

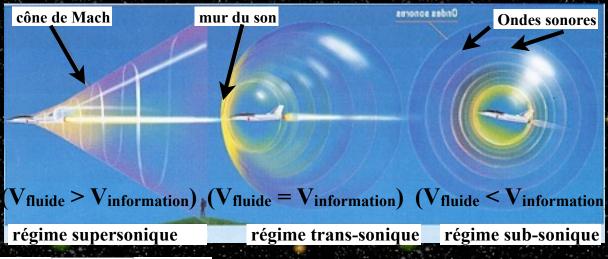


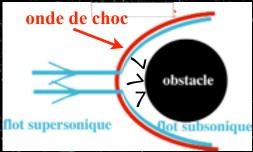




Les ondes de choc

origine écoulement supersonique ® obstacle







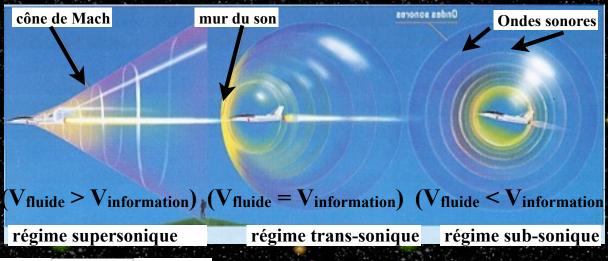


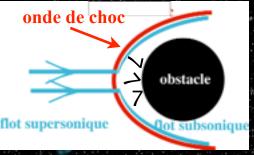




Les ondes de choc

origine écoulement supersonique ® obstacle





- → accumulation des particules devant l'obstacle
- → formation d'un front (chasse-neige ...)
- → compression irréversible du milieu
- → n /, P/, T/ → entropie / (phénomènes irréversibles)







Les ondes de choc

nature

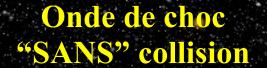
Onde

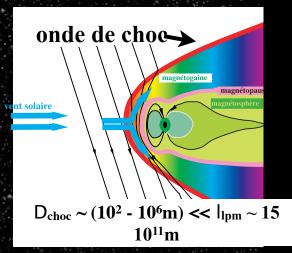
Onde de choc "usuelle"



 $D_{choc} \sim l_{lpm} \sim 10^{-9} m$ avion supersonique

Mécanismes de dissipation : les collisions





Exemple: choc en amont de la Terre Mécanismes de dissipation: Interactions champs-particules

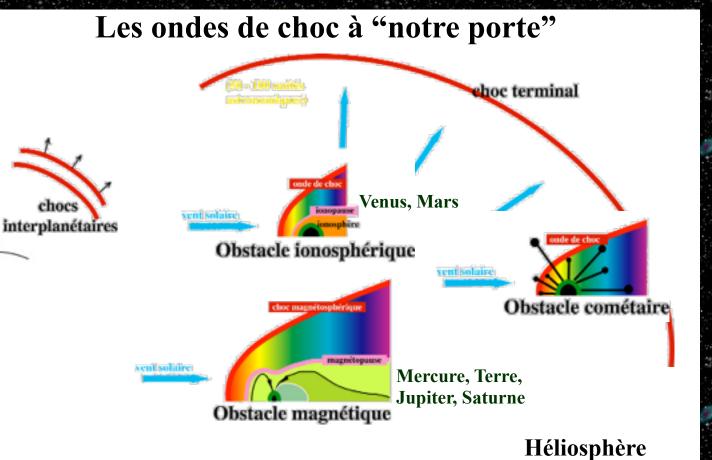
Effet de dispersion







existence





choc coronal

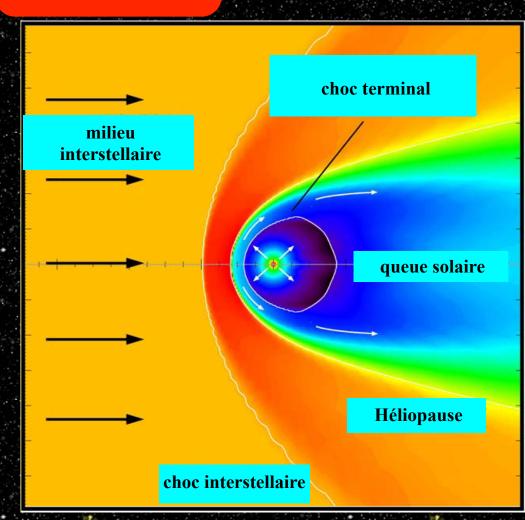
onde de choc

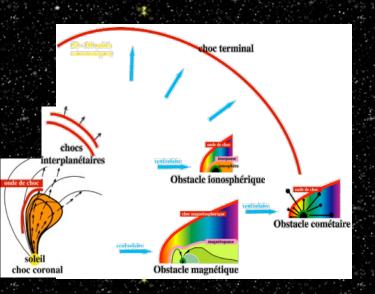


CME



existence



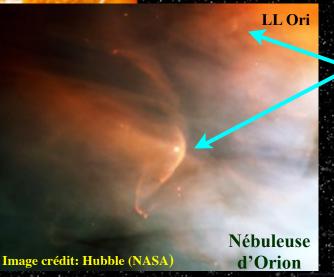








existence



ondes de choc

Les ondes de choc lointaines



Chocs radiatifs





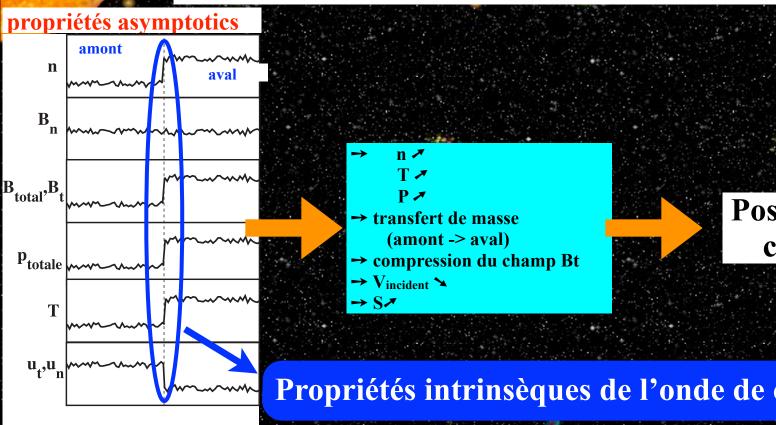


Rothenflug et al., 20041

Supernova: SN1006

nature

Etat du plasma de part et d'autre du choc: **Equations de Rankine-Hugoniot**



Possible SANS collision?

Propriétés intrinsèques de l'onde de choc ??







résultat de 3 processus distincts



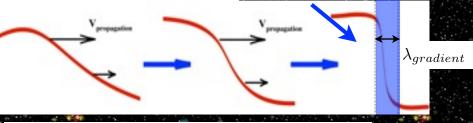
Onde de choc

raidissement NON LINEAIRE

d'un gradient (propagation idéale)

=> excitation des petites |

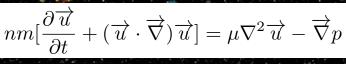
onde non linéaire formation fort gradient



$$nm\left[\frac{\partial \overrightarrow{u}}{\partial t} + (\overrightarrow{u} \cdot \overrightarrow{\nabla})\overrightarrow{u}\right] = \mu \nabla^2 \overrightarrow{u} - \overrightarrow{\nabla} p$$



formation de trains d'ondes amont-aval





résultat de 3 processus distincts

 $\lambda_{gradient} \approx \lambda_{dispersion}$

Onde de choc

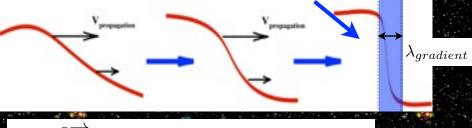
 $\lambda_{gradient} pprox \lambda_{dissipation}$

raidissement NON LINEAIRE

d'un gradient (propagation idéale)

=> excitation des petites |

onde non linéaire formation fort gradient



$$nm\left[\frac{\partial \overrightarrow{u}}{\partial t} + (\overrightarrow{u} \cdot \overrightarrow{\nabla})\overrightarrow{u}\right] = \mu \nabla^2 \overrightarrow{u} - \overrightarrow{\nabla} p$$

effets dispersifs

=> évacuation des

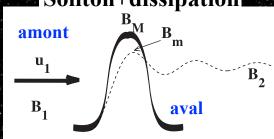
effets dissipatifs

 \Rightarrow amortissement des λ

résistivité «anormale» viscosité

«anormal»

Soliton+dissipation

















→ banlieue proche : mesures in-situ (AMPTE, ISEE,, CLUSTER-II, ...)

