

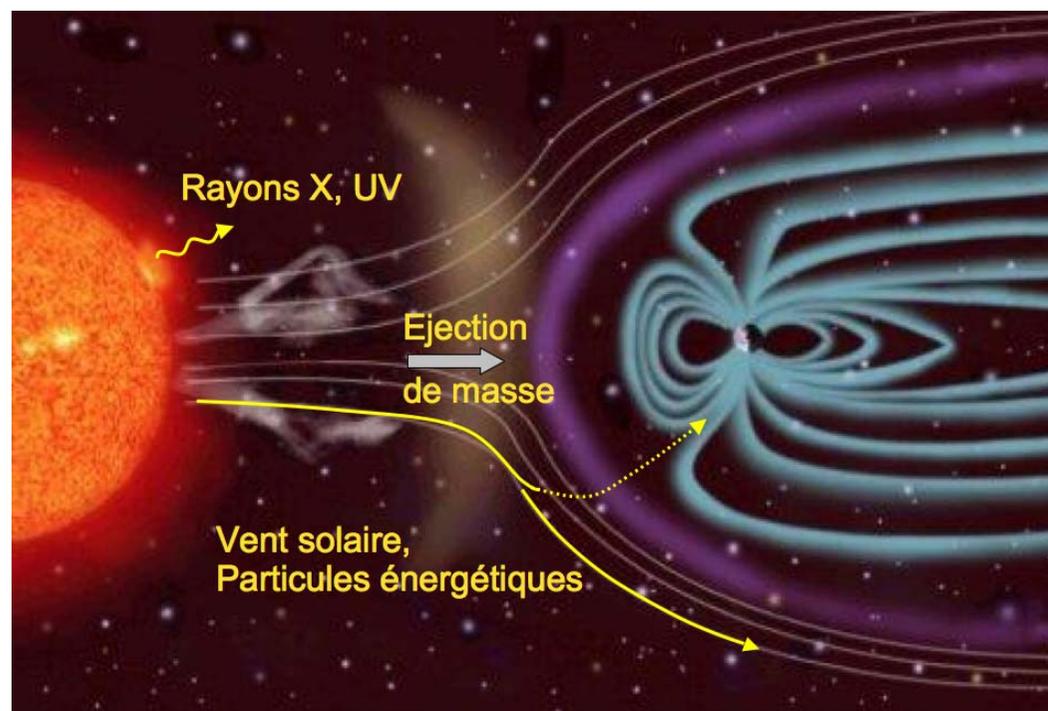
# Physique des relations Soleil-Héliosphère et météorologie de l'espace

Karl-Ludwig Klein

(ludwig.klein@obspm.fr)

LESIA - UMR 8109  
Observatoire de Paris, CNRS,  
Univ. P&M Curie, Paris-Diderot  
(F-92195 Meudon)

Pôle de physique solaire, LESIA,  
Meudon  
et Station de radioastronomie,  
Nançay



# Soleil-Héliosphère et météorologie de l'espace

## Activités

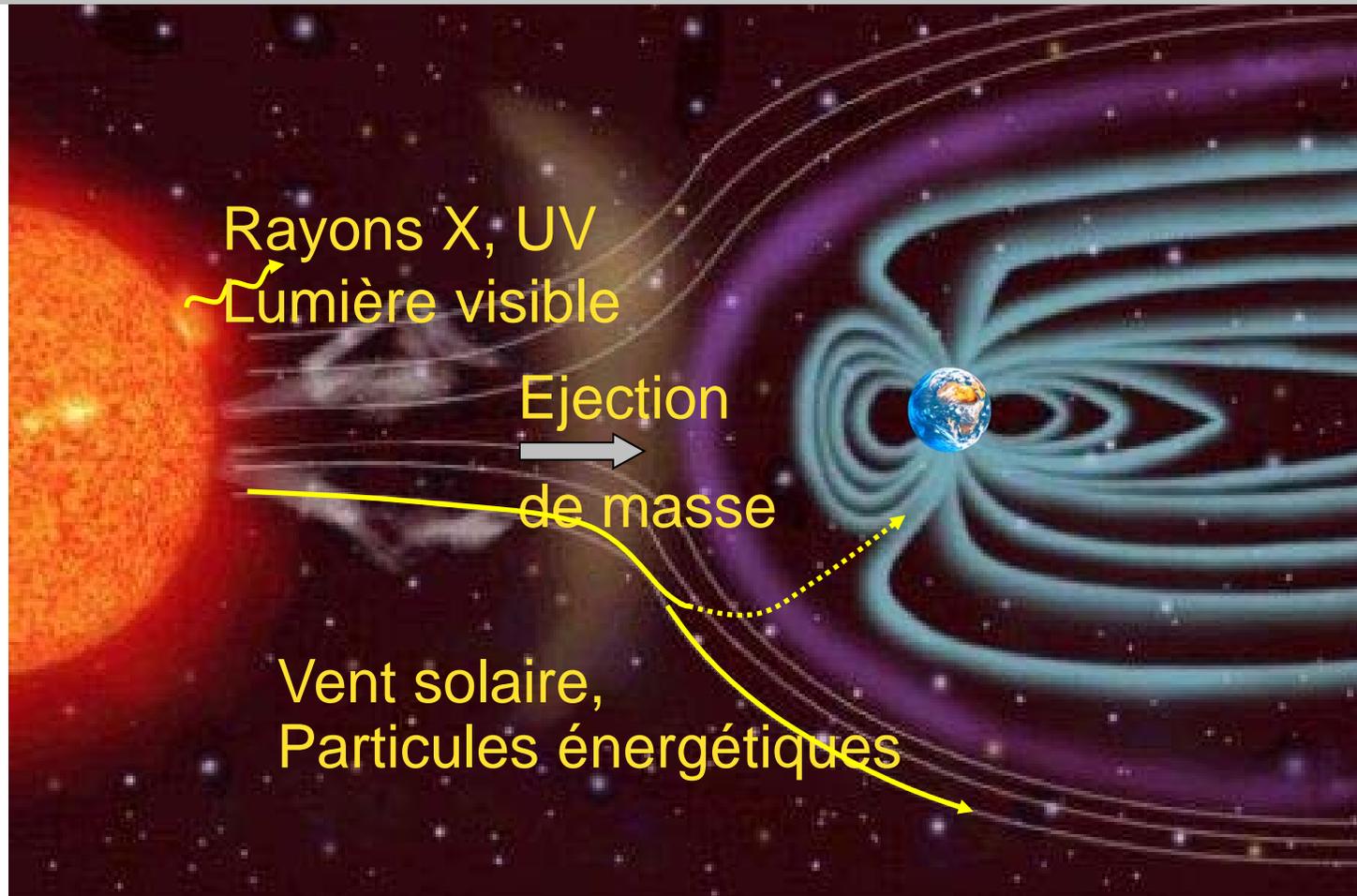
- LESIA, LPC2E, LATMOS: un ensemble d'activités de recherche sur lesquelles peuvent se construire des applications en météorologie de l'espace
  - Mesure du champ magnétique solaire, reconstitution du champ magnétique de la couronne
  - Instabilités des structures coronales
  - Flux transitoires de photons et de particules de haute énergie
  - Propagation de structures magnétiques et de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire
  - Relations Soleil - atmosphère - climat: caractérisation des paramètres clefs et recherches sur les mécanismes
- Des données originales: production, archivage, diffusion
- Valeur ajoutée et outils d'assistance à l'interprétation

# Relations Soleil-Héliosphère-Terre

Quelques illustrations

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Emissions solaires - environnement spatial de la Terre

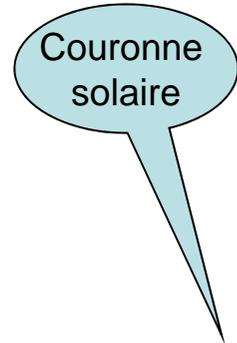
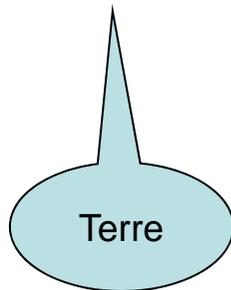


- Le champ magnétique (Magnétosphère): déviation des particules chargées du vent solaire et des particules de haute énergie
- L'atmosphère: absorption des rayonnements

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Ejections de masse - du Soleil à la Terre ...

