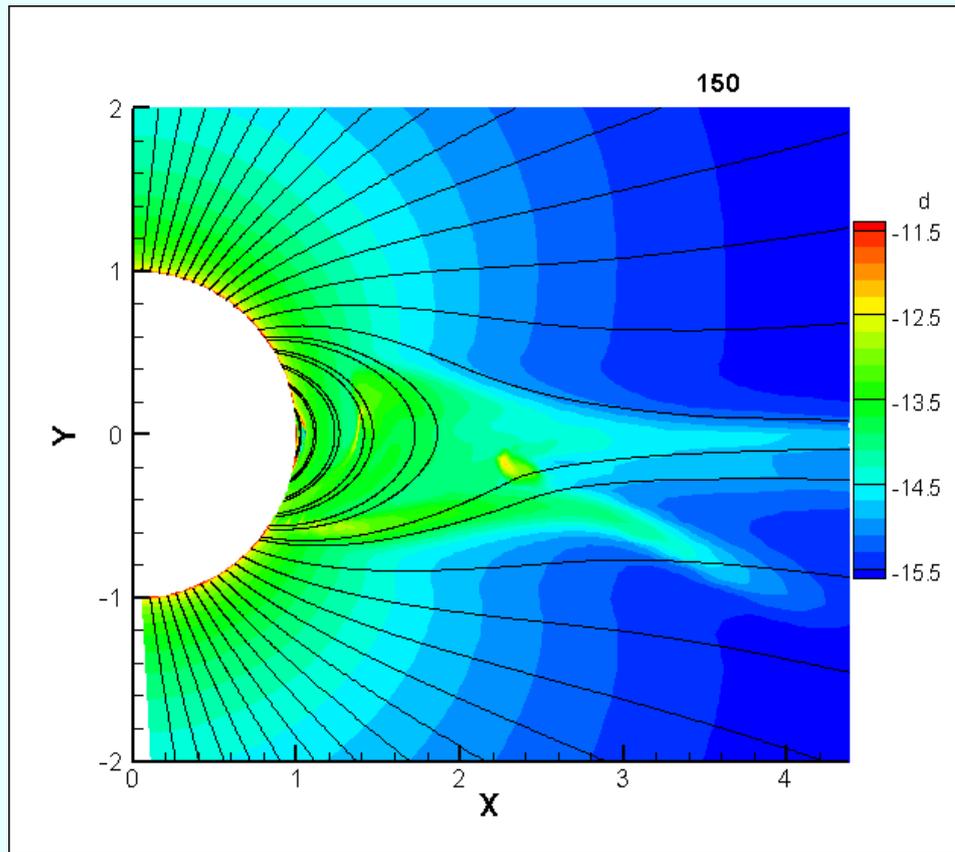
R_A = rayon d'Alfven



Simulations MHD de magnétosphères

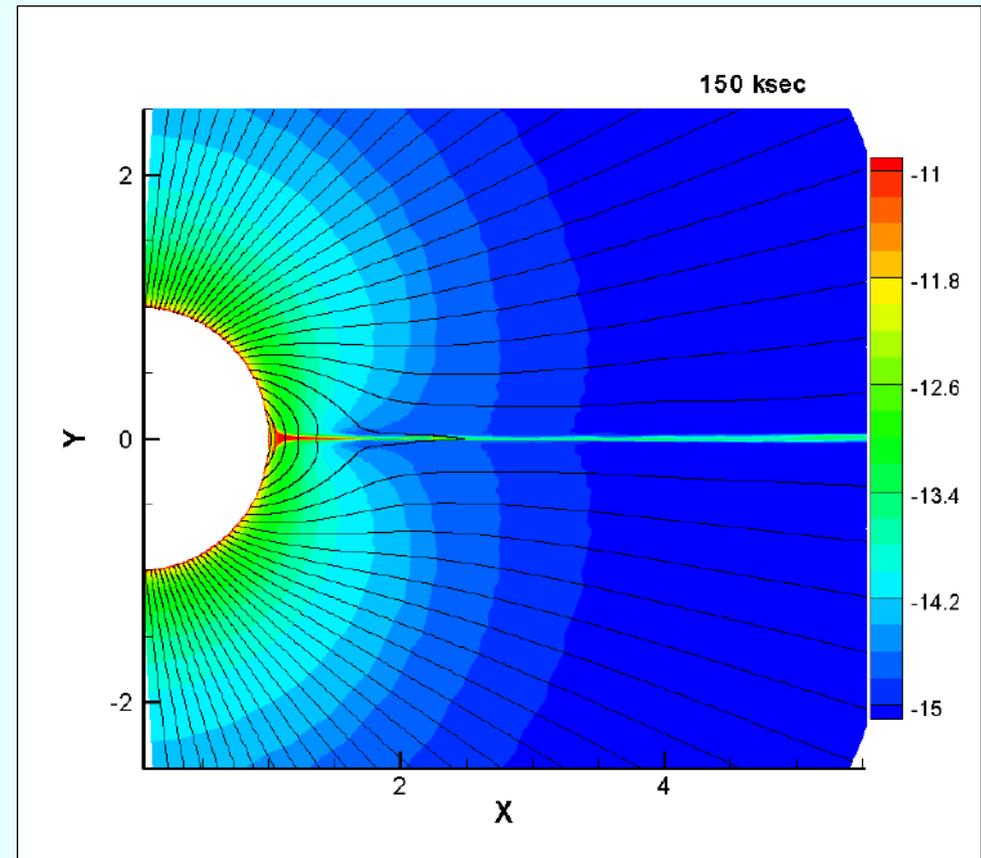
Magnétosphère *dynamique*

θ^1 Ori C



Magnétosphère *centrifuge*

ζ Pup

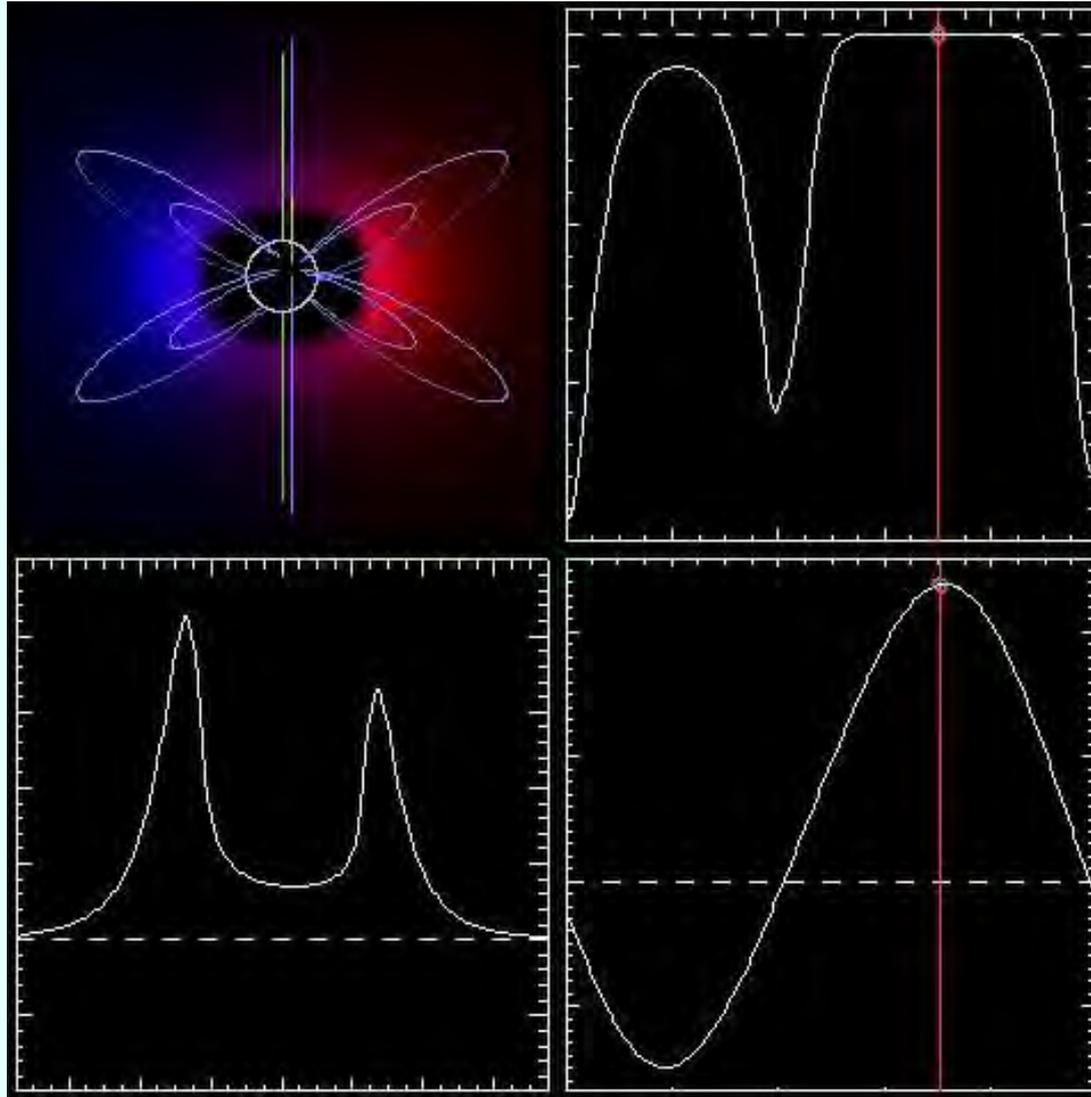


→ également possible en **3D** (*Ud Doula et al., 2023*)

© *Ud Doula*

Modulation rotationnelle

Magnétosphère

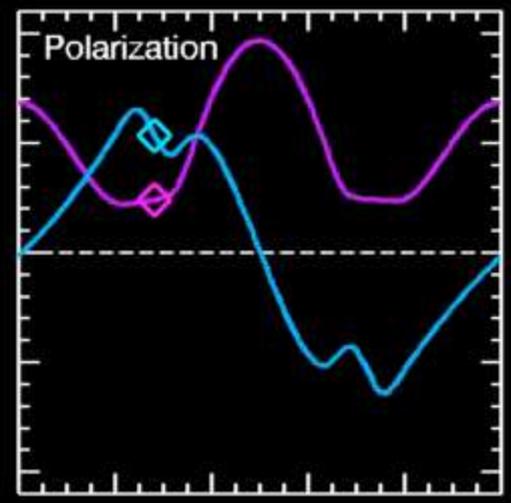
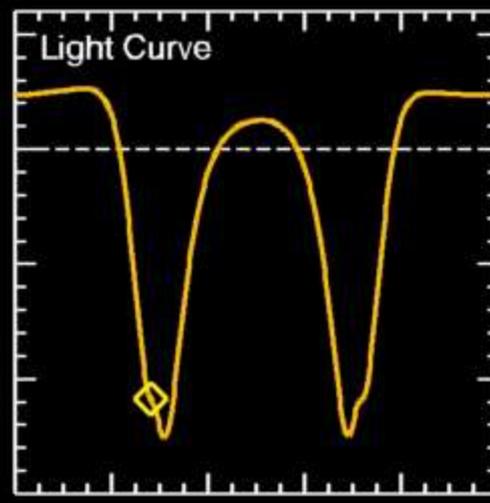
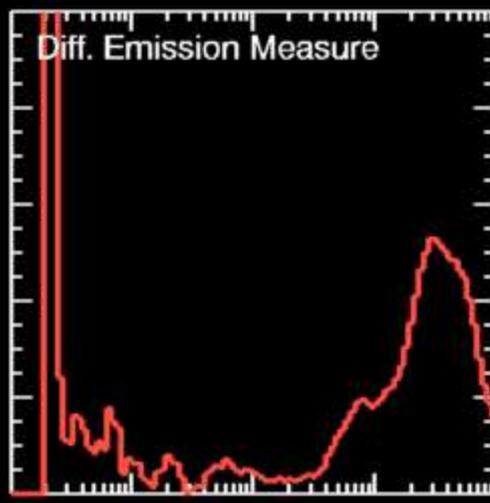
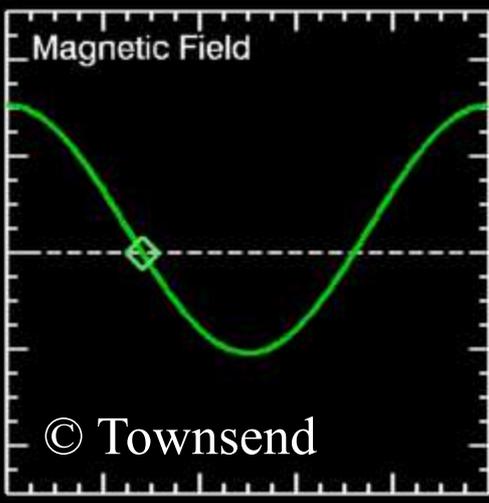
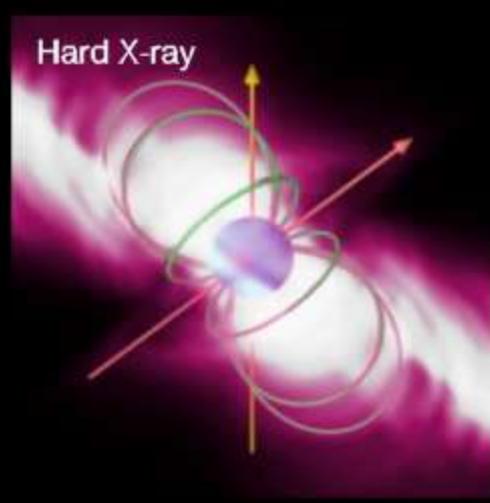
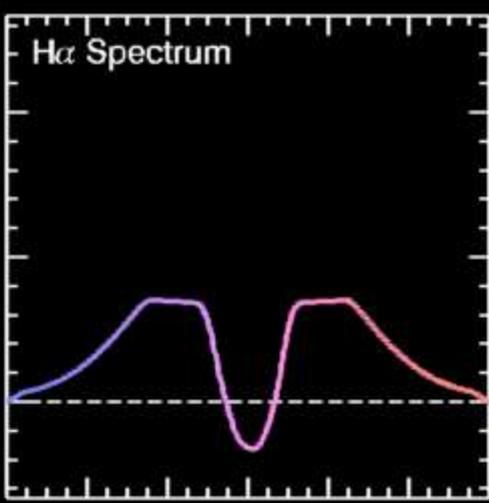
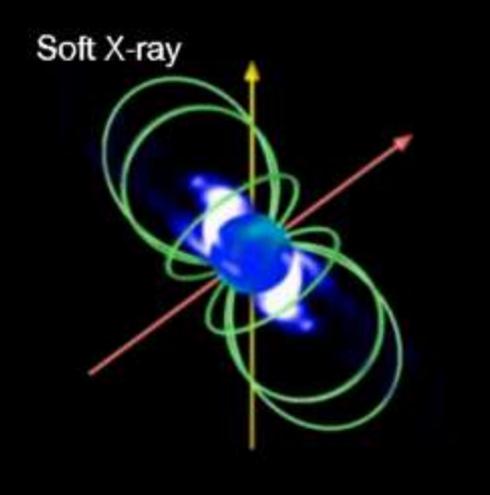
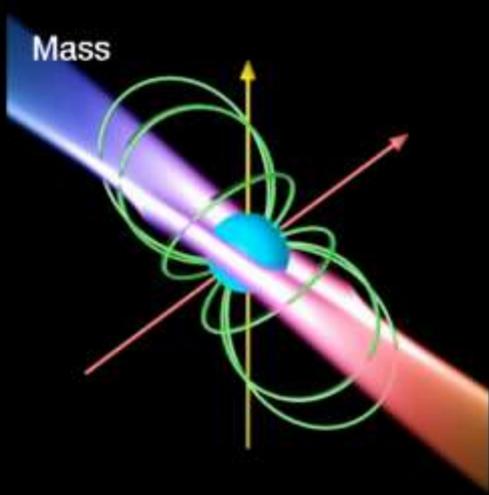


