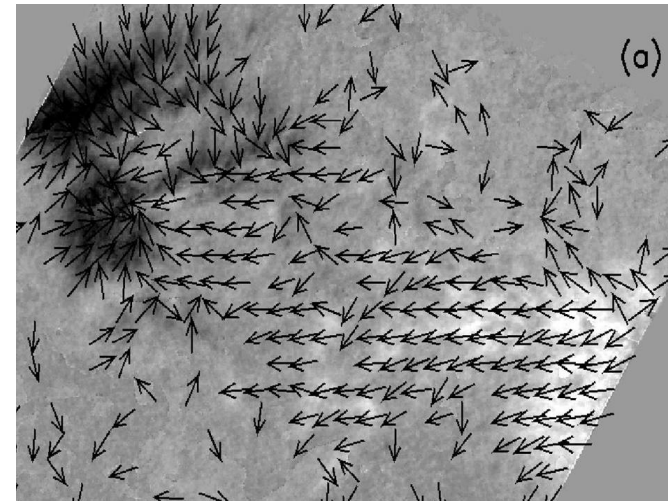
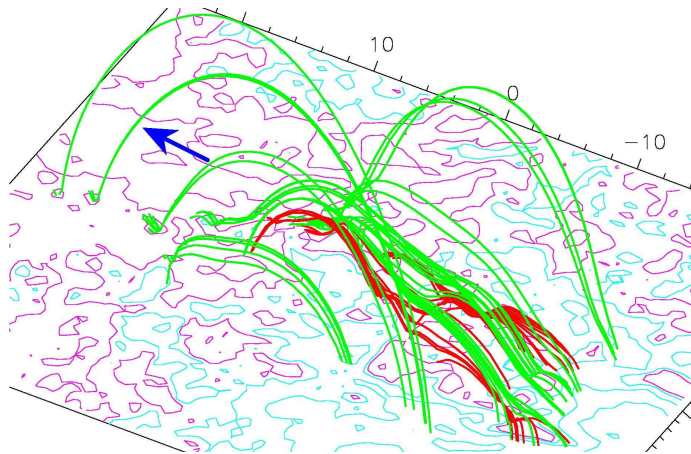


Émergence de champ magnétique dans l'atmosphère

Apport de l'étude à haute résolution spatiale du champ vectoriel



Pariat Etienne
(LESIA, observatoire de Meudon)

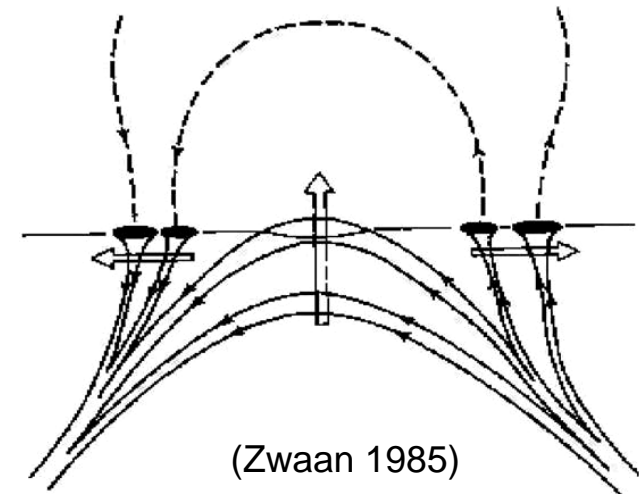
Plan

- **Introduction/Problématique**
- Campagne d'observation FGE (2000).
 - Données
 - Résultats
- Perspectives: Campagne d'observations THEMIS (2004, 2005)

Comment le champ magnétique émerge-t-il dans l'atmosphère ?

Modèle classique

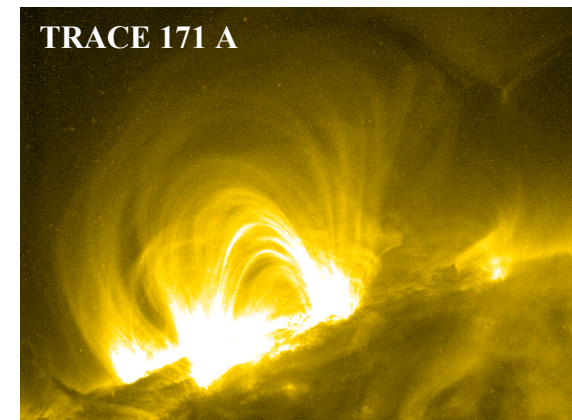
- **Instabilité magnétique** au niveau de la tachocline.
- Tubes de flux magnétique s'élèvent par **poussée d'Archimède**.
- Taches solaires situées à l'intersection de la photosphère et des tubes de flux.



Problème de la traversée de la photosphère :

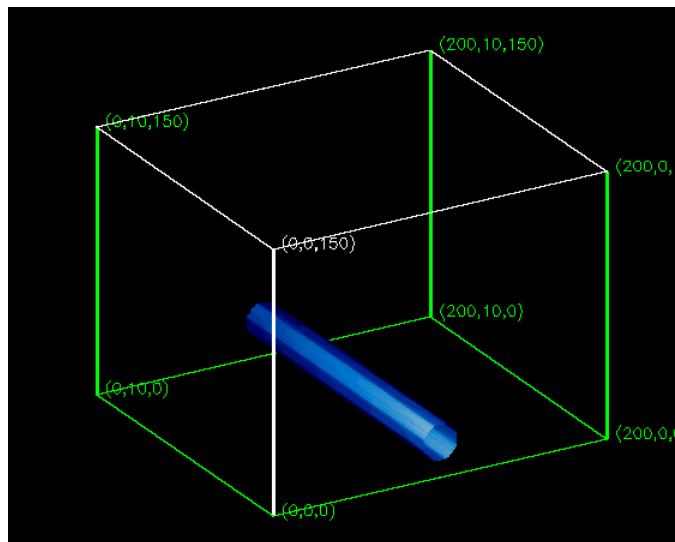
$$H_{P,phot} \sim L_{tube\ flux} ; \rho_{phot} < \rho_{tube\ flux} ; \beta \sim 1$$

La poussée d'Archimède ne fonctionne plus au niveau de la photosphère.

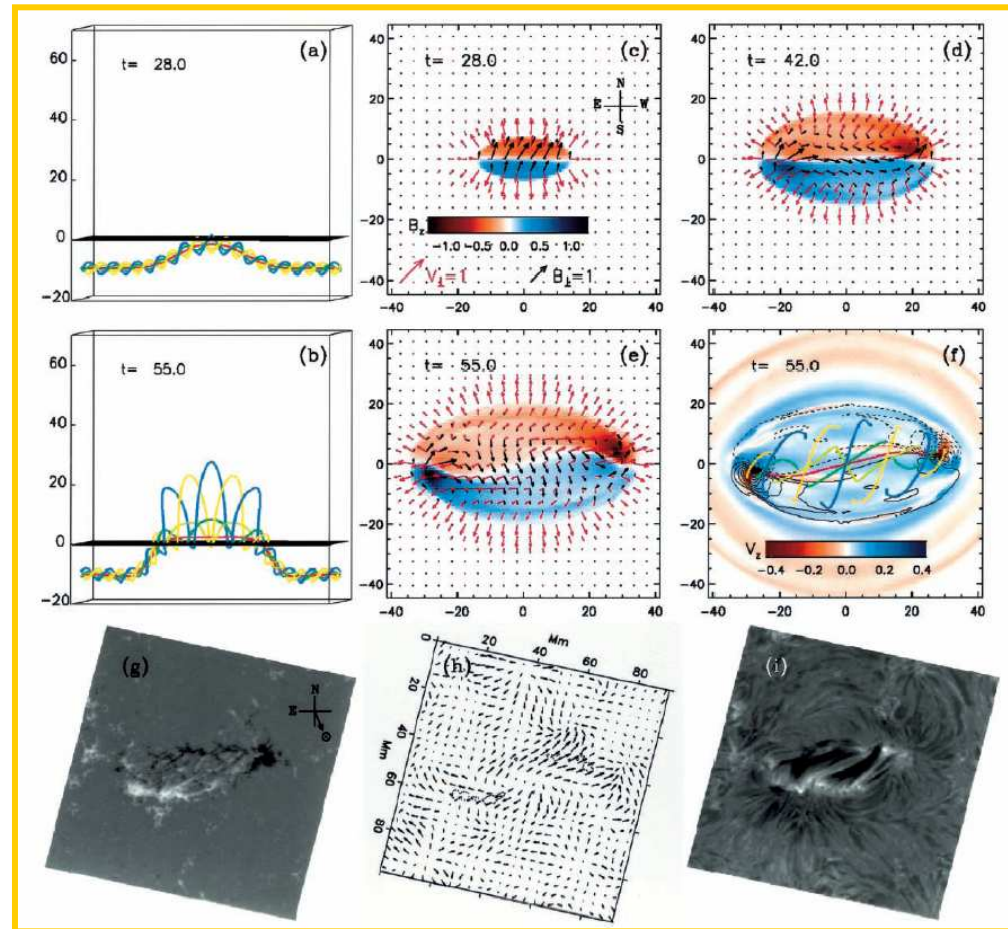


Simulation numérique d'émergence du champ magnétique

- Simulation (2D; 2,5D ; 3D) d'émergence de tube de flux twisté dans une atmosphère stratifiée (Moreno-Inertis 1996; Emonet 1998; Fan 2001; Magara 2001, 2002, 2004; Archontis 2004; ...).



