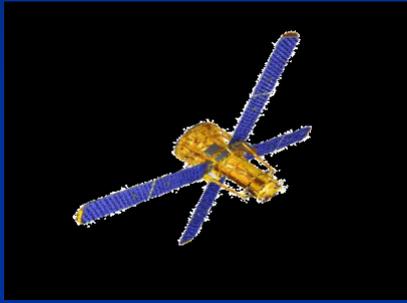


Particules énergétiques dans les éruptions solaires:



observations RHESSI

Nicole Vilmer

LESIA

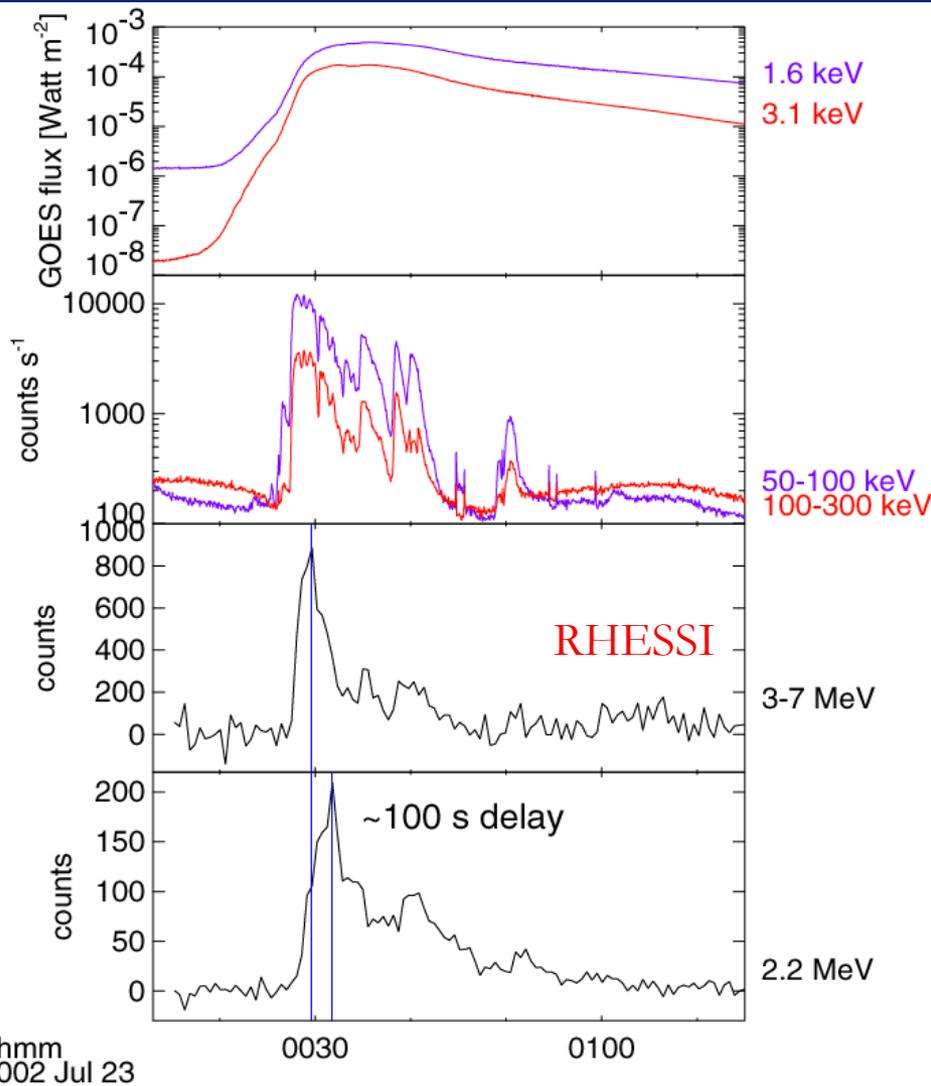
Observatoire de Paris

Collaborateurs (PNST):

Sophie Musset (LESIA), Véronique Bommier (LESIA),

Rui Pinto (IRAP), Sacha Brun (AIM), Hamish Reid, Eduard Kontar (Université Glasgow)

Diagnostics X/gamma des électrons et ions énergétiques dans les éruptions solaires



Emissions X mou (GOES)
Plasma chaud (7 à 8 MK)

Emissions X dur
Rayonnement de freinage des
électrons accélérés ($> 10\text{-}20$ keV)

Raies γ :
Raies de déexcitation nucléaire (e.g. C et O) (60%
du taux de comptage)
Signature des ions énergétiques ($> 2\text{MeV/nuc}$)

Capture radiative des neutrons à 2.2 MeV
interactions p-p; p- α et p-ions
Productions de neutrons rapides
Thermalisation puis capture radiative des neutrons sur H
ambient: formation de deutérium et raie à 2.2 MeV du
deutérium

Chauffage et accélération de particules dans les éruptions solaires

Observations satellite RHESSI

NASA SMEX PI R.P. Lin puis S. Krucker (Berkeley)

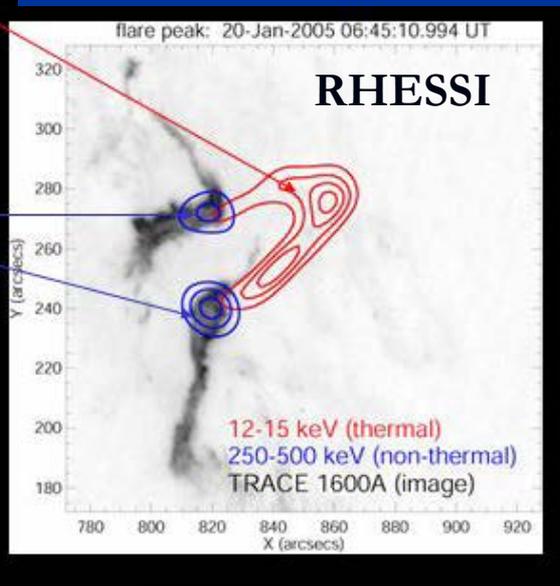
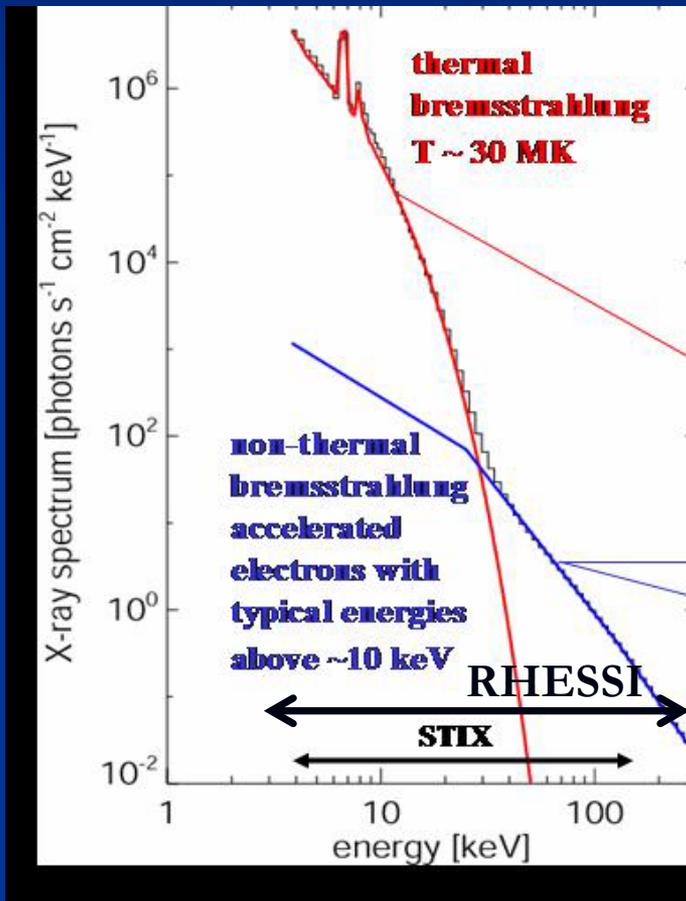
Lancement 5 Février 2002

Encore en fonctionnement

>11000 éruptions > 6 keV de Février 2002 à Février 2016.