Courbe de lumière

Emission de l'hydrogène H α

Champ magnétique longitudinal

© *Townsend*

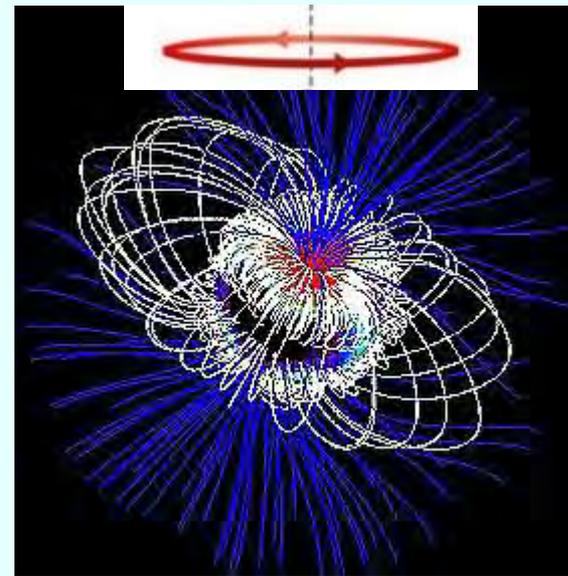
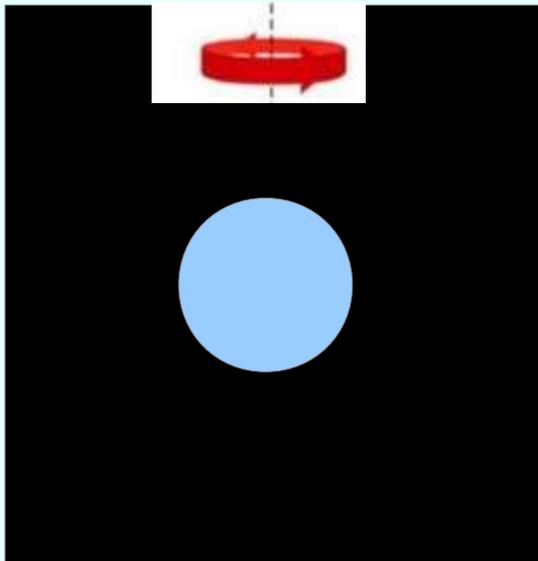


Freinage magnétique de l'étoile

Rotation rapide



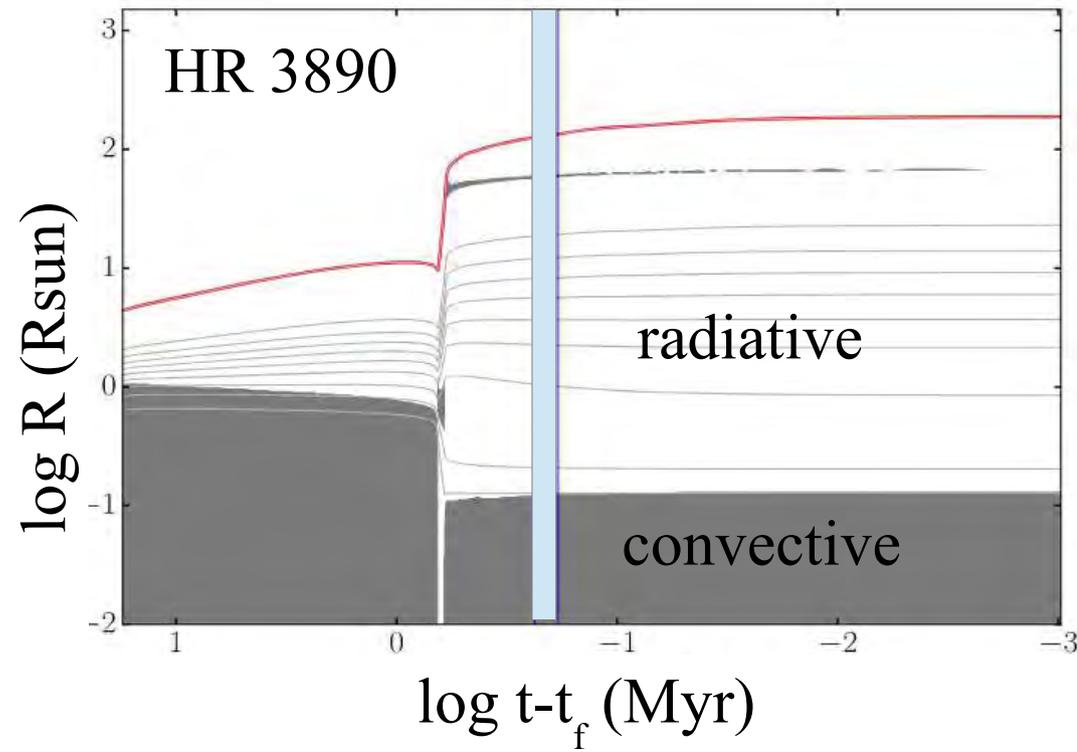
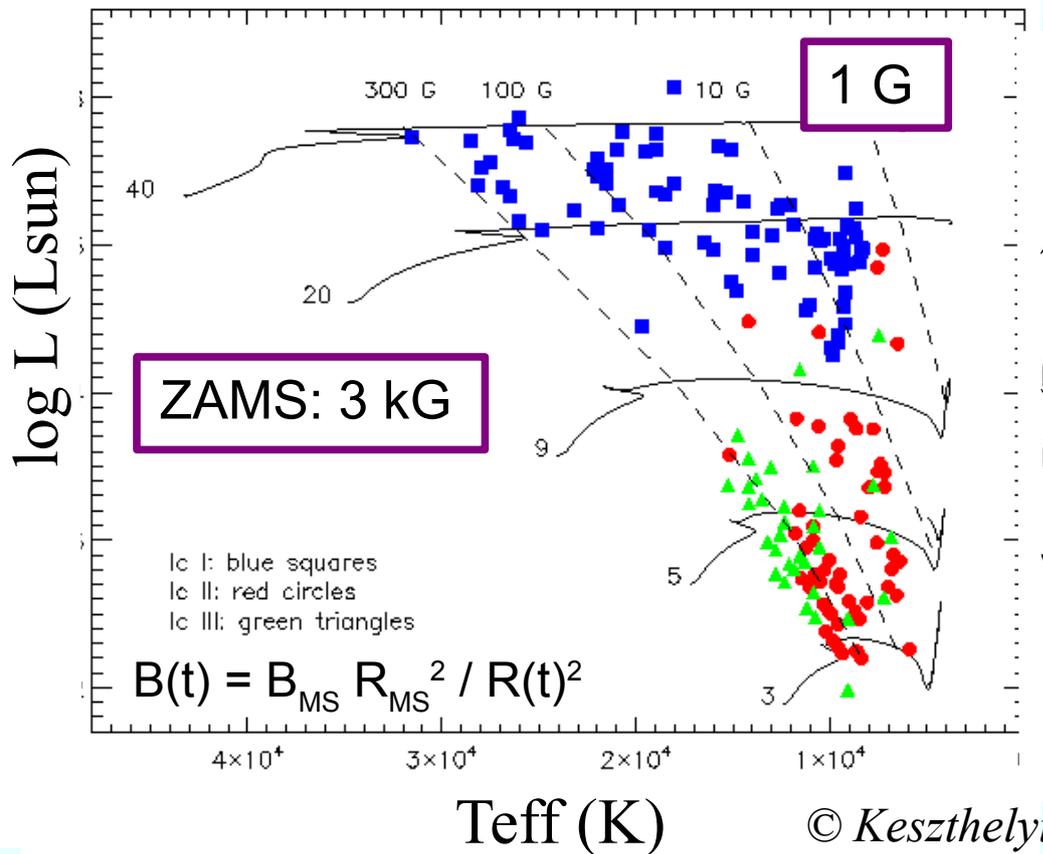
Rotation lente



→ la
magnétosphère
freine la rotation
de l'étoile
→ les étoiles
Bp/Ap tournent
doucement

Impact sur l'évolution stellaire

- Le champ magnétique impacte la rotation, le mouvement des fluides, le transport des éléments chimiques,... → il impacte l'évolution de l'étoile
- Le champ fossile lui-même évolue peu : conservation du flux magnétique, mais des champs dynamos apparaissent dans les zones convectives de l'enveloppe et interagissent avec le champ fossile



Neiner et al. 2017

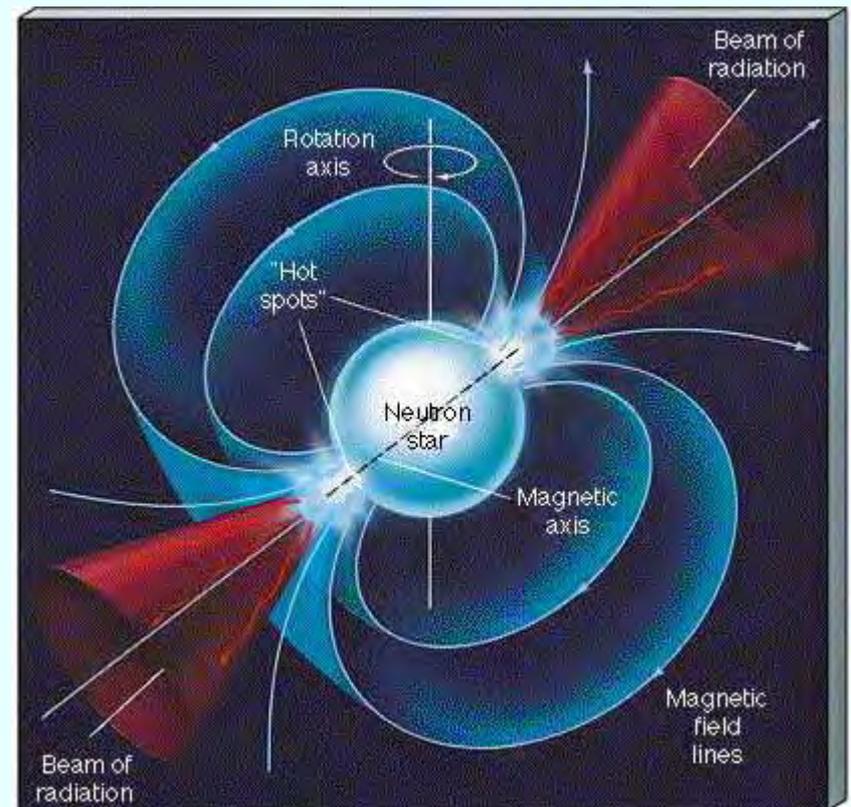
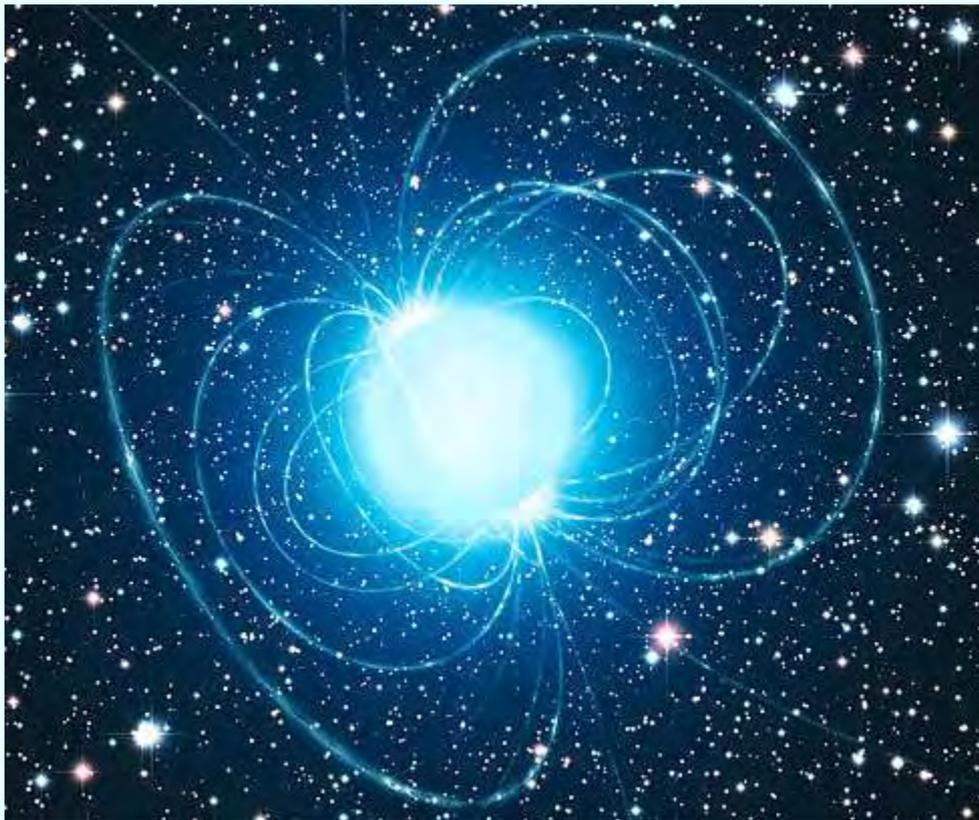
La fin de vie des étoiles chaudes

- Le champ magnétique contribue au budget énergétique de la supernova, mais le lien entre le champ de la séquence principale et celui de la fin de vie n'est pas encore compris.