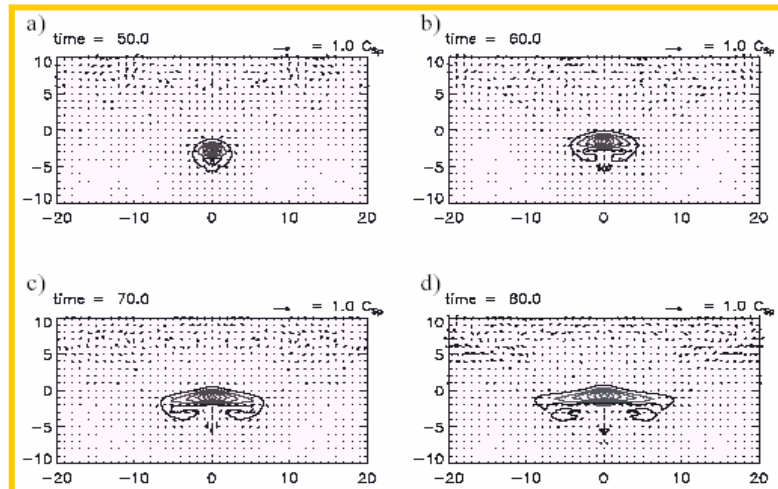
Magara (2001)



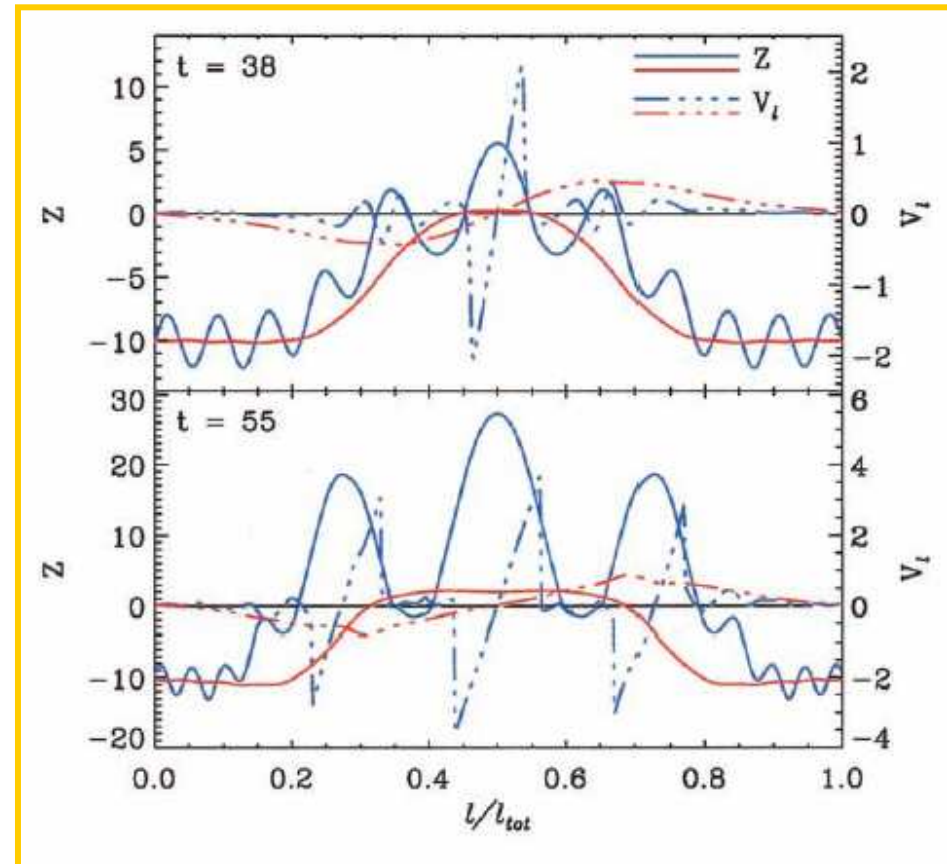
Fan (2001)

Simulation numérique d'émergence du champ magnétique

- Pb du choix des paramètres: tubes de flux **très torsadés**.
- Matière piégée dans les creux magnétiques empêche l'émergence complète du tube de flux.



Magara (2001)



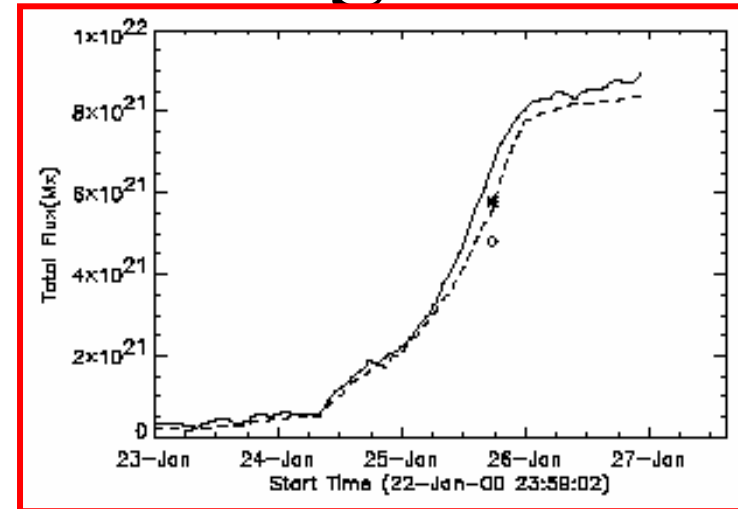
Fan (2001)

Comment les tubes de flux traversent la photosphère?

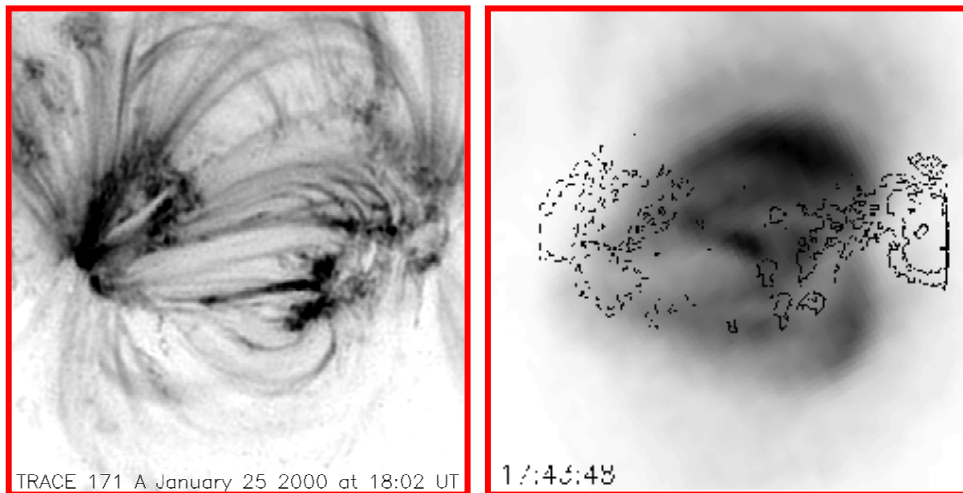
- Introduction/Problématique
- **Campagne d'observation FGE (2000).**
 - **Données**
 - Résultats
- Perspectives: Campagne d'observation THEMIS (2004, 2005)

Campagne d'observations d'une région active émergente

- Région active NOAA 8844
- Augmentation rapide du flux: 24/01/2000
- Observation coordonnée le 25/01: région située à 5°N 30°W



Schmieder et al. (2004)



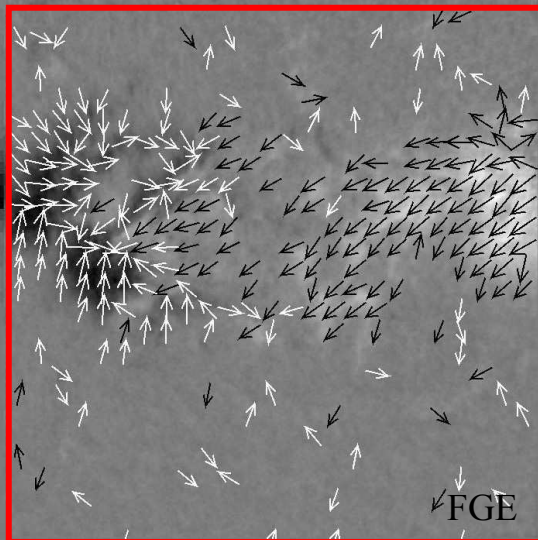
- TRACE: **EUV**, **couronne**.
- SXT (YOHKOH): **X-mou**, **couronne**.
- MDI (SoHO): **Continu (Ni I)**, observations polarisées, **photosphère**.
- Flare Genesis Experiment (FGE): **Ca I**, **H α** , observations polarisées, **photosphère et chromosphère**.

Flare Genesis Experiment

- Ballon: 17 jours de vol en Antarctique
- Télescope Cassegrain, 80 cm Ø, F/1.5
- Muni d'un miroir Tip-tilt
- Résolution spatiale en vol: 0.5"

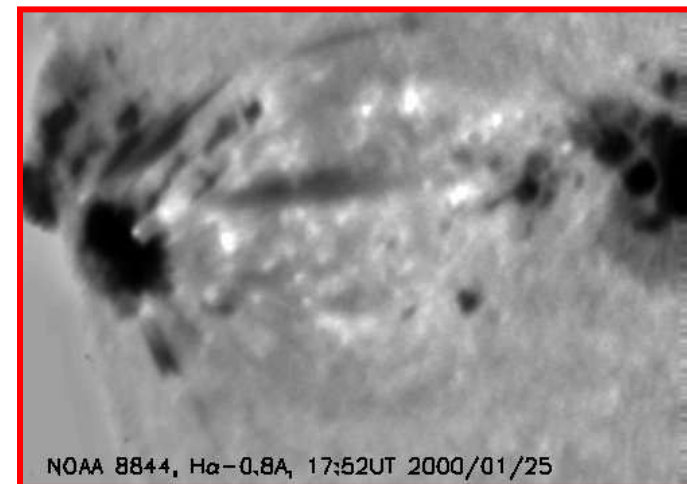


Magnétogramme



MDI

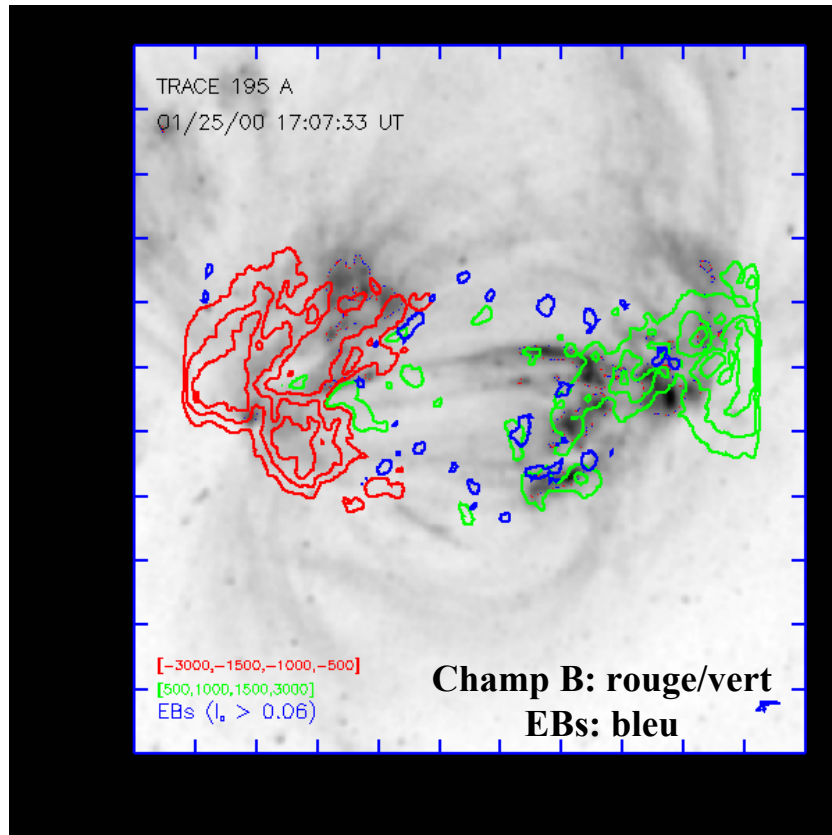
Magnétographe vectoriel imageur: Analyseur de polarisation + Filtre étalon Fabry-Pérot



