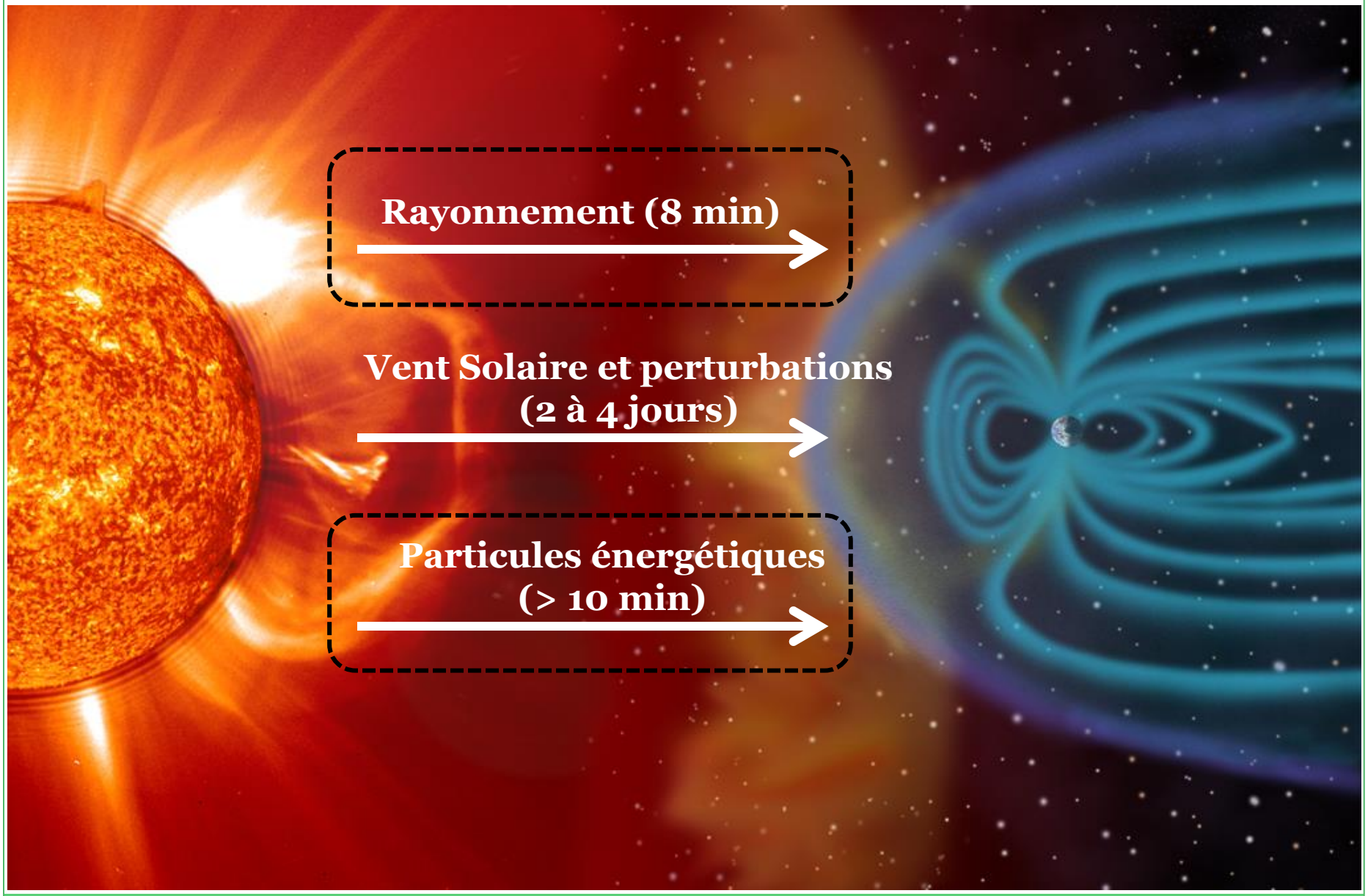
3ème journée ESEP
27 mai 2014

Evolution des courants électriques et des émissions X lors d'une éruption solaire

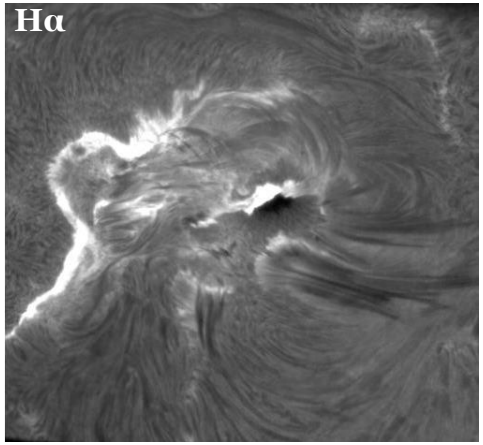
Accélération et propagation des particules énergétiques dans la couronne solaire (diagnostics X et gamma)
Préparation de l'exploitation de l'instrument STIX (Solar Orbiter)

