

Observations et Résultats du Proton Alfa Sensor (PAS) de Solar Orbiter



*P. Louarn, A. Fedorov, A. Barthe, E. Penou, V. Genot, A. Rouillard, B. Lavraud, V. Réville...
et toute l'équipe **SWA** + MAG and RPW*

1-Instrument, performances, opérations et données

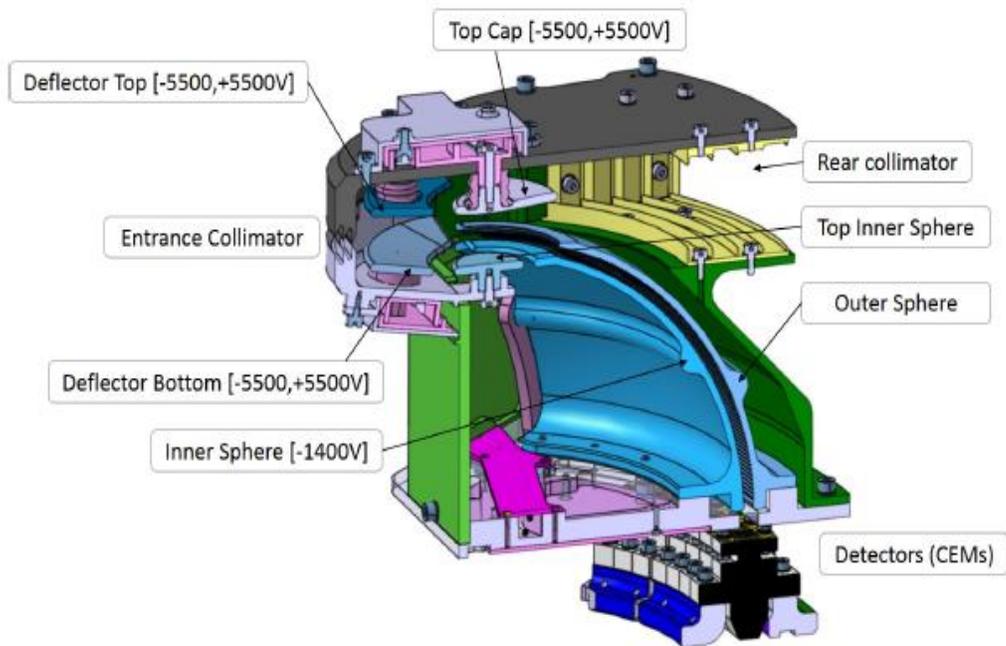
2- Le premier périhélie (Mars/Avril 2022). Evènements intéressants

3- Survol de la production scientifique. Exemples de travaux

En dépit d'opérations plus complexes que prévues (problème de DPU), ~18 mois de remarquables observations qui questionnent la dynamique du VS aux différentes échelles.

PAS : Principles and Measurements

PAS combines an **electrostatic deflector** and an **energy analyzer** to select the **elevation** and the **energy** of incident ions that are then counted by **11 detectors (azimuth)**.



PAS analyzer ion optics elements.

Deflector system designed to fit the maximal possible HV.

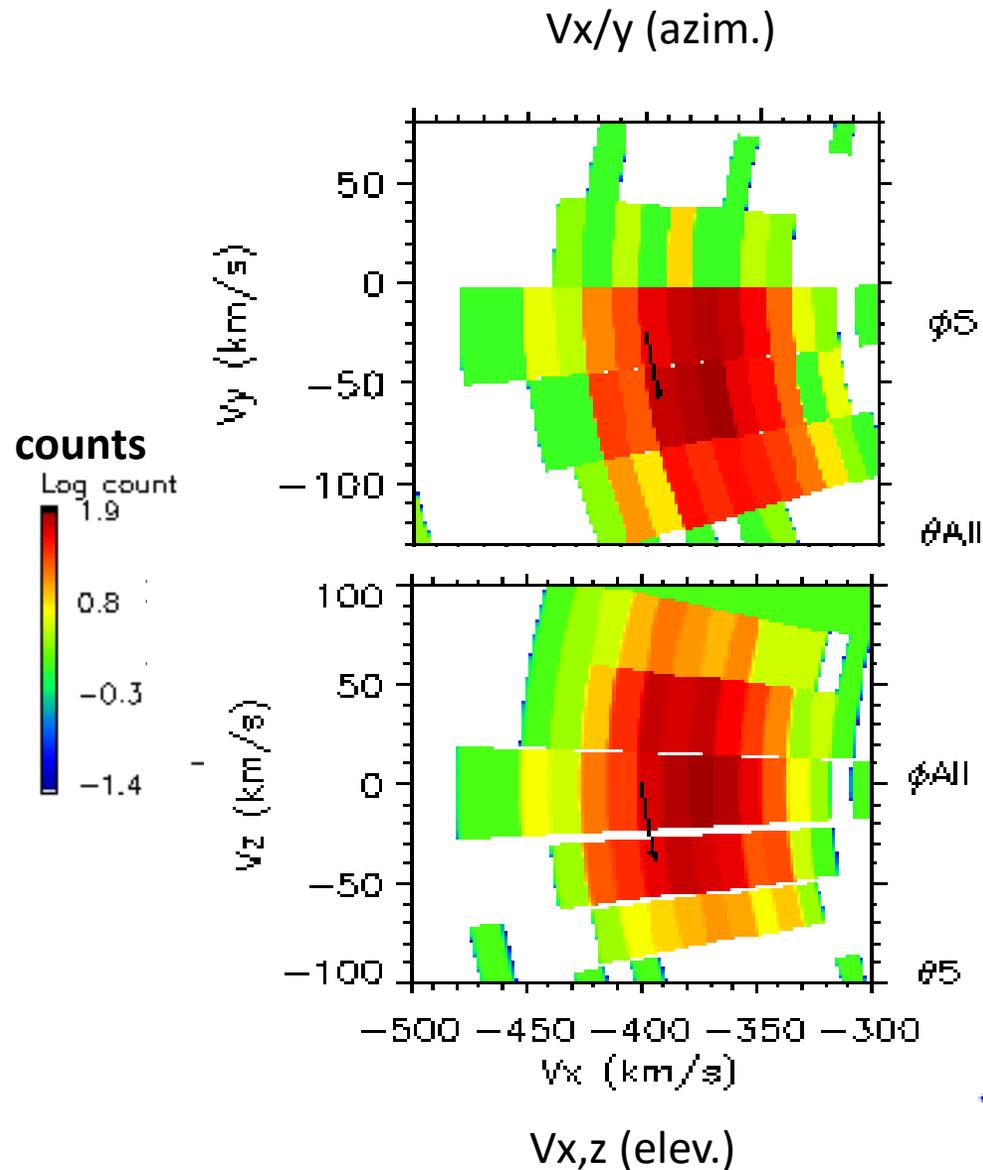
CEMs ion detectors chosen with very wide dynamic range (0.1 to 10^7 s^{-1}) count rate and a long time of life.

Designed by Andrei Fedorov, IRAP

PAS produces 3D matrix of counts, integrally transmitted to ground, then converted in 3D velocity distributions (VDF) and used for moment calculations (N, V, P).

- FOV of **45° in Elevation** (9 sectors) and **66° in Azimuth** (11 sectors), **resolution of 6°**.
- Energies: **200 eV – 20 keV (94 steps)** with resolution $\Delta E/E$: **8%**.
- Time resolution: a **full 3D** ([94,9,11] samplings) **is measured in 1 second**.
- **Peak tracking** to identify the SW core and focus the sampling -> *by adapting the number of energy and elevation steps, PAS can reaches sub-second resolution.*
- We generally use 32x5x11 sampling for bursts -> ***very representative 3D distributions of the SW at 4 Hz.***

Velocity Distribution Function (VDF) as the basic PAS product



Example of measurements (in counts). For a 'Normal' SW: 360 km/s, 9 cm⁻³, 10 eV. PAS gets a maximum counts/pixel ~ 80 and total counts ~ 2100.

statistical accuracy:

Density: 2400 counts corresponds to ~ 10 cm⁻³.

$$dN/N \sim \text{Sqrt}(\text{cts})/\text{cts} \sim 0.02 \text{ (2\%)}$$

Typically, for 2 σ : 10 \pm 0.4 cm⁻³

$$\text{Velocity: } dV/V \sim \text{Sqrt}(T/\langle E \rangle)/\text{Sqrt}(N) \sim 0.25 \%$$

Typically, for 2 σ : 350 \pm 2 km/s and angular accuracy: ~ 2°

Closer to Sun, total counts increase by factor 4 to 10. Gain in accuracy by factor 2 -3 -> relative accuracy better than 1% on N and 0.1 % on V

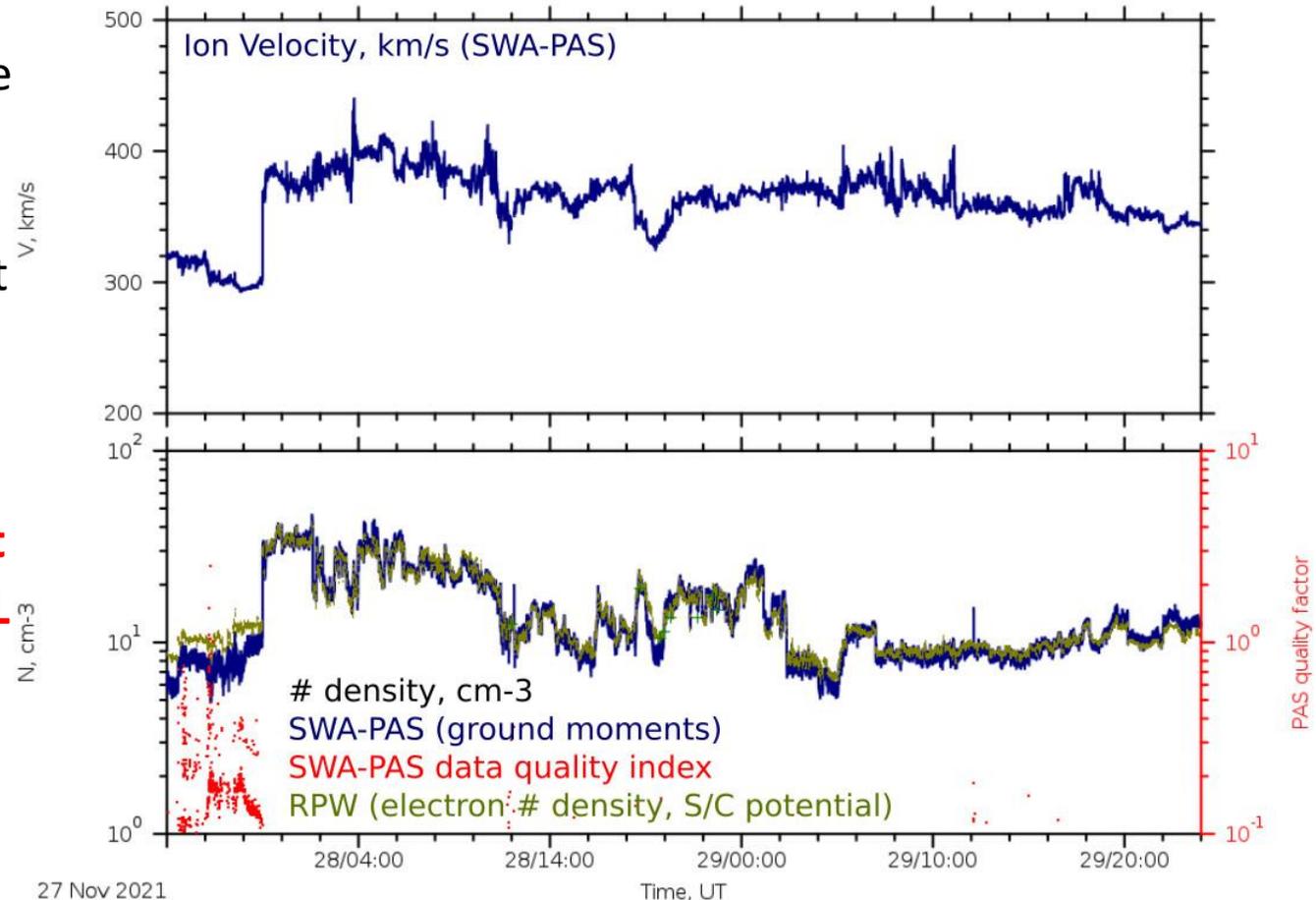
NOTE: Decrease of efficiency at low energies -> increase of noise if V < 330 eV. Be careful for any studies at V < 280 km/s