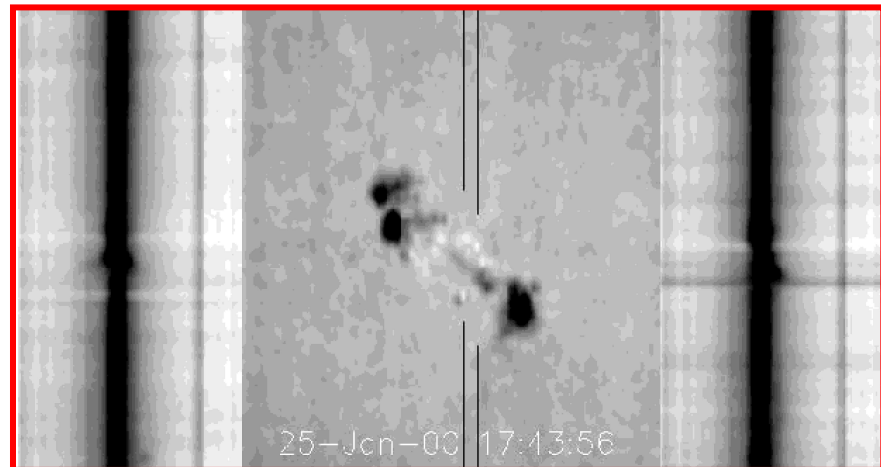
- **Image:** Aile bleue raie $H\alpha$ (-0.8 \AA):
chromosphère basse: Bombes d'Ellerman

Les Bombes d'Ellerman (EBs)

- Caractéristiques observationnelles:
 - Durée de vie \sim 10-14 minutes
 - Spectre en H α : Absorption dans le centre raie, émission dans les ailes : **origine chromosphérique** de l'émission.
 - Énergies de l'ordre des micro éruptions: $[1.2 \times 10^{20} ; 3 \times 10^{21}]$ Joules.
 - Situées sur lignes neutres de **B**



Quelle est l'origine des EBs?



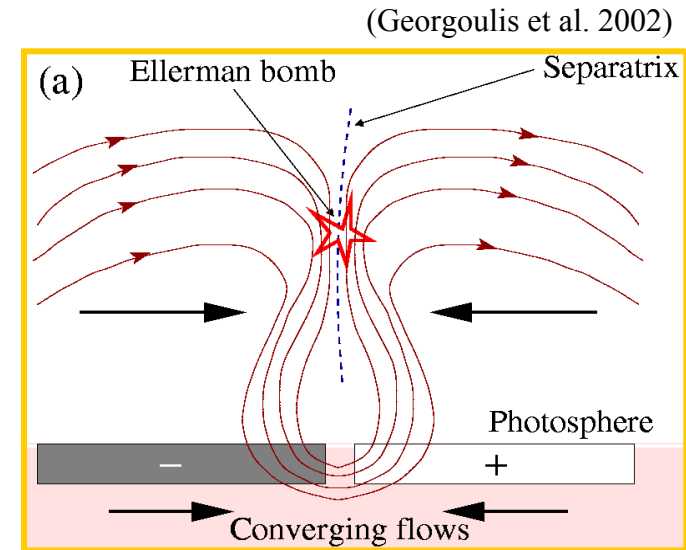
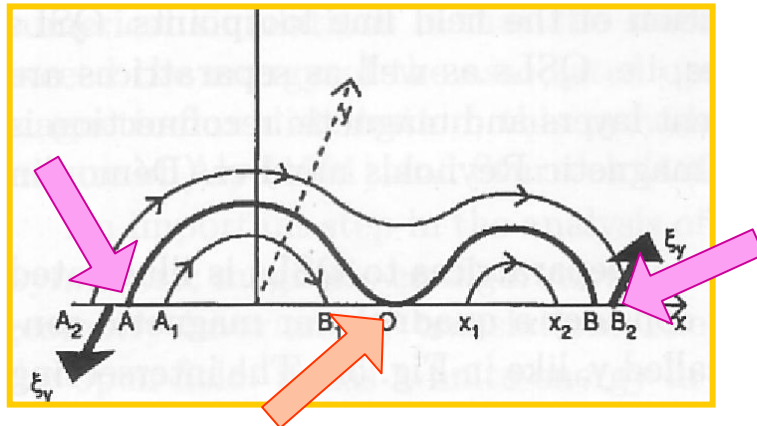
(IVM, image courtesy of B.J. Labonte)

Sites préférentiels de reconnexion: les Bald Patches (BPs)

Les EBs peuvent-elles s'expliquer par des reconnexion au niveau des BPs?

- BPs: Région où \mathbf{B} est **tangent** à la photosphère (ligne d'inversion) et où les lignes de champ sont **courbées vers le haut** (vers la chromosphère):

$$B_z = 0 \text{ et } \vec{B} \cdot \vec{\nabla} B_z > 0$$



L'embrillancement peut se produire:

- **Au niveau du BP lui-même.**
- **Au niveau des pieds des séparatrices** (lignes de champ magnétique qui passent par les BPs)

Étude lien EBs/BPs \implies Déterminer \mathbf{B} au dessus de la région active \implies Extrapolation de \mathbf{B}

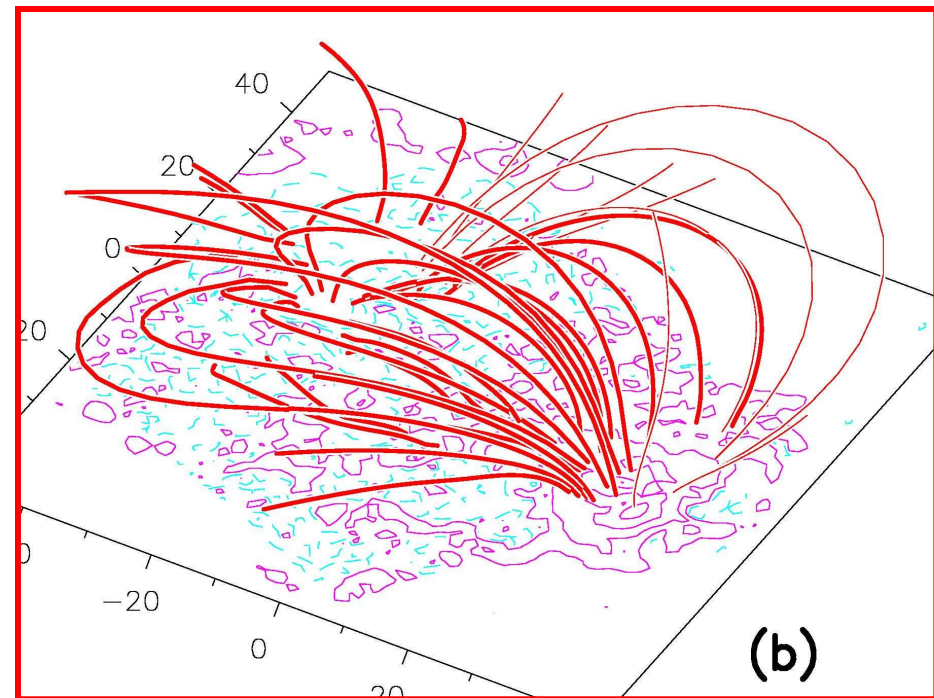
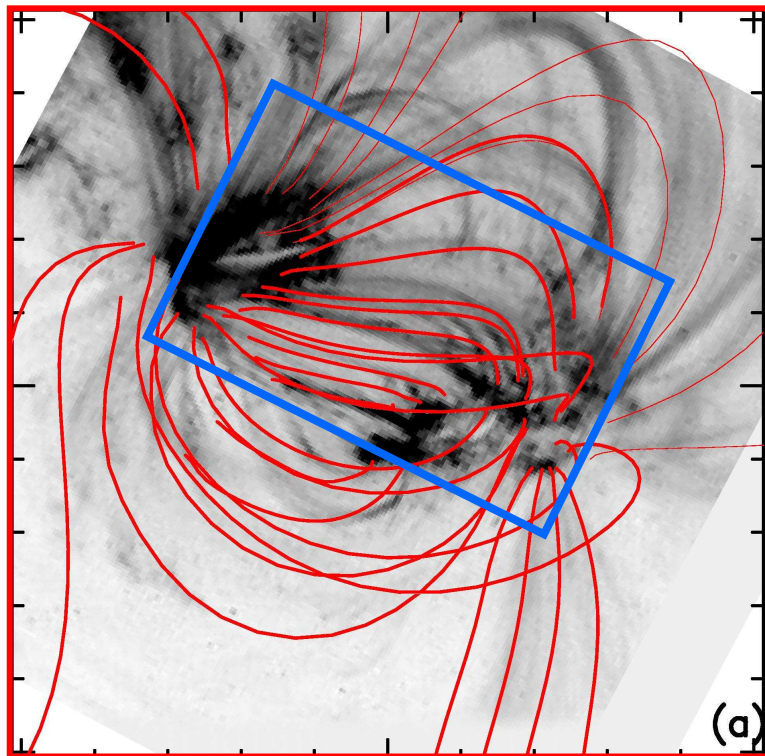
Extrapolation du champ magnétique

Équation du champ sans force linéaire à résoudre:

$$\nabla^2 \vec{B} + \alpha^2 \vec{B} = 0$$

Observations utilisées pour fixer le paramètre libre α

- Comparaison de certaines lignes extrapolées avec les boucles de TRACE.