>100 éruptions de classe X

27 éruptions avec raies γ



Observations RHESSI

3 keV-17 MeV

Images et spectres X

Imagerie: 2,3'' < 100 keV

7'' 100-400 keV

36'' > 400 keV

Spectroscopie:

résolution: <1 keV à 3 keV

5 keV à 5 MeV

Spectro-imagerie

Premières images

dans la raie 2.2 MeV

Chauffage et accélération de particules dans les éruptions solaires

Quel lien entre chauffage et accélération de particules?

Où sont situés les sites d'accélération? Sont-ils localisés
Comment se fait le transport des particules des sites d'accélération aux sites d'émissions X/ γ

Quelles sont les caractéristiques de l'accélération (temps d'accélération, durée de l'événement?)

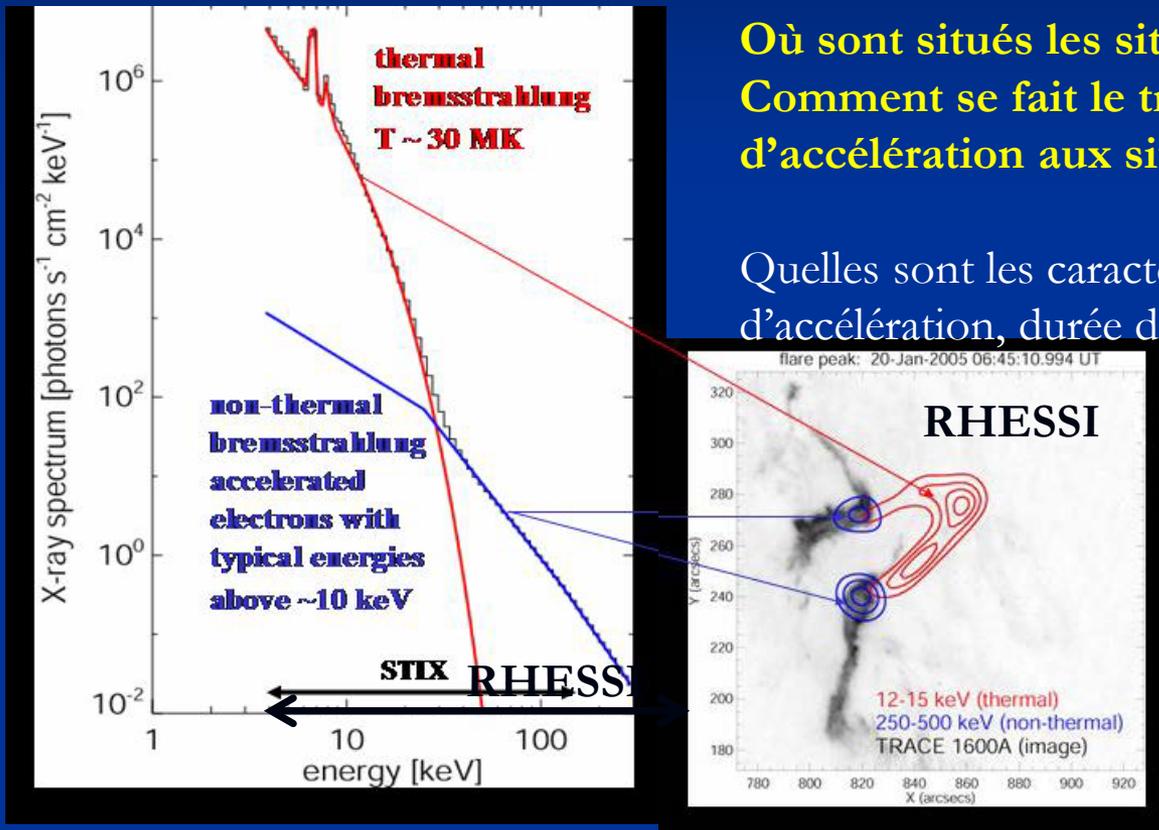
Quelles sont les caractéristiques des particules énergétiques (nombre, spectres en énergie, abondances des différents ions)

Quels mécanismes d'accélération dans les éruptions?

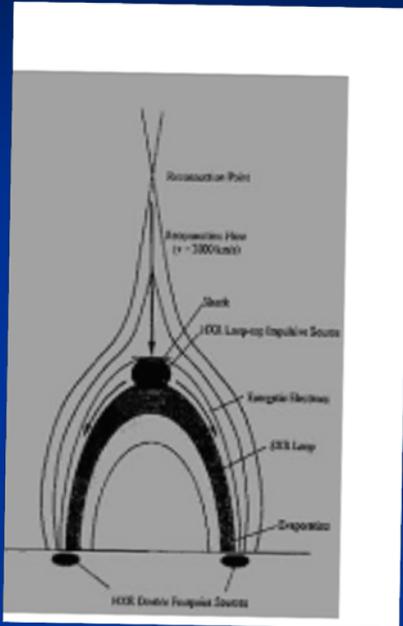
Accélération par chocs?

Accélération stochastique (interactions avec ondes)

Accélération par champ électrique (e.g. couches de courant)



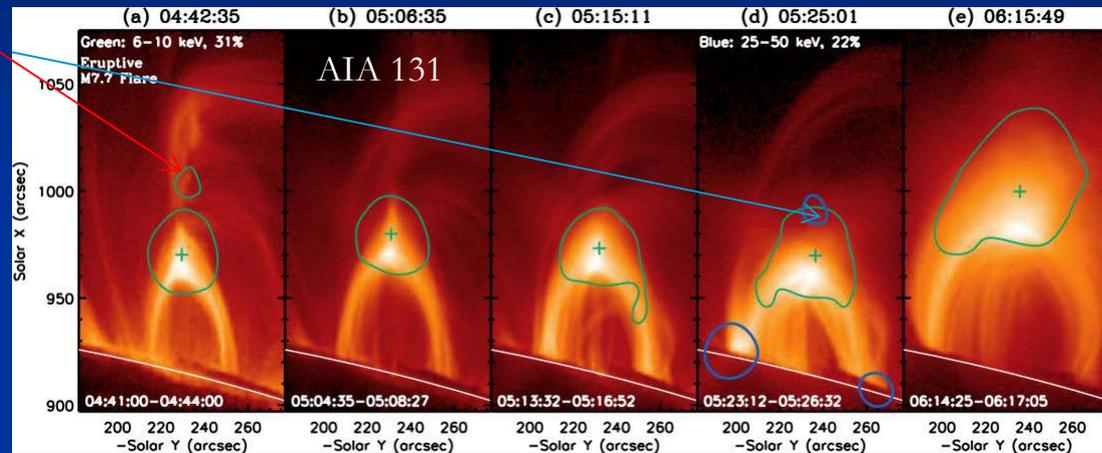
Libération d'énergie et accélération d'électrons dans les éruptions (I): de **YOHKOH/SXT** à **RHESSI (spectro-imagerie)**



Source coronale

« Above the loop top »

Footpoints

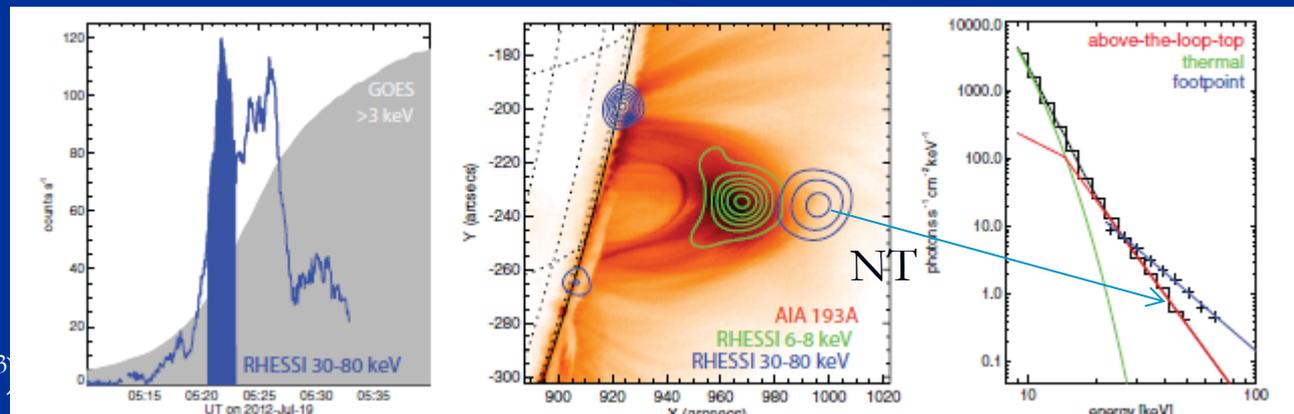


Liu et al., 2013

Conversion d'énergie magnétique et accélération de particules dans couche de courant au dessus de l'arche éruptive.