Bilan à 2 ans

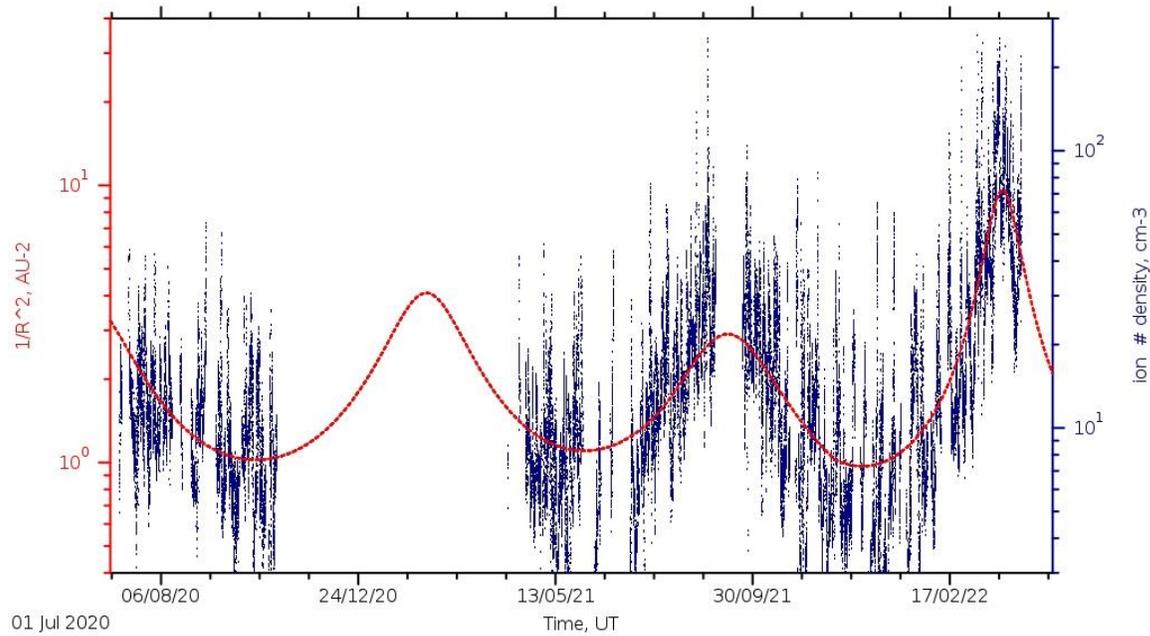
Depuis Avril 2020, ~ 18 mois d'excellentes observations, avec des périodes de ~ 2 mois en continu. Cependant, anomalies de fonctionnement du DPU. Pour 'stabiliser' le fonctionnement, *PAS n'effectue plus de mode 'burst' depuis Janvier 2022. en cours d'analyse*

La **calibration en vol** qui a permis de corriger la perte de sensibilité à faibles énergies (A. Fedorov).
Excellente comparaison entre les mesures de densité de RPW et PAS, avec moins que 10 % d'écart en moyenne si $V > 320$ km/s

Toutes ces données, calibrées, sont libres d'accès et les logiciels d'analyse sont disponibles: AMDA ou CL
(Contact CDPP, V. Génot, E. Penou, A. Fedorov, moi-même)

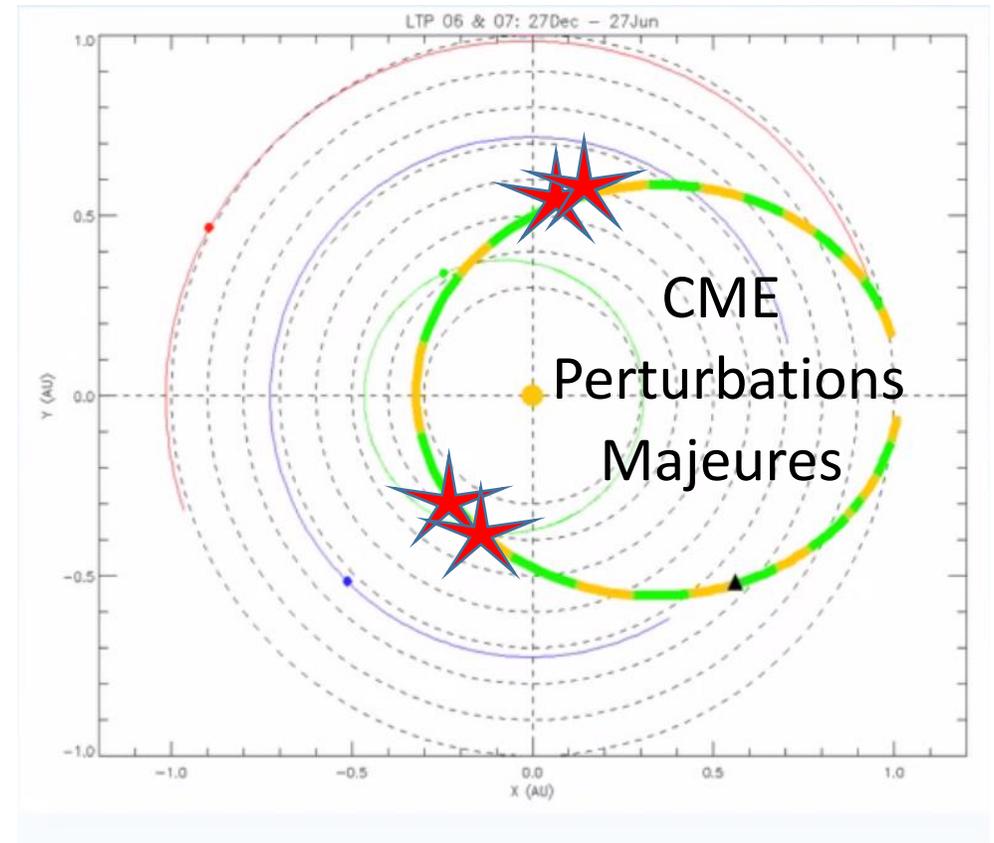


Illustrations



Variations de la densité avec la distance au soleil (r^{-2}), depuis Avril 2020

Quelques exemples intéressants observés de Mars à Avril 2022 lors du premier 'vrai' périhélie. (Distance entre 0.6 et 0.32 u.a)

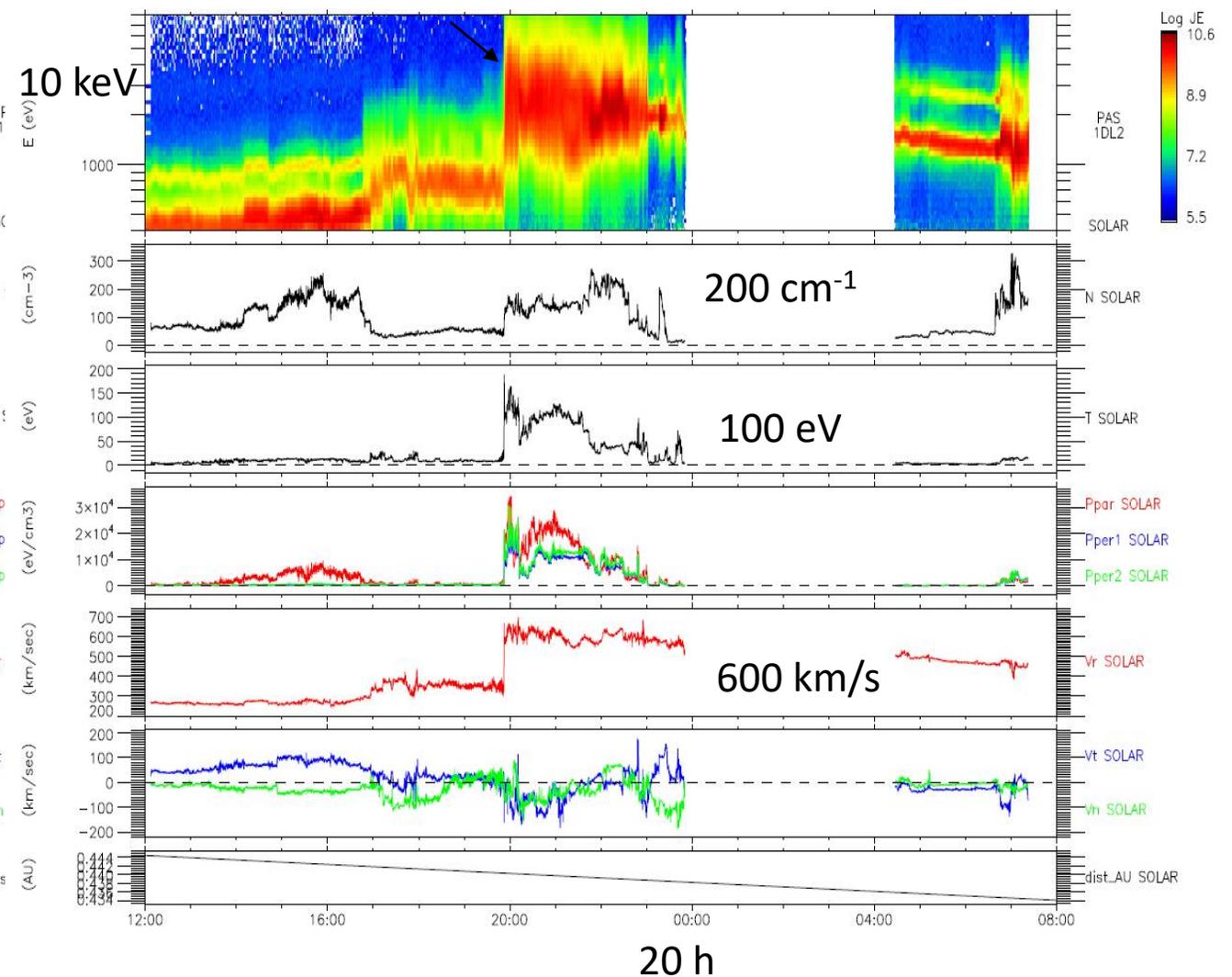
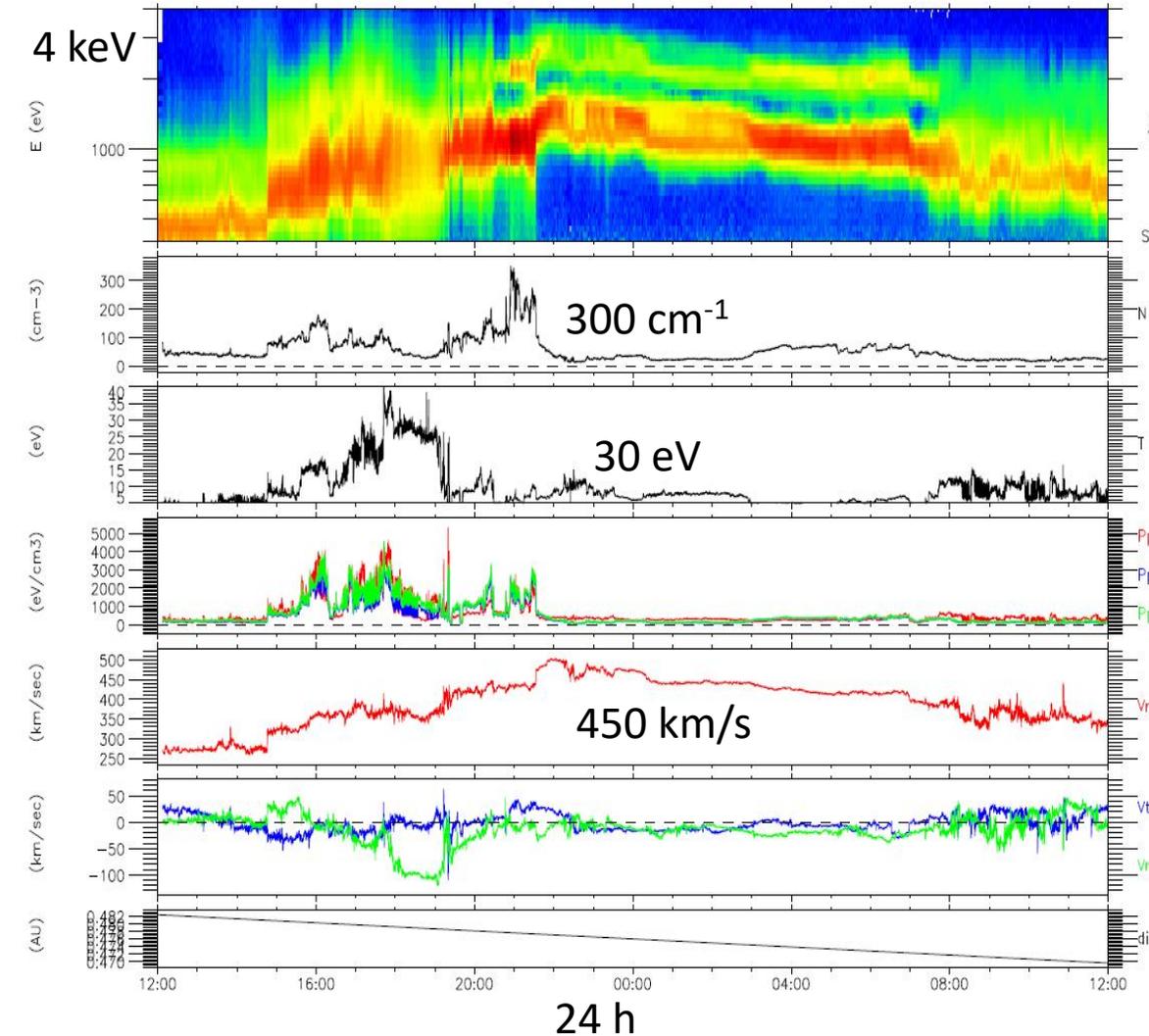


8 et 11 Mars, deux évènements majeurs (CME) (0.48 et 0.42 u.a)