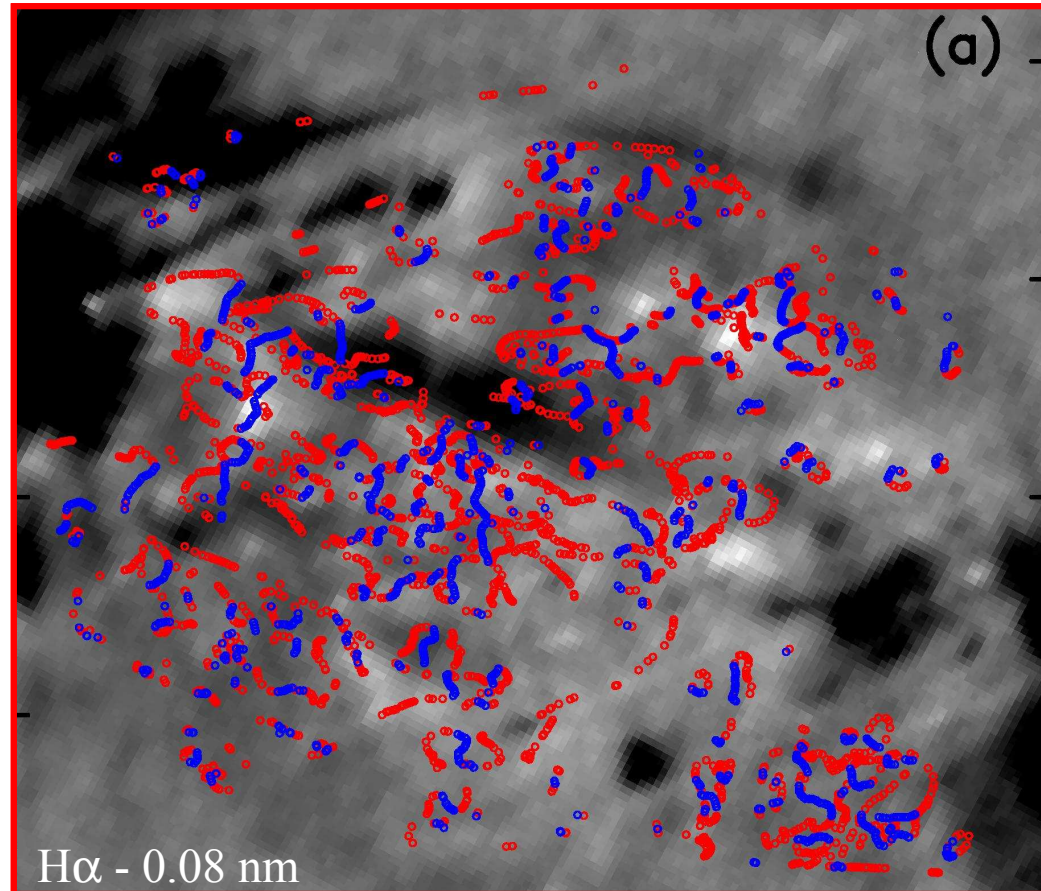
$$\alpha = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ Mm}^{-1}$$

Plan

- Introduction/Problématique
- **Campagne d'observation FGE (2000).**
 - Données
 - **Résultats**
- Perspectives: Campagne d'observations THEMIS (2004, 2005)

Lien Ebs/BPs

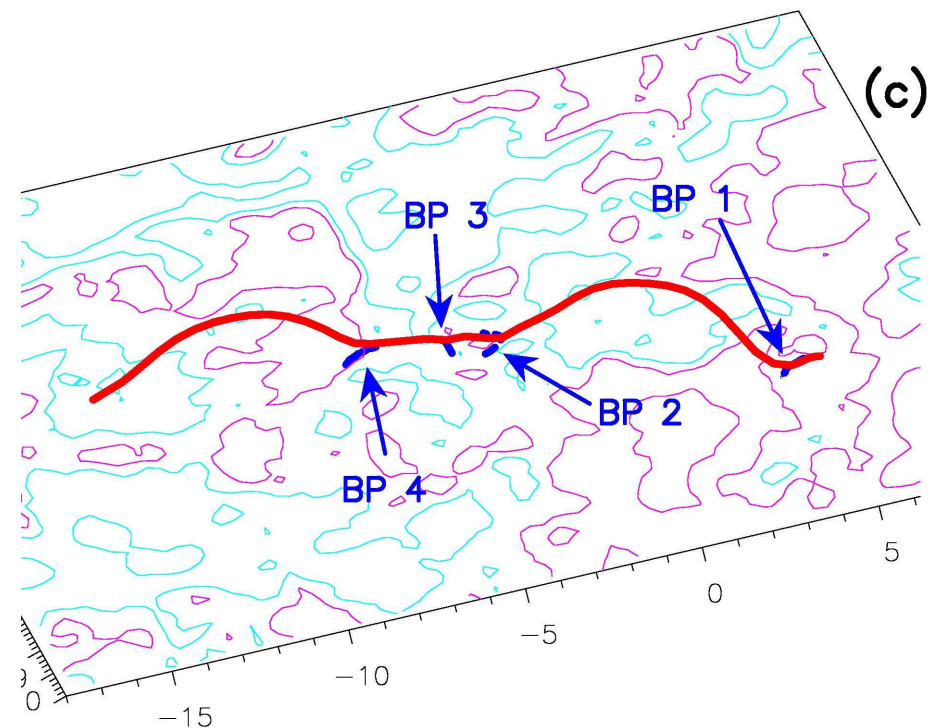
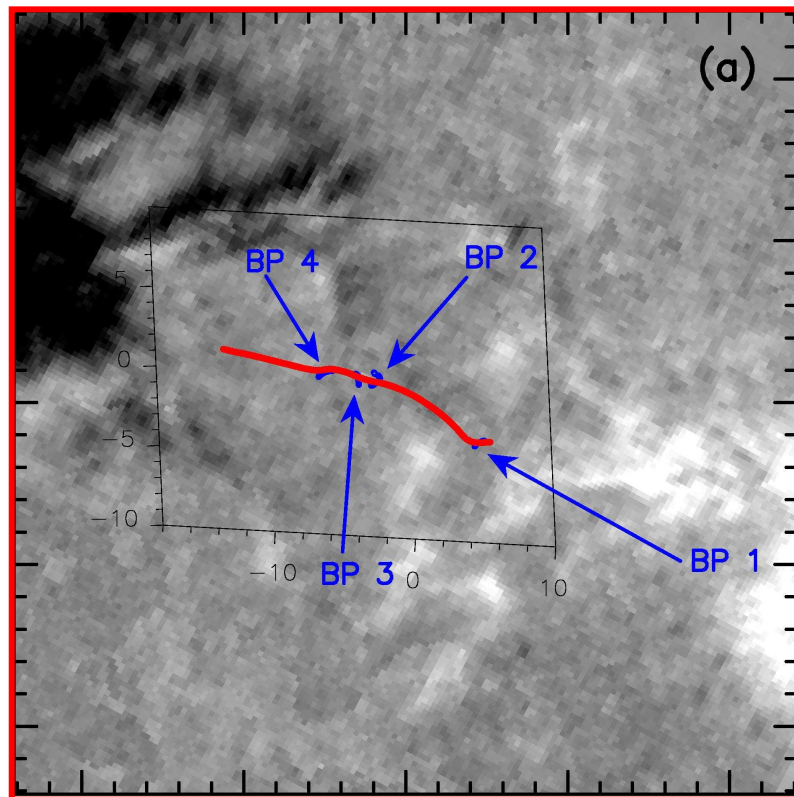
- 23/47 (49 %) des EBs (○) associées avec des BPs (dist. aléatoire: 30 %).
- 15/47 (32 %) des EBs (□) associées avec séparatrices (dist. aléatoire: 20 %).
- 9/47 (19 %) des Ebs (□) non associées. (dist. aléatoire: 50 %)
- + de 80 % des EBs associées à des structures magnétiques.



• Preuve observationnelle que les EBs sont bien dues à un mécanisme de reconnexion dans la basse chromosphère

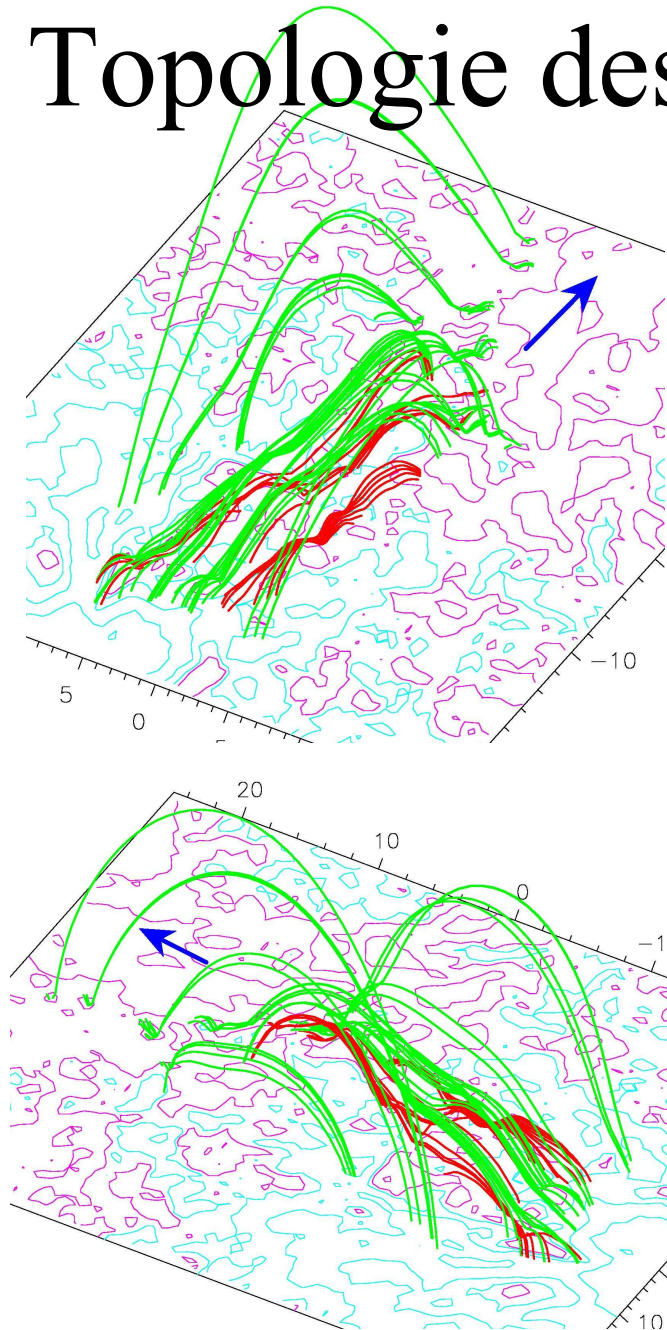
Analyse topologique:

- Dans la chromosphères les tubes de flux sont ondulés et sont topologiquement connectés à la photosphère par des BPs.