© STEREO/NASA [http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/stereoimages\\_storms.shtml](http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/stereoimages_storms.shtml)

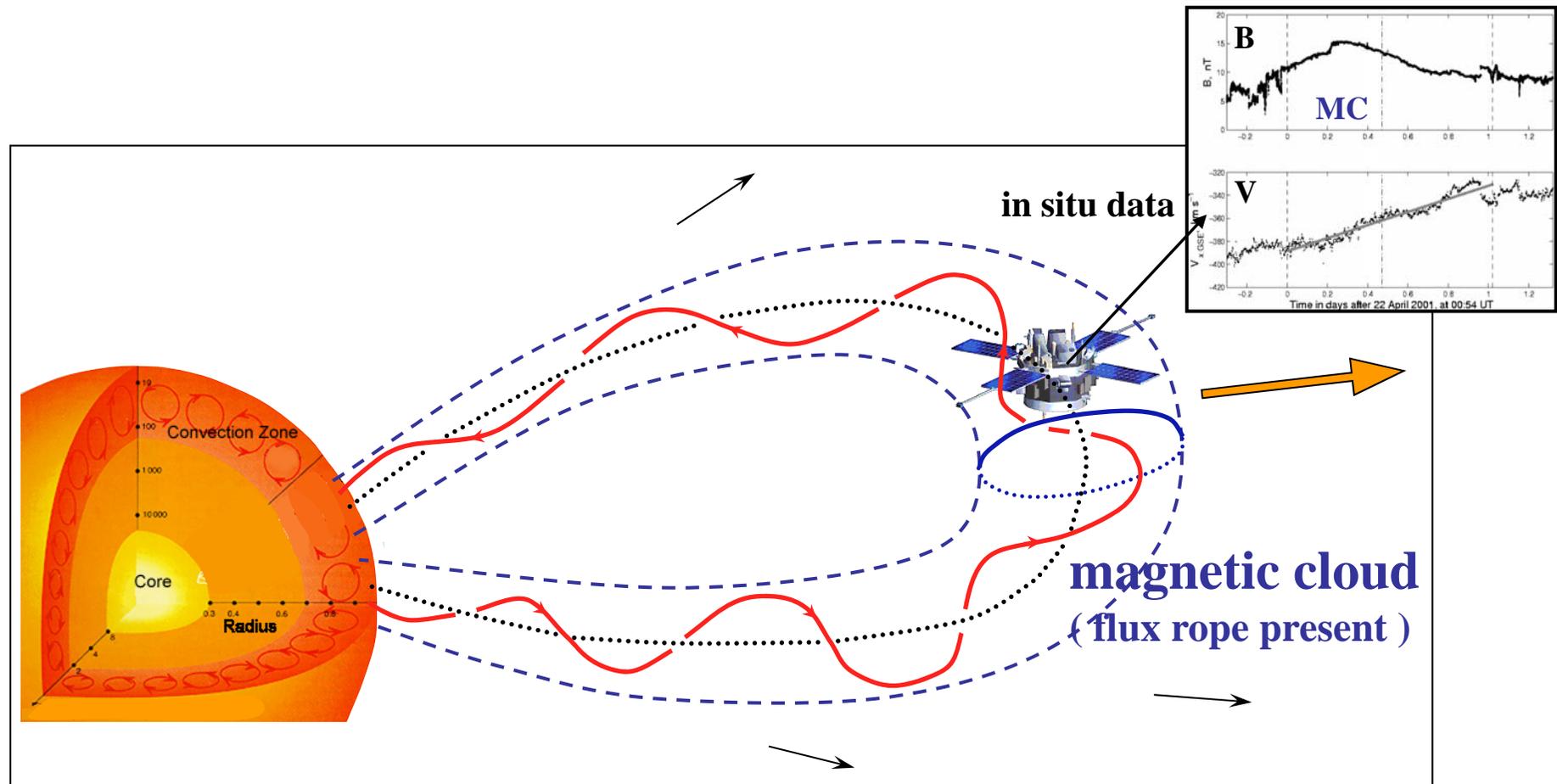


QuickTime™ et  
décompresseur codé  
sont requis pour visionner

- Ejections coronales de masse, du Soleil à la Terre (18 jours d'observation).
- Certaines perturbations peuvent atteindre la Terre:
  - le vent solaire en 4 jours
  - une éjection de masse en 1-2 jours

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Ejections de masse - du Soleil à Jupiter

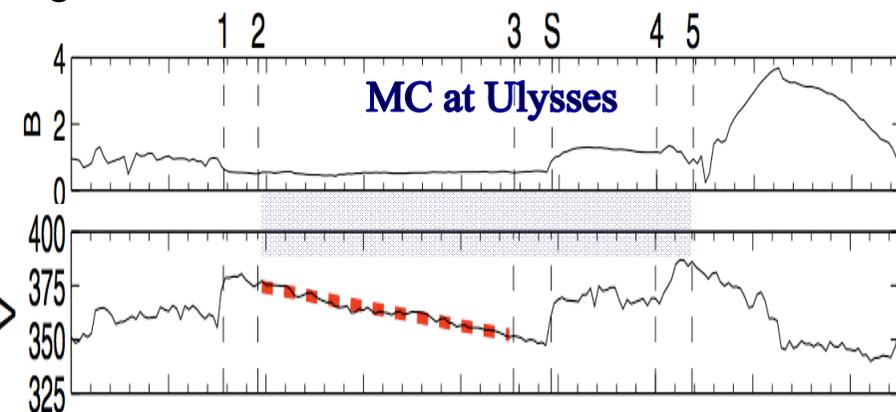
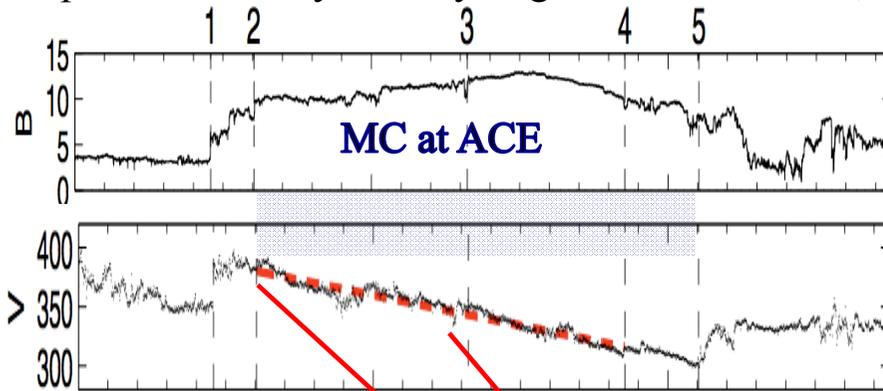