Détection d'une source X dans la bande d'énergie 30-80 keV au dessus de la source X dans la bande 6-8 keV

liée à la production d'électrons énergétiques (identifiée comme région d'accélération; $n_{nth} \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$) (Krucker & Battaglia, 2014)



Libération d'énergie et accélération d'électrons dans les éruptions (II): mise en évidence de sources coronales non-thermiques intenses et transport diffusif

Mise en évidence dans plusieurs éruptions du confinement d'électrons non thermiques dans la couronne:

Mesures spectro-imagerie: évaluation du nombre et spectre électrons non-thermiques dans la couronne et dans les pieds

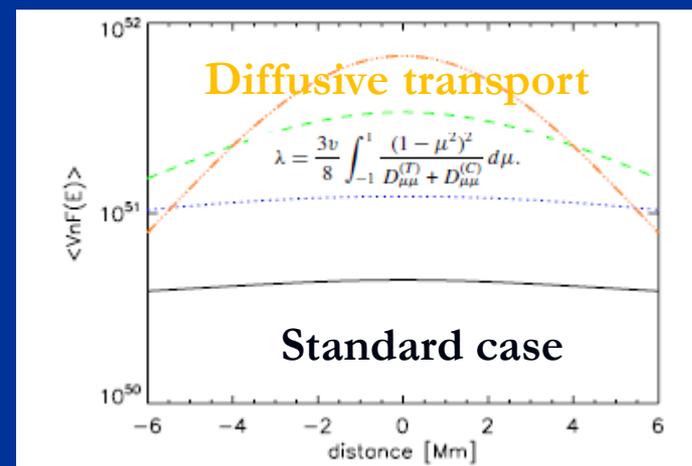
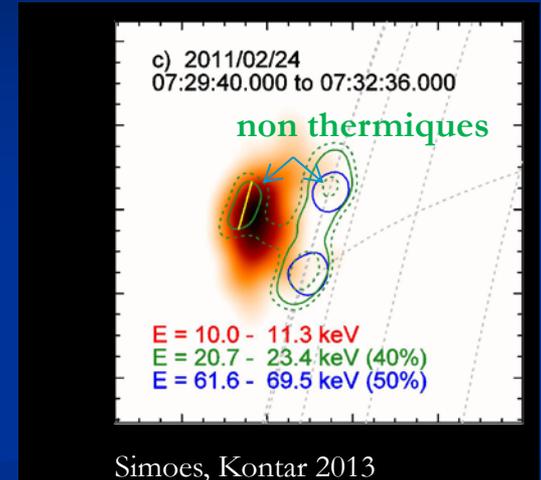
$\dot{N}_{LT}/\dot{N}_{FP}$ compris entre 1.4 et 1.7 (Simoes & Kontar, 2013)

$\dot{N}_{LT}/\dot{N}_{FP} = 2.2$ (Musset et al. en prép.)

Incompatible avec transport « standard » de la couronne (région d'accélération) vers les pieds

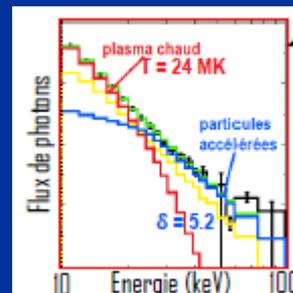
Effets de la diffusion des électrons dans un plasma turbulent et d'un transport diffusif

des électrons? (voir Kontar, Bian, Emslie, Vilmer, 2014)

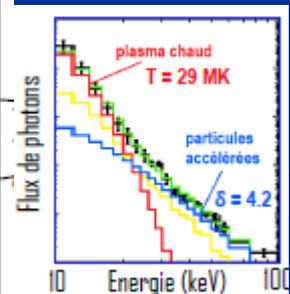
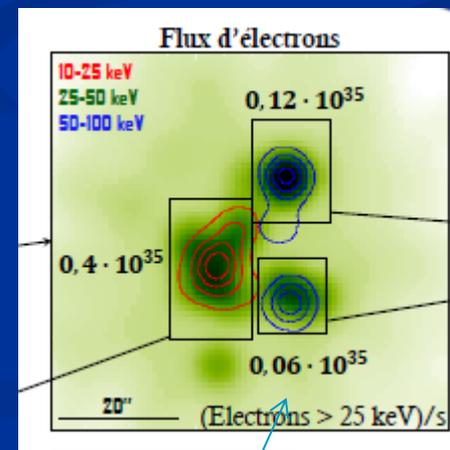


Distribution spatiale des électrons (Kontar et al., 2014)

$$\lambda = 10^7, 10^8, 10^9 \text{ cm}$$



Source coronale



Source pied

See poster 5.11 Musset, Kontar, Vilmer

Libération d'énergie et accélération d'électrons dans les éruptions (III): une alternative au modèle standard: accélération et libération d'énergie distribuée spatialement dans un tube de flux torsadé

Où est la région de libération d'énergie et d'accélération des particules?

Modèle standard

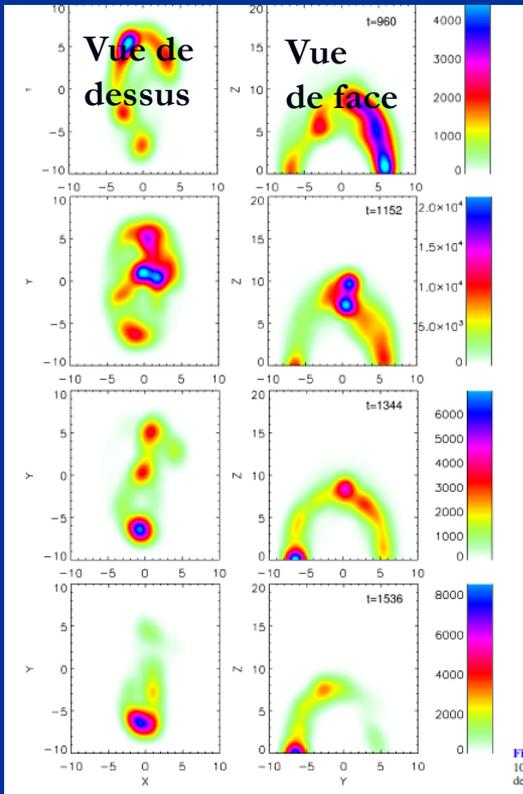
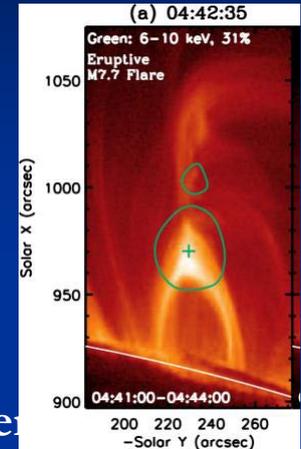
OU

accélération des électrons dans des couches de courant « fragmentées », distribuées spatialement et résultant de l'évolution de tubes de flux torsadés (Turkmani, 2005, 2006; Gordovskyy et al. (2012,2013,2014)

Emissions X dur synthétiques à 10 keV produites dans un tube de flux torsadé dense (10^{11} cm^{-3}): sources X aux pieds MAS aussi au sommet de la structure

Simulation MHD du tube de flux torsadé (création de couches de courant, reconnection,...) couplée à un modèle de particule test (accélération de la population d'électrons thermiques locales, puis transport et rayonnement X)

Gordovskyy et al, 2014



Libération d'énergie et accélération d'électrons dans les éruptions (III): une alternative au modèle standard: accélération et libération d'énergie distribuée spatialement dans un tube de flux torsadé

Est-il possible de reproduire des émissions X mou raisonnables dans ces modèles?

