

Use of Twenty Years CLUSTER/FGM Data to Observe
The Mean Behavior of the Magnetic Field and Current Density
of Earth's Magnetosphere

P. Robert
Café spatial LPP du 25/02/2022

P. Robert and M. Dunlop , Dec. 2021
Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2021JA029837.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029837>

TECHNICAL REPORTS: DATA

Received 31 JUL 2021
Accepted 9 DEC 2021

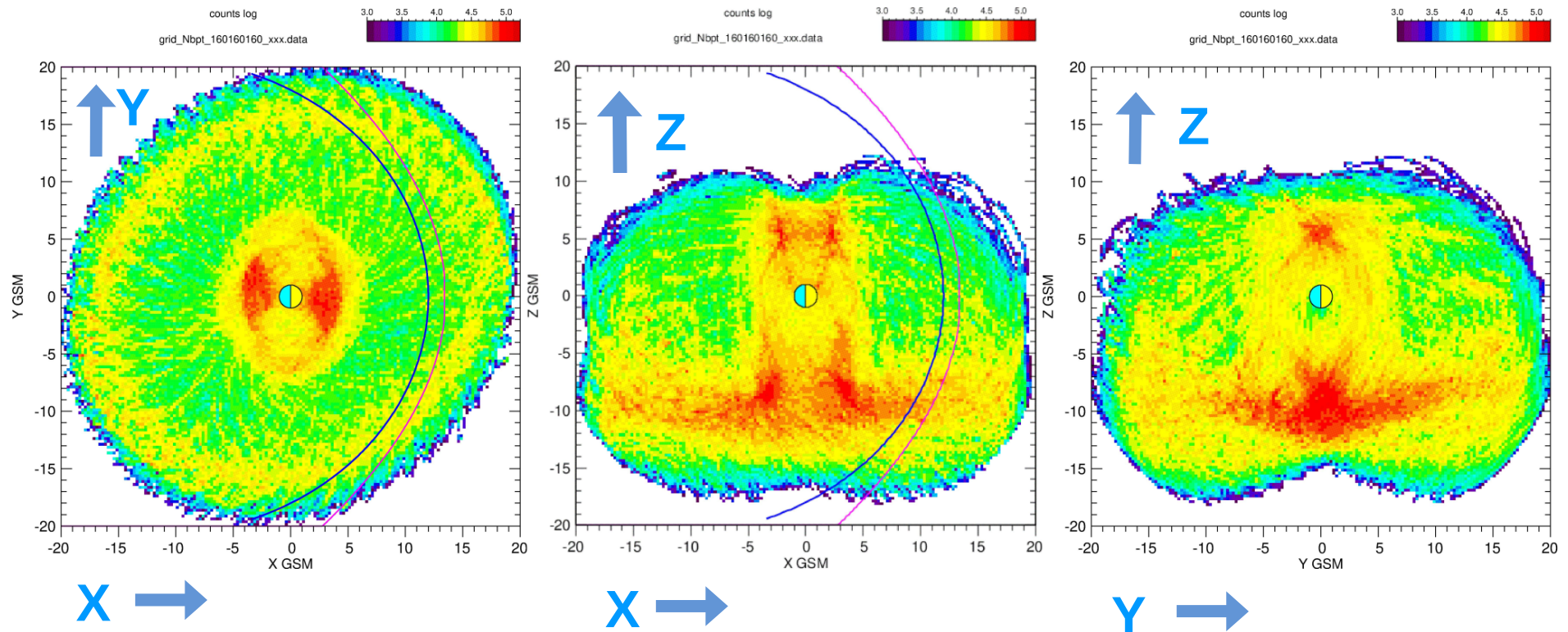
CLUSTER FGM: 20 ans de données

Idée: utiliser la couverture spatiale des mesures pour obtenir un ensemble de valeurs dans un volume fini

- Chaque point correspond à une date et une position
- Dans le GSM on fait l'hypothèse que le champ moyen dépend majoritairement de l'angle du dipôle avec Z (dipole tilt angle)
- A partir des mesures on peut construire des grilles de valeurs moyennes du champ, qui vont pouvoir être exploitées pour calculer Les intensités et directions de B et J

I – COUVERTURE SPATIALE

Dans le GSM on distribue les positions de CLUSTER pendant 20 ans sur une grille 3D de 0.25 R_E



Nombre total de tétraèdre dans le cube: $\sim 150 \cdot 10^6$

II - BASE DE DONNÉES

- FGM SPIN resolution ($\sim 4s$) ; $\sim 30\,000$ fichiers CEF, ~ 45 GB
- conversion binaire, avec champ et position : *FGM_POS_database* (~ 30 GB).
- pour le calcul de J il faut que les 4 mesures de B au sommet du tétraèdre soient alignées en temps. Idem pour les positions.



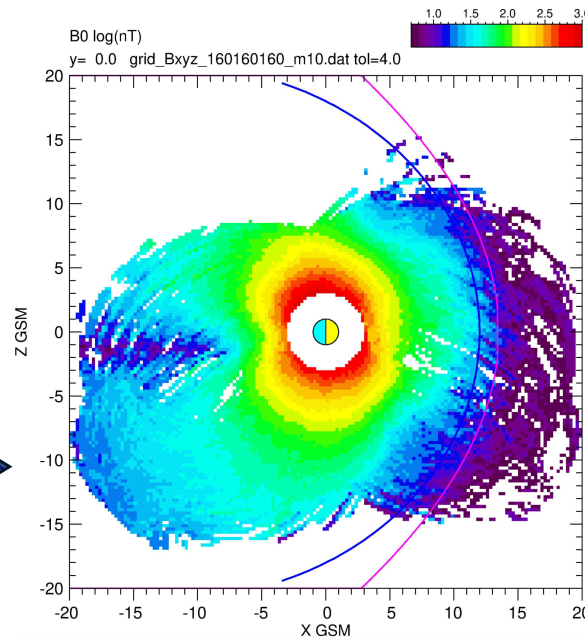
Création de la base *FGM_POS_aligned_database*

- fabrication de grilles 3D contenant le champ moyen pour diverses valeurs de θ (dipole tilt angle). Résolution: $0.25 R_E$

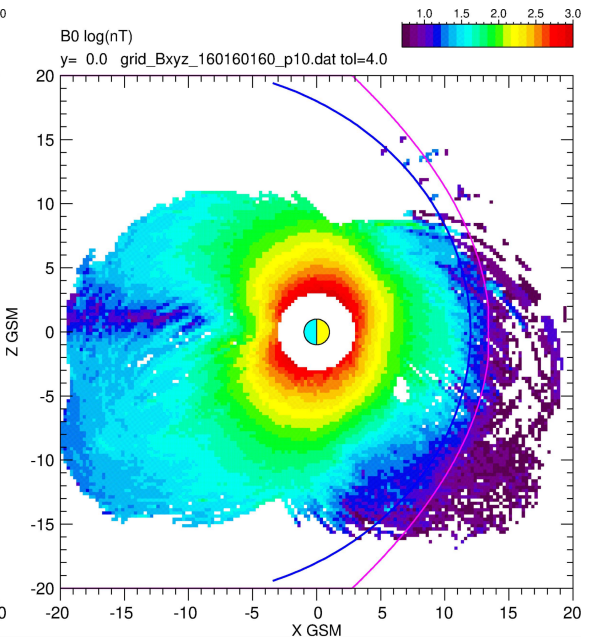
III – OBSERVATION DU CHAMP MOYEN

1) Intensité

(X,Z) GSM plane



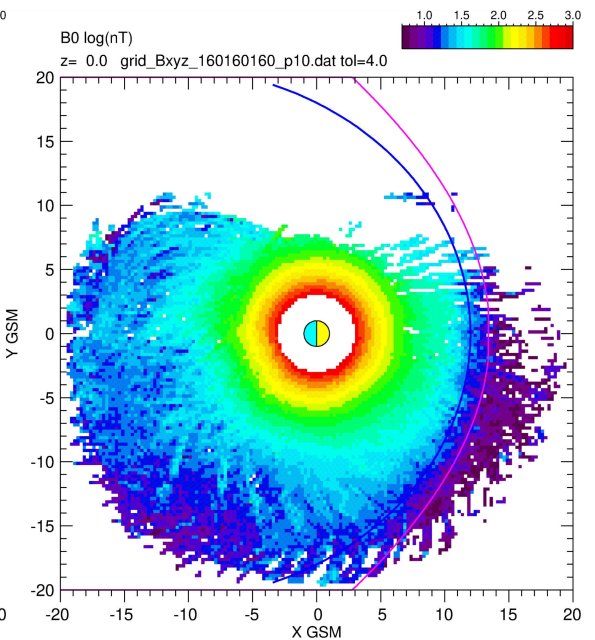
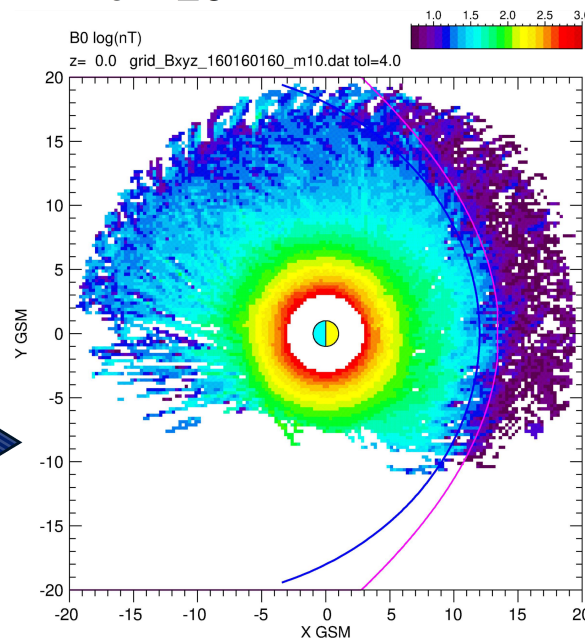
$\theta = -10^\circ$



$\theta = 10^\circ$

→ conforme à ce qui est attendu....