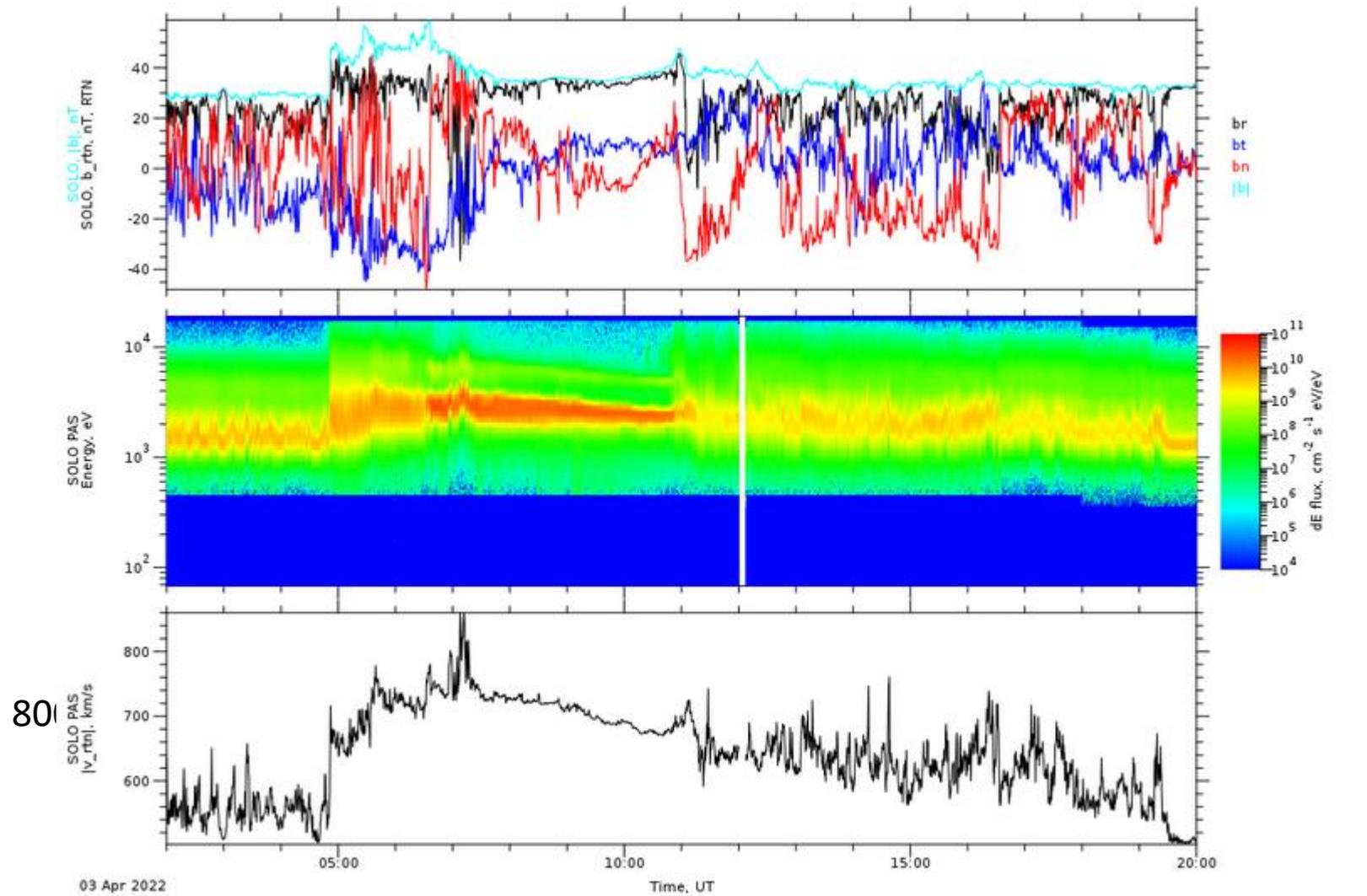
Des typologies de plasma similaires mais une organisation générale différente. Avec et sans chocs.

08/Mar/2022

11/Mar/2022



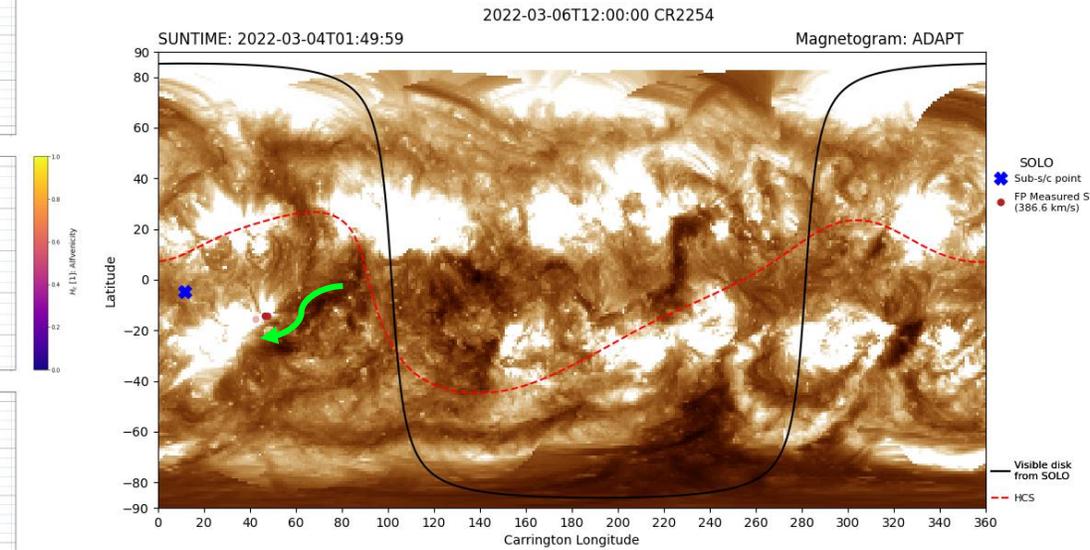
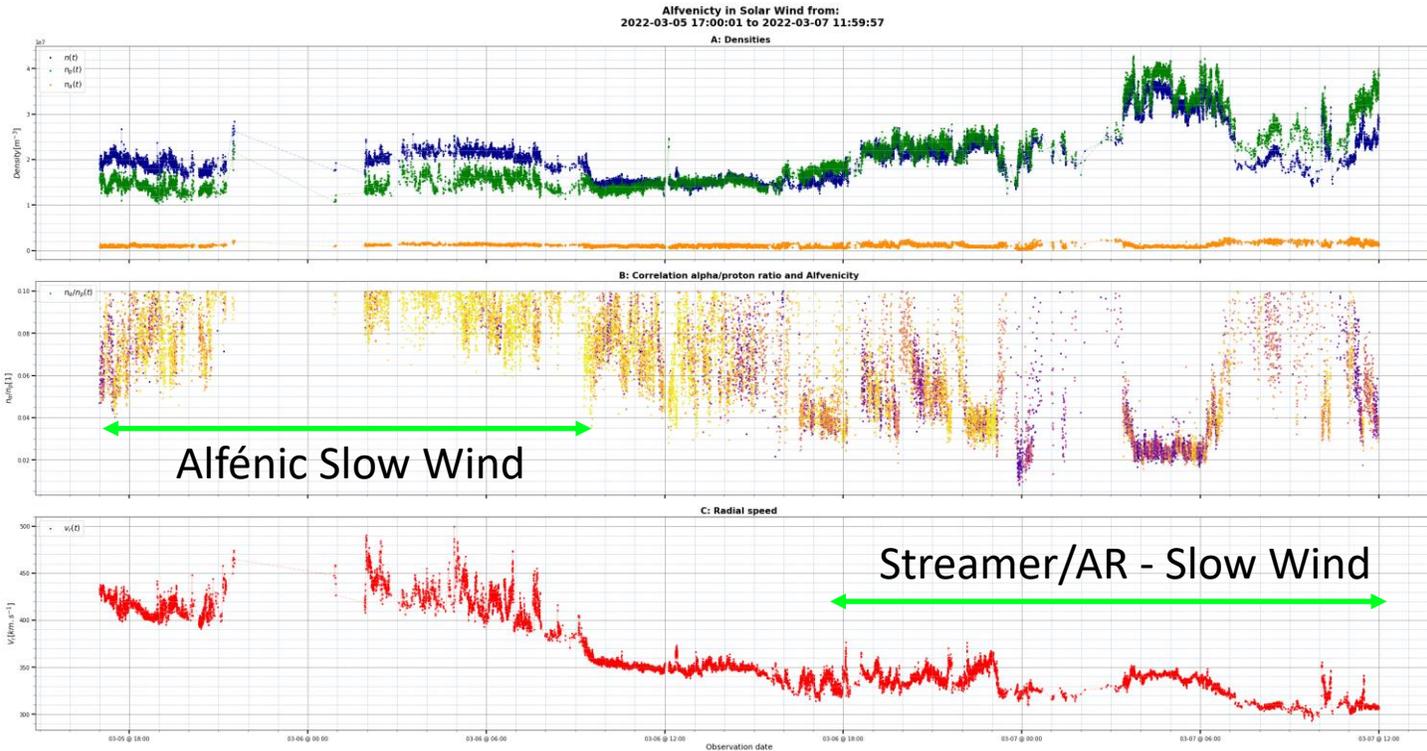
4 Avril, avec B



Science de la 'connexion'. Exemple d'analyse 'remonte/in-situ' (Rouillard et al)

Two states of the slow solar wind measured by Solar Orbiter PAS

Time interval : 1st remote-sensing window slow-wind connection campaign

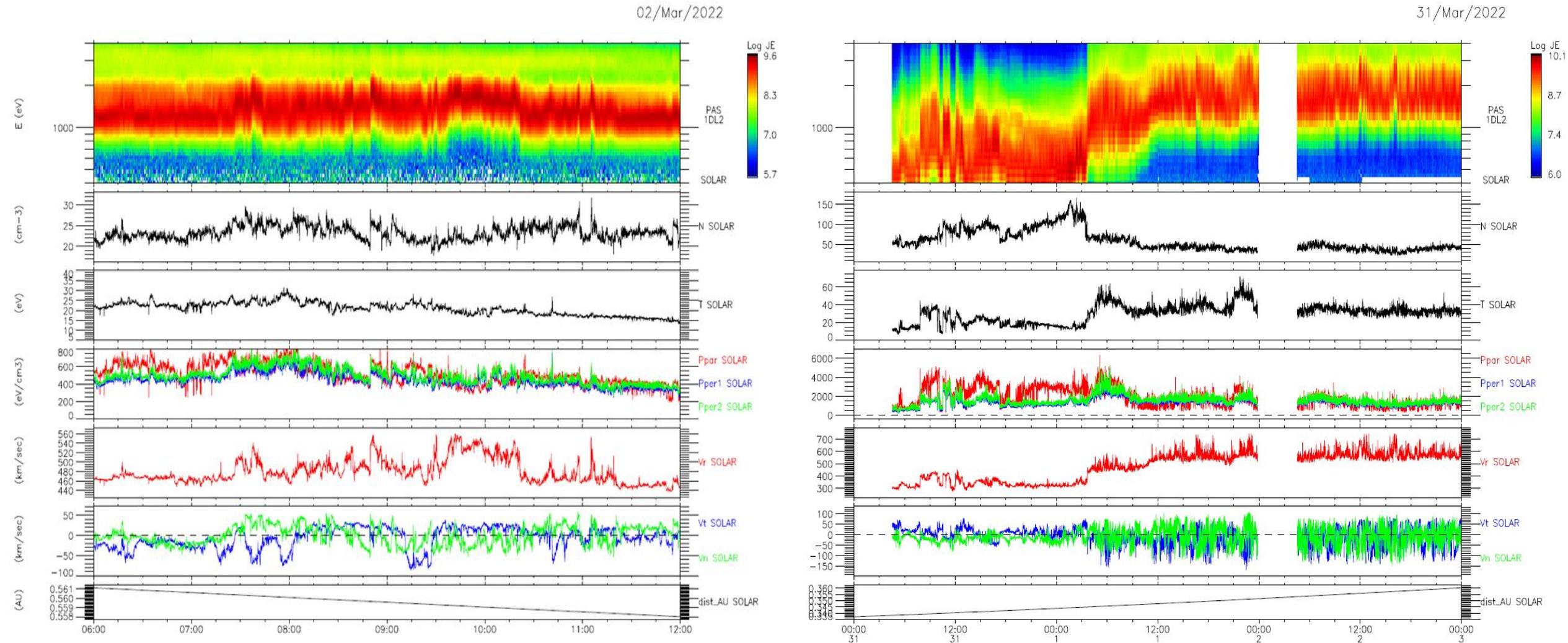


Internship: Valentin Badefort-Baril (supervisor A. Rouillard, V. Réville)

Des états de turbulence fortement variables.

