

# Le Soleil Accélérateur de Particules: diagnostics X et radio des électrons énergétiques

Nicole Vilmer

LESIA

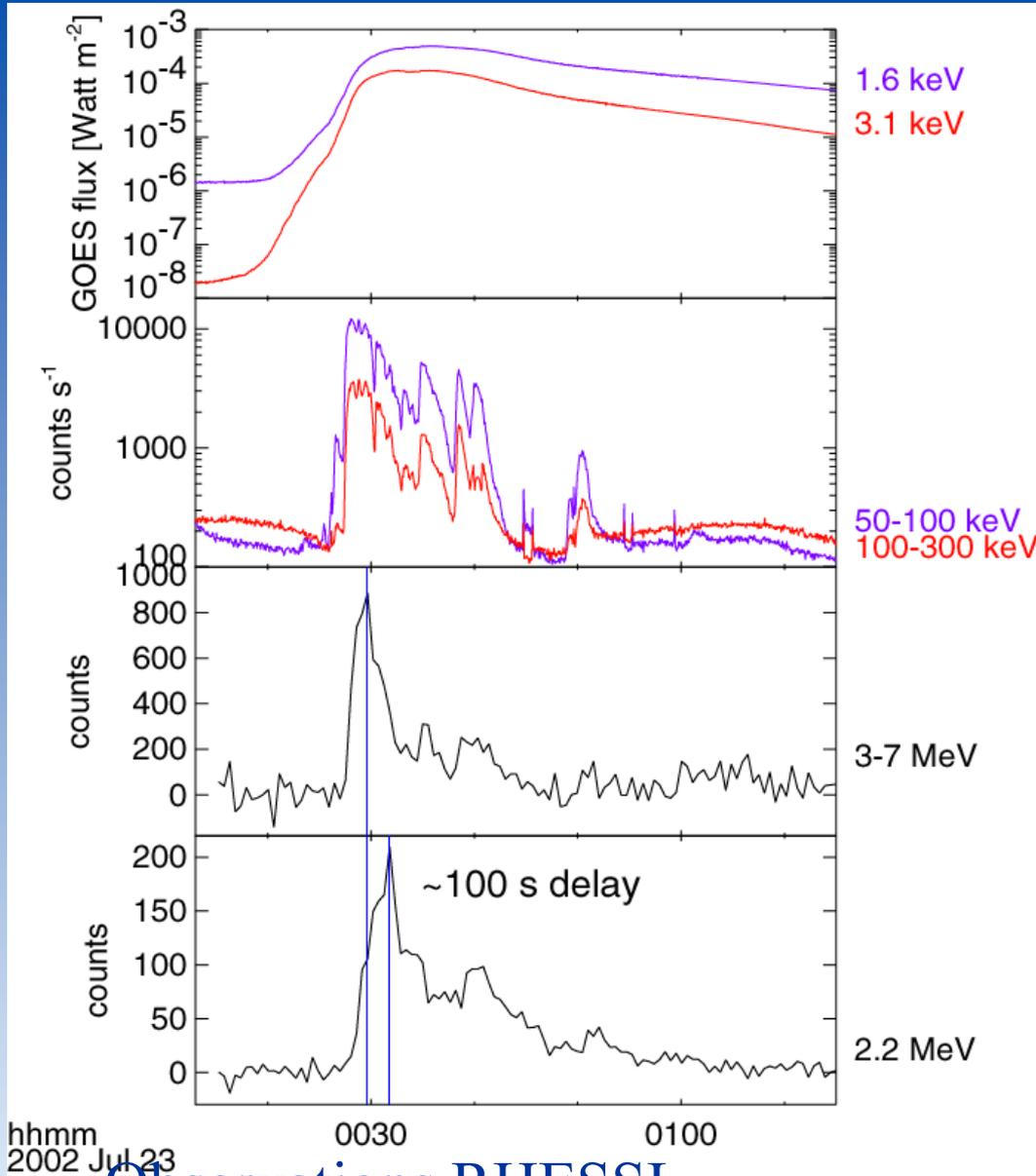
Observatoire de Paris



3<sup>ème</sup> journée ESEP – Orléans 26 Mai 2014



Le Soleil accélérateur de particules:  
Les Electrons et Protons en interaction dans l'atmosphère solaire



hhmm  
2002 Jul 23

Observations RHESSI

Rayonnement X mou  
Plasma chaud (7 à 8 MK)

Rayonnement X dur  
Rayt Freinage e accélérés

Raies  $\gamma$  promptes:  
Signature des protons et  
He

$> qq$  MeV /nuc

**Raie capture neutrons:**

p sur ions plus lourds produisent  
neutrons. Neutrons ralentissent,  
Puis capturés par hydrogène ambiant  
 $\Rightarrow$  deuterium + 2.2 MeV.

# Le Soleil accélérateur de particules:

## Les diagnostics radiatifs des électrons énergétiques

Spectre X et radio d'une grande éruption

Mécanisme rayt de freinage  
X-gamma e 10 keV-MeV

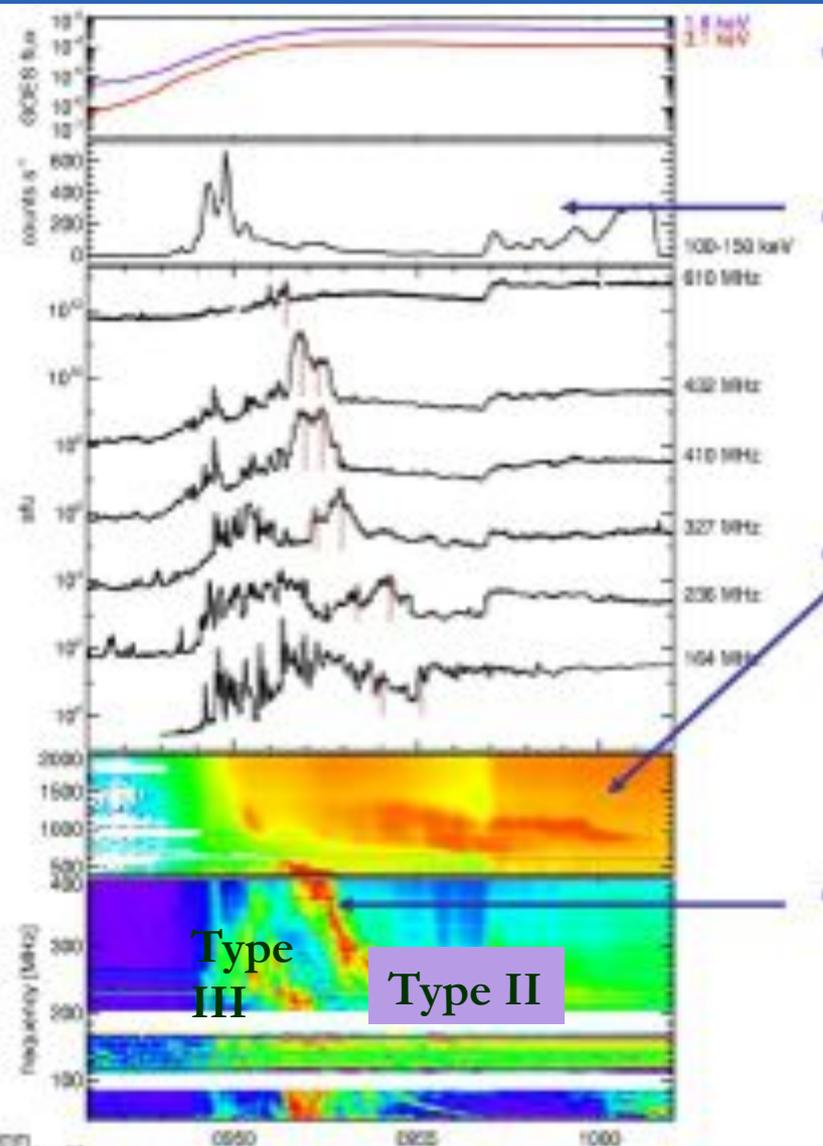
Mécanisme gyrosynchrotron :  
e 100 keV-MeV