Simulation numérique d'un tube de flux torsadé (simulation numérique MHD issu du code PLUTO (Mignone et al. 2007))

Conditions initiales

$T = 1.2 \text{ MK}$

$B = 200 \text{ G}$

$L = 5 \cdot 10^9 \text{ cm}$

$\rho = 2 \cdot 10^{-14} \text{ g}$

Evolutions champs magnétiques, densité de courant

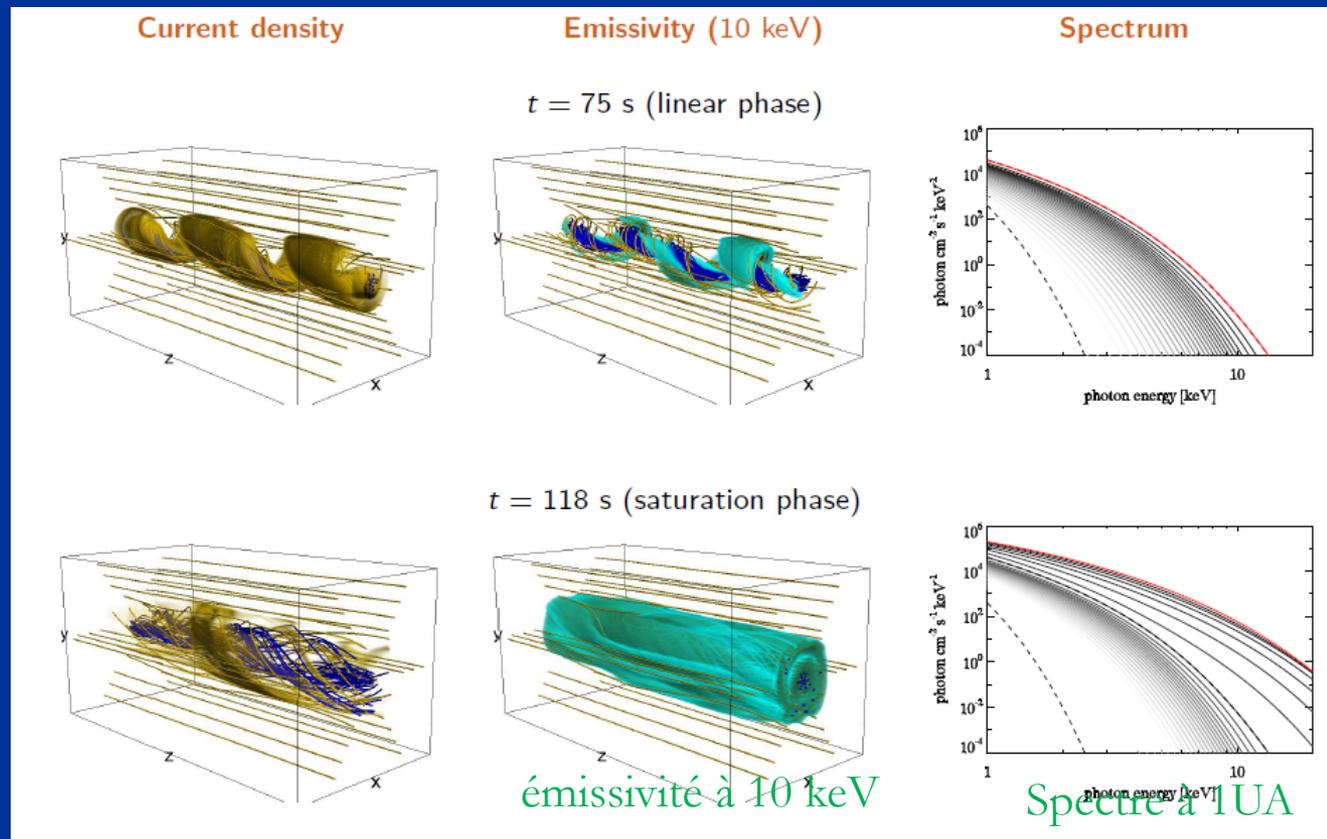
En bleu, lignes de B initialement à la périphérie du tube de flux

En jaune: distributions des couches de courant

Calcul émissivité X (en vert) et spectres X à 1 AU

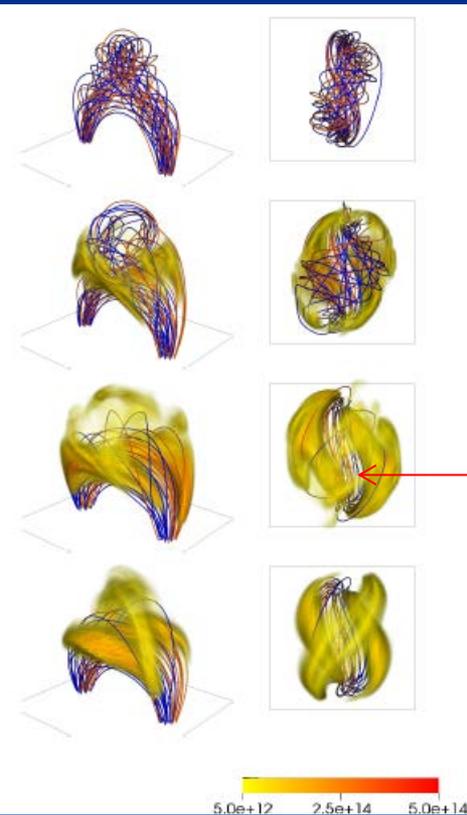
(OK pour éruption classe GOES C)

Pinto, Vilmer, Brun, 2015



Libération d'énergie et accélération d'électrons dans les éruptions (III): une alternative au modèle standard: accélération et libération d'énergie distribuée spatialement dans un tube de flux torsadé

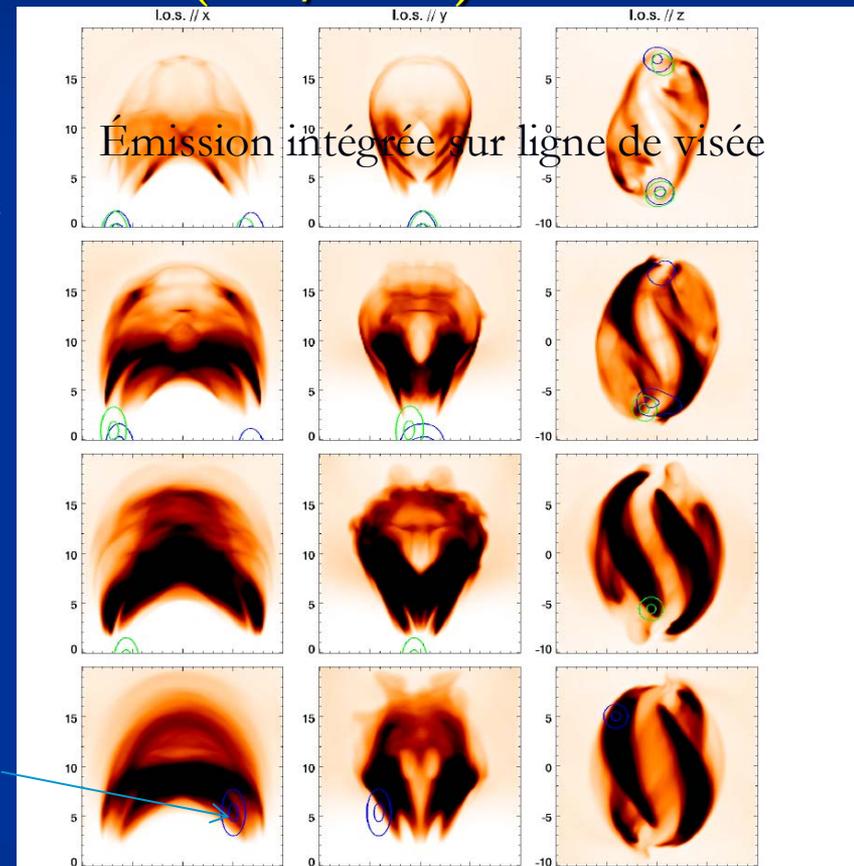
Quel lien entre chauffage et accélération de particules (SXR/HXR?)