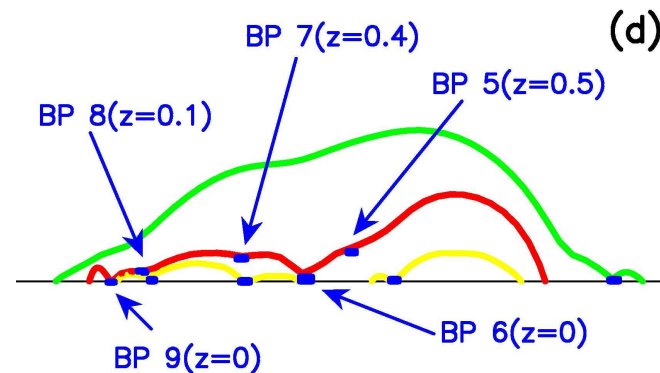
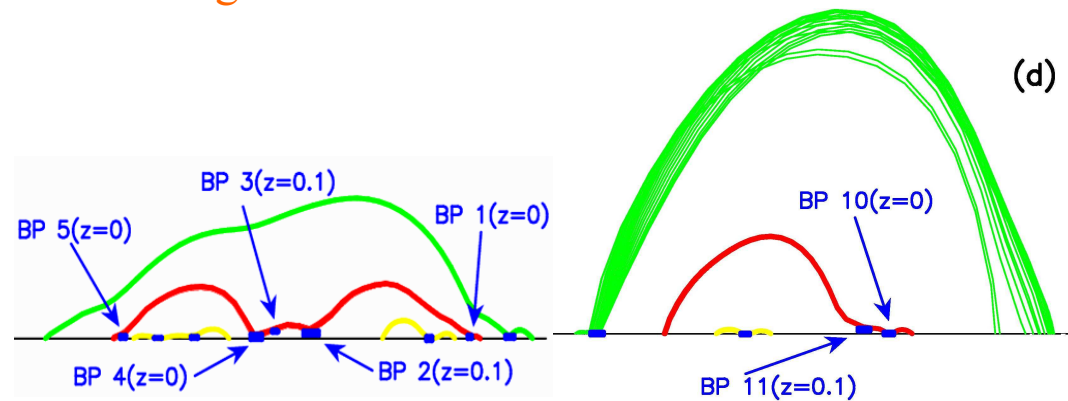


6 tubes de flux ondulés identifiés à $\sim 17\text{h}55$ UT au centre de la région active

Topologie des tubes : Hiérarchisation



- Tubes très ondulés près de la photosphère avec petites arcades.
- Tubes de moins en moins ondulés avec la hauteur: Tubes ondulés \rightarrow Tubes en Ω
- \neq types de ligne de champ : \neq étapes de l'émergence.

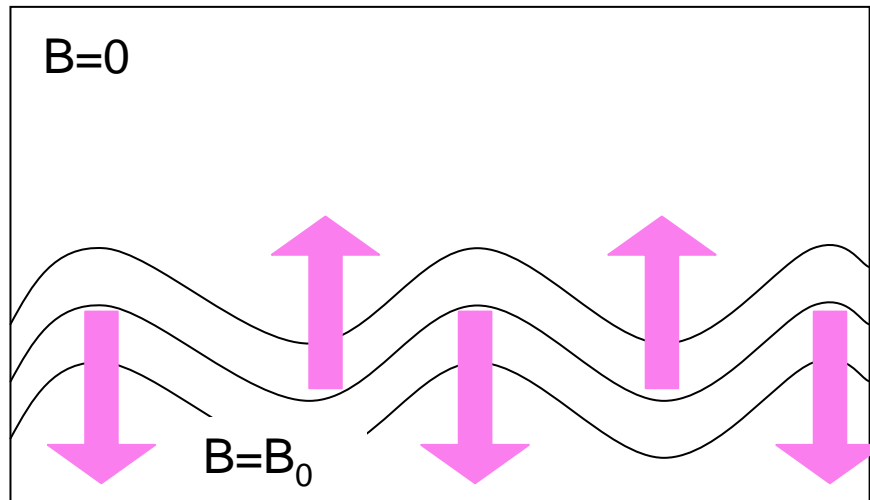
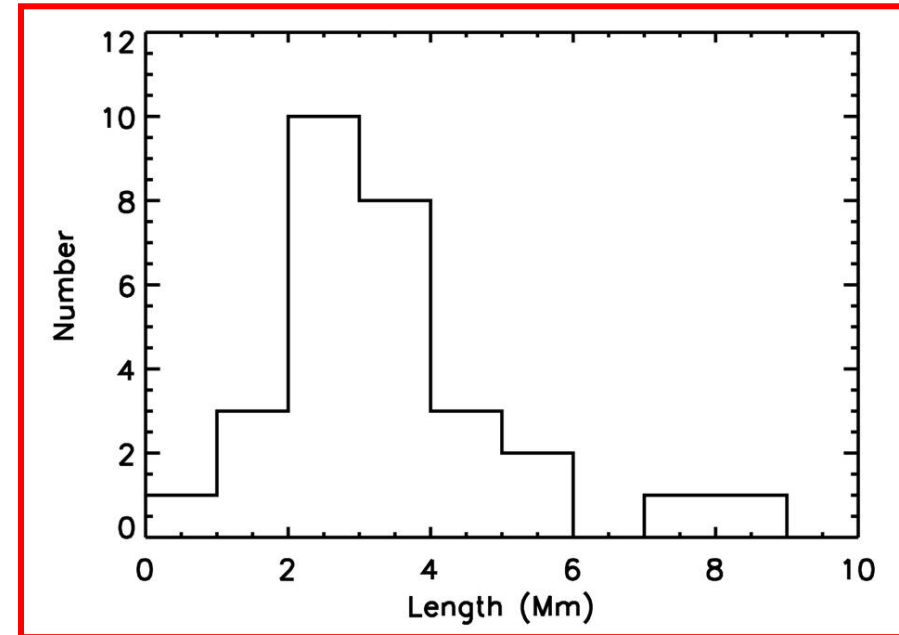


Qu'est ce qui ondule les tubes de flux ?

- Distribution de distance entre deux BPs consécutifs au sein d'un même tube de flux ondulé.
 - Pic: ~ 3 Mm
 - Seuil critique: ~ 2 Mm



Compatible avec l'instabilité de Parker.



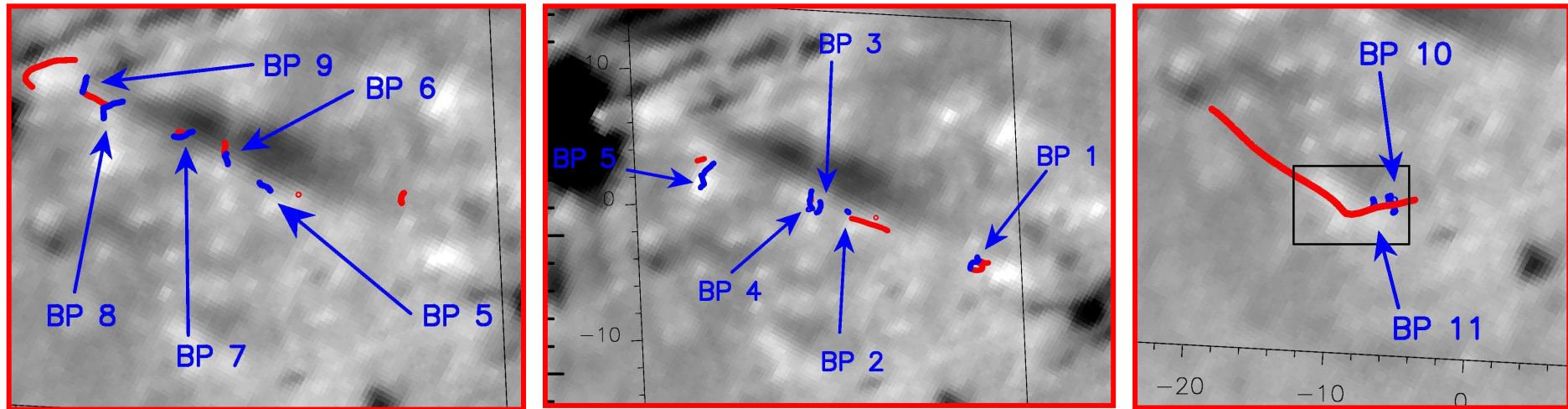
Atmosphère avec couche magnétisée:

- Équilibre mécanique
- Instabilité de Rayleigh-Taylor
- Tension de \mathbf{B} : résiste aux déformations

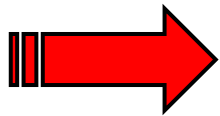
Ondulations pour $\lambda > \lambda_{\text{Parker,crit}}$
 $\lambda_{\text{P,c}} \sim 2$ Mm

Et la reconnexion dans tout ça ?

- **Corrélation EBs/BPs** vérifiée aussi pour les tubes ondulés.