(spectre large, diffus)

- Emission micro-ondes ( $> 1\text{GHz}$ )
- Parfois parties de l'émission dm-m
- (ici  $< 200\text{MHz}$ )

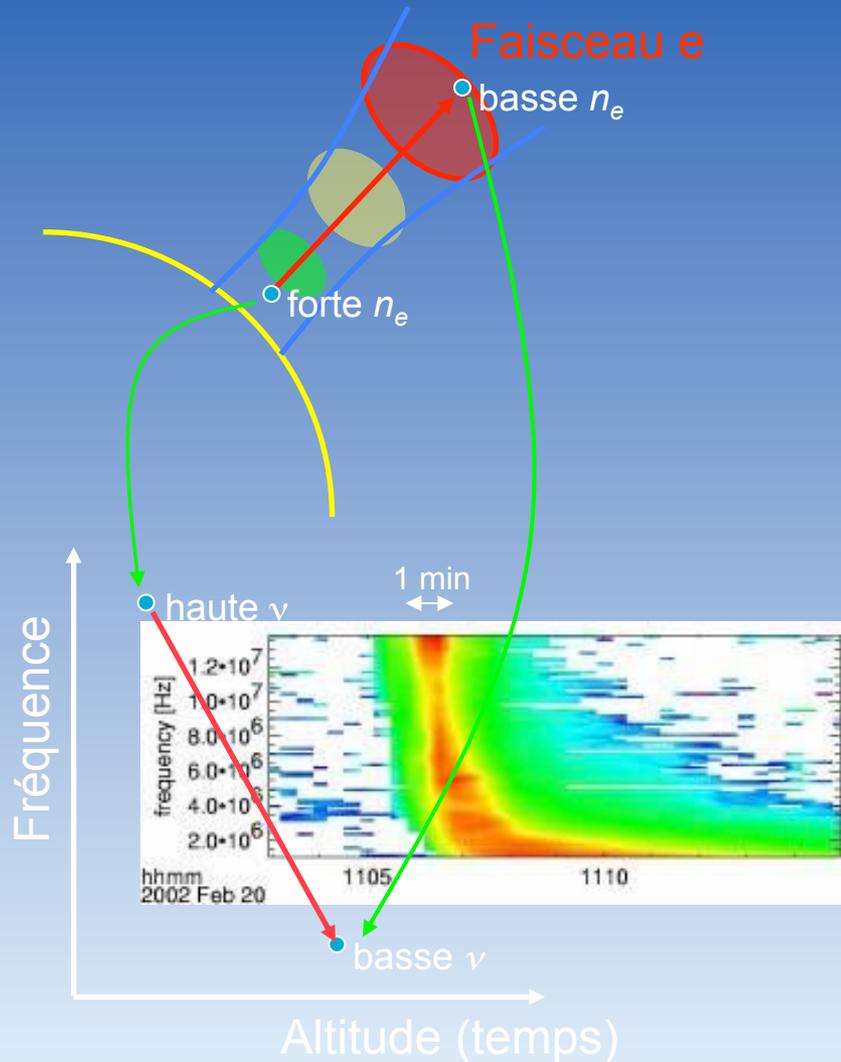
Mécanisme plasma (instabilités e.g. de  
type faisceau)

Nombreuses structures fines du  
spectre (types III, types II)



# Emission radio non thermique

## Instabilité faisceau-plasma, ondes de Langmuir

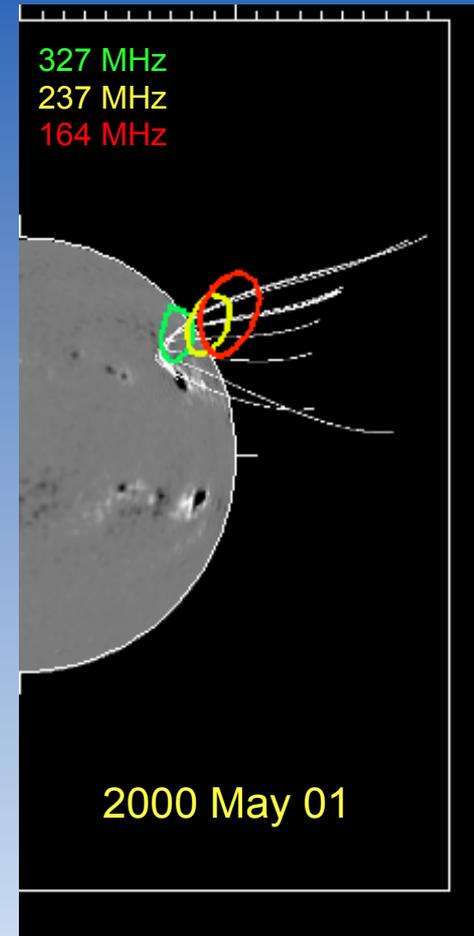


- Faisceau d'électrons traversant la couronne  $\rightarrow$  ondes de Langmuir à des  $\nu$  décroissantes
- Ondes L ne s'échappent pas de la source. Couplage engendrant une onde EM près de  $\nu_{pe}$  ou  $2\nu_{pe}$
- Sursaut bref dérivant des hautes  $\nu$  (grande  $n_e$ ) vers les basses  $\nu$  (basse  $n_e$ ): sursaut de "type III"