Sophie Musset, Nicole Vilmer, Véronique Bommier
1ère année de thèse CNES/ESEP

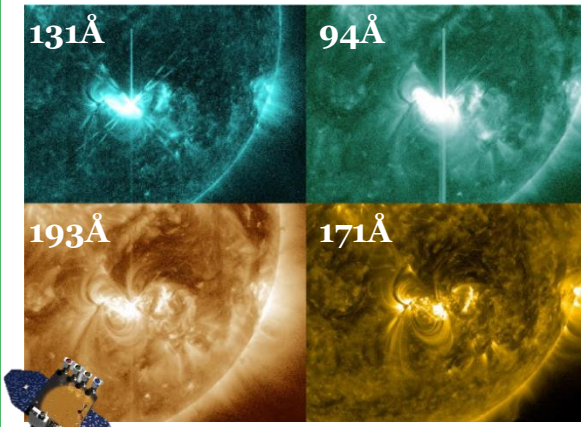
Les relations Soleil-Terre



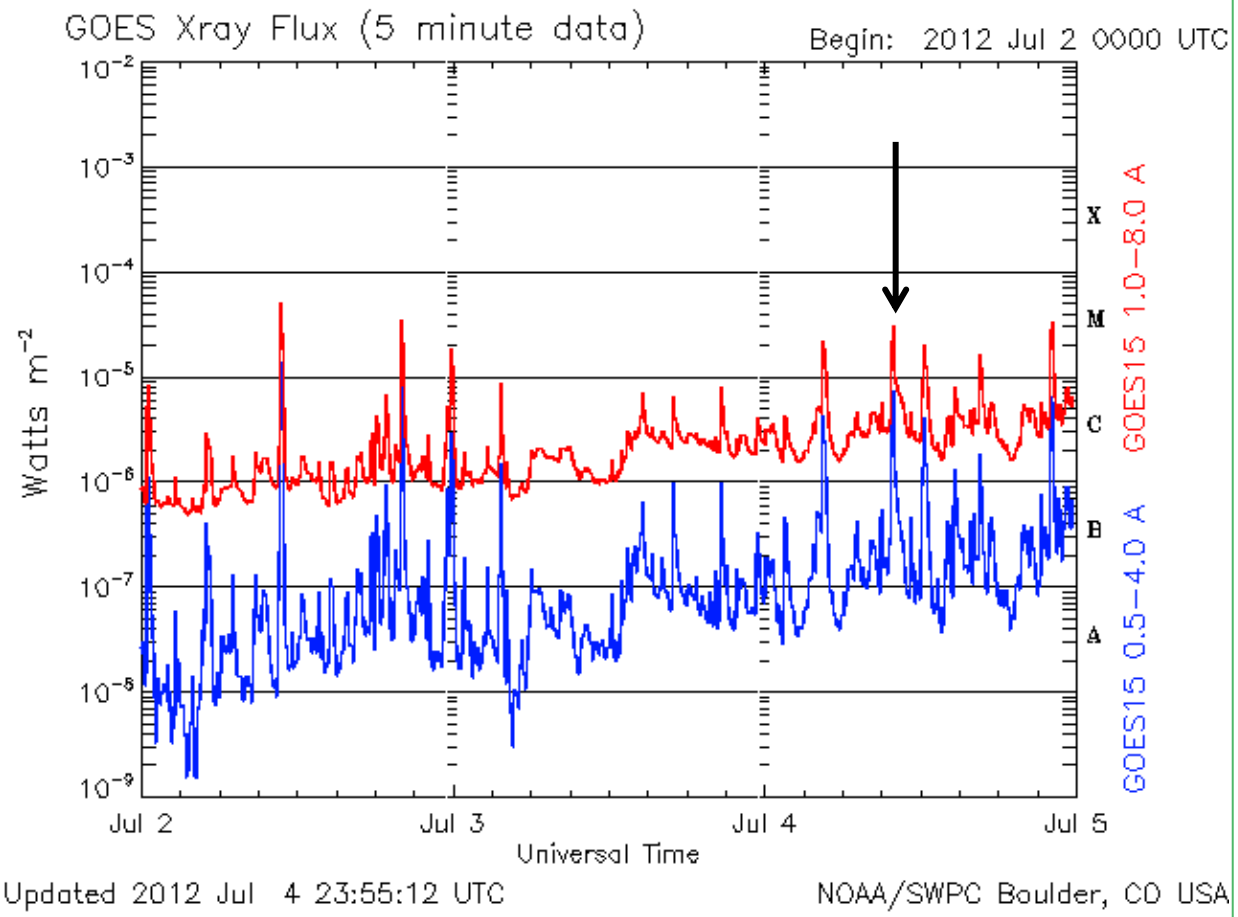
Soleil actif : les éruptions solaires



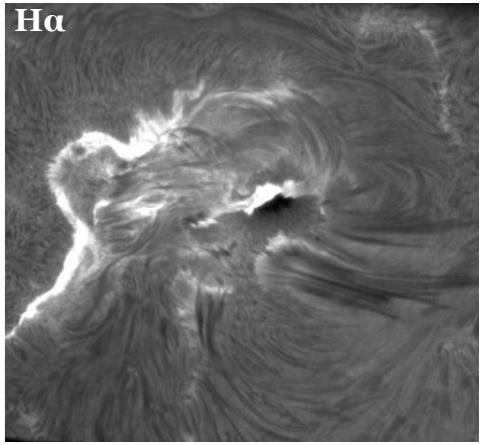
5-11-1998, BBSO



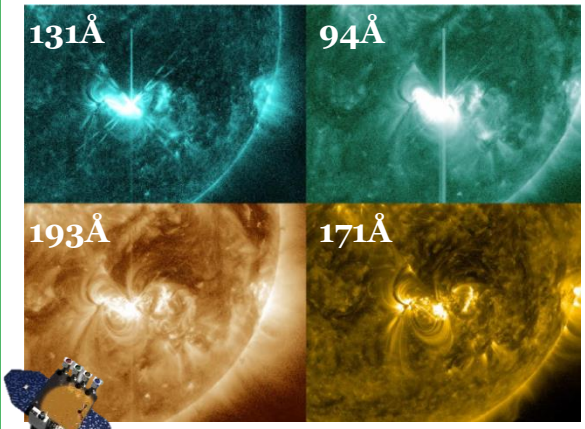
4-07-2012, SDO/AIA



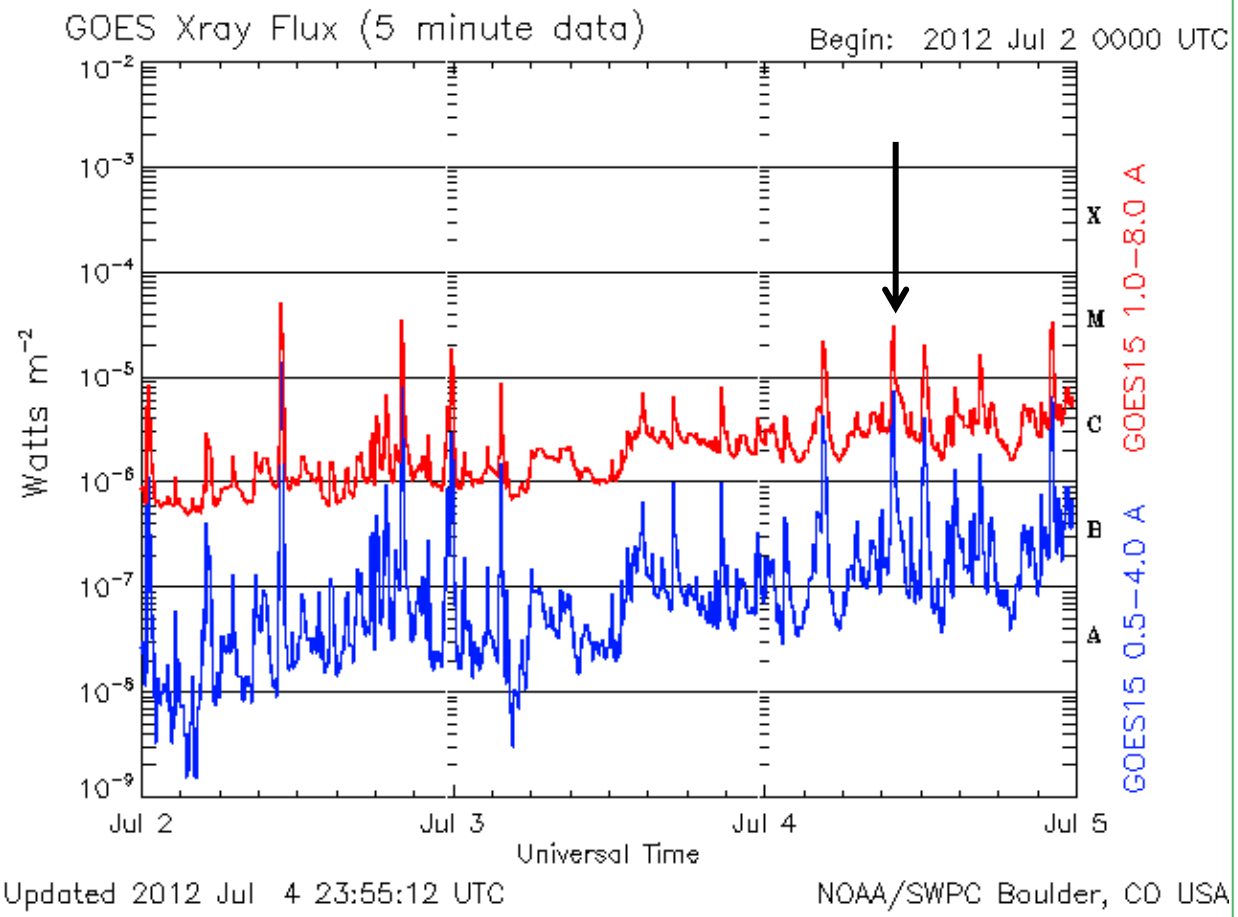
Soleil actif : les éruptions solaires



5-11-1998, BBSO



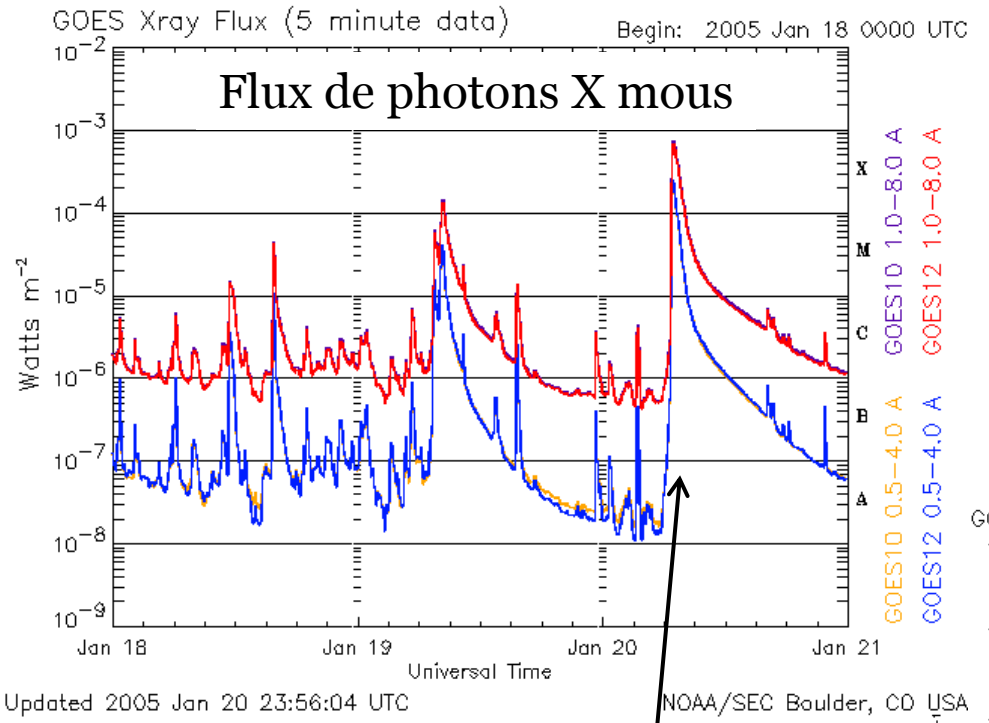
4-07-2012, SDO/AIA

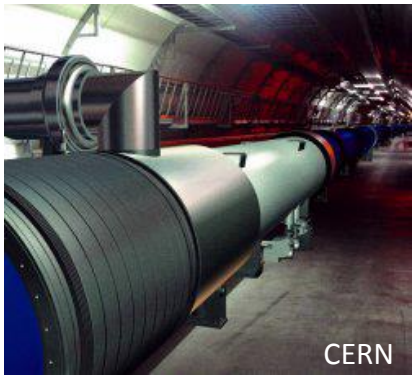


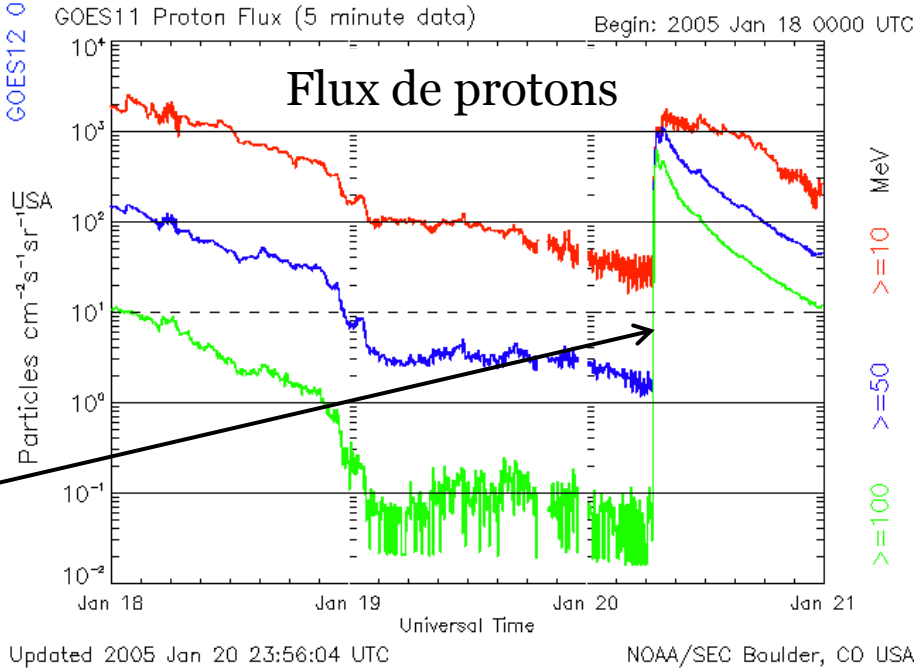
Eruption : 10^{32} erg libérés en quelques minutes

➔ Chauffage, mouvement de matière, <u>accélération de particules</u>

Le Soleil actif et accélérateur de particules



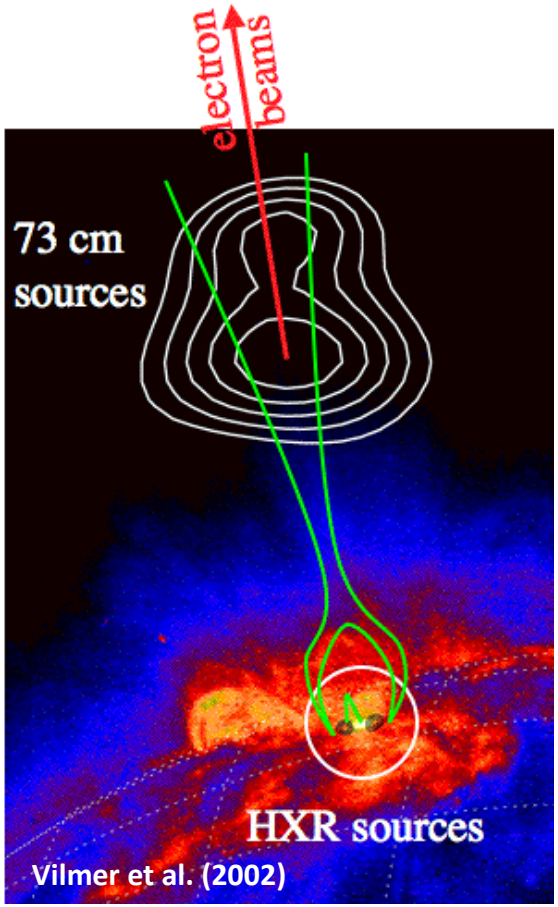




Protons associés à l'éruption de classe X9 du 20 Janvier 2005

Le Soleil actif et accélérateur de particules

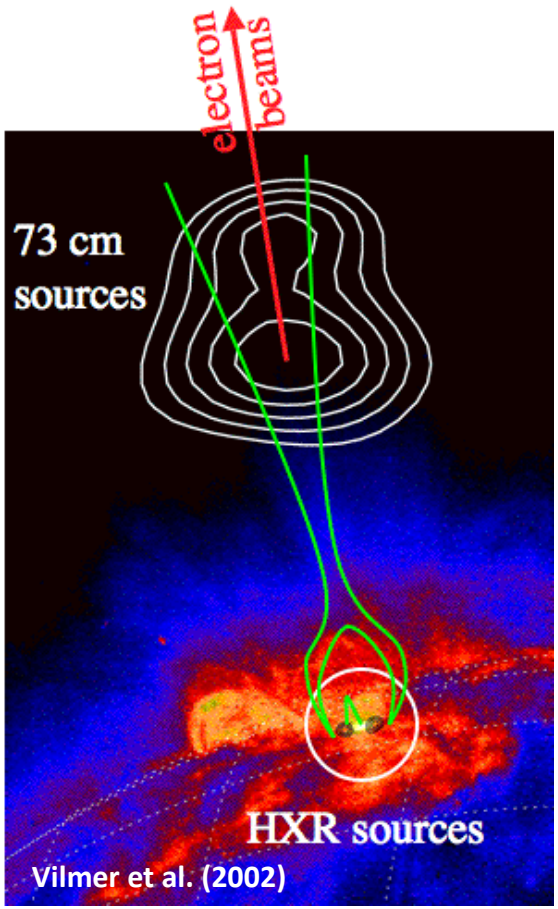
Particules énergétiques
qui s'échappent



Particules énergétiques
dans l'atmosphère solaire

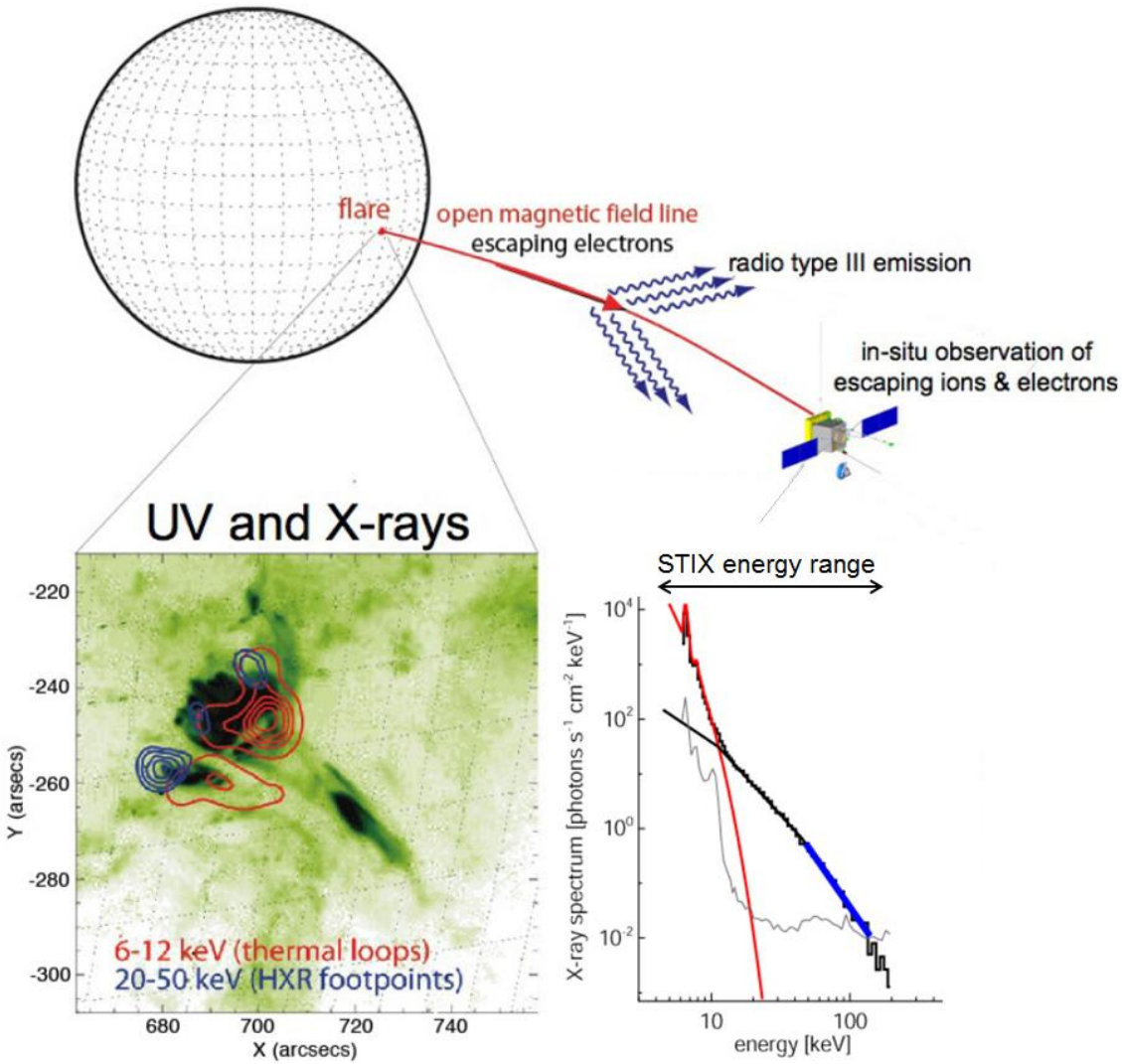
Le Soleil actif et accélérateur de particules

Particules énergétiques qui s'échappent

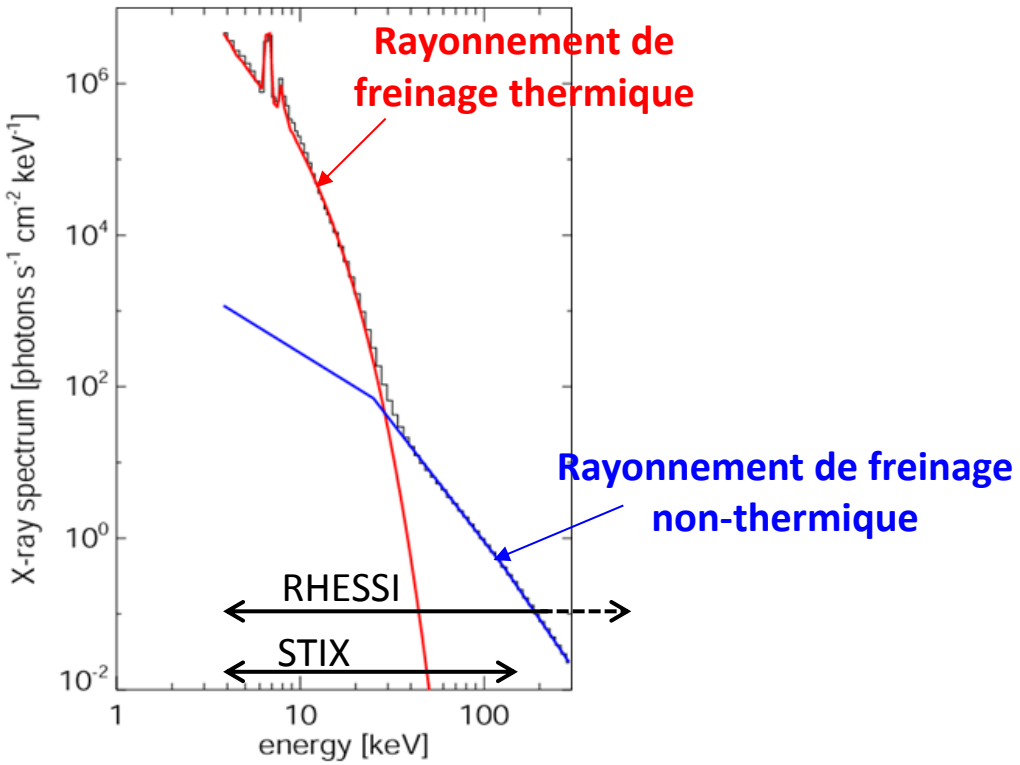


Particules énergétiques dans l'atmosphère solaire

Contexte : Solar Orbiter

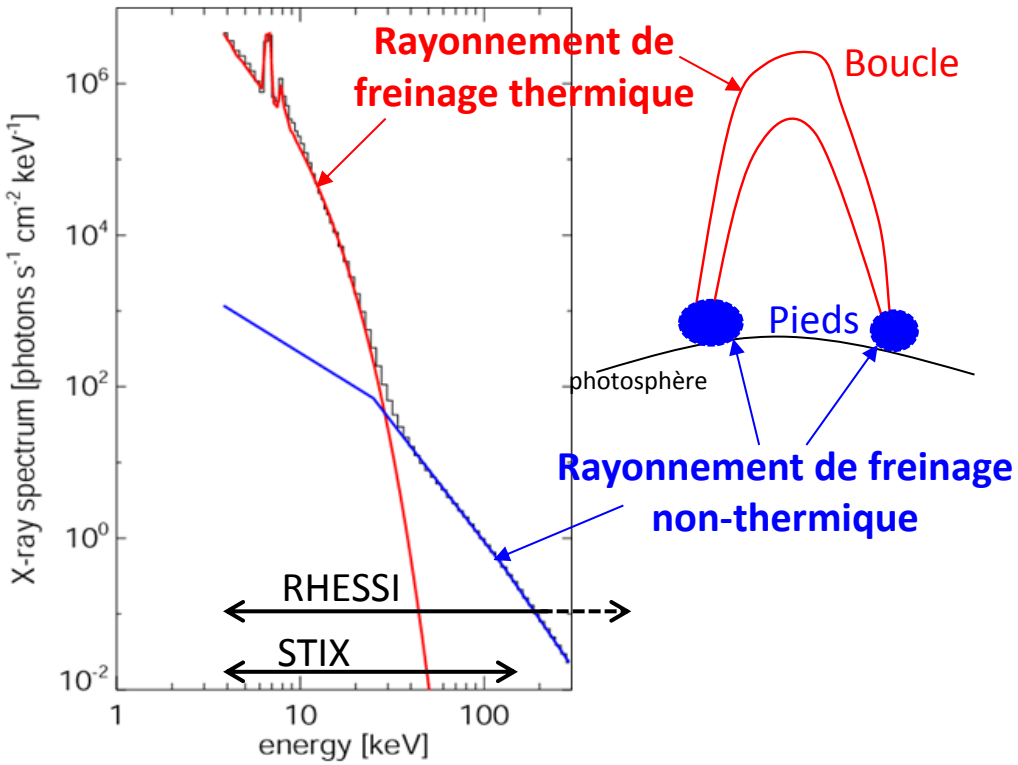


Diagnostic X des électrons énergétiques dans l'atmosphère solaire



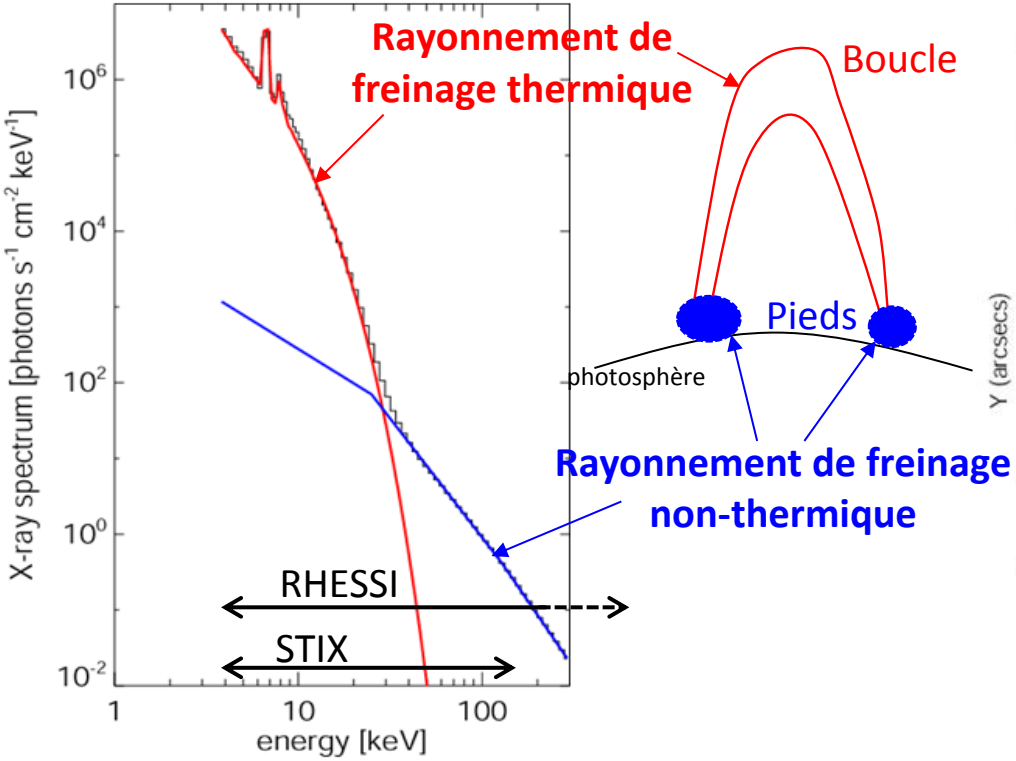
Rayonnement de freinage thermique : T ≈ 30 MK
Rayonnement de freinage non-thermique : électrons d'énergie > 30 keV