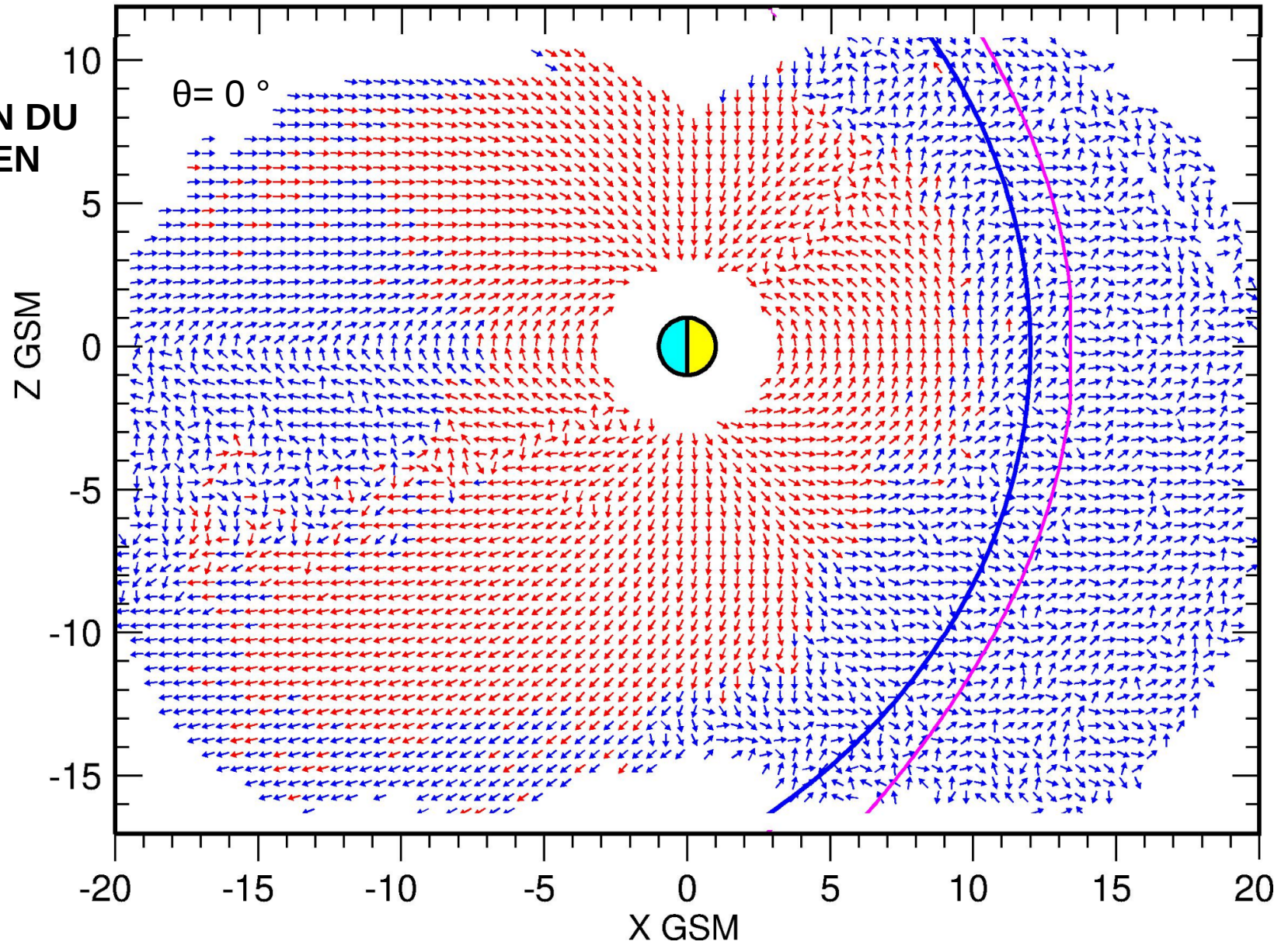
(X,Y) GSM plane



y= 0.0 grid_Bxyz_080080080_p00.dat tol=4.0

III – OBSERVATION DU CHAMP MOYEN

b) Direction



IV – INTERPOLATION SPATIALE

- Résolution de la grille : 0.25 RE
- Bon compromis entre la taille des cellules et le nombre de points à l'intérieur
- Interpolation de Franke-Little :
 - on collecte tous les points de la grille à l'intérieur d'une sphère de rayon $R_{\max}$
 - chaque point est à une distance d_i du point où l'on désire la valeur du champ interpolé
 - à chaque point on attribue un poids $W = \max(1 - d_i/R_{\max}, 0)$
 - et on calcule la moyenne à partir de tous les points dans la sphère



On peut ainsi avoir la valeur du champ en tout point de l'espace 3D couvert par la grille

Remarque : interpolation à partir de la grille : $\sim 4 \cdot 10^6$ points ($[40/0.25]^3$)

Interpolation à partir de tous les points initiaux : $600 \cdot 10^6$ points : trop lourd pour un PC...

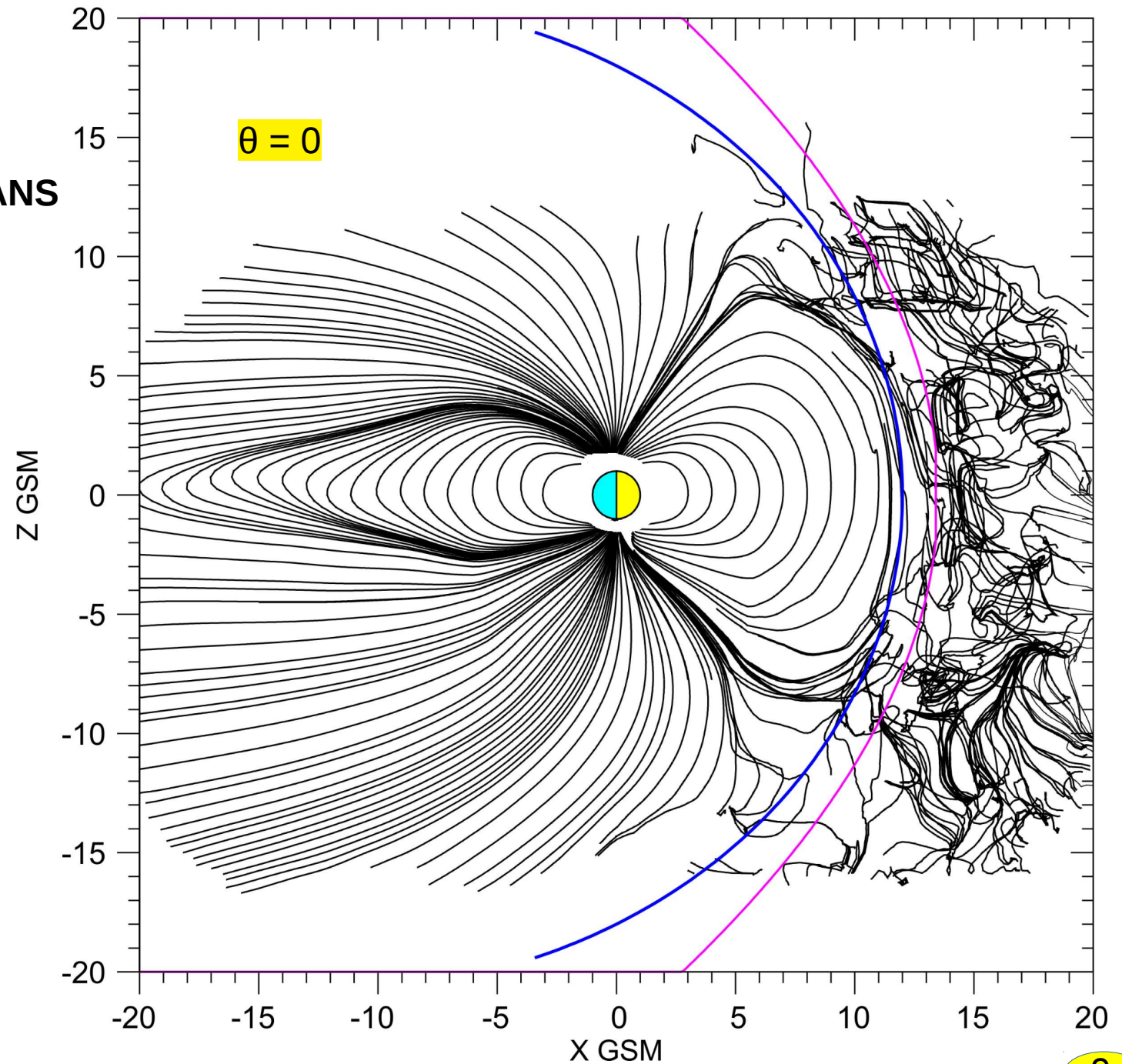
V – TRACE DE LIGNE DE CHAMP

- comme on peut avoir la valeur du champ en tout point de l'espace on peut calculer des lignes de force avec un programme de tracé de rayon (TRACE de TSY.)
- à partir d'un point donné, on peut calculer la ligne de force partant de ce point (et dans les deux sens)
- en choisissant bien un ensemble de points de départ, on peut obtenir des cartes de lignes de champ