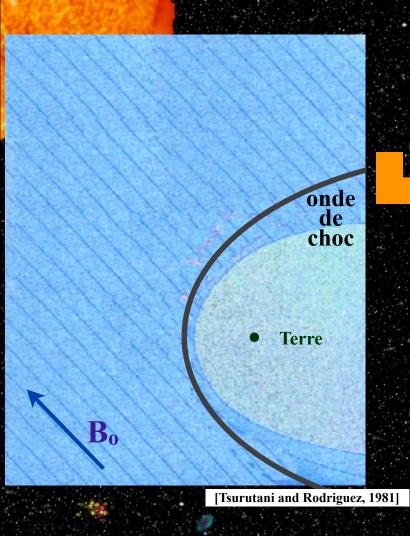


[Tsurutani and Rodriguez, 1981]









Structure multi-échelles :

petites échelles :

→ échelles dissipatives

(Nombre de Mach ≡ énergie à dissiper)

Nombre de Mach Alfvénique :

M_A=V_{vent solaire}/V_A

une valeur critique : $M_A^* \sim 3$

 $M_A < M_A^* \rightarrow chocs sous-critiques$

→ échelles résistives (instabilités)

 $M_A > M_A^* \rightarrow$ chocs supercritiques

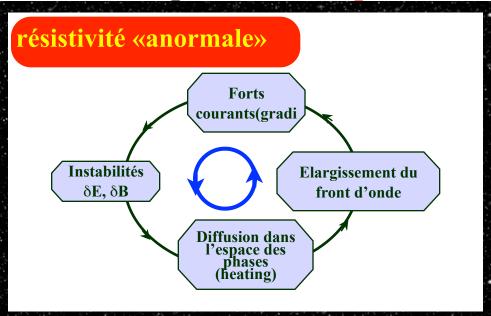
→ échelles «visqueuses»







Echelles dissipatives : dissipation «résistive»

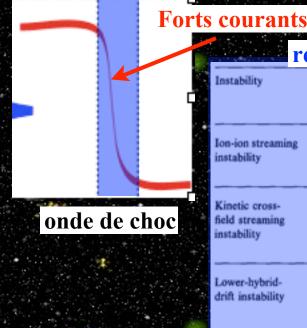








Echelles dissipatives : dissipation «résistive»



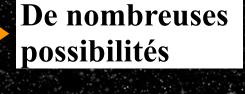
Instability	Nature of wave mode	Typical wavelength	Frequency and growth rate
Ion-ion streaming instability	Magnetosonic waves	$k \sim \frac{\omega_e}{c}$	$\gamma \sim \Omega_{\rm r}$
Kinetic cross- field streaming instability	Whistler mode waves with oblique propagation	$k \gtrsim \frac{\omega_{\text{LH}}}{V_0}$	$\begin{array}{l} \omega \simeq \omega_{\mathrm{LH}} \\ \gamma > \Omega_{\mathrm{r}} \\ \omega \simeq \omega_{\mathrm{LH}} \\ \gamma > \Omega_{\mathrm{r}} \end{array}$
Lower-hybrid- drift instability	Lower hybrid waves and drift waves	$k \sim \frac{\omega_{\rm LH}}{V_0}$	$ω ≃ ω_{LH}$ $γ ▶ Ω_{r}$
	Doppler-shifted whistler mode	$k > \frac{\omega_{\text{LH}}}{V_0}$	$\omega \simeq \omega_{LH}$ $\gamma \gg \Omega_{r}$
Ion-acoustic instability	Ion waves	<i>kλ</i> _D ≲1	$\omega \lesssim \omega_t$ $\gamma > \Omega_t$
Electron- cyclotron	Doppler-shifted Bernstein waves	kλ _D ≲ 1	$\omega \simeq n\Omega_e$ $\gamma > \Omega_i$

Whistler-mode

lel propagation

waves with paral-

région du front de choc









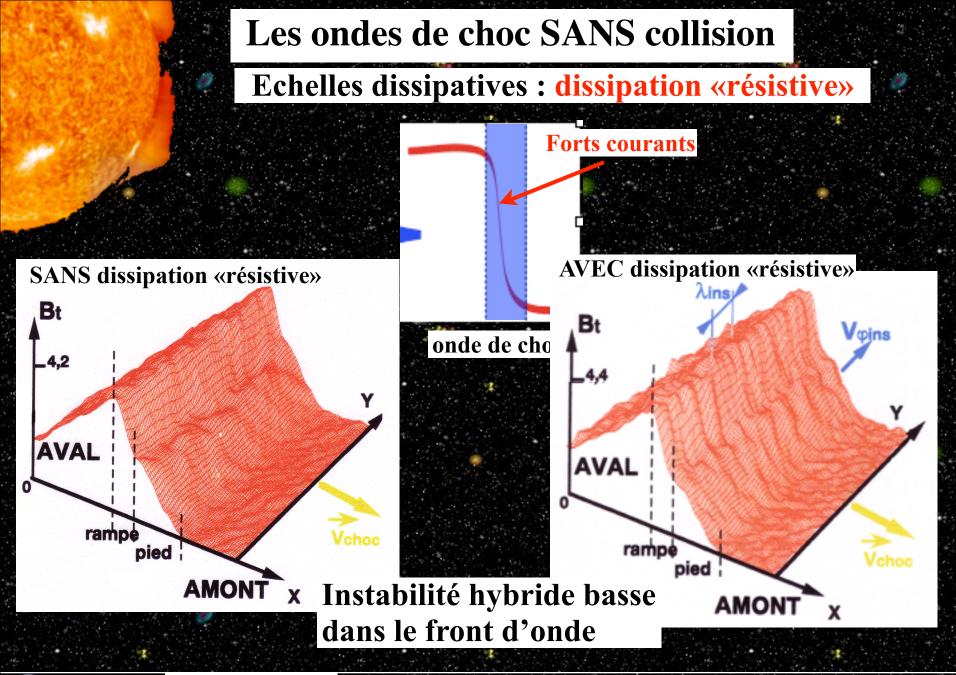
Whistler insta-

bility

 $\omega \triangleleft \Omega$

 $\gamma \triangleright Q_i$

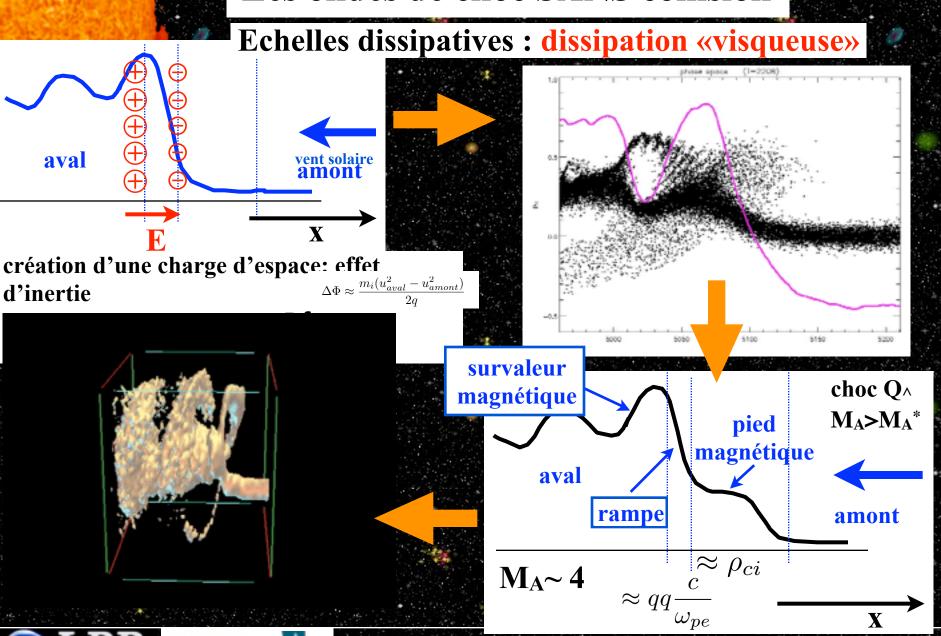
[Wu et al., 1984]