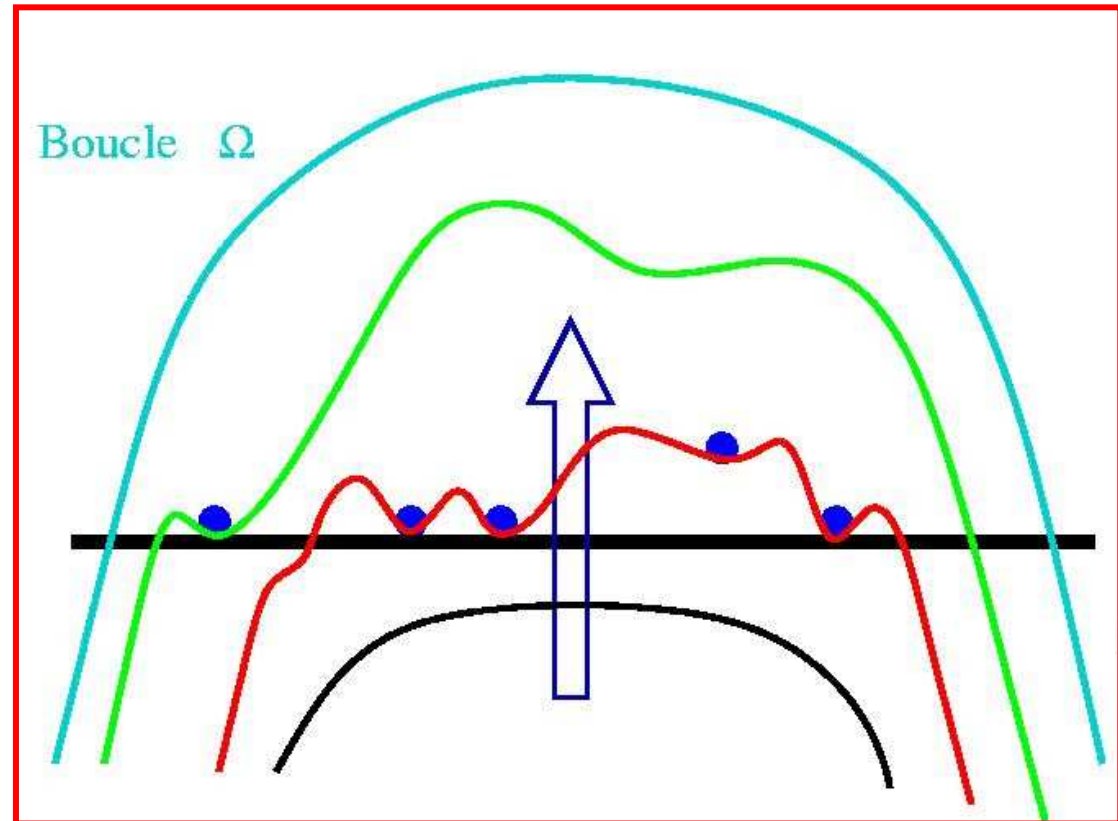
- La reconnexion magnétique: diffusion du champ magnétique; permet aux tubes de flux magnétique de traverser la chromosphère tout en se débarrassant du plasma piégé aux niveaux des creux magnétiques.



La reconnexion est un mécanisme clef de l'émergence du champ magnétique dans l'atmosphère solaire.

Résumé campagne FGE

- Les Bombes d'Ellerman sont dues à des mécanismes de reconnexion dans la basse chromosphère au niveau de séparatrices passant par des Bald Patches
- Les Bombes d'Ellerman sont les marqueurs de l'émergence de tubes de flux magnétique ondulés.
- Scénario amélioré d'émergence des tubes de flux magnétique dans l'atmosphère solaire (Pariat et al. ApJ 2004):



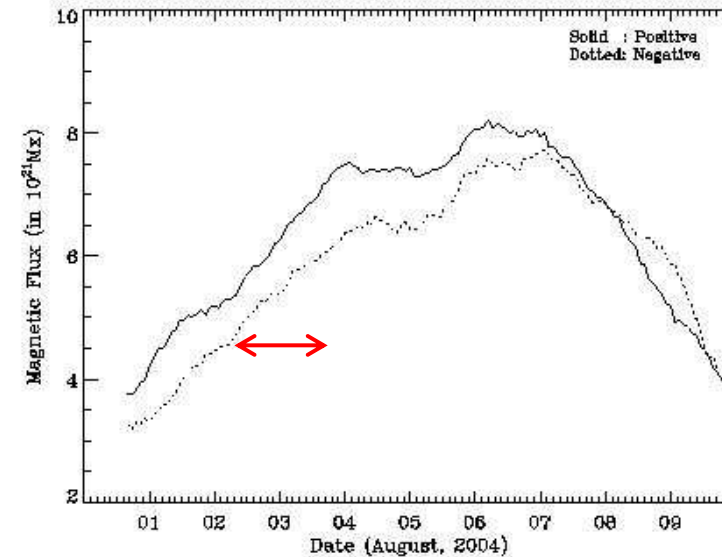
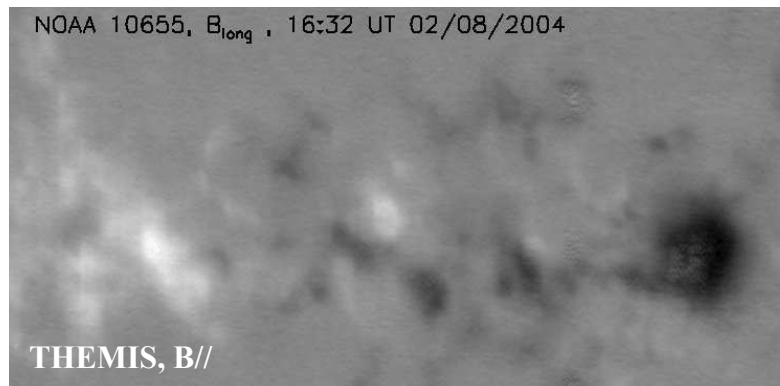
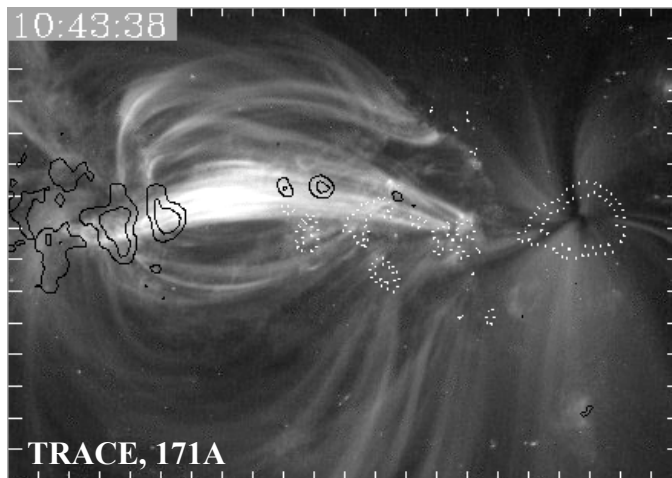
- Observations d'autres régions actives émergentes: campagne d'observations coordonnées avec THEMIS: Mesure à haute résolution angulaire du champ vectoriel

Plan

- Introduction/Problématique
- Campagne d'observations FGE (2000).
 - Données
 - Résultats
- **Perspectives: Campagne d'observations THEMIS (2004, 2005)**

Campagne THEMIS 2004

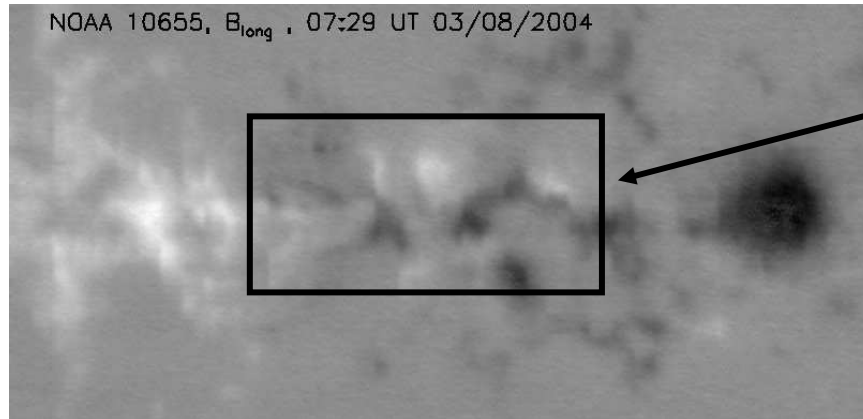
Région active NOAA 10655:
apparition de polarités au centre
d'une région pré-existante



Campagne multi-instruments:

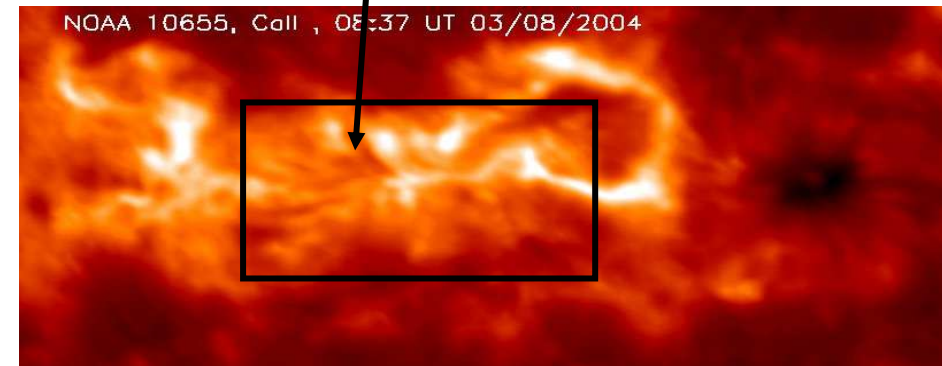
- TRACE: EUV, couronne.
- MDI (SoHO): Continu (Ni I), observations polarisées, photosphère.
- THEMIS, MSDP: Na I (B//); Ca II, observation polarisées, photosphère et chromosphère.
- THEMIS, MTR: 6302 Fe I, H α , observation polarisées, photosphère et chromosphère.

Campagne THEMIS 04

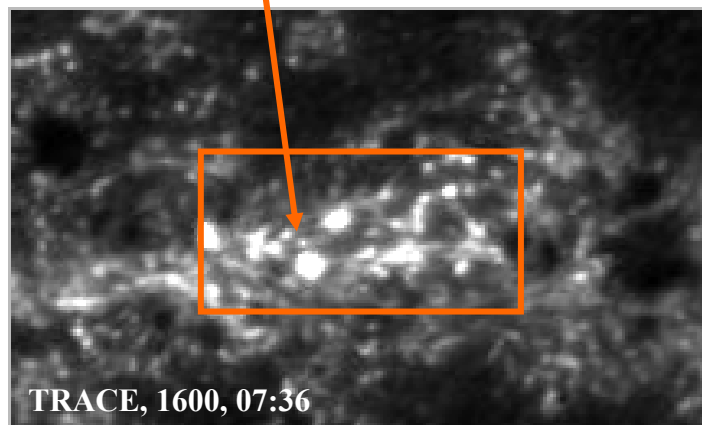


Présence de polarités parasites au centre de la région active.

Émergence de boucles: Arch Filament System



Nombreux points brillants visibles dans le continu UV. Lien entre Bombes d'Ellerman et points brillants UV (Schmieder et al. 2004).