# Emission radio non thermique

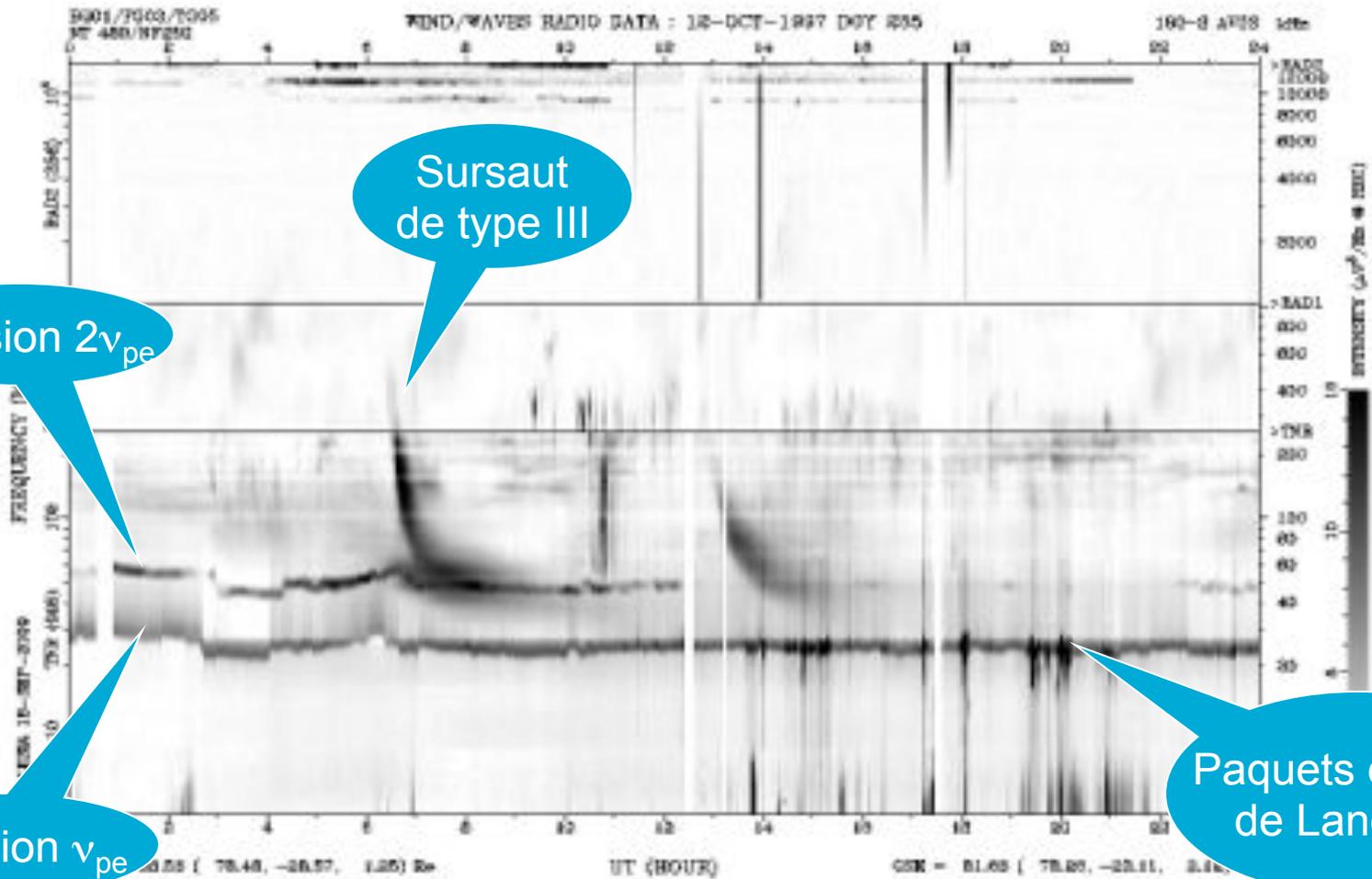
## Imagerie d'un sursaut de type III

- Imagerie (RH Nançay; iso-contours de brillance) d'un sursaut de type III à différentes fréquences
- Superposition sur carte champ magnétique dans la photosphère (SoHO/MDI) et lignes de champ extrapolées dans la couronne (modèle champ potentiel + surface source; *SolarSoft*; Schrijver & DeRosa).
- Les sursauts de type III sont des traceurs de lignes de champ ouvertes dans les régions actives.



# Emissions radio non thermiques

## Ondes de Langmuir, sursauts de type III

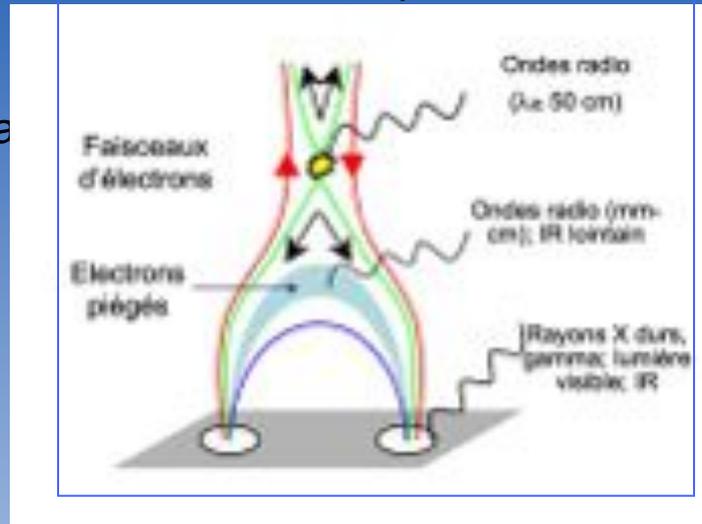


- Spectre dynamique (1 jour; 14 MHz-4 kHz; WAVES/Wind)
- Très différent du rayt de freinage: faible largeur bande spectrale; forte  $T_b$

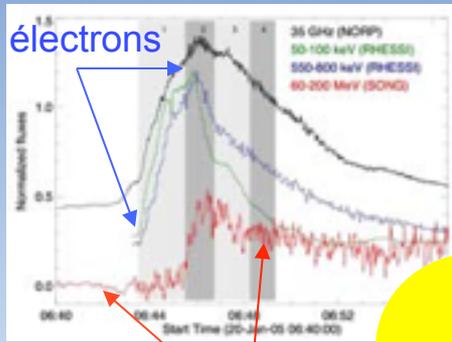
# Particules au soleil, particules dans le milieu interplanétaire

X, gamma, radio:  
Diagnostics radiatifs des  
particules: électrons et  
protons énergétiques dans la  
couronne

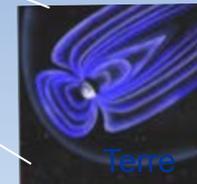
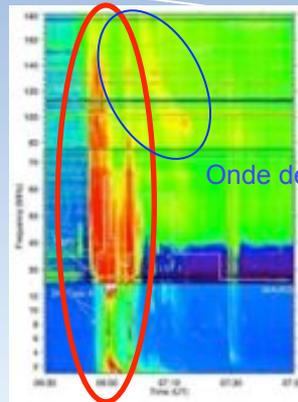
Un scénario simple:



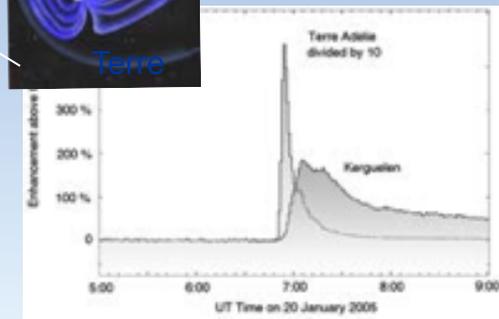
- Quel lien avec les particules dans le milieu interplanétaire?  
Accélération en liaison avec les éruptions?  
Accélération en liaison avec les chocs liés à la propagation des éjections de masse coronale?