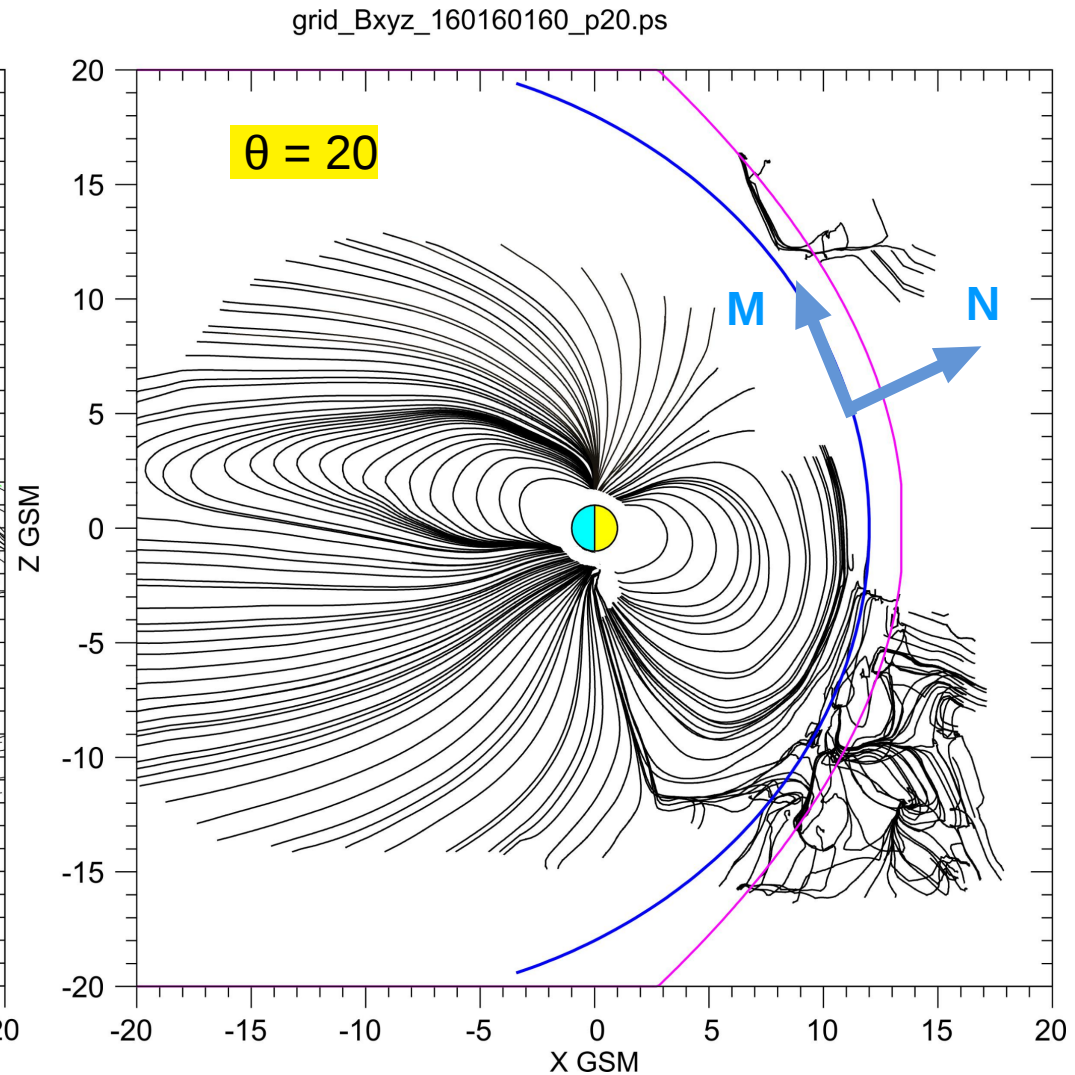
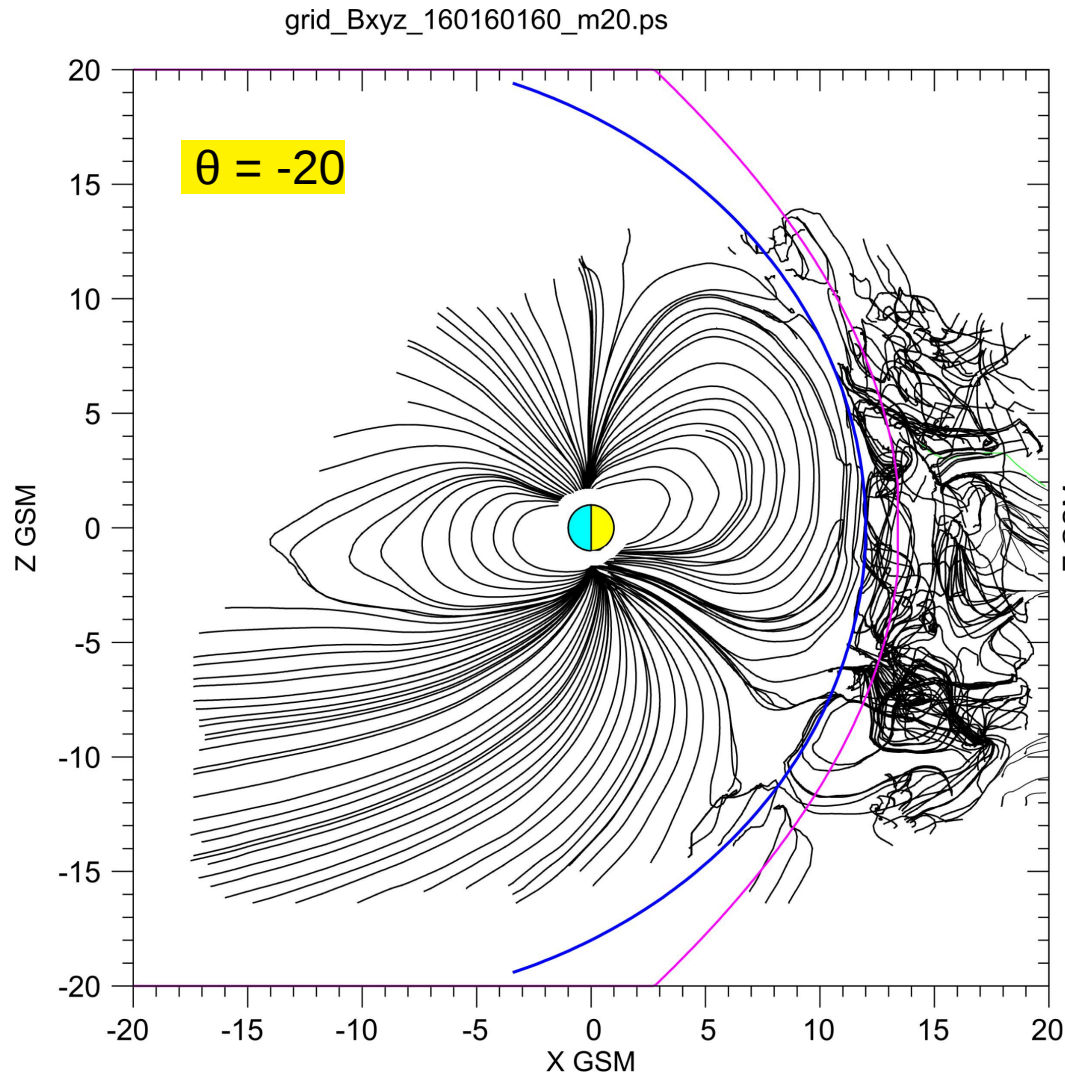
VI – LIGNES DE CHAMP DANS LE PLAN MÉRIDIEN

- départ des lignes de champ
toujours à $Y_{GSM} = 0$

- permet le calcul d'une
magnétopause approximée



VI – LIGNES DE CHAMP DANS LE PLAN MÉRIDIDIEN (suite)



For the meridian plane, this limit is approximately fitted by half an ellipse with major axis along X and minor axis along Z, the right focus being centered on the Earth. The elliptical equation in the XZ plane of GSM system is

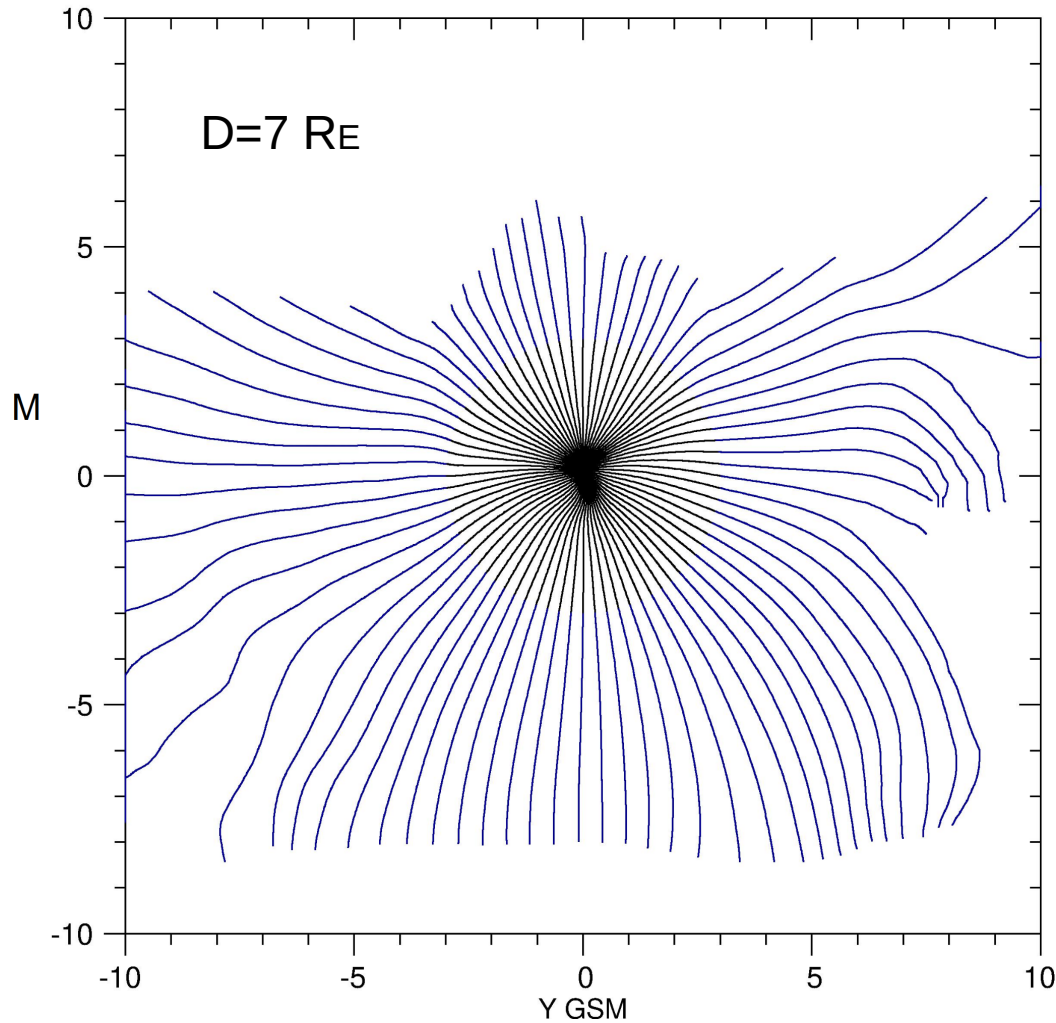
$$r(\alpha) = p / (1 + e \cos \alpha)$$

To compute p and e parameters we assume that the two points $(X,Z) = (12,0)$ and $(0,18)$ are part of the ellipse, which allows us to determine $p = 18$ and $e = 0.5$.