Wind, ACE, Ulysses

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Ejections de masse - du Soleil à Jupiter

Spacecraft nearly radially aligned:  $\Delta \text{latitude}=2^\circ$ ,  $\Delta \text{longitude}=6^\circ$



radial expansion  
 + orthoradial expansion as distance  
 + ACE data

Only the front part of the MC is used (before axis) as the rear part is strongly overtaken

	ACE	predicted	Ulysses	ratio
	1 AU	5.4 AU	5.4 AU	
$\langle N_p \rangle$ (cm <sup>-3</sup> )	16.	0.16	0.12	1.3
$\langle B_{\text{norm}} \rangle$ (nT)	10.	0.53	0.48	1.0
$\langle B_{\text{axial}} \rangle$ (nT)	4.1	0.22	0.18	1.2
$\langle B_{\text{azimuthal}} \rangle$ (nT)	9.0	0.48	0.42	1.2

**Good prediction with a factor 5 on solar distance.**

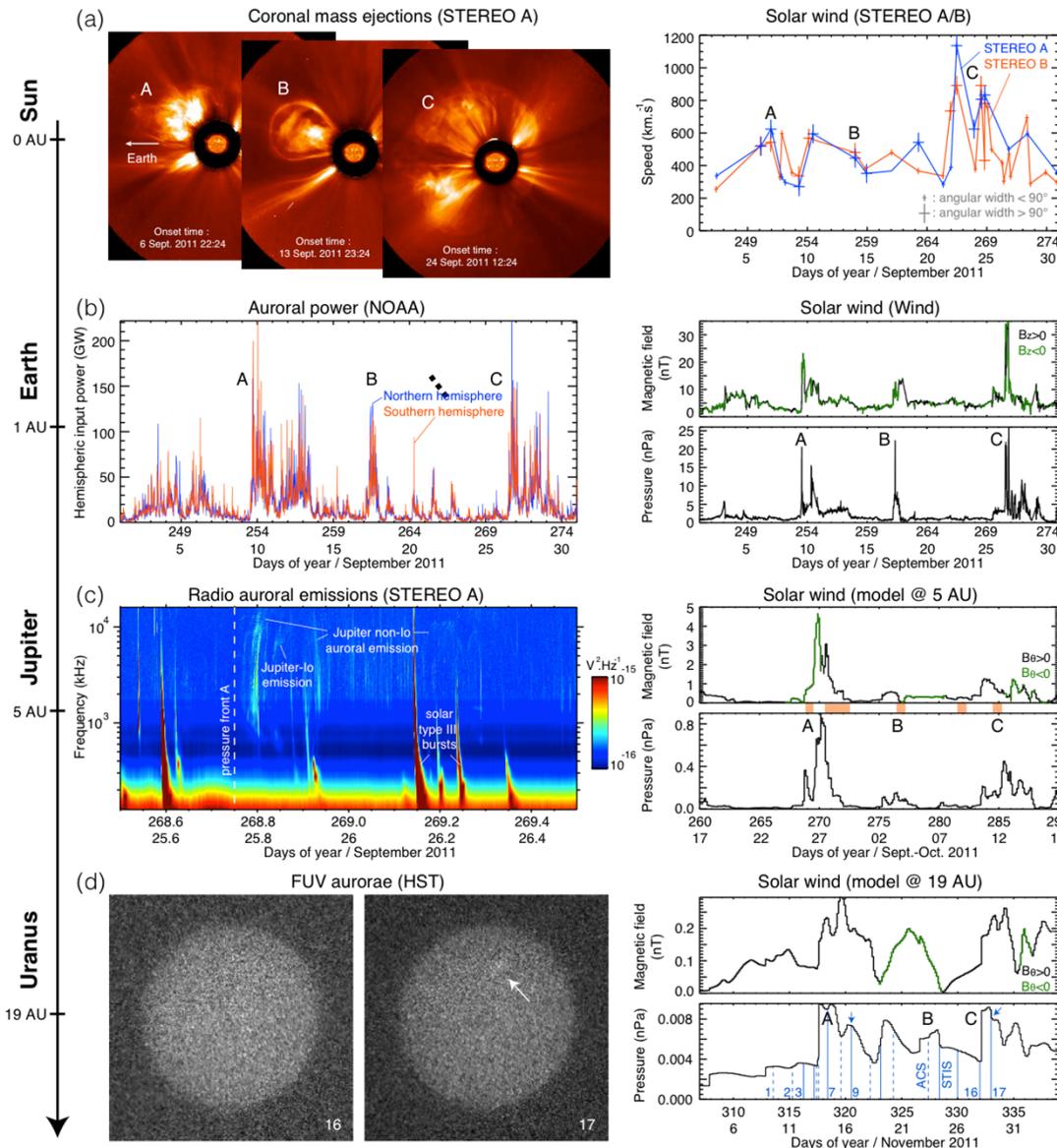
**In the same way: observations at 0.2 AU -> prediction at 1 AU**

Nakwacki, Dasso, Démoulin, Mandrini, Gulisano (2011)

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Ejections de masse - du Soleil à Uranus

