

Le Soleil: structures magnétiques

Jean Louis ZERBO

jeanlouis.zerbo@gmail.com

jeanlouis.zerbo@u-naziboni.bf

Université Nazi
BONI

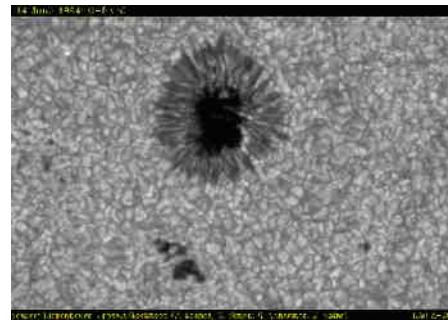
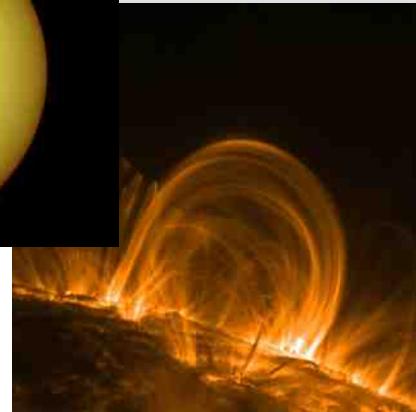
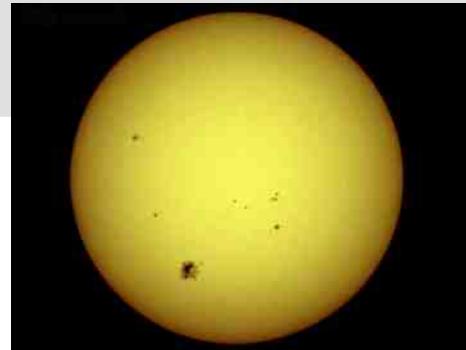


Bobo-Dioulasso

- BURKINA FASO

Karl Ludwig Klein

ludwig.klein@obspm.fr,



- Dans la photosphère : taches solaires
- Structuration magnétique de la couronne
- Le champ magnétique de l'héliosphère
- Evolution des régions actives

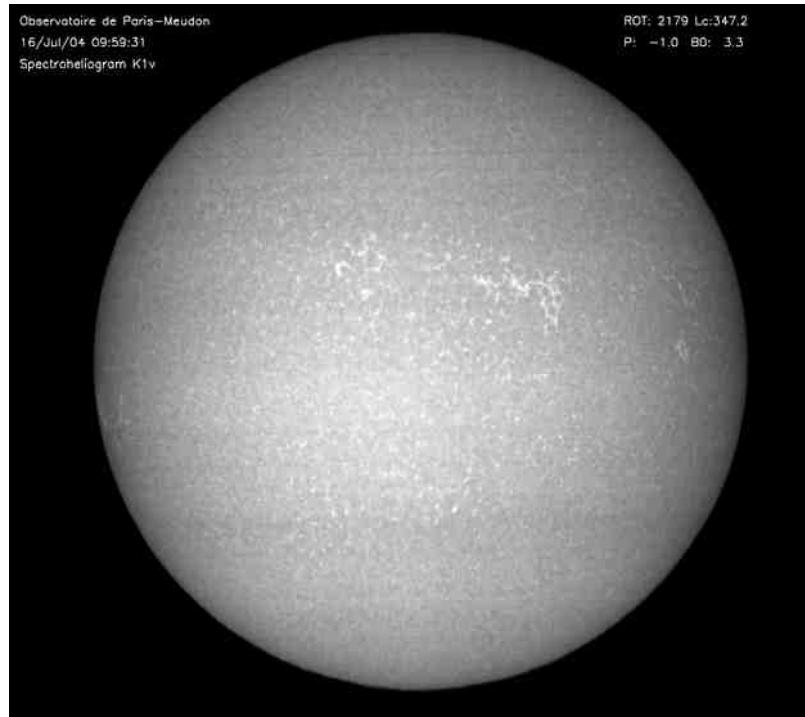
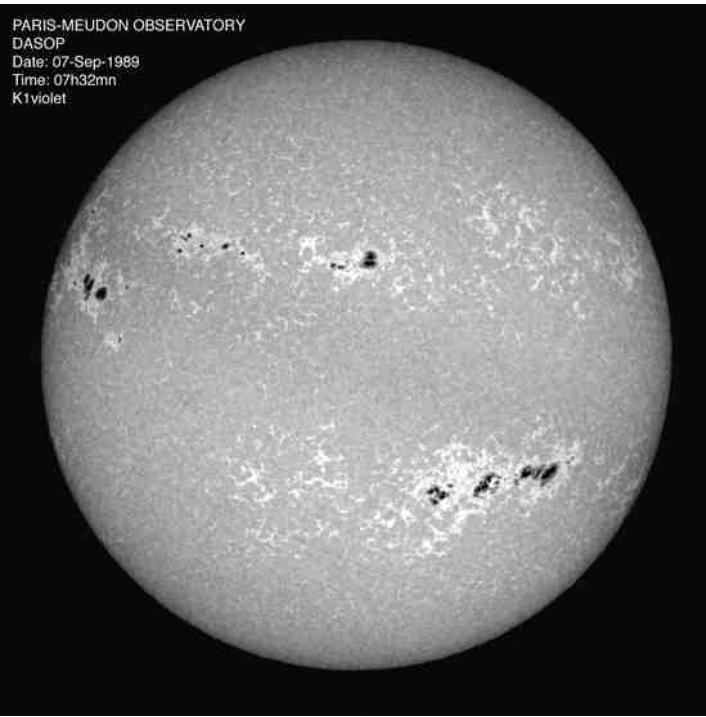
Le champ magnétique dans la photosphère solaire

Structuration du champ magnétique
par le plasma

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: taches et facules

- Deux vues de la photosphère: Septembre 1989, Juillet 2004 – des périodes « active » et « calme » du Soleil

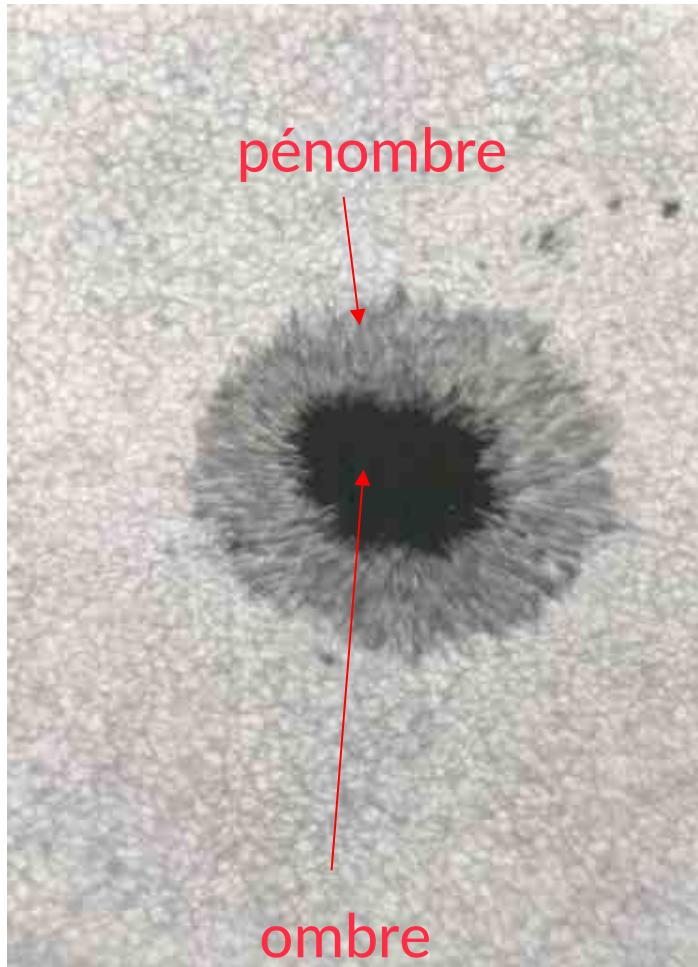


- Structures : taches (sombres), facules (brillantes)

Cliché Obs. Paris (Meudon): bass2000.obspm.fr

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: taches solaires



Cliché Pic du Midi

Deux parties :

- noyau sombre (« ombre »)
- entourage moins sombre (« pénombre »), structuré en filaments plus ou moins radiaux

Mesures (photométrie, analyse spectrale) :

- Contraste de luminosité tache-photosphère:
 - Températures: 5800 K (photosphère), 5600 K (pénombre), 3900-4900 K (ombre)

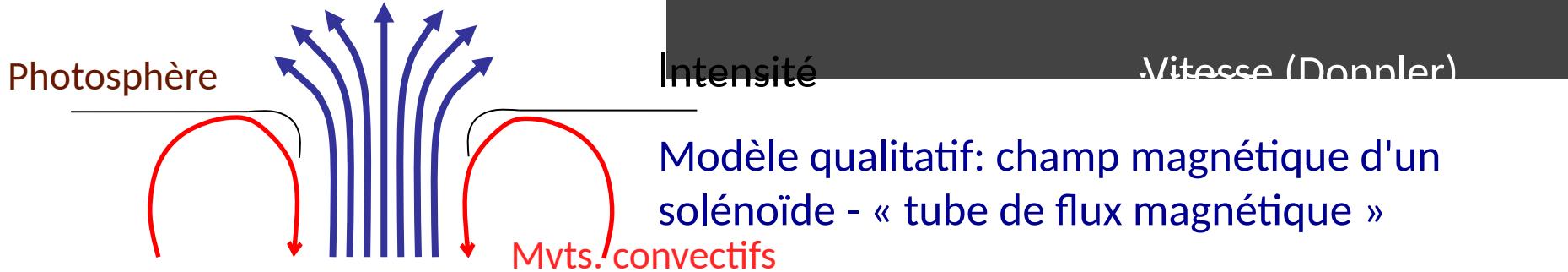
{

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: taches solaires

Vecteur champ magnétique dans et autour d'une tache
(Satellite Hinode - mesure par effet Zeeman) :

