



Contrat CEA/EURATOM
Rapport final, 2^{ème} année, 2002

**Extraction des événements cohérents
et estimation des flux de particules
dans les signaux de plasma de bord**

Marie Farge¹, Kai Schneider²,
Michele Caldro³,
& Pascal Devynck⁴

¹Directeur de Recherche, LMD-CNRS, Ecole Normale Supérieure, Paris, France

²Professeur, CMI, Université de Provence, Marseille, France

³Stagiaire de 3^{ème} année ENSTA,

⁴Chercheur, CEA, Cadarache

1. Méthode d'analyse

11. Mesures

Nous analysons une série de $X=15$ signaux de $N=2048$ instants chacun, mesurés à partir de 32 sondes placées sur le bord d'une section poloïdale de la machine Mirabelle à Nancy. Ces mesures correspondent à un segment de 90° , soit une mesure tous les 6° d'angle.

Chaque signal se compose de deux mesures :

- la différence de potentiel $\delta V = V_n - V_{n-1}$ entre deux sondes séparées de la distance d , qui nous permet d'évaluer la vitesse radiale v des particules

$$\delta V = \frac{\delta E_\theta \times B}{B^2} \quad \text{avec} \quad \delta E_\theta = \frac{\delta V}{d}$$

E_θ étant le champ électrique dans une section poloïdale,
 B étant le champ magnétique,

- le courant de saturation δj , qui donne la densité de particules $n = \delta j / (Te)^{1/2}$ avec Te la température électronique.

12. Extraction

Pour chaque position x de la sonde et à chaque instant t , on sépare v et n en contributions cohérentes et incohérentes :

$$\begin{aligned} v_i(x,t) &= v_c(x,t) + v_i(x,t) \\ n_i(x,t) &= n_c(x,t) + n_i(x,t) \end{aligned}$$

Les événements cohérents correspondent à la vitesse cohérente $v_c(x,t)$ et la densité cohérente $n_c(x,t)$.

13. Flux instantanés de particules $\Gamma(x,t)$

On calcule le flux instantané total :

$$\Gamma_t(\mathbf{x},t) = \mathbf{v}_t(\mathbf{x},t) \cdot \mathbf{n}_t(\mathbf{x},t)$$

Il se décompose en :

$$\Gamma_t(\mathbf{x},t) = \Gamma_{cc}(\mathbf{x},t) + \Gamma_{ci}(\mathbf{x},t) + \Gamma_{ic}(\mathbf{x},t) + \Gamma_{ii}(\mathbf{x},t)$$

avec :

$$\text{flux total } \Gamma_t = \mathbf{v}_t \cdot \mathbf{n}_t$$

$$\text{flux cohérent-cohérent} \quad \Gamma_{cc} = \mathbf{v}_c \cdot \mathbf{n}_c$$

$$\text{flux cohérent-incohérent} \quad \Gamma_{ci} = \mathbf{v}_c \cdot \mathbf{n}_i$$

$$\text{flux incohérent-cohérent} \quad \Gamma_{ic} = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_c$$

$$\text{flux incohérent-incohérent} \quad \Gamma_{ii} = \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_i$$

14. Flux intégré en temps $\bar{\Gamma}(\mathbf{x})$

Le flux intégré en temps est :

$$\bar{\Gamma}(\mathbf{x}) = \int \Gamma(\mathbf{x}, t) \cdot dt \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_i$$

Il se décompose en :

$$\bar{\Gamma}_t = \bar{\Gamma}_{cc} + \bar{\Gamma}_{ci} + \bar{\Gamma}_{ic} + \bar{\Gamma}_{ii}$$

15. Flux intégré en temps et en espace $\langle \bar{\Gamma} \rangle$

Le flux intégré en temps et en espace est :

$$\langle \bar{\Gamma} \rangle \cong \frac{1}{15} \sum_{x=1}^{15} \bar{\Gamma}_x$$

2. Extraction des événements cohérents pour la sonde x=3

21. Séparation de $\mathbf{v}_t(3,t)$

Seuil : 0.16

Nombre d'itérations : 9

Nombre de coefficients de la partie cohérente : 121

Nombre de coefficients de la partie incohérente : 1927

Taux de compression : 5.9 % N

Variance du total : $6.8 \cdot 10^{-3}$

Variance de la partie cohérente : $5.2 \cdot 10^{-3}$

Variance de la partie incohérente : $1.6 \cdot 10^{-3}$

Taux de compression de la variance : 76 %

22. Séparation de $n_t(3,t)$

Seuil : 0.87

Nombre d'itérations : 13

Nombre de coefficients de la partie cohérente : 170

Nombre de coefficients de la partie incohérente : 1878

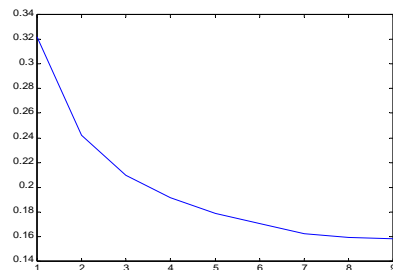
Taux de compression : 8.3 % N

Variance du total : 0.33

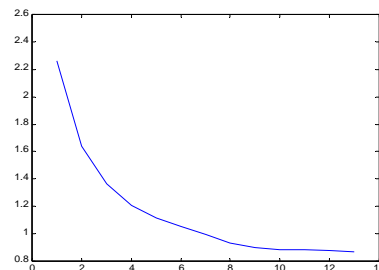
Variance de la partie cohérente : 0.28

Variance de la partie incohérente : 0.05

Taux de compression de la variance : 85.3 %

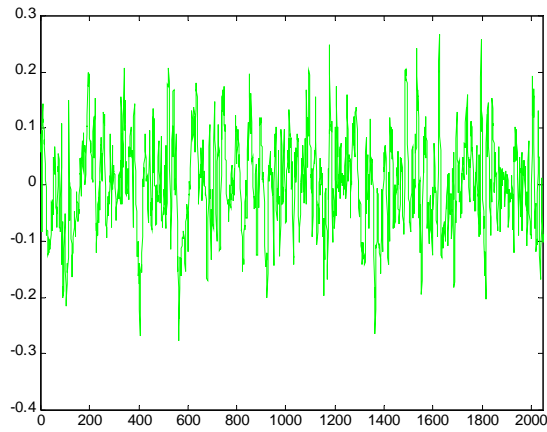


Convergence pour v

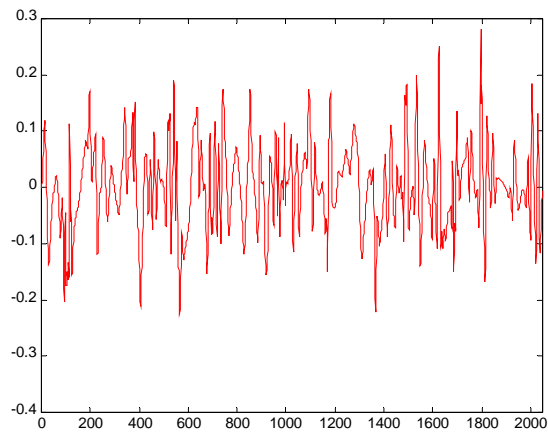


Convergence pour n

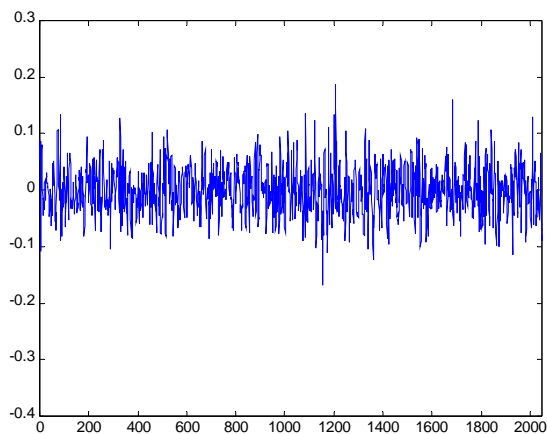
Abcisse : nombre d'itérations
Ordonnée : valeur du seuil