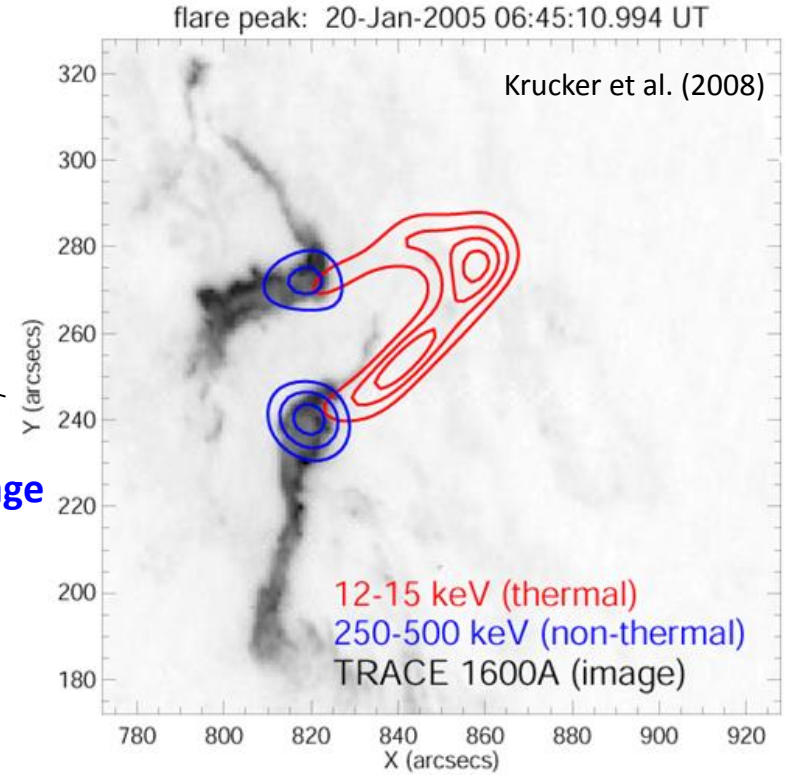
Diagnostic X des électrons énergétiques dans l'atmosphère solaire



Rayonnement de freinage thermique : T ≈ 30 MK
Rayonnement de freinage non-thermique : électrons d'énergie > 30 keV

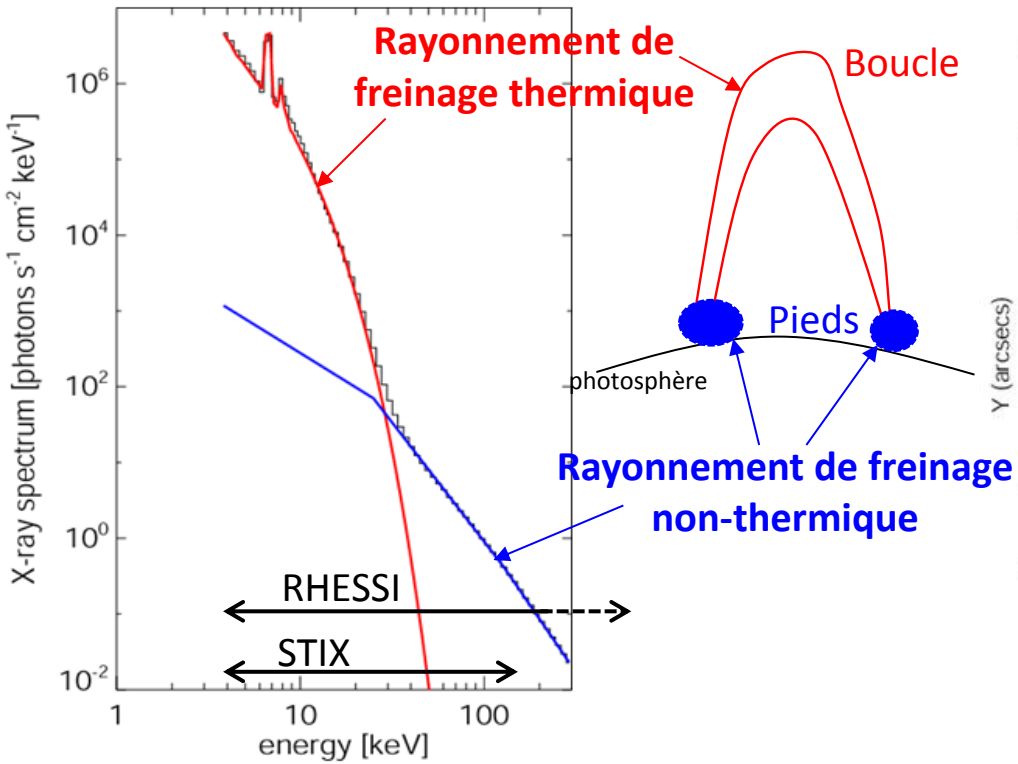
Diagnostic X des électrons énergétiques dans l'atmosphère solaire

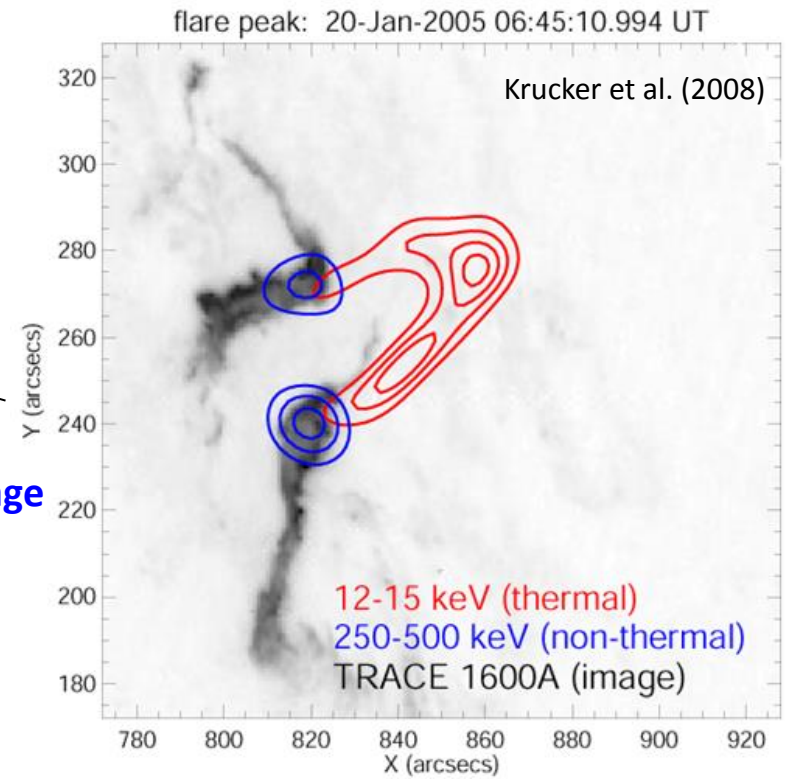




Rayonnement de freinage thermique : T ≈ 30 MK
Rayonnement de freinage non-thermique : électrons d'énergie > 30 keV

Diagnostic X des électrons énergétiques dans l'atmosphère solaire





Rayonnement de freinage thermique : T ≈ 30 MK
Rayonnement de freinage non-thermique : électrons d'énergie > 30 keV

Accélération ?

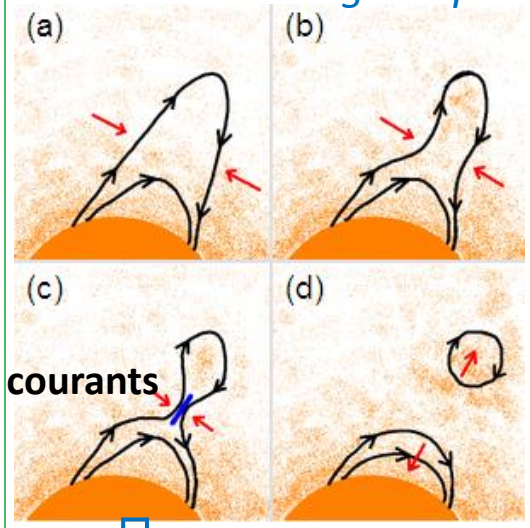
Accélération des particules pendant les éruptions solaires ?

Pendant les éruptions solaires, 3 mécanismes possibles pour accélérer les particules :

- **Accélération par un champ électrique continu**
  - Couches de courants
  - Boucles portant des courants … (lien avec la reconnexion magnétique ?)
- **Accélération au niveau d'un choc**
- **Accélération stochastique**

Reconnexion magnétique et accélération des électrons

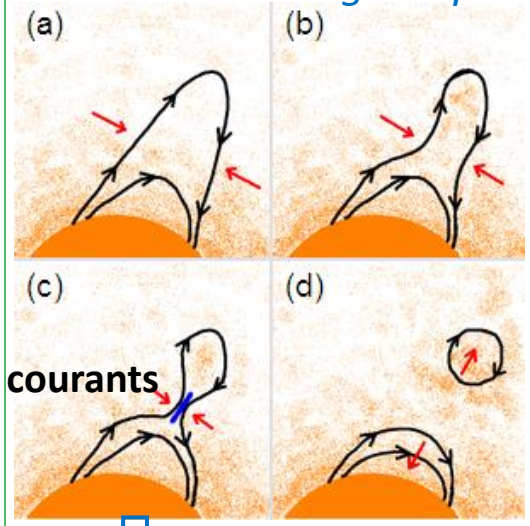
Reconnexion magnétique



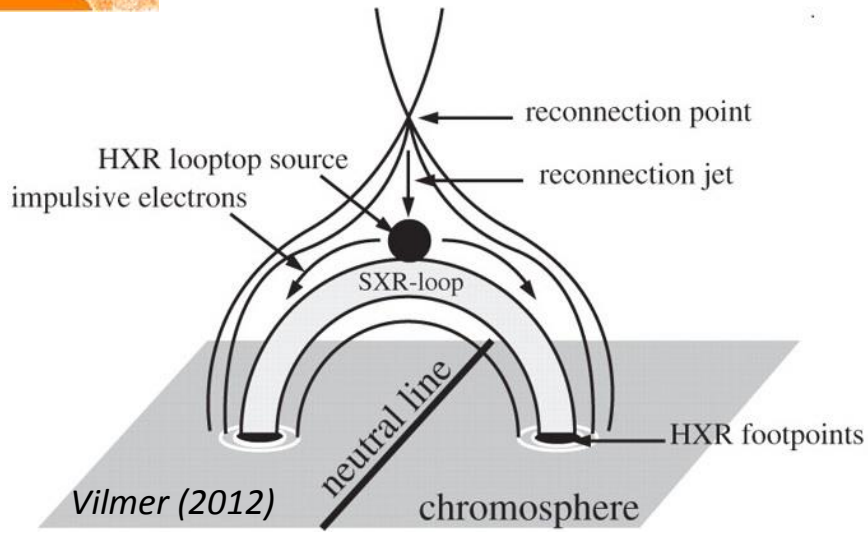
Accélération des particules chargées

Reconnexion magnétique et accélération des électrons

Reconnexion magnétique



Accélération des particules chargées

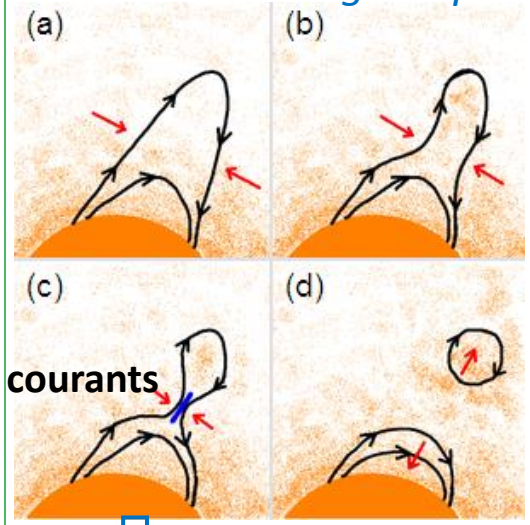


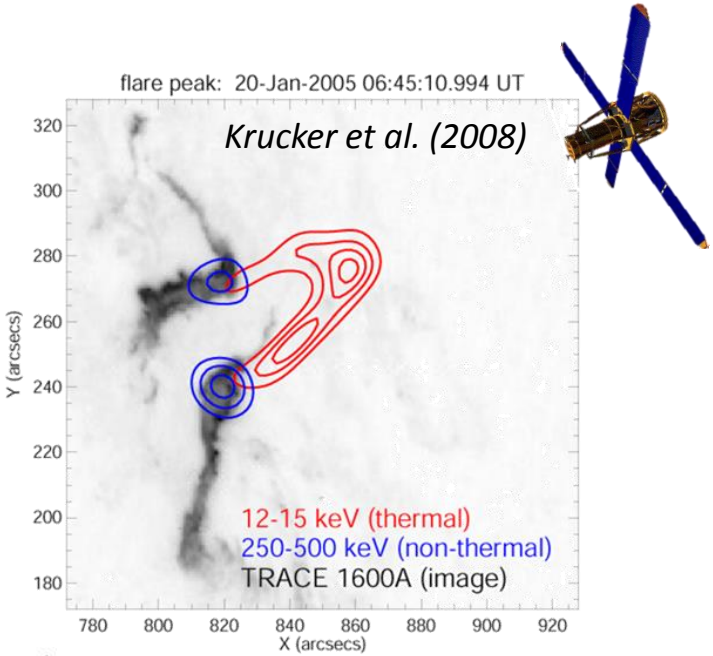
Vilmer (2012)

Propagation des particules accélérées jusqu'à la chromosphère

Reconnexion magnétique et accélération des électrons

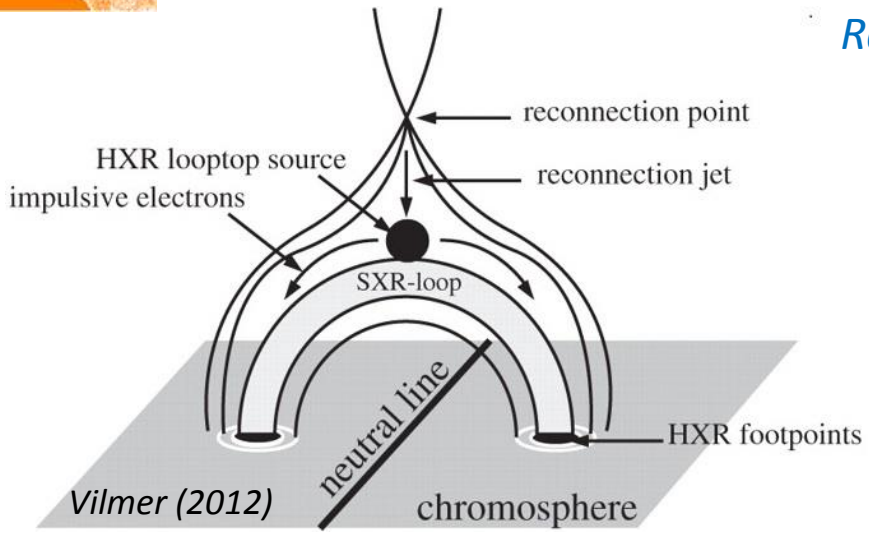
Reconnexion magnétique





Rayonnement de freinage

Accélération des particules chargées



Vilmer (2012)