Corrélation entre les polarités liés à l'émergence du champ magnétique et de multiples événements reconnectifs. (Pariat et al, en préparation)

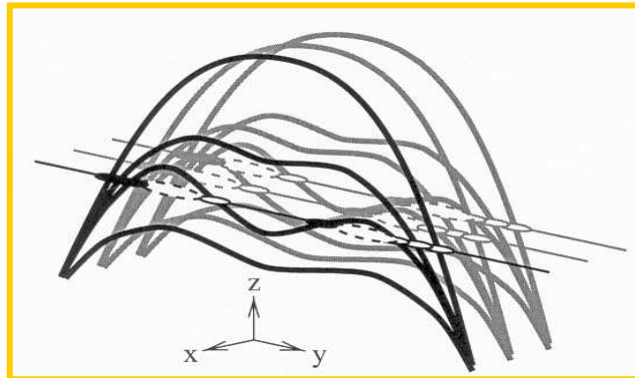
Campagne THEMIS 2005

Campagnes coordonnées: 13-24 août 2005

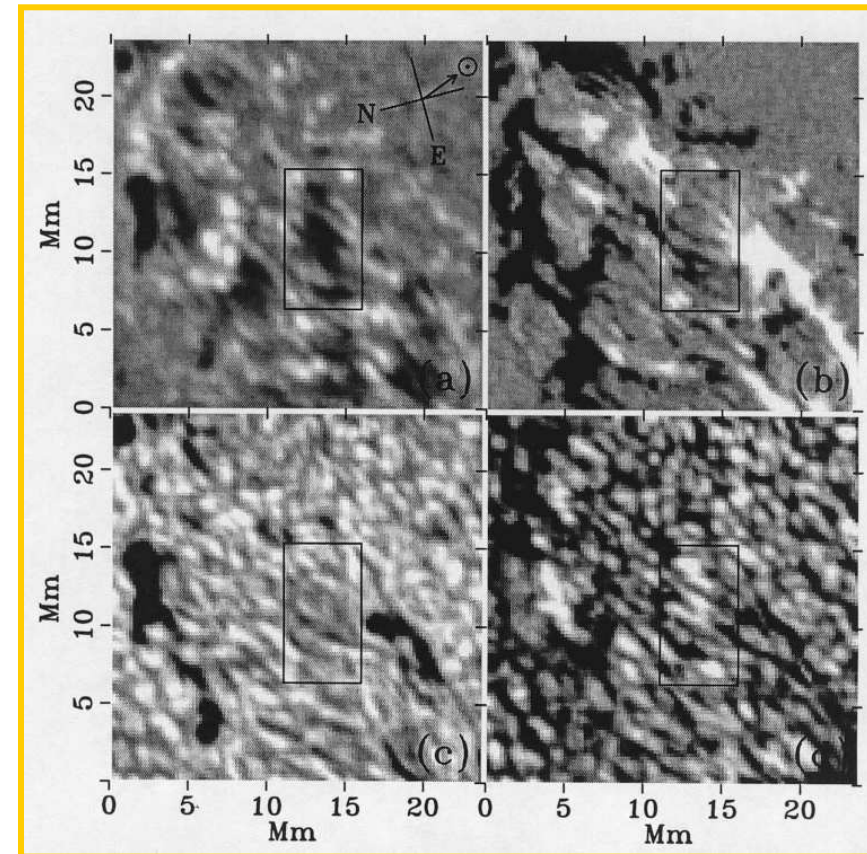


Structures fines de l'émergence:

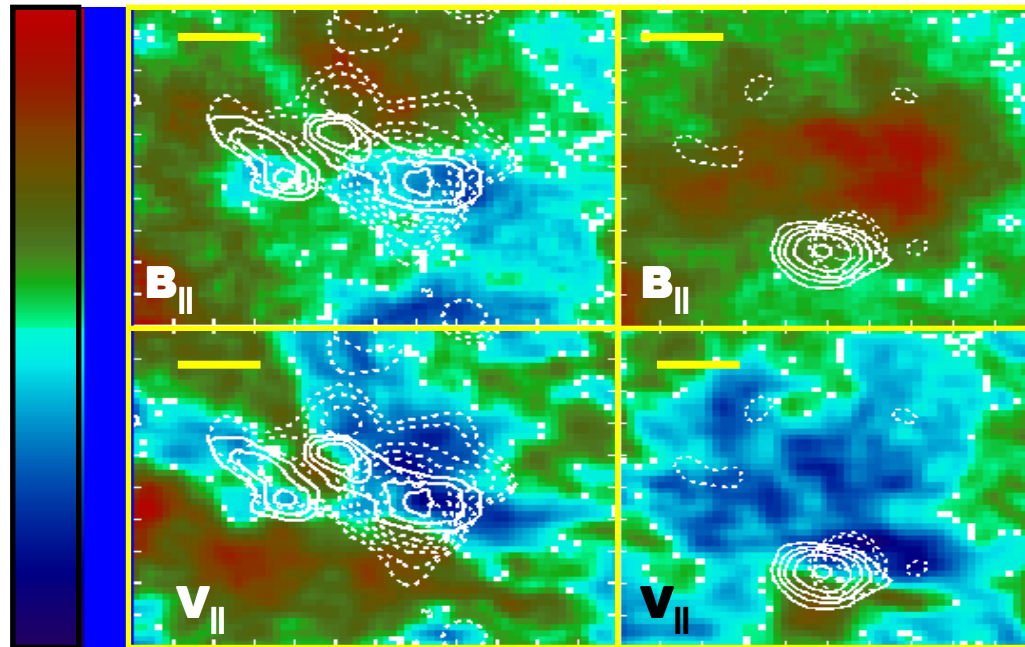
- Dopplergrammes présentent des bandes parallèles régulières:
existence de « sea-serpents » ?



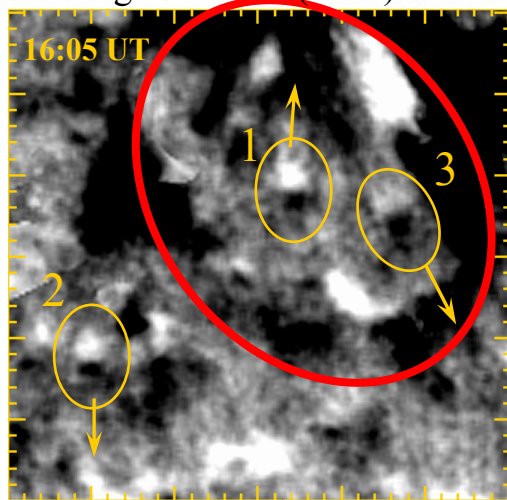
Strous et Zwaan. (1999)



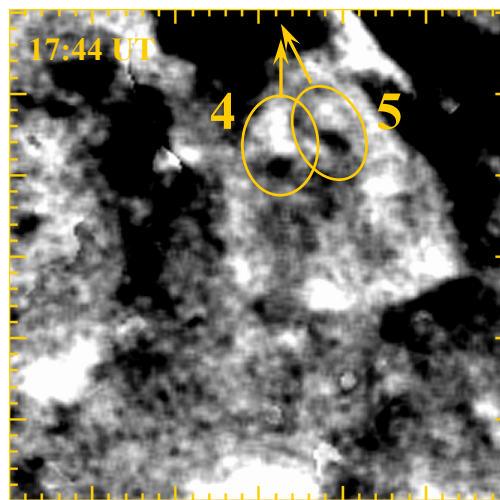
Les bombes d'Ellermans



Georgoulis et al. (2004)



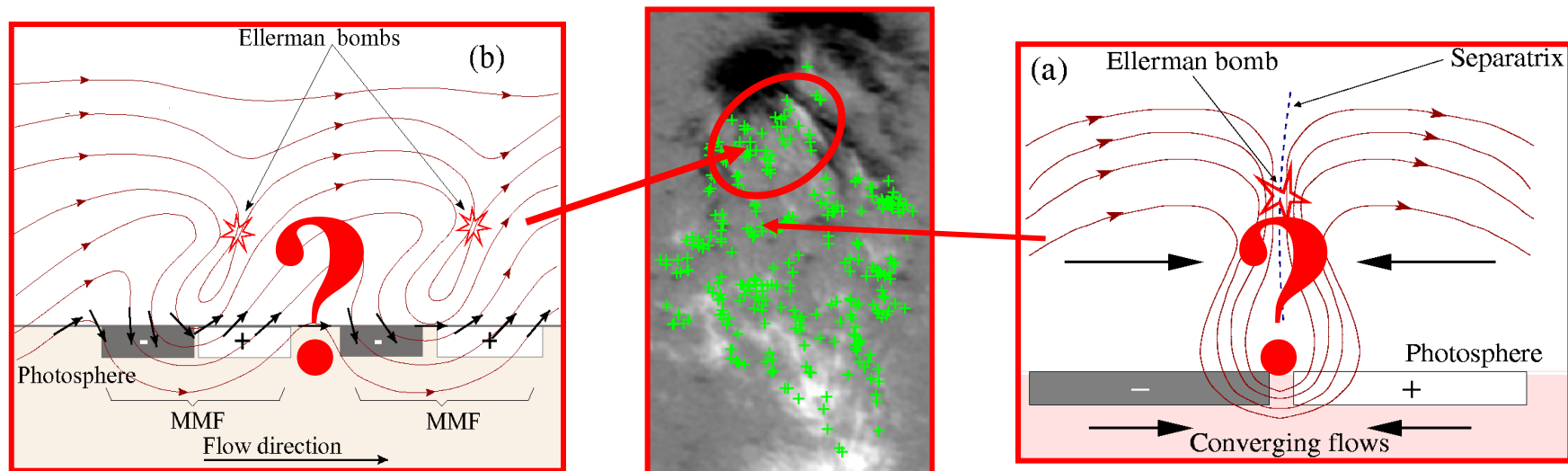
Bernasconiet al. (2002)



- EBs généralement situées près des **lignes neutres** du champ **B**.
- EBs associées à des **flux descendant** (relatif ou absolu).
- EBs se déplacent avec les flux horizontaux du plasma: Moving Magnetic Features (MMF) dans la supergranule.

Mécanismes de formation ?