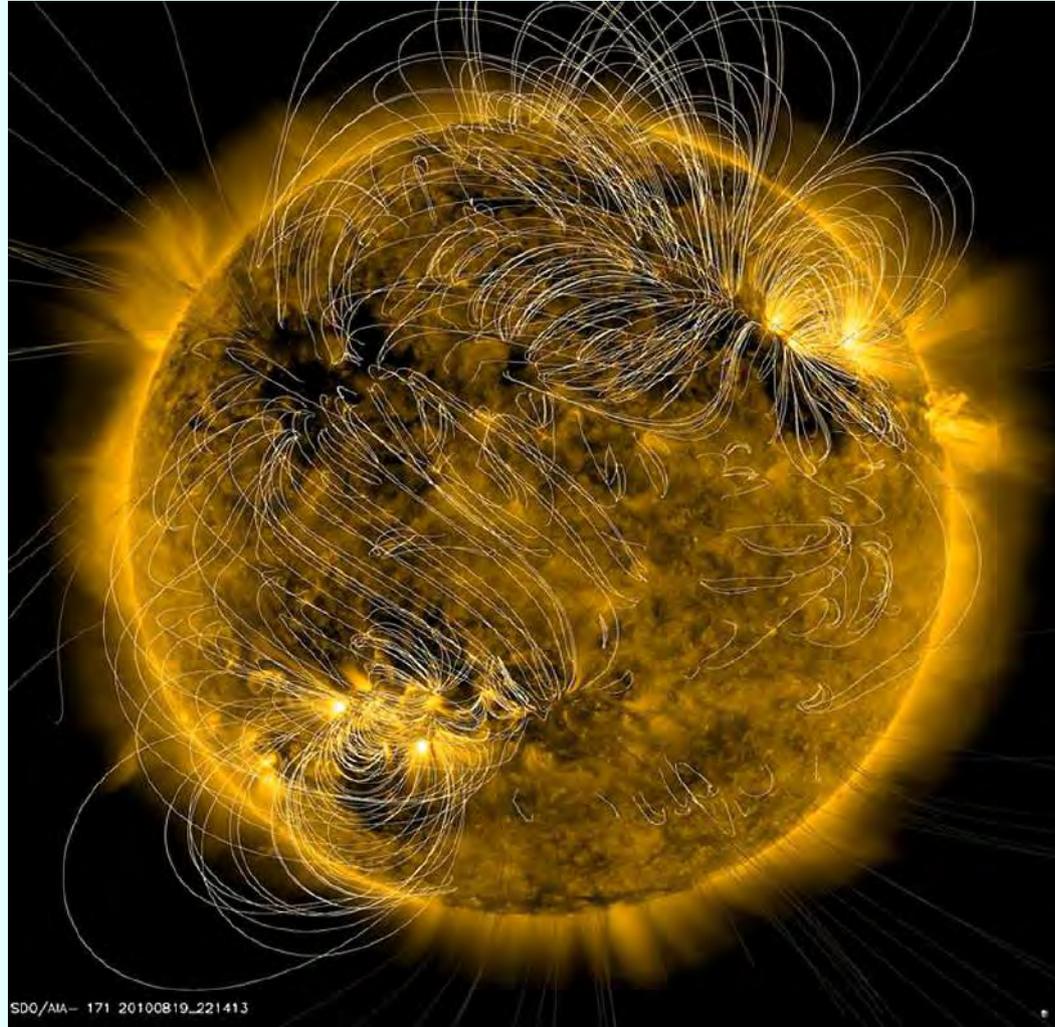
- Toutes les étoiles à neutron sont très magnétiques.

Pulsars : tournent très vite, sont des « phares ». Leur champ magnétique est entre 10 et 1000 millions de Gauss.

Magnétars : champs ultra forts → jusqu'à 100000 milliards de Gauss



Les champs magnétiques des étoiles froides

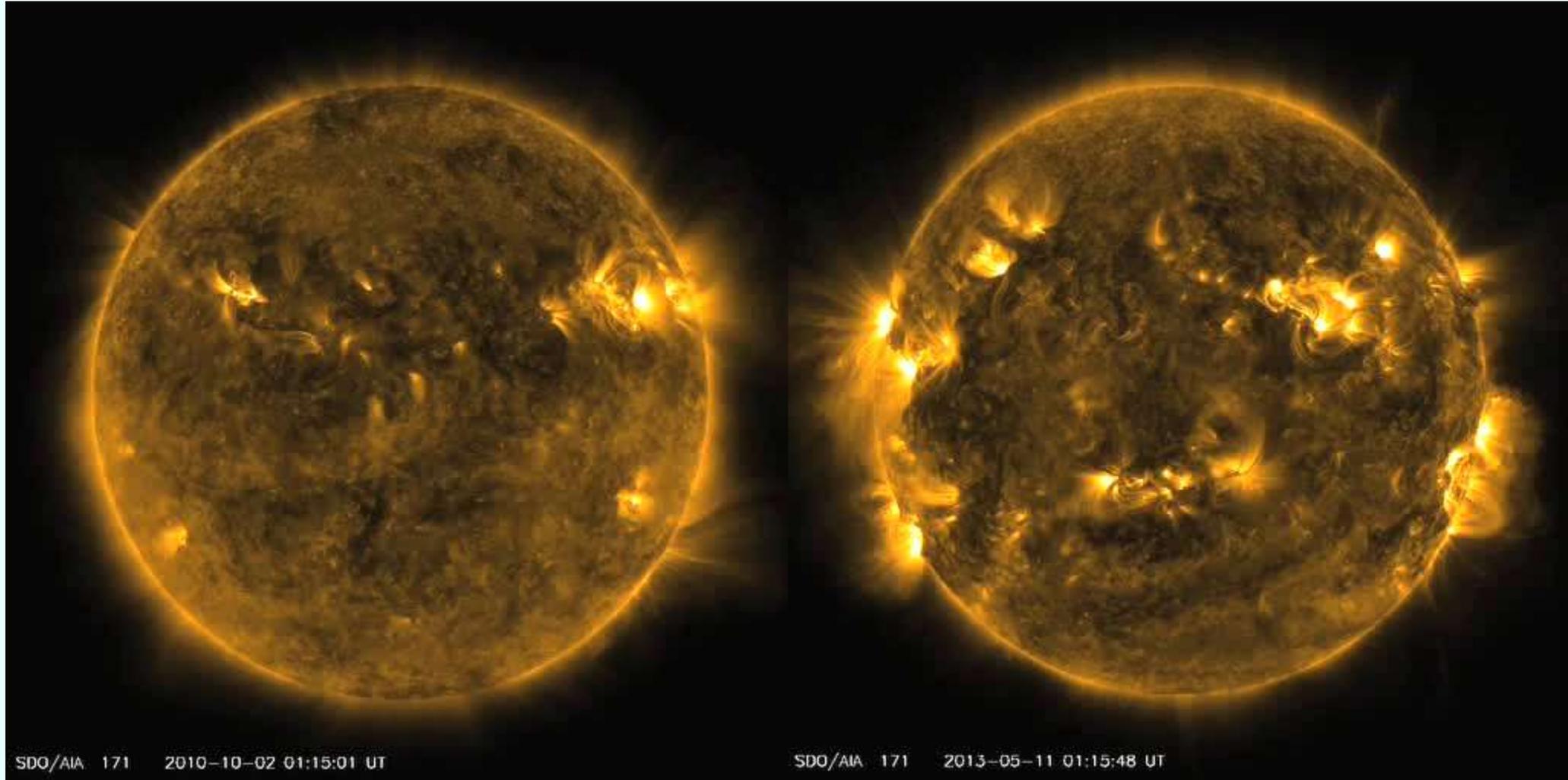


© *SDO*

Le champ magnétique du Soleil

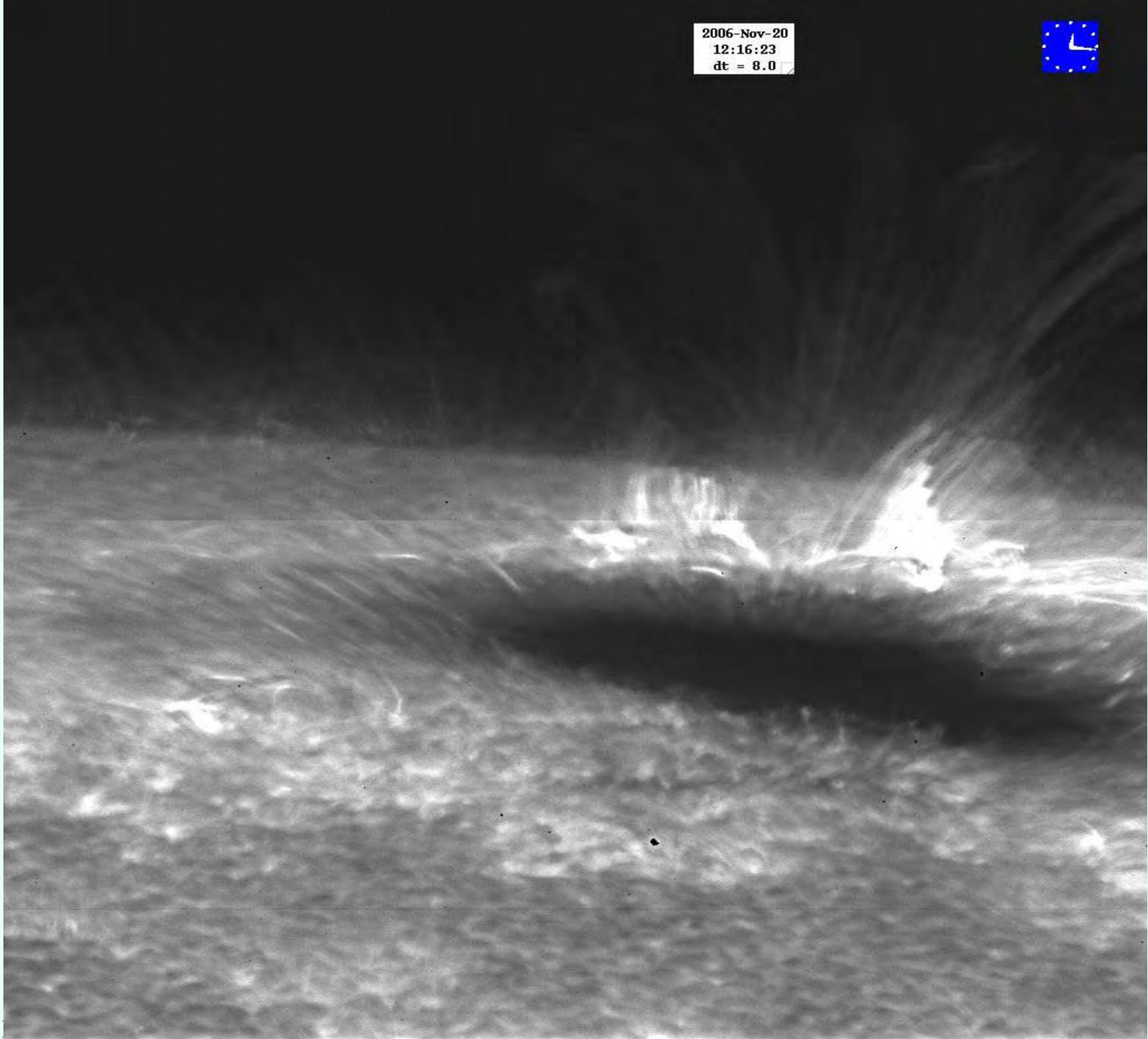
Activité faible

Activité forte

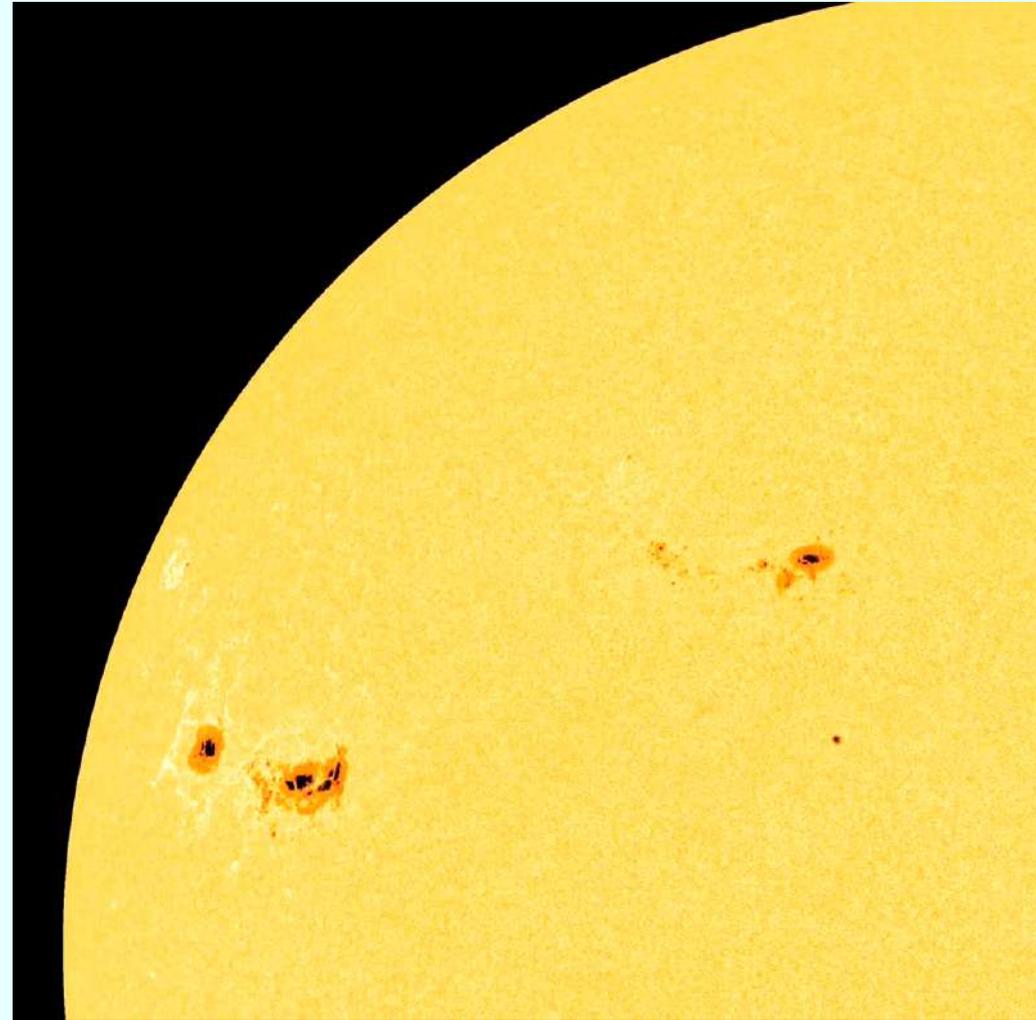
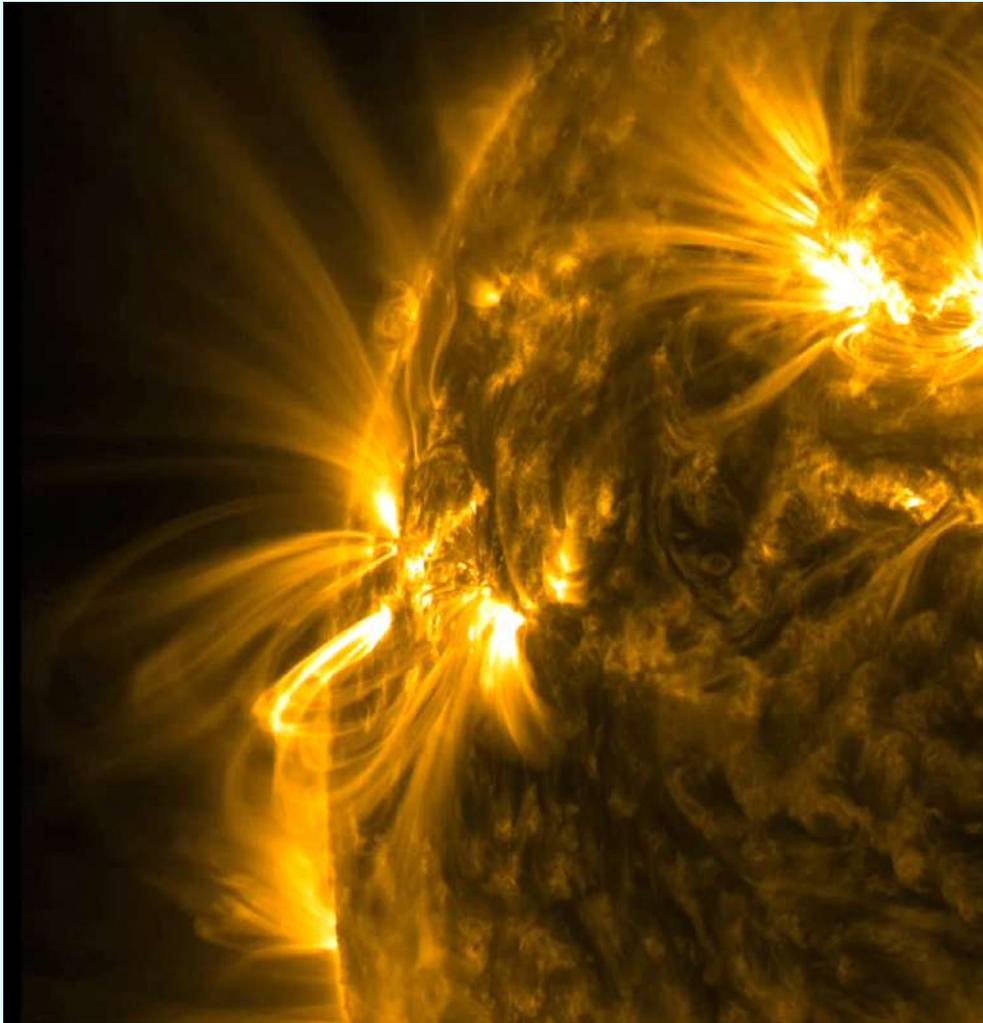