Collisions avec les ions ambiants

Propagation des particules accélérées jusqu'à la chromosphère

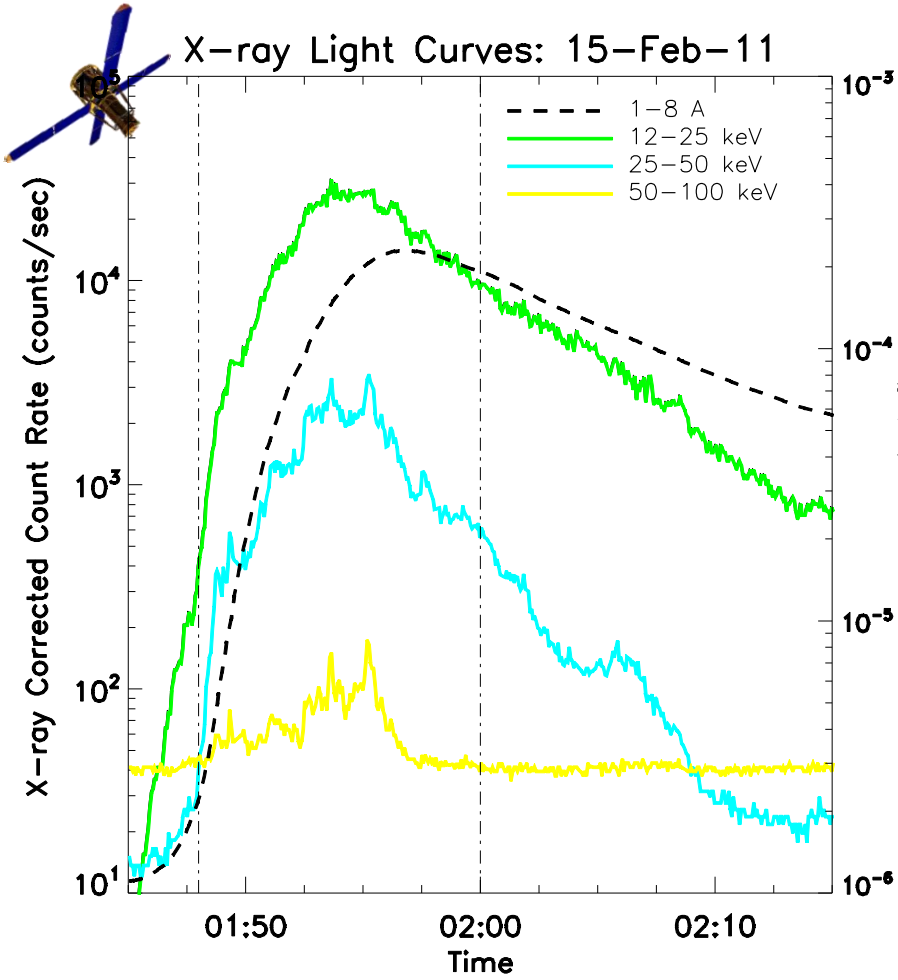
Evolution des courants électriques et des émissions X lors d'une éruption solaire

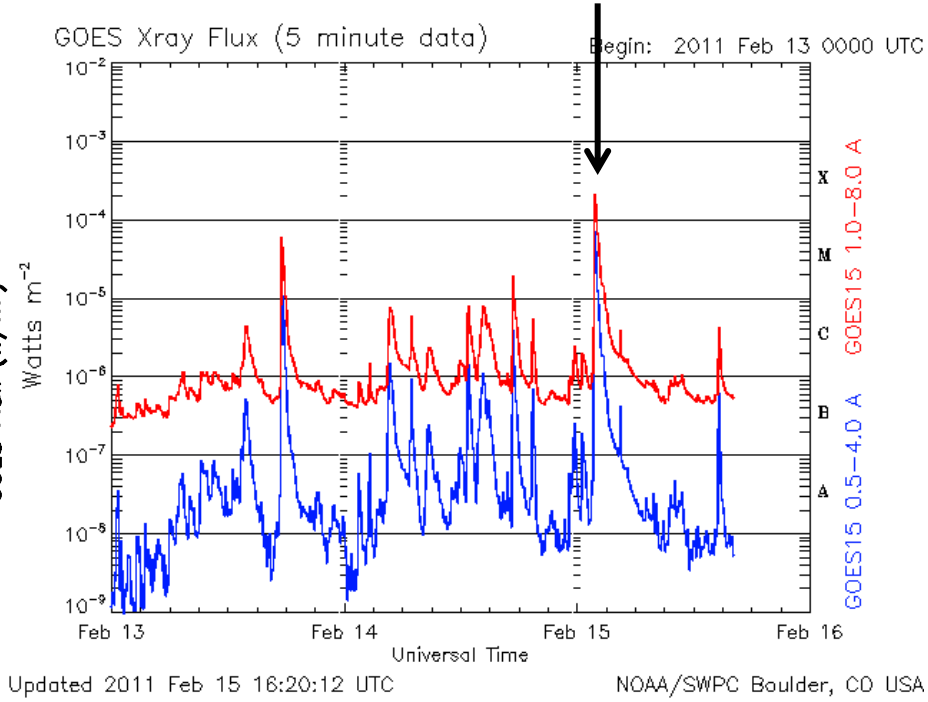
Quelle est la relation entre les sites d'accélération des particules et les courants électriques (indicatifs d'un champ électrique) ?

- SDO/HMI → $\vec{B}$ **et** J_z, cadence temporelle de 12 min + résolution spatiale de 0,5 arcsec
- RHESSI → **Images et spectres en rayons X**, cadence temporelle de 4 sec + résolution spatiale de 3 arcsec

→ Etude de la relation entre les sites d'émissions X et la localisation et l'évolution des courants électriques

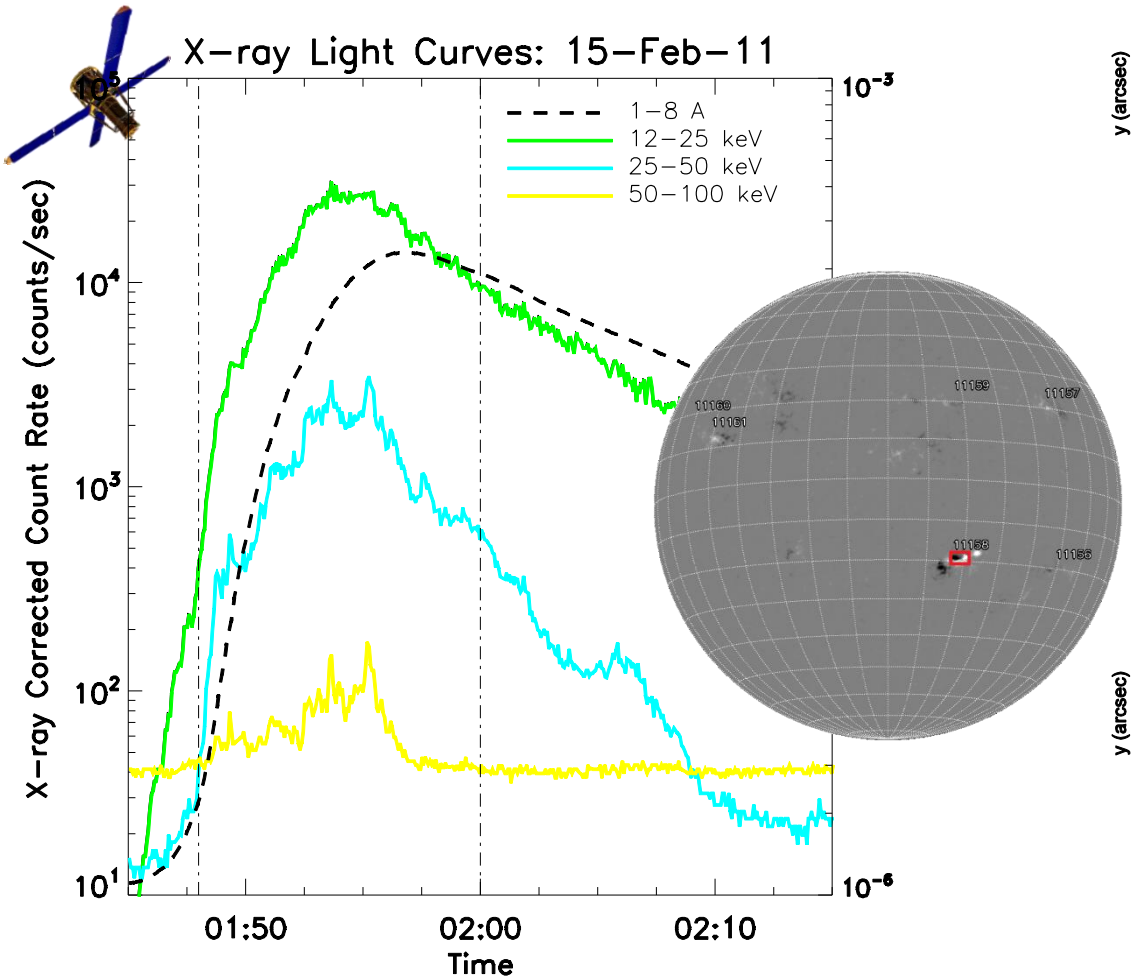
Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

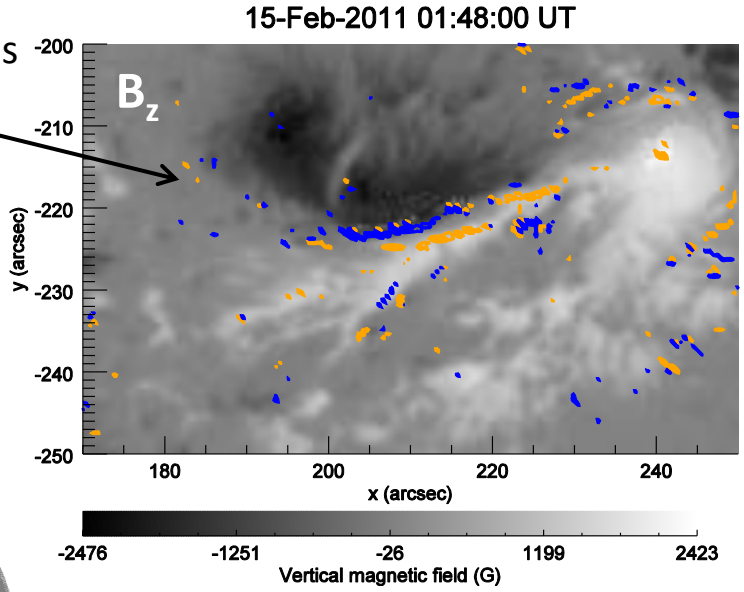


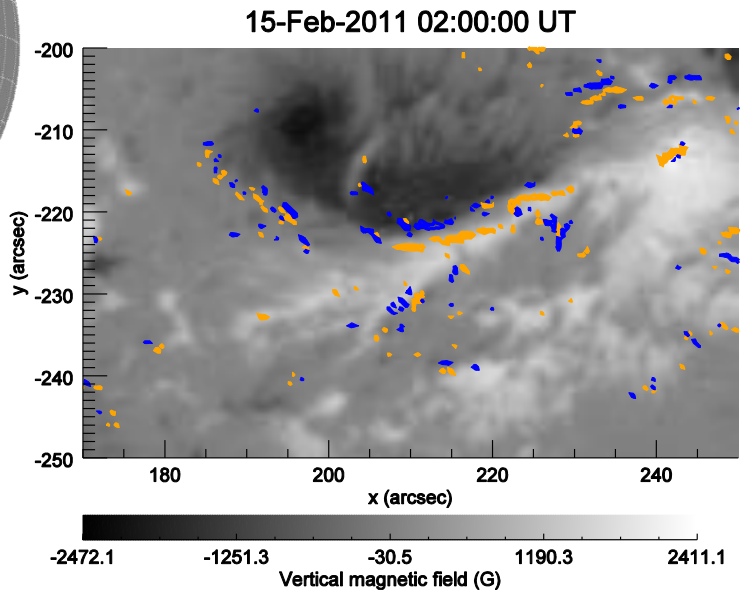


Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

Courants électriques verticaux (J_z)

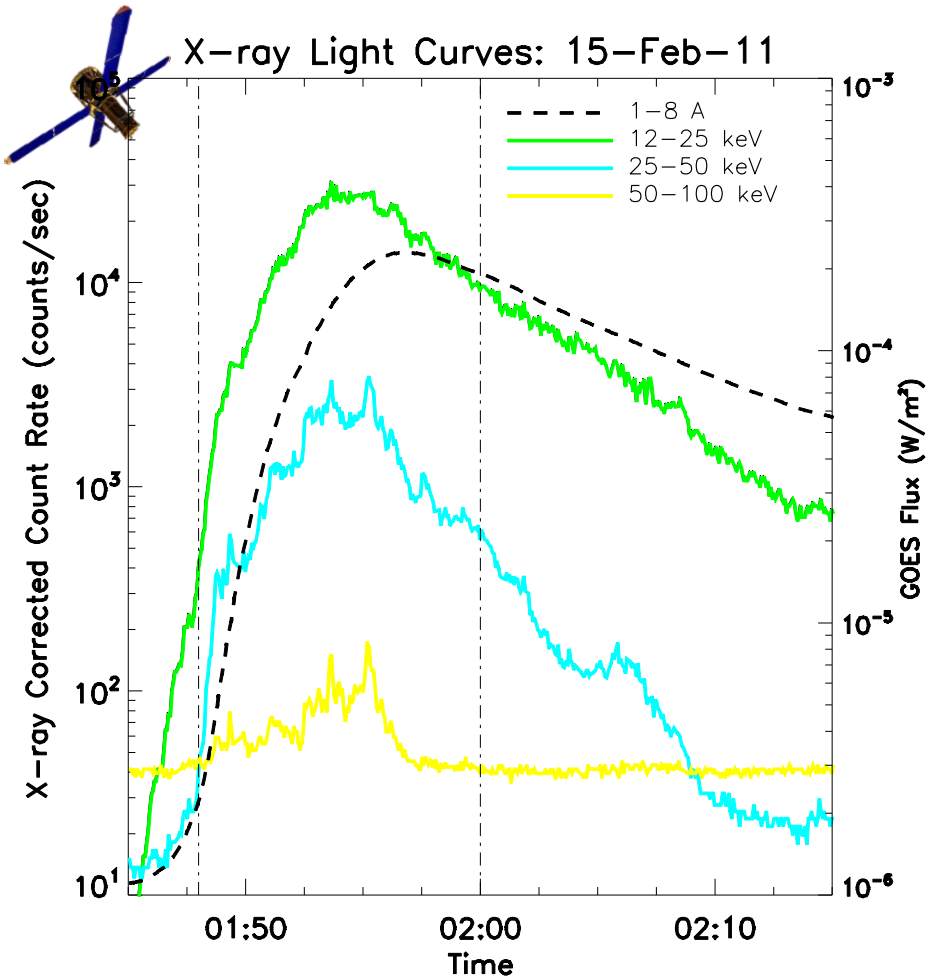


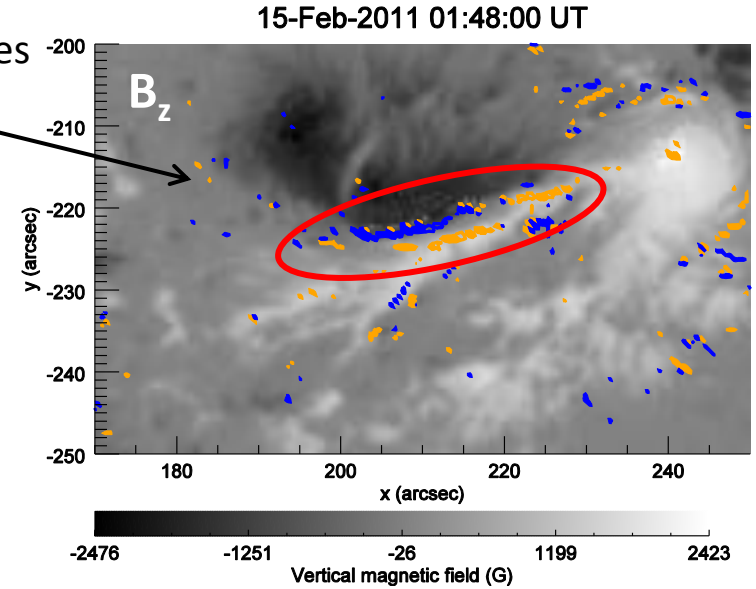


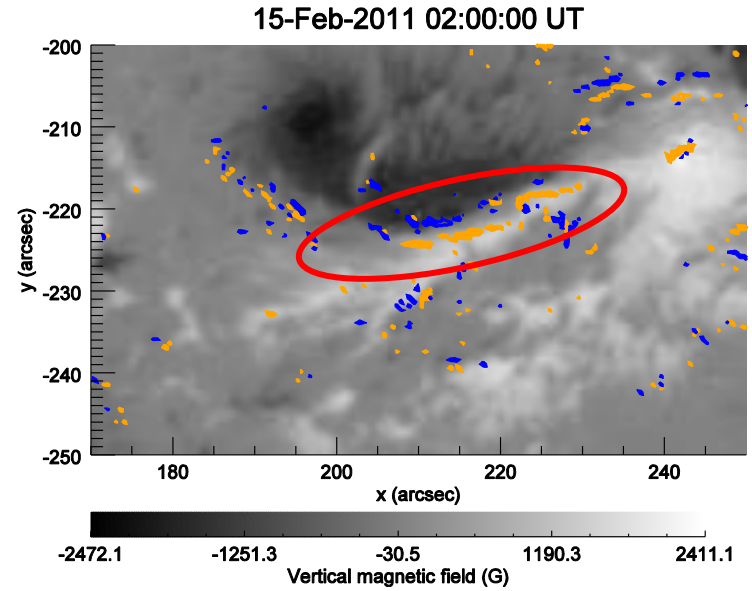


Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

Courants électriques verticaux (J_z)