Faisceaux  $e^-$



Protons relativistes



# Quelques études statistiques sur les sursauts de type III « coronaux »

~ 10000 types III bursts observés par le NRH de 1998 à 2008

(Saint-Hilaire, Vilmer, Kerdraon, 2013)

Liste de types III bursts dans

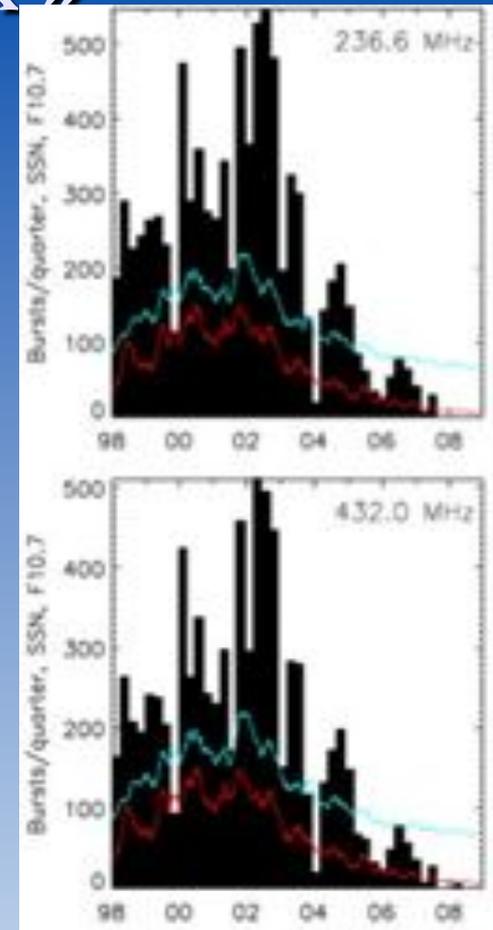
[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SOLAR\\_RADIO/SPECTRAL/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/SPECTRAL/)

dans fenêtre temporelle 08:30-15:30

dans bande spectrale 450-150 MHz

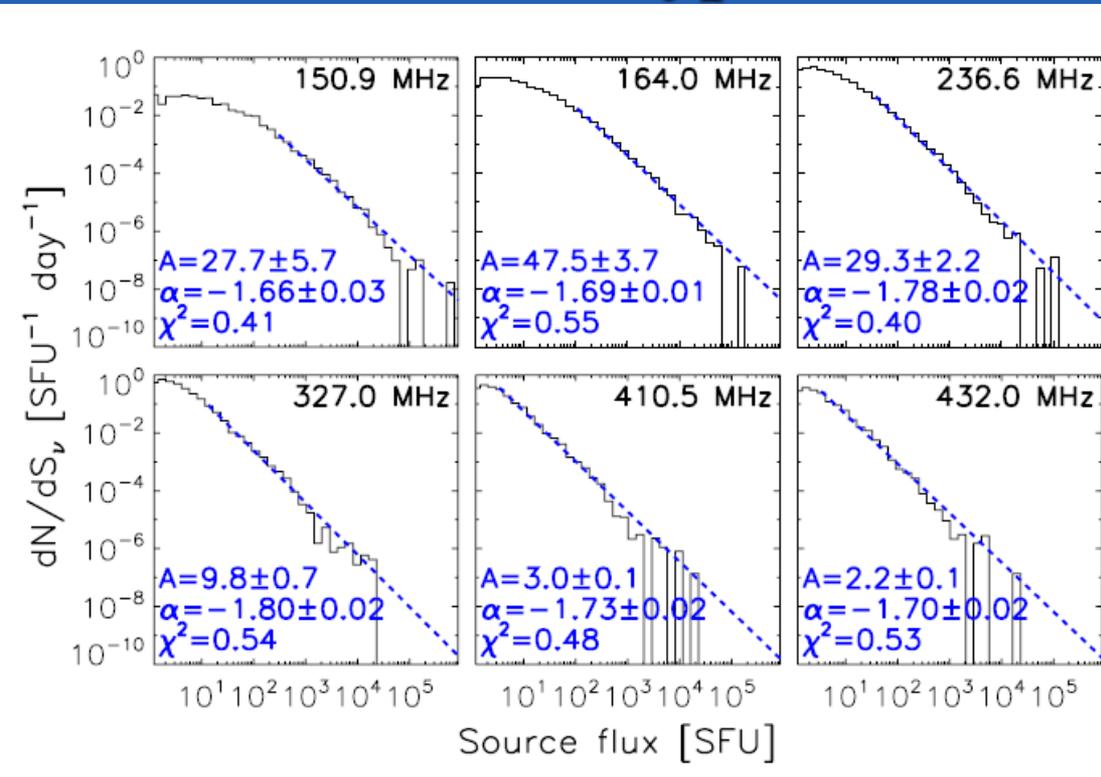
Durée groupe typesIII < 10 minutes

$$T_{B \text{ peak}} > 10 \text{ MK}$$



Nombre de types III sur 3 mois  
(avec observations NRH )  
Bleu: f 10.7 index (SFU)  
Rouge Nombre taches

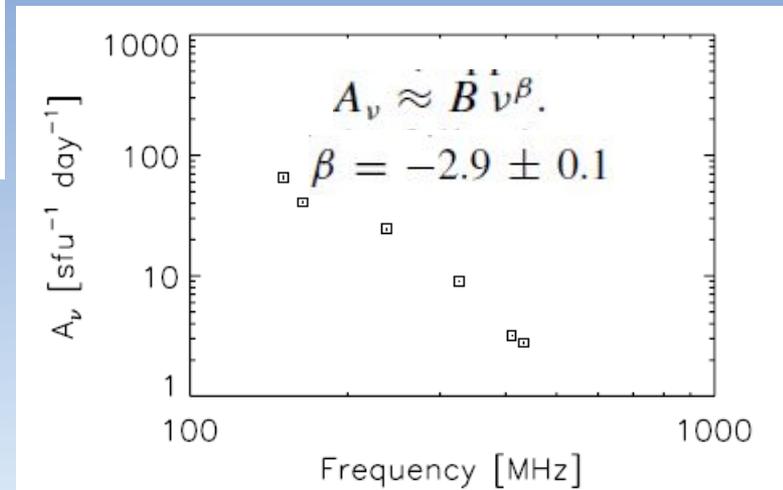
# Quelques études statistiques sur les sursauts de type III « coronaux »



$$(dN/ds_\nu) \propto \dot{S}_\nu^{-1.7}$$

Very close to Nita et al., 2002  
For bursts above 1GHz  
(-1.8)

Saint-Hilaire, Vilmer, Kerdraon, 2013



Histogrammes des flux des sources de type III  
Variation du flux moyen avec la fréquence en : -2.9  
Contraintes sur les modèles d'émission de type III ?  
Lien avec types III interplanétaires?