- champ vertical au centre (ombre), incliné à la périphérie (péronbre)
- faibles mouvements systématiques dans la tache, comparée à la photosphère ambiante

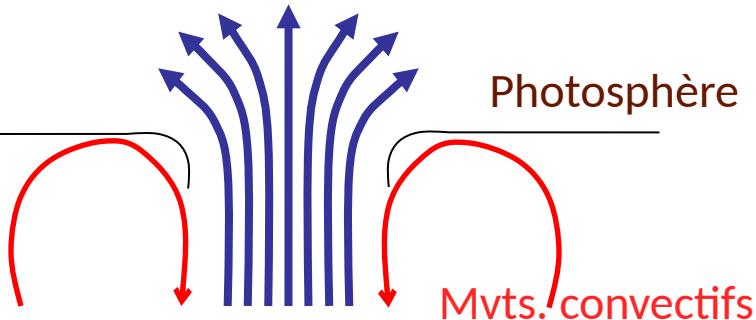


Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: taches solaires

Pourquoi les taches solaires sont-elles sombres ?

- Force de Lorentz sur une particule électriquement chargée: $F=qv\times B \Rightarrow$ pas de transport perpendiculaire au champ magnétique
- Réduction de la convection \Rightarrow apport réduit d'énergie depuis l'intérieur



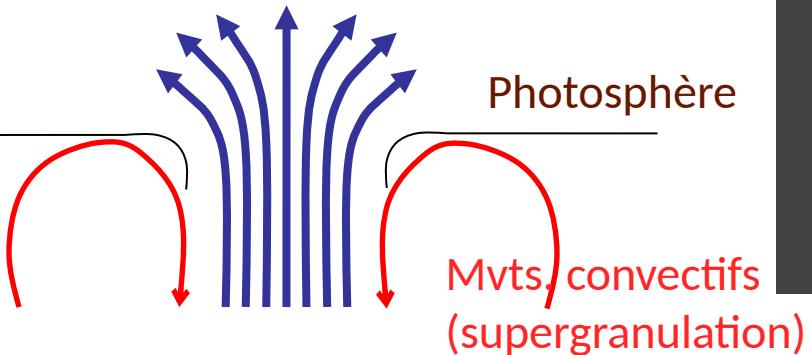
- Energie bloquée sous la tache, diffusée dans la zone convective, puis rayonnée graduellement

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: taches solaires

Tache solaire:

- entourée de granules
- mouvements à plus grande échelle (supergranulation) concentrant le champ magnétique



- Vieille tache solaire: pont lumineux, régions brillantes dans l'ombre
 - ombre = ensemble de tubes de flux magnétique
 - d'où apport résiduel d'énergie, malgré la réduction de la convection

Le champ magnétique du Soleil

Evolution du champ magnétique en MHD – loi d'induction

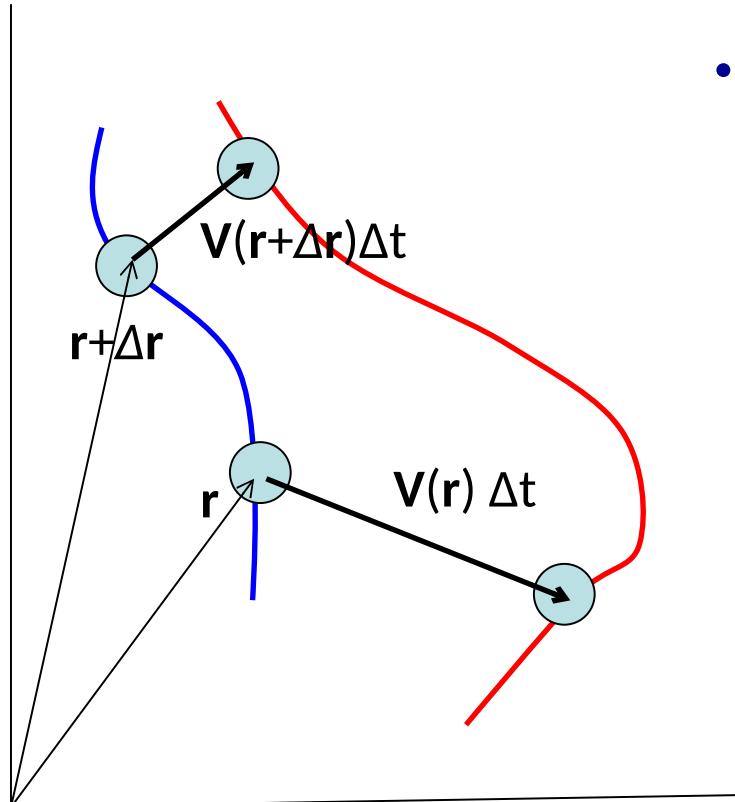


- Deux modes de changement du champ magnétique:
 - Haute résistivité η ou petite échelle spatiale L : dissipation Joule
 - Faible résistivité / grande échelle spatiale: transport avec le plasma

Le champ magnétique du Soleil

Le théorème du gel de la MHD

- Force de Laplace sur un élément fluide:
 - mouvement libre le long de \mathbf{B} (le long d'une ligne de champ)
 - ralentissement/accélération en direction perpendiculaire à \mathbf{B}



- Gaz ionisé (« plasma ») à haute conductivité électrique ou à grande échelle spatiale:
 - deux éléments fluides qui sont sur une ligne de champ à un instant donné sont sur une ligne de champ à tout instant (« gel » du champ magnétique – MHD « idéale », grande échelle, faible résistivité)
 - si la force de Laplace domine les forces mécaniques: le champ magnétique guide les mouvements du plasma (structures couronne)
 - si les forces mécaniques du fluide dominent: le gaz se meut librement, le champ magnétique s'y adapte (taches solaires)

Le champ magnétique du Soleil

Force de Laplace: pression et tension magnétiques

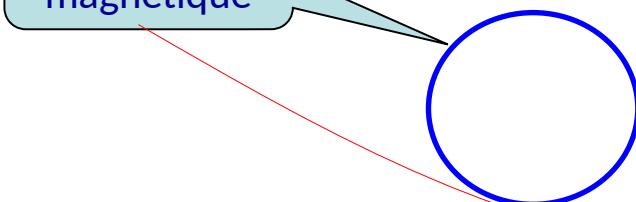
Equation du mouvement MHD :

Equation du mouvement (version préliminaire):

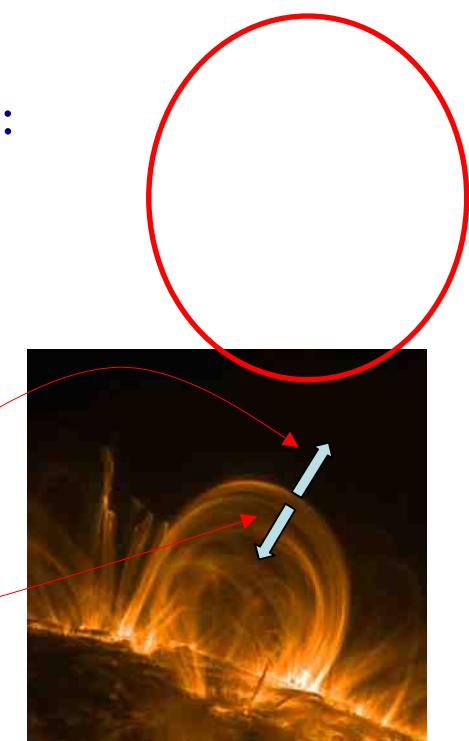


Séparer composantes parallèle et perpendiculaire à $\mathbf{B} = B\mathbf{b}$:

Tension
magnétique

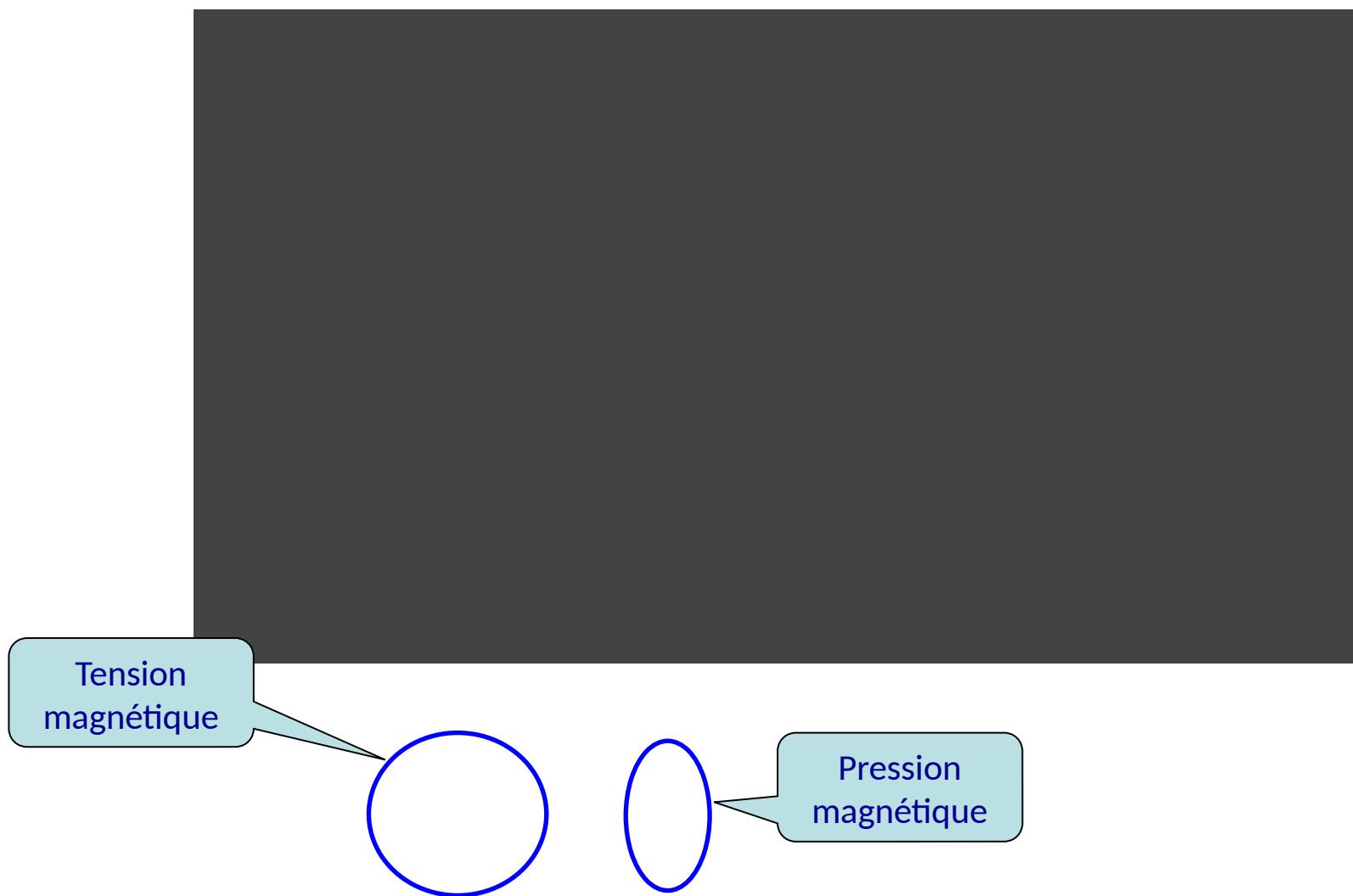


Pression
magnétique



Le champ magnétique du Soleil

Force de Laplace: pression et tension magnétiques

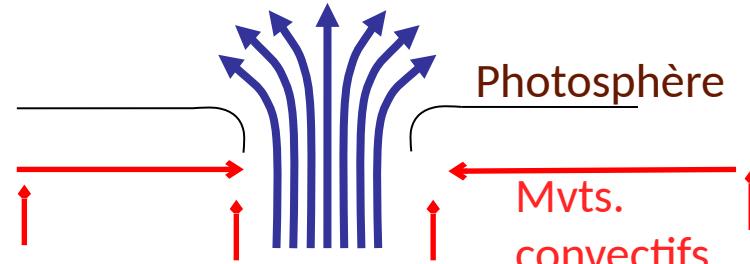


© Solar Orbiter EUI, ESA/NASA

Le champ magnétique de la photosphère

Plasma et champ magnétique: équilibre magnéto-hydrostatique

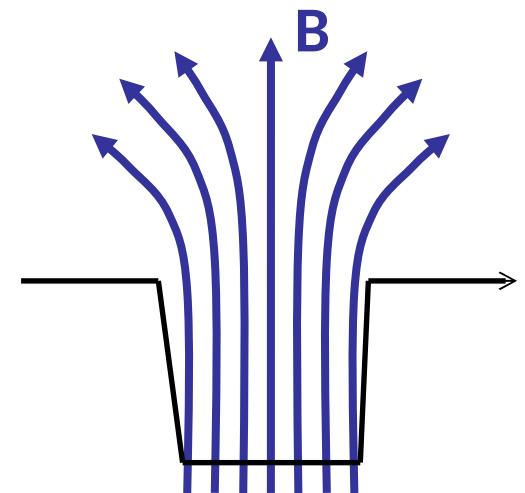
- Cas particulier: équation du mouvement 1-D, lignes de champ magnétique droites perpendiculaires au mouvement du fluide



- Équation du mouvement (on néglige la pesanteur)

- Problème statique:
 - Seule variation spatiale en dir. horizontale (x):

- Équation du mouvement dans ce cas:

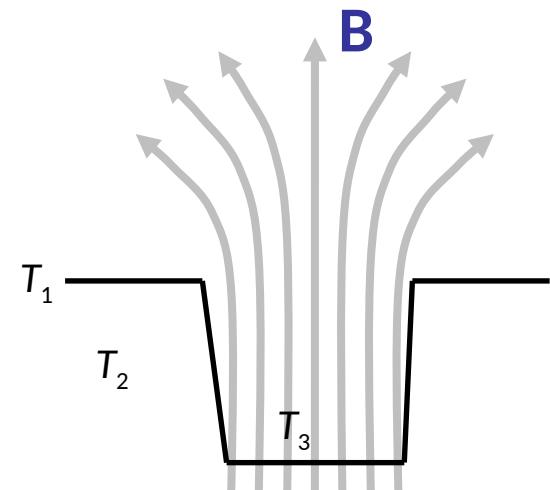
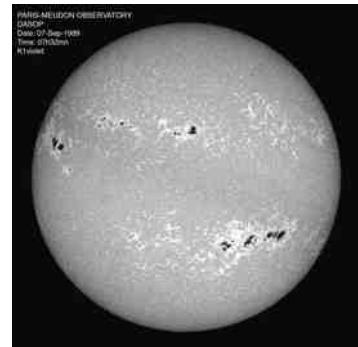


$$P(\text{tube de flux}) < P(\text{environ})$$

Le champ magnétique de la photosphère

Plasma et champ magnétique: équilibre magnéto-hydrostatique

- On voit des régions plus profondes dans le tube de flux qu'en dehors
- Tube de flux étroit:
 - déficit d'apport d'énergie depuis l'intérieur
(suppression convection),
 - mais chauffage du gaz par les parois ($T_2 > T_1$)
 - Pouvant conduire à $T_3 > T_1$
- A épaisseur optique égale,
l'intérieur d'un tube de flux étroit
peut paraître plus brillant que ses
environs (=> facule) !

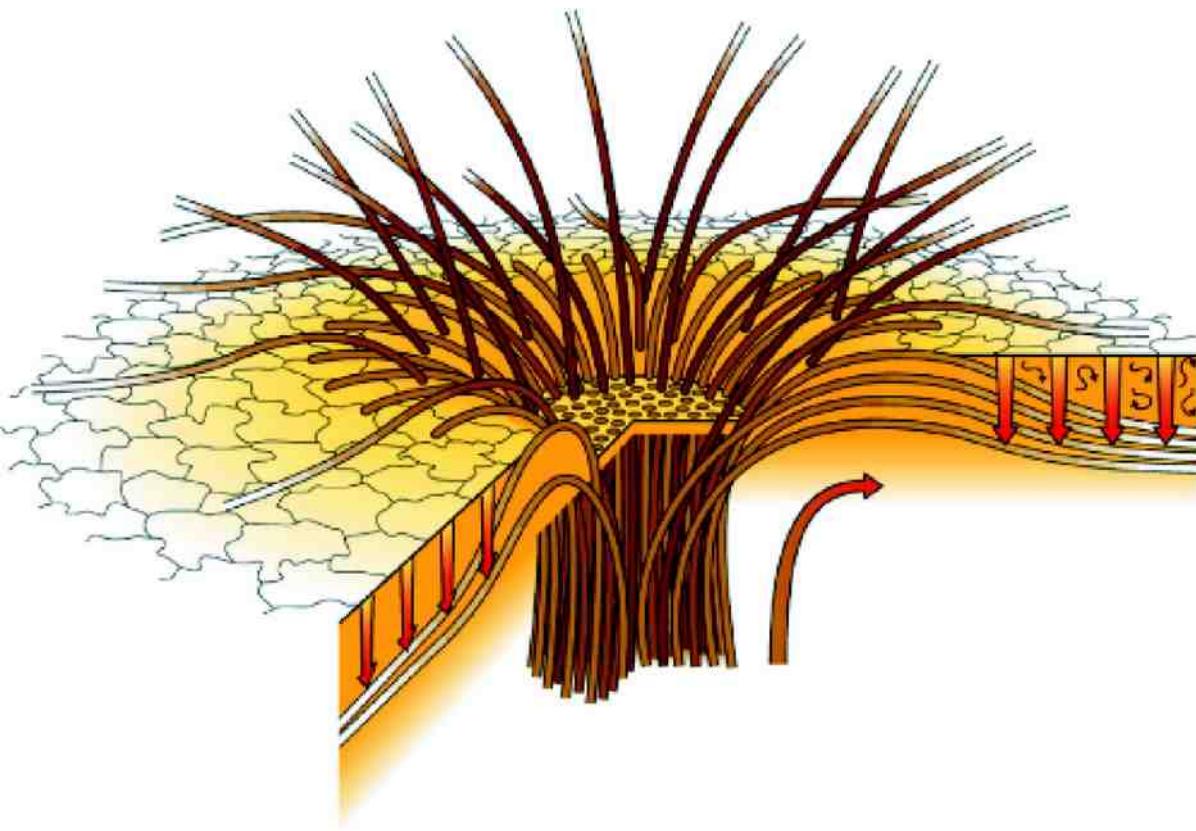


$$P(\text{tube de flux}) < P(\text{environ})$$

$$\tau(\text{tube de flux}) < \tau(\text{environ})$$

Le champ magnétique du Soleil

Modèle d'une tache solaire



Weiss et al. 2004, ApJ 600, 1073

Modèle d'une tache solaire:

- filamentaire - l'ombre est constituée de nombreux tubes de flux magnétique élémentaires (= pores)
- au bord de l'ombre, courbure des tubes de flux magnétique par les mouvements descendants des granules voisines: pénombre

Le champ magnétique du Soleil

Formation et évolution de taches solaires



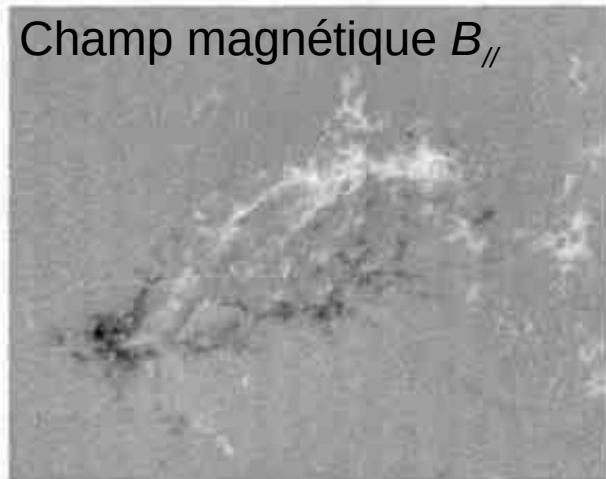
Observation SDO (NASA), lumière visible

- Formation des taches solaires: émergence du champ magnétique, concentration par les mouvements du plasma ambiant
- Puis les mouvements du plasma désassemblent les taches

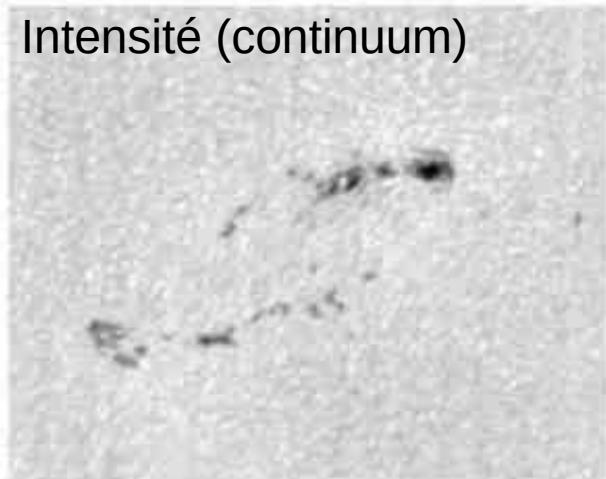
Le champ magnétique du Soleil

Régions actives

Champ magnétique B_{\parallel}

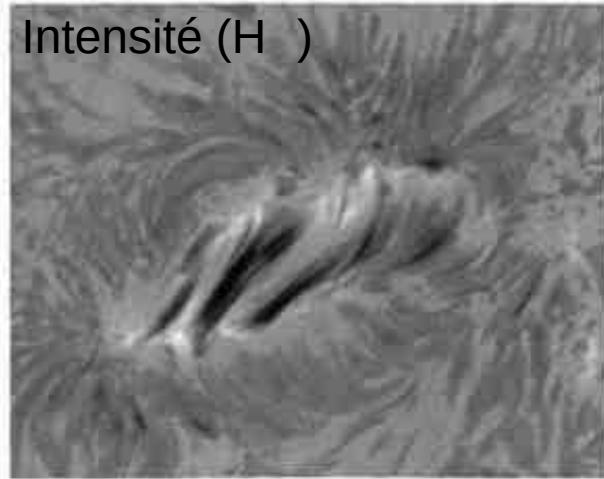


Intensité (continuum)



L. Strous, d'après
http://www.scholarpedia.org/article/Magnetic_Flux_Emergence

Intensité ($H \alpha$)



- Tache solaire = champ magnétique monopolaire
- groupe de taches et pores (I cont) associé à une région bipolaire (B_{\parallel})
- deux polarités connectées par boucles (ici $H \alpha$; EUV)
- « région active »



Le champ magnétique dans la couronne solaire

Structuration du plasma
par le champ magnétique

Le champ magnétique du Soleil

Couronne solaire



Le champ magnétique du Soleil

Structuration de l'atmosphère solaire

- Rappel: équilibre magnéto-hydrostatique :
- Couronne solaire :
 - pas de mouvements convectifs (ils ont lieu au-dessous de la photosphère)
 - équilibre hydrostatique dans la couronne jusqu'à au moins $1 R_s$ au-dessus de la photosphère
- Mesure de l'importance relative des pressions cinétique (P) et magnétique (B) :
- Couronne: ($r < 2 R_s$)
 - $\beta \ll 1$ (région polaire)
 - $\beta \geq 1$ (région brillante: « grand jet »)

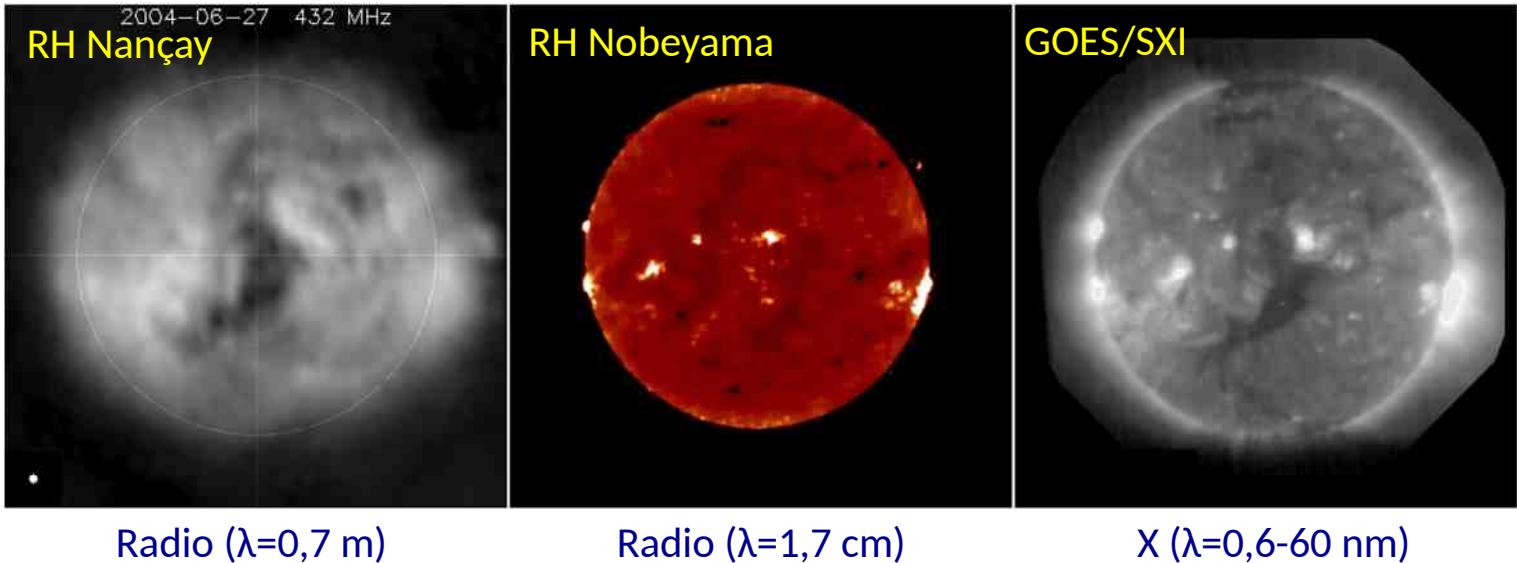


Le champ magnétique du Soleil

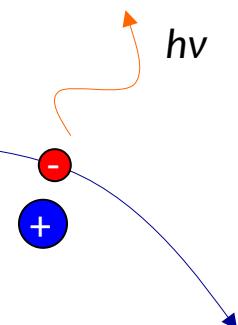
Structuration de l'atmosphère – trous coronaux, régions actives

Mercier & Chambe 2012

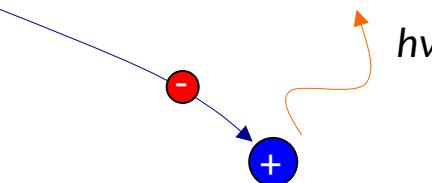
- La couronne devant le disque solaire (hors éclipse)