Lamy et al. 2012 GRL 39, CiteID L07105

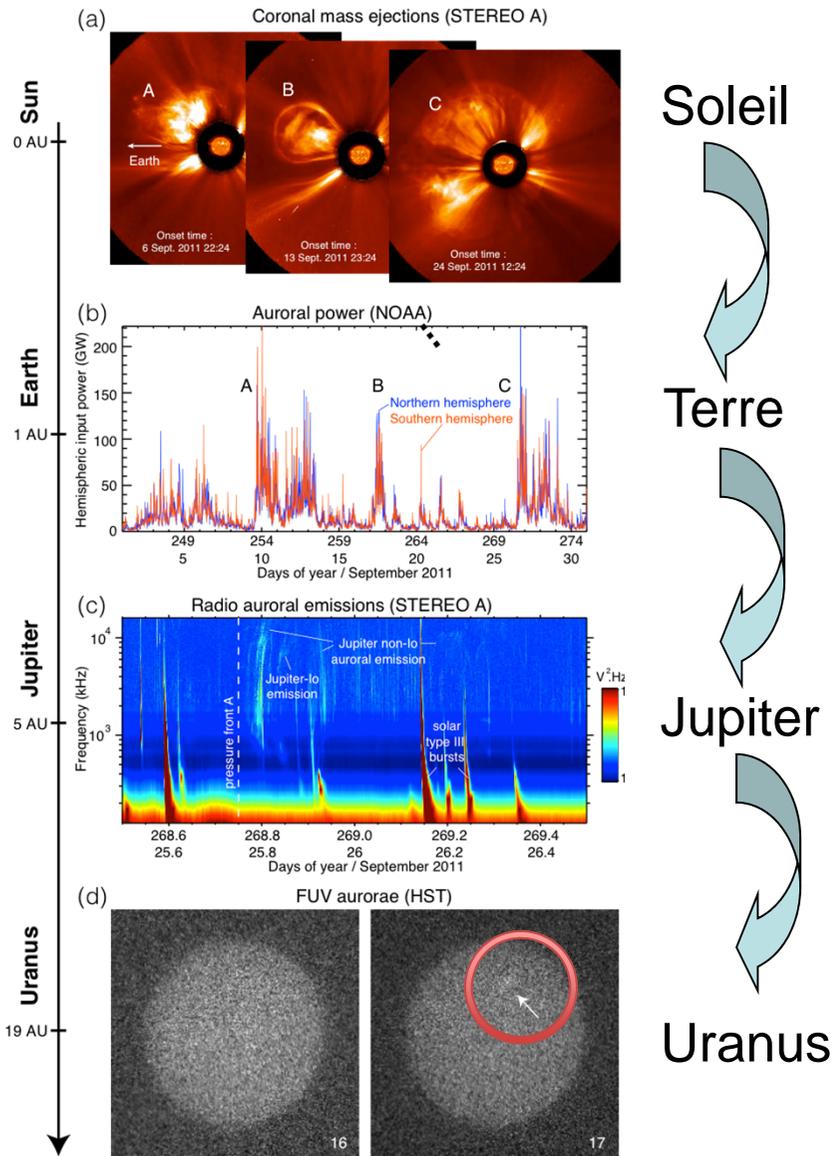


- Emissions aurorales des planètes sensibles au vent solaire (CME, CIRs...)
- ⇒ Diagnostic à distance unique de l'héliosphère et des magnétosphères
- Sep-Oct 2011 : série CMEs Terre-Jupiter-Uranus :
  - Soleil (STEREO, SDO),
  - vent solaire (Wind, prop. MHD => 20 UA)
  - Aurores terrestres (NOAA, e-), joviennes (STEREO/radio, XMM/rayons X), Uranus (HST/UV, UKIRT/IR)
- 1<sup>ères</sup> images aurores Uranus !

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Ejections de masse - du Soleil à Uranus

Lamy et al. 2012 GRL 39, CiteID L07105



- Emissions aurorales des planètes sensibles au vent solaire (CME, CIRs...)  
⇒ Diagnostic à distance unique de l'héliosphère et des magnétosphères
- Sep-Oct 2011 : série CMEs Terre-Jupiter-Uranus :
  - Soleil (STEREO, SDO),
  - vent solaire (Wind, prop. MHD => 20 UA)
  - Aurores terrestres (NOAA, e-), joviennes (STEREO/radio, XMM/rayons X), Uranus (HST/UV, UKIRT/IR)
- 1<sup>ères</sup> images aurores Uranus !

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

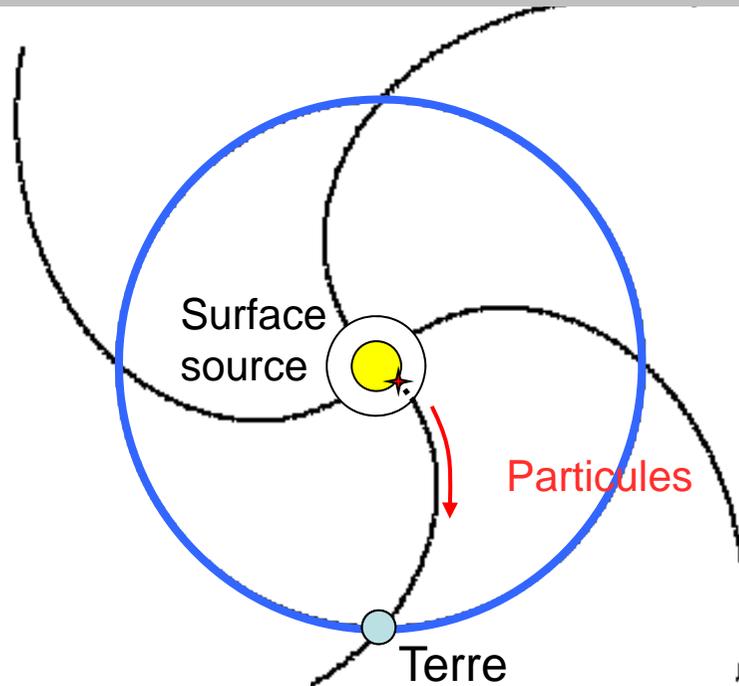
## Particules solaires de haute énergie

- Observation d'une grande éruption solaire en EUV (SoHO/ESA & NASA):
  - embrillancement d'une région active.
  - perturbation des détecteurs par des protons de haute énergie accélérées au Soleil, qui s'échappent dans l'espace
  - deux perturbations de l'environnement spatial de la Terre:
    - Les rayons UV et X (à la Terre après 8 min)
    - Les particules chargées de haute énergie (électrons, protons, ions; à la Terre après 10 min-1 heure)

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

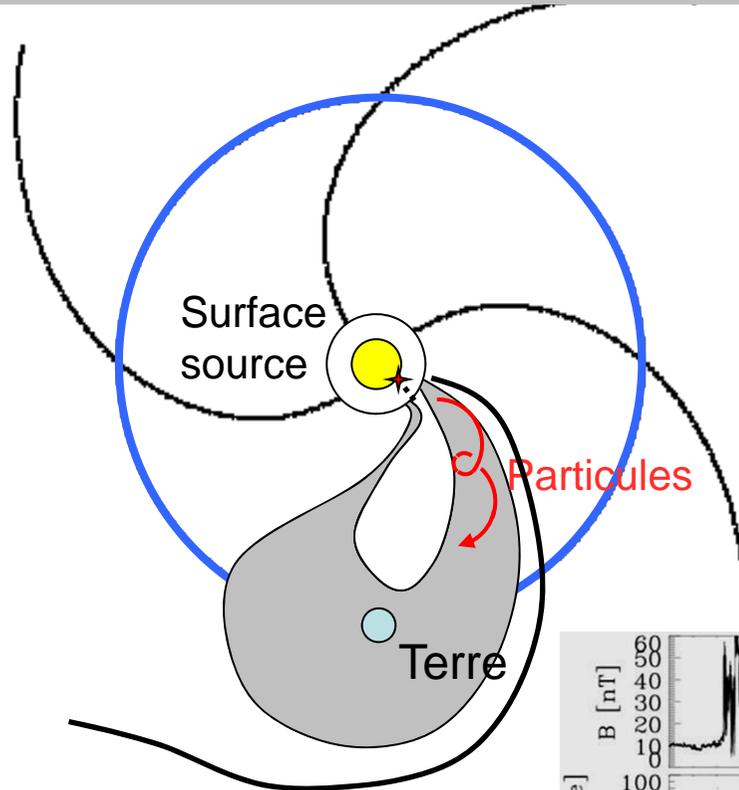
## Particules solaires de haute énergie



- Vue traditionnelle: propagation vers Terre lorsque éruption à l'ouest
- Champ magnétique IP = spirale Parker