Modèle MHD dérivé de Gordovsky et al., (2014) incluant atmosphère stratifiée courbure B à grande échelle $L = 24\text{Mm}$
 $B_f = 90\text{G}$
 $B_t = 10\text{G}$
 $T = 0.8\text{MK}$
(état initial)

Calcul émissivité SXR par méthode développée dans Pinto et al. 2015

Emissions X non thermiques



Émission intégrée sur ligne de visée

perspective Vue de dessus

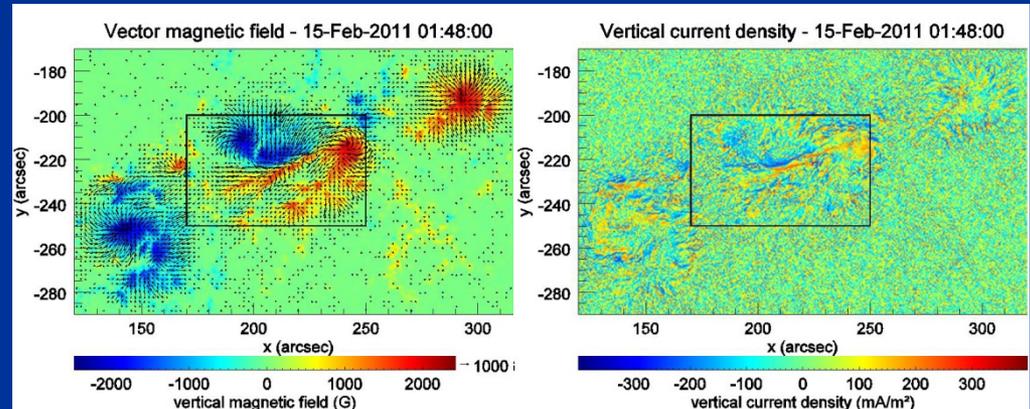
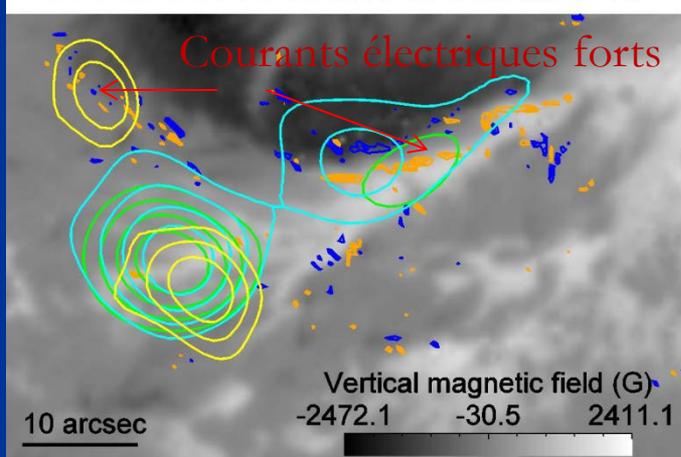
See poster 5.12 Pinto, Vilmer, Gordovsky, Browning et Pinto, Gordovsky, Browning, Vilmer 2016

Accélération des particules dans les éruptions

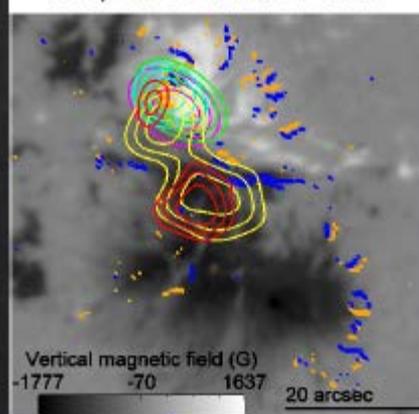
- Quel mécanisme d'accélération?
- Si accélération par champs électriques directs (couches de courant) : quels lien entre sites émissions électrons non-thermiques et courants électriques mesurés?

Comparaison émissions X de RHESSI et cartes de courant électrique déduits de cartes de B:
Sources X au dessus des régions de fort courant électrique (photosphérique)

15-Feb-2011 01:55:10 to 01:55:50 UT



06-Sep-2011 22:21:40 to 22:22:00 UT



Spectro-polarimétrie avec SDO/HMI

Code inversion UNNOFIT

Code de résolution

ambiguïté Metcalf

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \text{curl}(\vec{B}) \cdot \vec{e}_z$$

Musset, Vilmer, Bommier (2015)

Musset, Vilmer, Bommier (AGU, 2015)

Grey scale : Bz
Positive and negative
Jz > 100 mA/m²

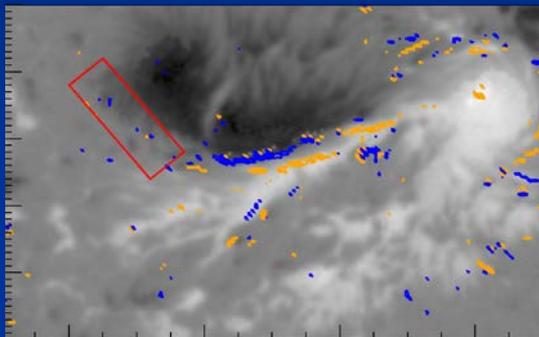
X-ray emission:

- 12 - 25 keV
- 25 - 50 keV
- 50 - 100 keV

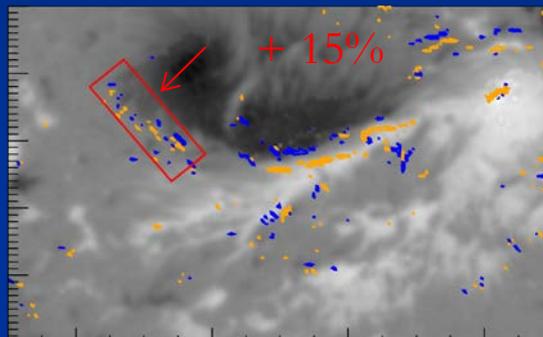
Accélération des particules dans les éruptions

Evolutions simultanées sources X et cartes de courant électrique:

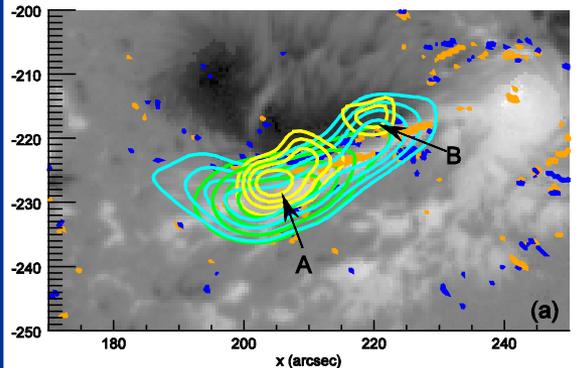
15-Feb-2011 01:48:00 UT



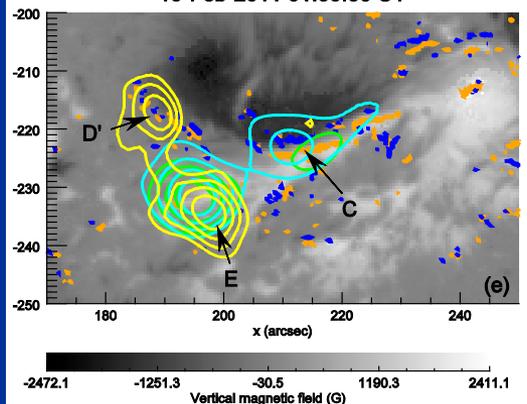
15-Feb-2011 02:00:00 UT



15-Feb-2011 01:49:08 UT



15-Feb-2011 01:55:30 UT



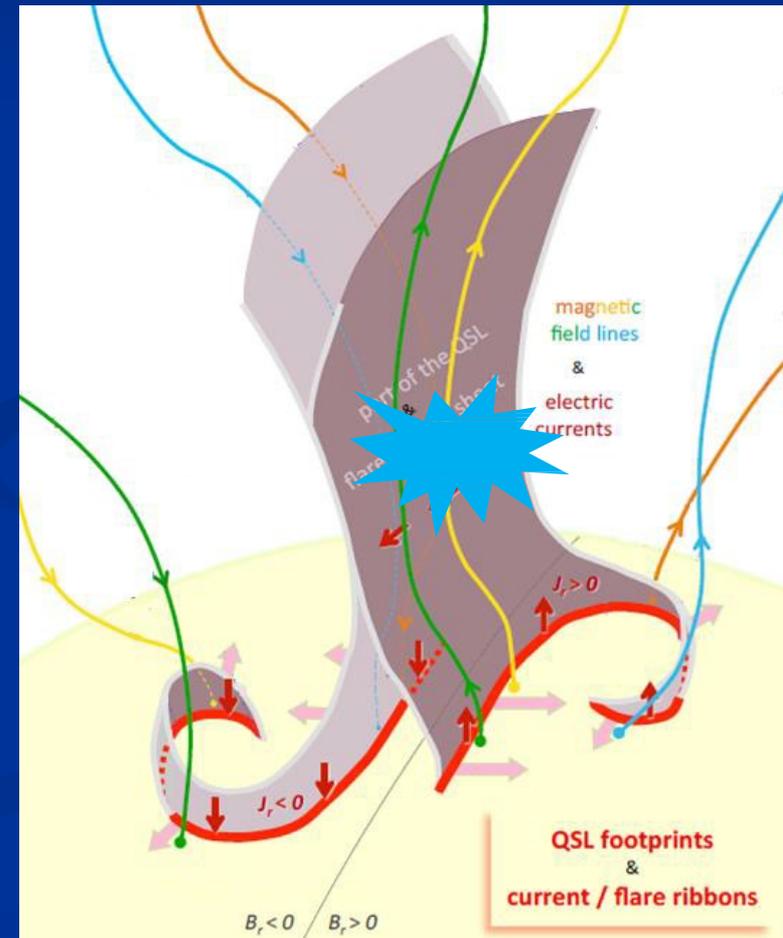
Apparition nouvelle source X
en liaison
avec augmentation
localisée courants