- Rayonnement de freinage
(``bremsstrahlung''): électron + ion libres



- Raies excitées par les collisions: électron + ion

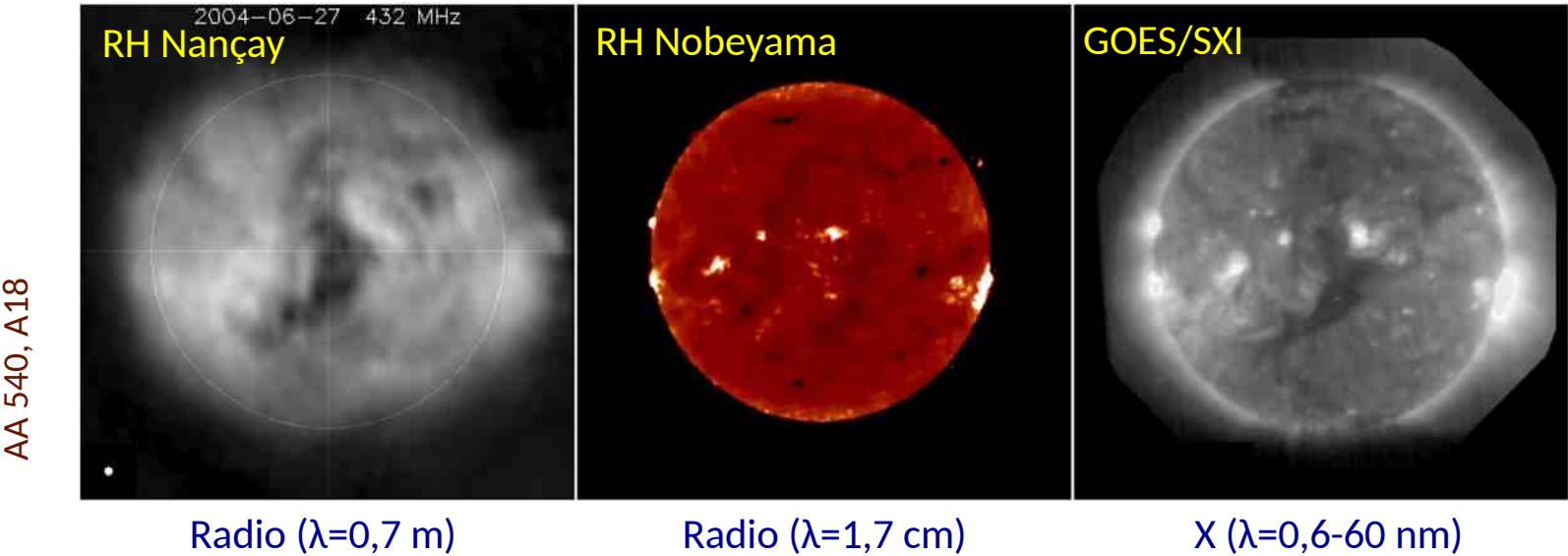


Le champ magnétique du Soleil

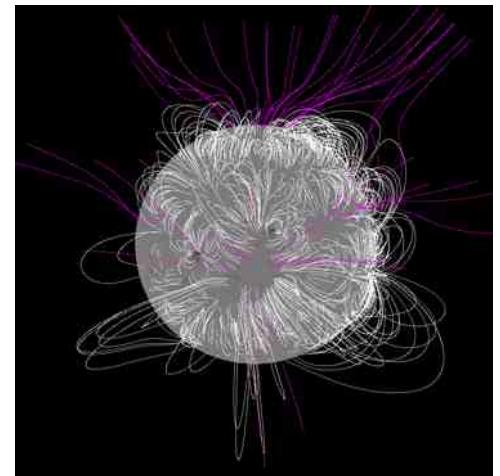
Structuration de l'atmosphère – trous coronaux, régions actives

Mercier & Chambe 2012

- La couronne devant le disque solaire (hors éclipse)



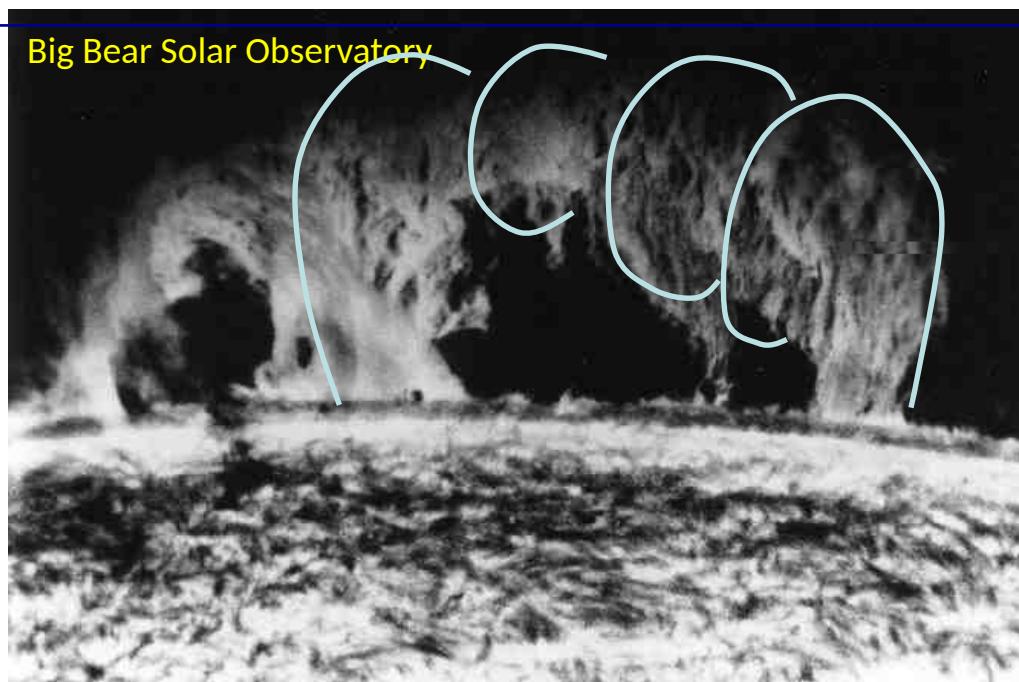
- Structures (extrapolation du champ magnétique mesuré dans la photosphère) :
 - trou coronal (déficit de densité électronique => faible intensité radio $\lambda=0,7\text{ m}$, rayons X)
 - boucles (densité électronique plus élevée)
 - régions actives (chromosphère, basse couronne; forte densité électronique)



Le champ magnétique du Soleil

Structuration de l'atmosphère – protubérances

- Protubérance/filament: gaz froid (H α)
 - surplombe une ligne d'inversion du champ magnétique (composante dans la ligne de visée=0) dans la photosphère
 - champ magnétique horizontal sur l'axe du filament)

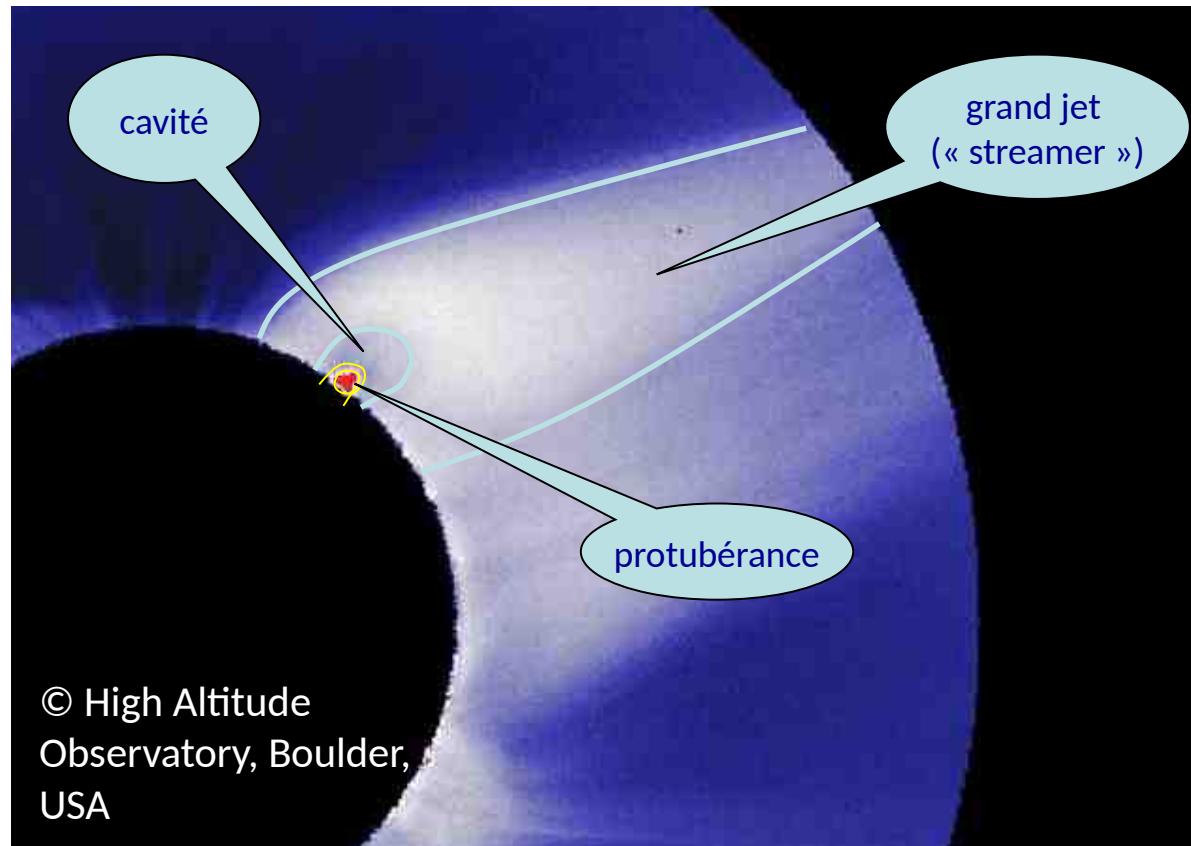


- Matière soutenue par le champ magnétique contre la gravitation.
- configuration : tube de flux torsadé (« magnetic flux rope »)
- isolation thermique !