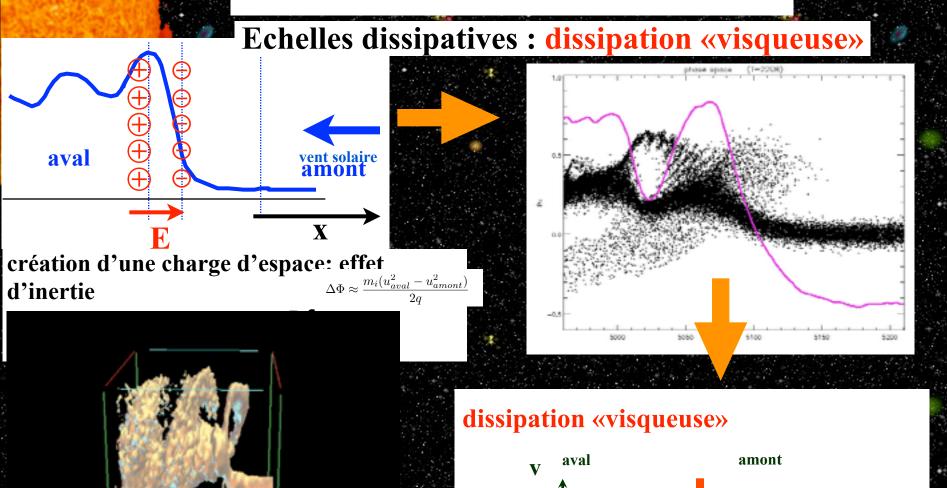










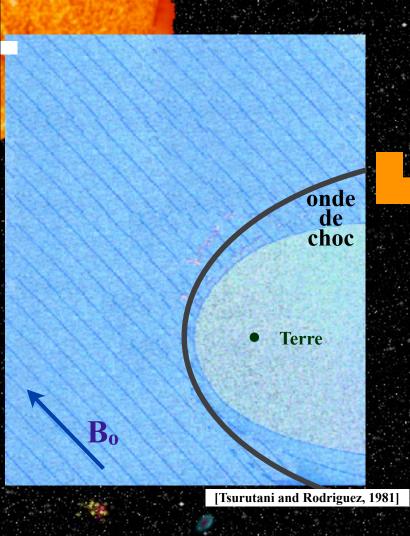








espace des phases



Structure multi-échelles :

petites échelles :

→ échelles dissipatives

(Nombre de Mach ≡ énergie à dissiper)

Nombre de Mach Alfvénique :

M_A=V_{vent solaire}/V_A

une valeur critique : $M_A^* \sim 3$

 $M_A < M_A^* \rightarrow chocs sous-critiques$

→ échelles résistives (instabilités)

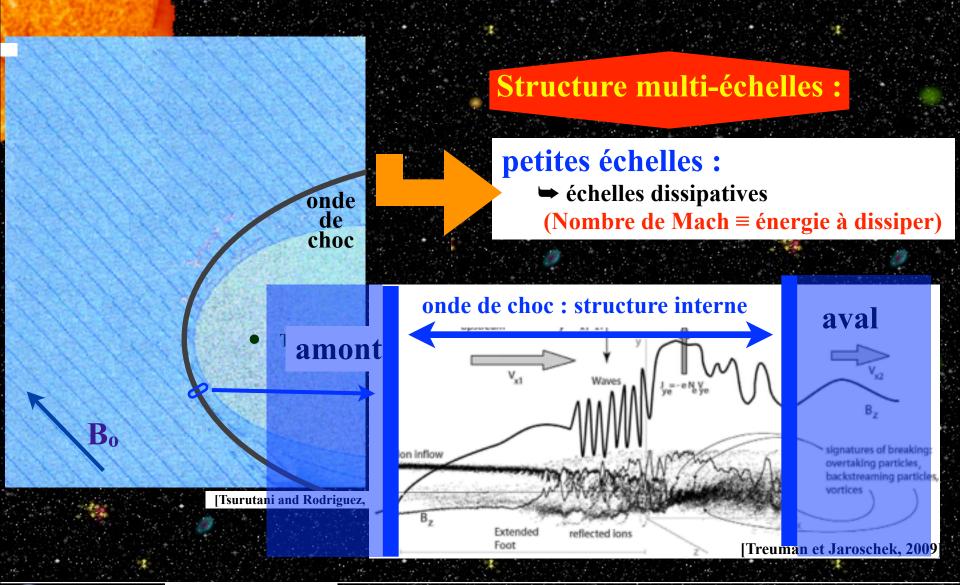
 $M_A > M_A^* \rightarrow$ chocs supercritiques

→ échelles «visqueuses»