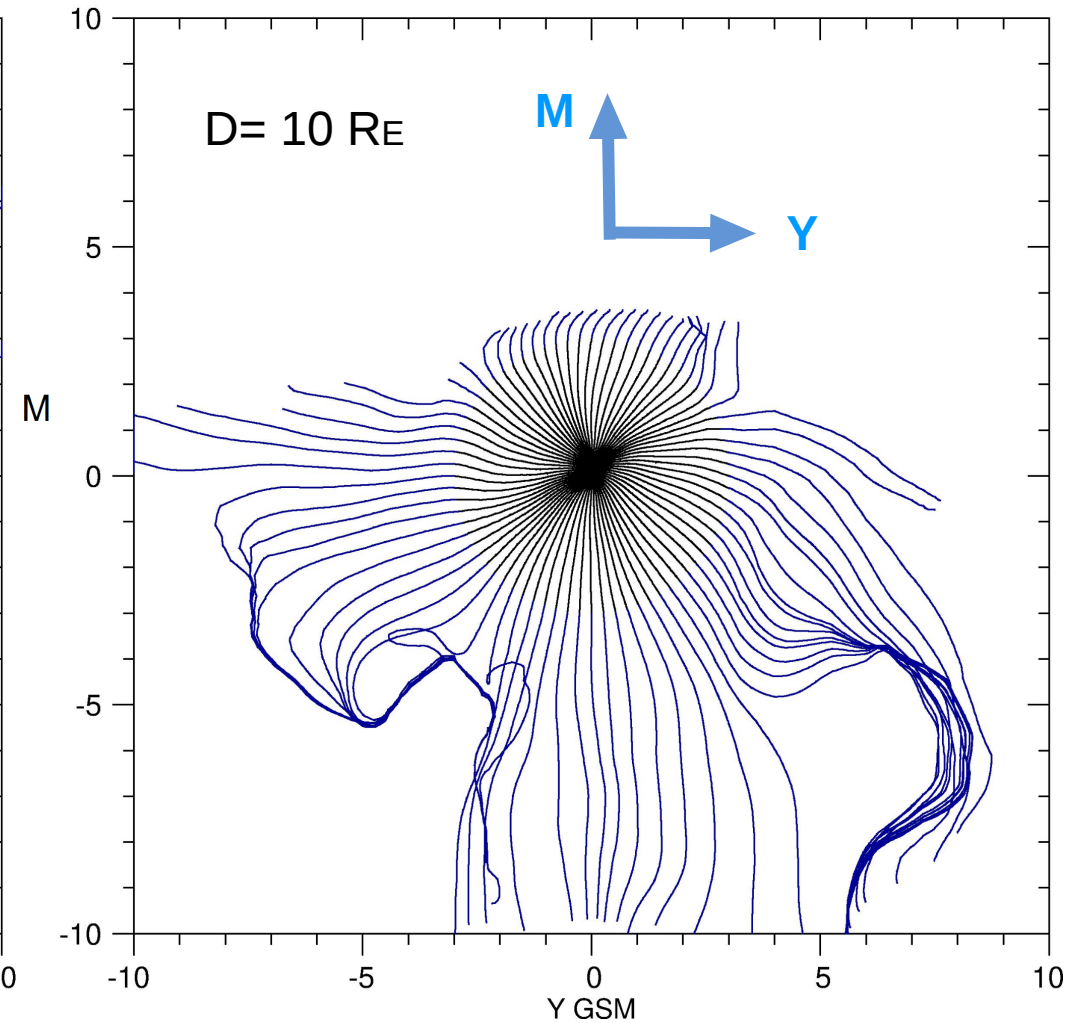
VII – LIGNE DE CHAMP PRES DES CUSPS

a) cusp **NORD**, $\theta = 0$

grid_Bxyz_160160160_p00_p55_07_cusp.ps

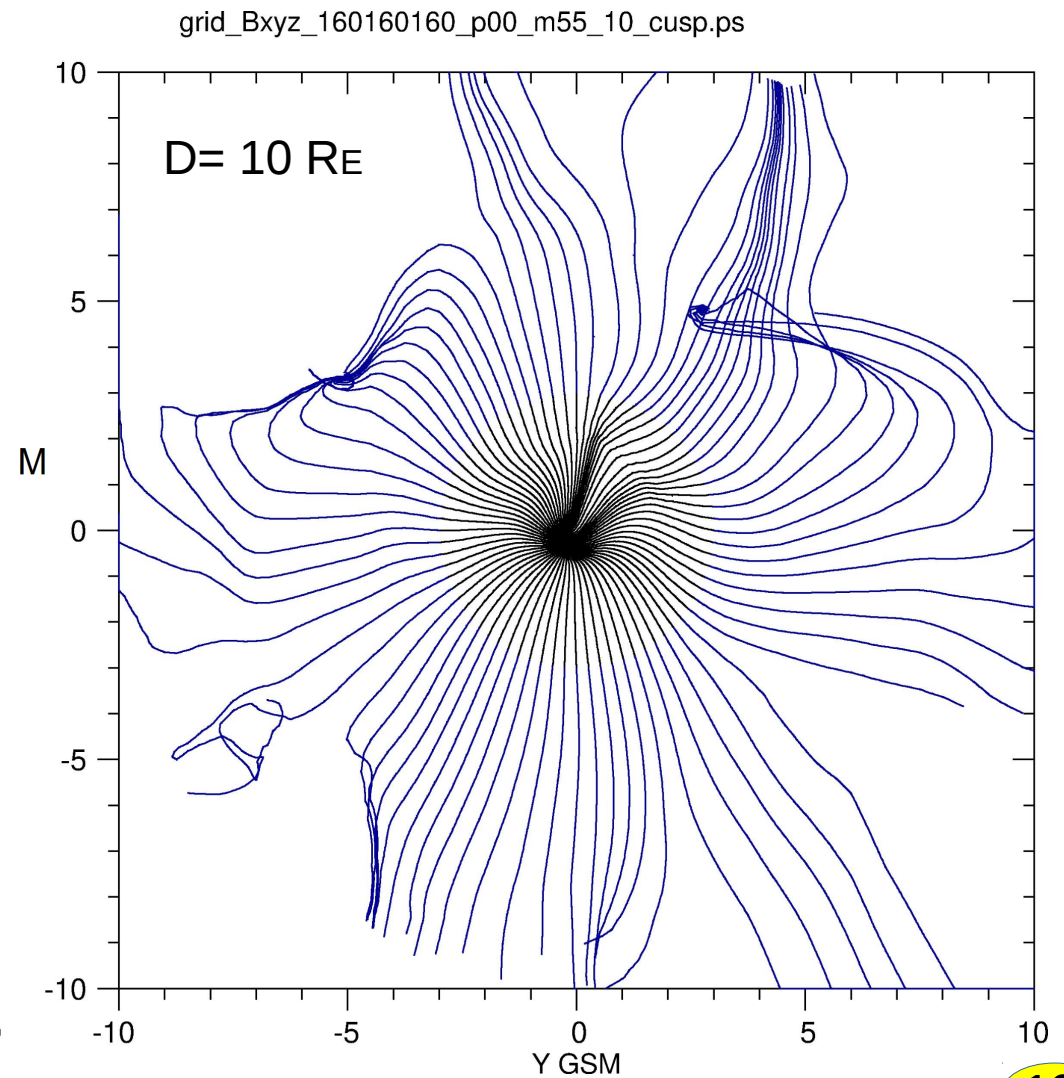
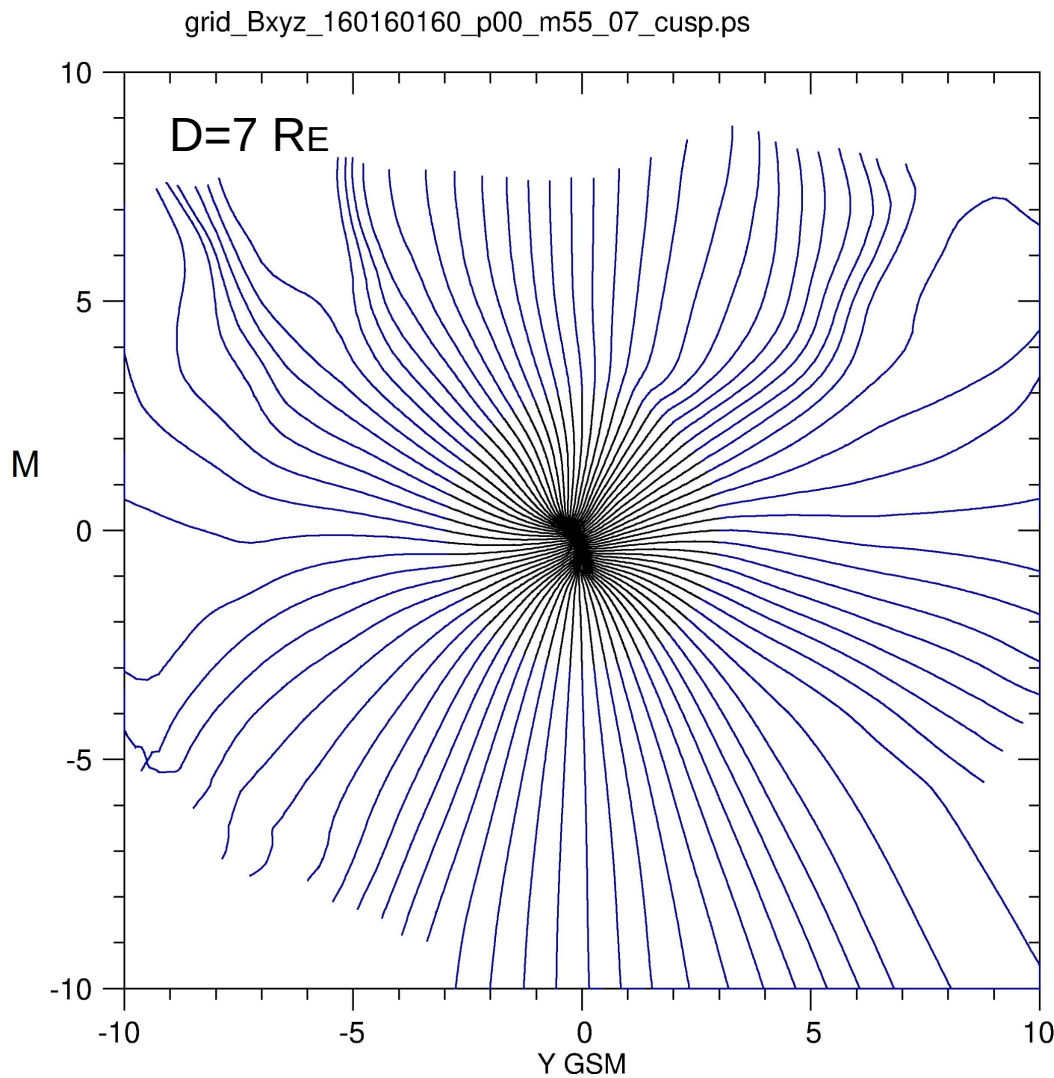