vitesse totale $v_t(3,t)$

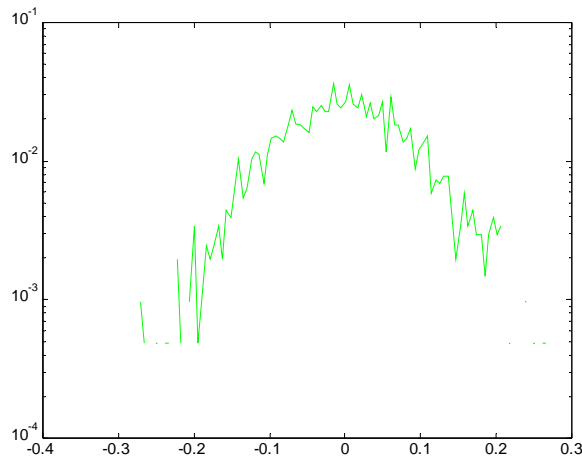


Vitesse cohérente $v_c(3,t)$

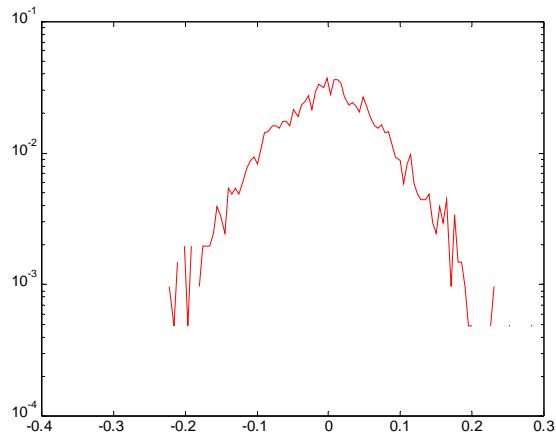


Vitesse incohérente $v_i(3,t)$

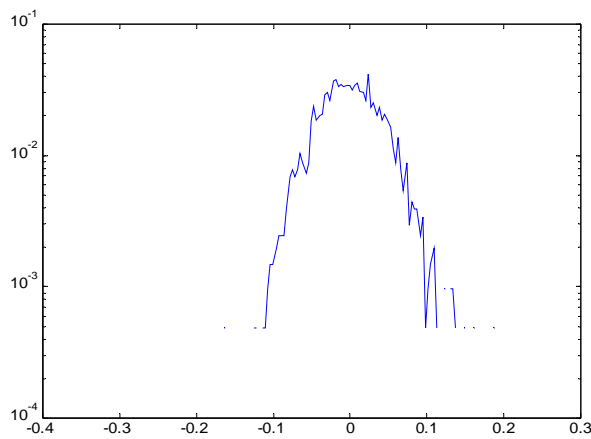
Abcisse : instant t
Ordonnée : valeur du champ v



PDF totale $p[v_t(3,t)]$



PDF cohérente $p[v_c(3,t)]$

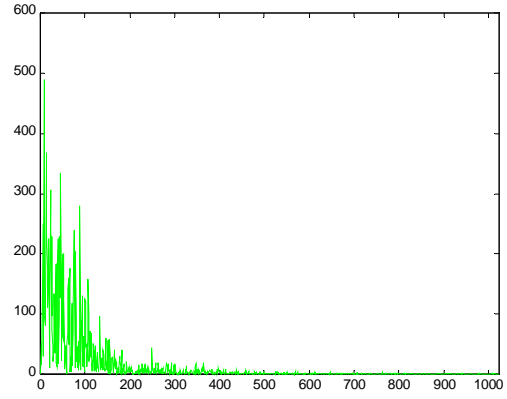
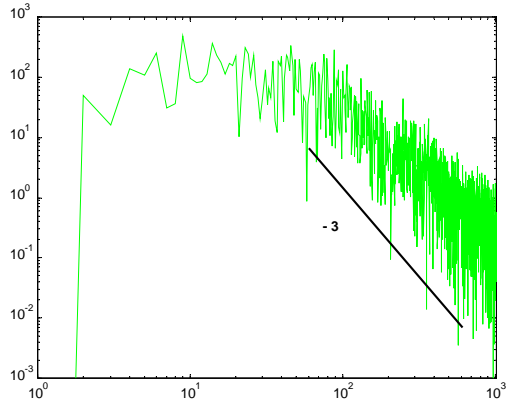


PDF incohérente $p[v_i(3,t)]$

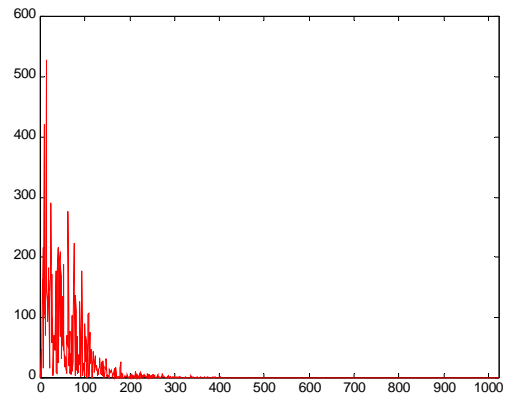
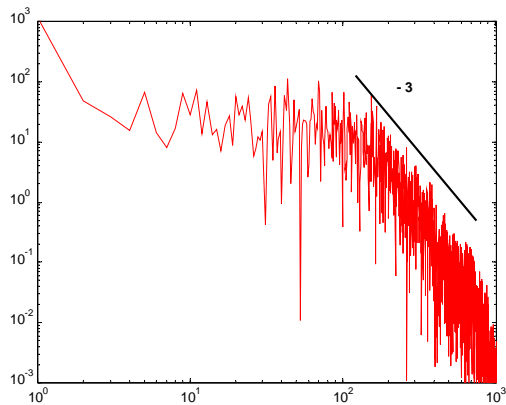
*Abcisse : valeur du champ v
Ordonnée : log de la probabilité p*

échelle log-log

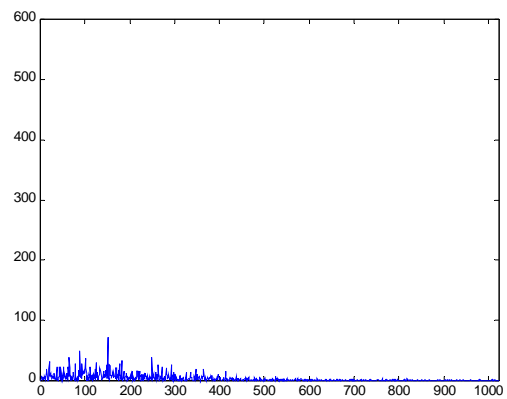
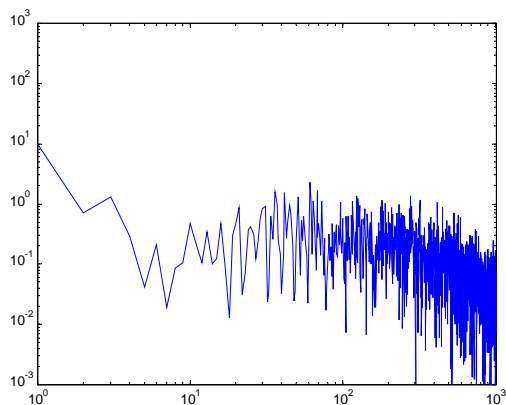
échelle lin-lin