Le champ magnétique du Soleil

Structuration de l'atmosphère – grands jets

- Structure d'un grand jet:
 - région dense étendue
 - cavité (n_e réduite)
 - protubérance (H_α)

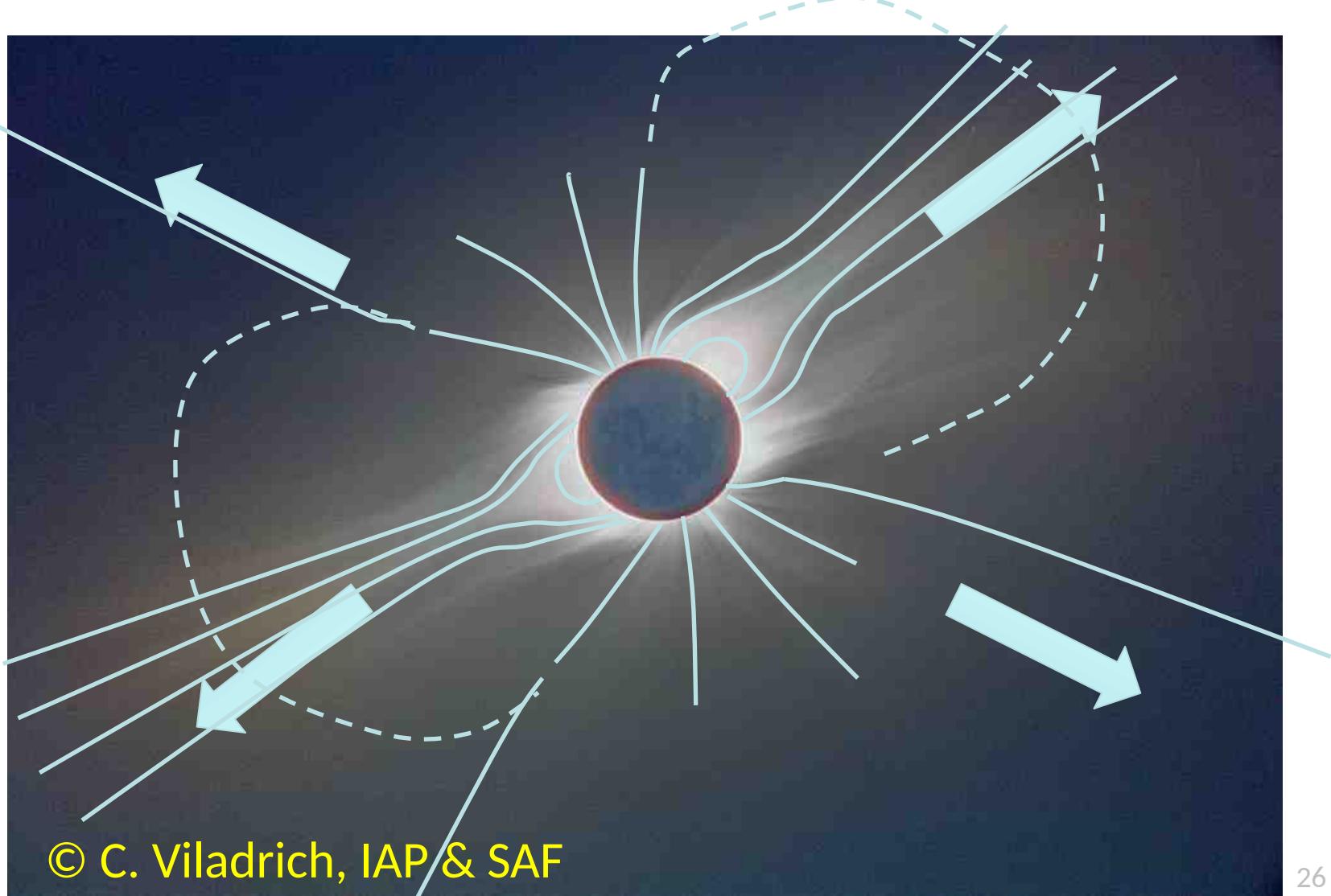


Le champ magnétique de l'Héliosphère

Extension du champ magnétique
solaire

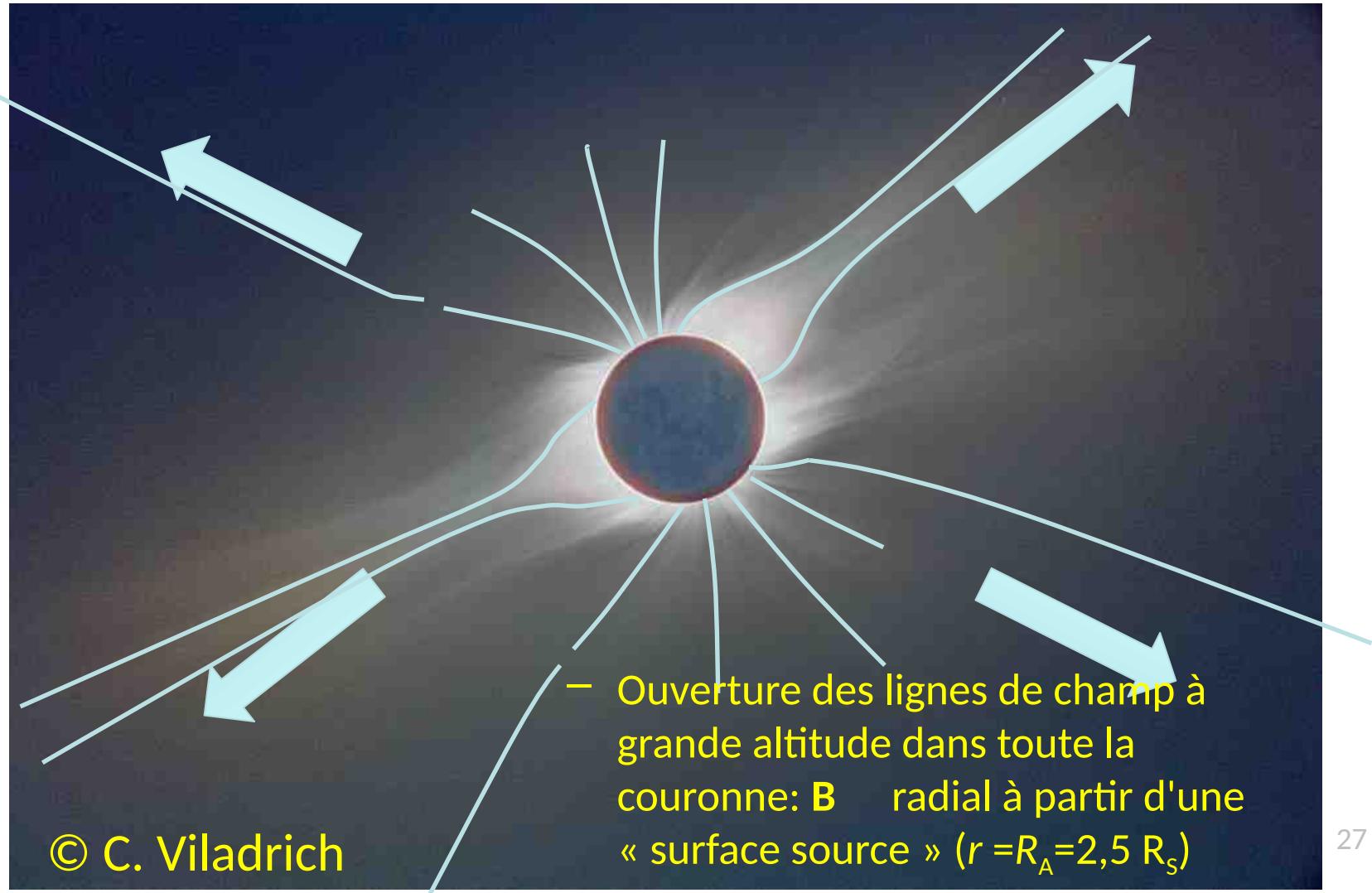
Le champ magnétique de l'Héliosphère

Vent solaire et champ magnétique de la couronne



Le champ magnétique de l'Héliosphère

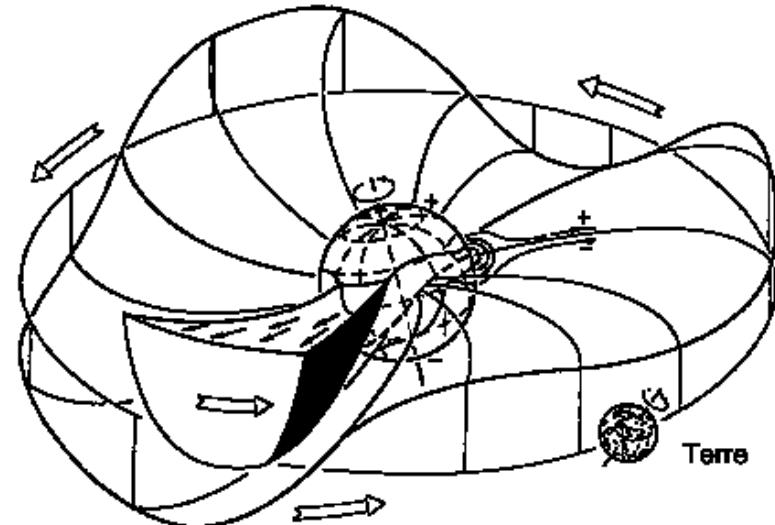
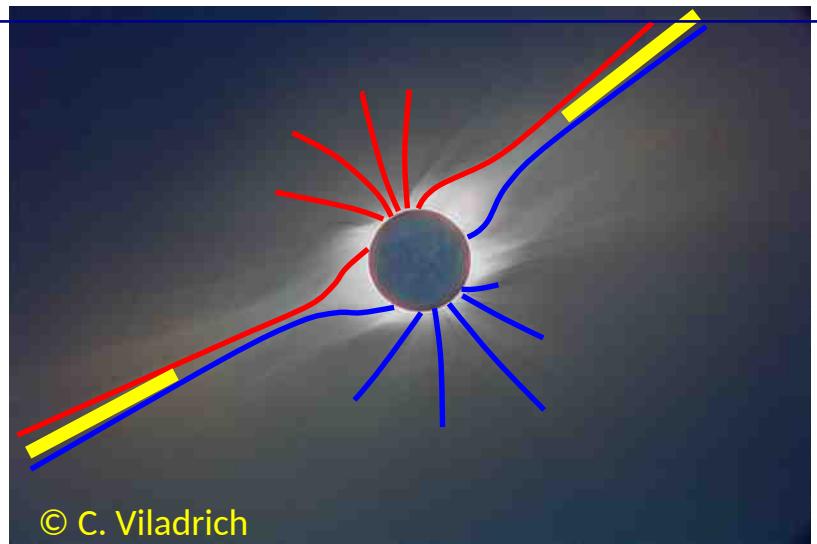
Vent solaire et champ magnétique de la couronne