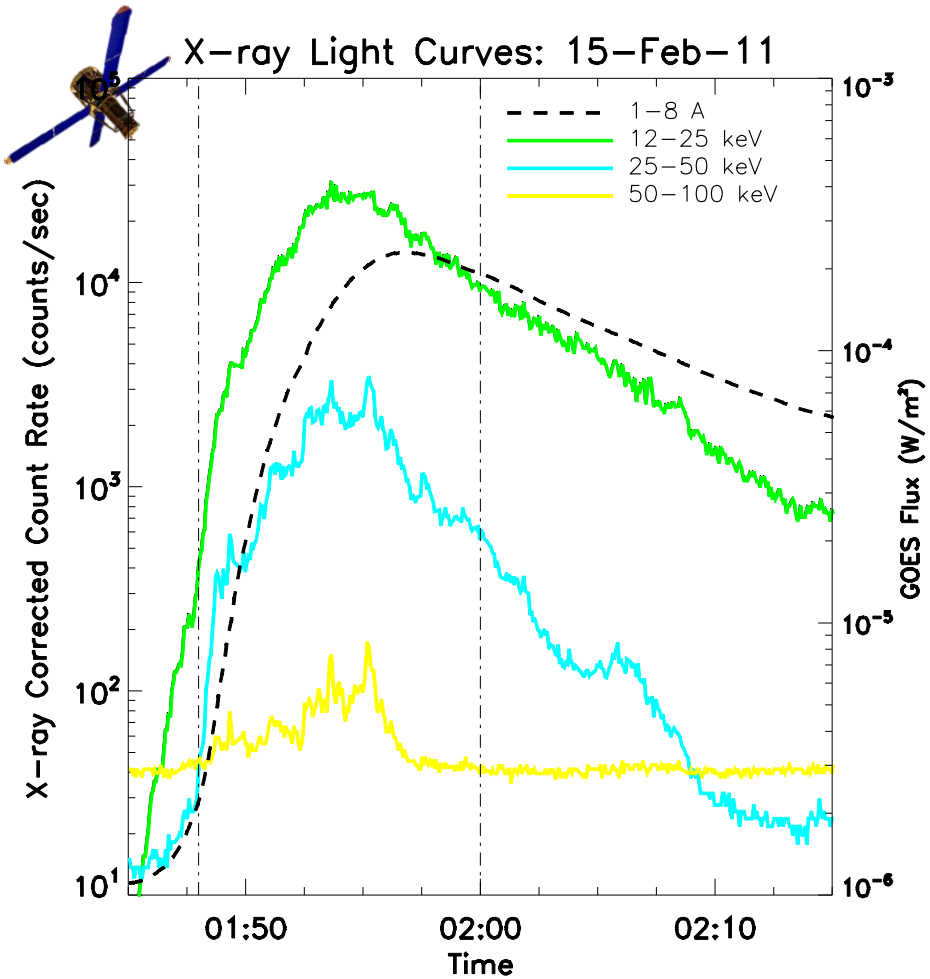


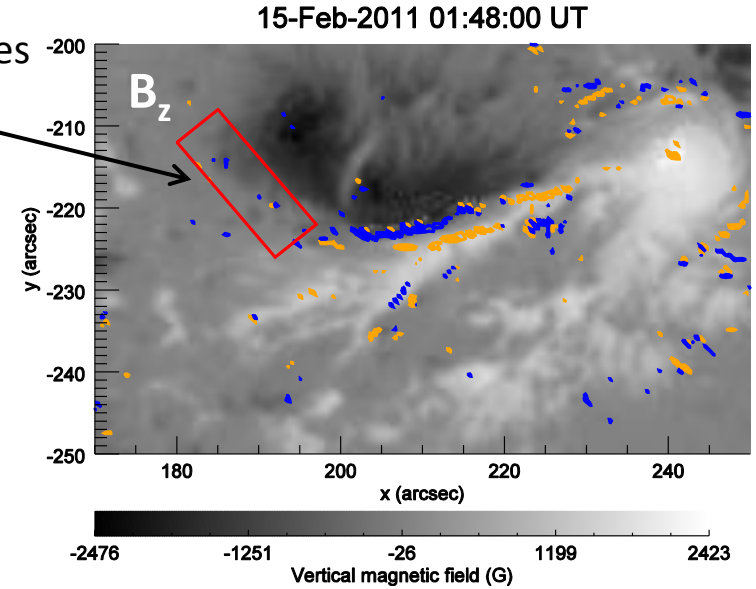


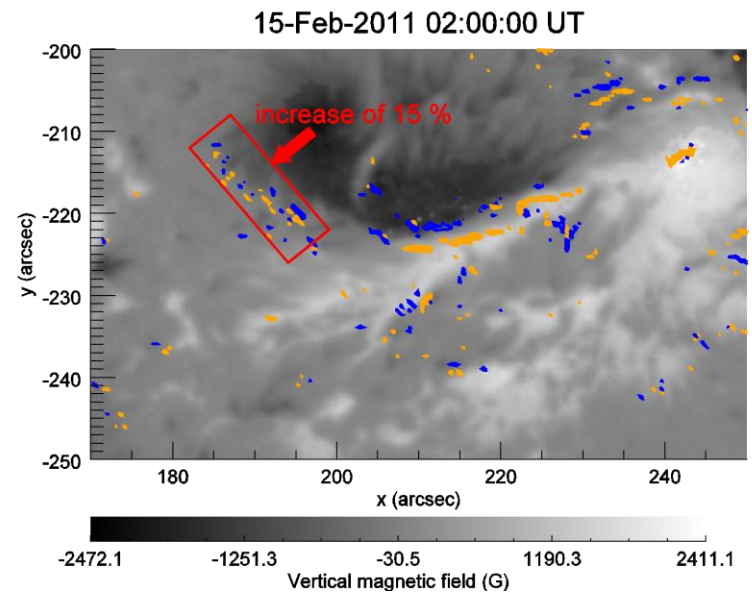


Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

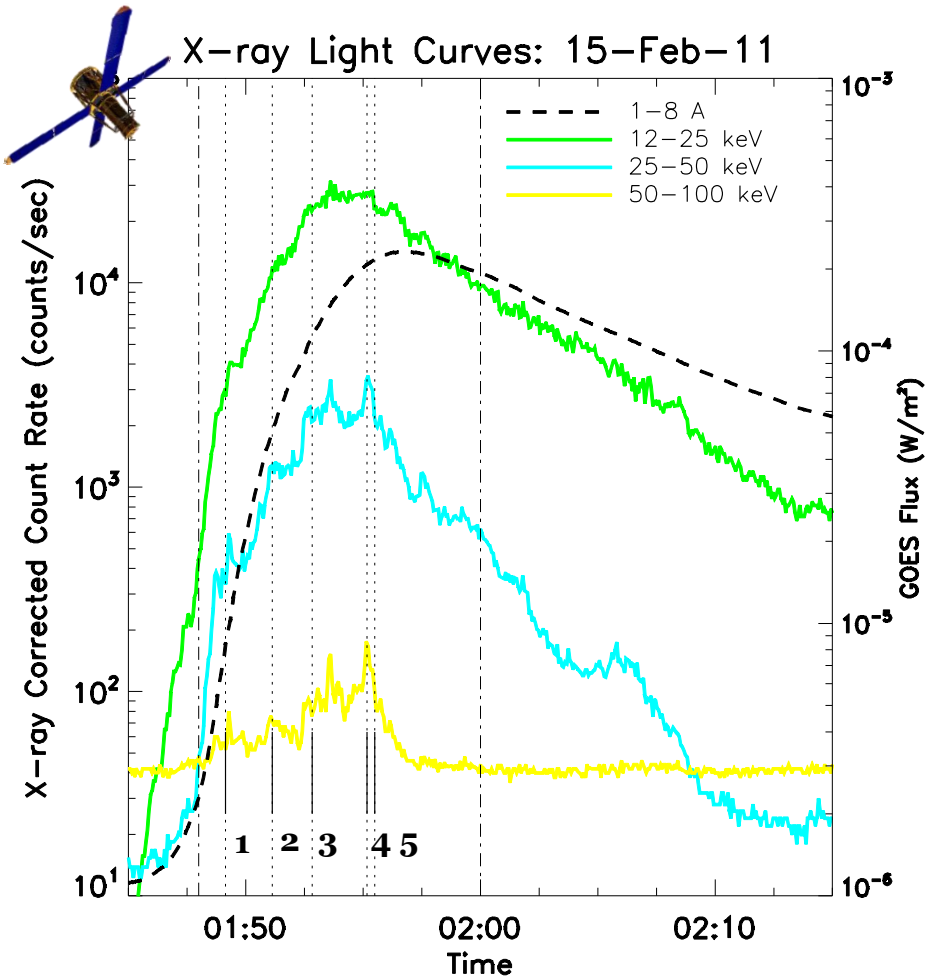
Courants électriques verticaux (J_z)