Spectre total $\hat{v}_t^2(3,k)$

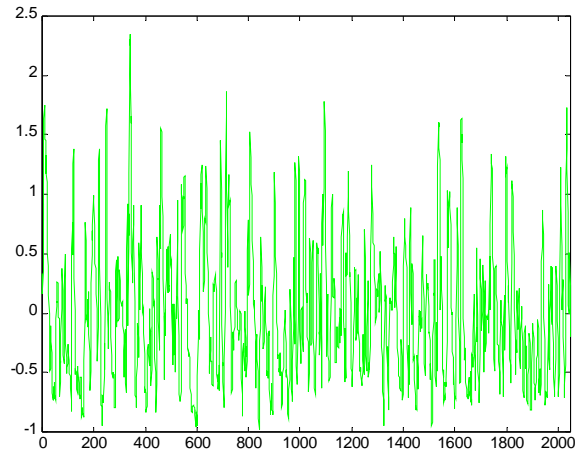


Spectre cohérent $\hat{v}_c^2(3,k)$

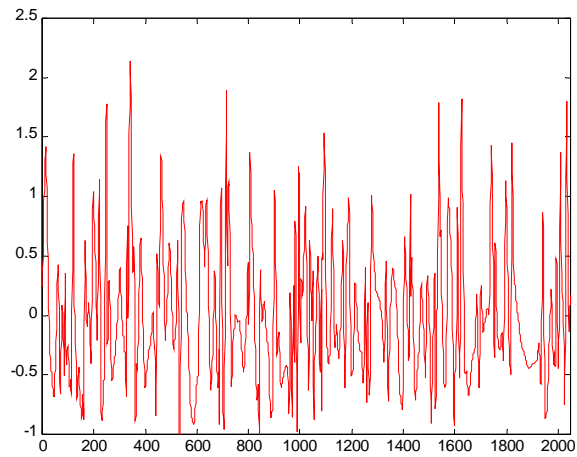


Spectre incohérent $\hat{v}_i^2(3,k)$

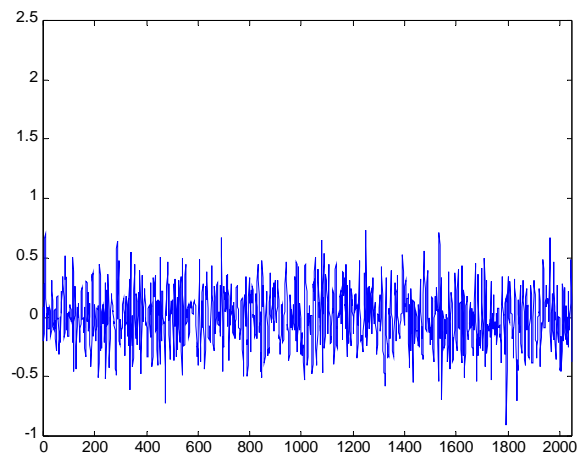
Abscisse : fréquence k
Ordonnée : énergie (norme L^2 du champ)



Densité totale $n_t(3,t)$



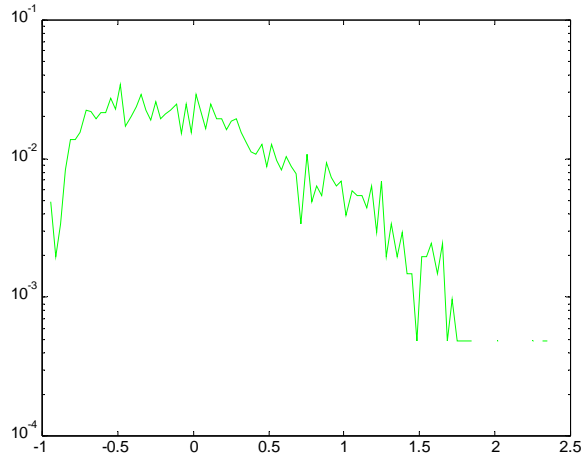
Densité cohérente $n_c(3,t)$



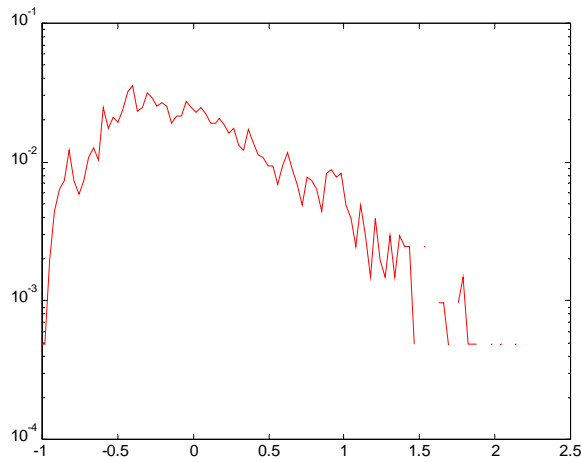
incohérente $n_i(3,t)$

Densité

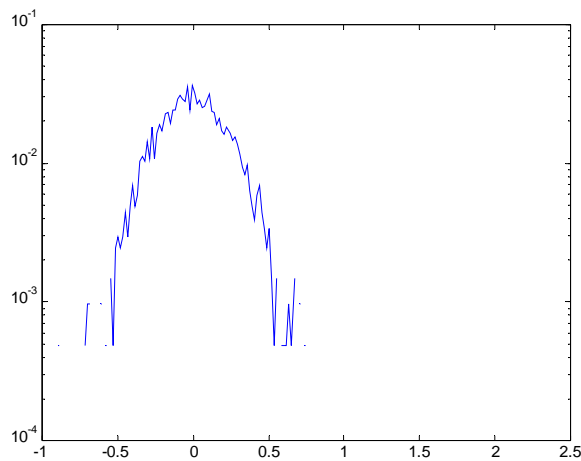
Abcisse : instant t
Ordonnée : valeur du champ n



PDF totale $p[n_t(3,t)]$



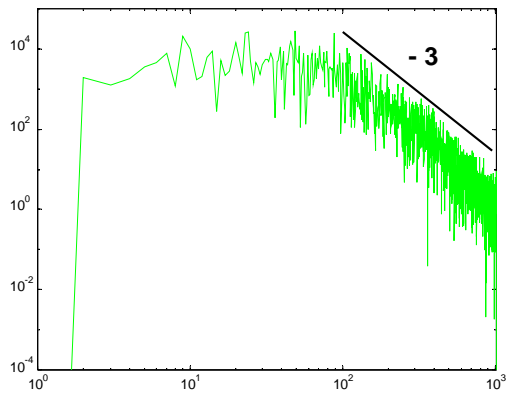
PDF cohérente $p[n_c(3,t)]$



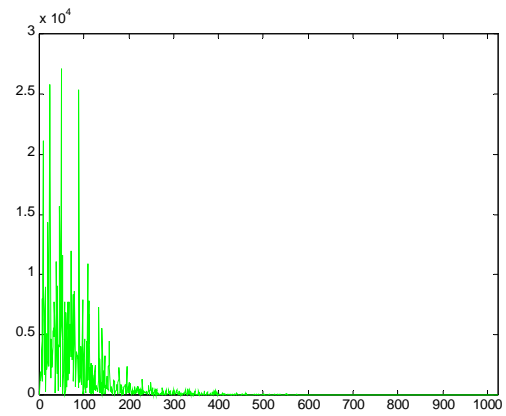
PDF incohérente $p[n_i(3,t)]$

Abcisse : valeur du champ n
Ordonnée : log de la probabilité p

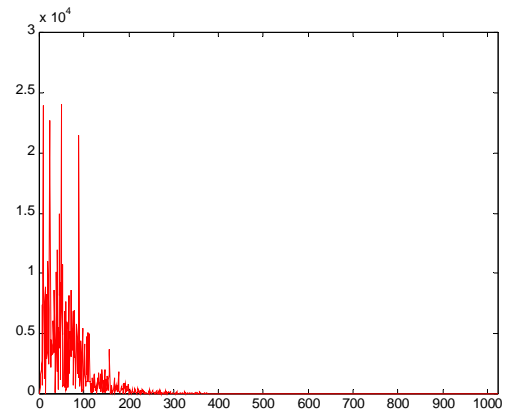
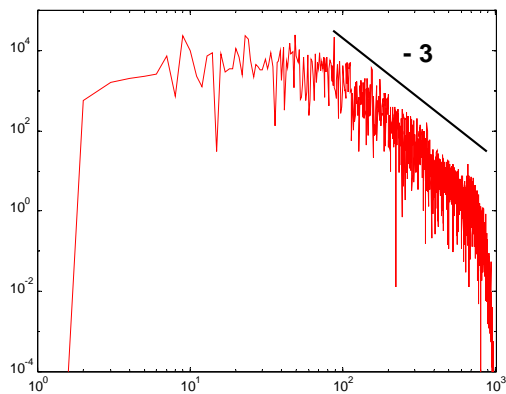
échelle log-log