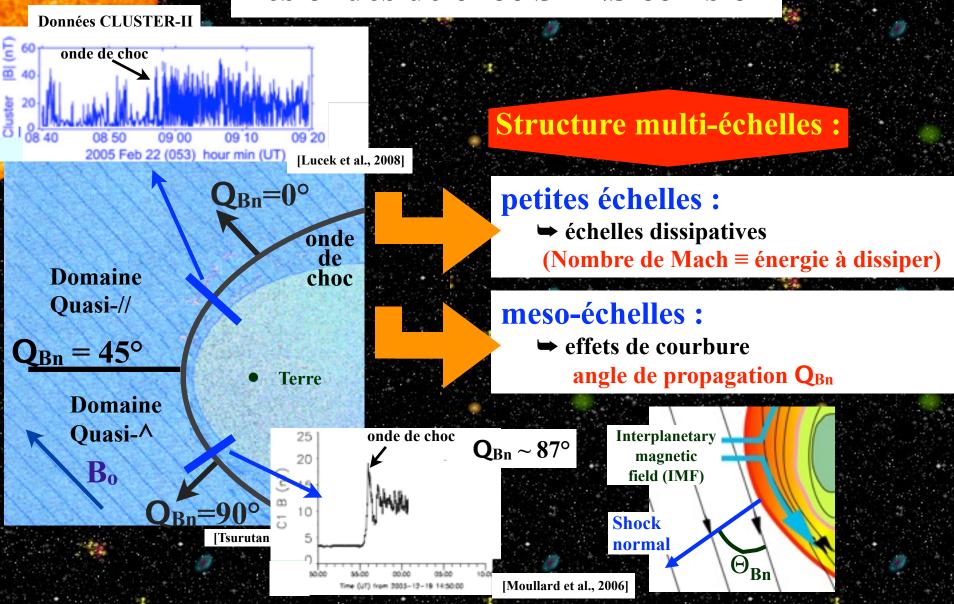








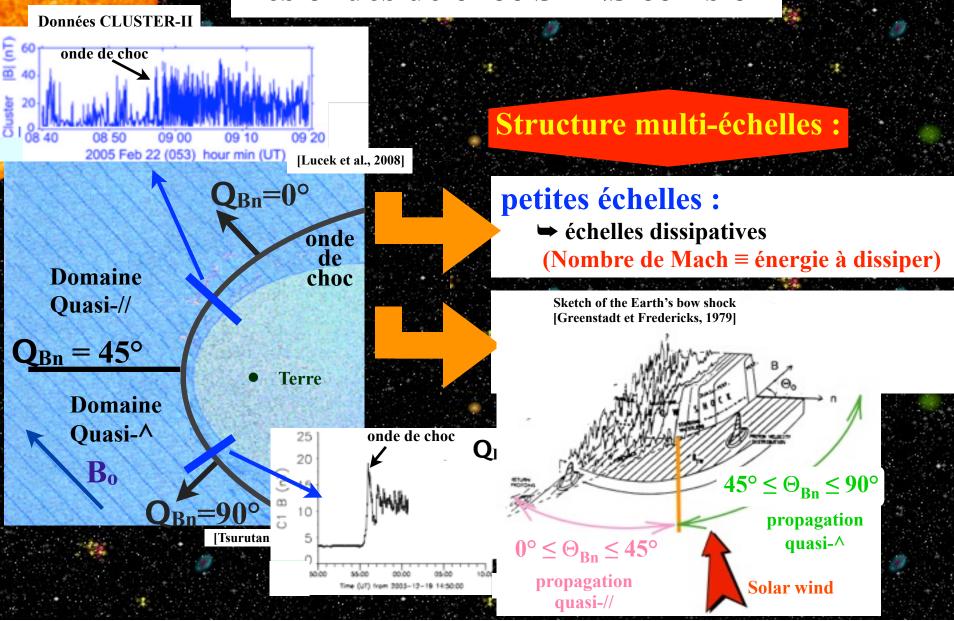








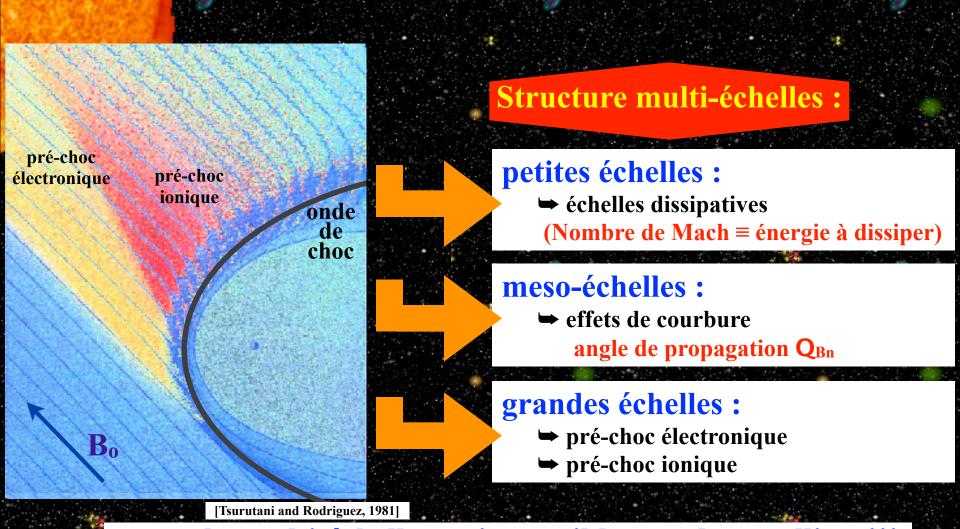












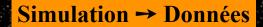
approche multi-échelles → impossible avec les satellites !!!
apport de la simulation numérique







Quelques exemples de résultats obtenus via la simulation numérique



→ Petites échelles :

la non-stationarité du choc

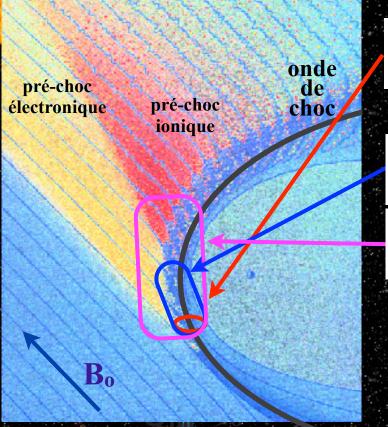
Données → **Simulation**

→ Meso échelles :

accélération des électrons

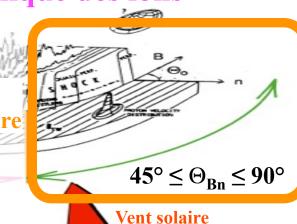
→ Grandes échelles :

dynamique des ions



Domaine Quasi-perpendiculaire









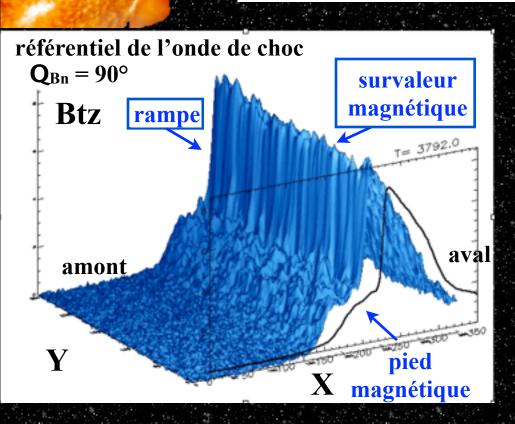


[Tsurutani and Rodriguez, 1981

Les ondes de choc SANS collision

→ Petites échelles :

la non-stationarité du choc





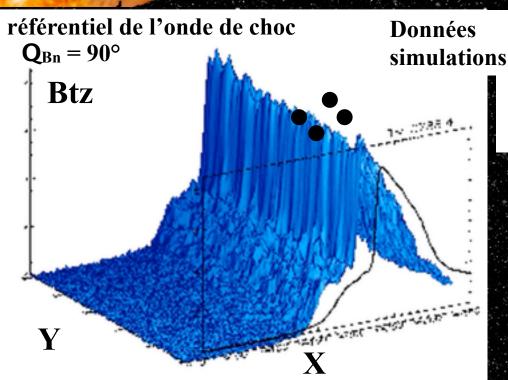


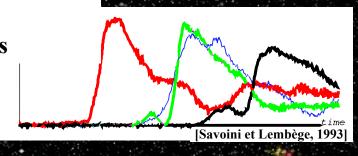


Les ondes de choc SANS collision

→ Petites échelles :

la non-stationarité du choc







- auto-reformation périodique du front
- $T\sim 1 t_{ci}$



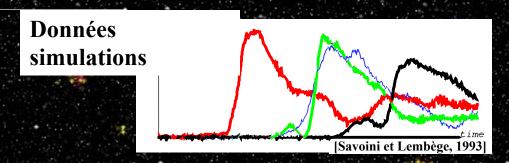




Les ondes de choc SANS collision

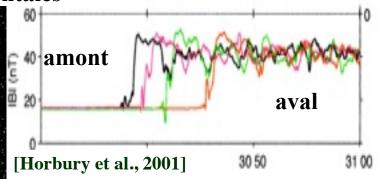
→ Petites échelles :

la non-stationarité du choc



Données expérimentales







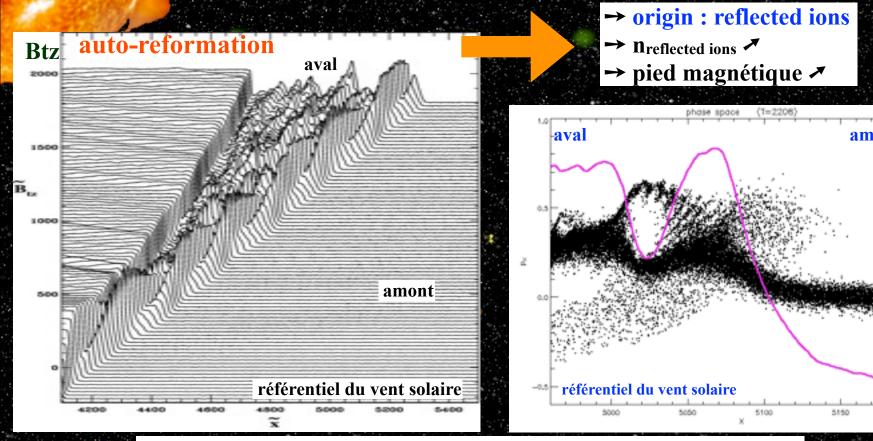




Les ondes de choc SANS collision

→ Petites échelles :

la non-stationarité du choc



Processus d'auto-reformation : pas si simple !!!!