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

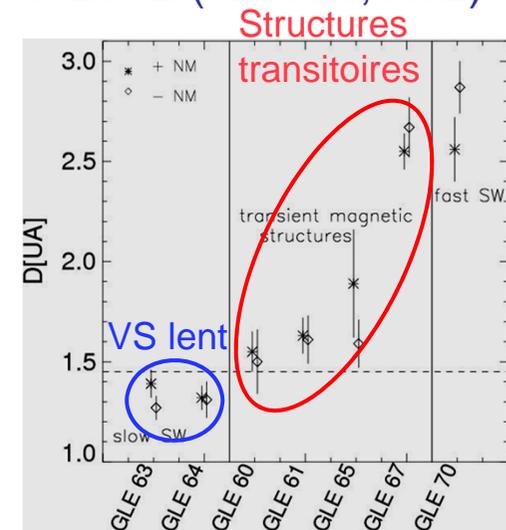
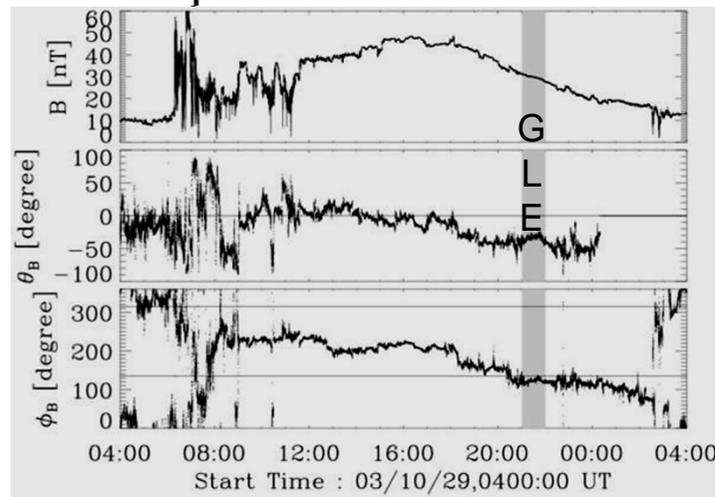
## Particules solaires de haute énergie



- Vue traditionnelle: propagation vers Terre lorsque éruption à l'ouest
- Champ magnétique IP = spirale Parker
- Mais: évts à particules relativistes la plupart du temps (7/10, 2000-2006) dans / au voisinage ICMEs !

Masson, Démoulin et al. 2012 (AA 538, A32)

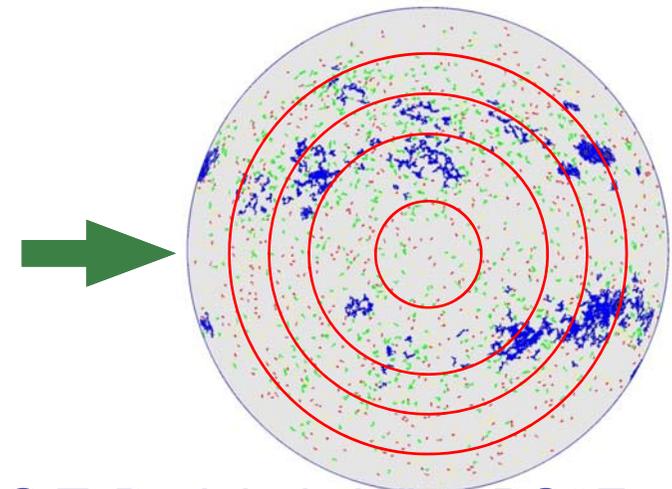
- Deux approches:
  - structures magnétiques ACE
  - longueur parcours IP des particules (SoHO/ERNE)



# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Irradiance solaire (spectrale et totale)

- Spectre UV, EUV solaire - un ingrédient essentiel pour caractériser la réponse de l'atmosphère terrestre à l'activité solaire
- Objectif: le reconstituer depuis des observations proxies (temps réel)
- Démarche:
  - Magnétogrammes + images (visible) SDO/HMI
  - Ségmentation en intensité
  - Calcul facteurs de remplissage selon angle de visée
  - Réseau de neurones
- Reconstruction de l'émission avec précision de qq % à la plupart des  $\lambda$

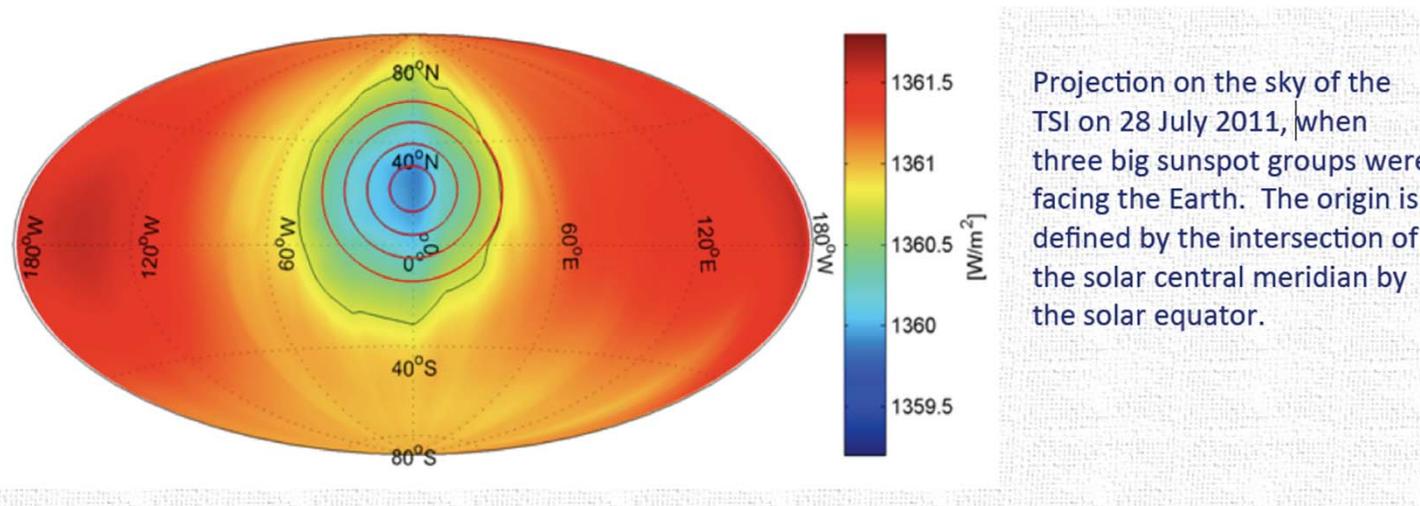


© T. Dudok de Wit, LPC2E

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

## Irradiance solaire (spectrale et totale)

- Evaluation de la variation en latitude de l'irradiance solaire:



- Conclusions (Vieira et al. 2012 GRL 39, L16104):
  - Variations en fct de la latitude jusqu'à 0,1 %.
  - La luminosité solaire n'est pas constante (déficit dû aux taches non compensé par excès dans les facules et plages).
  - Insuffisant pour expliquer pourquoi le Soleil semble moins actif que des étoiles similaires.
  - Variations orbitales de la Terre ne peuvent expliquer période de  $10^5$  ans dans les traceurs du climat.