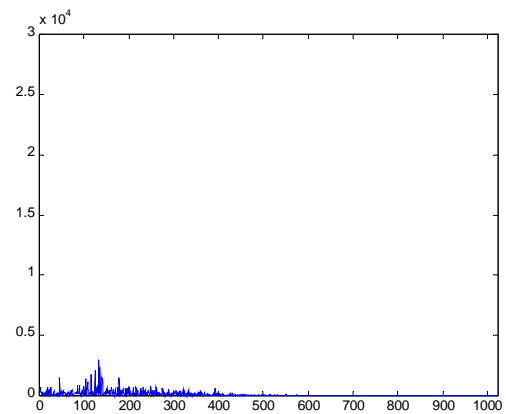
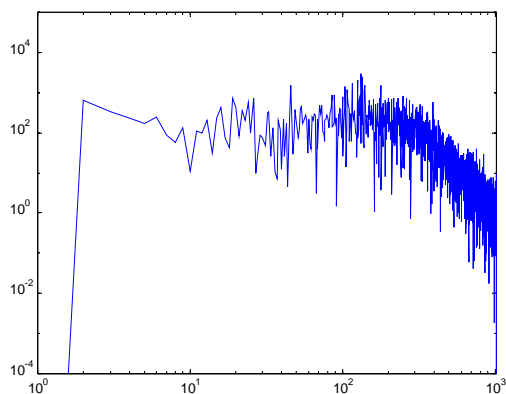
échelle lin-lin



Spectre total $\hat{n}_t^2(3,k)$



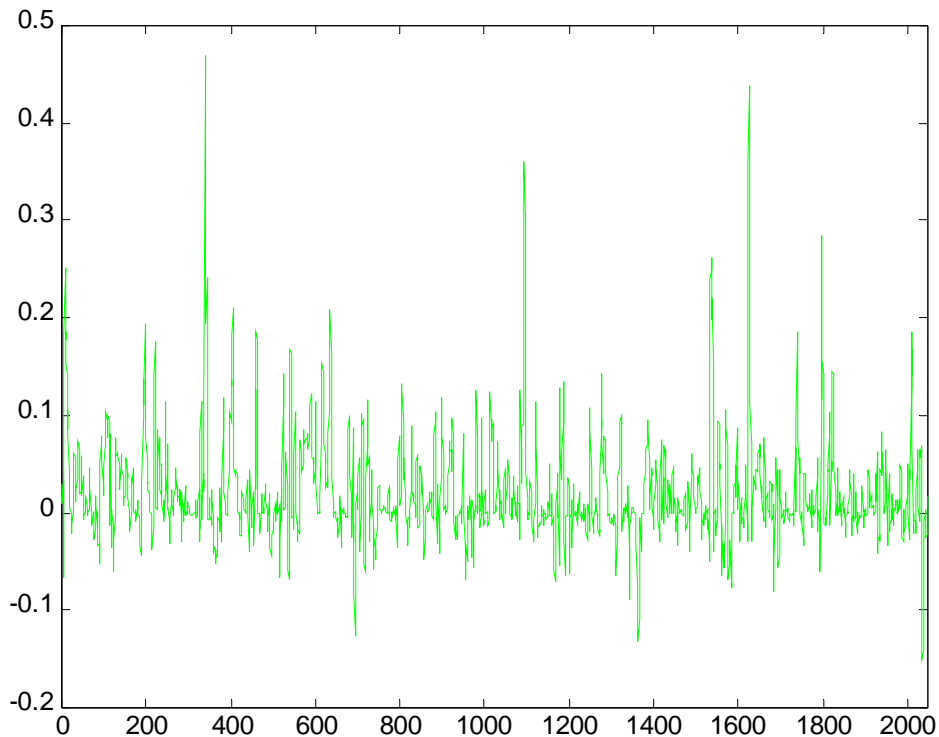
Spectre cohérent $\hat{n}_c^2(3,k)$



Spectre incohérent $\hat{n}_i^2(3,k)$

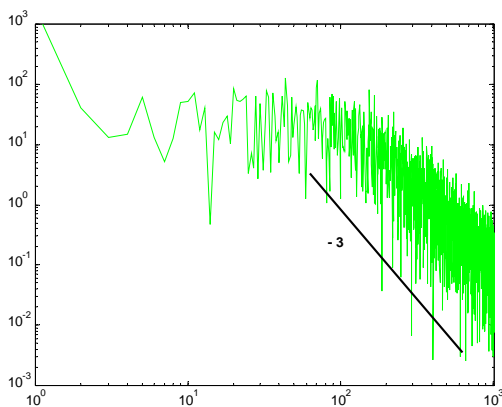
Abcisse : fréquence k
Ordonnée : énergie (norme L^2 du champ)