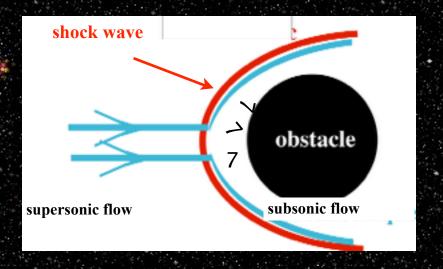
- → existence d'autres mécanismes déclencheurs
- → existence aussi de mécanismes stabilisateurs







choc AVEC collisions ≡ **un horizon**





- → pas de particules
- → pas d'ondes sonores

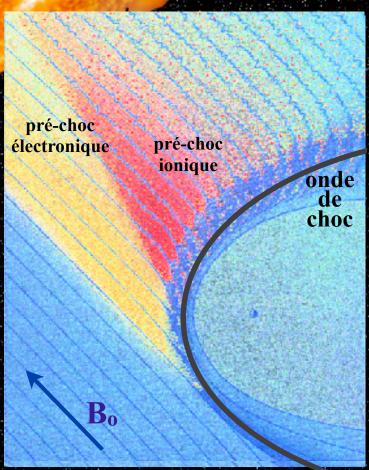






→ meso-échelles :

accélération des particules



[Tsurutani and Rodriguez, 1981]







mécanismes d'accélération de base

(transfert d'énergie via les champs E et B)



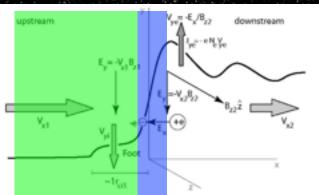
inertie des particules → champ de charge d'espace

$$\overrightarrow{\nabla}E = \frac{\rho}{\epsilon_o}$$

mouvement des particules

→ champ de convection

$$\overrightarrow{E} = -\overrightarrow{u} \times \overrightarrow{I}$$



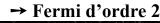
[Treuman et Jaroschek, 2008]

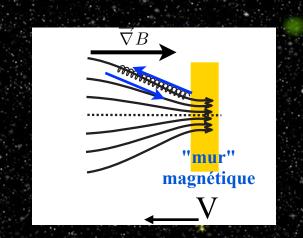
Gain d'énergie (accélération)



miroir magnétique → Fermi d'ordre 1 («effet» raquette de tennis)

collisions stochastiques

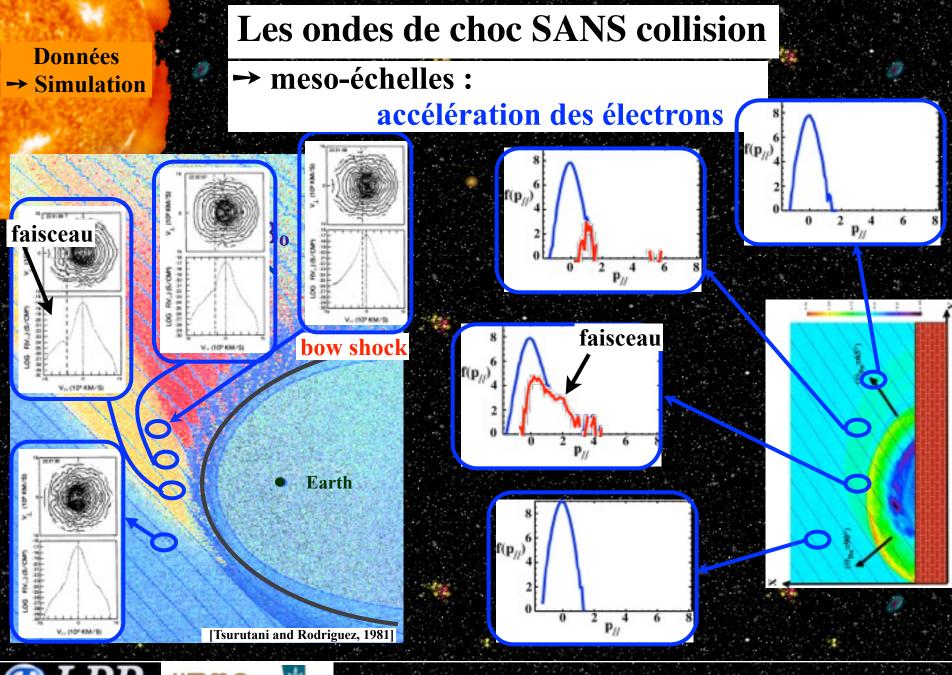


















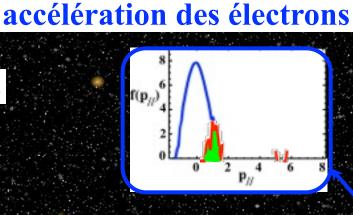
Données → Simulation

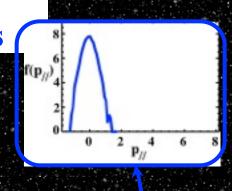
Les ondes de choc SANS collision

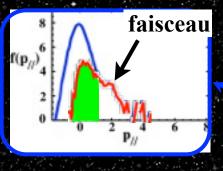
→ meso-échelles :

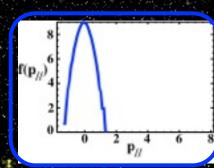
→ 2 populations distinctes

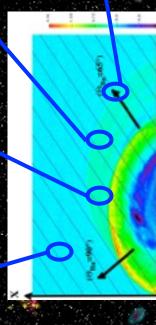












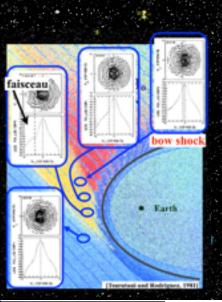


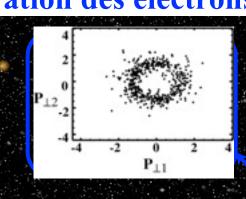


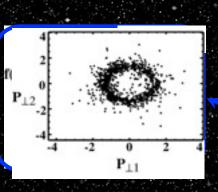


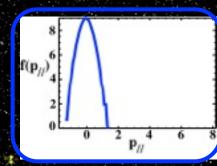
Données → Simulation

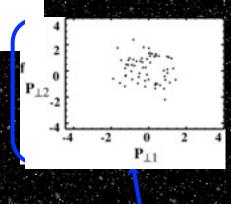
- → meso-échelles :
- accélération des électrons
- → 2 populations distinctes
- → Signature «cone de perte» : réflexion miroir

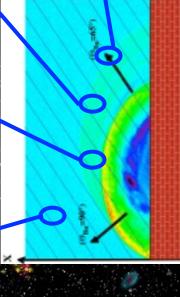


















Données

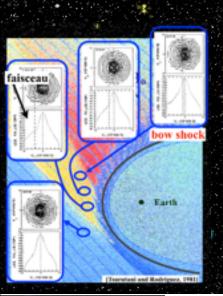
→ Simulation

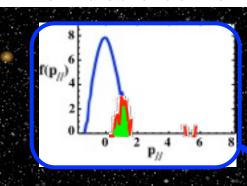
Les ondes de choc SANS collision

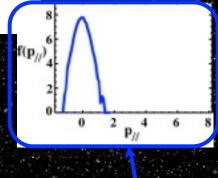
→ meso-échelles :