# Le Soleil actif et l'Héliosphère

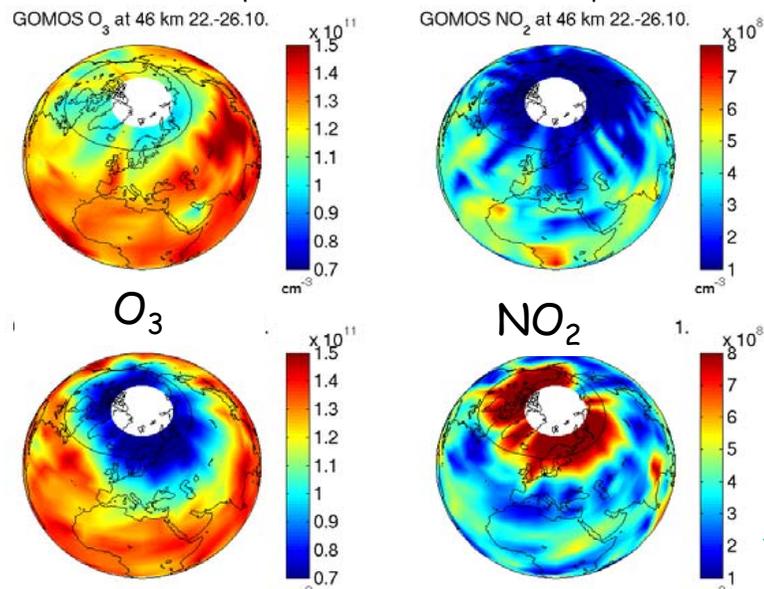
## Rôle de la variabilité solaire pour le climat terrestre

- **Effet radiatif direct**
  - Chauffage surface par le rayonnement solaire total
  - Variabilité TSI
    - 0.1% sur 11 ans
    - 0.4% (?) minimum de Maunder
- **Effets photochimiques**
  - Production d'ozone par l'ultraviolet solaire UV
  - Chauffage de la stratosphère dû à l'absorption par O<sub>3</sub> du rayonnement solaire UV
  - Couplage dynamique stratosphère-troposphère
  - Variabilité UV
    - 5 à 10% vers 200 nm
- **Précipitation de particules énergétiques**
  - Protons solaires en zone aurorale
  - Modulation solaire du flux de rayons cosmiques
    - production de NO<sub>x</sub> and HO<sub>x</sub> qui détruisent O<sub>3</sub>

- **LMDz Reprobus**
  - Modélise l'évolution de l'atmosphère terrestre
    - Modules développés au LMD
      - Dynamique
      - paramétrisation physique (nuages, convection)
      - transfert radiatif
      - transport d'espèces chimiques
    - Module développé au LATMOS
      - photochimie gazeuse et hétérogène
    - La variabilité solaire UV intervient de 2 façons:
      - Transfert radiatif (bandes spectrales)
      - Photolyse des molécules (spectre solaire)

- **Évolution future de LMDz Reprobus**
  - Inclure la haute atmosphère et la variabilité solaire
  - Effets solaires ont lieu dans les hautes couches (stratosphère-mésosphère-thermosphère)
    - mais ils peuvent être transmis aux basses couches par couplages dynamique et radiatif.

- **Questions ouvertes**
  - Reproduire la dépendance au cycle solaire de
    - l'ozone stratosphérique
    - La vapeur d'eau dans basse stratosphère et haute troposphère
  - Chimie de l'atmosphère polaire sous précipitations de particules, propagation aux basses altitudes et latitudes



Avant

Après

← Halloween Solar Proton Event 28-31 octobre 2003 (Seppälä et al, 2009) <sup>15</sup>

Services, production, archivage  
et diffusion de données

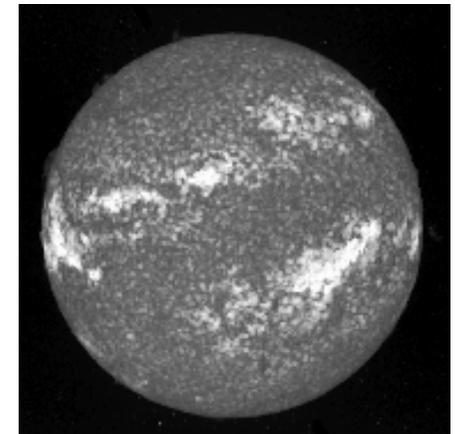
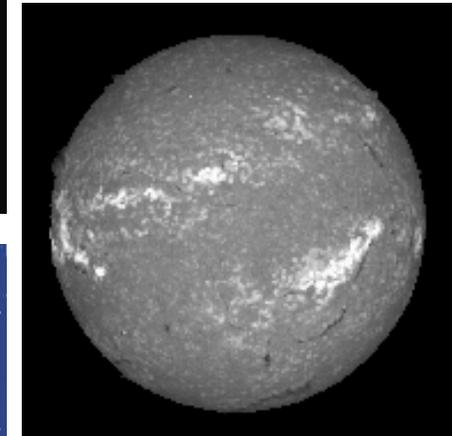
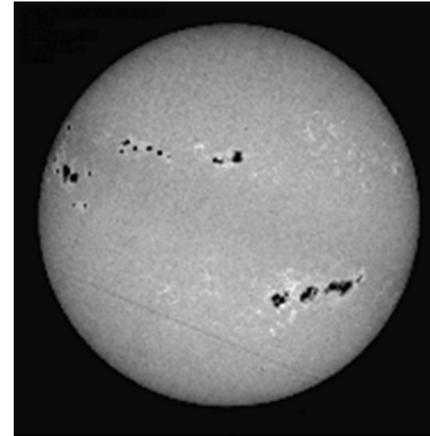
# Production de données

Des observations de la photosphère à 1 UA:

- lumière visible
  - Spectrohéliogrammes Meudon <http://solaire.obspm.fr/>
  - Spectro-polarimétrie THEMIS (campagnes; régions choisies)
- ondes radioélectriques
  - Spectrographie et imagerie sol Nançay: ORFEES 1000-130 MHz, NDA 70-20 MHz; NRH  $\in [150, 450]$  MHz <http://www.obs-nancay.fr/>
  - Spectrographie espace 16 MHz - qq kHz ( $v_{pe}$  Terre) Wind, STEREO
  - <http://www.lesia.obspm.fr/-WAVES-sur-WIND-.html> ,  
<http://www.lesia.obspm.fr/STEREO-WAVES.html>
- particules de haute énergie (rayons cosmiques):
  - moniteurs à neutrons Iles Kerguelen, Terre Adélie (<http://previ.obspm.fr/>; 1 min, temps réel [www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu))

# Production de données Observations lumière visible

- Spectrohéliogrammes  
Meudon: imagerie disque  $H_{\alpha}$ ,  
Call  $K_{1V}$ , Call  $K_3$
- Une longue série de données  
(100 ans) disponible pour la  
recherche et les applications