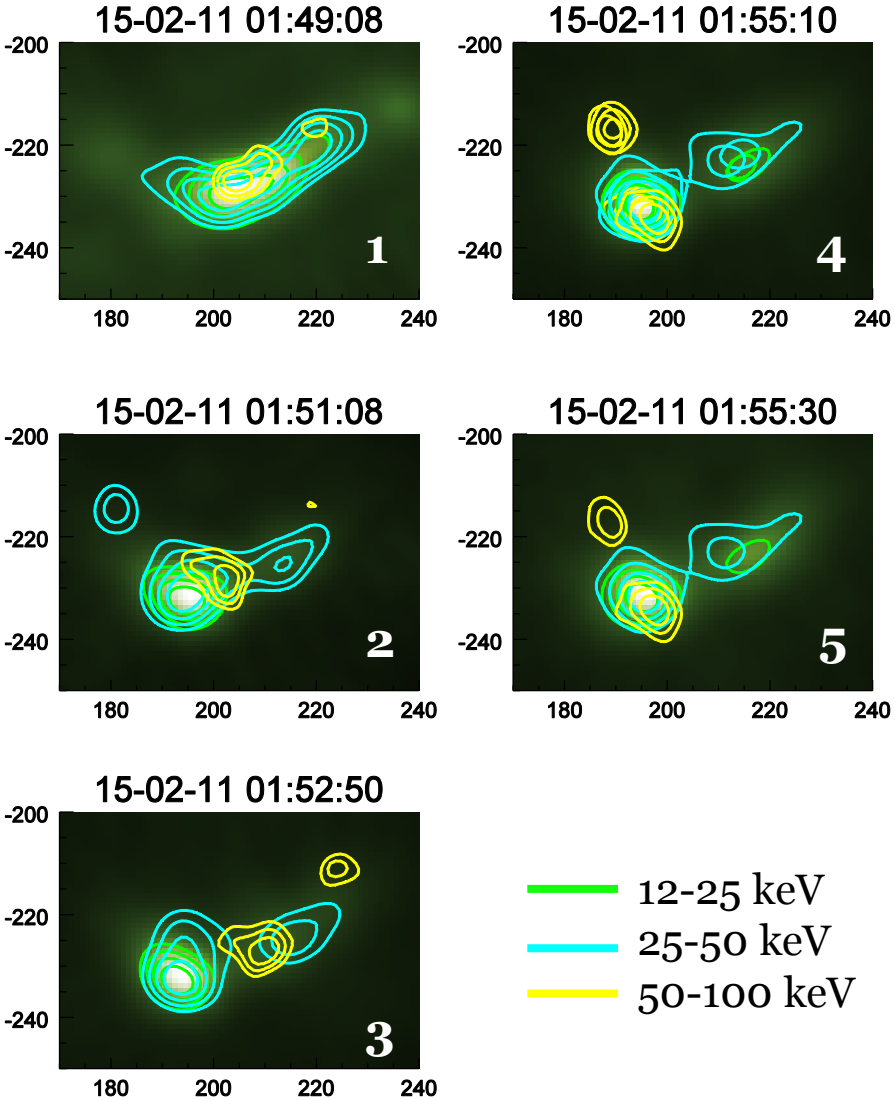




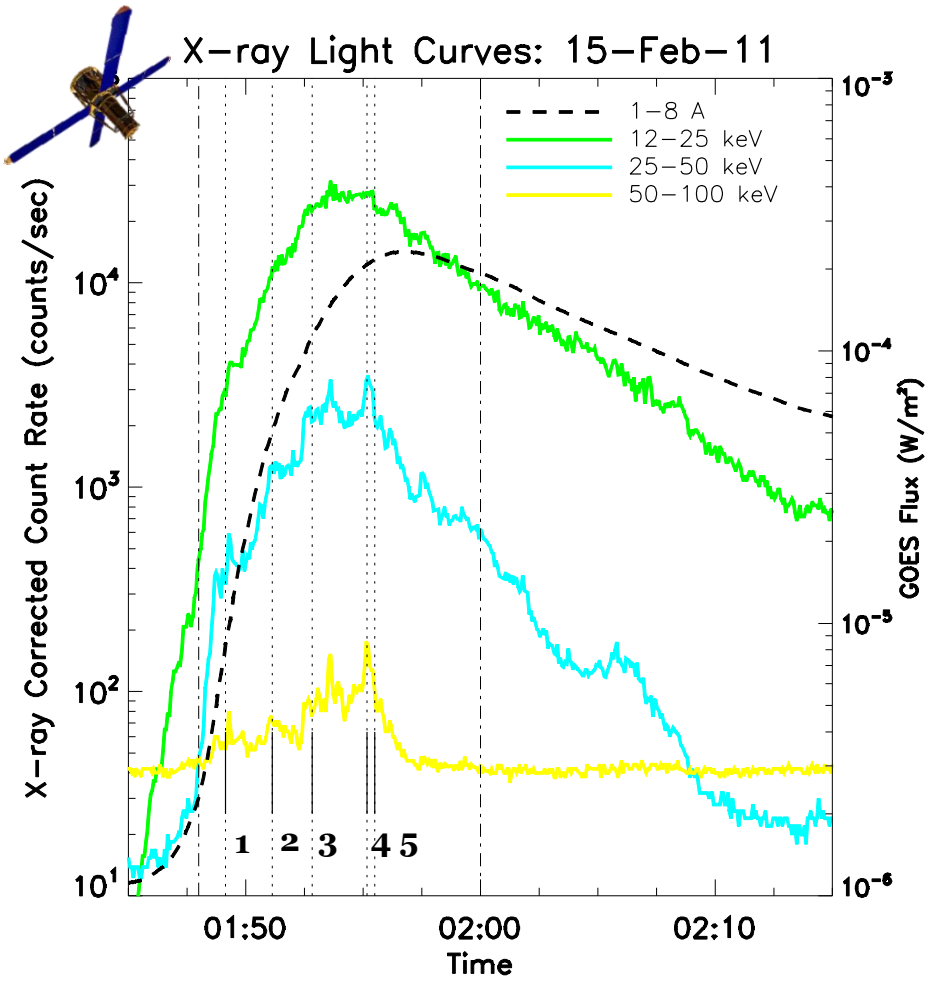


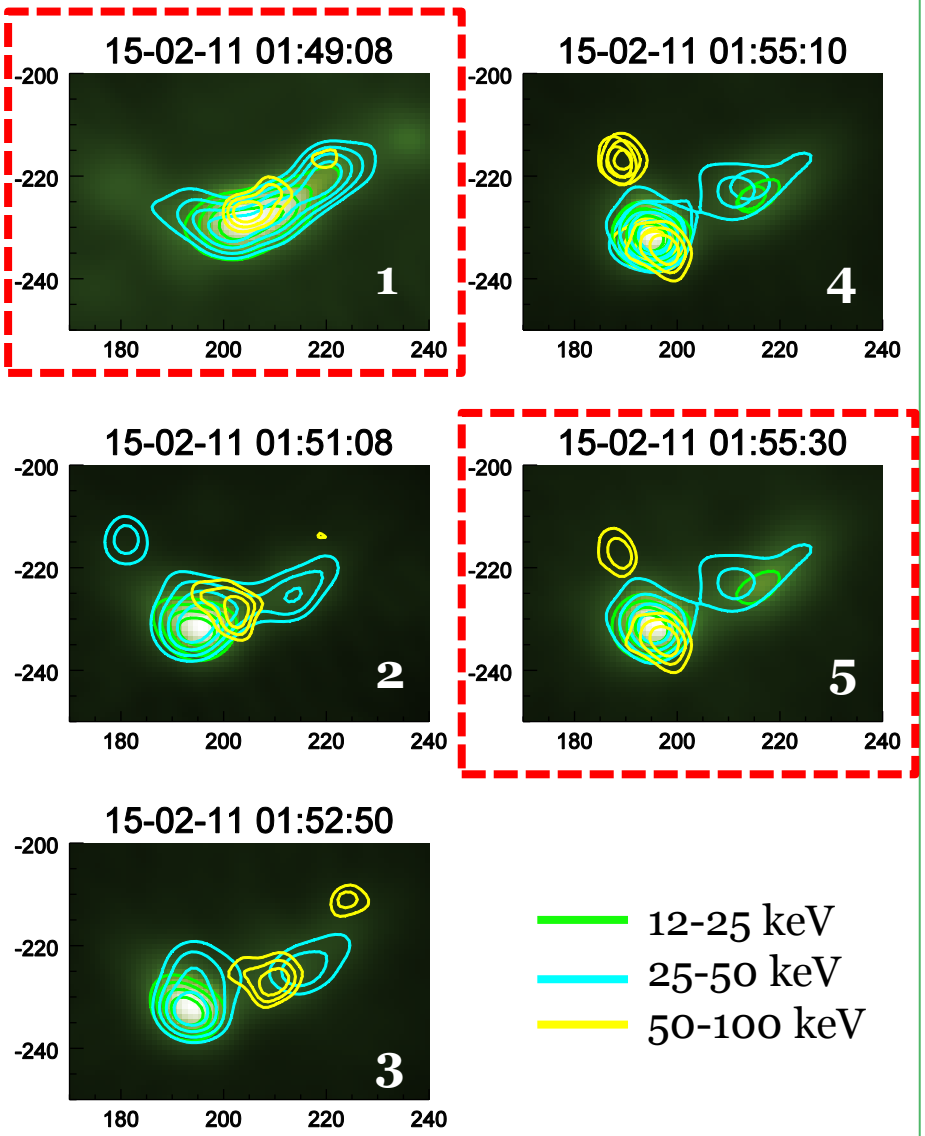
Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011



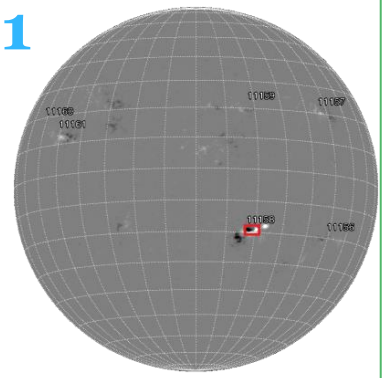


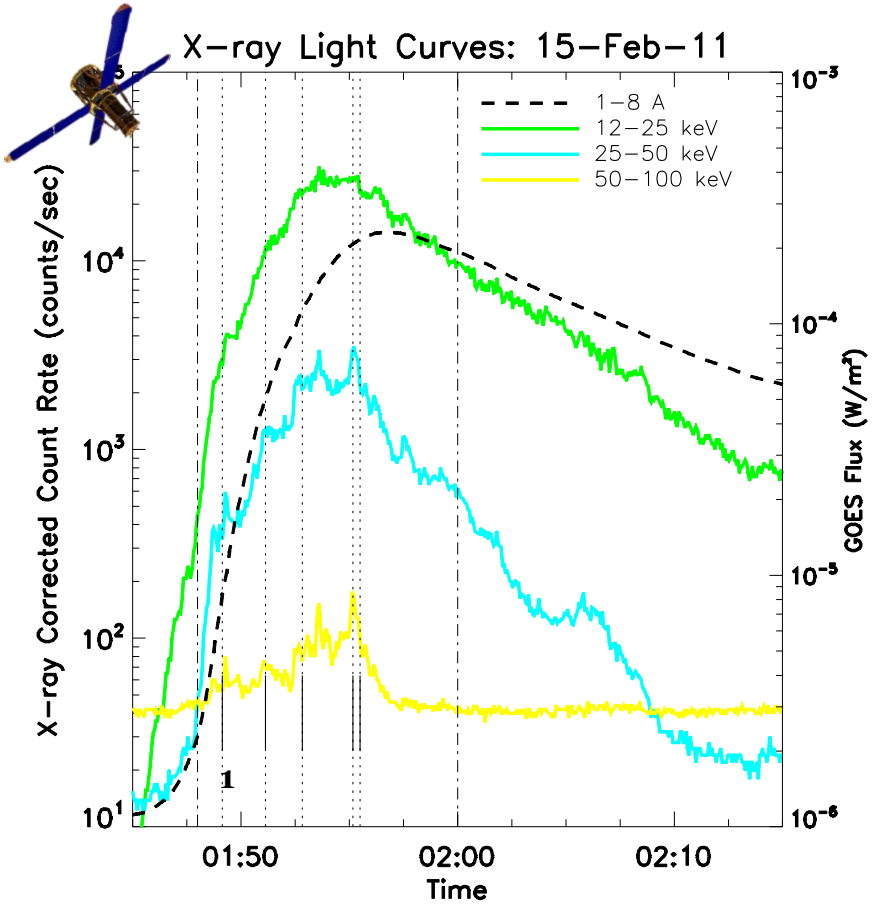
Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

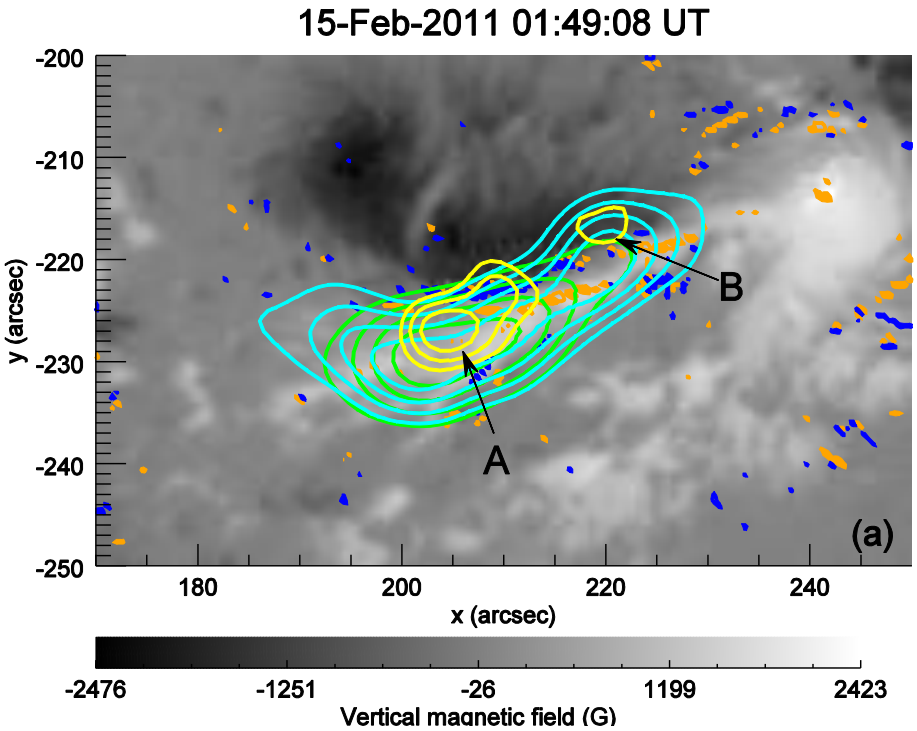




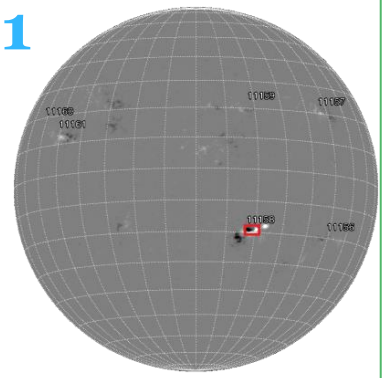
Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

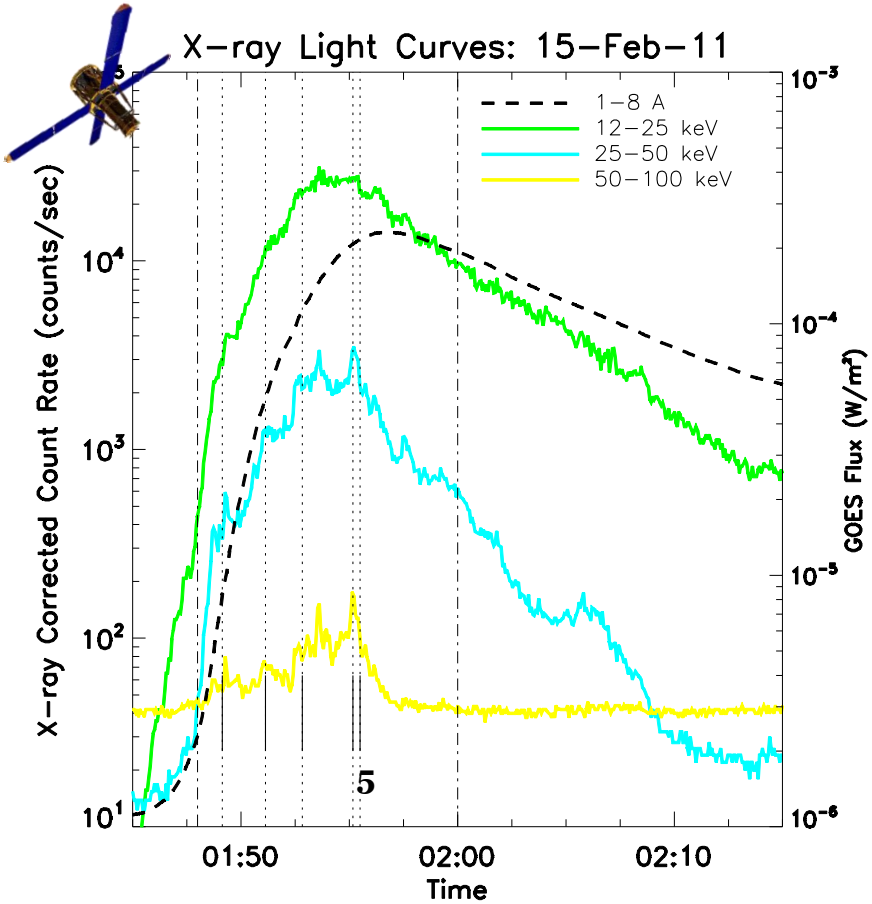


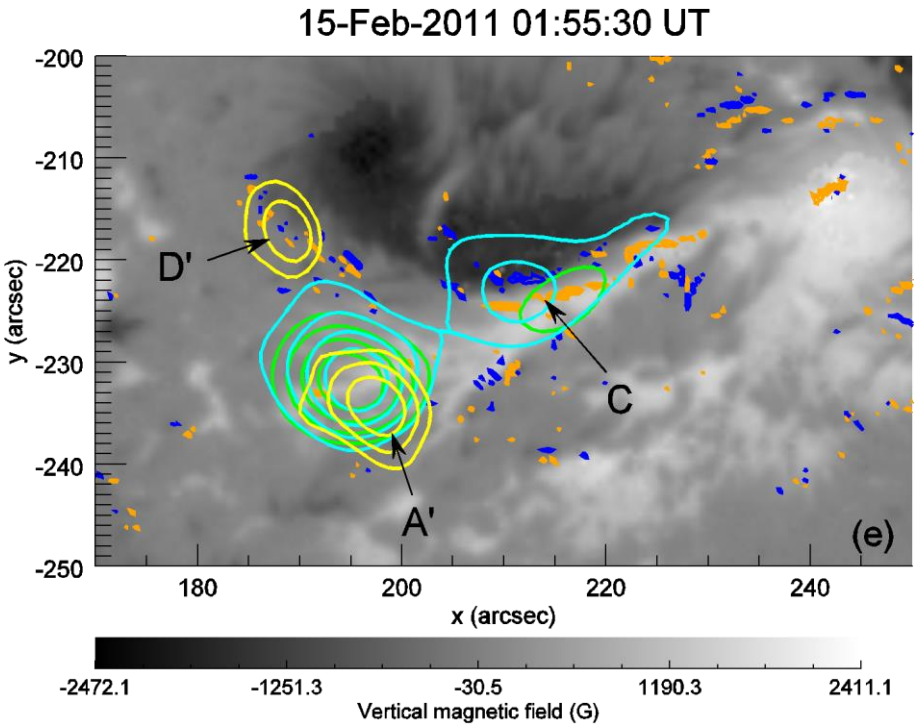




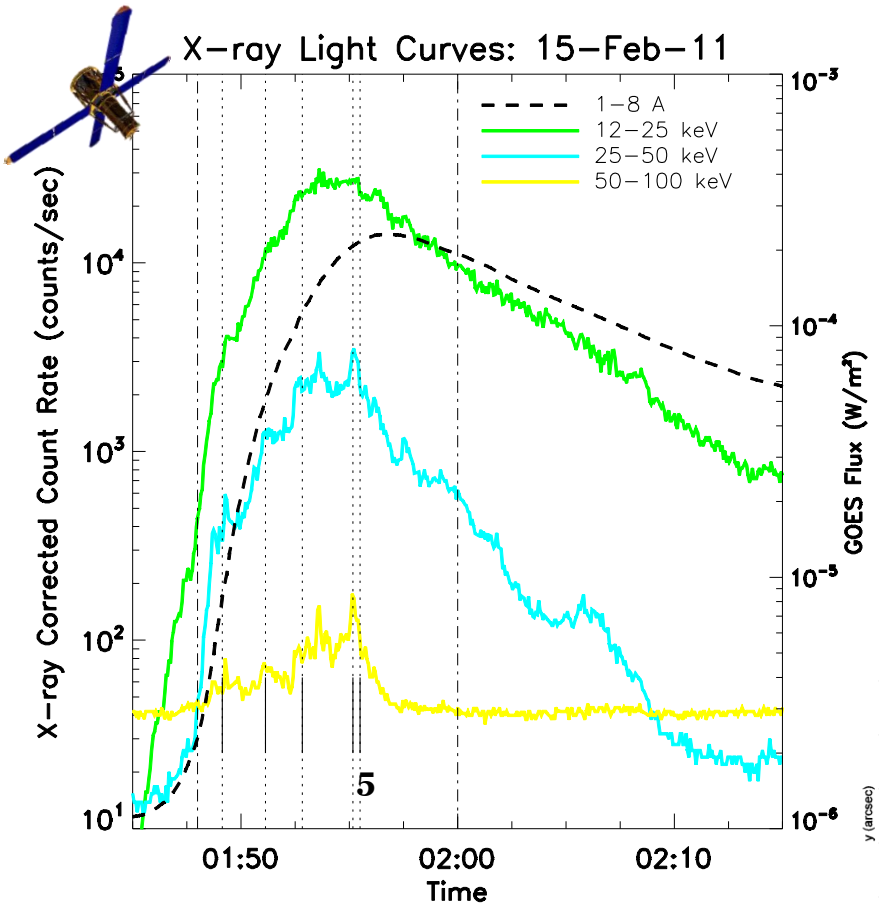
Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011