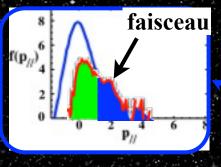
accélération des électrons

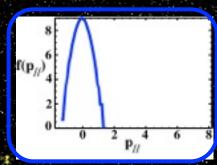
- → 2 populations distinctes
- → Signature «cone de perte» : réflexion miroir

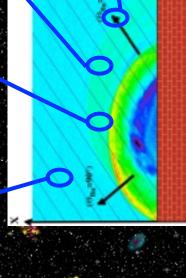


















Données

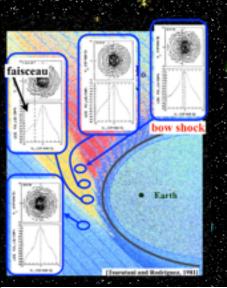
→ Simulation

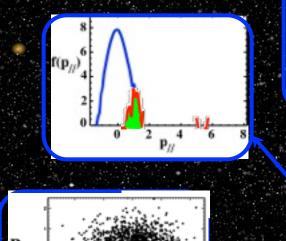
Les ondes de choc SANS collision

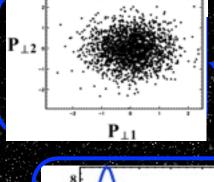
→ meso-échelles :

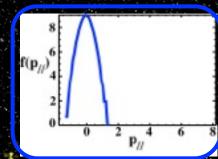
accélération des électrons (

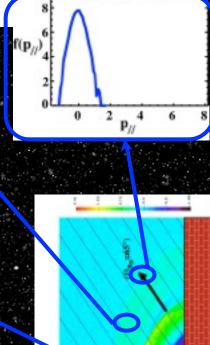
- → 2 populations distinctes
- → Signature «cone de perte» : réflexion miroir
- → Aucune signature caractéristique
 - : autres mécanismes ??







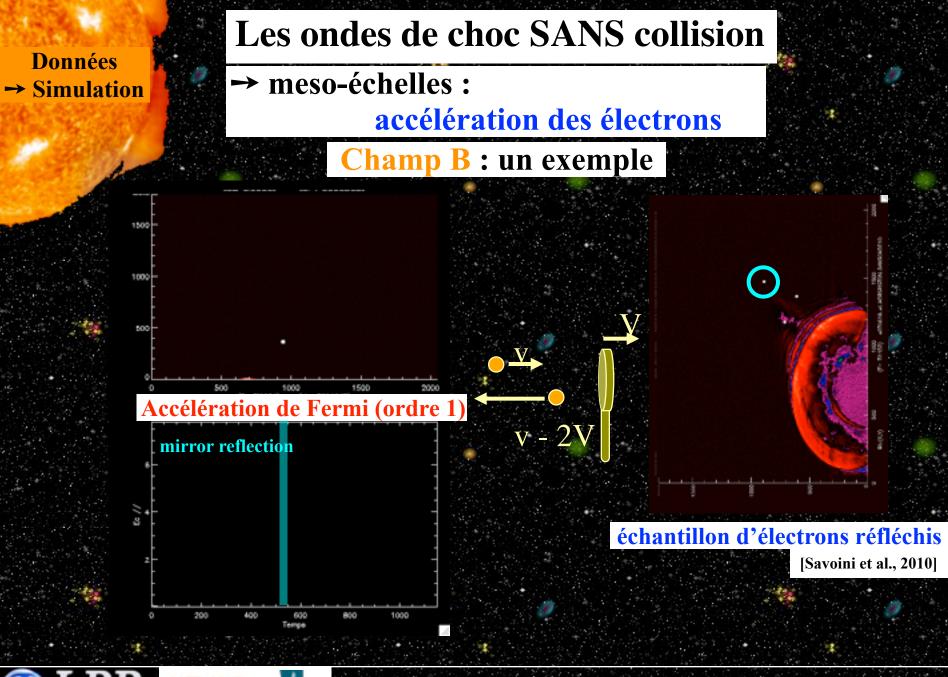








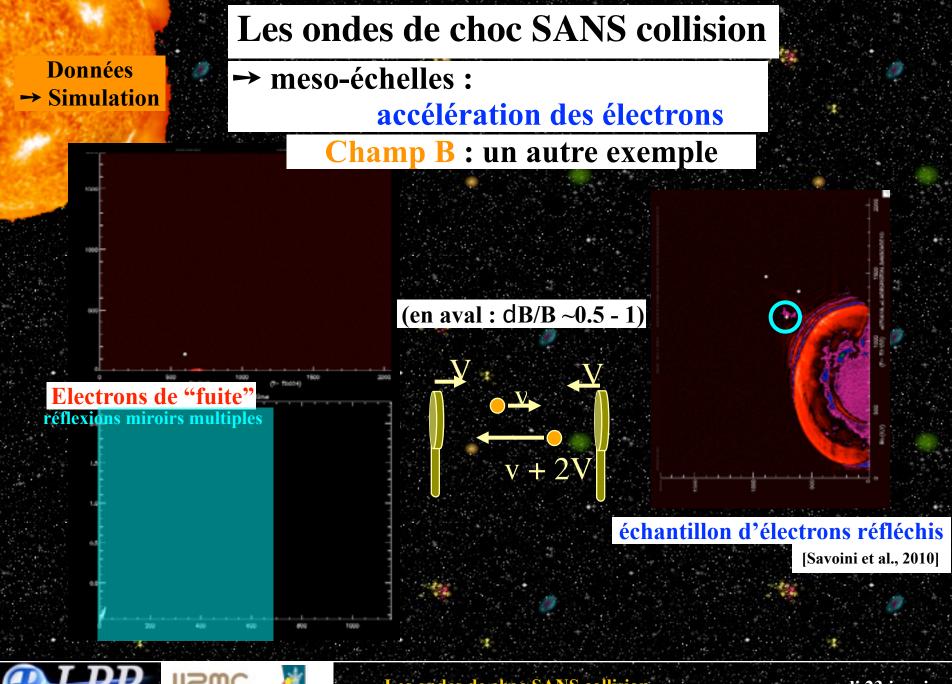
















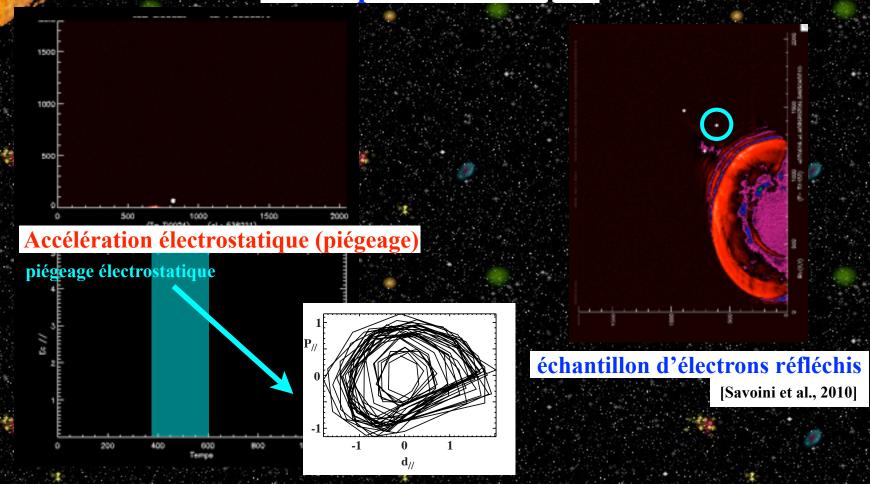
Données → Simulation

Les ondes de choc SANS collision

→ meso-échelles :

accélération des électrons

Champ E: un exemple









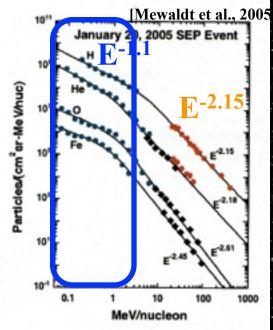


→ meso-échelles :

accélération des ions

Spectre d'énergie (~ 1 UA)