grid_Bxyz_160160160_p00_p55_10_cusp.ps



VII – LIGNE DE CHAMP PRES DES CUSPS

b) cusp **SUD**, $\theta = 0$



VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

a) Rappel de la méthode de calcul

$$\oint \vec{B}(M) \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$$

To apply this formula to a tetrahedron, consider the face formed by vertices (i,j,k). Following the linearity assumption of B, the field between the spacecraft i and j can be expressed by:

$$\vec{B}_{ij} = \vec{B}_i + (\vec{B}_j - \vec{B}_i)l/L_{ij}$$

where L_{ij} is the distance between spacecraft i and j .

So for the line ij we have:

$$\int_0^{L_{ij}} \vec{B}_{ij}(l) \cdot d\vec{l} = \vec{B}_j + (\vec{B}_j - \vec{B}_i) \int_0^{L_{ij}} l dl / L_{ij} = (\vec{B}_i + \vec{B}_j) \cdot L_{ij} / 2$$

By noting the result S_{ij} , and by doing the same thing for the 3 lines of the (i,j,k) triangle, we obtain:

$$\mu_0 \cdot I_{ijk} = S_{ij} + S_{jk} + S_{ki} \text{ and so we have } J_{ijk} = (S_{ij} + S_{jk} + S_{ki}) / (A_{ijk} \mu_0)$$

where A_{ijk} is the area of the (i,j,k) triangle.

To calculate the density vector $\vec{J}$, one chooses three faces among the four, and therefore we obtain three components of $\vec{J}$ in a non-orthogonal coordinate system. If the tetrahedron is not flat, one carries out the passage in an orthogonal frame by a classical method and one finally obtains the vector $\vec{J}$ in the initial coordinate system.

We thus can obtain four possible values for the estimation of the rotational gradient. In practice, when the tetrahedron is not degenerated, these 4 values are extremely close, and we use as final result the average of these four estimations.

To compute $\text{div}(\vec{B})$ we use the divergence law, or Green-Ostrogradski law, as:

$$\iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} dV = \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

In the same way we have shown that $\int_0^{L_{ij}} \vec{B}_{ij}(l) \cdot d\vec{l} = (\vec{B}_i + \vec{B}_j) \cdot \vec{L}_{ij} / 2$ we can show that on the face of the (i,j,k) triangle we have $\int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B}_{ijk} \cdot \vec{N}_{ijk}$, where $\vec{N}_{ijk}$ is the output normal to the (i,j,k) face and $\vec{B}_{ijk} = (\vec{B}_i + \vec{B}_j + \vec{B}_k) / 3$.

By dividing by the volume of the tetrahedron, we obtain the contribution of the divergence on each face;

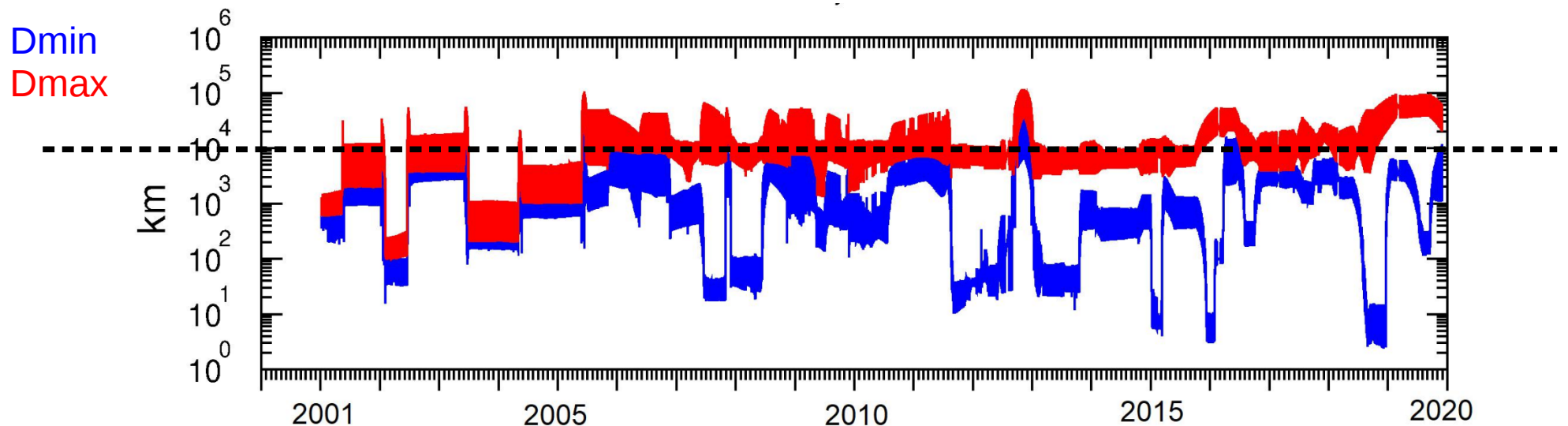
$$D_{ijk} = \vec{B}_{ijk} \cdot \vec{N}_{ijk} / V$$

and finally the total divergence $\text{Div}(\vec{B}) = D_{123} + D_{134} + D_{142} + D_{432}$

VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

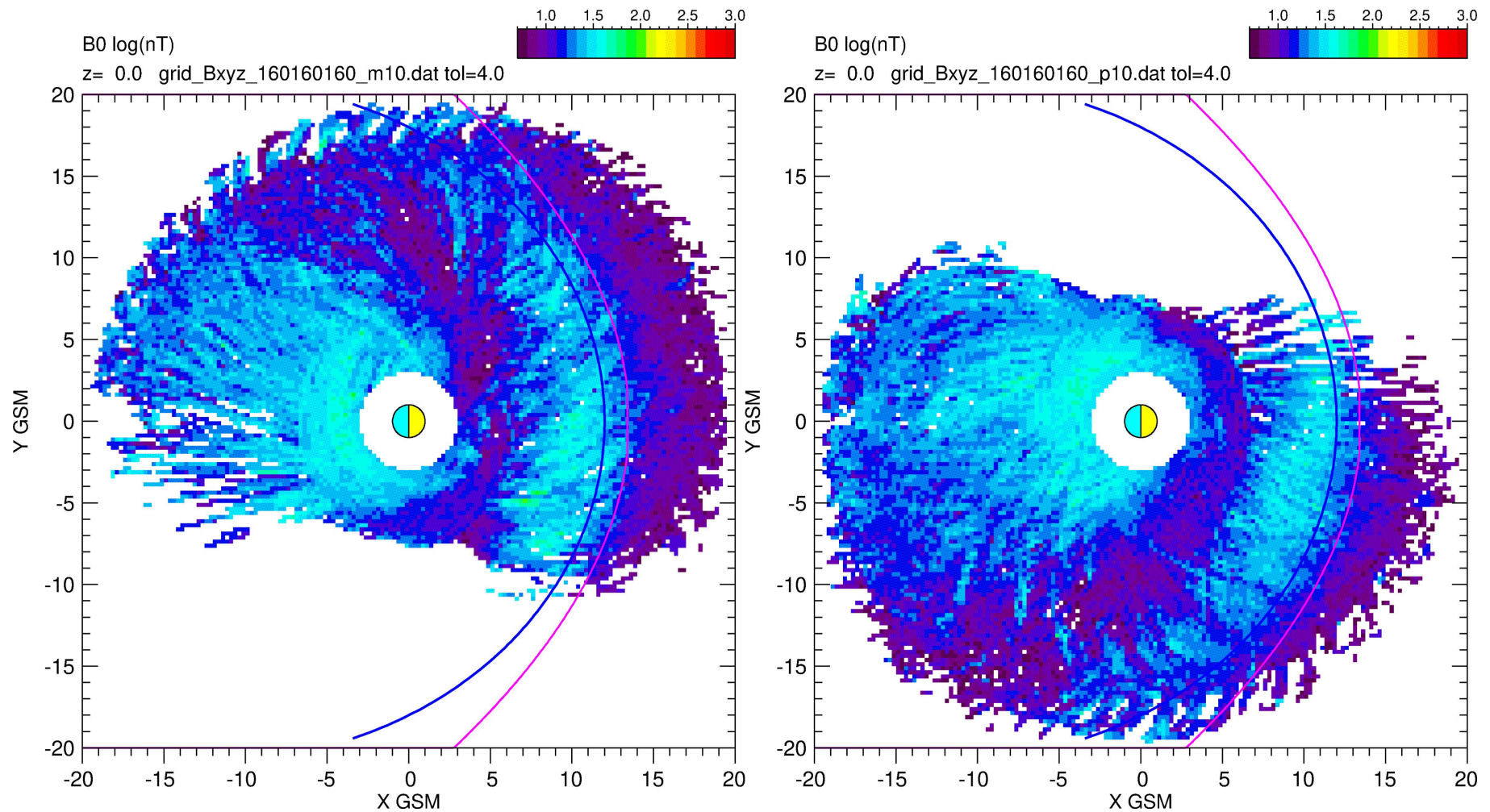
a) Test de la méthode

- élimination des tétraèdres dégénérés (élongation planarity > 0.9)
- limitation de la taille du tétraèdre : choix d'une limite sur les inter-distances
 $D_{\max} = 10\,000\text{ km}$
- retrait du champ IGRF avant calcul



VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

b) Champ résiduel après retrait de l'IGRF



VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

c) deux manière pour calculer J

1- prendre tous les tétraèdres sélectionnés et calculer J et div(B)



Utilisation de la base *FGM_POS_aligned_database*

2 - prendre les valeurs de B données par la grille 3D du champ moyen
Et définir un tétraèdre virtuel par

$$P1(i, j, k), P2(i + 1, j, k), P3(i, j + 1, k), P4(i, j, k + 1)$$



Utilisation de la base *FGM_POS_database*

Avantages :

- tétraèdre orthogonal
- tétraèdre de petite taille : la taille du maillage
- base de donnée plus grande (ne nécessite pas de groupe de 4 satellites)

VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

d) résultats pour la méthode 1

J_0 (nA/m²)



Y ↑

X →

$\theta = -10^\circ$

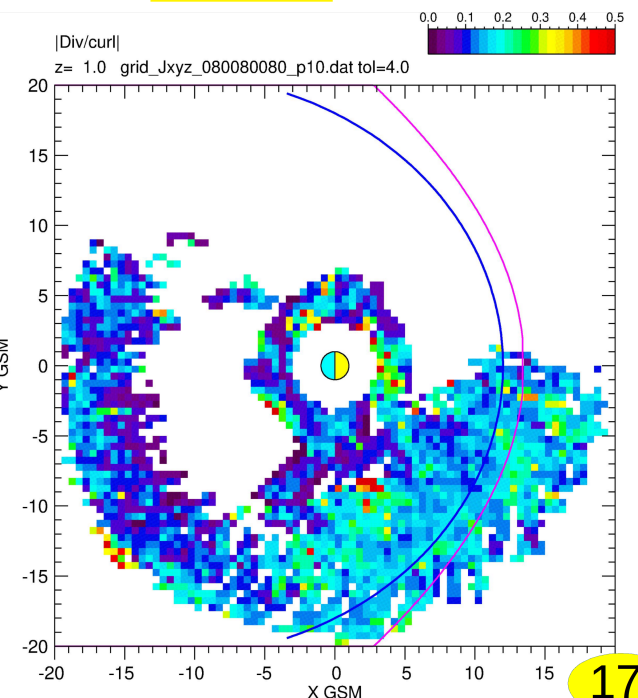
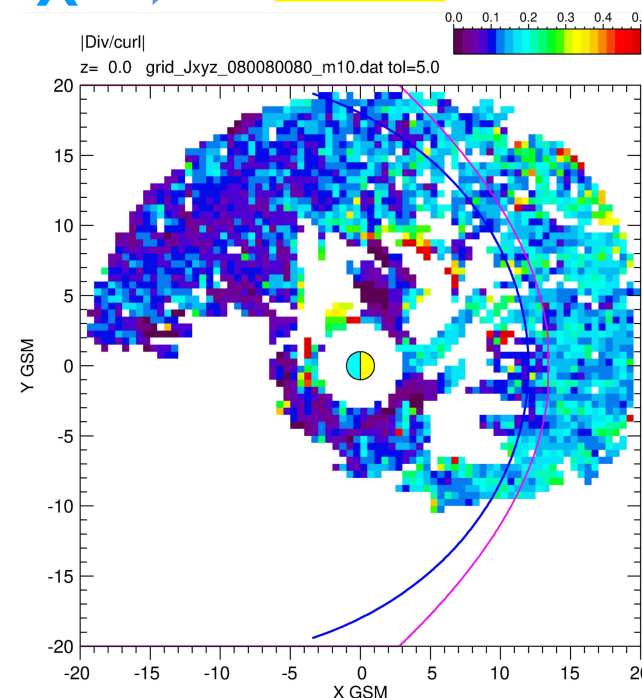
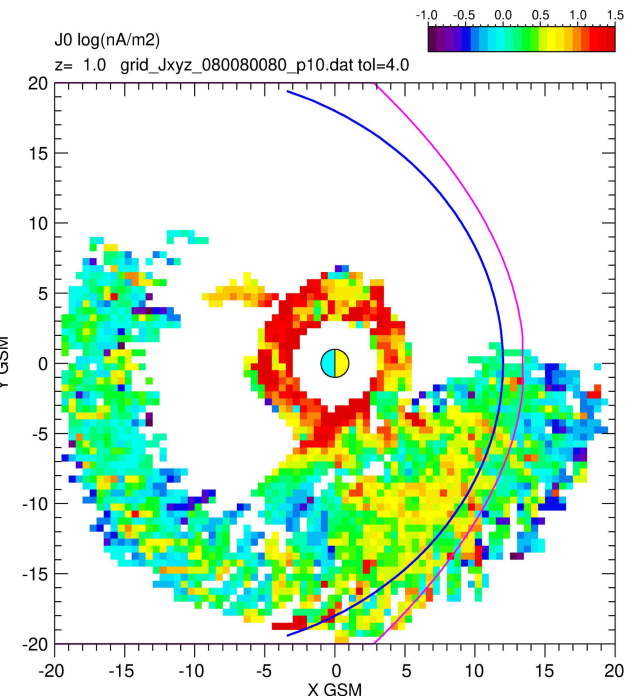
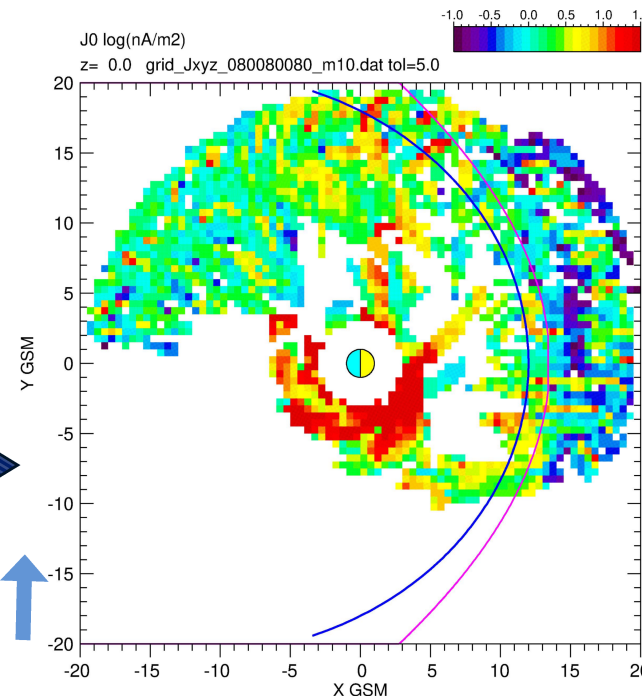
$\theta = +10^\circ$