3. Flux instantanés de particule pour la sonde x=3



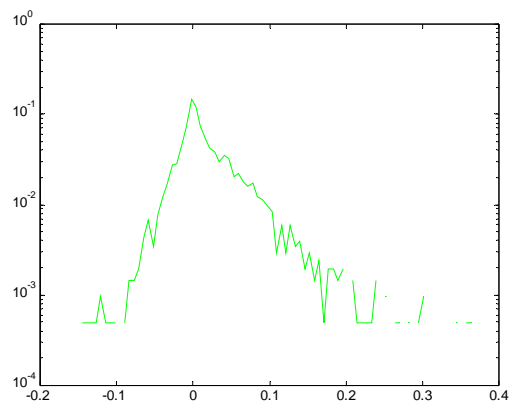
Flux total

$$\Gamma_t(3,t) = v_t(3,t) n_t(3,t)$$



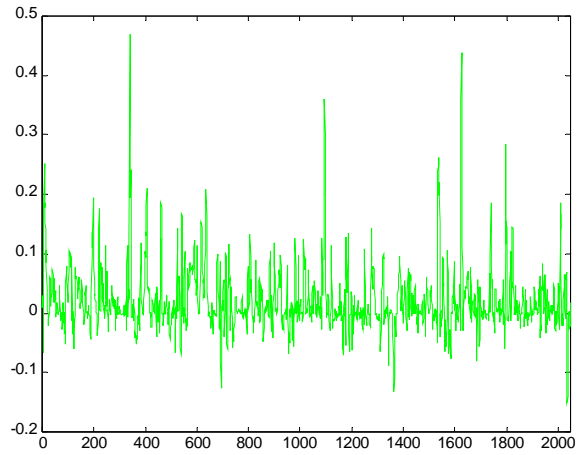
Spectre total

$$\hat{\Gamma}_t^2(3,k)$$

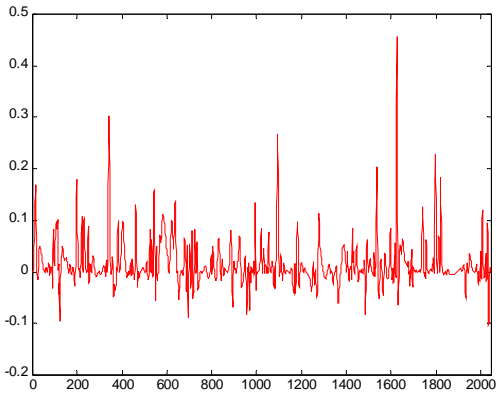


PDF totale

$$p[\Gamma_t(3,t)]$$

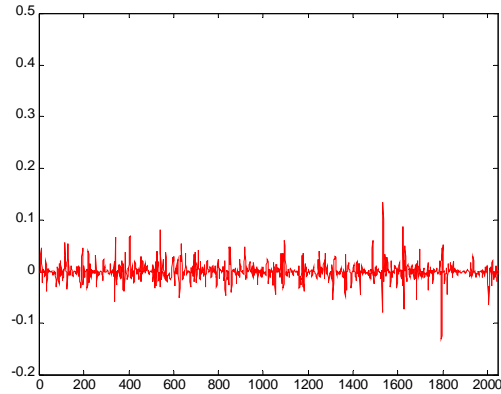


Flux total
 $\Gamma_t(3,t)$

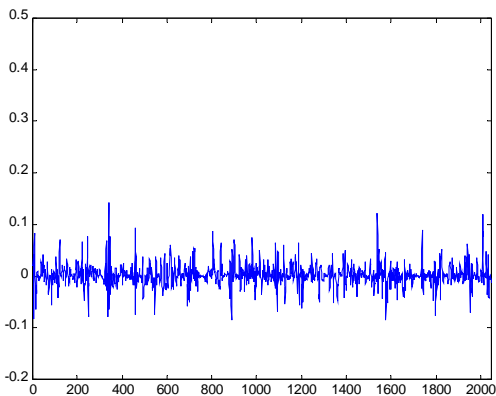


$\Gamma_{cc}(3,t)$

Flux v-cohérents



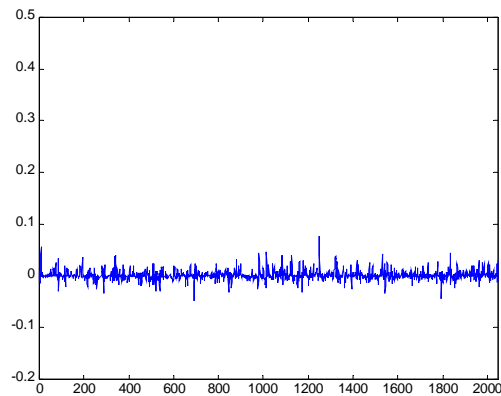
$\Gamma_{ci}(3,t)$



$\Gamma_{ic}(3,t)$

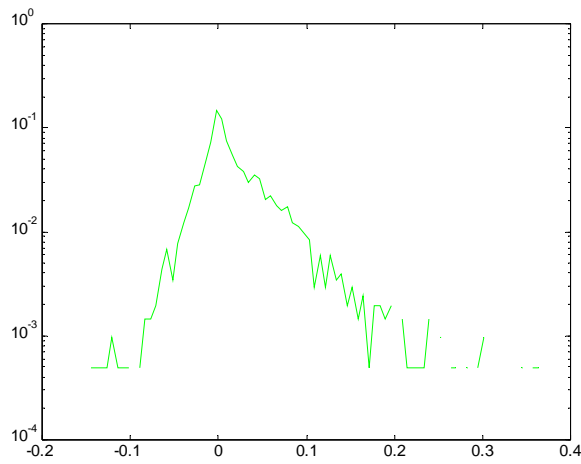
Flux v-incohérents

$\Gamma_{ii}(3,t)$

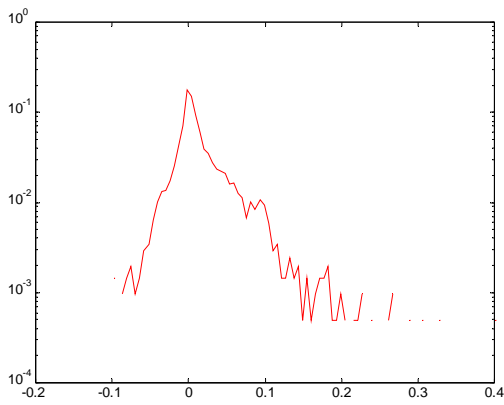


Abscisse : instant t

Ordonnée : valeur du champ Γ

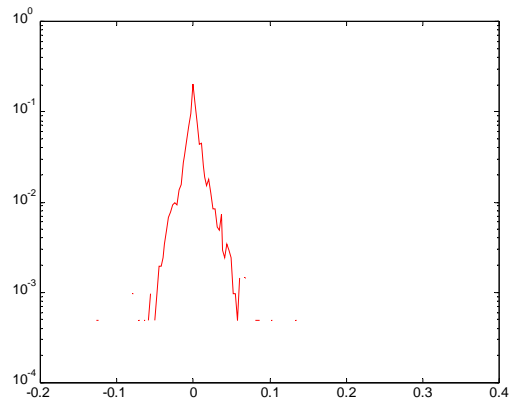


PDF totale
 $p[\Gamma_t(3,t)]$

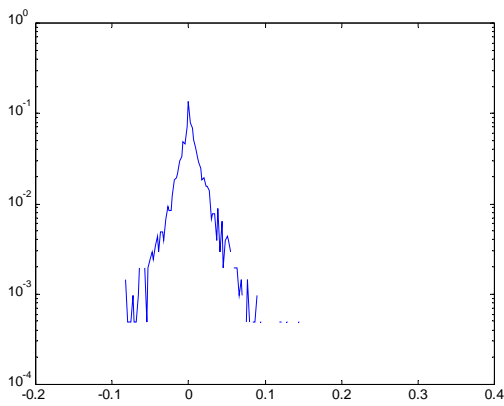


$p[\Gamma_{cc}(3,t)]$

PDF v-cohérentes



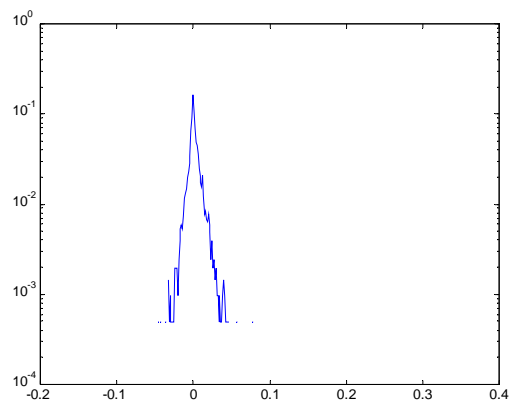
$p[\Gamma_{ci}(3,t)]$



$p[\Gamma_{ic}(3,t)]$

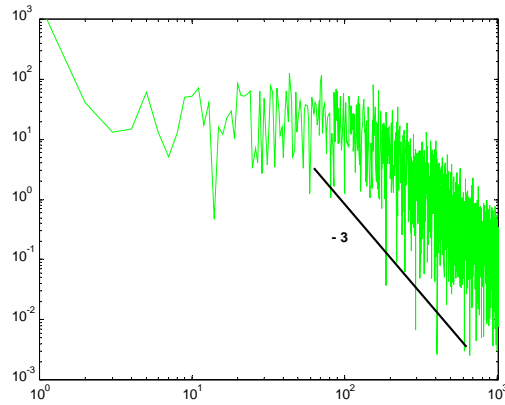
PDF v-incohérentes

$p[\Gamma_{ii}(3,t)]$



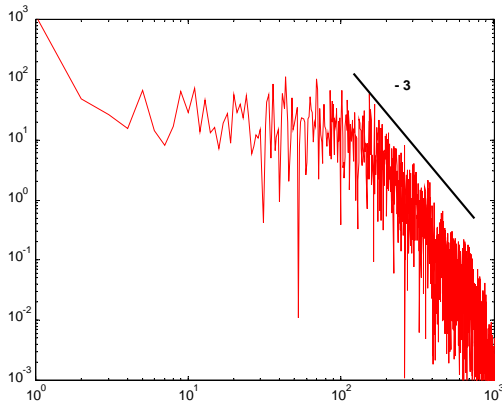
Abcisse : valeur du champ Γ

Ordonnée : log de la probabilité p
échelle log-log



Spectre total

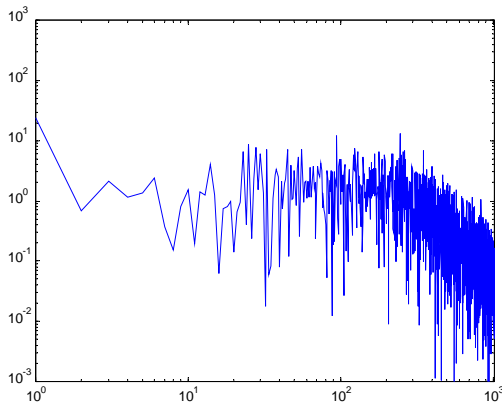
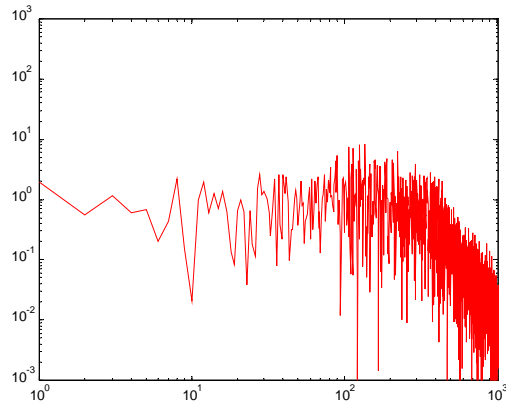
$$\hat{\Gamma}_t^2(3,k)$$