(Heliospheric particles)



données de ACE, SAMPEX et GOES-

→ Loi de puissance

$$\frac{dJ}{dE} \propto E^{-\gamma} \exp(-\frac{E}{E_o})$$

- \rightarrow E⁻¹
- → Spectre faible énergie(≤ qq MeV)
- \rightarrow t_{acceleration} $\leq 10 \text{ s}$





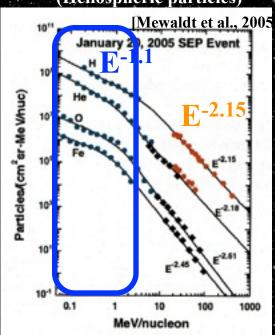
→ meso-échelles :

accélération des ions

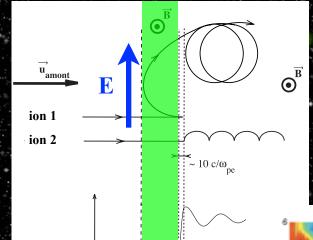
downsti

accélération de dérive

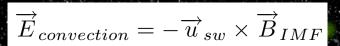
Spectre d'énergie (~1 UA)
(Heliospheric particles)



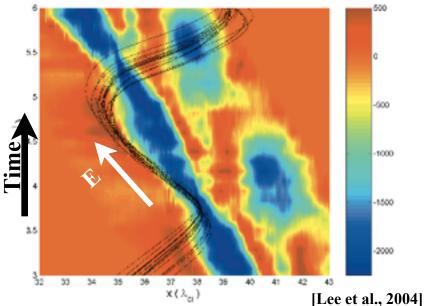
données de ACE, SAMPEX et GOES-



upstream







Space







Données → Simulation

Les ondes de choc SANS collision

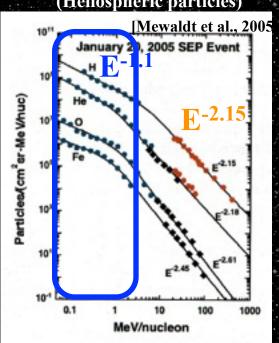
→ meso-échelles :

accélération des ions

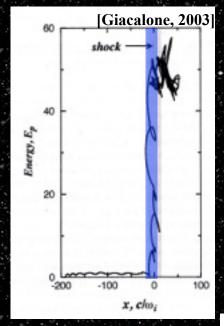
accélération résonante («surf»)

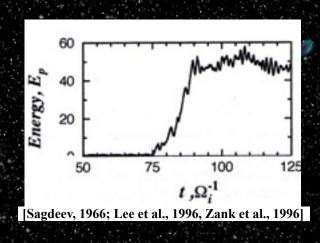
→ accélération très efficace : $DE \ge 1000 E_i$

Spectre d'énergie (~ 1 UA) (Heliospheric particles)



données de ACE, SAMPEX et GOES-





Choc Quasi-perpendiculaire:

→ Ec ✓ MeV en 3 minutes







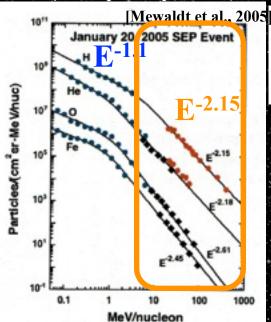
→ meso-échelles :

accélération des ions

accélération diffusive

Spectre d'énergie (~1 UA)

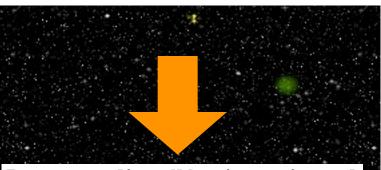
(Heliospheric particles)



données de ACE, SAMPEX et GOES-

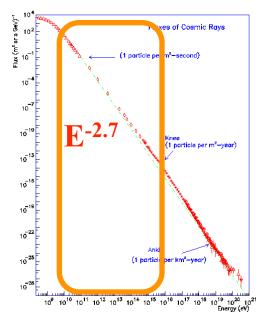
Energy spectra Cosmic rays

- → Loi de puissance
- \rightarrow E⁻² ~ (-3)
- → Spectre de haute énergie (>> MeV)



Processus d'accélération universel

→ Les ondes de choc !!!



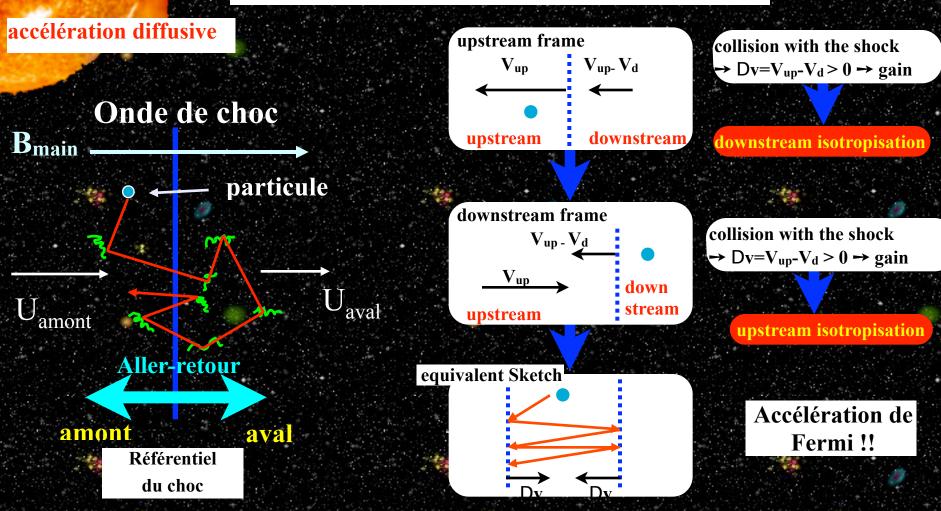






→ meso-échelles :

accélération des ions











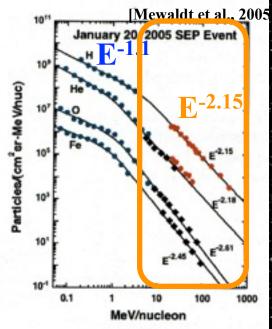
→ meso-échelles :

accélération des ions

accélération diffusive

Spectre d'énergie (~1 UA)

(Heliospheric particles)



données de ACE, SAMPEX et GOES-

Accélération diffusive

→ Loi de puissance:
$$\frac{dJ}{dE} \propto E^{-\alpha}$$
 $(\alpha = \frac{\varpi+2}{\varpi-1})$

→ loi de puissance universelle :

 \rightarrow quand M_A>10, $\varpi \approx 4$ alors $\alpha \approx 2$

→ dJ/dE a E⁻² bon accord avec le spectre NON thermique

→ tacc réduit : DE ren secondes (ou semaines)

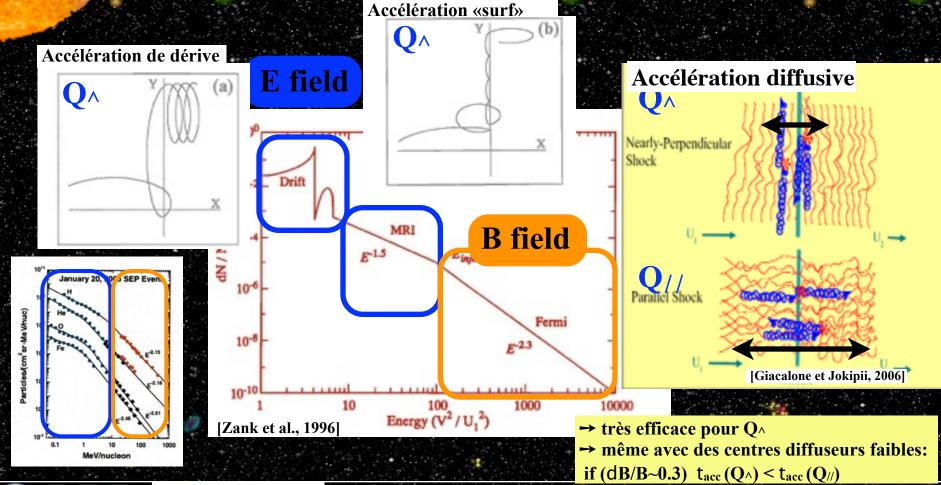
→ plus de problème d'accélération initiale