# Diagnosics Radio et X des Electrons Energétiques:

## Particules s'échappant de la couronne:

Electrons Energétiques

Diagnosics radio des faisceaux d'électrons

dm to km

Rayonnements Coherents

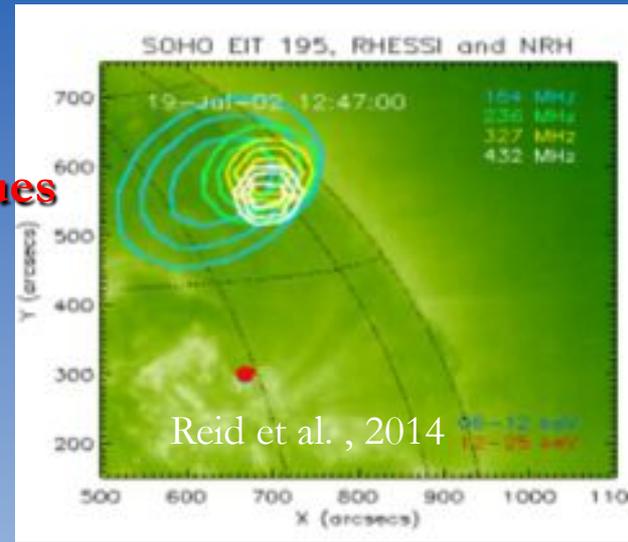
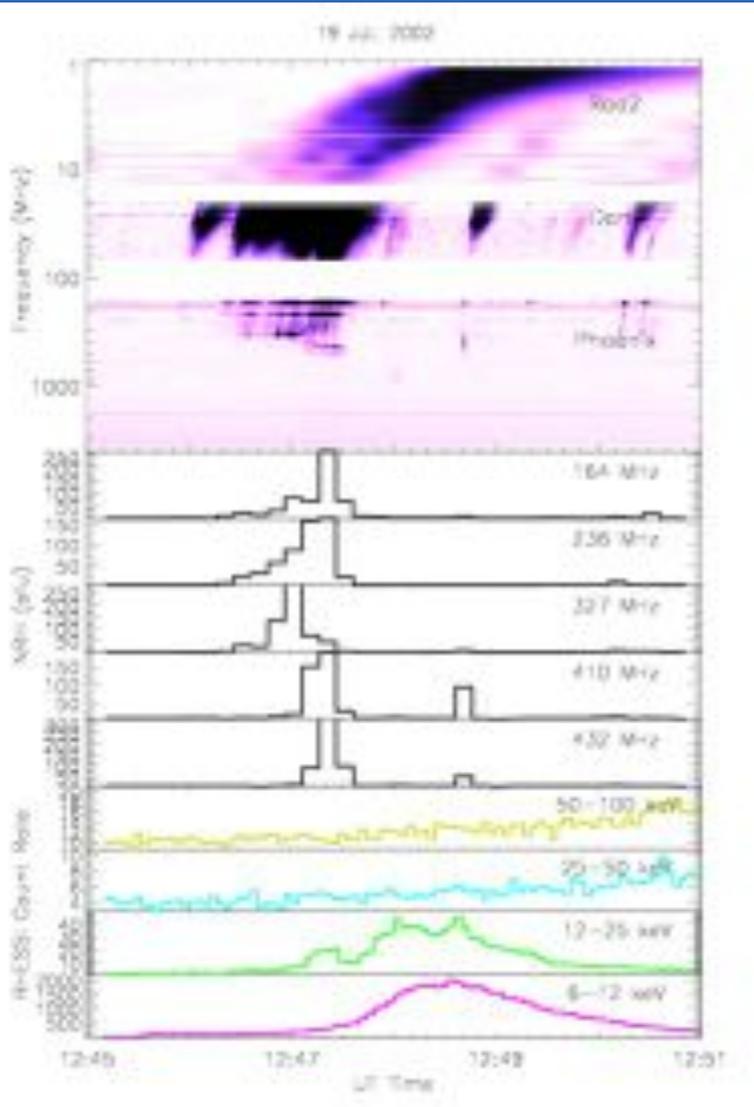
Particules en interaction au soleil

H X-Ray / (gamma-ray)

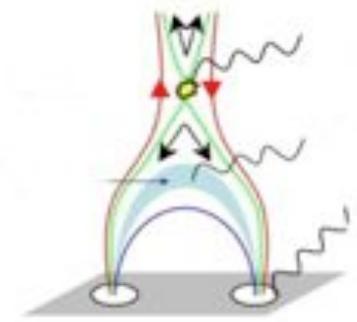
Electrons / (Ions)

Acceleration: Ou? Combien

Lien entre électrons produisant rayons X et radio ??