$$\hat{\Gamma}_{cc}^2(3,k)$$

Spectres v-cohérents

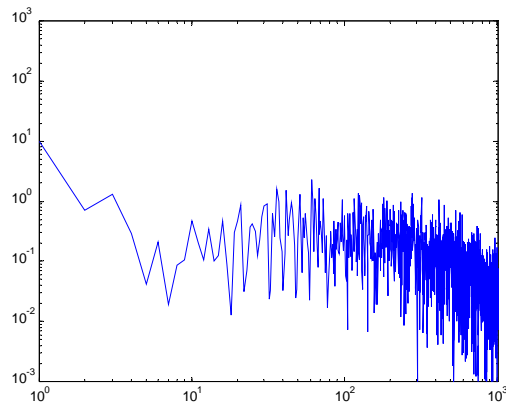
$$\hat{\Gamma}_{ci}^2(3,k)$$



$$\hat{\Gamma}_{ic}^2(3,k)$$

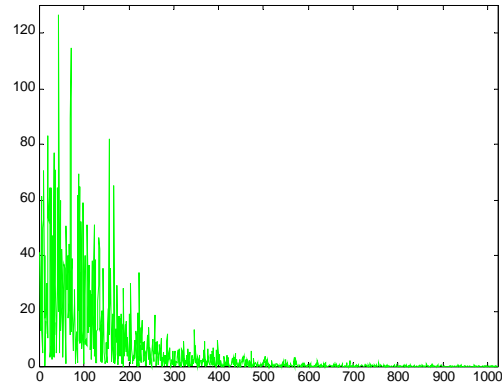
Spectres v-incohérents

$$\hat{\Gamma}_{ii}^2(3,k)$$



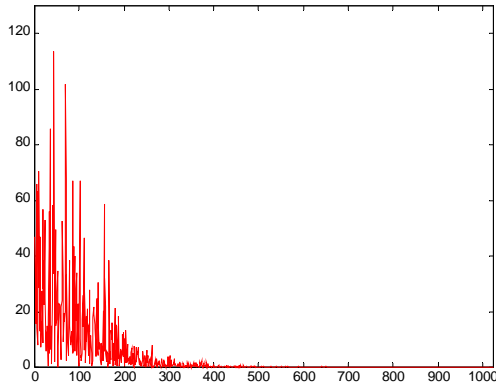
Abscisse : fréquence k
 Ordonnée : énergie (norme L² du champ)

échelle lin-lin



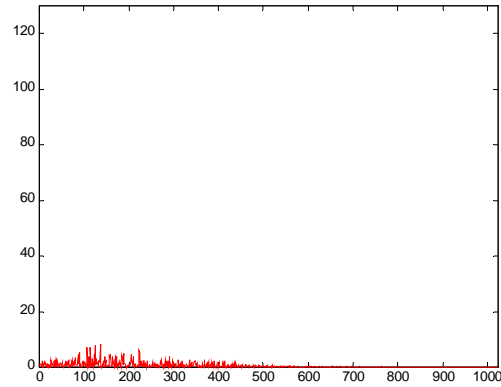
Spectre total

$$\hat{\Gamma}_t^2(3,k)$$

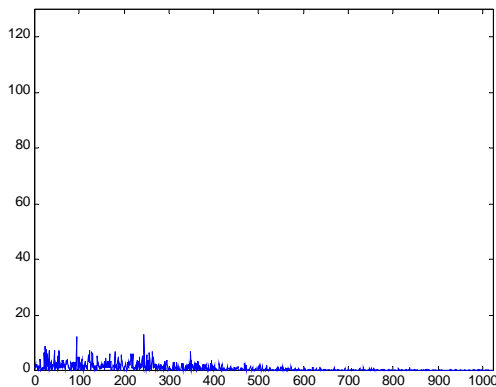


$$\hat{\Gamma}_{cc}^2(3,k)$$

Spectres v-cohérents



$$\hat{\Gamma}_{ci}^2(3,k)$$



$$\hat{\Gamma}_{ic}^2(3,k)$$

Spectres v-incohérents

$$\hat{\Gamma}_{ii}^2(3,k)$$

Abcisse : fréquence k
Ordonnée : énergie (norme L² du champ)

4. Flux intégrés en temps pour la sonde x=3

Flux total	$\bar{\Gamma}_t(3) = 0.0211$
Flux cohérent_cohérent	$\bar{\Gamma}_{cc}(3) = 0.0165$, soit 78.0% $\bar{\Gamma}_t(3)$
Flux cohérent_incohérent	$\bar{\Gamma}_{ci}(3) = 0.0007$, soit 3.3% $\bar{\Gamma}_t(3)$
Flux incohérent_cohérent	$\bar{\Gamma}_{ic}(3) = 0.0024$, soit 11.4% $\bar{\Gamma}_t(3)$
Flux incohérent_incohérent	$\bar{\Gamma}_{ii}(3) = 0.0015$, soit 7.3% $\bar{\Gamma}_t(3)$

On observe que l'essentiel du flux de particules provient du transport des composantes cohérentes de la densité par les composantes cohérentes de la vitesse, qui représente 78% du flux total.

Le fait que le flux incohérent_cohérent (11% du flux total) l'emporte sur le flux cohérent_incohérent (3% du flux total) semble indiquer que la cohérence de la densité est plus importante que la cohérence de la vitesse radiale pour assurer le transport des particules.

Cette remarque est confirmée quand on refait les séparations sur les 15 sondes (voir paragraphe suivant). Les figures qui se trouvent sur la dernière page montrent la valeur des quatre composantes du flux intégré en temps en fonction de la position de la sonde. On observe que c'est la contribution cohérente de la densité qui contribue le plus au flux total.