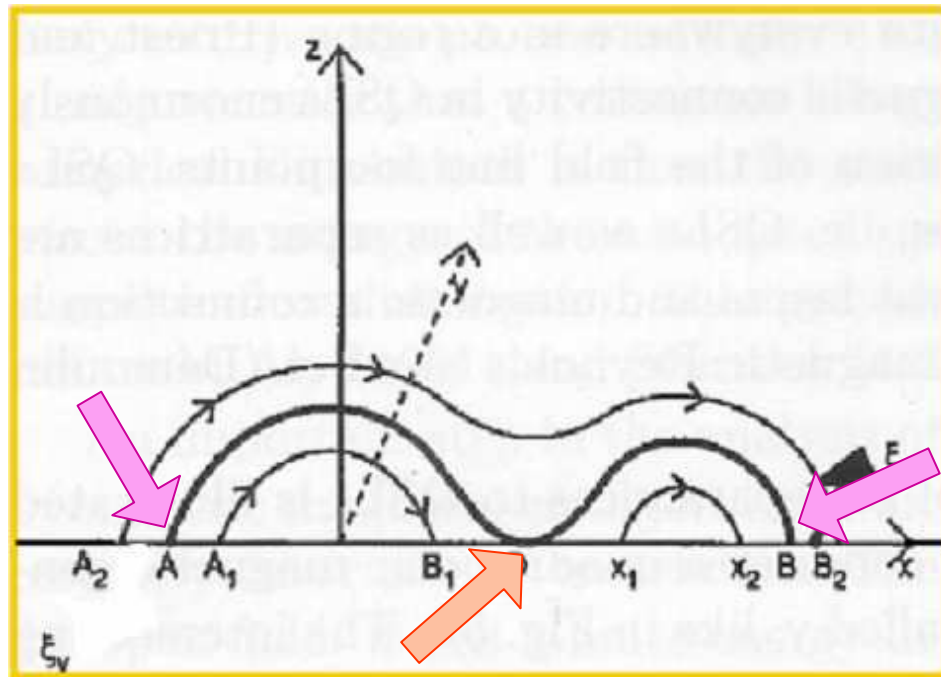
- Diffusion turbulente dans une couche opaque en expansion (Severny 1968).
- Chauffage ($\Delta T > 1500$ K) et compression ($\rho = 5\rho_0$) de la chromosphère basse: compression isotherme ou onde de choc (Kitai 1983).
- Instabilité de Kelvin-Helmoltz qui perturbe une région de flux laminaire: dissipation ohmique (Diver et al. 1995).
- Reconnexion : - Modèle MHD (Hu et al. 1995 ; Ji et al. 2001)
 - Non thermique: Faisceau de protons accélérés dans la basse chromosphère (Hénoux et al. 1998) .



Georgoulis et al. (2002)

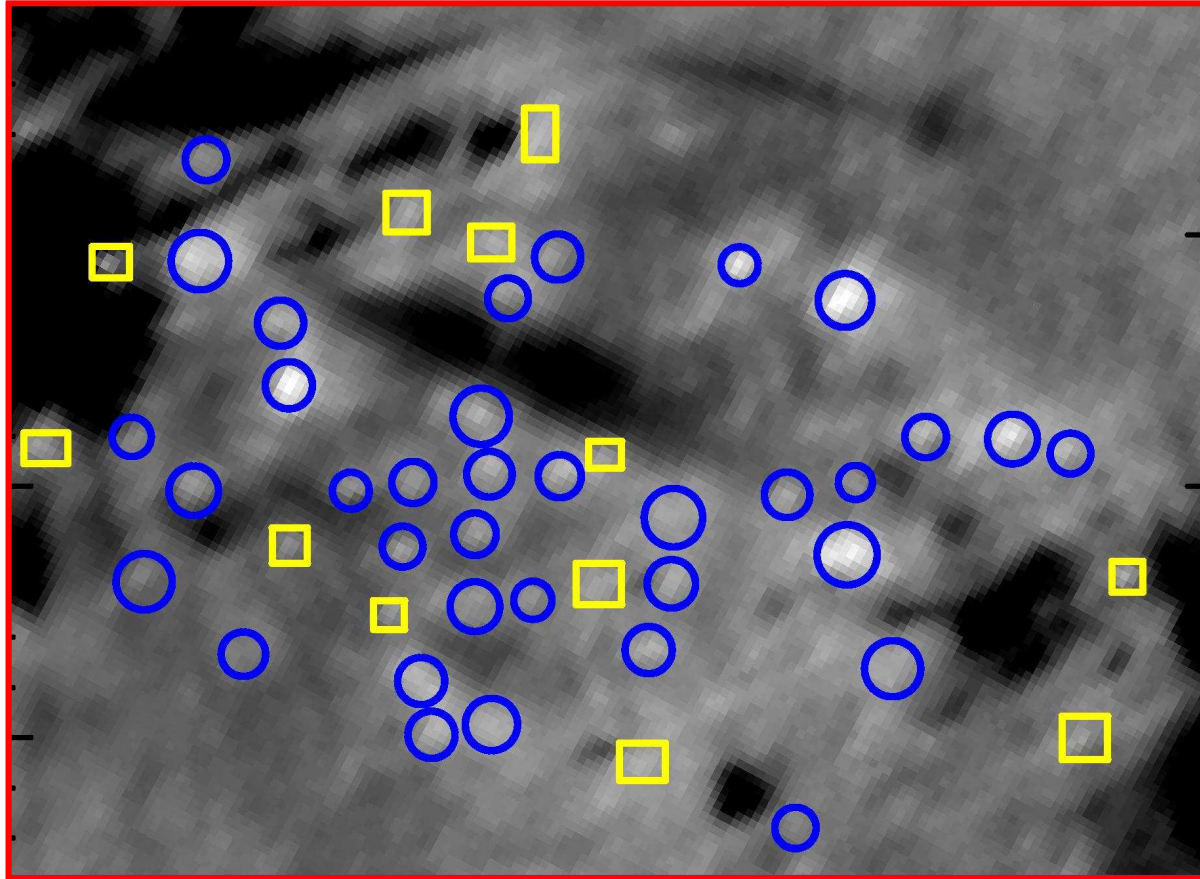
Reconnexion au niveau d'un BP.

- Séparatrices associées aux BPs définissent trois régions ayant des connectivités distinctes.
- Lignes de champ ancrées dans la photosphère: mvt des pieds dues aux mouvements photosphériques: si déplacement d'un pied de la séparatrice:



- Mvt relatif de deux lignes de champ au niveau de la séparatrice
 - Formation nappe courant
 - Reconnexion le long de la séparatrice
-
- La libération d'énergie peut se produire:
 - Au niveau du BP lui-même.
 - Au niveau des pieds des séparatrices.

Lien EBs /BPs : Observations



- Calcul des BPs directement à partir des **observations** ($\|\mathbf{B}\| > 200 \text{ G}$)
- ~ 17h52 UT: 35/47 (74 %) EBs liées à un BP (○).
- 25 % EBs restantes (□): Associées aux pieds des séparatrices ?
- Résultats similaires à d'autres instants
- Distribution aléatoire d'EBs: 50 % corr.

Extrapolation: Quel modèle ?

- Hypothèse du champ sans force (de Lorentz) :

$$(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})(\vec{B}) = \vec{\nabla} \left(\frac{B^2}{2} \right) \quad \longleftrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \alpha(\vec{x}) \vec{B}$$

(Équilibre entre tension et pression magnétique)

Courants électriques et champ **B** alignés.

- Cisaillement magnétique α constant le long d'une ligne de champ.
- Validité : $\beta \ll 1$; $V \ll (V_A, C_S)$; $L \ll H_p$: Couronne ✓

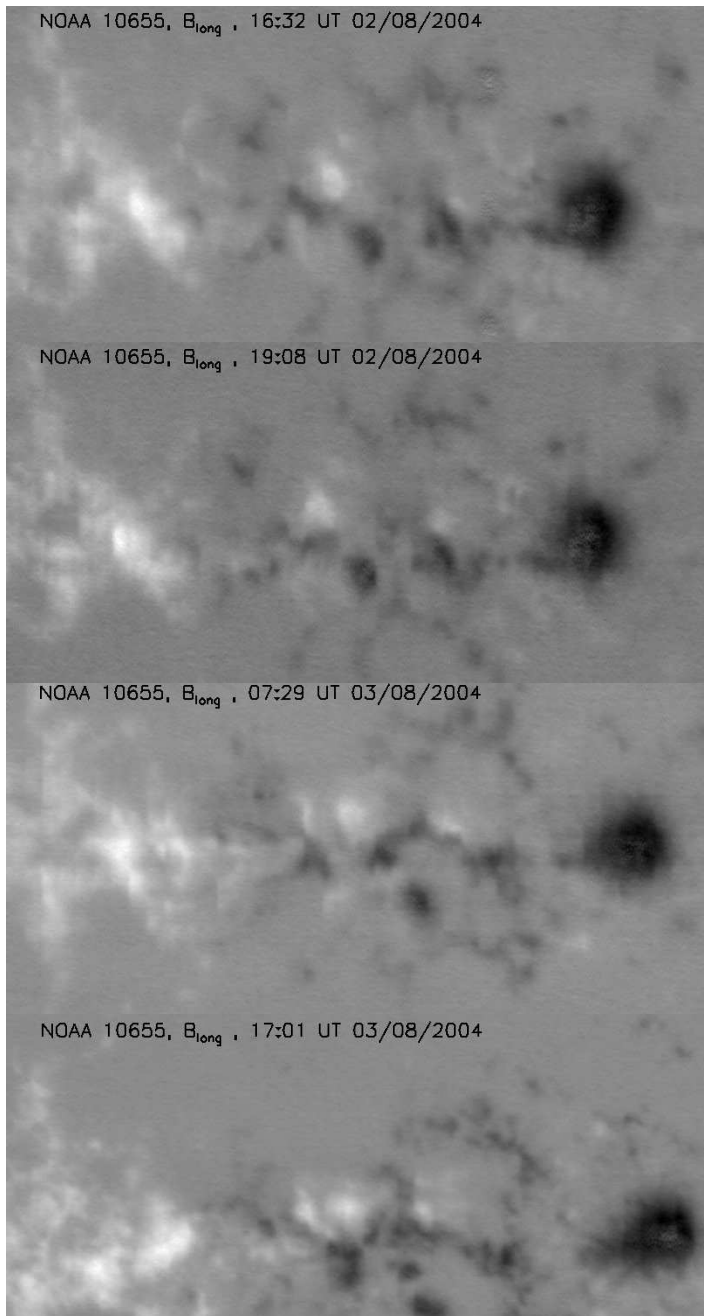
Chromosphère \sim (>400 km)

- Hypothèse du champ sans force linéaire (lfff) :

- Cisaillement α constant dans toute la région active.
- Validité : minimum d'énergie (à Hélicité magnétique constante).

- Équation à résoudre:
$$\nabla^2 \vec{B} + \alpha^2 \vec{B} = 0$$

- Utilisation des **observations pour fixer α** , paramètre libre ici



Campagne THEMIS 04

Présence de polarités parasites de signe opposée au centre de la région active.

Nombreux points brillants visibles dans le continu UV (TRACE, 1600 Å).

Lien entre Bombes Ellermans et points brillants UV (schmieder et al. 2004)

Corrélation entre les polarités lié à l'émergence du champ magnétique et de multiples événements reconnectifs.