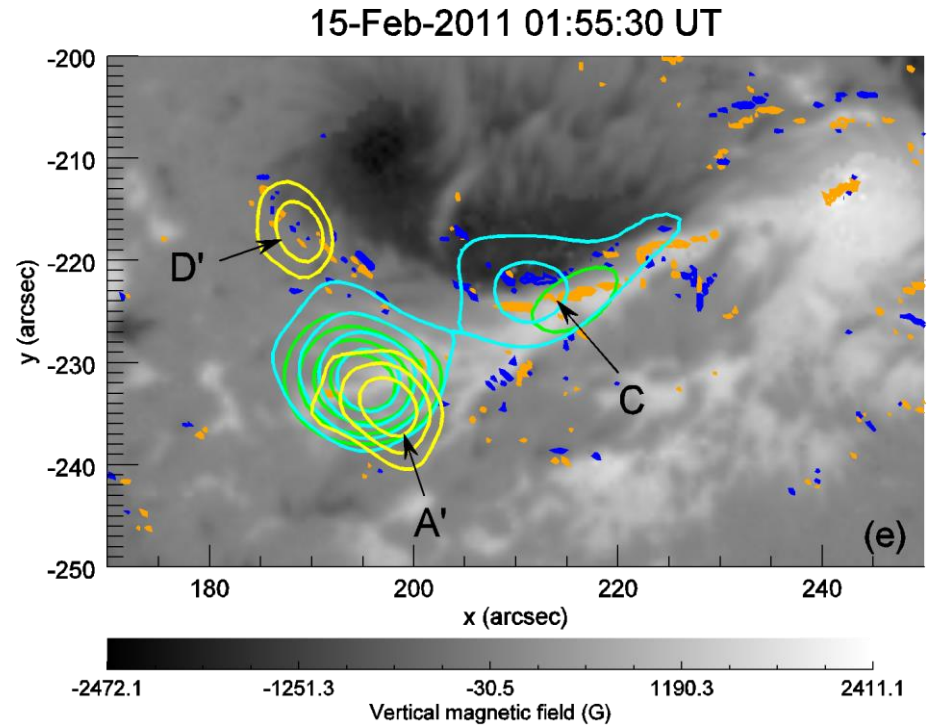


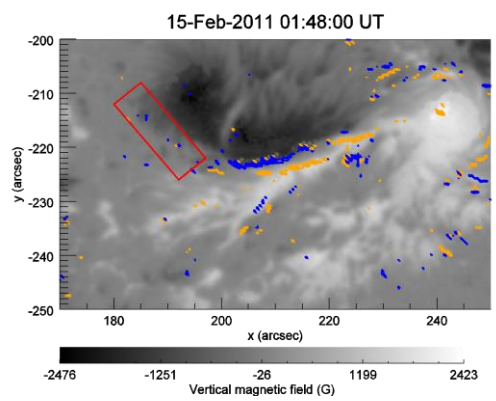


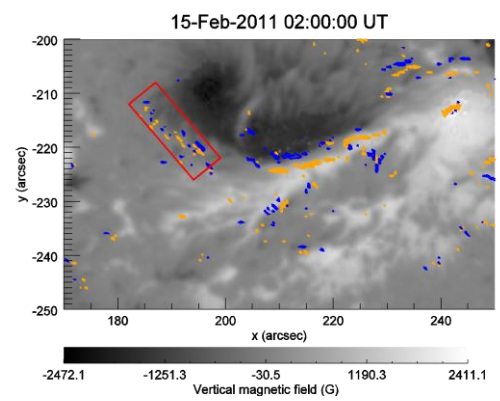


Eruption solaire de classe X2.2 – 15 Fev. 2011









Conclusions

- **Les émissions X (<50 keV) sont situées <u>au-dessus de la « feuille de courants verticaux »</u>**

Reconnexion magnétique ⟷ au niveau des couches de courants coronales

↓ ↓

Accélération de particules, chauffage

↓

Emissions X ⟷ Corrélation spatiale observée ⟷ Dont les courants photosphériques sont la trace

Conclusions

- **Les émissions X (<50 keV) sont situées <u>au-dessus de la « feuille de courants verticaux »</u>**

Reconnexion magnétique ⟷ au niveau des couches de courants coronales

↓ Accélération de particules, chauffage

↓ Emissions X ⟷ Corrélation spatiale observée ⟷ Dont les courants photosphériques sont la trace

- **De nouvelles sources d'émissions X sont apparues a différents moments <u>au-dessus de la zone où les courants photosphériques ont augmenté</u> entre 01:48 et 02:00**

Reconnexion magnétique (dans une nouvelle structure)

↙ Accélération de particules, chauffage

↘ Nouvelle topologie de B dans la couronne

↓ Emissions X ⟷ Corrélation spatiale observée ⟷ Augmentation des courants photosphériques

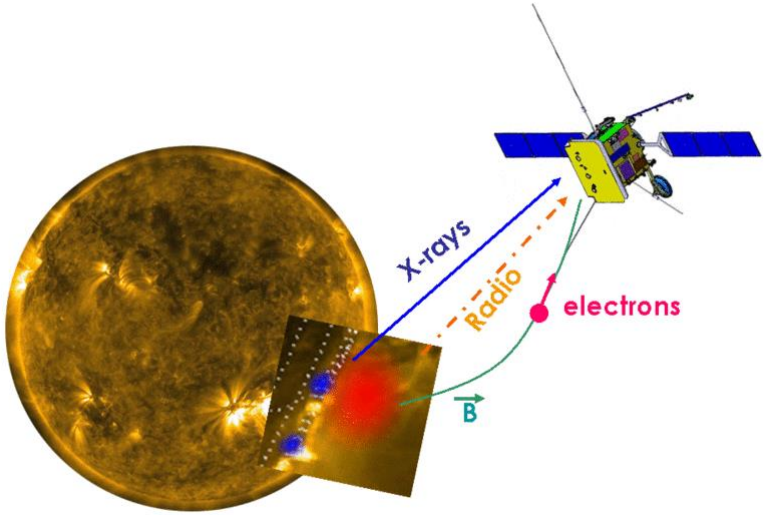
Perspectives

A court terme:

- Ce type de relation est-il commun à plusieurs éruptions ?

A plus long terme :

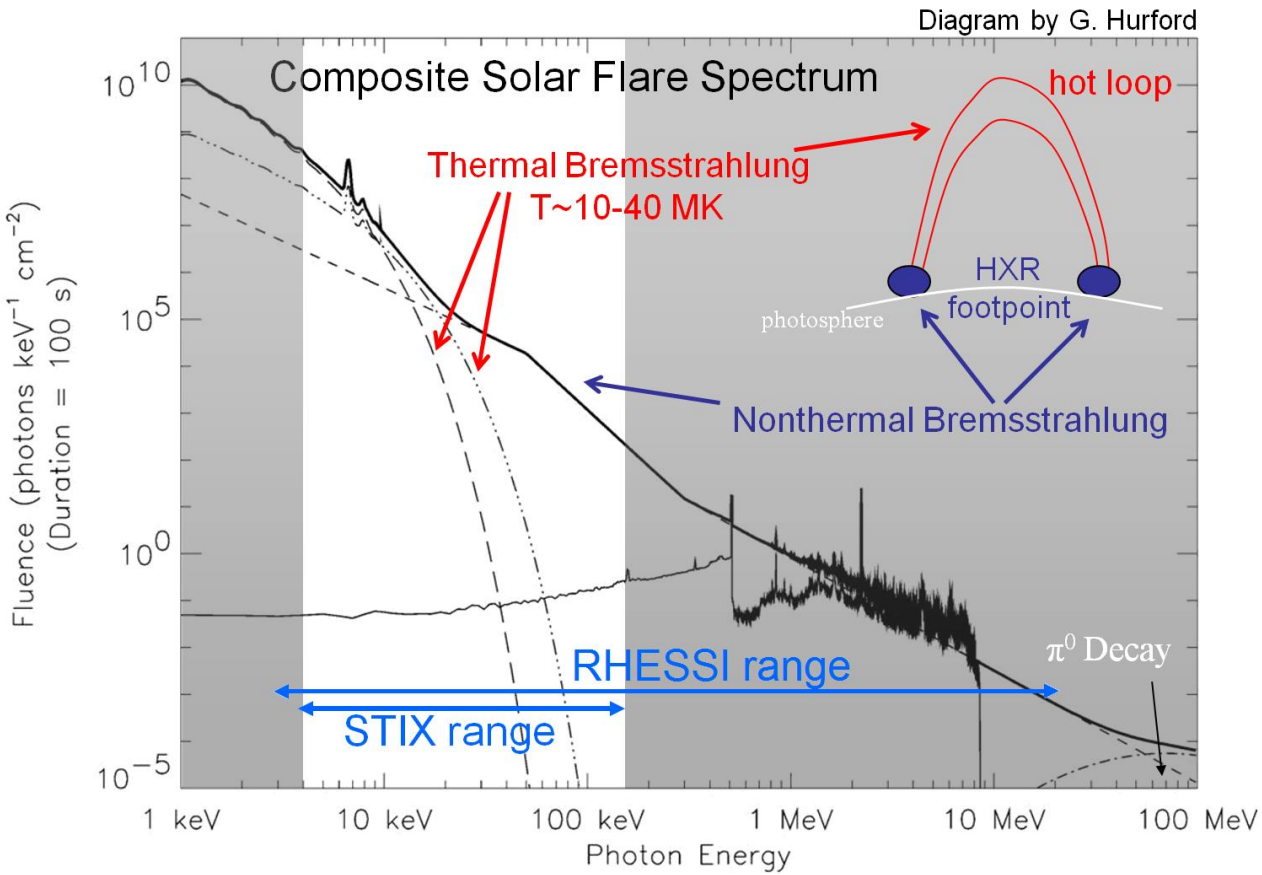
- Ce type d'étude pourra être réalisé en combinant STIX et PHI sur Solar Orbiter

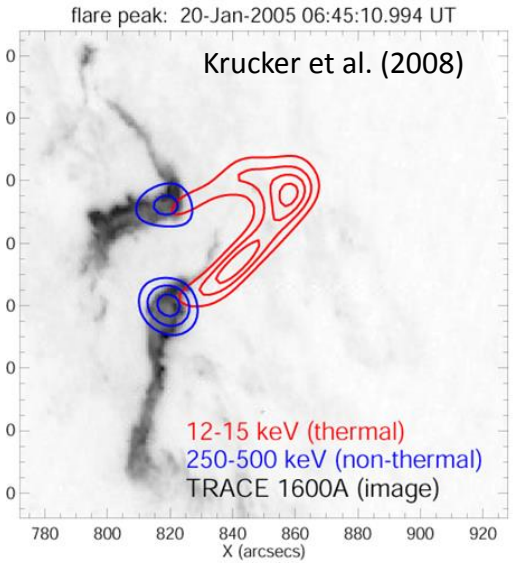


Bibliographie :

- Krucker, S. et al. (2008), *Hard X-ray emission from the solar corona*, The A&A Review, Volume 16, pp, 155-208
- Vilmer, N. (2012), *Solar Flares and Energetics Particles*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Volume 370, issue 1970, pp, 3241-3268
- Li, J. et al. (1997), *What is the Spatial Relationship between Hard X-ray Footpoints and Vertical Electric Currents in Solar Flares?,* ApJ, v. 482, p. 490
- Janvier, M. et al. (2014), *Electric current in flare ribbons: observations and 3D standard model*, accepted

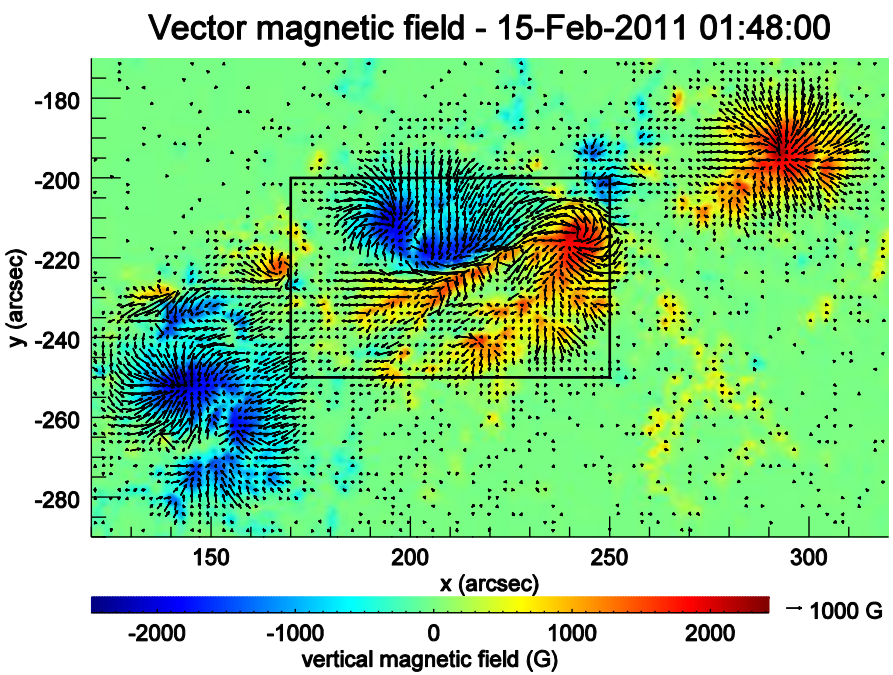
Accélération des particules dans la couronne solaire





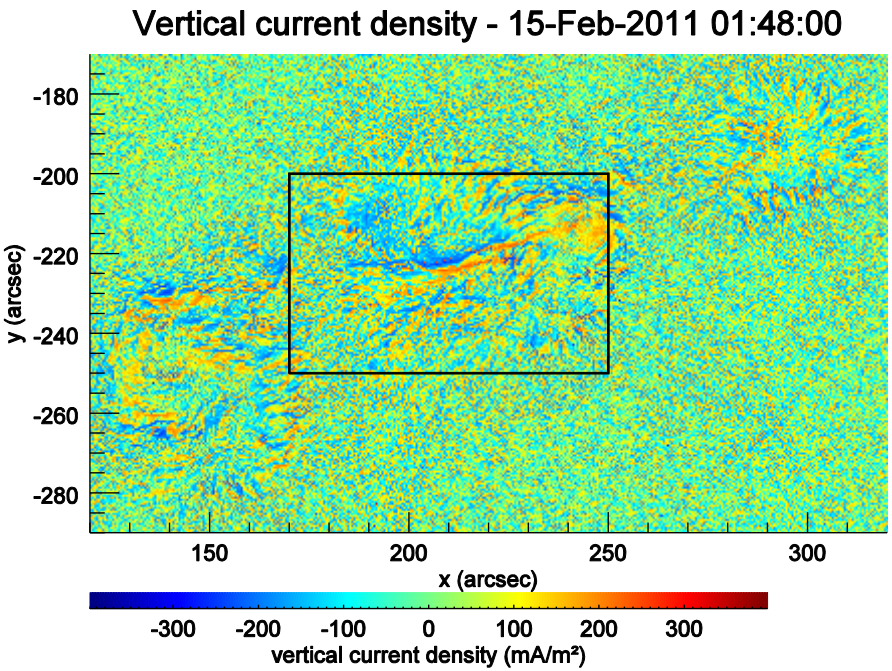
Introduction – Spectropolarimétrie et mesure des champs magnétiques

Dans le profil d'une raie du Fer (FeI à 6173.3 Å)
Images à 6 longueurs d'onde, et dans 4 états de polarisation,
→ 3 composantes du champ magnétique dans la photosphère