Reid et al., 2014

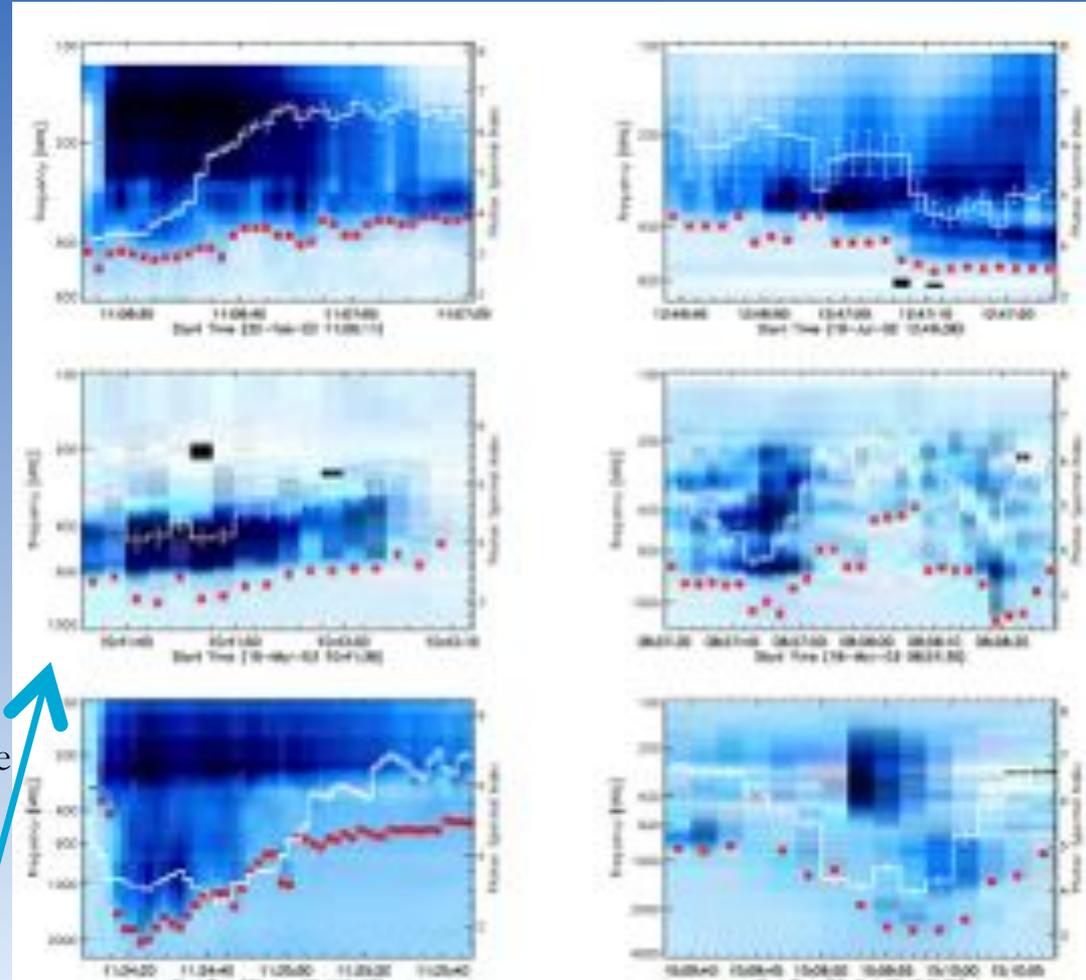


# Recherches de corrélations entre fréquences de démarrage des types III et indices spectraux en rayons X

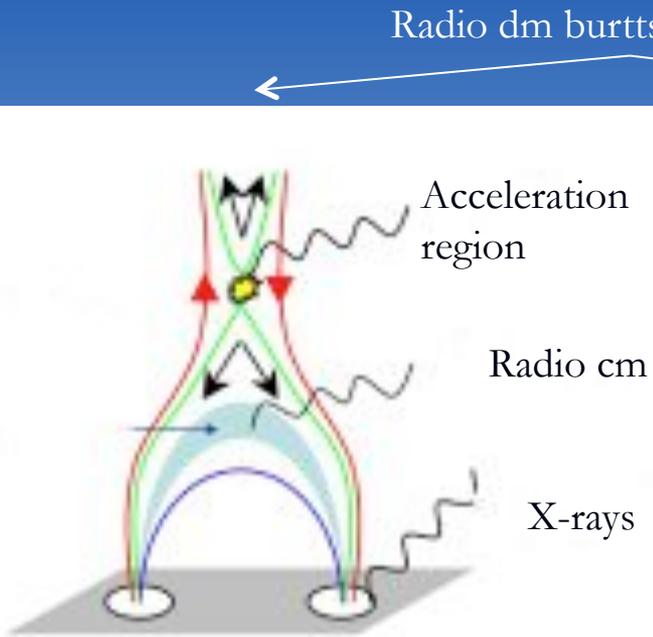
Reid, Vilmer, Kontar, A&A in press

Recherche systématique utilisant la liste des éruptions X de RHESSI et le catalogue de sursauts de type III de PHOENIX 2

- Evénements entre 08 et 16 UT
- Fréquence de démarrage des Types III (4 GHz-100 MHz range)
- Evénements en dehors des nuits de RHESSI et SAA
- Seulement des types III bursts
- Emission X-ray emission détectée  $> 25$  keV
- Durée des groupes de type III group  $> 20$ s
- Résultats de la sélection: 30 événements entre 2002 et 2009
- Fréquence de démarrage et spectre HXR Pour 6 événements



# ← Accélération d'électrons et propagation dans la basse couronne

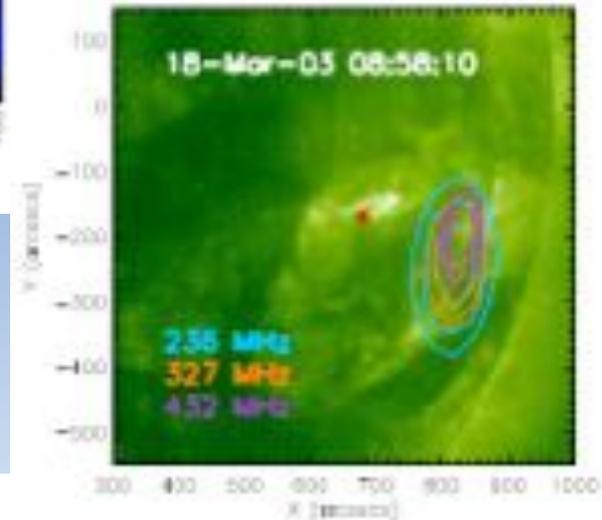
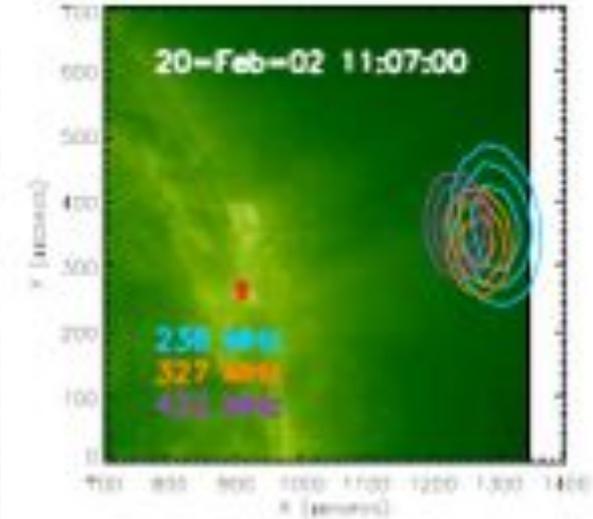
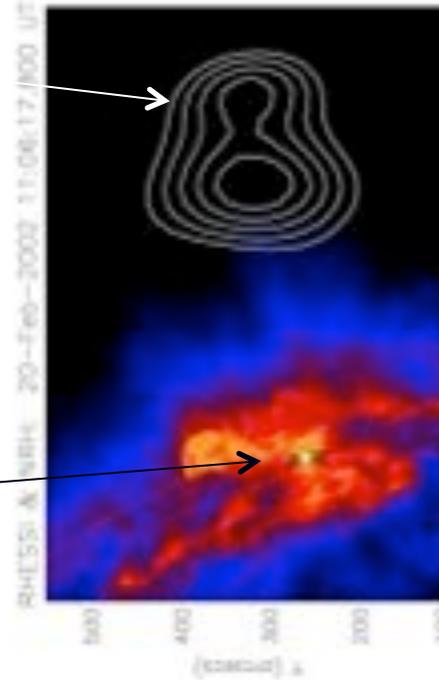


Simple cartoon connecting X-ray and radio emitting sites

Caractéristiques de la région d'accélération:

10 events:

H de 25Mm à 180 Mm (hauteur)  
d entre 2.1 to 16 Mm (taille)



OK pour 50% de l'échantillon MAIS  
la situation est loin d'être simple.....