Le champ magnétique de l'Héliosphère

Vent solaire et champ magnétique de la couronne

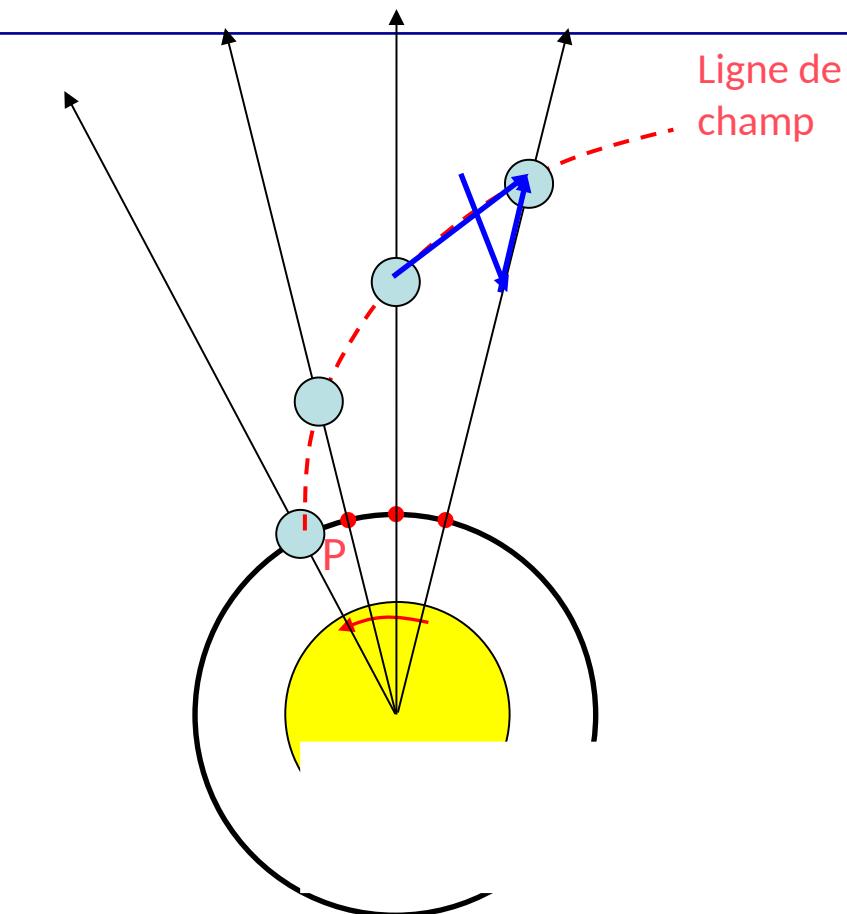
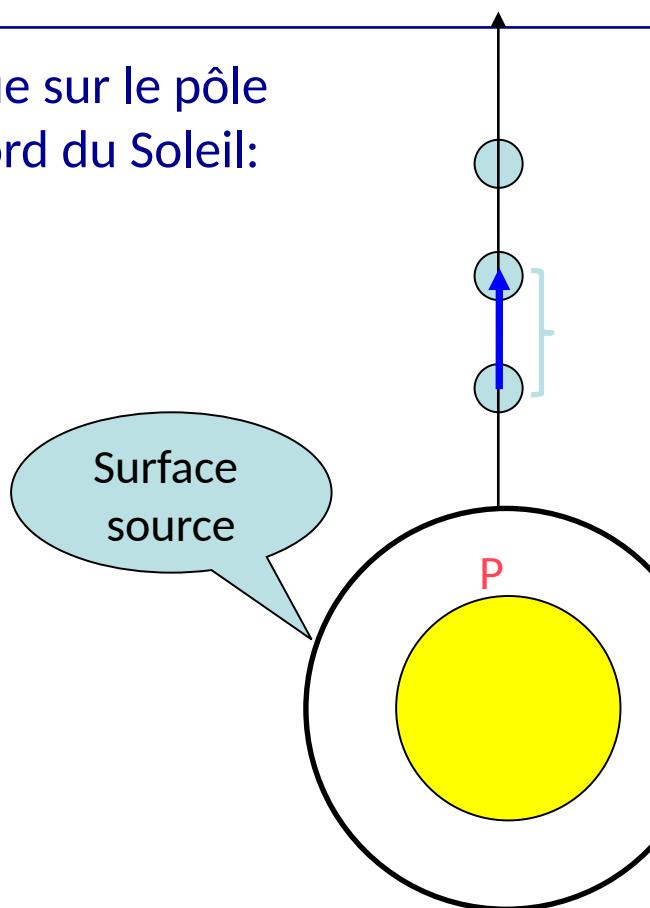
- Nappe de courant héliosphérique (base: ceinture des grands jets)
 - plan équatorial du Soleil si dipôle aligné à l'axe de rotation
 - incliné p/r au plan équatorial et à l'écliptique
 - surface ondulée dans l'espace interplanétaire (« jupe de ballerine »)



Le champ magnétique de l'Héliosphère

Spirale de Parker dans le plan écliptique

Vue sur le pôle
nord du Soleil:

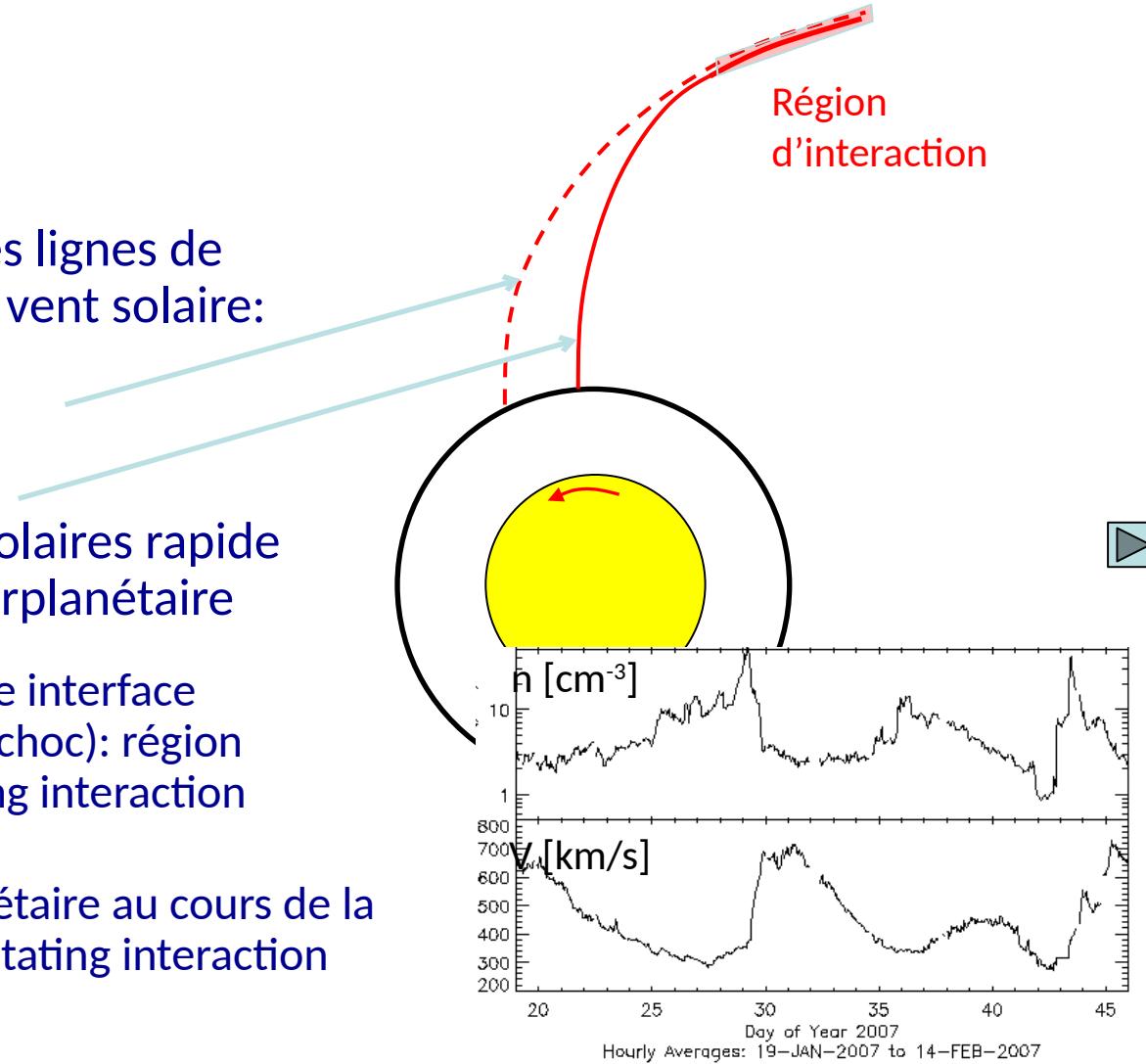


- Vent solaire (hypothèse: symétrie sphérique) pour un Soleil (a) sans (b) avec rotation
- parcelles fluides se meuvent en direction radiale, P suit la rotation du Soleil