- Intensité du ring current $\sim 5\text{-}20$ nA/m²

- position autour de 3-8 RE

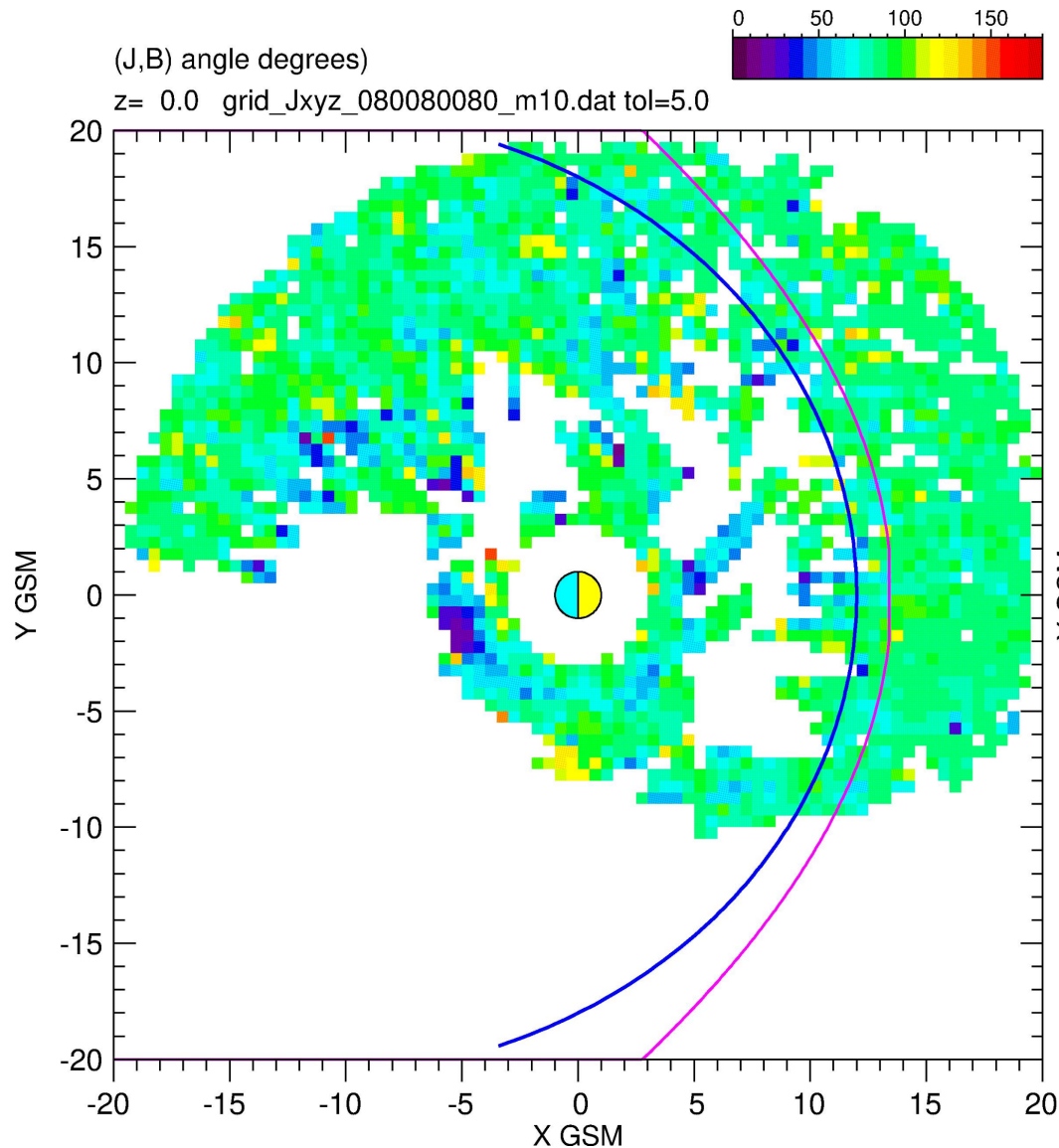
- Div/Curl ~ 0.1

Div/Curl



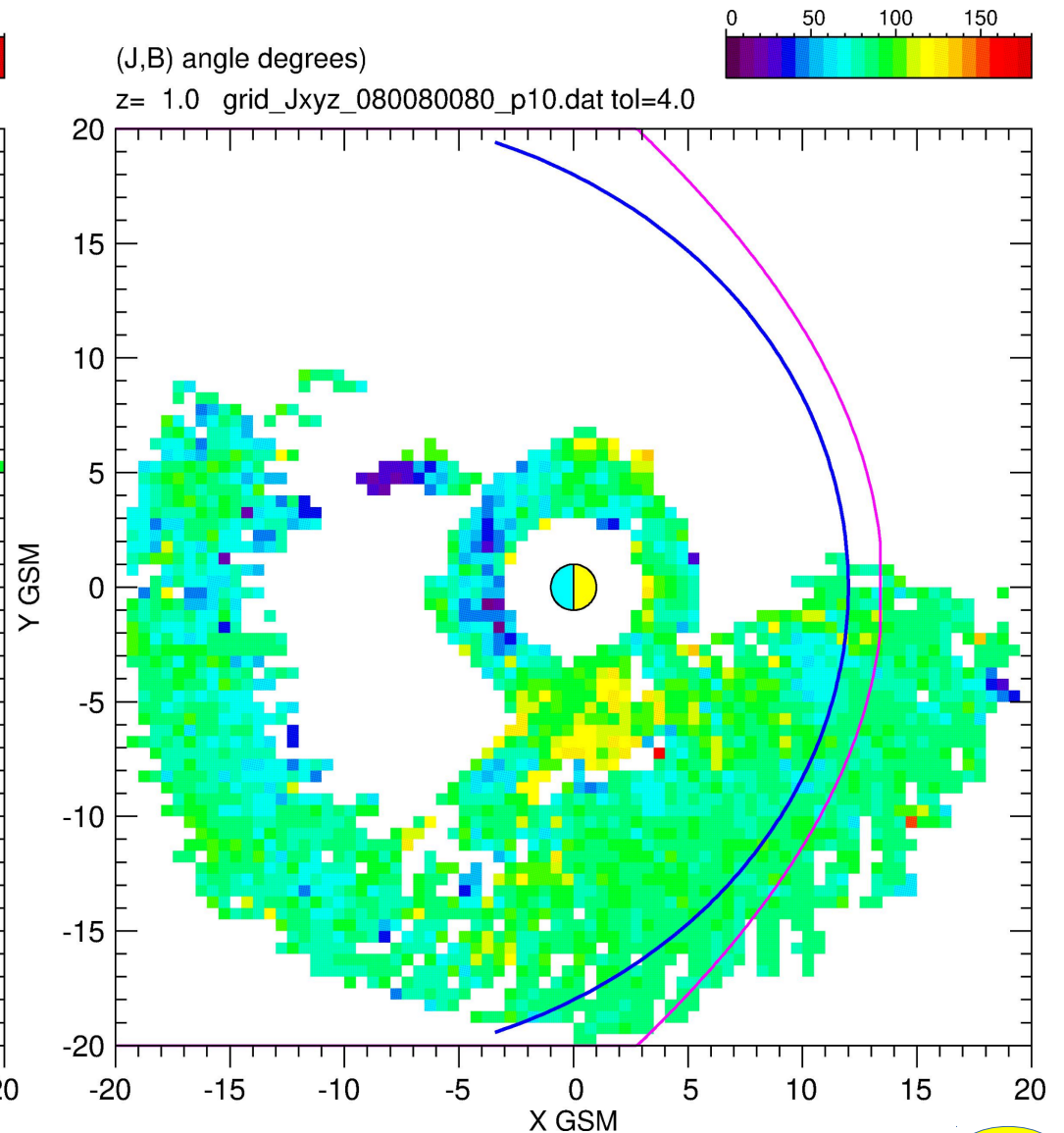
VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