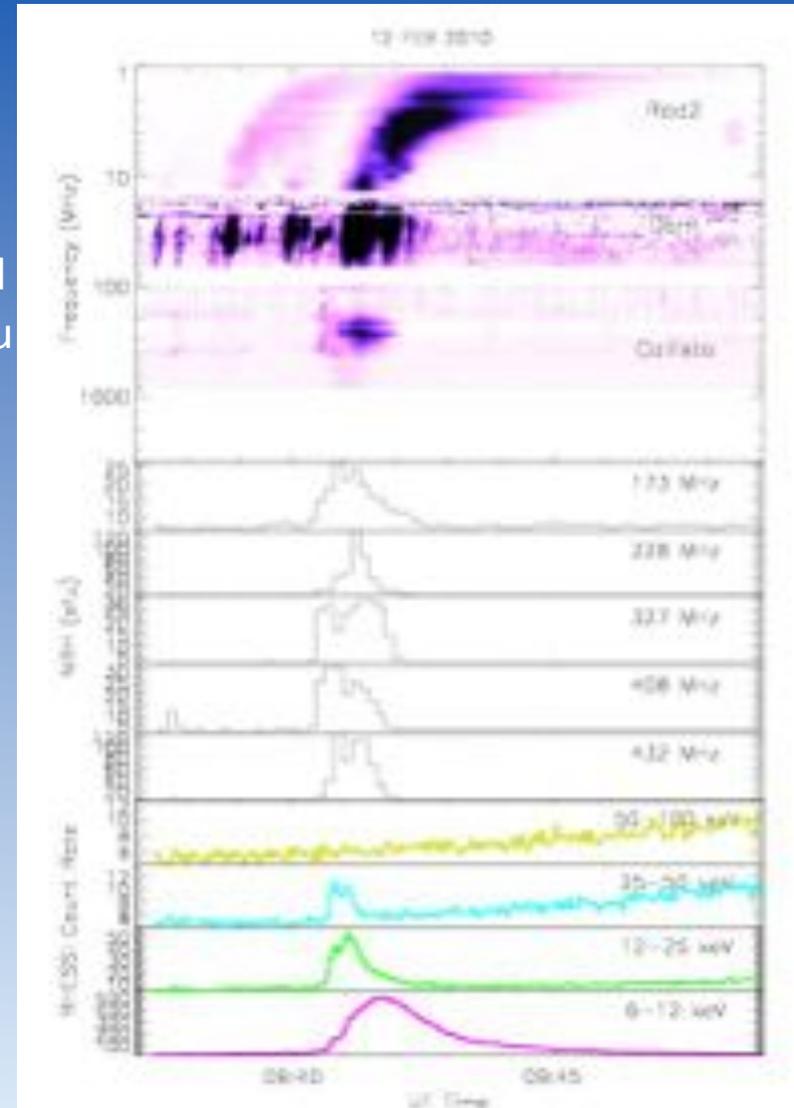
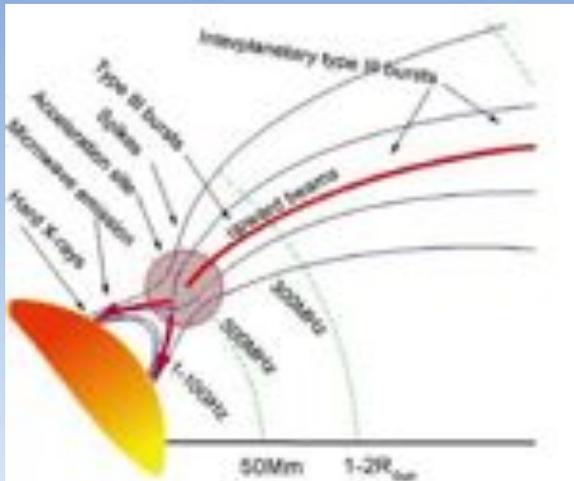


# Quelques statistiques sur l'extension des émissions vers le milieu interplanétaire

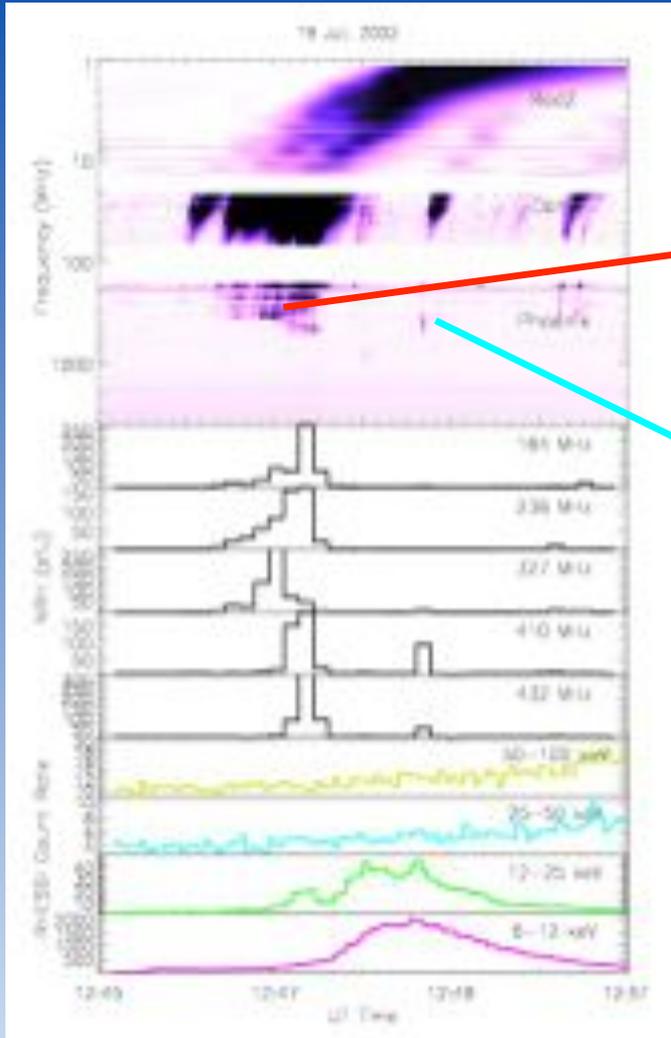
>50% des sursauts de notre échantillon ont une contrepartie dans le milieu interplanétaire

(faisceaux d'électrons partant de la surface du soleil se propageant dans la haute couronne vers le milieu interplanétaire)

(étude en cours)