© SDO

2006-Nov-20
12:16:23
dt = 8.0

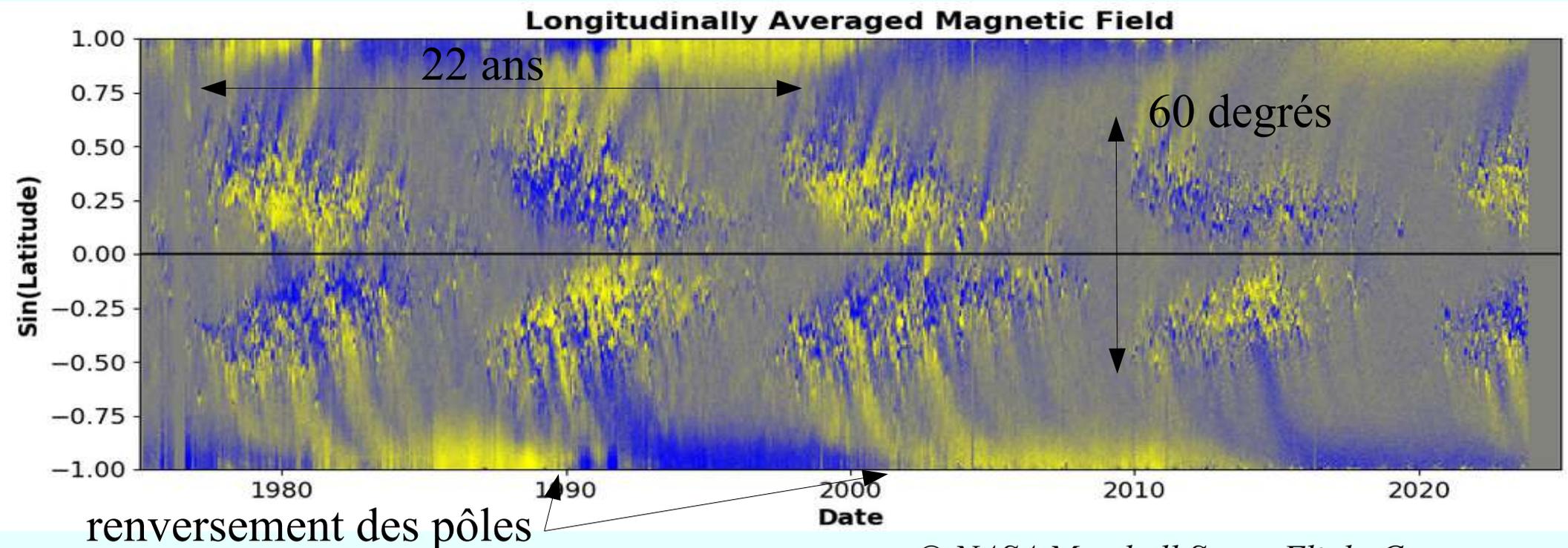
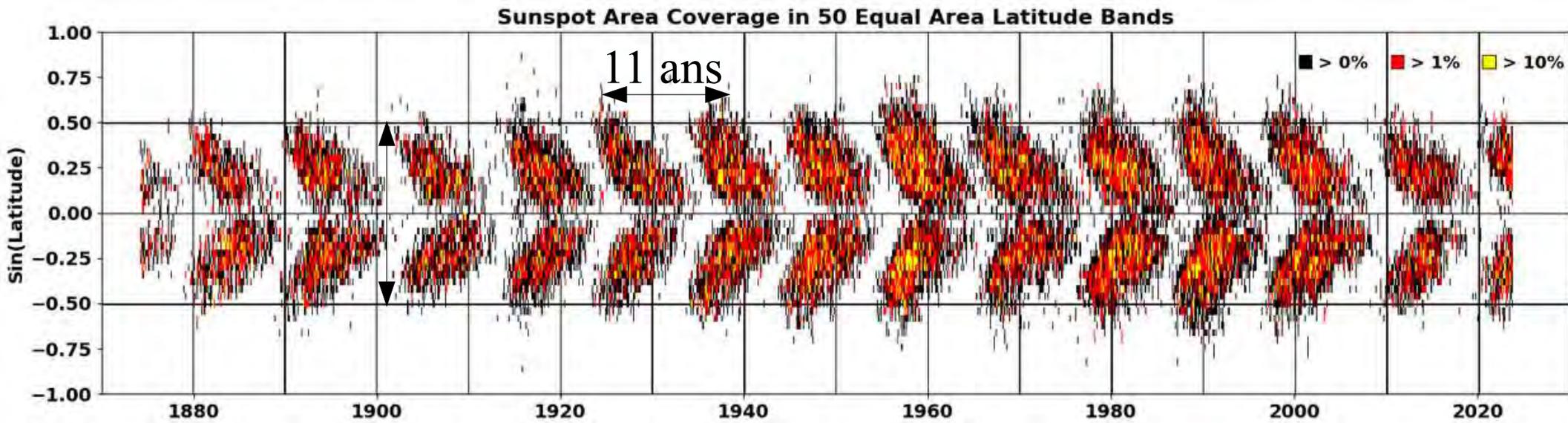


Les protubérances magnétiques



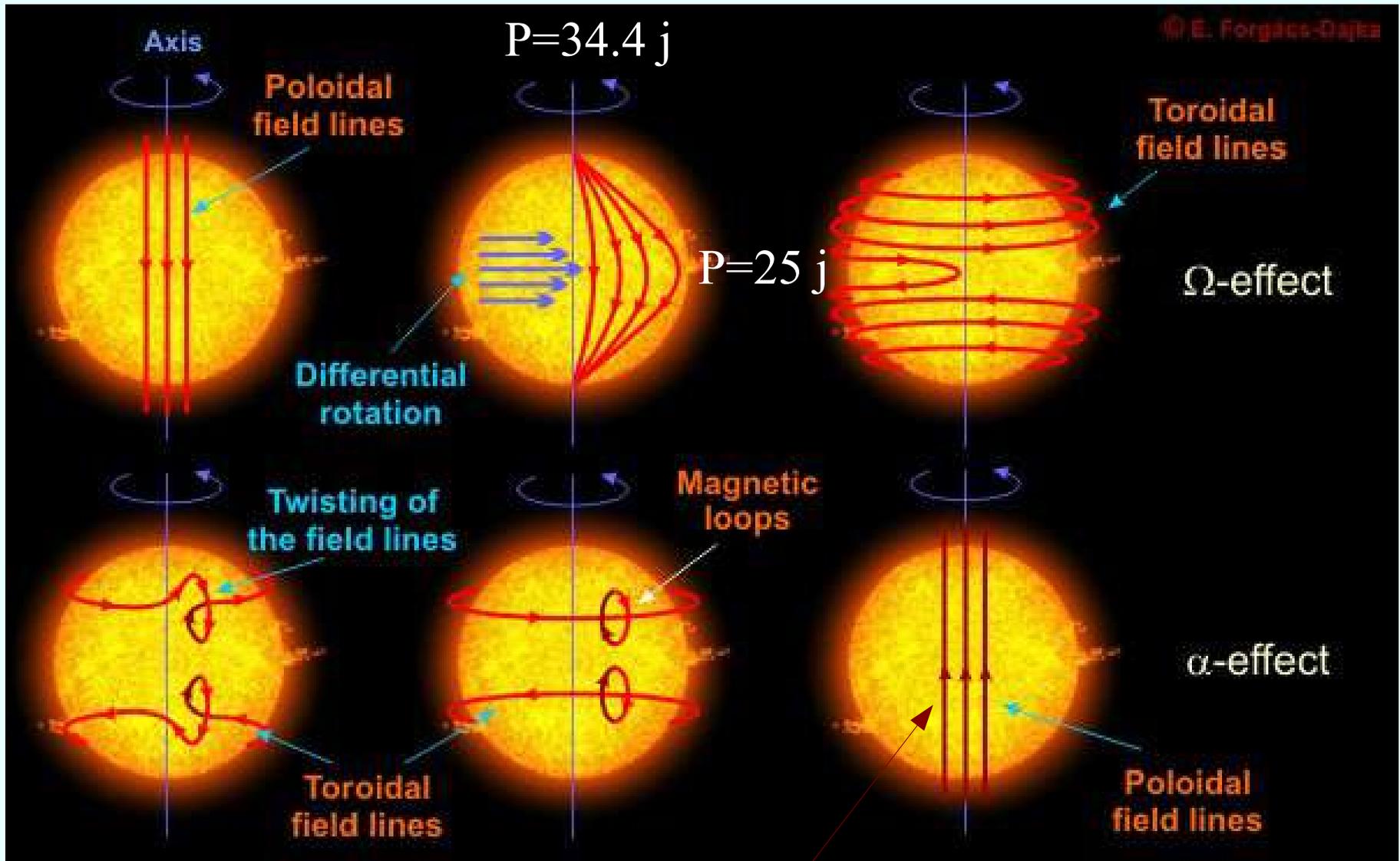
© SDO

Diagramme « papillon »



Le champ magnétique dynamo

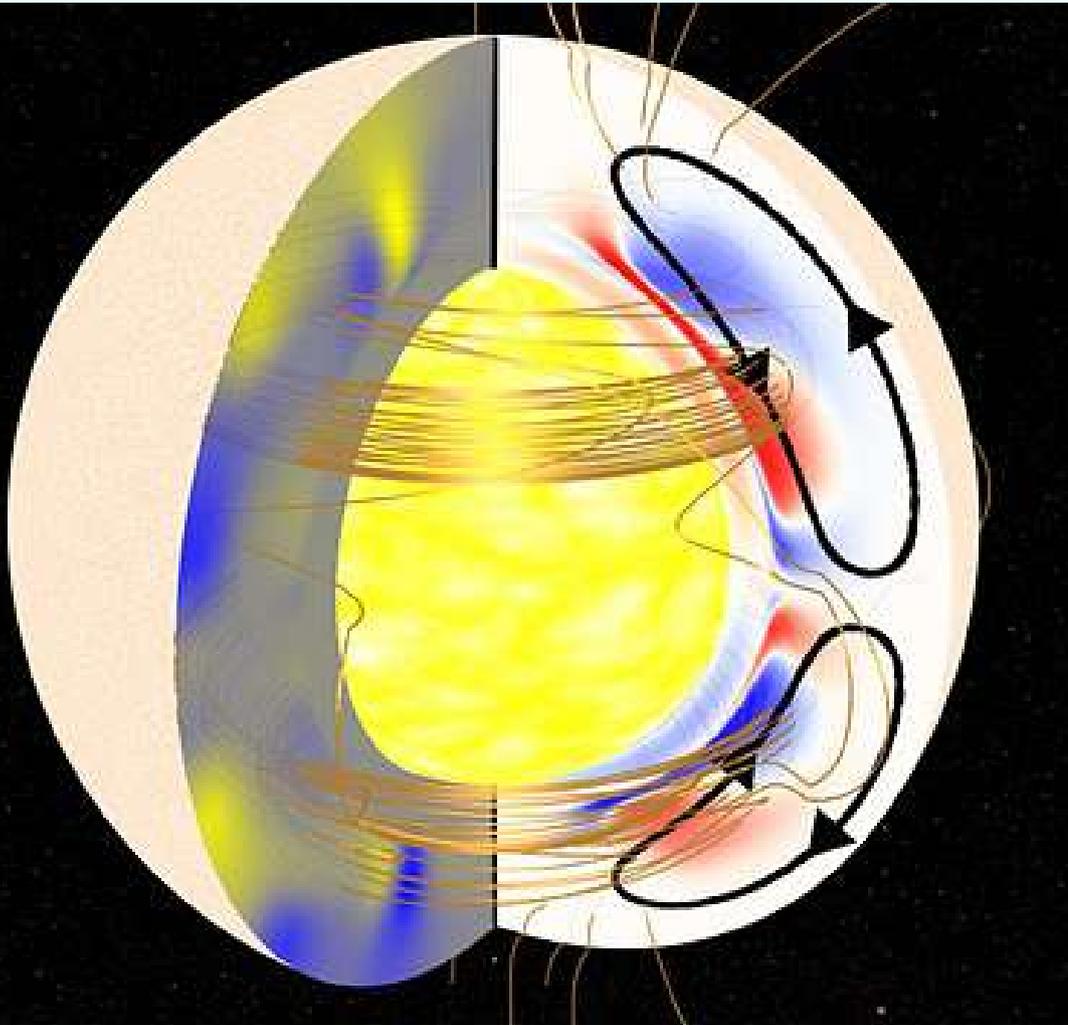
L'équateur tourne plus vite que les pôles → les lignes de champ magnétique s'enroulent autour de l'étoile, puis se reconnectent