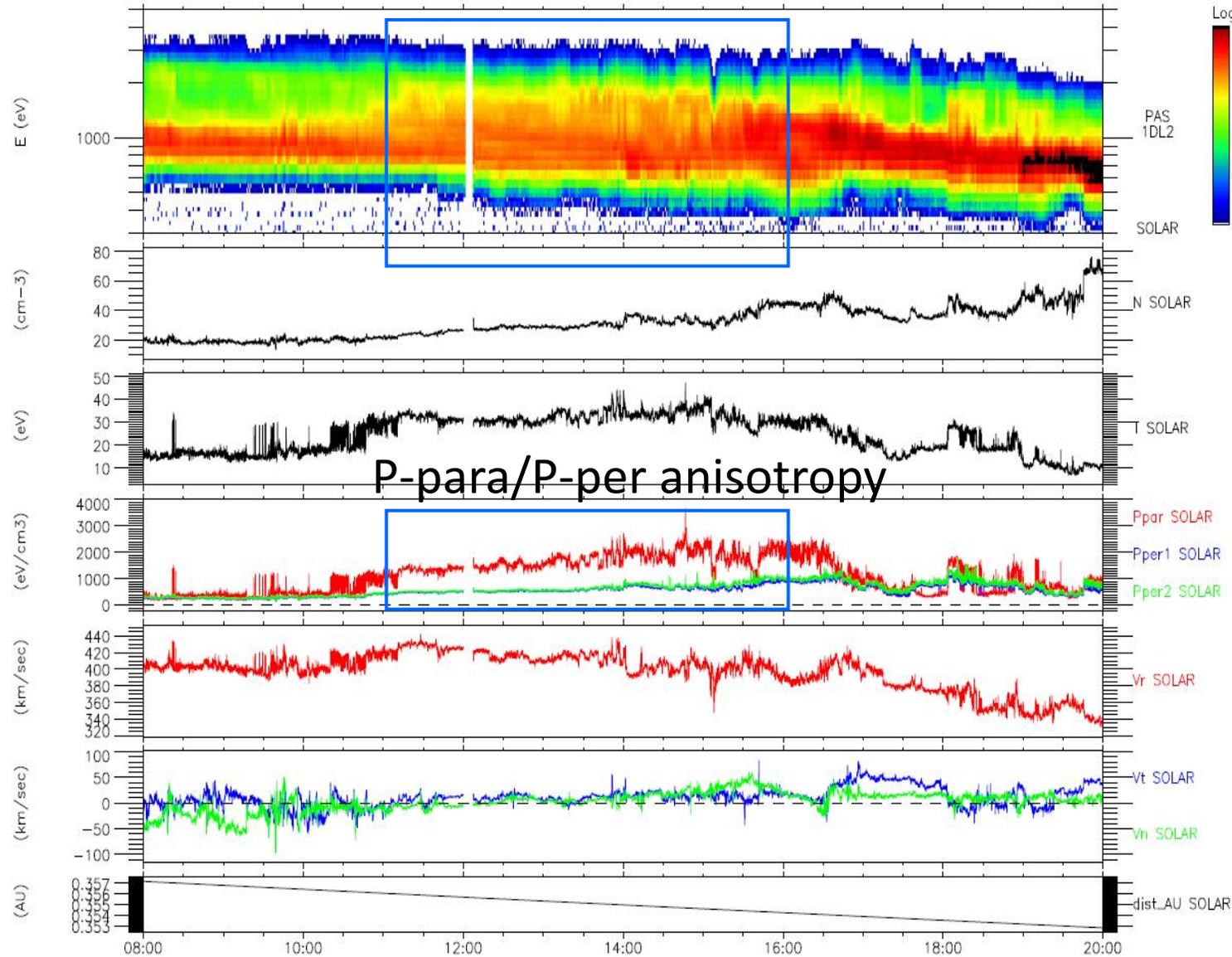
Vents plus ou moins alfvéniques. Accélérations aux échelles courtes (<1 min)

Visible à 1 a.u mais plus intense et mieux échantillonné à 0.5-0.3 a.u



Des états cinétiques 'extrêmes'.

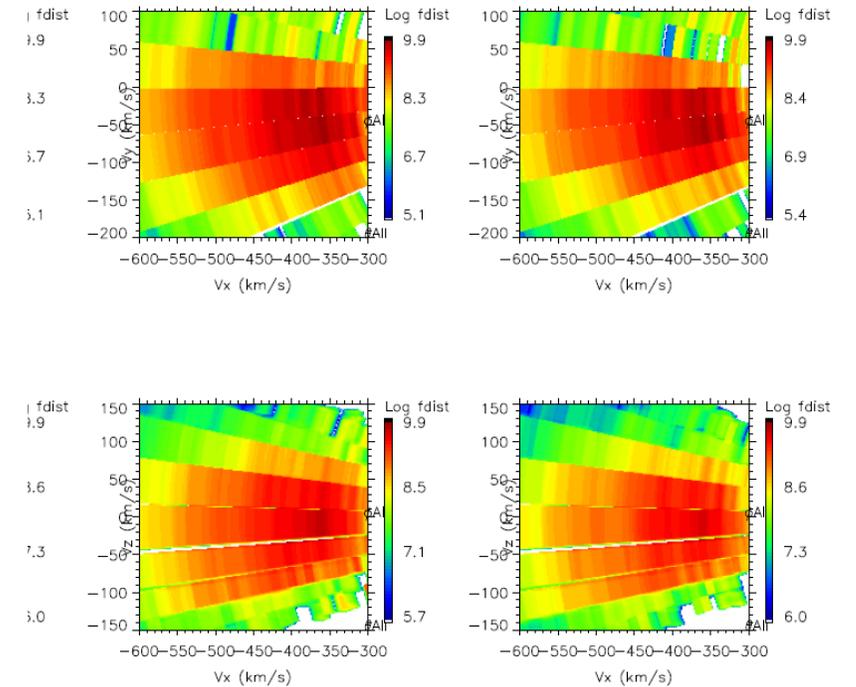
19/Mar/2022



Distributions à doubles faisceaux,
Anisotropie à des niveaux bien
supérieurs qu'observés à 1 a.u

19/Mar/2022 13:01:03.689

19/Mar/2022 13:01:07.689



Exemples de travaux 'PAS' et défis

- **Moments: N, V, T:** Incontournables pour le contexte (~5-6 art.) mais aussi pour des études globales. *Verscharen, 2021, Variations du flux de moment angulaire en fonction des différents vents.* **Importance de la mesure 'absolue'.**
- **Moments à 4 s de résolution:** Une relative haute résolution temporelle qui autorise l'étude 'fluide' de la plupart des processus 'énergétiques'. *Jets de reconnexion (Fargette, sub.) Instabilités macroscopiques, Kelvin-helmholtz (Kieokaew, 2021), Vents Alfvéniques (D'Amicis, 2021), Turbulence (Carbone, Peronne, 2021). Chocs (Plotnikov), CME etc... (Réville, Pinto, Rouillard)* **Continuité d'observations, de la période de rotation solaire aux échelles cinétiques, Fluctuations à mieux que le '%'**
- **Fonctions de distributions 'instantanées':** Acquisition des 'cœurs' en $\sim 0.1 - 0.2$ s, bien en dessous des échelles cinétiques. Gain de 50 en résolution temporelle par rapport à HELIOS. **Modes Burst, Atteindre 10 Hz de résolution.**

VDF comme 'traceurs' de processus plus grandes échelles

Reconnexion (Lavraud, 2021)

Switchback (Fedorov, 2021)

~20 articles 'PAS', A&A, 2021

Physique cinétique et turbulence.

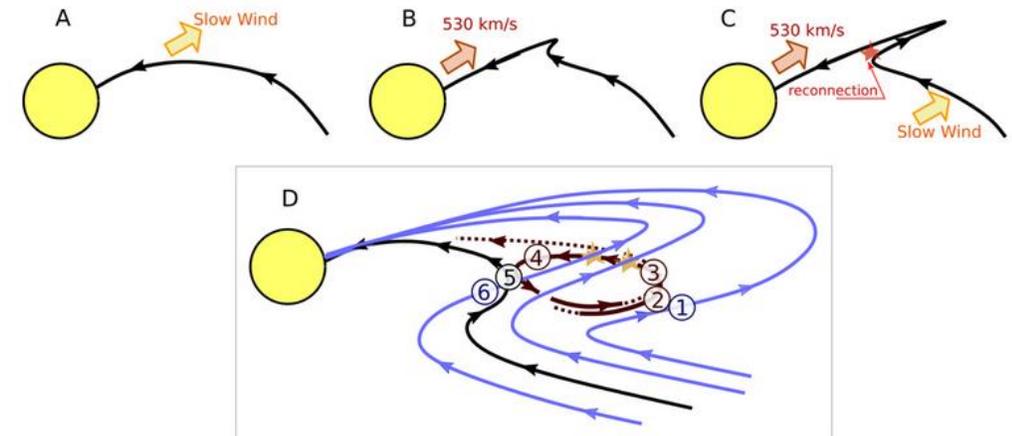
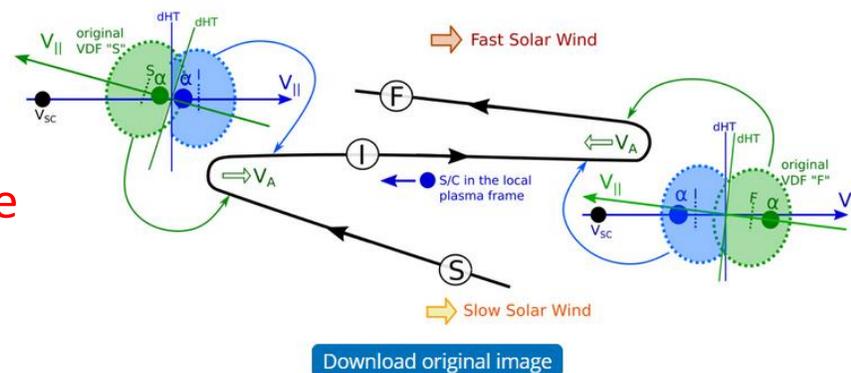
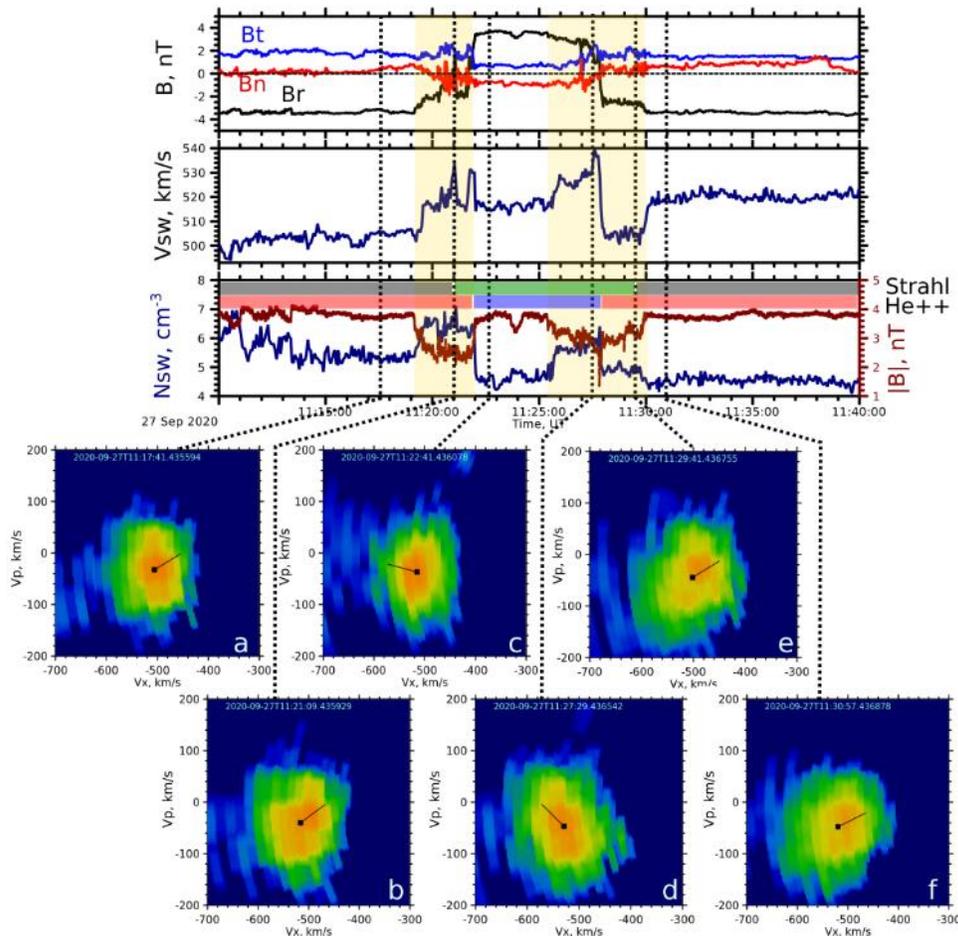
Spécificités des VDF (Louarn, 2021)

Instabilités, transport, relaxations, dissipations....

Exemple 1: Switchback-like structures observed by Solar Orbiter (Fedorov, 2021) Chef de projet 'PAS

Observations de 'retournements' de B à un interface vent lent/rapide. Analyse des VDF: elles montrent les déformations 'classiques' dues à des reconnexion (D-shape).

Idée d'une évolution continue de la topologie, passant du switchback 'classique' (vu par PSP) à une 'flux rope' (SolO), lors de la propagation et par effet du 'shear' de vitesse.



Utilisation des VDF pour comprendre la dynamique globale (voir aussi Lavaud, 2021)

[Download original image](#)

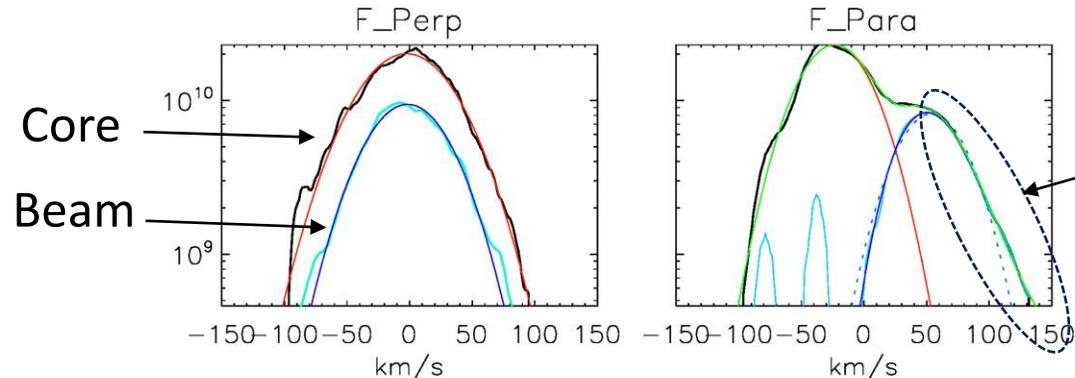
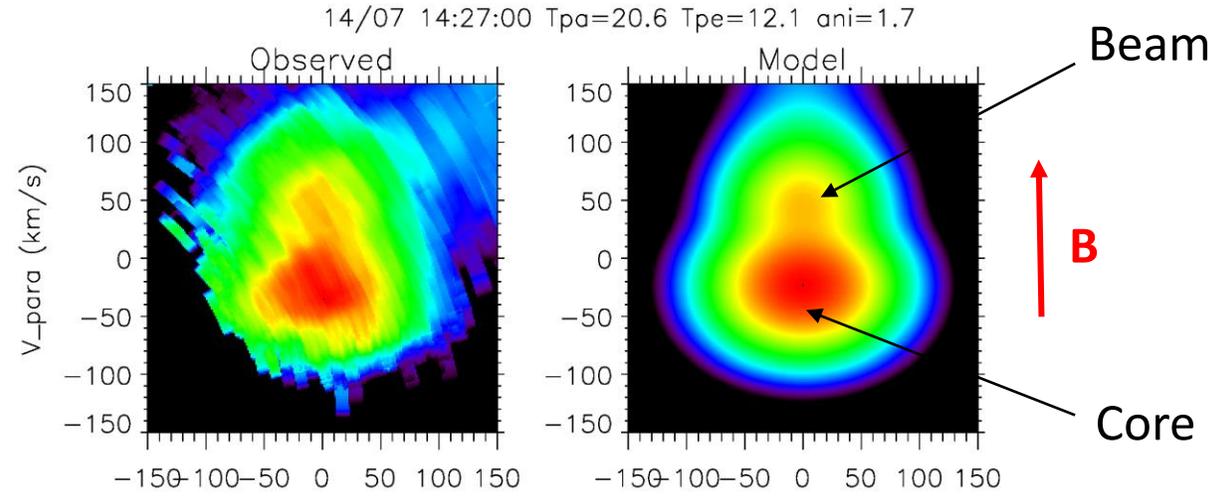
Example 2: Kinetic Structure of the proton VDF .
(Louarn et al, 2021)

In an Alfvénic wind.