→ meso-échelles :

accélération des ions





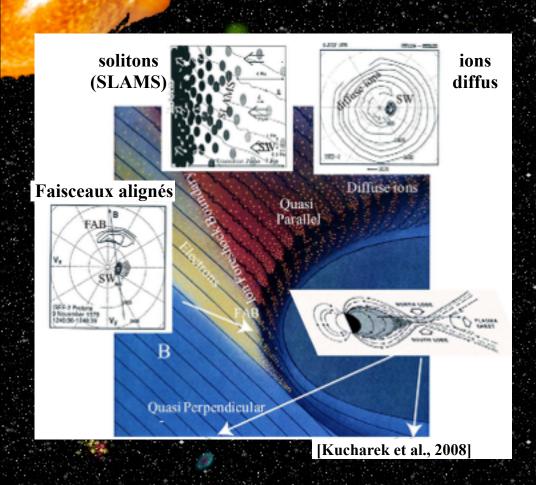






→ grande-échelles :

le pré-choc ionique







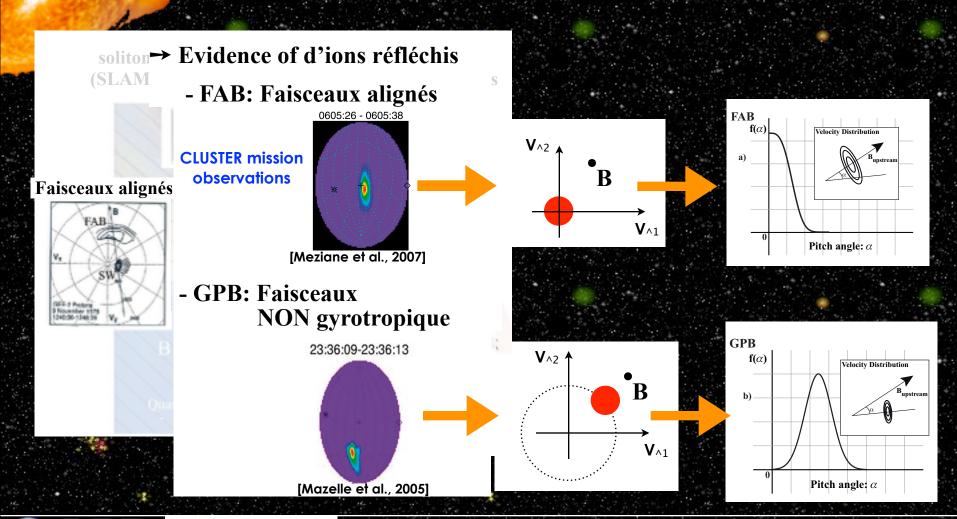


Données → Simulation

Les ondes de choc SANS collision

→ grande-échelles :

le pré-choc ionique











(SLAM

Faisceaux alignés

Les ondes de choc SANS collision

→ grande-échelles :

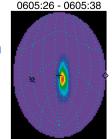
le pré-choc ionique

soliton

Evidence of d'ions réfléchis

- FAB: Faisceaux alignés

CLUSTER mission observations



[Meziane et al., 2007]

- Réflexion spéculaire avec m =cte ou m ≠ cte

[Sonnerup, 1969; Schwartz et Burgess, 1984; Gosling et al., 1982]

- Ions de fuite (magnétogaine)

[Tanaka et al., 1983; Thomsen et al.]

- Diffusion des ions réfléchis par des fluctuations amont

[Giacalone et al., 1994]

par des fluctuation dans la rampe

[Kucharek et al., 2004; Bale et al., 2005]

- GPB: Faisceaux NON gyrotropique

23:36:09-23:36:13



- gyrating ions at the ramp

[Gurgiolo et al., 1981, 1983]

- Wave synchronisation

[Mazelle et al., 2003; Hamza et al., 2006]

- Beam-plasma Instability

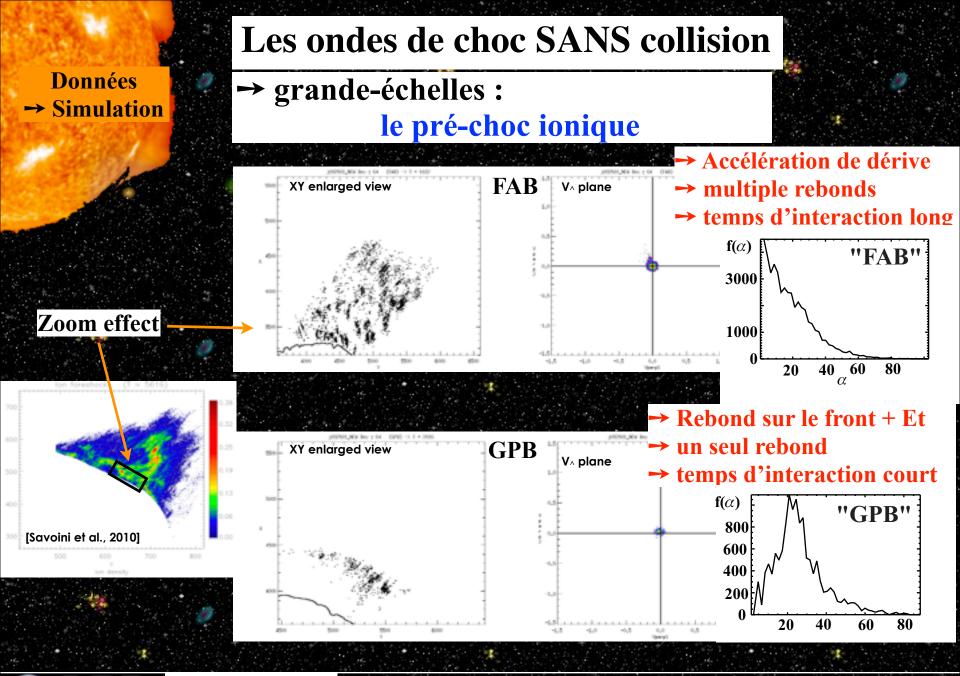
[Hoshino and Terasawa, 1985]



November 1575 NO:00-1246-39















→ grande-échelles :

le pré-choc ionique

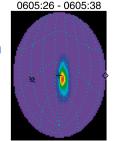
soliton

Evidence of d'ions réfléchis

- FAB: Faisceaux alignés

CLUSTER mission observations

Faisceaux alignés



[Meziane et al., 2007]

- Réflexion spéculaire avec m = cte ou $m \neq cte$

[Sonnerup, 1969; Schwartz et Burgess, 1984; Gosling et al., 1982]

- rons de ruite (magnetogame)

[Tanaka et al., 1983; Thomsen et al.]

- Diffusion des ions réfléchis par des fluctuations amont [Giacalone et al., 1994]

par des fluctuation dans la rampe

[Kucharek et al., 2004; Bale et al., 2005]

- GPB: Faisceaux NON gyrotropique

23:36:09-23:36:13



- gyrating ions at the ramp

[Gurgiolo et al., 1981, 1983]

- Wave synchronisation

[Mazelle et al., 2003; Hamza et al., 2006]

- Beam-plasma Instability

[Hoshino and Terasawa, 1985]



November 1979 240:00-1240:30