champ inversé

© SOLSTART

Le champ magnétique dynamo



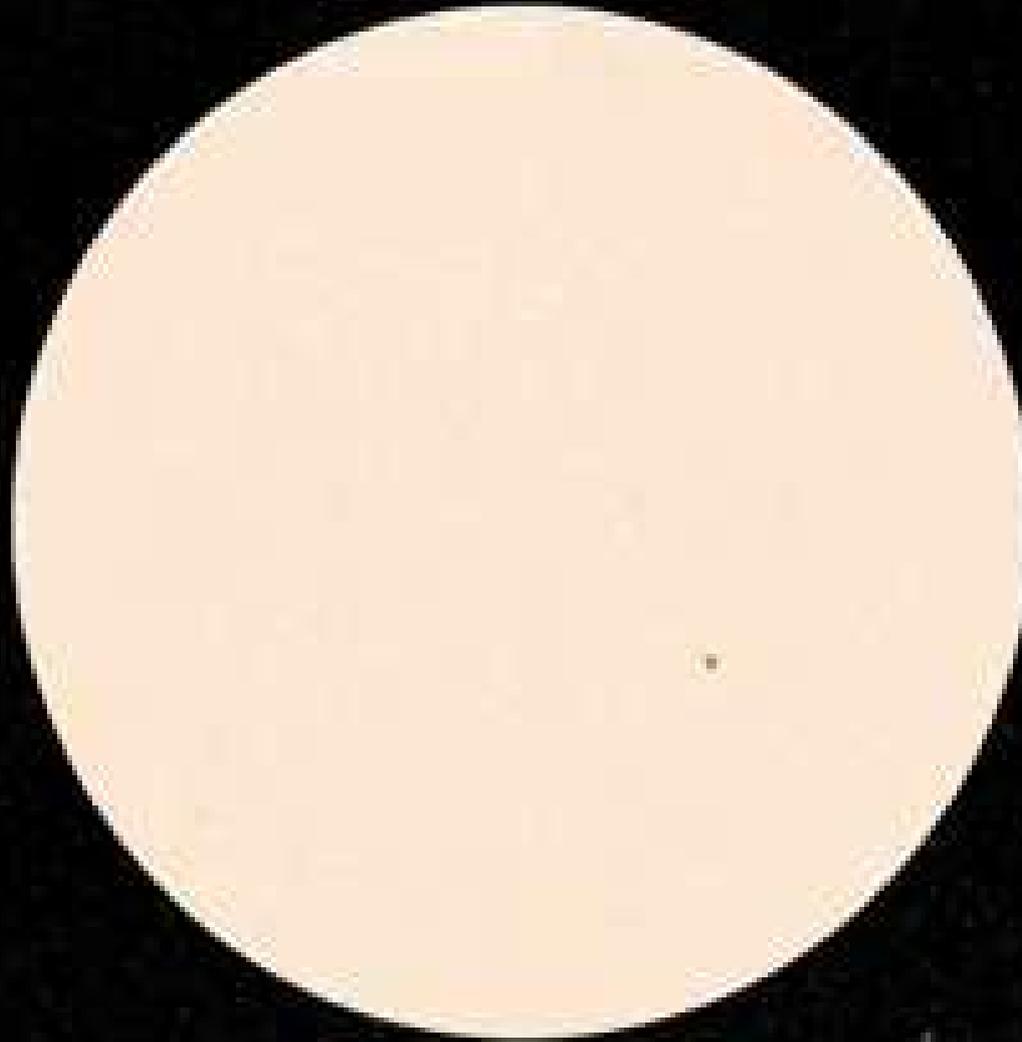
La dynamo se produit en bas de la zone convective.

→ La convection permet aux boucles de champ magnétique de remonter à la surface.

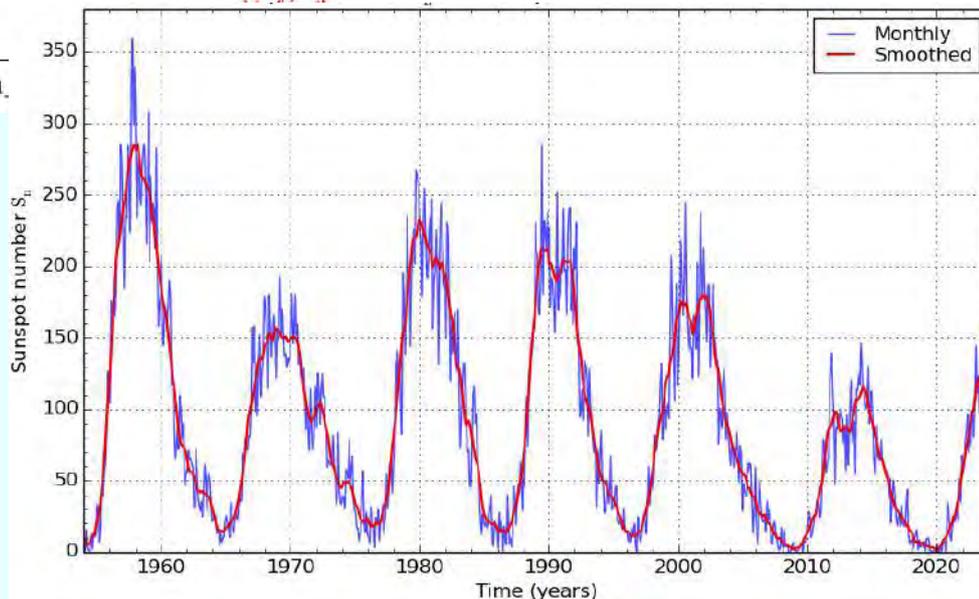
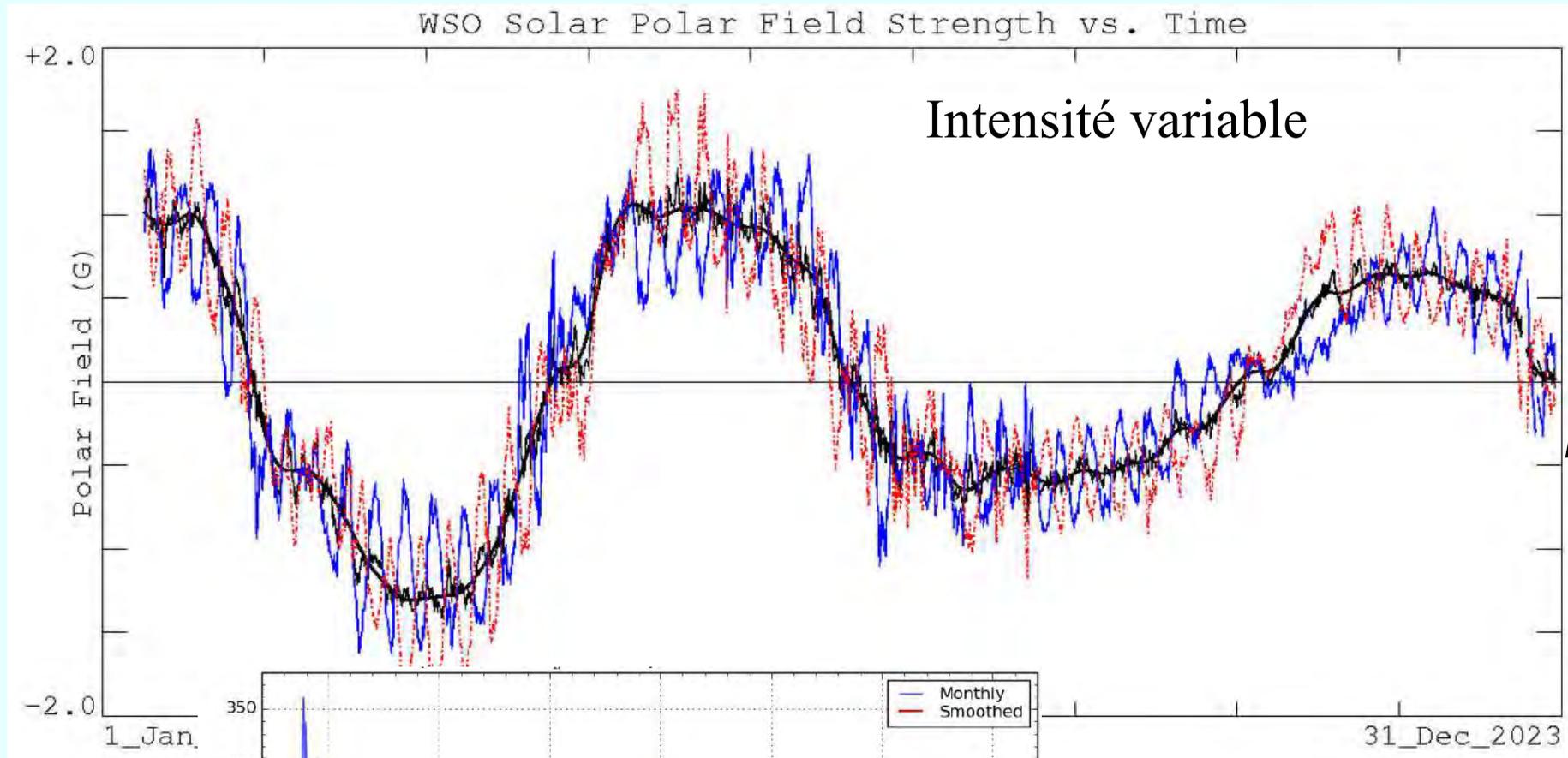
Force du champ magnétique du Soleil:

Champ global dipolaire : 0.01 G
Dans les taches : 1500 G

Le champ magnétique dynamo



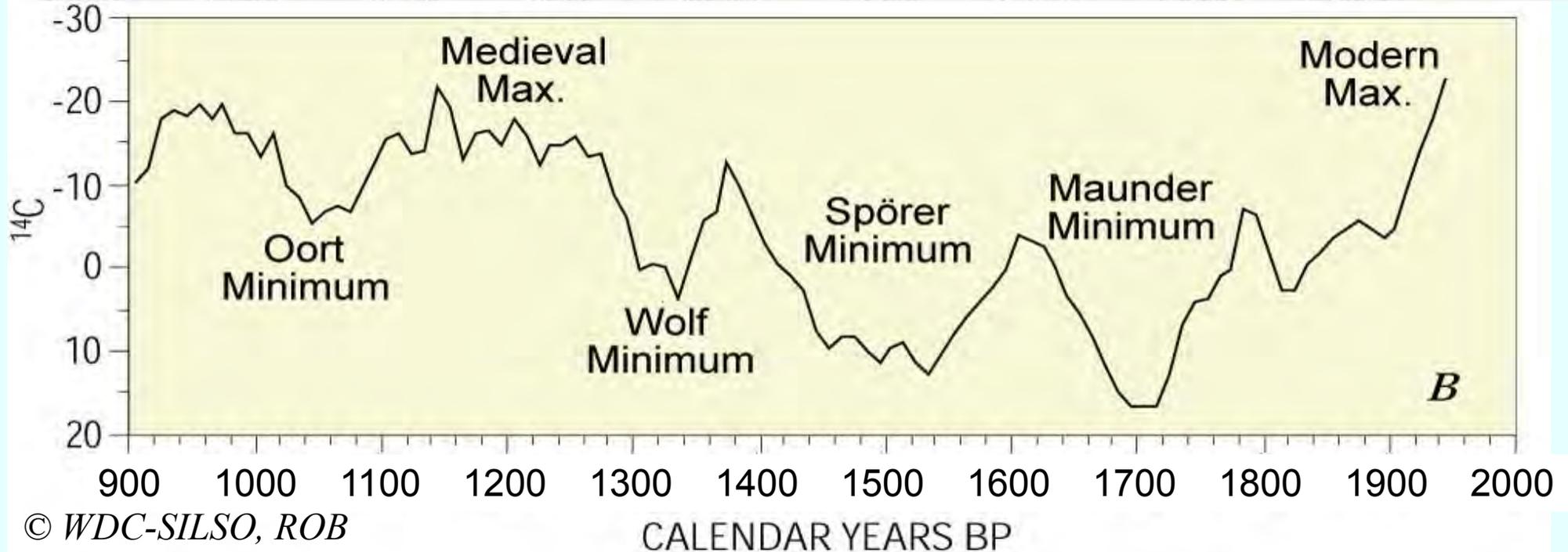
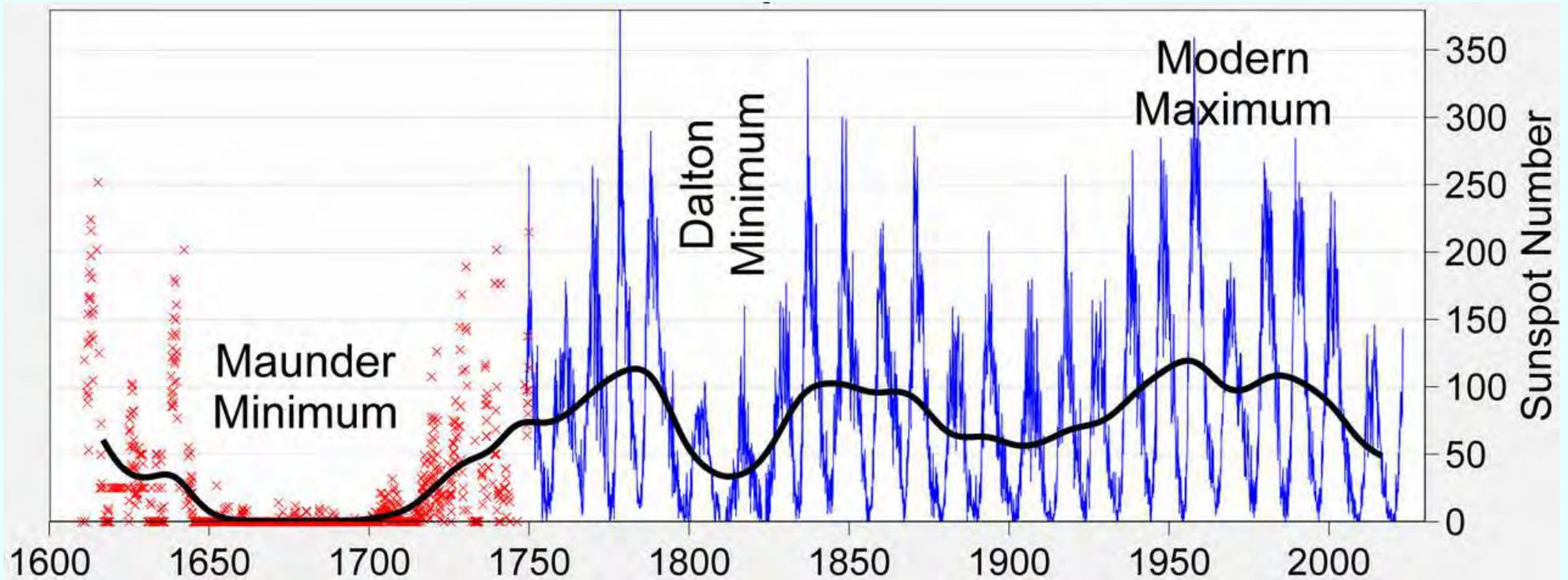
Variations d'un cycle à l'autre