5. Flux intégrés en temps pour chacune des 15 sondes

X	$\bar{\Gamma}_t \cdot 10^2$	$\bar{\Gamma}_{cc} (\% \bar{\Gamma}_t)$	$\bar{\Gamma}_{ci} (\% \bar{\Gamma}_t)$	$\bar{\Gamma}_{ic} (\% \bar{\Gamma}_t)$	$\bar{\Gamma}_{ii} (\% \bar{\Gamma}_t)$
1	4.48	42.5	1.5	37.5	18.5
2	1.59	56.3	9.0	17.5	17.2
3	2.11	78.0	3.3	11.4	7.3
4	2.81	61.1	0.3	29.6	9.0
5	2.10	75.5	1.8	16.7	6.0
6	1.28	70.8	1.0	24.5	3.7
7	2.26	76.9	0.2	19.1	3.8
8	2.59	61.6	1.5	32.6	4.3
9	3.94	46.0	1.7	31.1	21.2
10	4.46	54.5	2.3	31.4	11.8
11	4.41	47.4	1.0	37.8	13.8
12	2.89	39.9	0.1	47.6	12.4
13	2.89	44.7	1.5	39.7	14.1
14	1.42	39.4	1.0	47.1	12.5
15	1.38	43.1	2.3	37.8	16.8

Flux intégrés en temps et en espace (sur les 15 sondes)

$\langle \bar{\Gamma} \rangle$	t	cc	ci	ic	ii
moyenne	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$
variance	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$

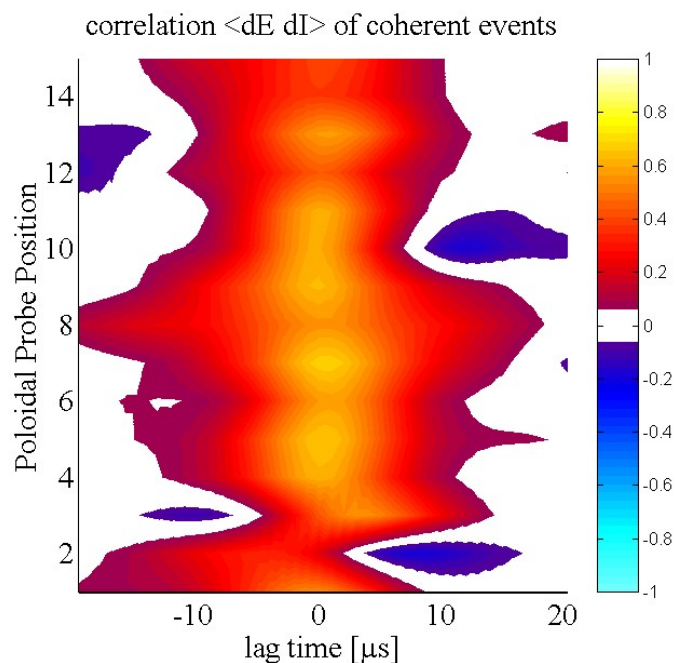
exprimé en % du flux total

$\% \langle \bar{\Gamma}_t \rangle$	total	cc	ci	ic	ii
-------------------------------------	--------------	-----------	-----------	-----------	-----------

moyenne	100	53.9	1.7	32	12.4
variance	100	22.7	0.15	20.2	5

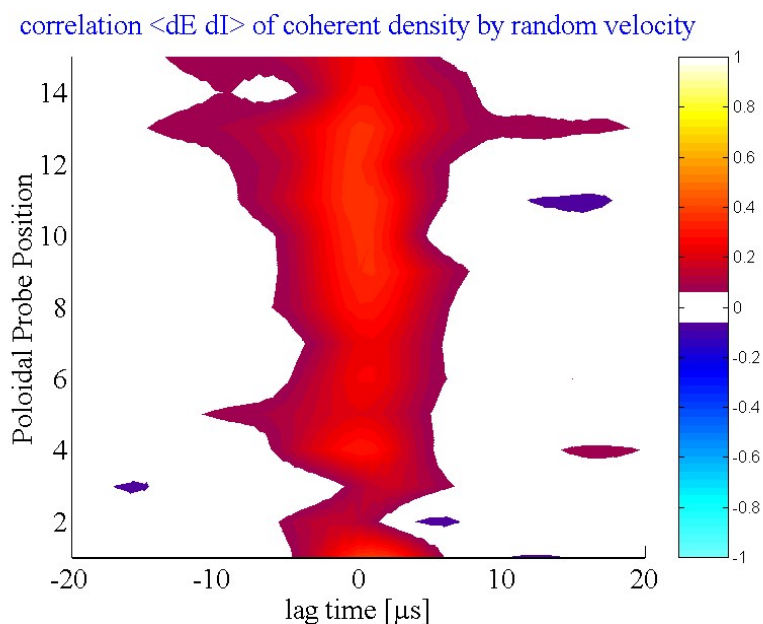
6. Corrélation entre densité et vitesse radiale turbulente

Densité et vitesse radiale cohérentes



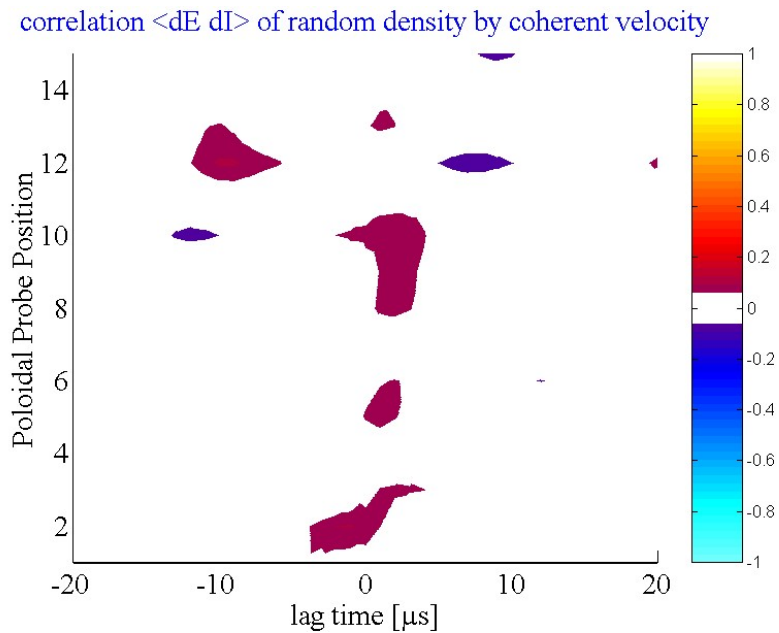
On observe une corrélation de l'ordre de 20 μs sur les 15 positions poloidales avec un taux de corrélation élevé.

Densité cohérente et vitesse radiale incohérente



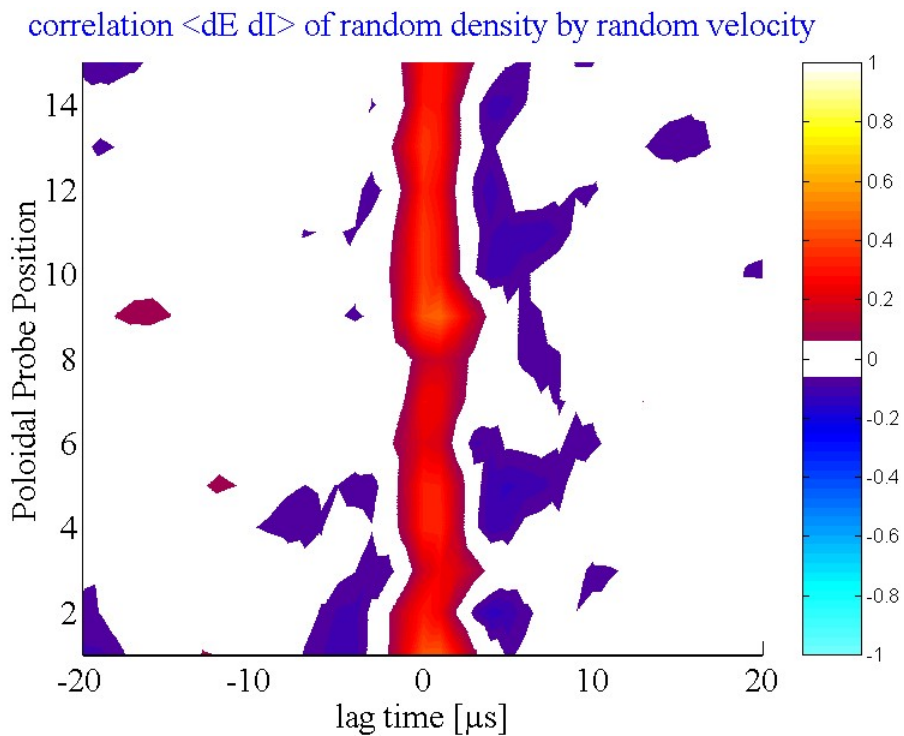
On observe une corrélation d'un niveau plus faible mais de l'ordre de 12 μs sur les 15 positions poloidales

Densité incohérente et vitesse radiale cohérente



Pas de corrélation entre ces deux quantités.