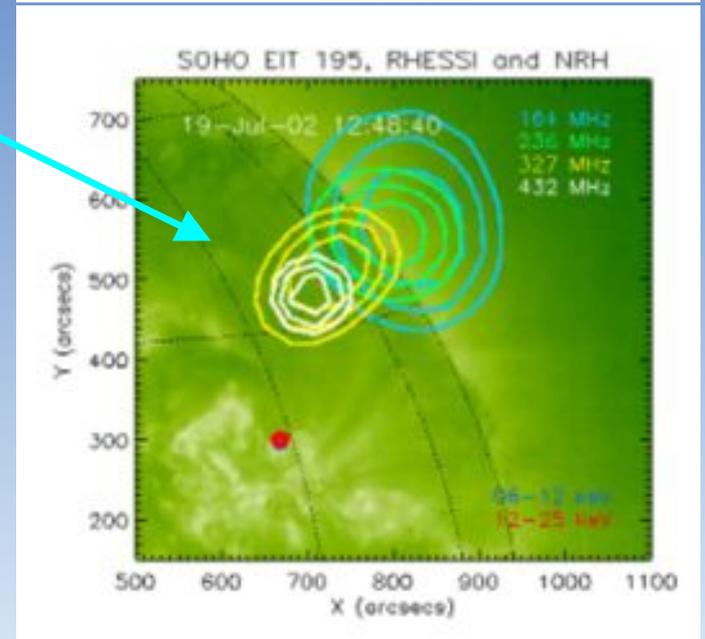
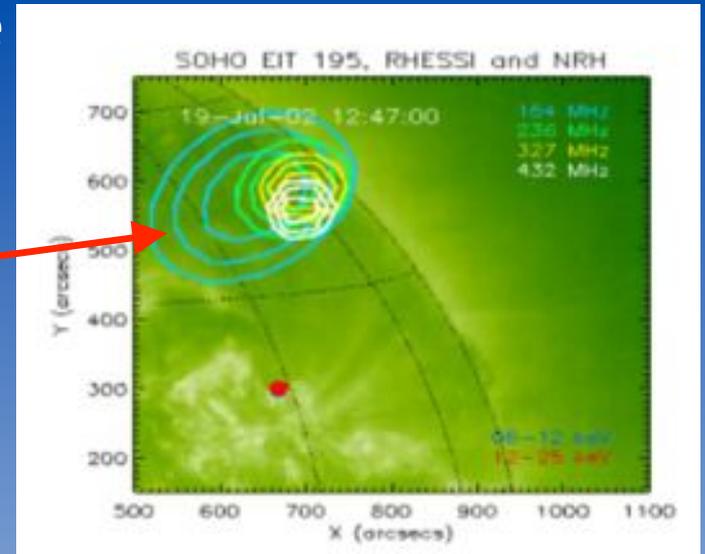


# Propagation des électrons dans la couronne vers le milieu interplanétaire



L'accès des électrons vers le milieu interplanétaire peut être complexe

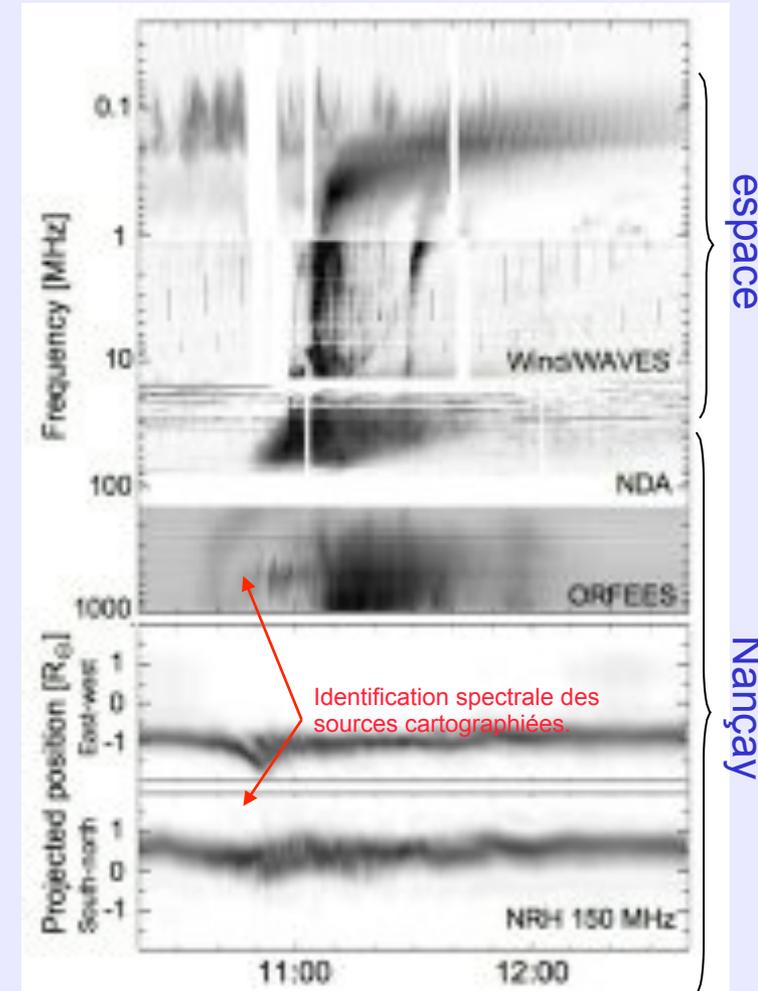
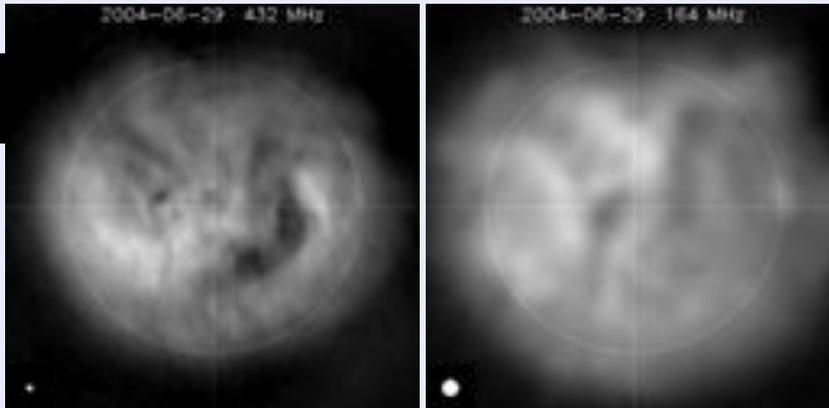
Les particules peuvent être injectées dans différentes structures magnétiques au cours d'un même événement  
Cela peut affecter ou non l'accès du faisceau d'électrons à l'espace interplanétaire.



# Apport des observations radioélectriques à la thématique des relations soleil-terre

- Un ensemble complet et unique d'imagerie et de spectrographie en ondes dm-m:
- Radiohéliographe NRH (150-450 MHz)
  - Seul imageur en dm-m- $\lambda$  dédié au Soleil
- Réseau décamétrique NDA (réseau 20-70 MHz)
  - Sensibilité et qualité sans concurrent

Nouveau spectrographe: ORFEES, 130-1000 MHz)



# Quelques conclusions et perspectives

De nombreuses études statistiques basées sur la combinaison d'observations X et radio produites par les faisceaux d'électrons accélérés lors des éruptions.

Accélération des électrons?

Condition d'injection des électrons (particules dans le milieu interplanétaire)??

De nouveaux modèles d'injection de particules dans le milieu interplanétaire basés sur la reconnection entre structures magnétiques fermées et ouvertes

Des observations systématiques à Nançay

Dans le futur possibilités de combiner ces observations avec les instruments à bord de Solar Orbiter (Solar probe+)

Observations avec LOFAR? Chinsé Solar Radio Heliograph?