Emissions X et courants électriques: interprétation

Emissions X au dessus des régions à forte concentration de courants électriques verticaux

Reconnection magnétique \longleftrightarrow couches courant coronal

Adapté de Janvier et al. 2004



Emissions X et courants électriques: interprétation

Emissions X au dessus des régions à forte concentration de courants électriques verticaux

Reconnection magnétique \longleftrightarrow couches courant coronal

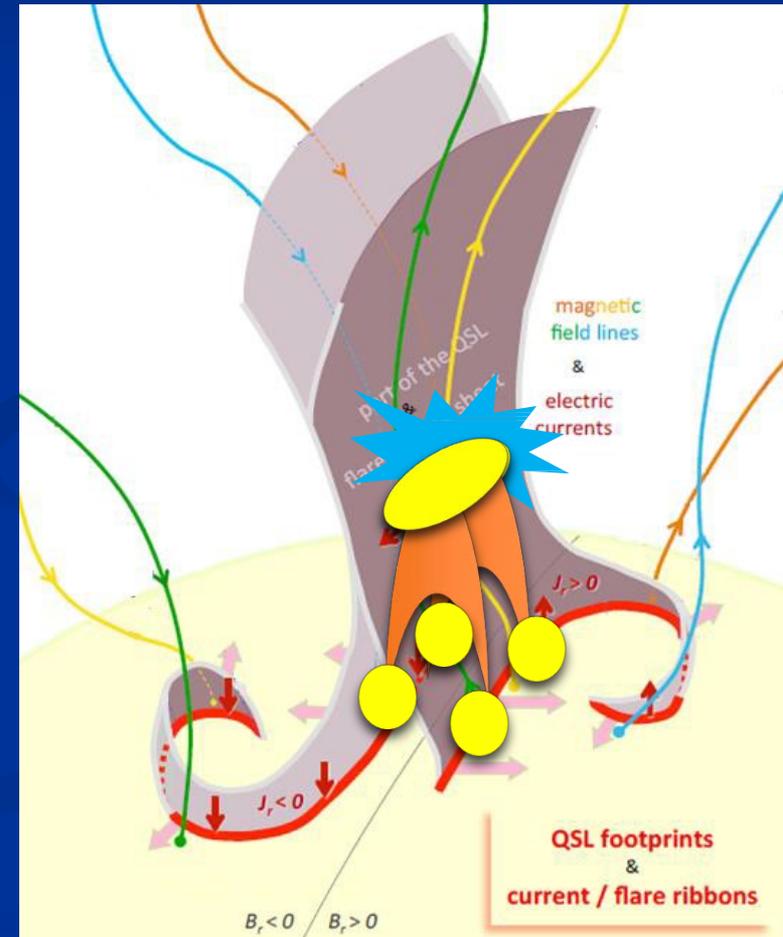
Adapté de Janvier et al. 2004



Accélération de particules
Chauffage



tracés par courant
photosphérique



Emissions X et courants électriques: interprétation

Emissions X au dessus des régions à forte concentration de courants électriques verticaux

Reconnection magnétique \longleftrightarrow couches courant coronal

Adapté de Janvier et al. 2004

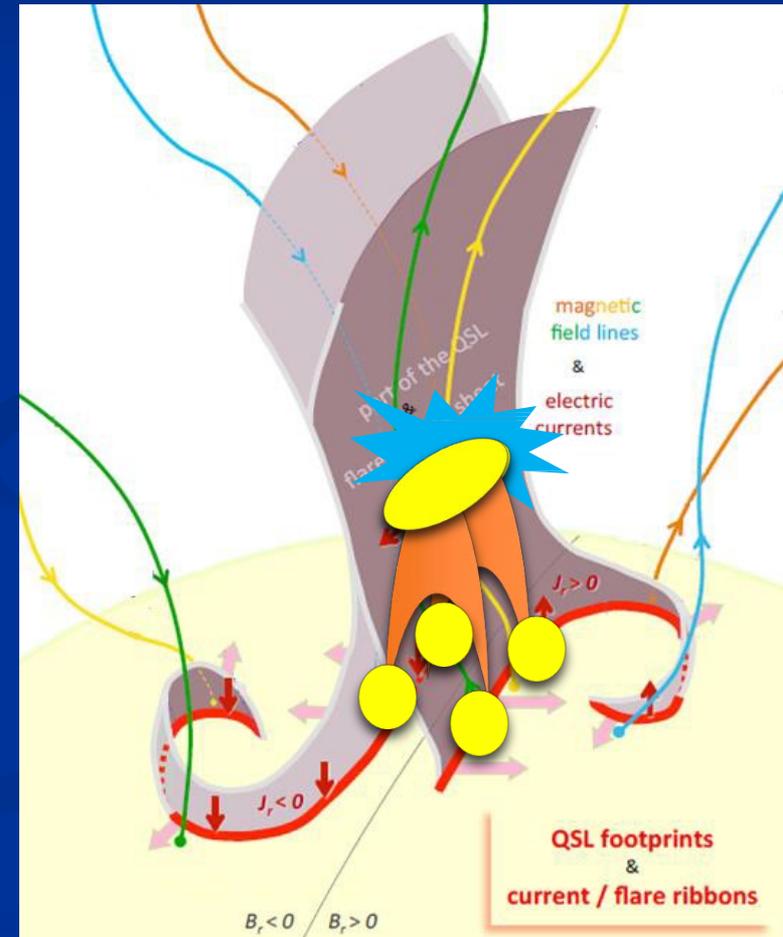


Accélération de
particules
Chauffage

Correlation



tracés par courant
photosphérique



Emissions X et courants électriques: interprétation

Emissions X au dessus des régions à forte concentration de courants électriques verticaux

Reconnection magnétique \longleftrightarrow couches courant coronal

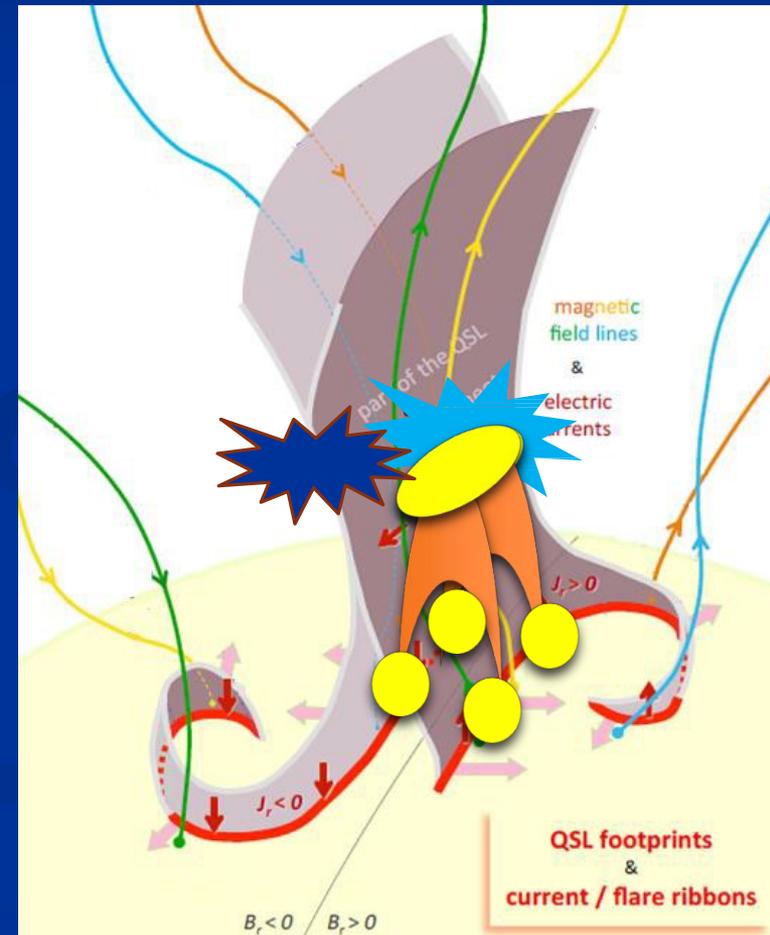
Adapté de Janvier et al. 2004



Accélération de particules
Chauffage

tracés par courant
photosphérique

- **Apparition nouvelle source X au dessus zone**
croissance courant photosphérique X-ray sources
Reconnection magnétique (nouvelle source)