VDF are most of the time a juxtaposition of a core and a beam populations. *Well known from Helios, Marsch et al, 1981.*

From fit with model, we get here:
 Core: $T_{//} \sim 5.9$, $T_{\perp} \sim 15.8$ eV
Anisotropic core with $T_{\perp} = 1.7 T_{//}$
 Beam: $T_{//b} \sim 13.7$, $T_{\perp b} \sim 10.2$ eV
Beam or elongated tail along B
 Beam/Core density: 0.32
Beam density is typically 1/3 of core
 Drift: 72 km/s (1.3 Va)
Relative drift slightly larger than Va

$V_{//}/V_{\perp}$ 2D slice: Measured and model distribution



In $V_{//}$, the best model of the beam is a kappa rather than a Maxwellian.

V_{\perp} profile
 Maxwellian model in red and blue

$V_{//}$ profile
 Light blue is Total-core. Model in green

How diverse could VDF be?

Recent development : Can we better model the beam ? (*Pierre Trottier, internship*)

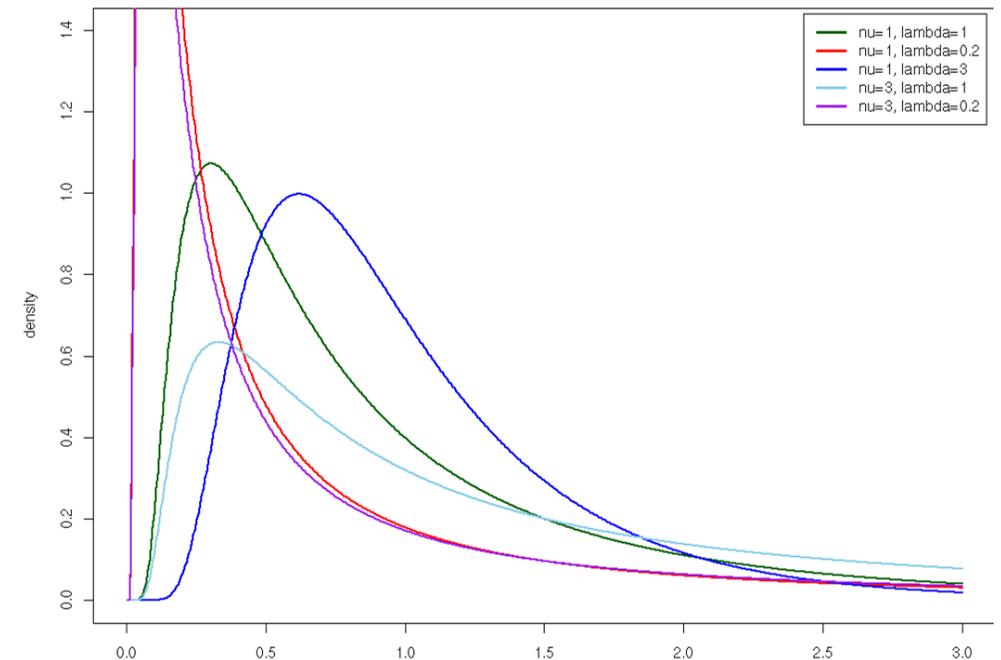
The beam is definitely not a maxwellian. It presents a strong positive skewness (heavy populated nergetic tail). Is there a more 'natural' model than a mixture of maxwellian (low energy side) and kappa distribution (high energy side) ?

We try the Inverse-Gaussian Distribution

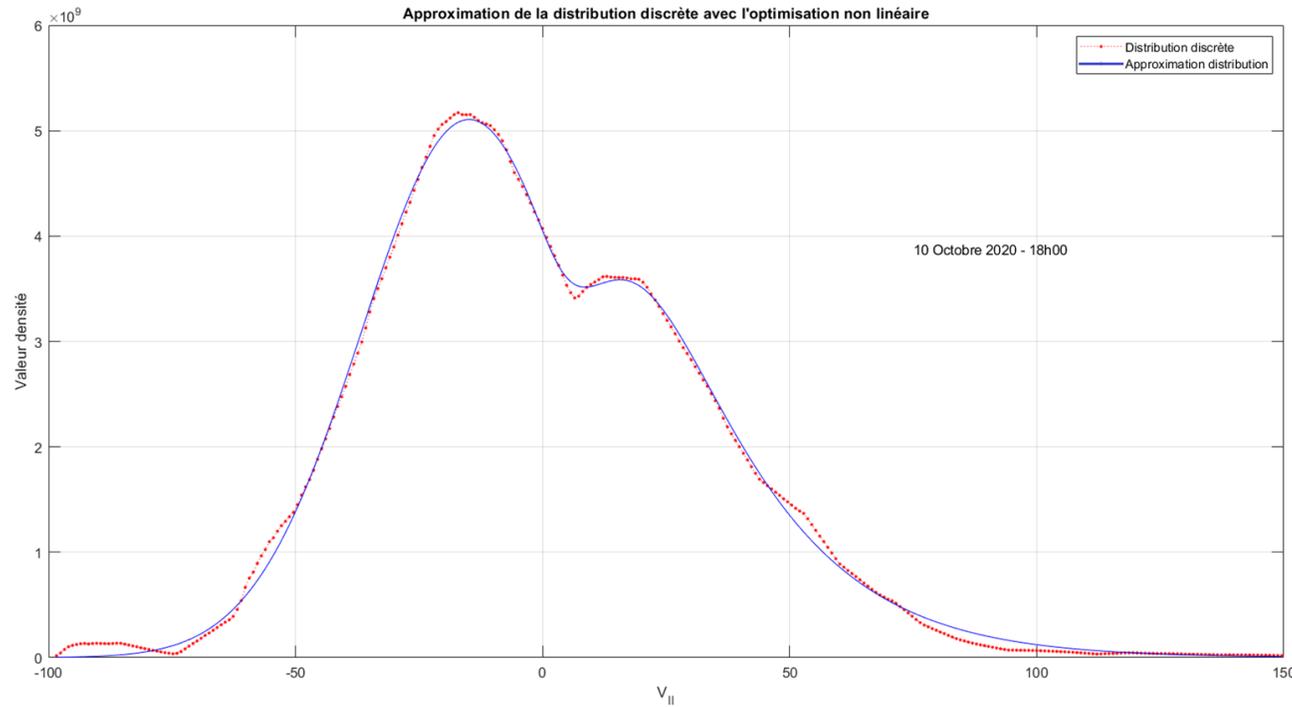
$$f(x; \mu, \lambda) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{2\pi x^3}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\lambda(x-\mu)^2}{2\mu^2 x}\right) & \text{if } x > 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

A classical statistical distribution that can model stochastic processes with higher probability of extreme events than the normal distribution.

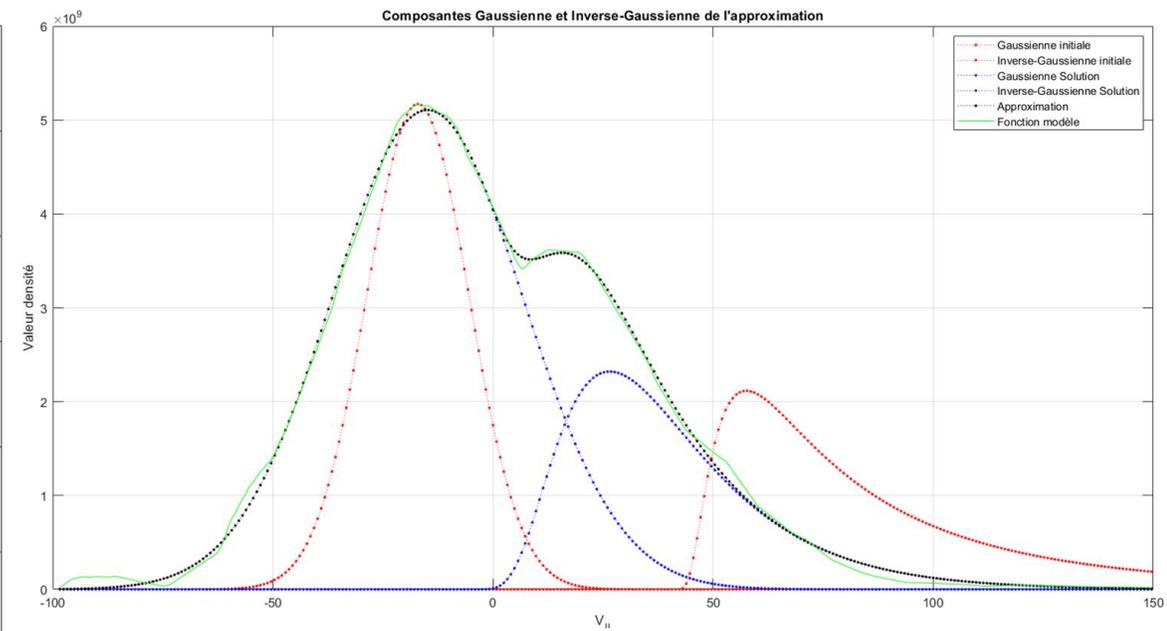
Use: Economy and market prices, Probability of failures in time, Aerosol dissimination ...



Amazingly adapted to fit core + beam distributions !



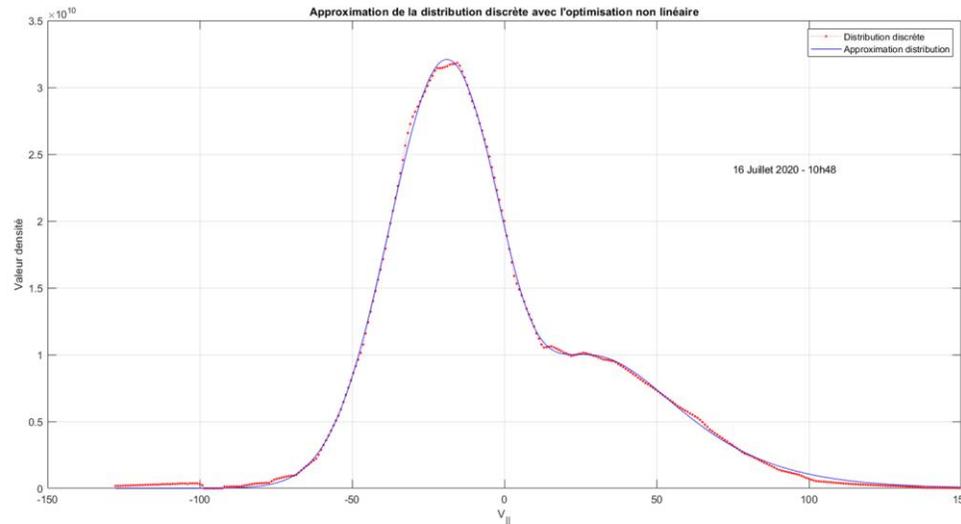
Approximation with Gaussian and Inverse-Gaussian distributions



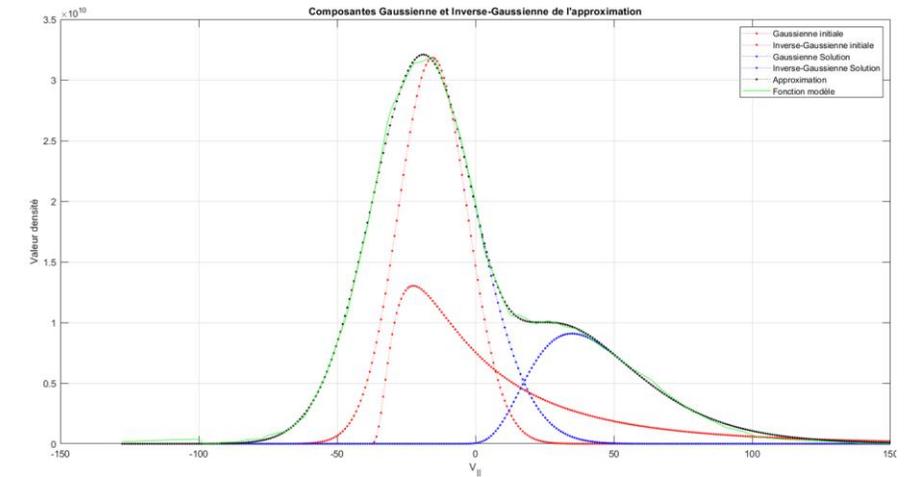
In red: the starting functions (gaussian for the core, inverse-gaussian for the beam). In blue: the resulting fit after optimization

Example 2

The fits are so good and 'easy' in a number of diverse situations that one may suspect a deep physical origin



Approximation with Gaussian and Inverse-Gaussian distributions

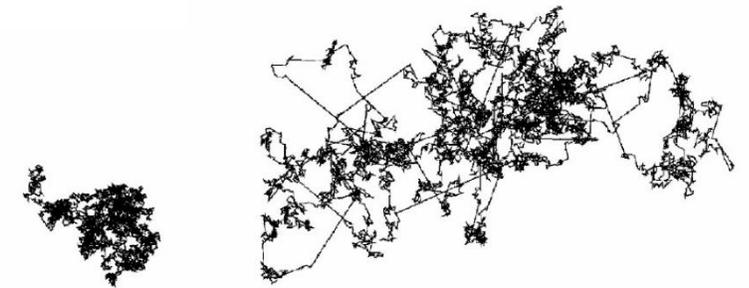


In red: the starting functions (gaussian for the core, inverse-gaussian for the beam). In blue: the resulting fit after optimization

Interpretation (à construire)

L'inverse-gaussienne caractérise une **augmentation de probabilité d'évènements 'extrêmes'** (par rapport à la loi normale) et peut être reliée au phénomène des '**vols de Levy**': Processus de 'marche au hasard' à probabilité de 'grands sauts' augmentée. Typiquement, probabilité d'incrément qui est une loi de puissance et décroît donc moins vite que l'exponentielle de la loi normale.