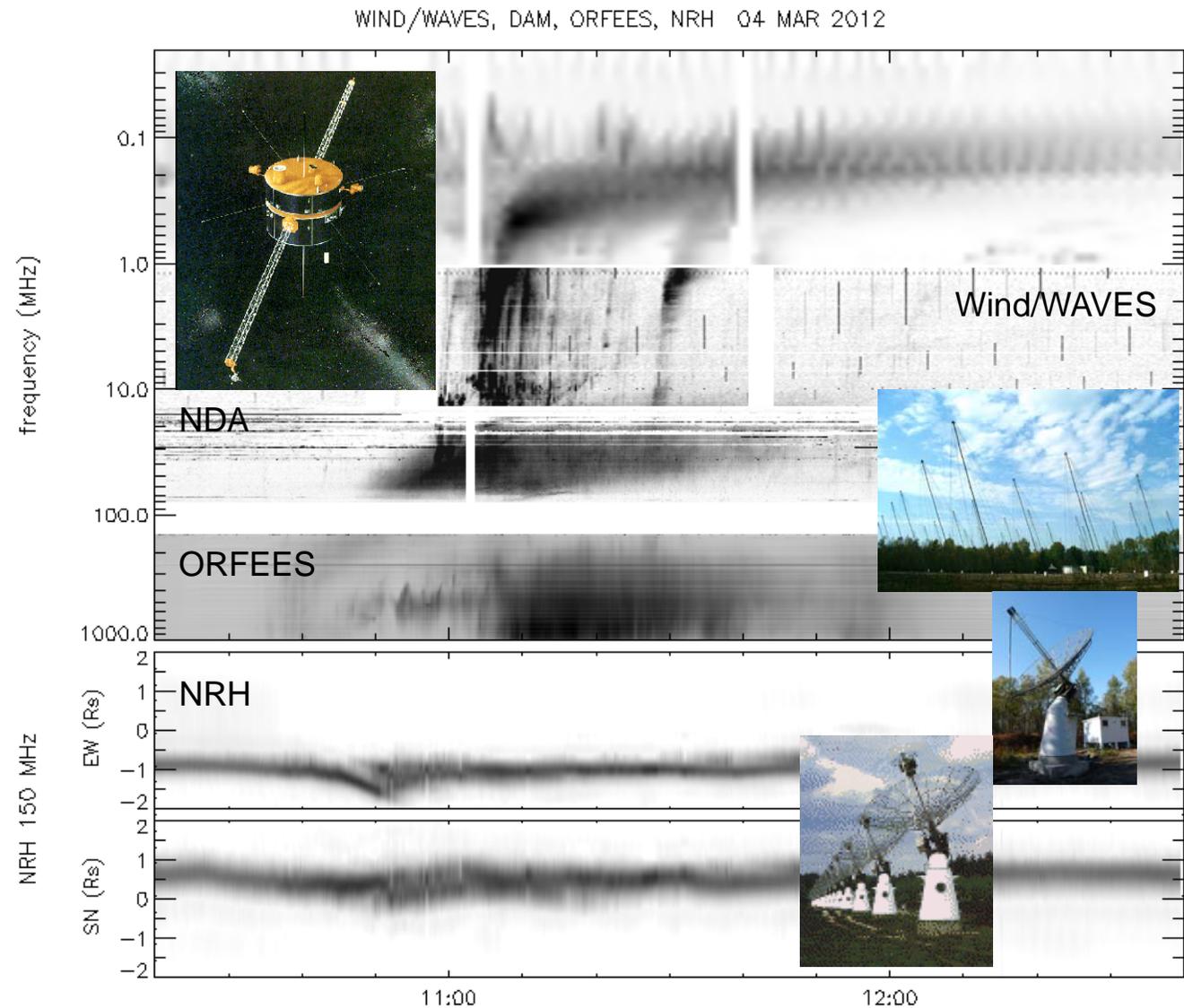


<http://bass2000.obspm.fr/>

# Production de données

## Observations radio sol et espace

- Sol Nançay: NRH, NDA, ORFEES
- Espace: Wind, STEREO
- Un jeu complémentaire d'observations radio, de la basse couronne à 1 UA
- Spectroscopie et imagerie
- Visualisation synthétique <http://secchirh.obspm.fr/>



# Diffusion de données

## Bases de données

Centre de Données de la Physique des Plasmas  
Plasma Physics Data Centre

**BASS2000**  
Solar Survey Archive

**NMDb**  
Neutron Monitor Database

**Cassini/RPWS/HFR-Kronos**  
Access to Lesia-Meudon data products

**Radio Monitoring**  
Welcome

Set Date: 2012100 (format: 'YYYYDD')  
Option: SKR bursts predicted by SLS3 and SLS-N/S/mo

Year 2012  
Day 100

Spectral Flux

Hours of day	00	02	04	06
Distance (Rs)	36.9	36.7	36.5	36.3
Latitude (deg)	0.4	0.4	0.4	0.4
Local Time (hr)	16.8	16.8	16.8	16.9

Click here for details, help, references, caveats  
Advanced Options: Show intervals with ambiguous po  
Tested with Safari, Chrome and Firefox.

- Contribution aux bases de données de la discipline CDP (Toulouse) et BASS2000 (Soleil entier, Meudon)
- Bases de données spécialisées:
  - moniteurs à neutrons NMDB (U Kiel)
  - Cassini/ RPWS/ HFR-Kronos (Meudon)
  - Radio Monitoring (Meudon)
  - Centre de données basses fréquences, Nançay (en cours de développement)
- Contributions aux OV: HELIO (FP7), AMDA (CDPP)

<http://cdpp.cesr.fr/>

<http://bass2000.obspm.fr/>

<http://www.nmdb.eu/>

<http://www.lesia.obspm.fr/kronos/>

<http://secchirh.obspm.fr/>

# Diffusion de données OV HELIO

HELIO Front End

hfe.helio-vo.eu/Helio/

HELIOPHYSICS INTEGRATED OBSERVATORY

Select Event List

Select criteria to restrict the list of events

Show all

Event type:  CME  Flare  Solar Wind  Particle

Location:  Solar  IPS  Geo  Planet

Obs. type:  In situ  Remote  Both

Show flare lists WHERE Location is Geo

Description From To Type Status Info

Storm List [Gopalswamy et al., 2009]

Mars Earth Interplanetary CME (ICME) List [Falkenberg et al., 2011]

Stream Interaction Regions (SIR) from Wind and ACE data [Jian et al., 2011]

GOES strong flare and SEP list [Klein et al., 2011]

NMDB Ground Level Enhancement List

Study of SEP Events of 1997-2006 [Cane et al., 2010]

Search

Parameters

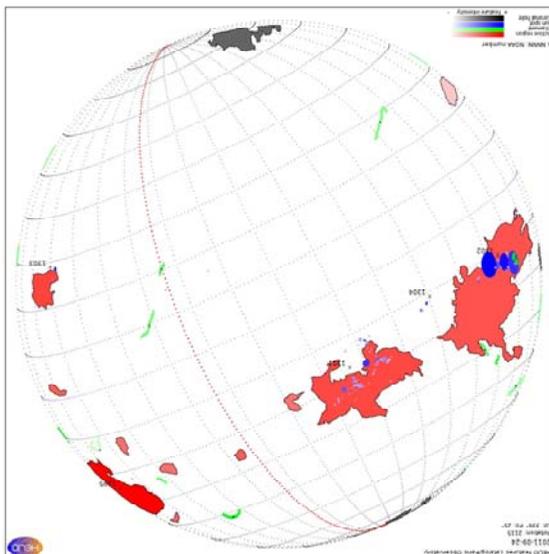
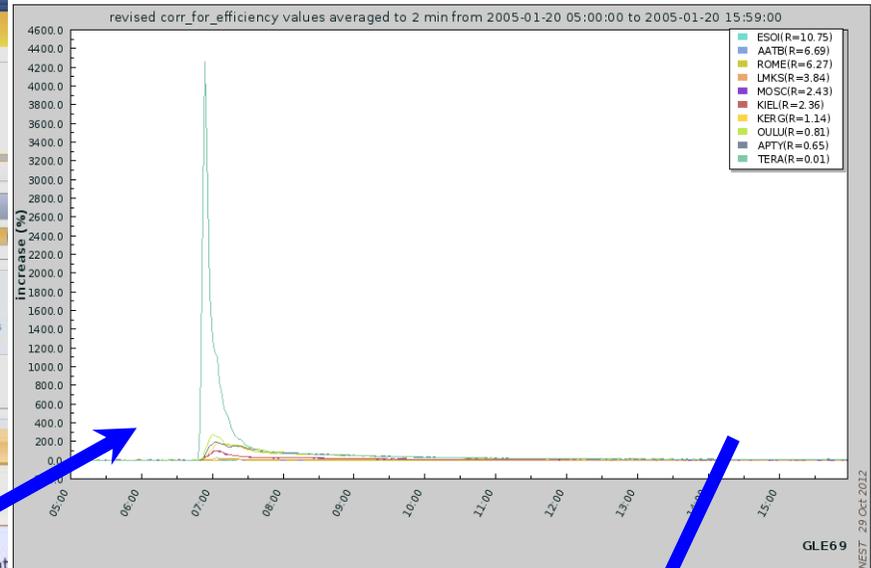
Select Dates

Select an Event List

Show 50 entries

num	time_start	time_end	time_onset	comments
69	2005-01-20T05:00:00	2005-01-20T06:00:00	2005-01-20T06:51:00	Onset time from Gopalswamy et al., Proceedings of 29th ICRC, 2005.