Le champ magnétique de l'Héliosphère

Régions d'interaction

- Courbures différentes des lignes de champ selon l'origine du vent solaire:
 - lent (couronne calme)
 - rapide (trou coronal)
- Interaction entre vents solaires rapide et lent dans l'espace interplanétaire
 - collision, formation d'une interface (compression, ondes de choc): région d'interaction (« corotating interaction region », CIR)
 - balaie l'espace interplanétaire au cours de la rotation du Soleil (« corotating interaction region »)

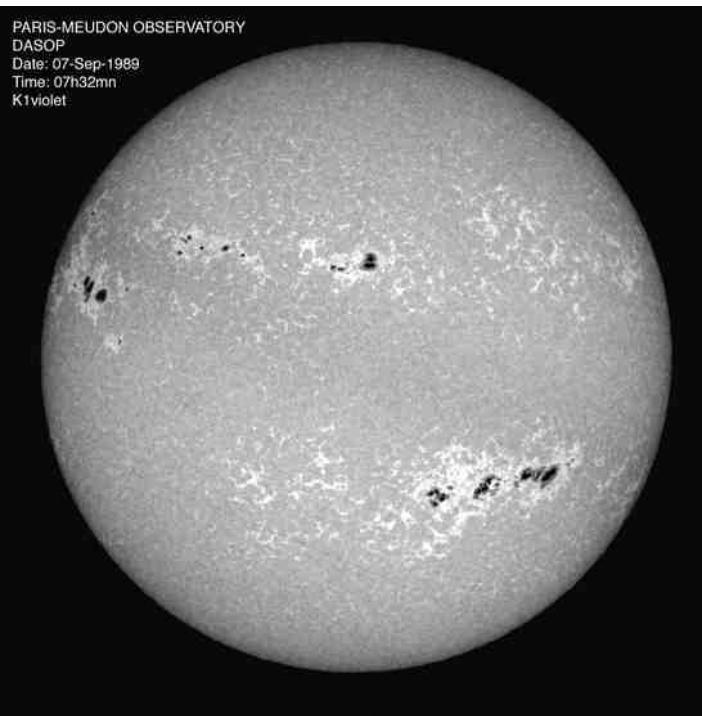


Réserve

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: facules

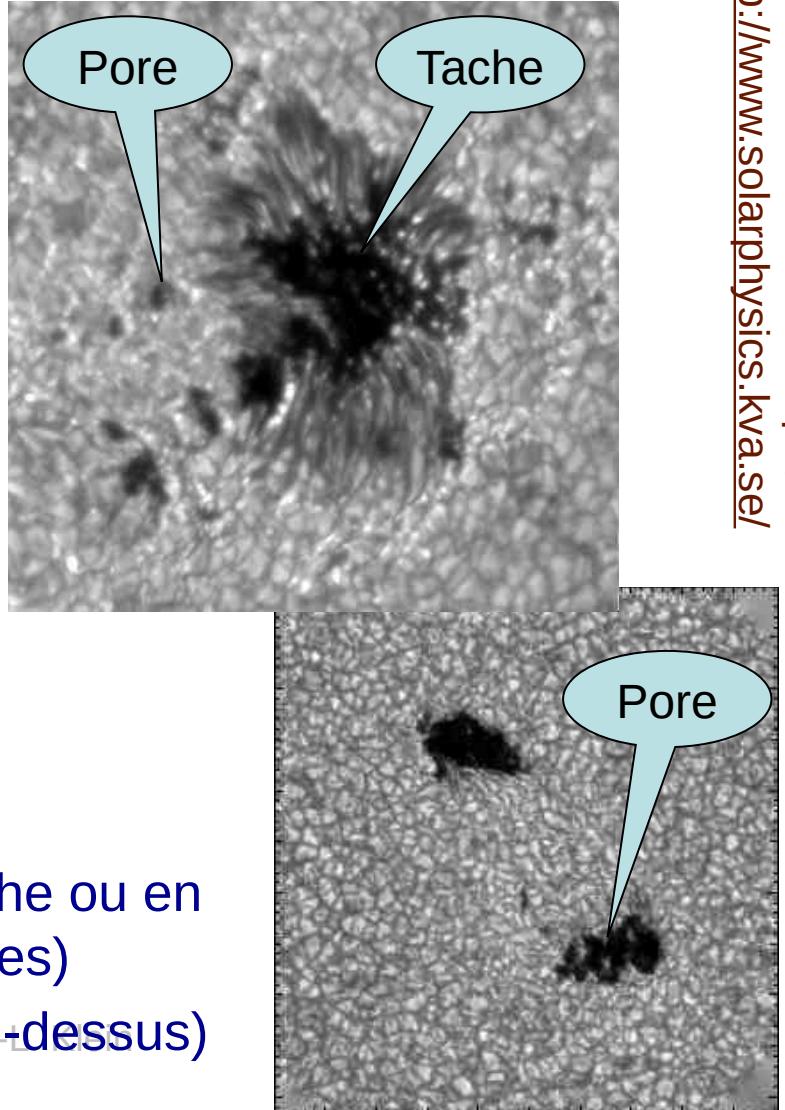
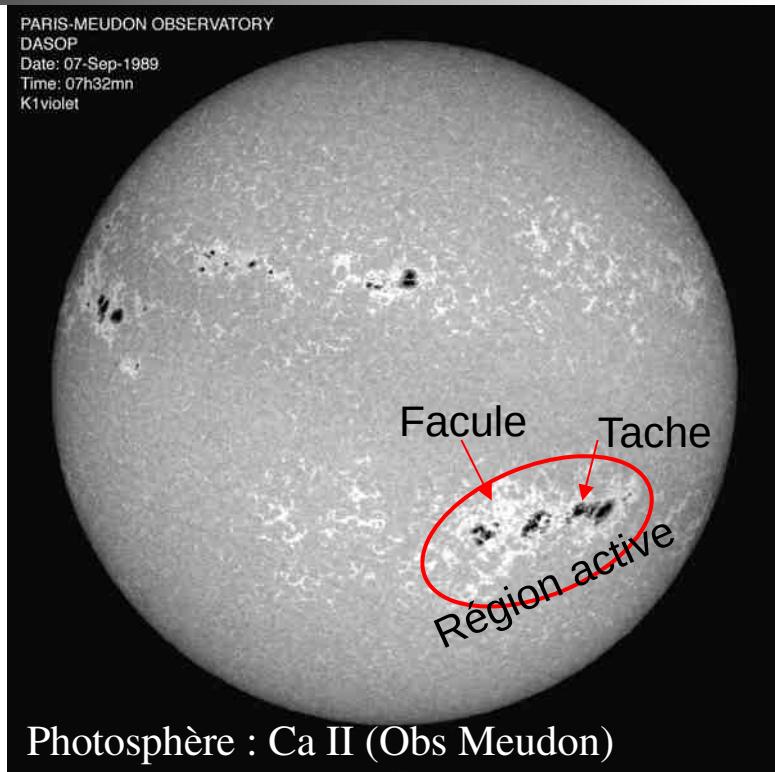
- Facules = structures brillantes, souvent autour des taches
- Très structurées: ensemble de tubes de flux magnétique



- Brillantes, parce qu'à une épaisseur optique donnée, on voit des régions géométriques plus profondes que dans la photosphère ambiante

Le champ magnétique du Soleil

Photosphère: résumé



- Tache solaire: région sombre
- Pore (petite tache, sans pénombre)
- Facule: région brillante autour d'une tache ou en l'absence de tache (vieilles régions actives)
- Région active: l'ensemble

Le champ magnétique de la photosphère

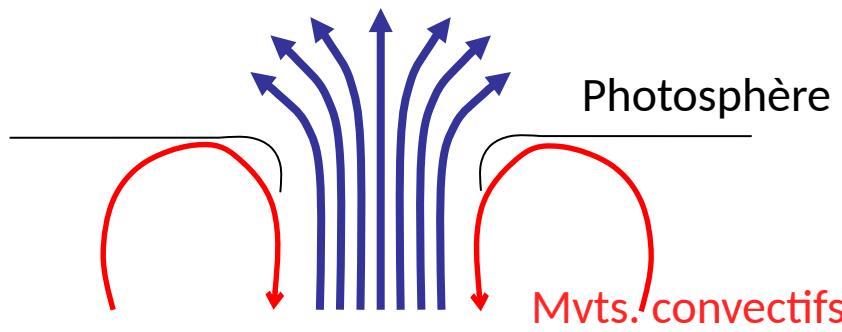
Plasma et champ magnétique: équilibre dynamique

- Cas particulier: équation du mouvement 1-D, lignes de champ magnétique droites perpendiculaires au mouvement du fluide
- Equation du mouvement générale (on néglige la pesanteur)
 - Ecoulement stationnaire:
 - Mouvement en direction x:
 - Equation de continuité:
- Equation du mouvement dans ce cas:

Le champ magnétique de la photosphère

Plasma et champ magnétique: équilibre dynamique

- Champ magnétique et mouvement du gaz ionisé:
- Paramètres de la photosphère, hors tubes de flux magnétique
 - $\rho \approx 2.5 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$, $v_x \approx 10^3 \text{ m s}^{-1}$ (granulation) =>
 - Pression du gaz



- Estimation de l'équilibre entre une région de la photosphère sans champ magnétique et un tube de flux sans mouvement ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$) => les mouvements du gaz concentrent le champ magnétique



MERCI