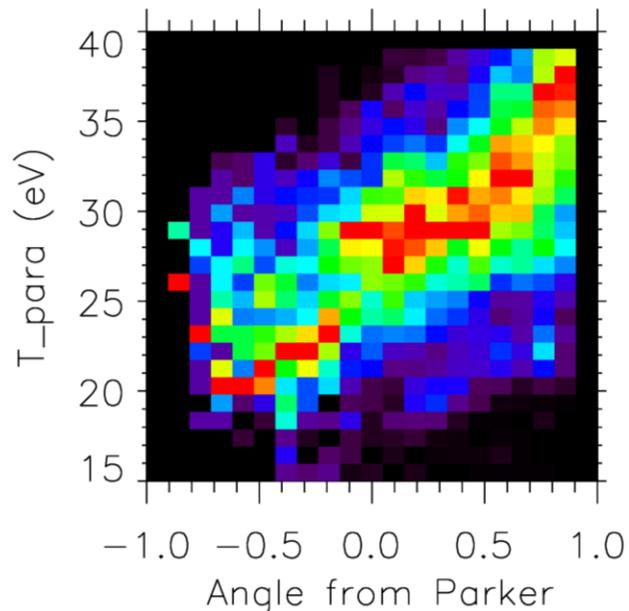
Voir Collier, GRL, 1993 pour les fonctions kappa



Marche au hasard 'classique' et avec 'vols de Levy'

CONCLUSION

- 1) Instrument conforme à nos vœux. Précision, Capacité à observer les phénomènes cinétiques, Mode bursts (4 Hz) franchement innovants.
- 2) Souci du fonctionnement du DPU. Loin d'être serein...
- 3) Déjà 18 mois de mesures qui ne demandent qu'à être pleinement exploitées. Il y a des pépites dans ces données, surtout si on les mets dans un contexte 'multi-instrument'.



Scatter plot. T_{para} /angle from radial direction

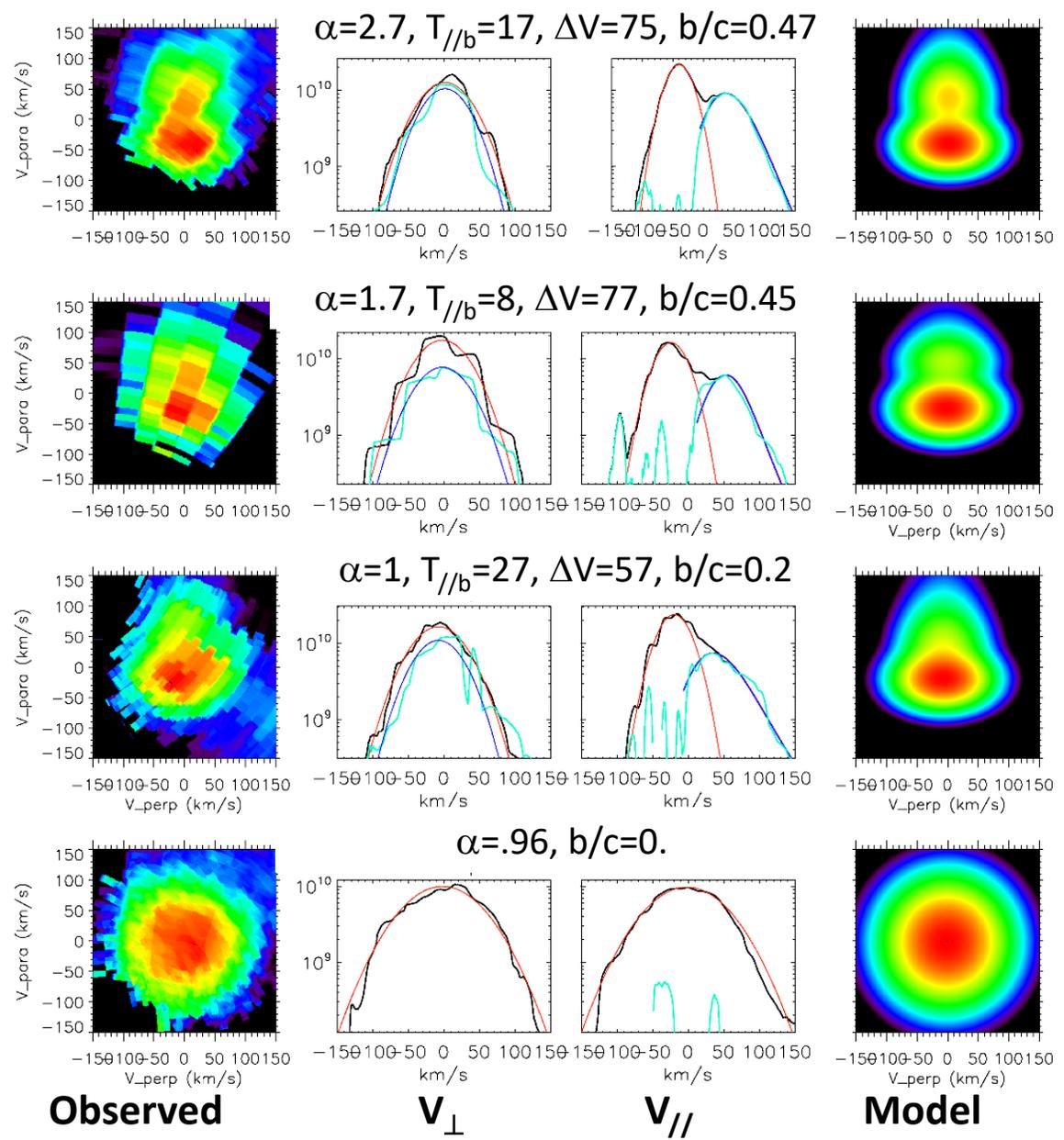
Exemple: comment la géométrie agit sur les propriétés cinétiques du vent solaire
Ici, dans un vent Alfvénique, comment T_{para} augmente lorsque est quasi-radial direction -> lié à la formation d'un faisceau secondaire d'autant plus fort que B est radial.

Un cas 'fou' lors d'une rotation subtile de B

**Quand le faisceau 'mange' le cœur de la
distribution !**

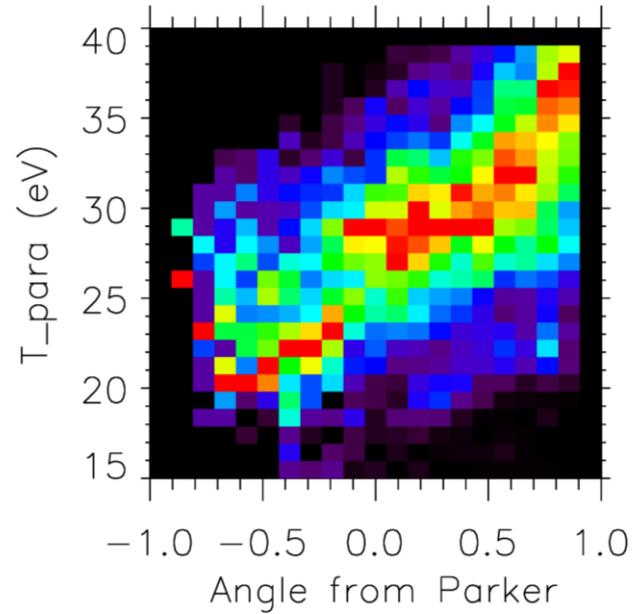
Diversity of proton VDF – Examples seen on 14/07

Increasing importance of the beam.
Total anisotropy $\alpha = T_{//} / T_{\perp} \sim 1$ to 3

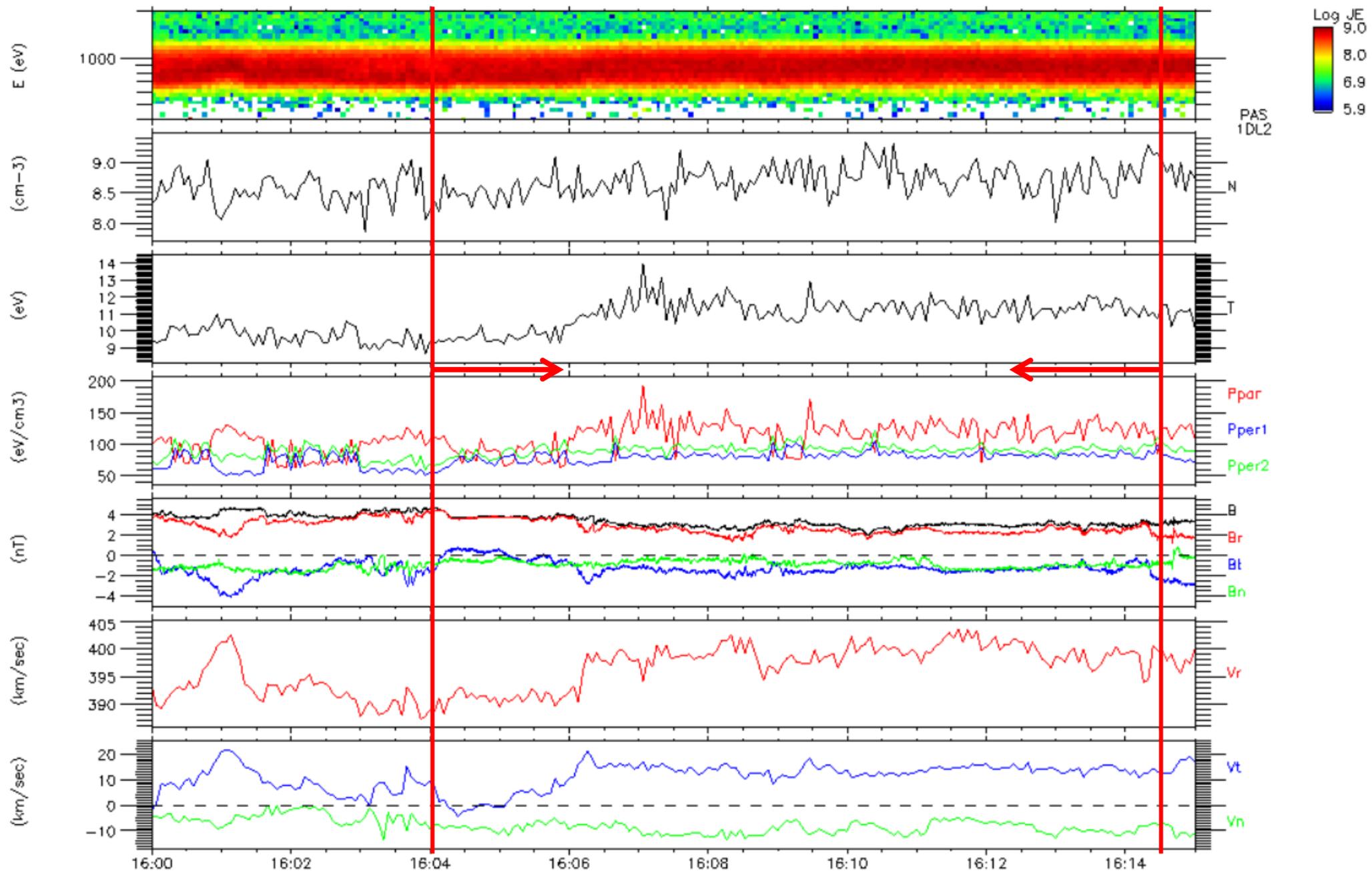


Core is relatively constant but the beam may significantly vary on short time scales (seen at 4 s resolution). This mostly concern density and $T_{//}$.