Emissions X et courants électriques: interprétation

Emissions X au dessus des régions à forte concentration de courants électriques verticaux

Reconnection magnétique \longleftrightarrow couches courant coronal

Adapté de Janvier et al. 2004



Accélération de particules
Chauffage

tracés par courant
photosphérique

- **Apparition nouvelle source X au dessus zone**
croissance courant photosphérique X-ray sources
Reconnection magnétique (nouvelle source)



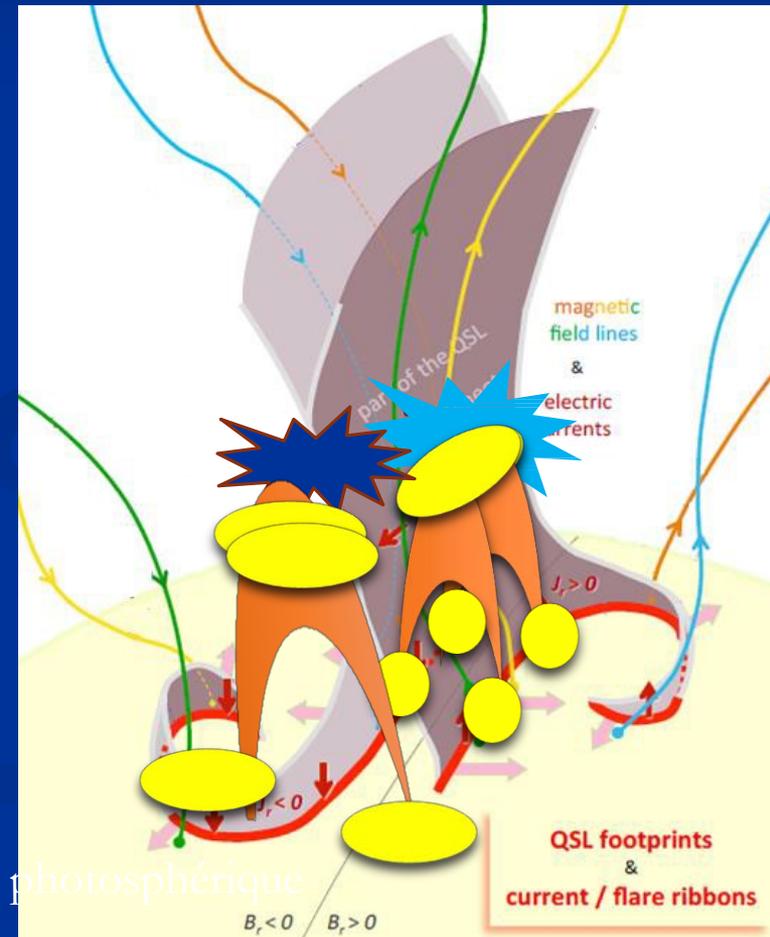
Accélération de particules
Chauffage

Changement B coronal

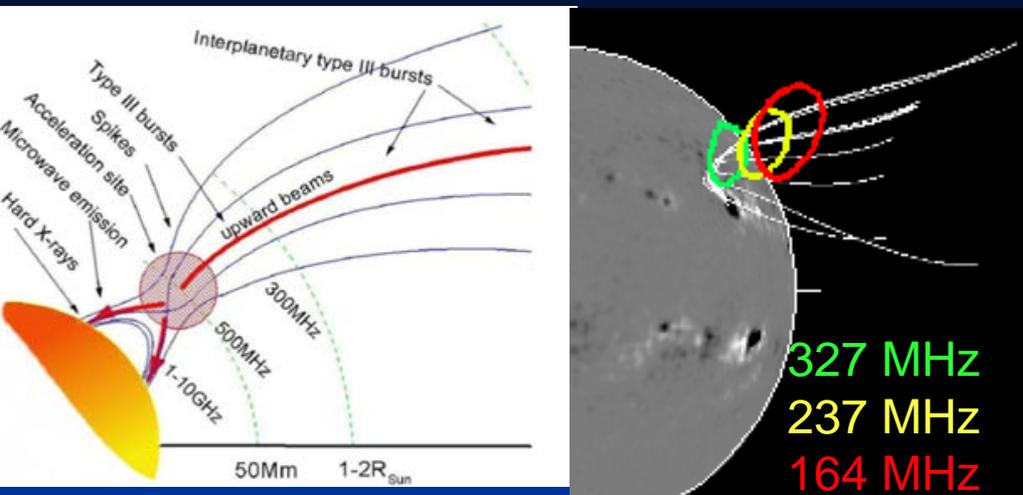


Emissions X

Augmentation courant photosphérique



Diagnostics X et radio des faisceaux d'électrons



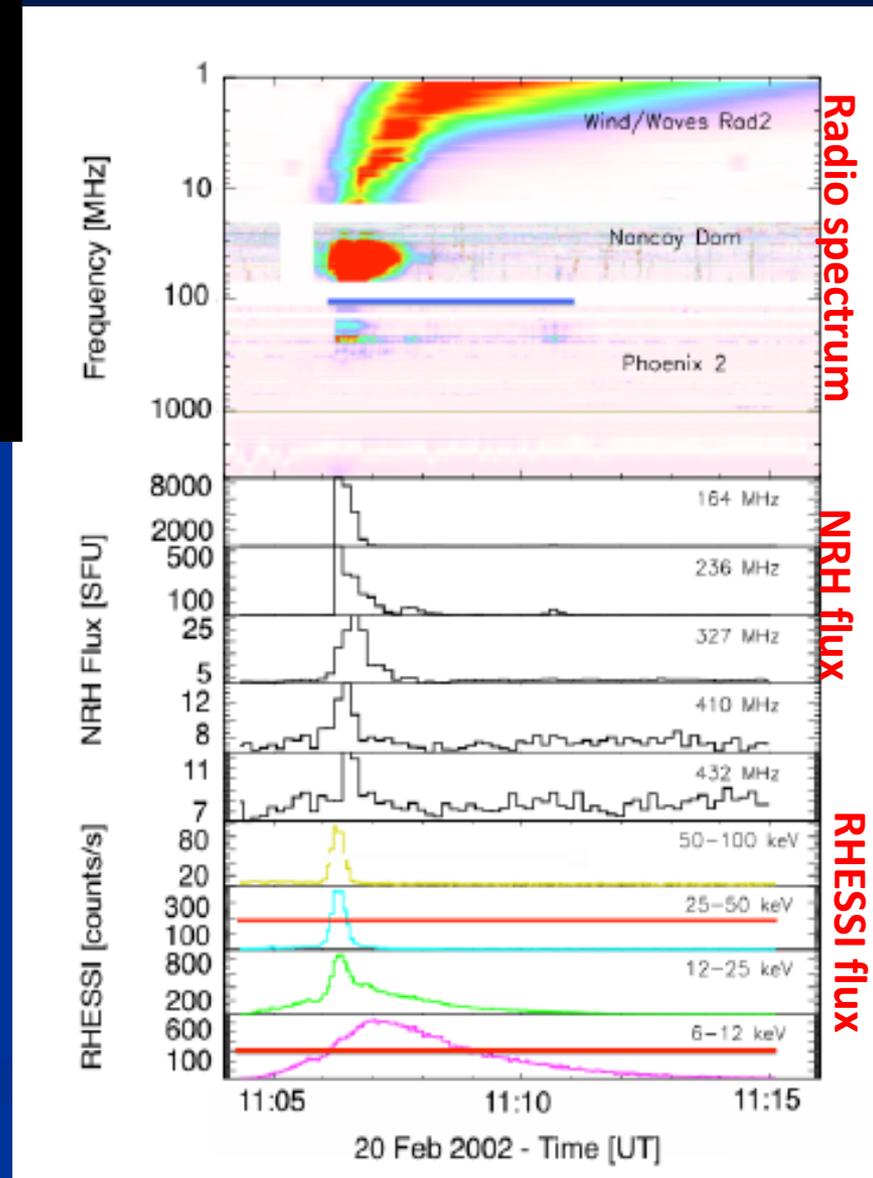
Quels liens entre électrons produisant les éruptions X et les électrons des émissions radio (ex types III)?