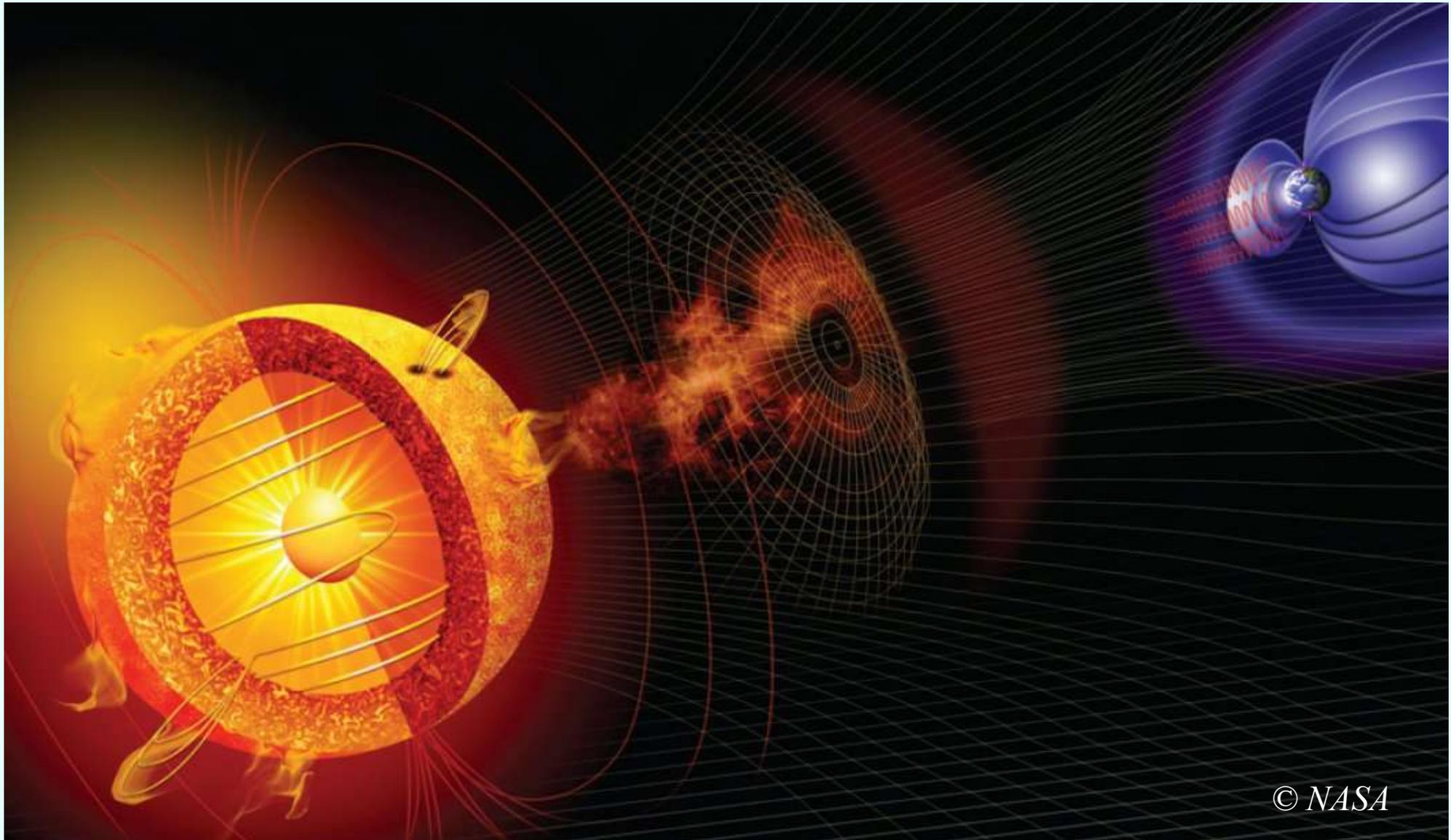
changement de polarité

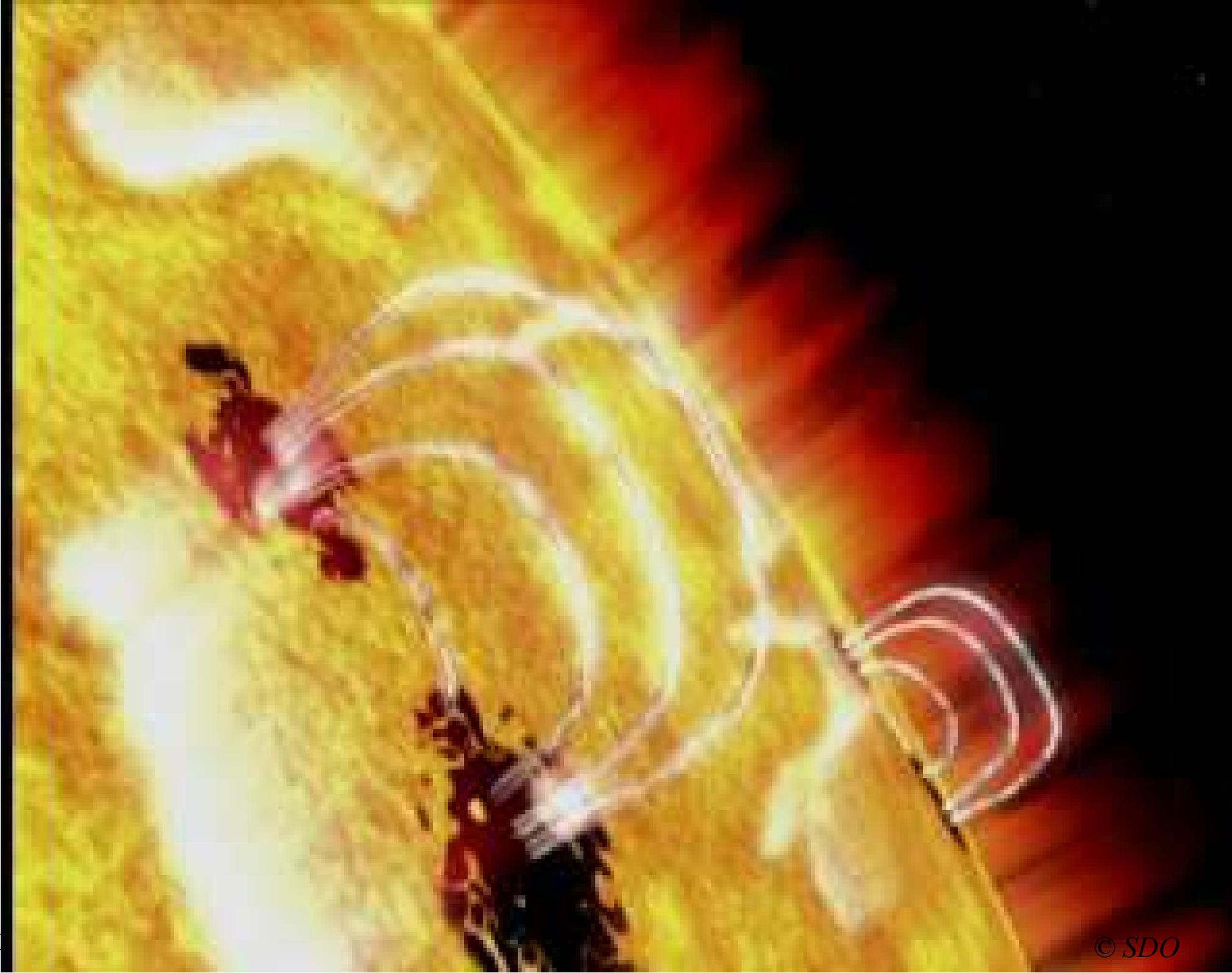
nombre de taches variable

Variations du cycle à long terme



Impact de l'activité solaire aux grandes échelles : les éjections de masse coronale





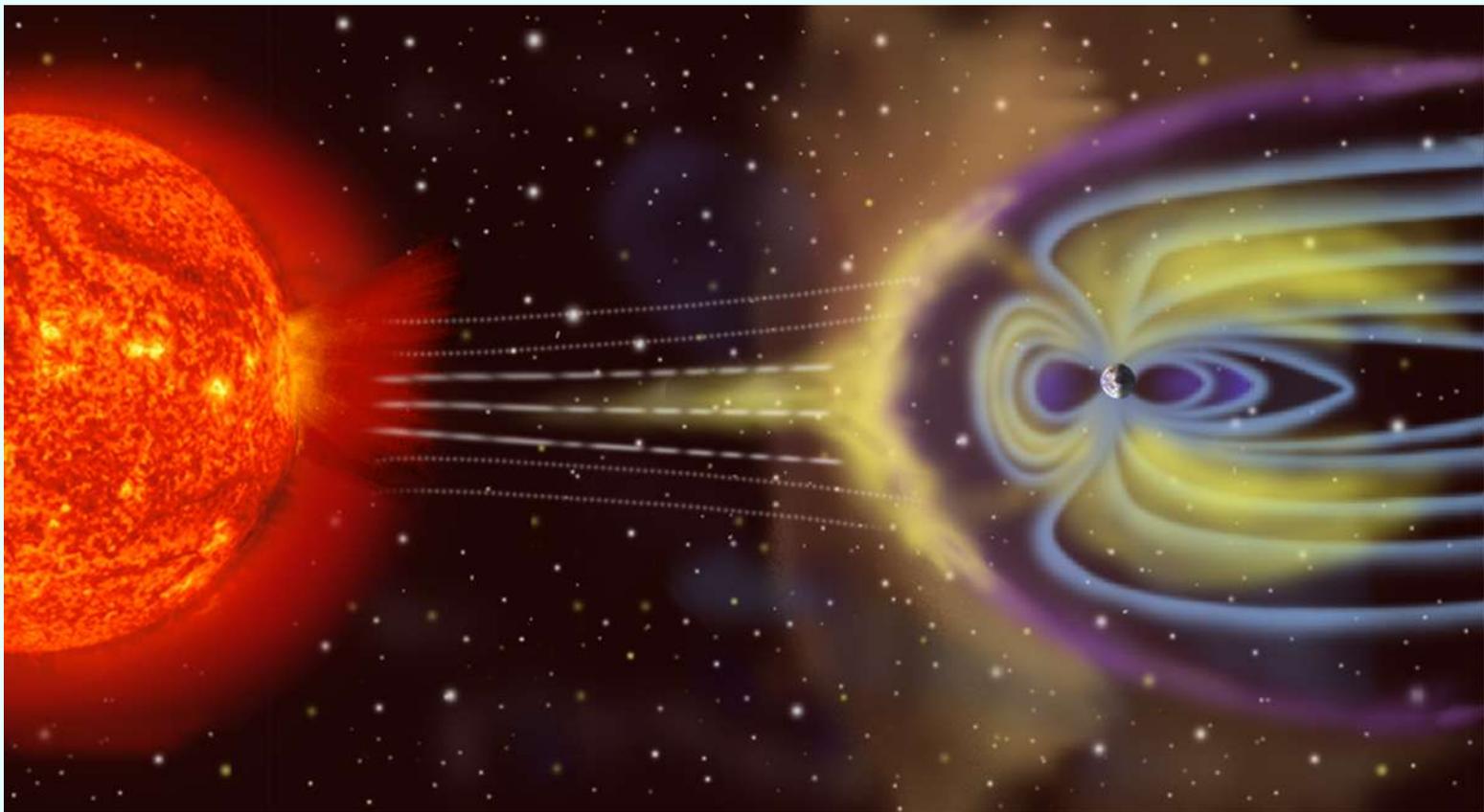


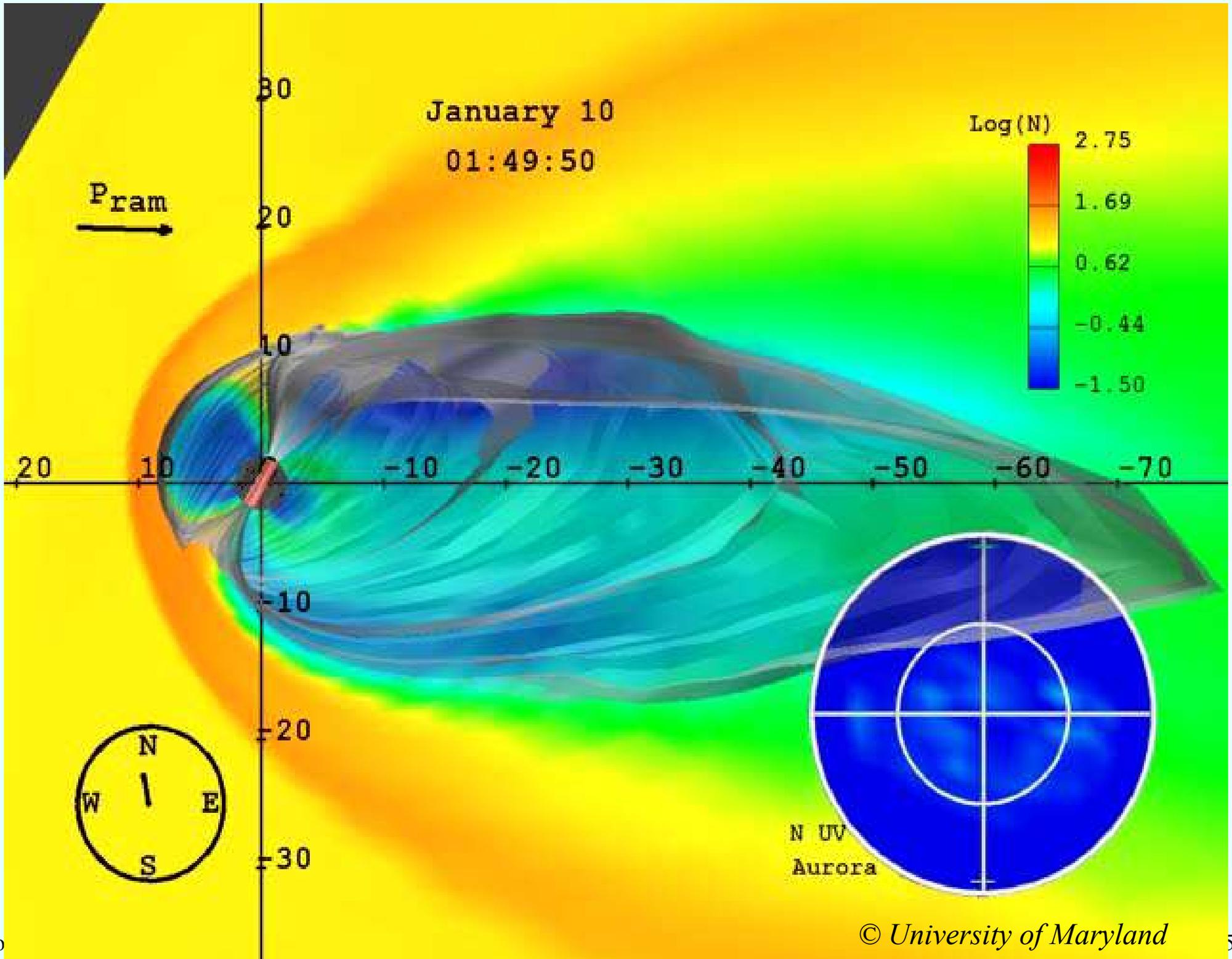
Apr 17 2002 23:59:32

Impact du champ magnétique du Soleil sur la Terre

Le champ magnétique n'est PAS responsable des variations météorologiques à court terme sur Terre (canicule, tempêtes, réchauffement, etc).