Interesting observation: T_{para} is much larger when B is close to the radial direction -> situations of 'stronger' beam



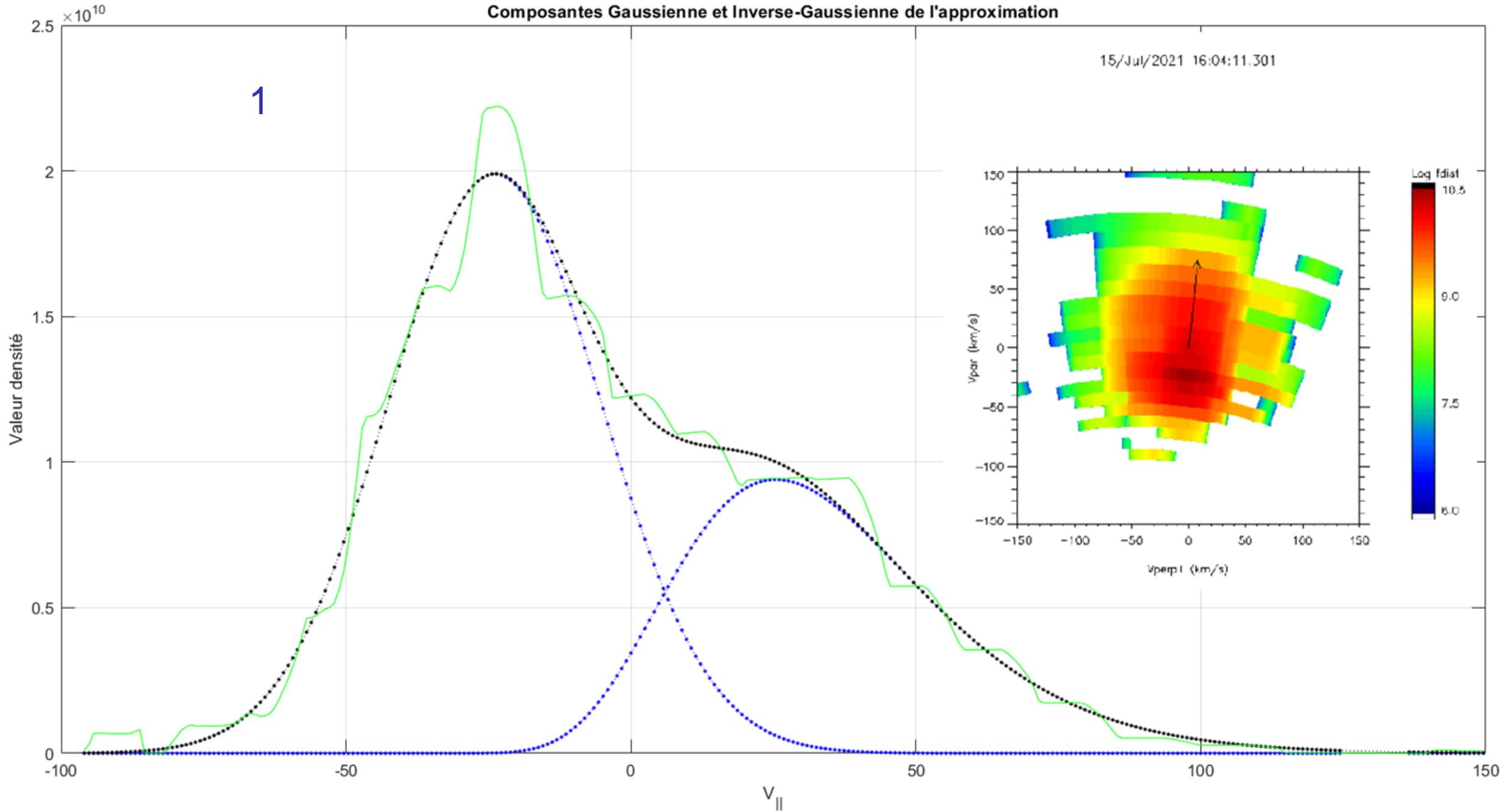
Scatter plot. T_{para} /angle from radial direction



Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

15/Jul/2021 16:04:11.301

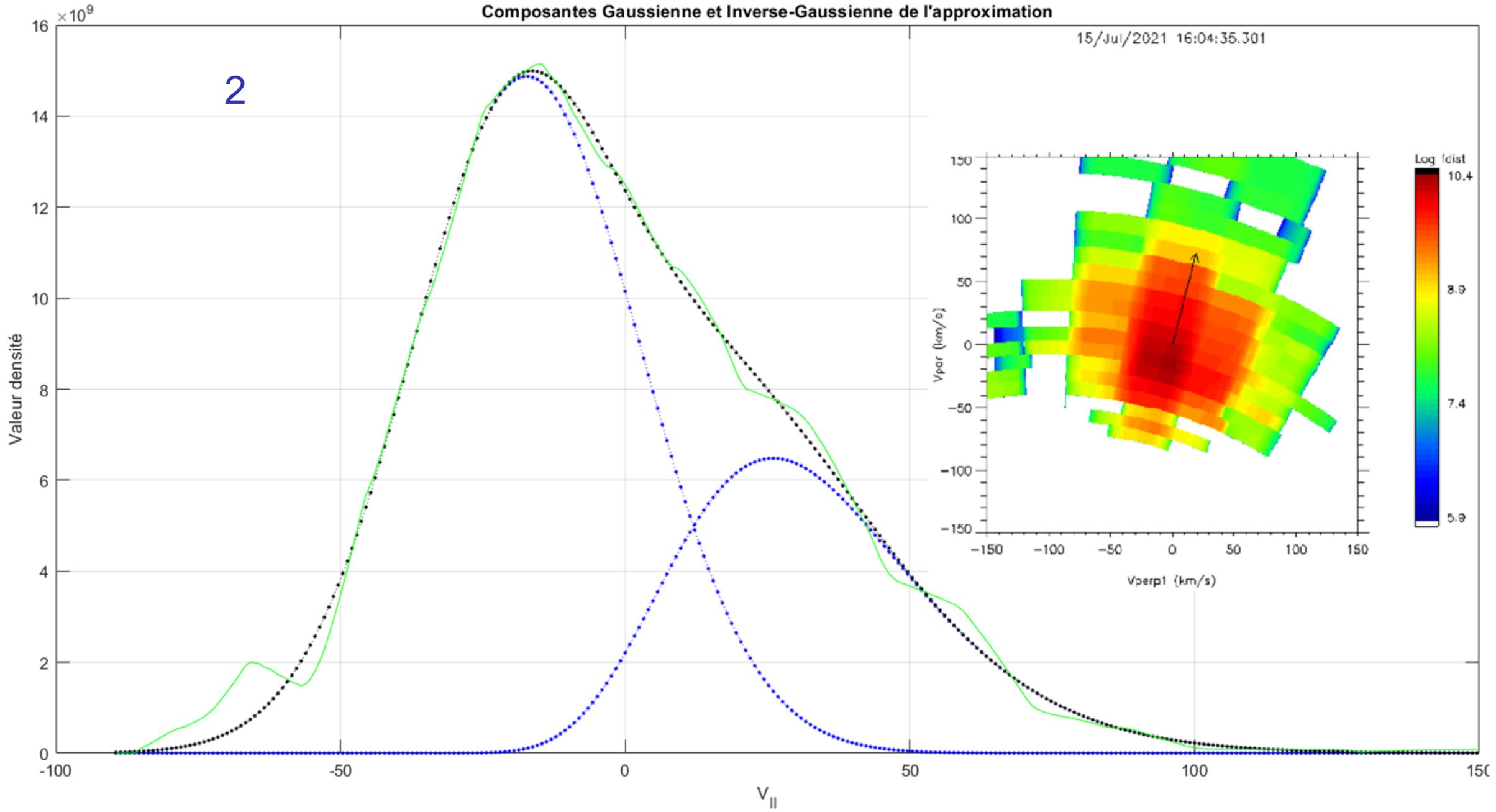
1



Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

15/Jul/2021 16:04:35.301

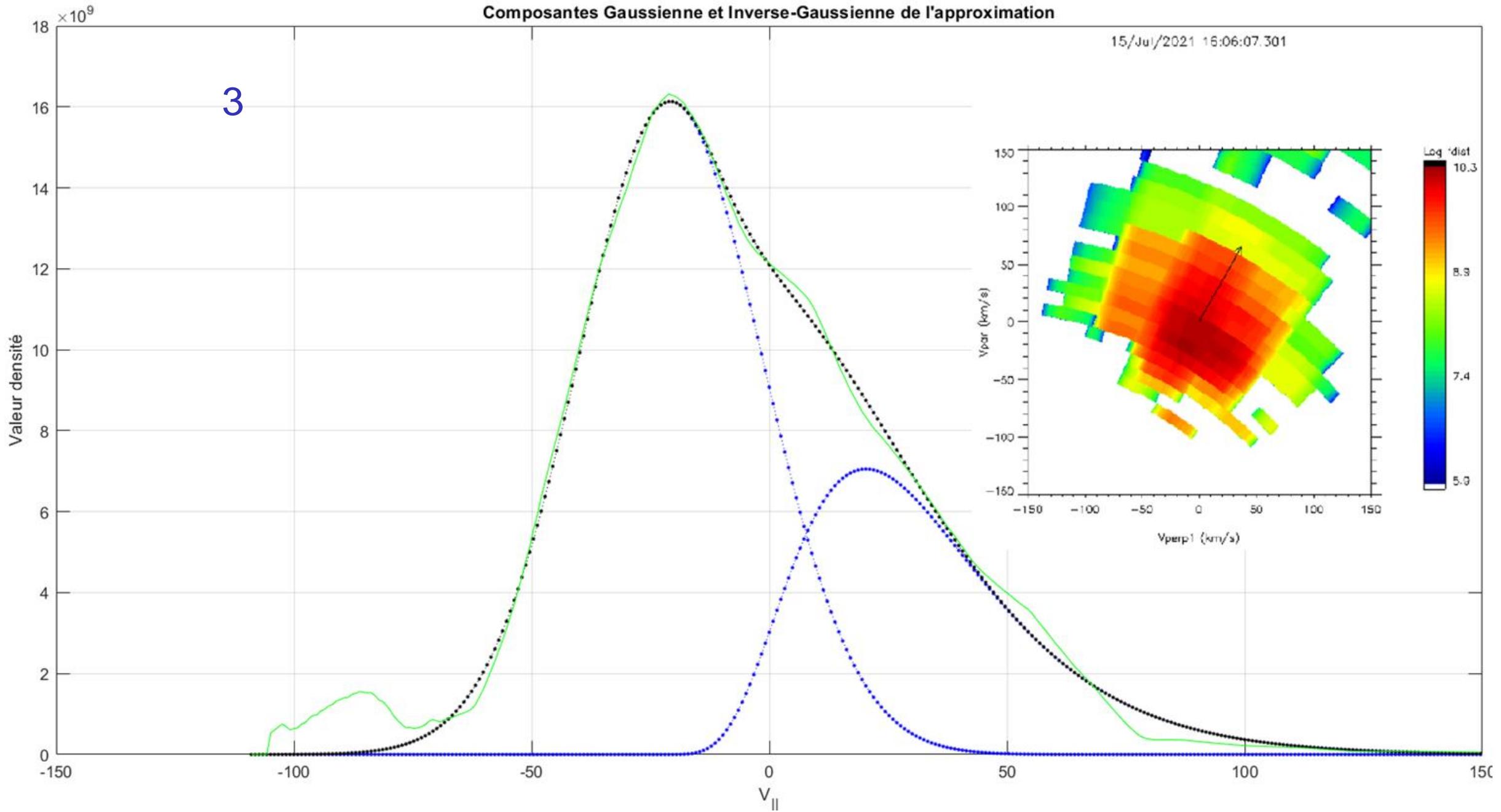
2



Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

15/Jul/2021 16:06:07.301

3

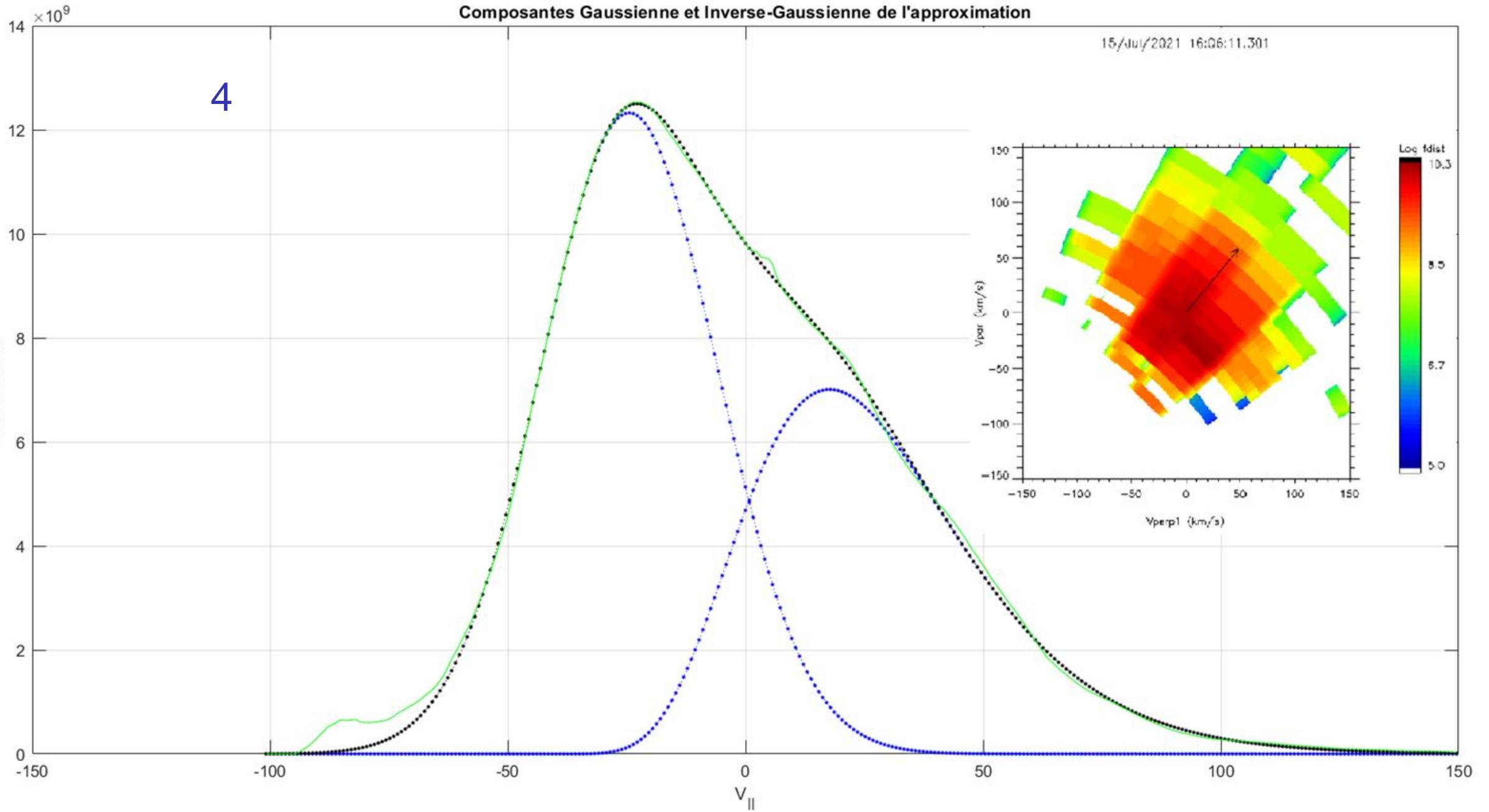


Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

15/Jul/2021 16:06:11.301

4

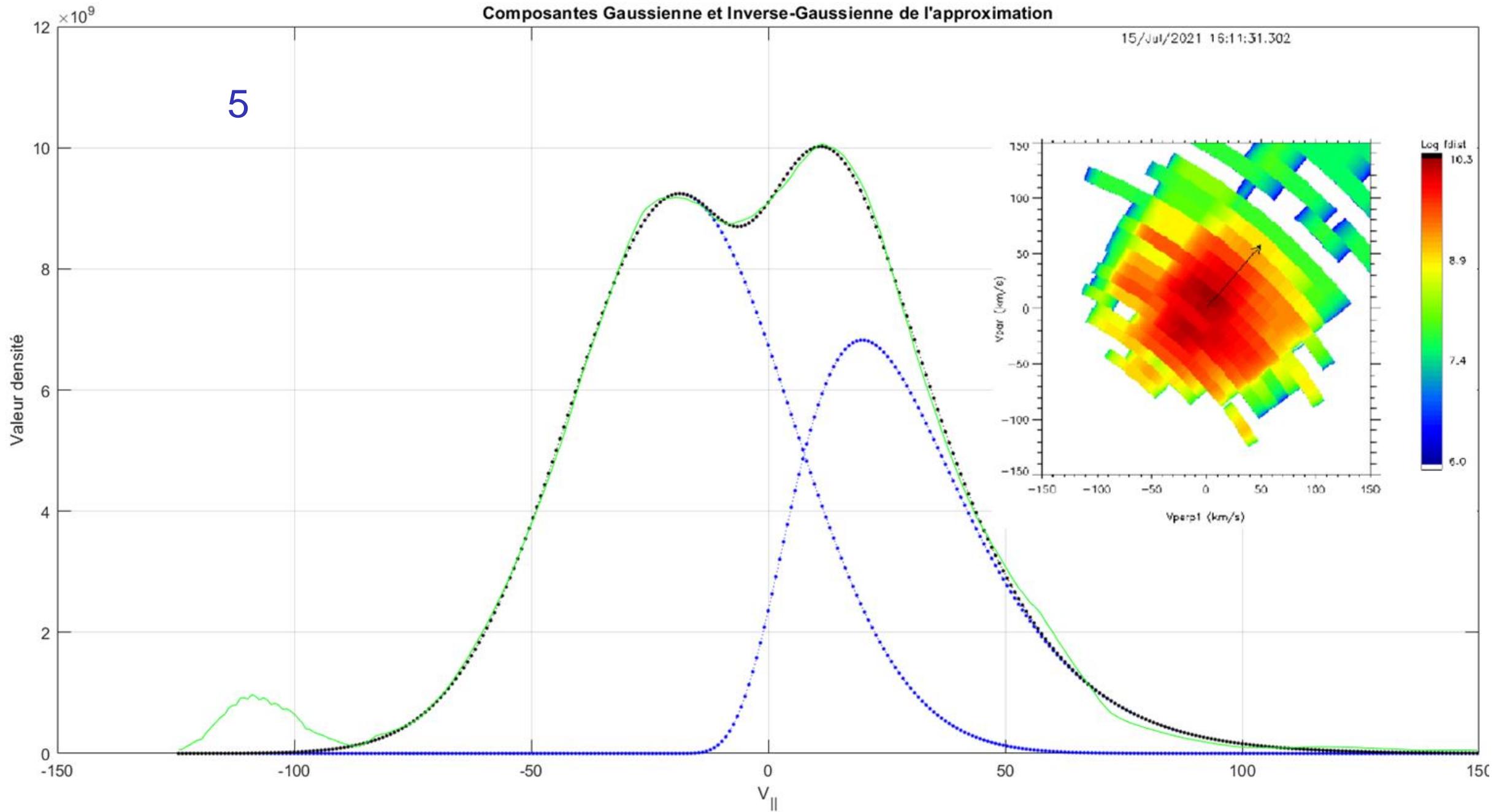
Valeur densité



Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

15/Jul/2021 16:11:31.302

5

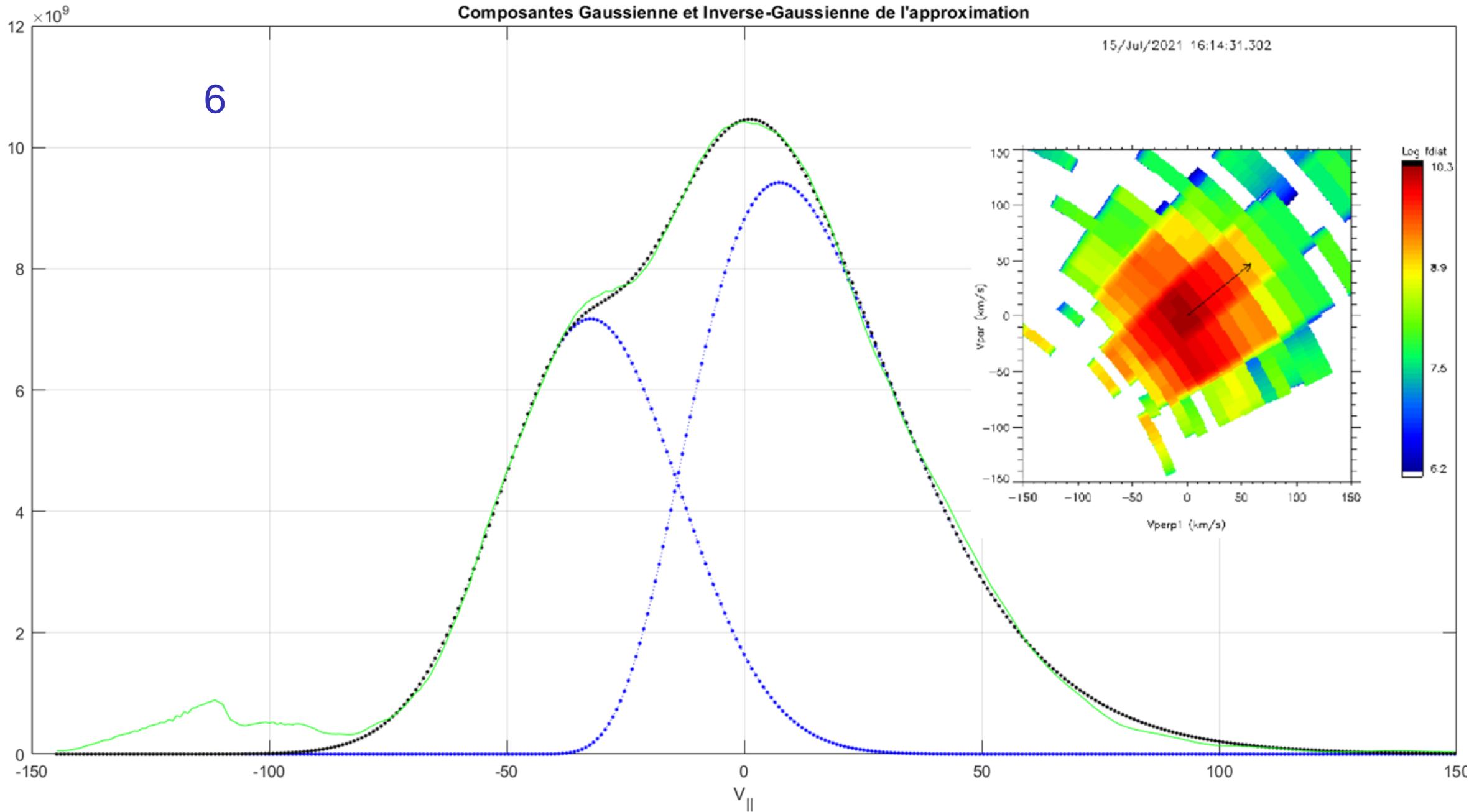


Composantes Gaussienne et Inverse-Gaussienne de l'approximation

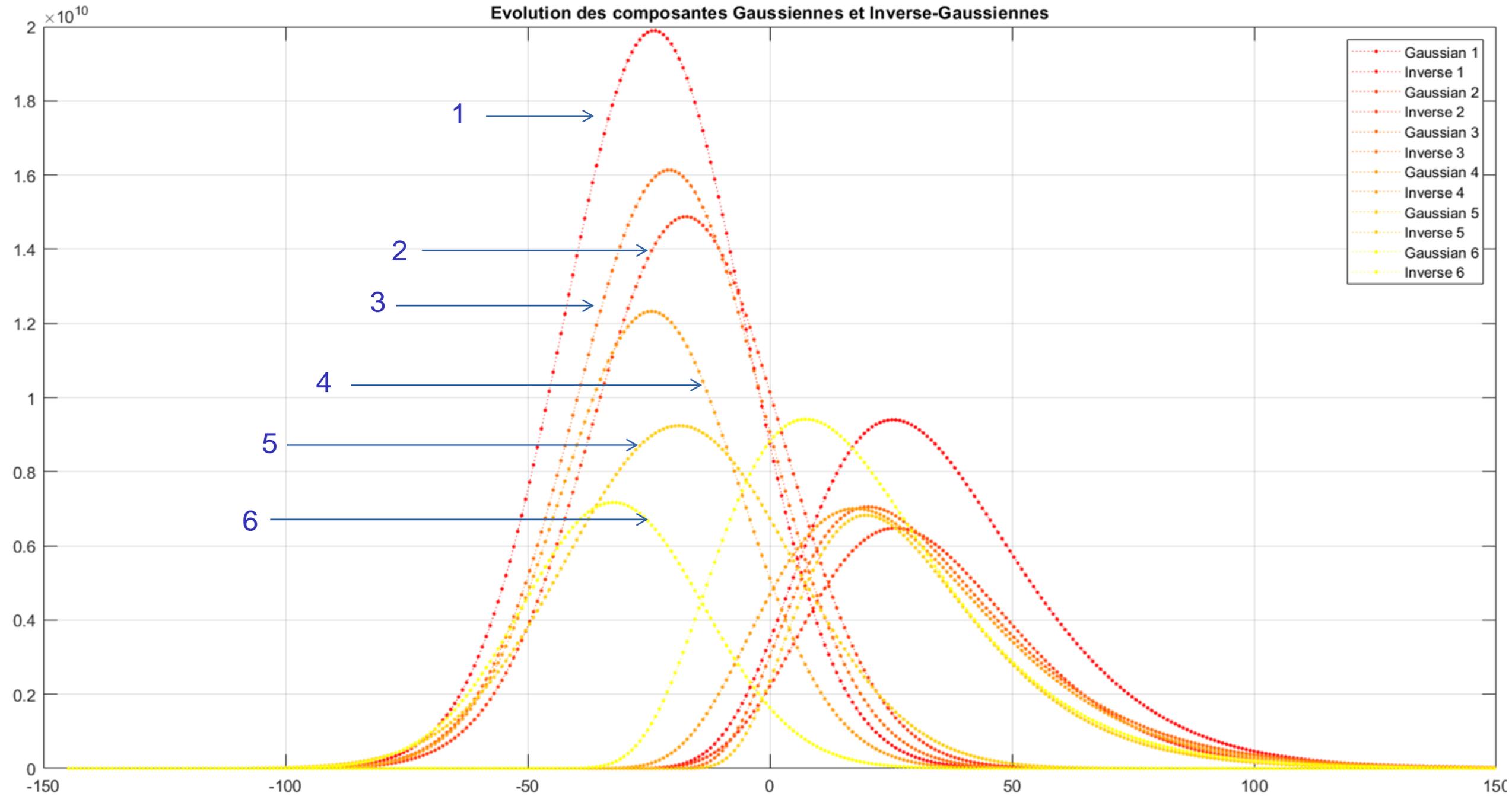
15/Jul/2021 16:14:31.302

6

Valeur densité



Evolution des composantes Gaussiennes et Inverse-Gaussiennes



4 et 8 Avril, autres exemples de fortes perturbations (0.36 et 0.42 u.a)

Quelle connexion aux structures solaires ?

Variabilité de l'état turbulent

03/Apr/2022

08/Apr/2022