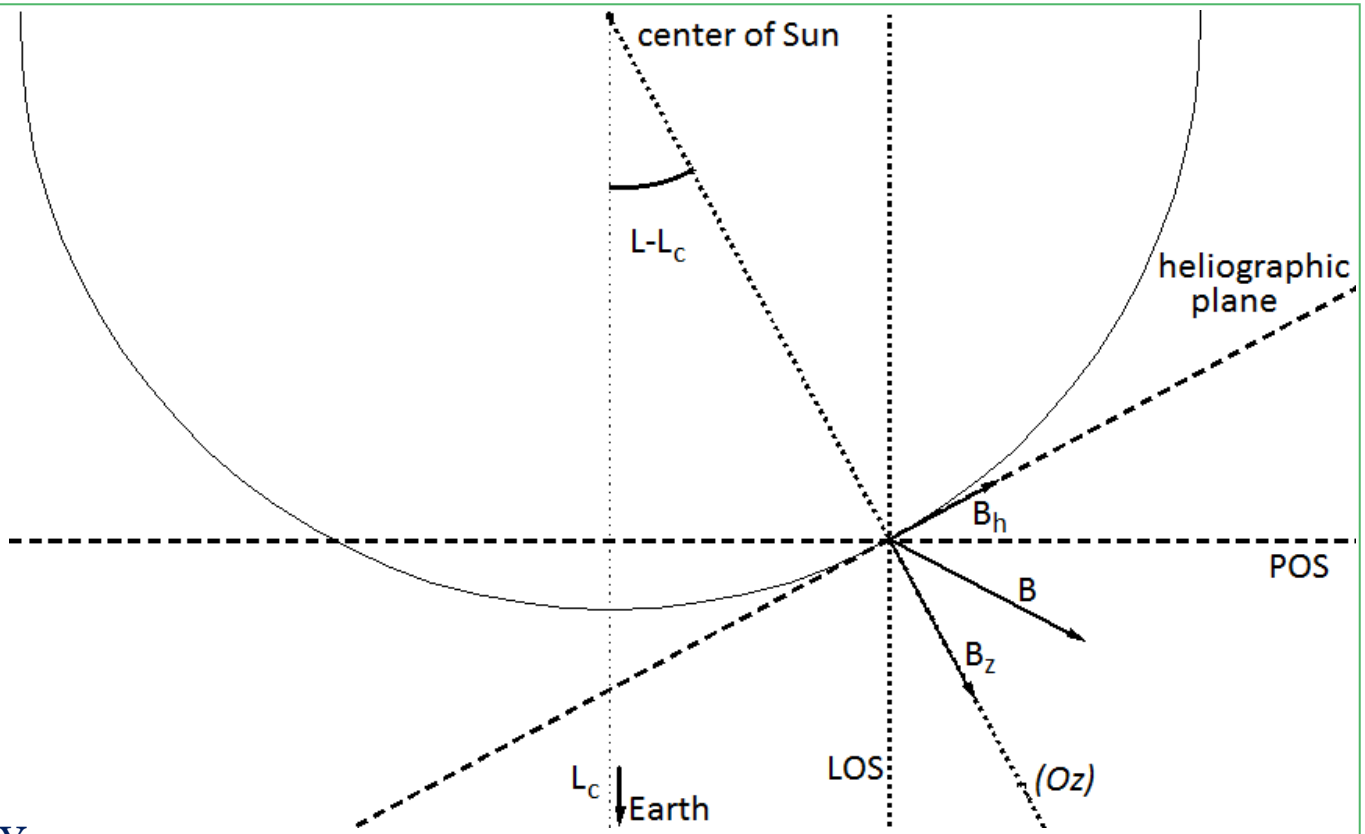
→ Densité de courants électriques verticaux:

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} rot(\vec{B}).\vec{e_z}$$



- Code d'inversion UNNOFIT
- Résolution d'ambiguité de Metcalf

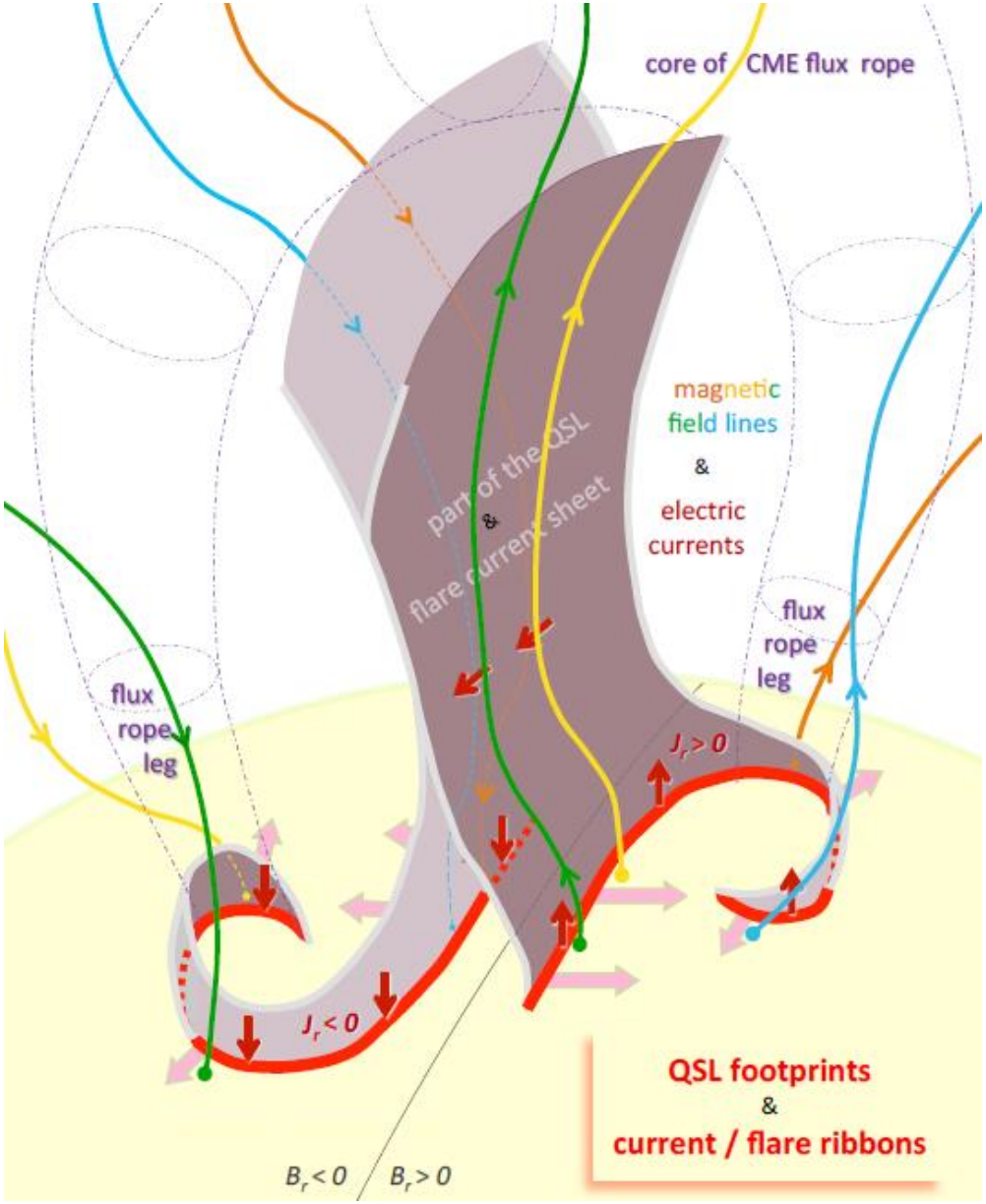
(Véronique Bommier)



SPECTROPOLARIMETRY :
Observation in an atomic line ➔ at one altitude
➔ Solar coordinates

Vertical field (B_z): parallel to the solar radius
Horizontal field : in the plane perpendicular to solar radius

Plot in the line-of-sight coordinates
to compare with RHESSI X-ray emission



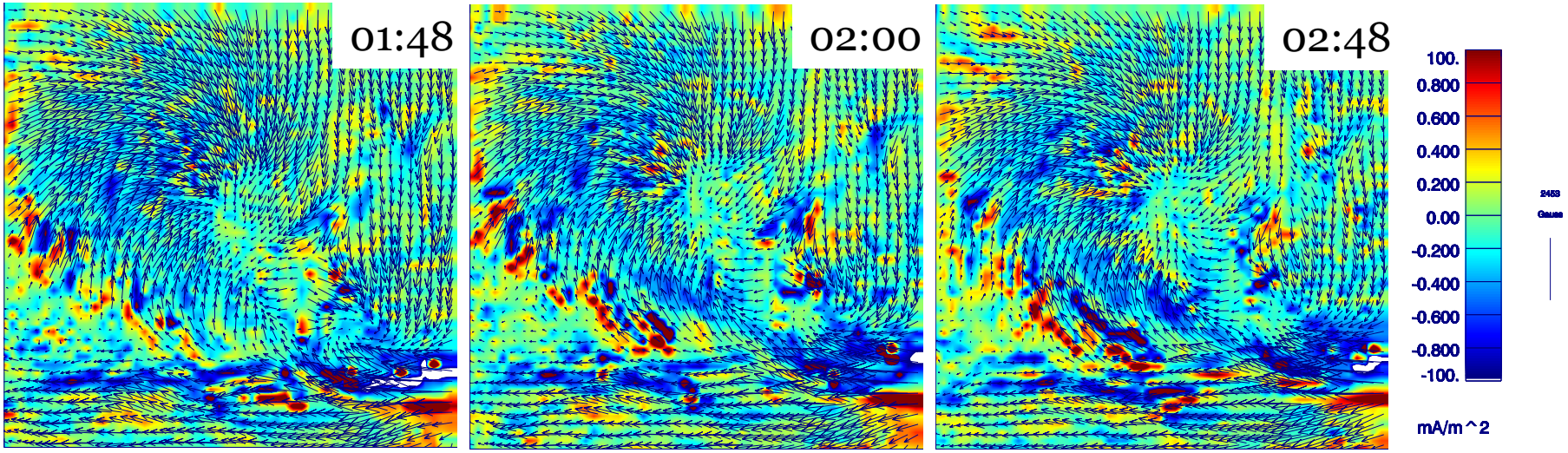
Janvier et al. 2014

- Could the changes in the current density be artefacts from polarization effects ?
  → *See Janvier et al. 2014*

- Polarization artifacts have been seriously considered, since they appear at flare ribbon location;
- But this effect is mainly seen for chromospheric lines (e.g. Hα, Na D2)

- Horizontal field vector has well resolved vector that smootly rotates across the current ribbon

→ Consistent magnetic field signal free of artifacts

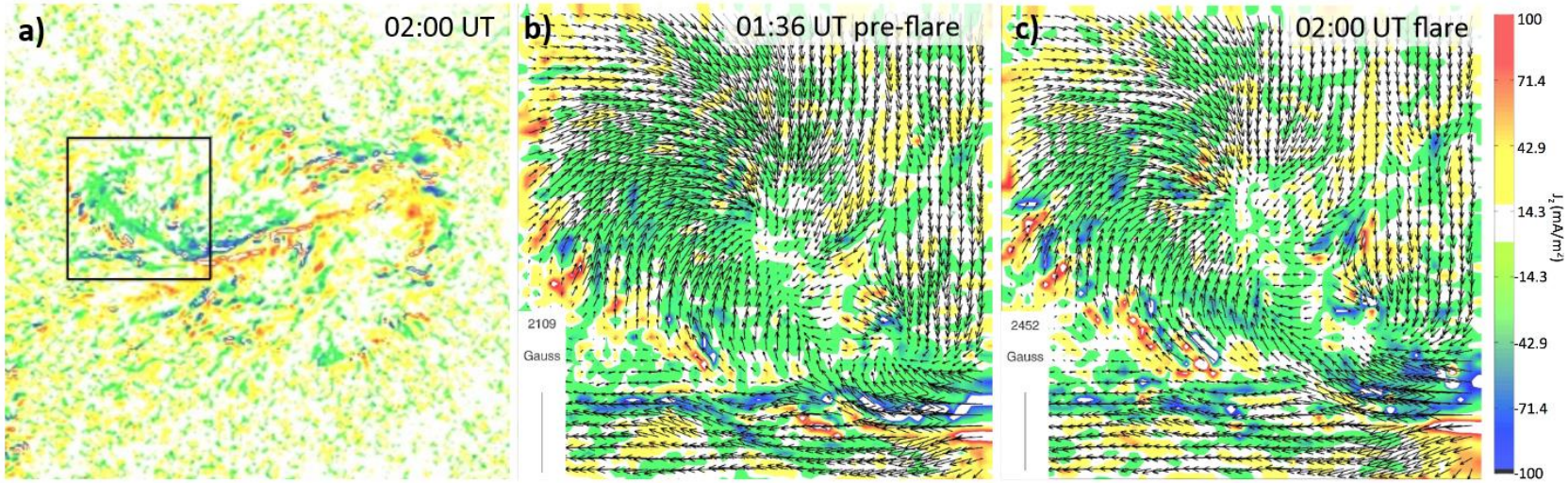


- Could the changes in the current density be artefacts from polarization effects ?
  → *See Janvier et al. 2014*

- Polarization artifacts have been seriously considered, since they appear at flare ribbon location;
- But this effect is mainly seen for chromospheric lines (e.g. Hα, Na D2)

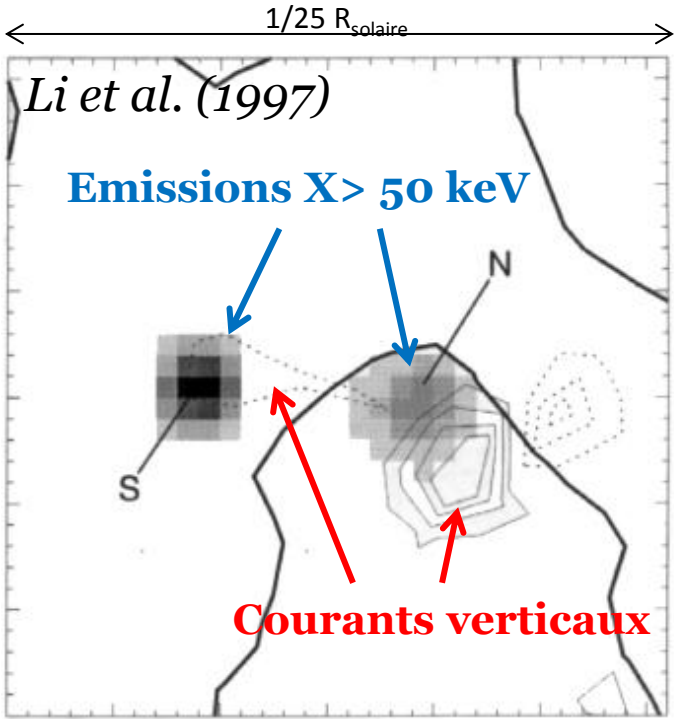
- Horizontal field vector has well resolved vector that smootly rotates across the current ribbon

→ Consistent magnetic field signal free of artifacts



Introduction

Quelle est la relation entre les sites d'accélération des particules et les courants électriques (indicatifs d'un champ électrique) ?



Rayons X: Yohkoh –
Courants verticaux: MSO

Première comparaison entre courants électriques et sources X :
→ Sources X proches des maxima de courant pour 6 éruptions solaires

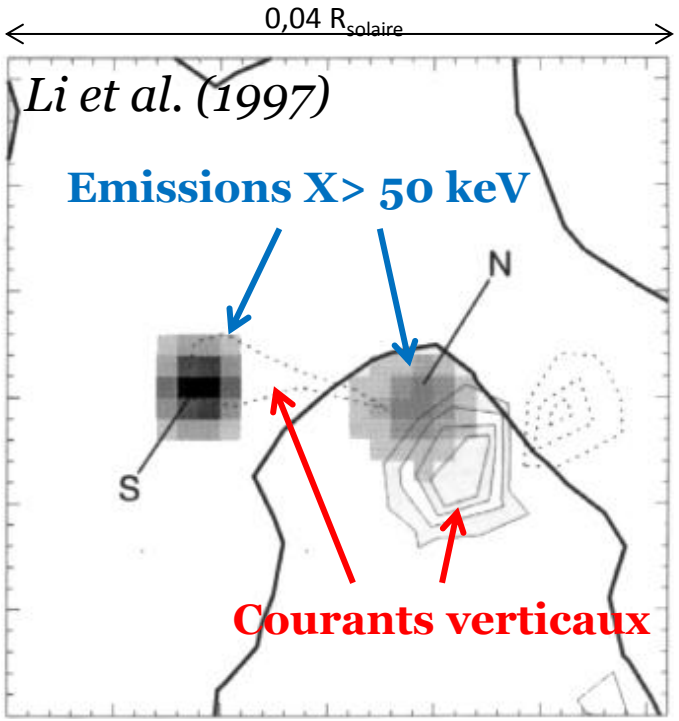
Aujourd'hui :

- SDO/HMI → $\vec{B}$ **et** J_z, cadence temporelle de 12 min + résolution spatiale de 0,5 arcsec
- RHESSI → **Images et spectres en rayons X**, cadence temporelle de 4 sec + résolution spatiale de 3 arcsec

→ Nouvelle étude de la relation entre les sites d'émissions X et la localisation et l'évolution des courants électriques

Introduction

Quelle est la relation entre les sites d'accélération des particules et les courants électriques (indicatifs d'un champ électrique) ?



Rayons X: Yohkoh –
Courants verticaux: MSO

Première comparaison entre courants électriques et sources X :
→ Sources X proches des maxima de courant pour 6 éruptions solaires