Mais le vent solaire qui s'échappe le long des lignes de champs magnétiques et les éjections de masse coronale qui s'échappent via les protubérances atteignent la Terre.





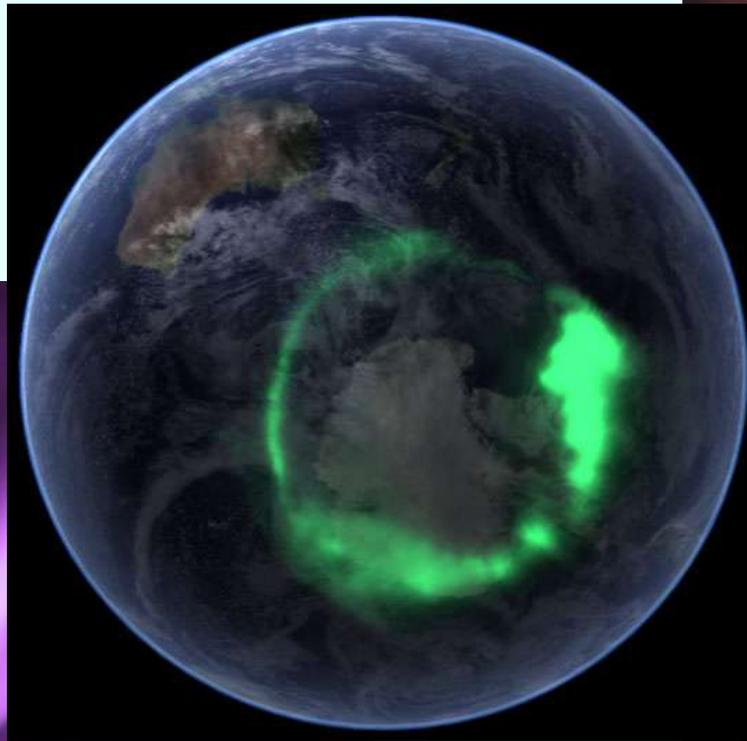


© NASA

Aurores boréales et australes

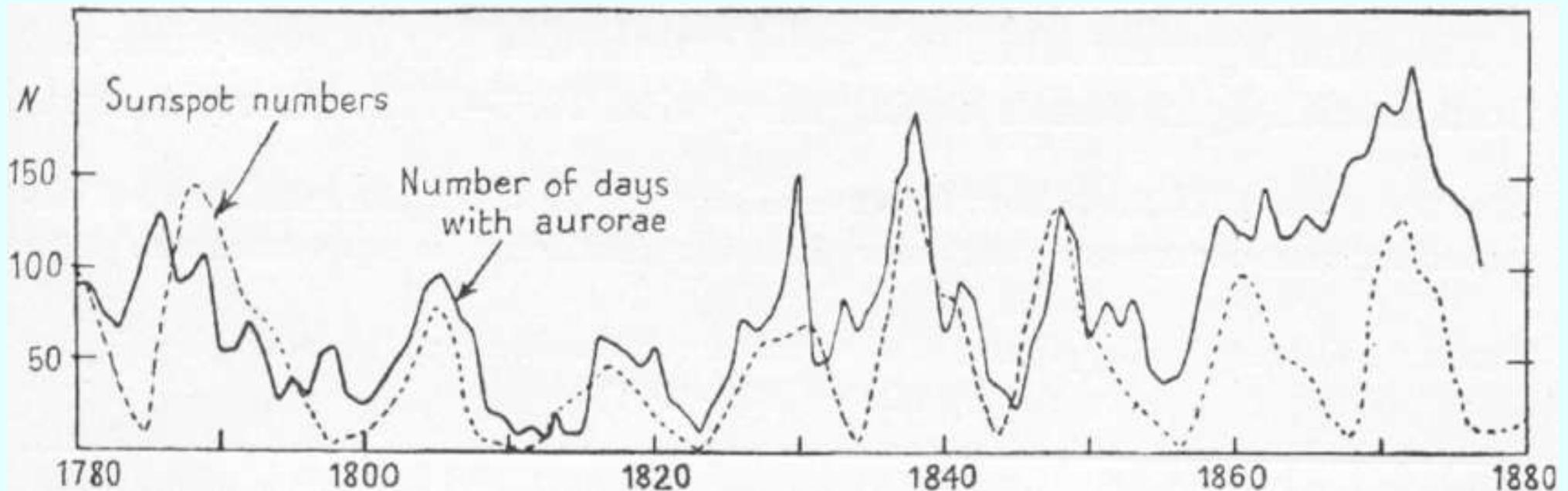
La couleur dépend du gaz dans l'ionosphère et donc de l'altitude :

- oxygène > 300 km → rouge
- oxygène entre 100 et 300 km → vert
- azote < 100 km → rouge
- hélium, hydrogène → bleu, violet



La fréquence des aurores

Le nombre d'aurores par jour est directement relié au nombre de taches sur le Soleil, mais les éjections mettent 2 à 4 jours à atteindre la Terre.



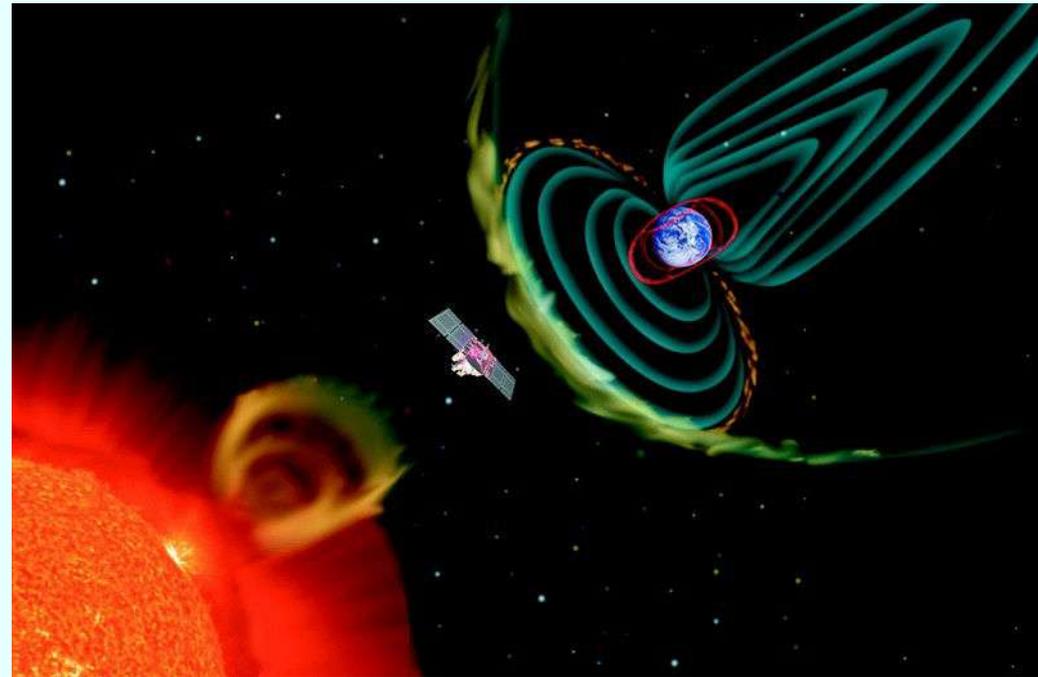
Tromholt, 1898

Effets néfastes : spatial

Les particules solaires qui créent les aurores produisent aussi des effets néfastes :

A très haute altitude :

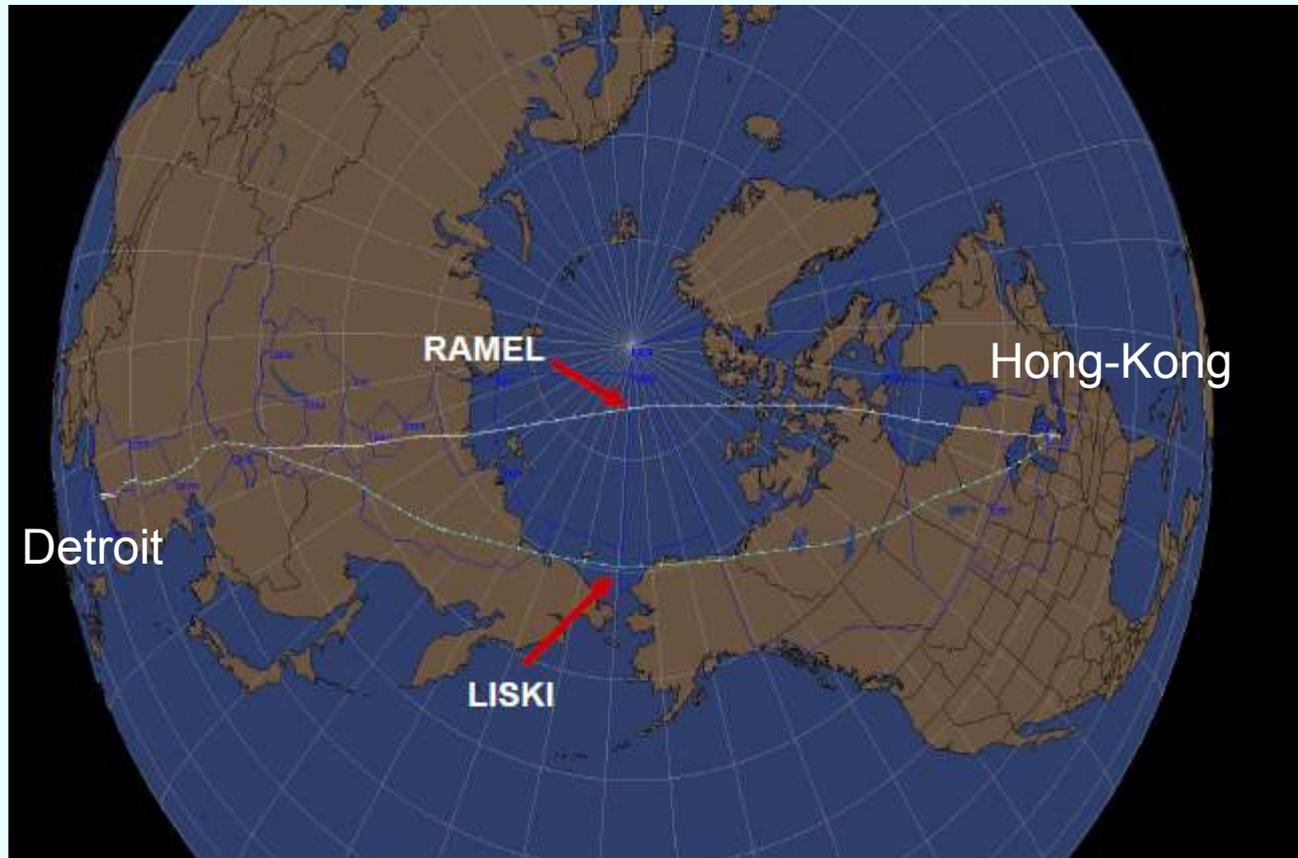
- Destruction progressive de l'**électronique des satellites** due aux impacts des protons
- Modification de l'**orbite des satellites** en orbite terrestre basse ou moyenne
- Perturbations du système de contrôle de la **station spatiale ISS**
- **Santé des astronautes** (irradiation nucléaire)



Effets néfastes : aviation

A plus basse altitude :

- **Détours d'avion**, par exemple 16 avions Delta Airlines détournés des pôles (> 78 deg) en 2012 : à cause de la **perte possible des communications** et pour éviter les **radiations nuisibles à la santé**