Corrélations entre intensités X et intensités radio?

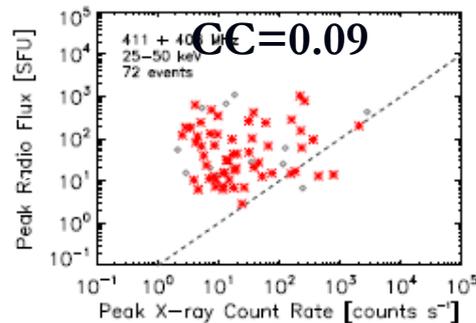
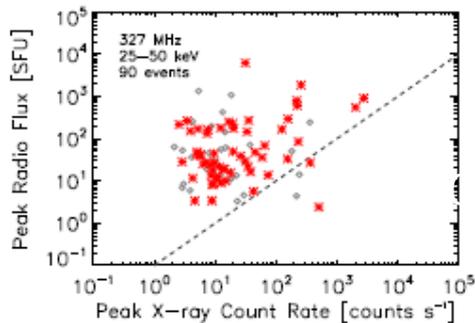
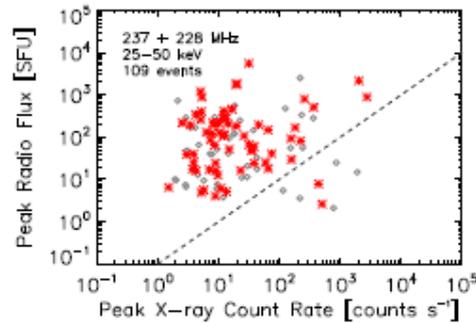
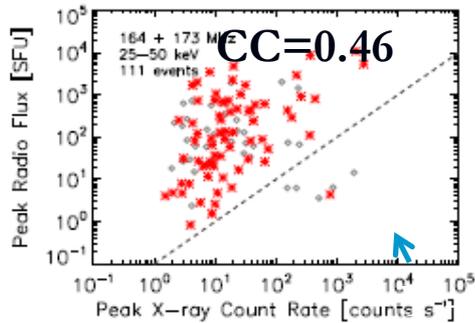
Quel pourcentage de sursauts de type III dans la couronne se prolongent dans le milieu interplanétaire?

Etude basée sur >1000 types III coronaires sur 10 ans de données (2002-2011)

(Reid, H.; Vilmer, N. A&A, 2016 en révision)



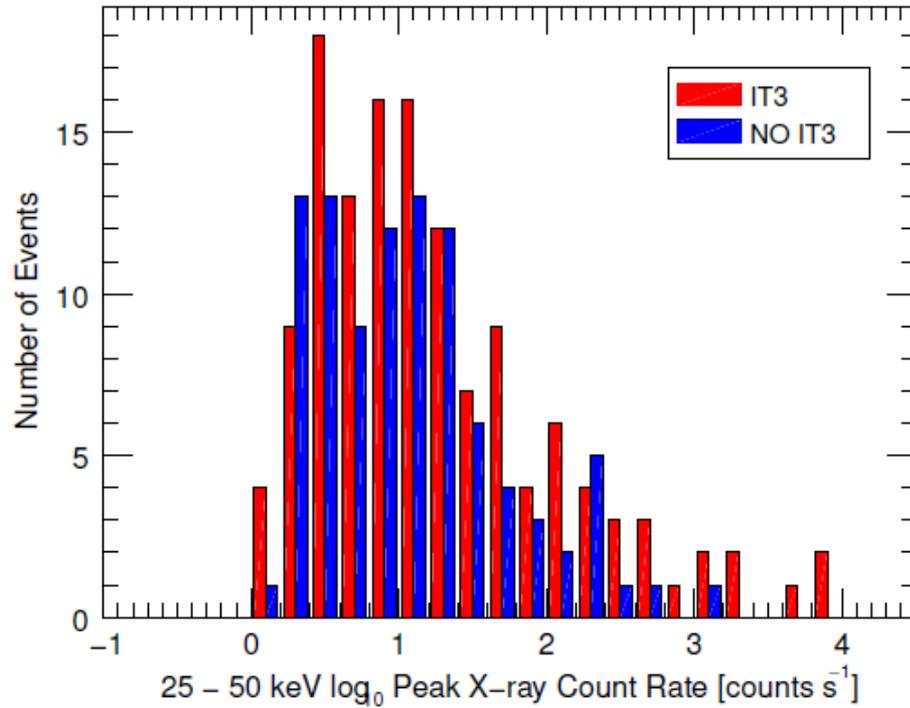
Diagnostics X et radio des faisceaux d'électrons



+ de corrélation
entre flux radio vers
160 MHz (mesurés
par NRH) que vers
410 MHz avec les
intensités des
sursauts X
(~ 100 événements)

(Reid, H.; Vilmer, N. A&A, 2016 en révision)

Diagnostics radio et X des faisceaux d'électrons



Sur >300 événements
(types III coronaux et
sursauts X)
(Li & Cairns, 2013)

54% associés à sursaut
type III interplanétaire
(observé >14 MHz par
WIND/WAVES)

Reid, H.; Vilmer, N. A&A, 2016
en révision)

Taux d'association croit si sursaut X plus intense
Faisceaux plus intenses et/ou électrons plus énergétiques ??
(voir simulations numériques Li et al., 2008,2011 Li&Cairns 2013)

Futur des observations X

STIX

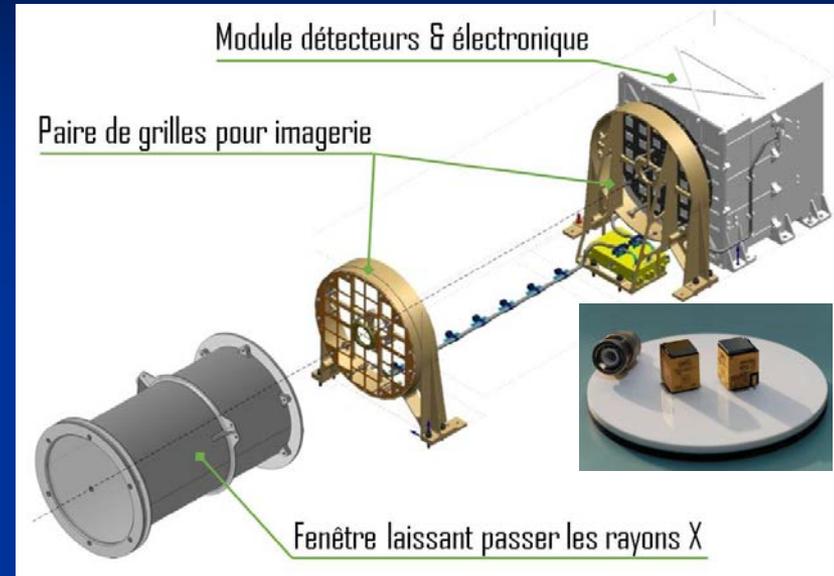
Spectrometer Telescope for Imaging X-rays

Spectroscopie entre 4 et 150 keV
Résolution spectrale de 1 keV à 10 keV

32 détecteurs

Imagerie de Fourier (30 bases dans le plan des fréquences spatiales)

Résolution angulaire: 7''



FOXSI

Imagerie X directe

Première image X > 5 keV)

fusée sonde

Projet NASA SMEX ?

3-50 keV (5'')

+ dynamique + sensibilité??