Densité incohérente et vitesse radiale incohérente

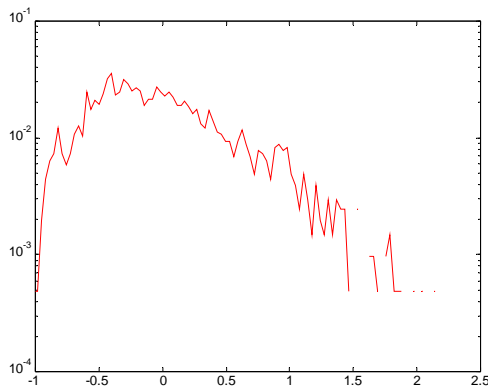


Corrélation résiduelle moyenne ($\sim 40\%$) mais à durée courte.

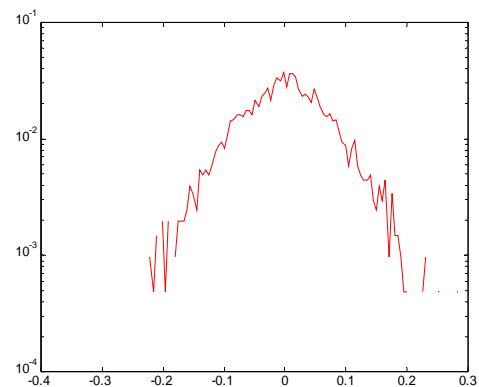
Nous allons vérifier que cela ne provient pas d'un bruit expérimental.

Nous observons que :

- le flux radial dû à la densité cohérente transportée par la vitesse incohérente (Γ_{ic}) est plus important que le flux radial dû à la densité incohérente transporté par la vitesse cohérente (Γ_{ci}).
- Une explication possible est que celle-ci provient de l'assymétrie (skewness) du signal cohérent qui est plus forte dans le cas de la densité que dans le cas de la vitesse.



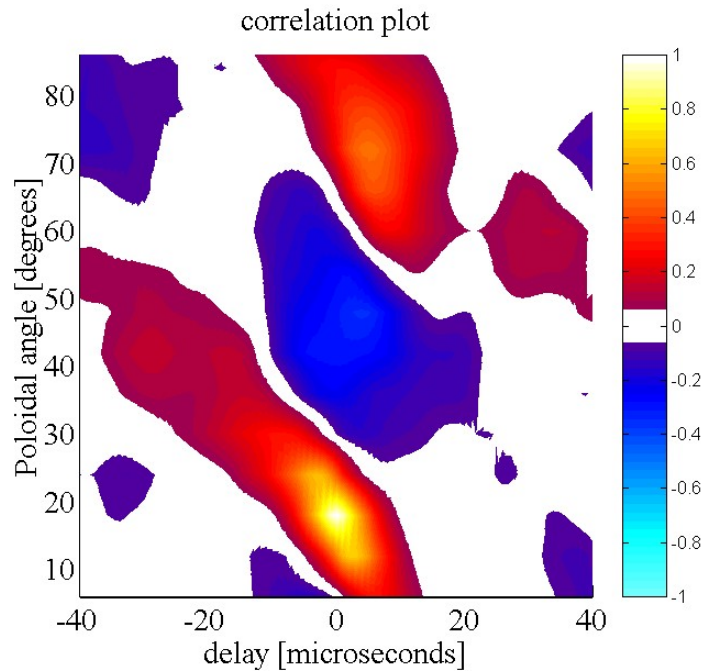
PDF de la densité cohérente



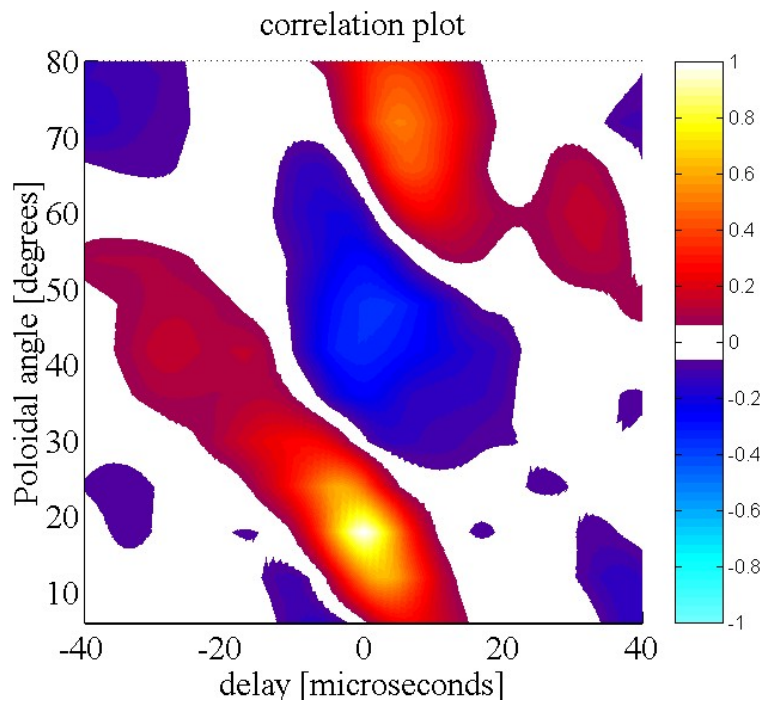
PDF de la vitesse cohérente

7. Vitesses poloidales des parties cohérente et incohérentes des fluctuations de densité

Fluctuations de densité totale

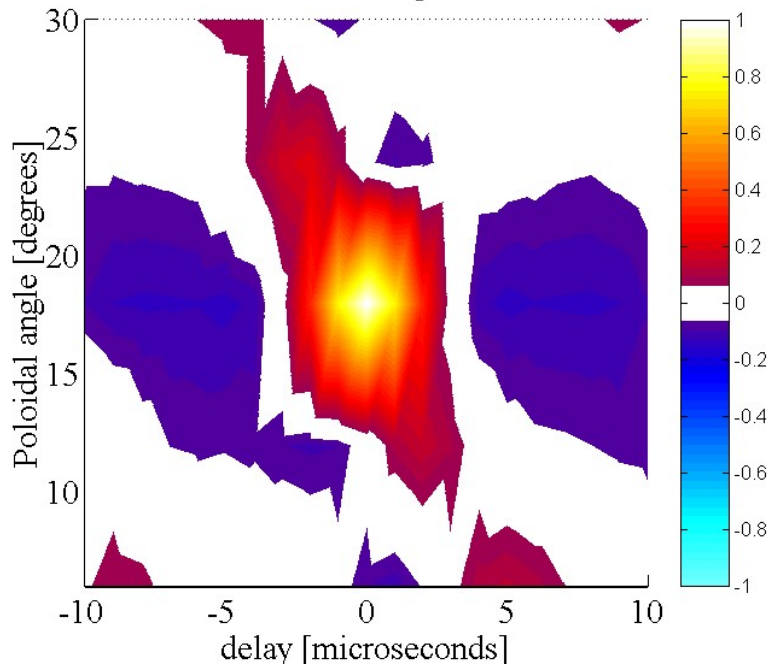


Fluctuations de densité cohérentes



Fluctuations de densité incohérentes

correlation plot



La corrélation croisée est calculée entre les différentes sondes séparées poloidalement et une sonde de référence. La sonde de référence est la sonde 3.

L'inclinaison des structures corrélées dans le diagramme angle poloidal/temps permet de calculer la vitesse d'entraînement poloïdal de la turbulence.

Nous observons que :

- pour la densité totale, la vitesse poloïdale serait de 1000m/s,
- pour la densité cohérente, la vitesse poloïdale serait de 954 m/s, soit identique à la vitesse totale,
- Pour la densité incohérente, elle serait de 2653 m/s.

Il semble au vu de ces résultats que la vitesse du fond incohérent des fluctuations de densité est deux fois plus élevée que celle des évènements cohérents, ce qui n'est pas compris pour le moment.