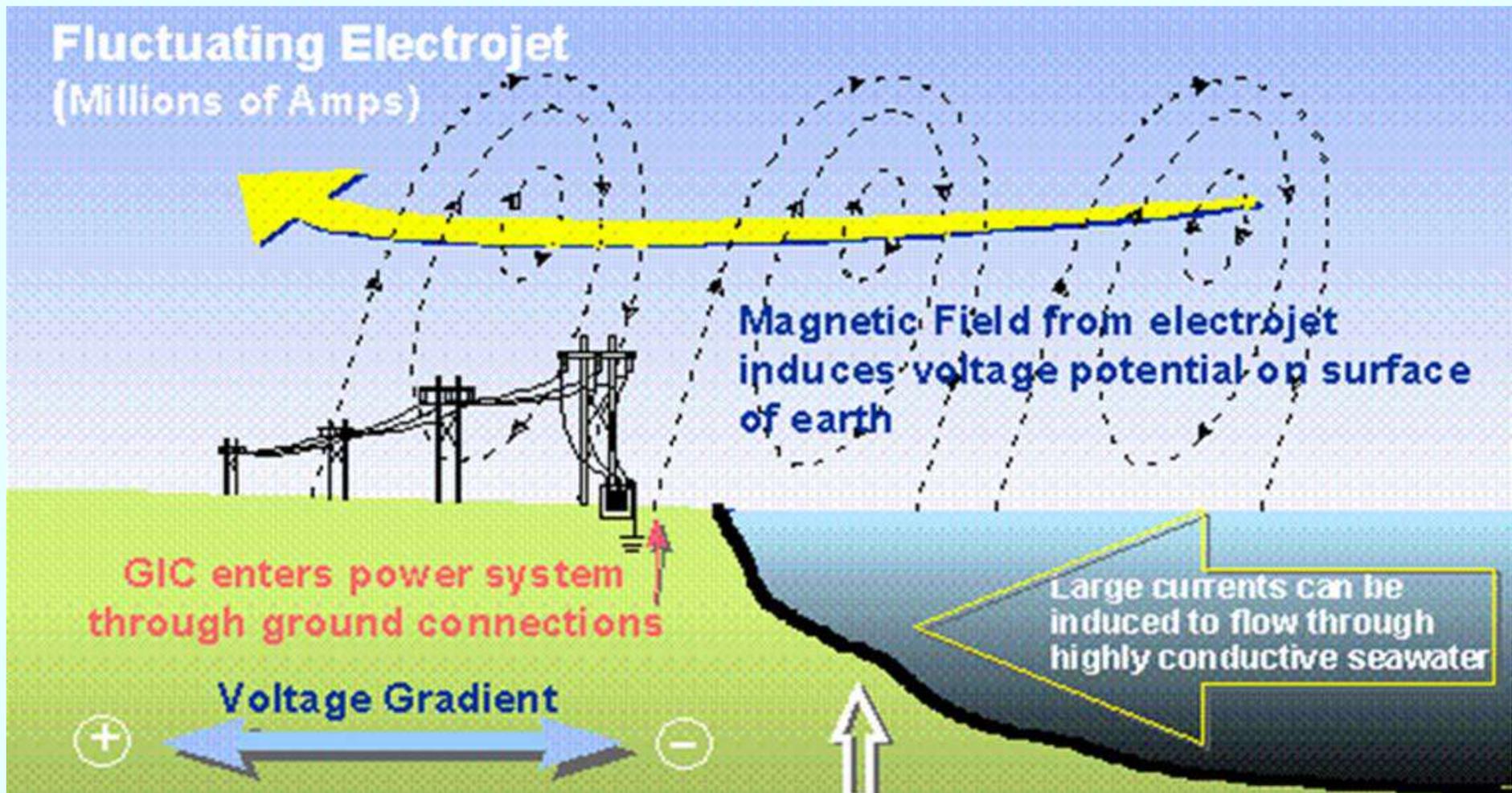
© Delta Airlines

+23 min
+140 km
+5900 l de fuel
+4507 \$

Effets néfastes : électricité

A plus basse altitude :

- Perturbations radios, lignes téléphoniques, navigation GPS...
- Perturbations dans la production et le transport d'électricité



Tempêtes magnétiques

Super-tempête (Carrington) en 1859 :

- la CME a mis ~ 18 h au lieu de ~ 3 jours pour atteindre la Terre
- des aurores géantes jusqu'à Hawaï et Cuba
- problèmes sur le système des télégraphes

Exemple d'événement moins fort mais plus récent en 1989 :

- la CME a mis 3.5 jours pour atteindre la Terre
- black-out électrique de 9 heures au Québec
- suspension de la bourse de Toronto
- perte de contrôle de plusieurs satellites en orbite polaire
- dommages électroniques sur plusieurs satellites

Impact sur nous ?

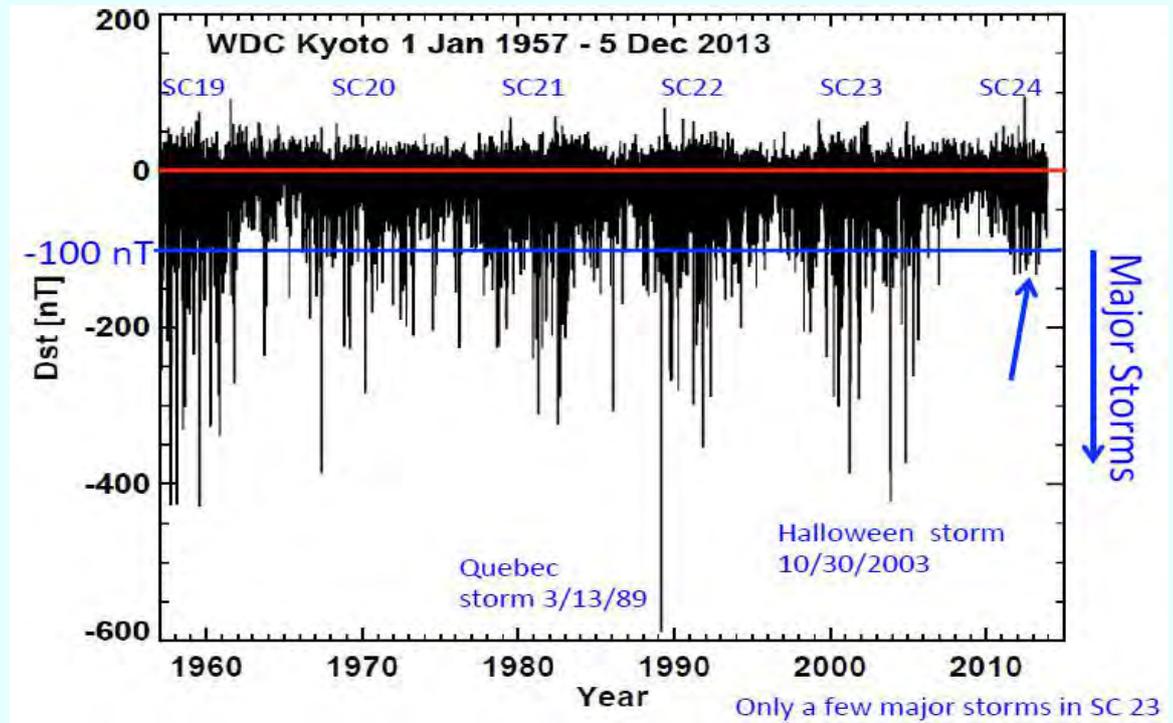
On ne risque rien sur Terre grâce au champ magnétique de la Terre !
La plupart des événements passent inaperçus !

mais ils ont un coût :

→ quelques milliers d'euros pour un avion détourné

→ estimé à 2600 milliards de dollars pour un évènement majeur comme celui de Carrington (1859) qui se produirait aujourd'hui et il faudrait plusieurs années pour rétablir tous nos systèmes...

Les études de glace du Groenland montrent que les super-tempêtes se produisent tous les ~500 ans.



Résumé

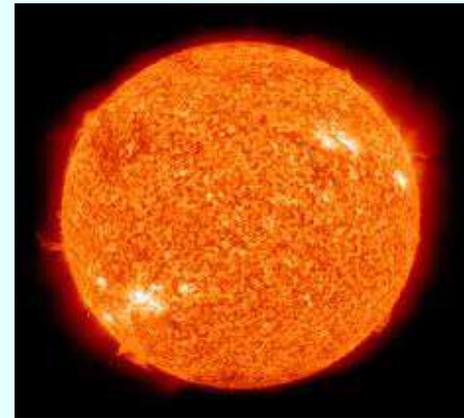


Champs magnétiques des étoiles chaudes :

- seulement $\sim 10\%$ des étoiles sont fortement magnétiques
- ~ 3000 G sur la séquence principale
- origine fossile (nuage moléculaire)
- le champ magnétique produit des taches, une magnétosphère, freine l'étoile...
- étoiles à neutron (pulsars et magnétars) très fortement magnétiques

Champs magnétiques des étoiles froides comme le Soleil :

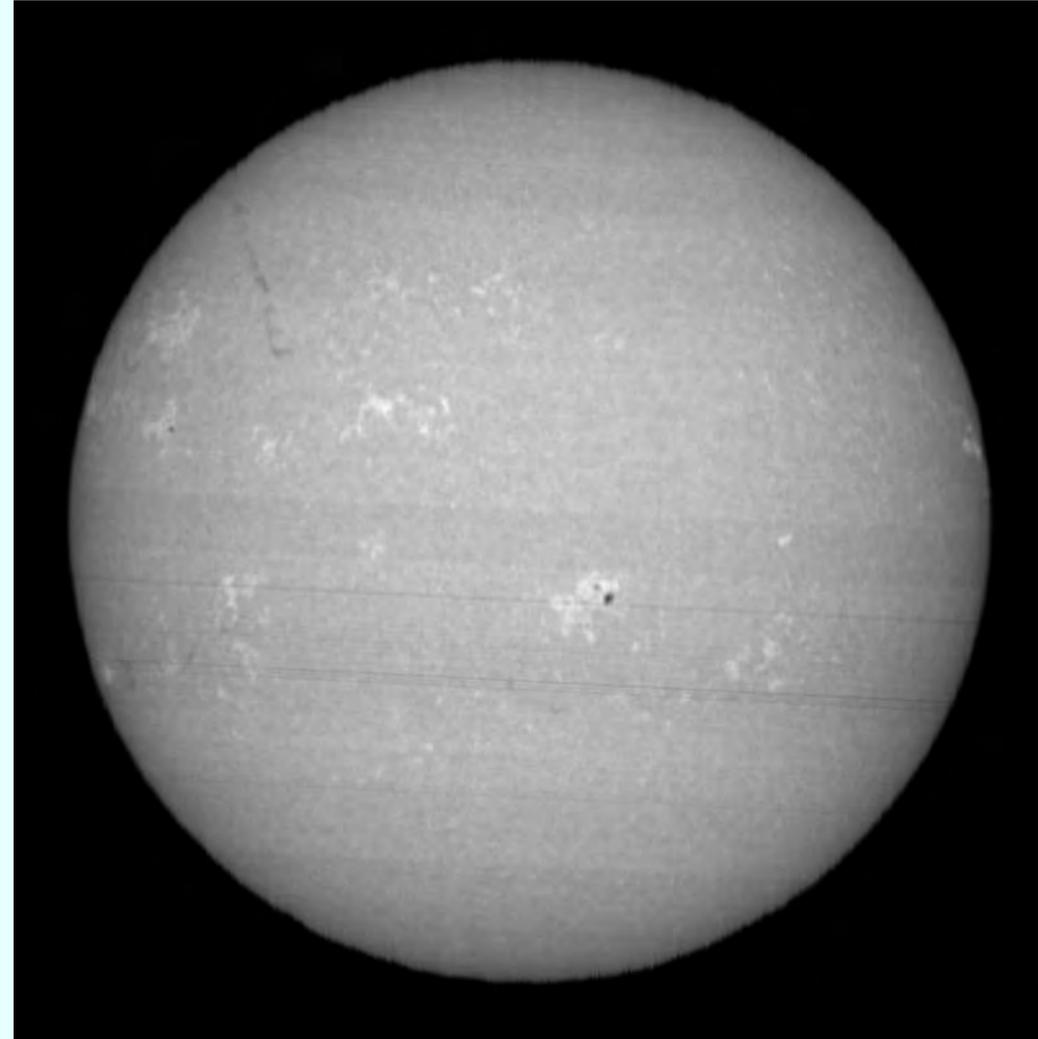
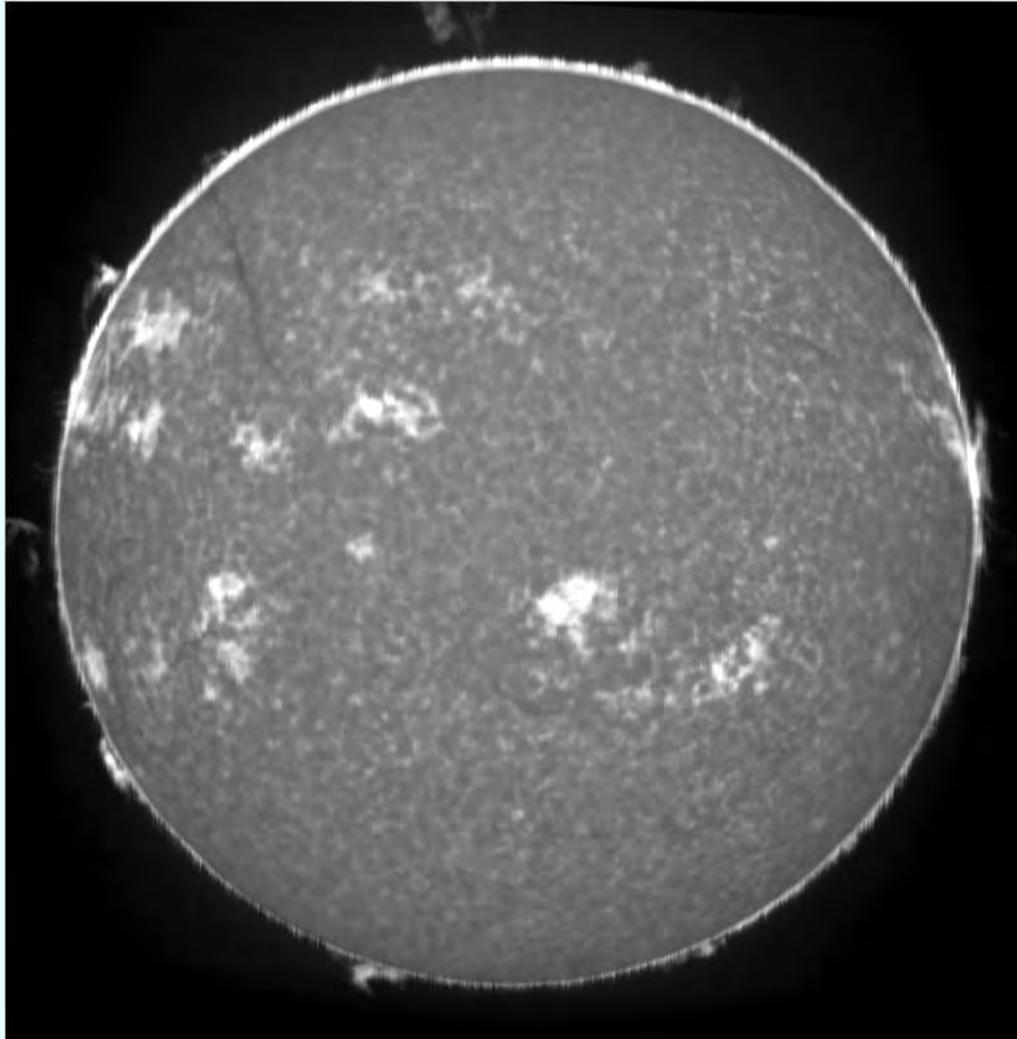
- toutes les étoiles froides sont magnétiques
- globalement 0.01 G mais ~ 1500 G dans les taches
- champ fabriqué par l'étoile par dynamo



Impact sur la Terre :

- surtout à très haute altitude (satellites, astronautes...)
- un peu à basse altitude (avion, installation électrique...)
- a un coût pour la société...

Le Soleil le 17 décembre 2023



BASS2000