[draw\\_graph.php?formchk=1&listations=1&output=plot](#)



Select Parameter

Parameter Object Value

Speed 800

SpeedError ± 100

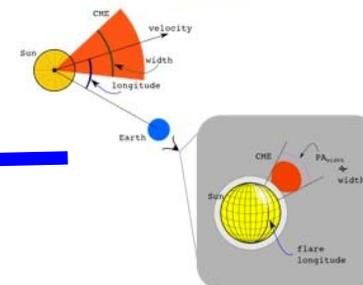
Width 60

Planet or Satellite hit by the CME

CME speed in km/s

Error in the speed in km/s

Longitudinal width of the CME in degrees



# Services en météorologie de l'espace Irradiance solaire (spectrale et totale)

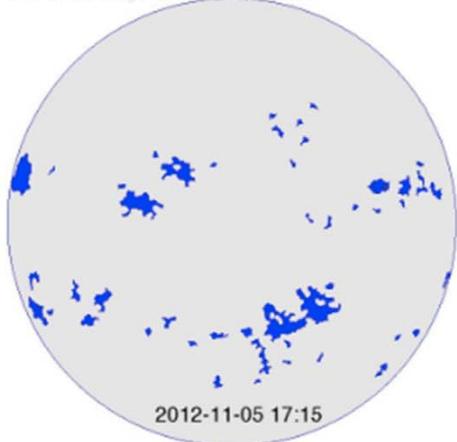
<http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~soteria/>

Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement  
et de l'Espace

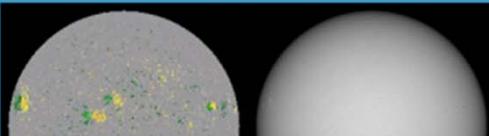
[Home](#) [TSI](#) [XPS](#) [FUV](#) [MUV](#)

## Reconstruction and Short-term Forecast of the Solar Irradiance

Click on the image for a high-res version



2012-11-05 17:15



Total Solar Irradiance (Update: 05-Nov-2012 18:14:36 Z)

Click on the image for a high-res version



Flux Density [W/m<sup>2</sup>]

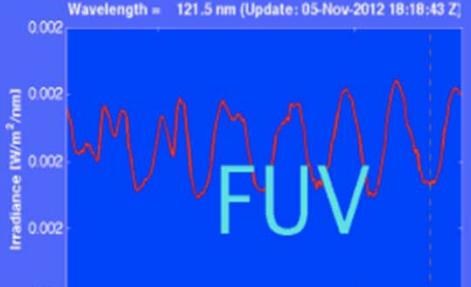
Time

TSI

Short-term forecast of the TSI/SSI			
Spectral Coverage	Res.	Data File	Model Version
TSI		<a href="#">tsi_last.txt</a>	ANN V1.1
XPS, 0.1-40nm	1 nm	<a href="#">xps_last.txt</a>	ANN V1.1
FUV, 115-180 nm	1 nm	<a href="#">fuv_last.txt</a>	ANN V1.1
MUV, 180-310 nm	1 nm	<a href="#">muv_last.txt</a>	ANN V1.1
VIS/IR, 310-2000 nm	Varies	<a href="#">sim_last.txt</a>	ANN V1.2
TSI (out-of-the-ecliptic)			
<a href="#">TSI (GRL Paper)</a>			
Long-term reconstruction of the TSI			
<a href="#">TSI (HOLOCENE)</a>		<a href="#">J/A+A/531/A6</a>	SATIRE

**Model Description:** The solar total and spectral irradiance are computed employing a neural network model. The input parameters are the fraction of the solar disk covered by bright and dark magnetic features on the solar surface, which are obtained from HMI/SDO solar disk magnetograms and continuum images.

Wavelength = 121.5 nm (Update: 05-Nov-2012 18:18:43 Z)



Irradiance [W/m<sup>2</sup>/nm]

FUV

# Services en météorologie de l'espace

## Surveillance: rayons cosmiques, Soleil en radio

- **Projet SIEVERT:**
  - surveillance des doses de radiation (rayons cosmiques) reçues par le personnel navigant de l'aviation civile en France (avec DGAC, IRSN, IPEV);
  - mesures des moniteurs à neutrons Kerguelen, Terre Adélie
  - logiciel SIGLE pour calculer les doses de radiation dues aux événements solaires à particules

The screenshot shows the SIEVERT website interface. At the top, there is a navigation bar with the SIEVERT logo and several menu items: 'Evaluez la dose reçue', 'Ou'est ce que le rayonnement cosmique?', 'L'exposition au rayonnement cosmique en avion', 'Les effets du rayonnement sur la santé', 'La mesure du rayonnement et l'évaluation de ses effets', 'Les experts vous en disent plus', 'Glossaire', and 'Rechercher'. Below the navigation bar, there are logos for IRSN and IPEV, and a main heading 'Evaluez la dose reçue'. The main content area is divided into two columns: 'DÉPART :' and 'ARRIVÉE :'. Each column contains a form with fields for 'Pays', 'Ville', 'date (locale)', and 'Heure (locale)'. The 'Pays' and 'Ville' fields are dropdown menus, and the 'date' and 'Heure' fields are date and time pickers. Below the forms, there is a 'Type d'avion' dropdown menu set to 'Subsonic' and a 'Calculer la dose de rayonnements cosmiques reçue lors de ce vol' button. At the bottom, there is a footer with the text 'Système réalisé et intégré par LOGATIQUE' and a disclaimer: 'Sous réserve des modifications de la réglementation locale, les dates et heures du vol prennent en compte le décalage horaire et éventuellement l'heure d'été. Vérifier la durée du vol.'

- Interaction avec des utilisateurs hors recherche: aviation civile (projet SIEVERT), Armée de l'Air (projet FEDOME)
- Des contributions concrètes à l'axe fédérateur *Environnement spatial de la Terre* de l'Observatoire de Paris.

# Soleil-Héliosphère-Terre et météo de l'espace

## Résumé

- Un axe de recherches en accord avec l'implication des laboratoires dans les grands projets de la discipline (notamment *Solar Orbiter*):
  - rôles de PI (instrument ondes RPW) et CoI (X durs, EUV, particules)
  - soutien sol important, notamment radio Nançay
  - savoir-faire en modélisation des structures magnétiques (couronne et milieu interplanétaire), étroitement liée aux observations multi-instruments
  - savoir-faire en modélisation de l'irradiance solaire et des processus de transport dans l'atmosphère terrestre - climatologie
  - utilité d'une approche coordonnée à l'archivage, la diffusion et l'exploitation des données.
- Possibilité de tirer le meilleur profit d'une recherche fondamentale riche et diversifiée pour développer des applications en météorologie de l'espace, en interaction avec les utilisateurs extérieurs.