$\theta = -10^\circ$



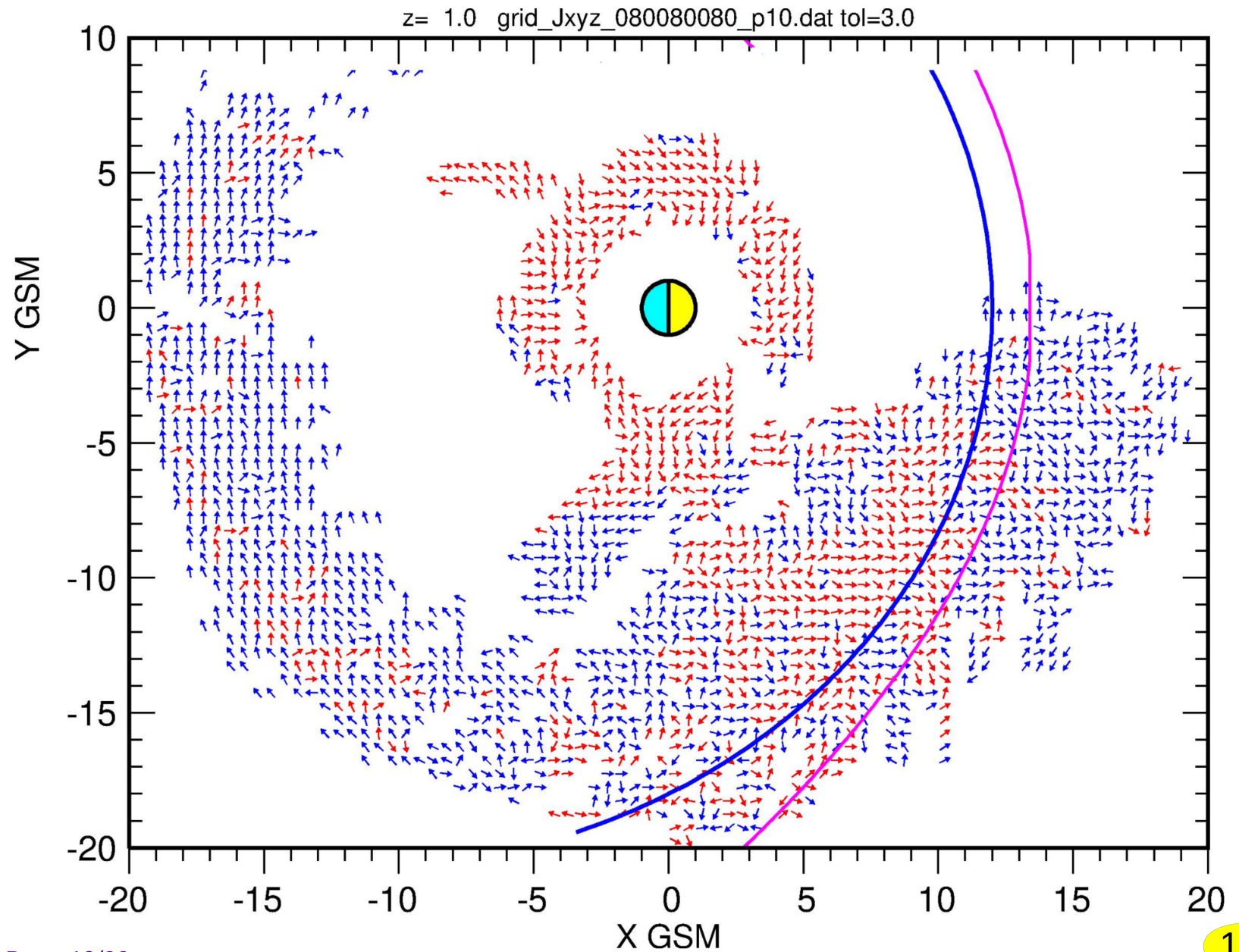
e) angle (J,B) par la méthode 1

$\theta = +10^\circ$

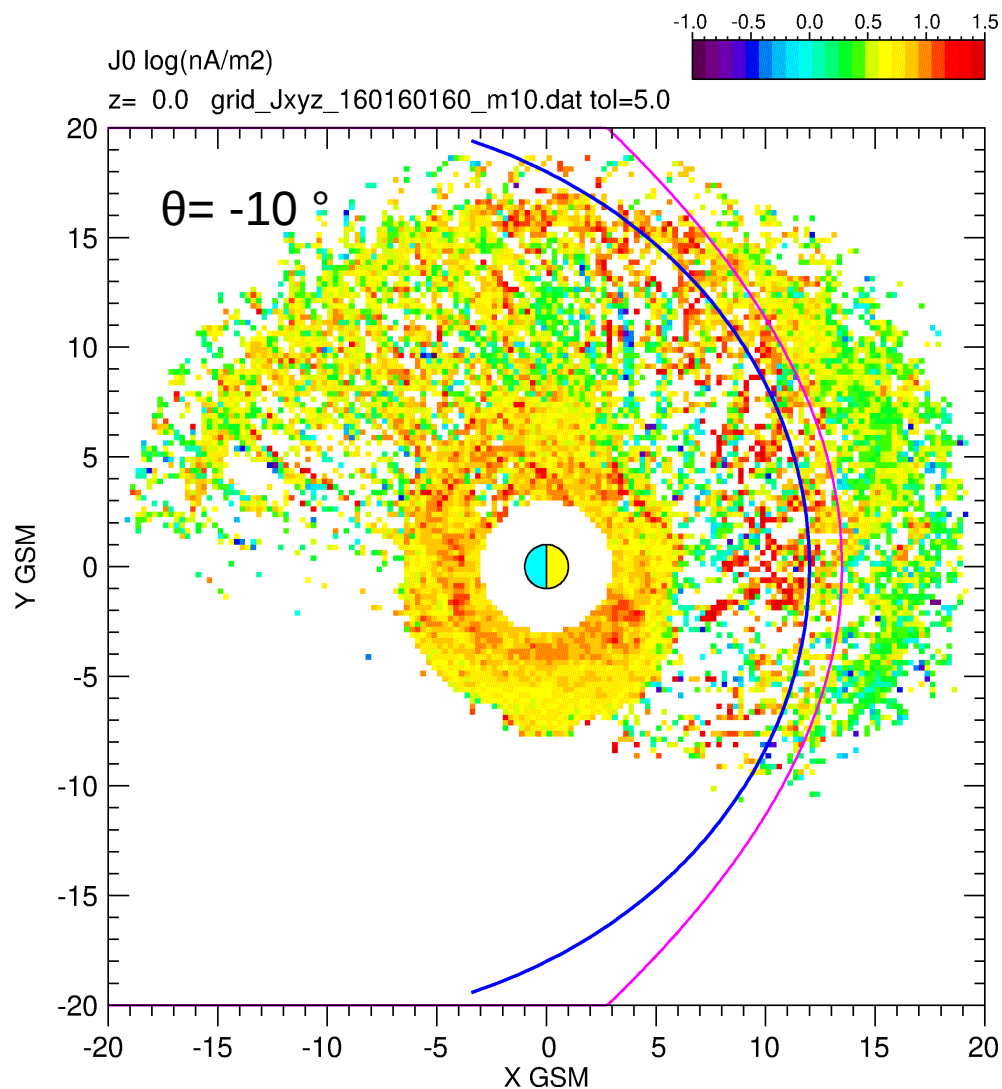


VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

f) direction de J par la méthode 1



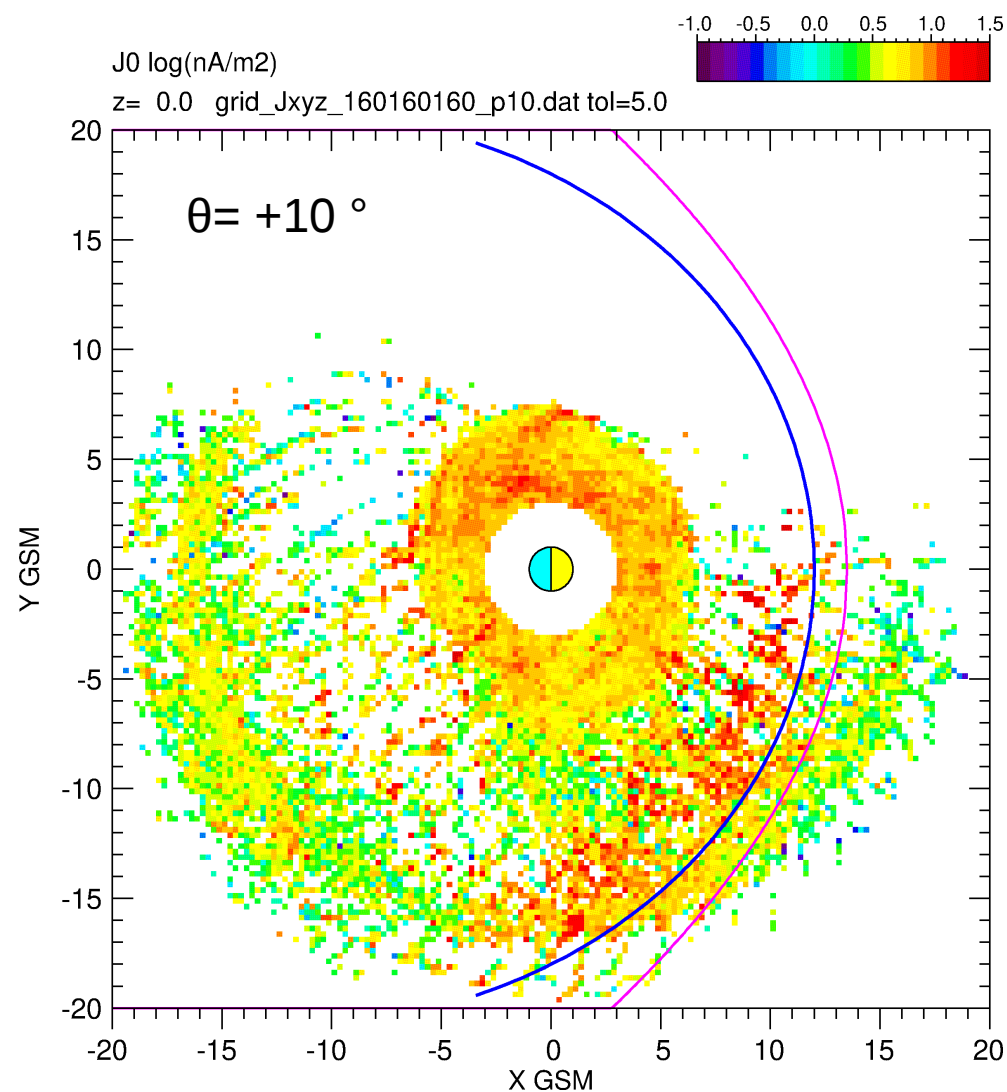
VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE



- Intensité du ring current $\sim 5\text{-}20 \text{ nA/m}^2$
- position autour de 3-8 RE



f) résultats pour la méthode 2



- Ring current mieux défini par cette méthode

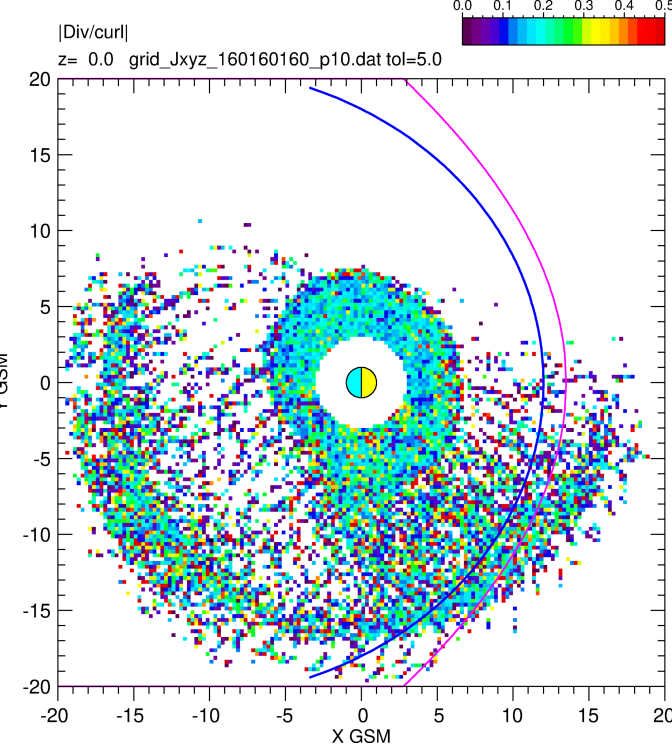
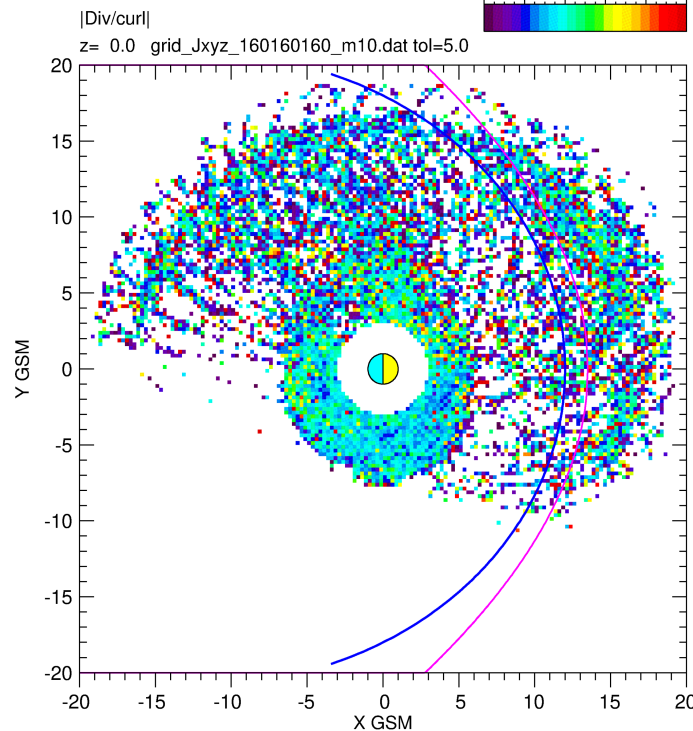
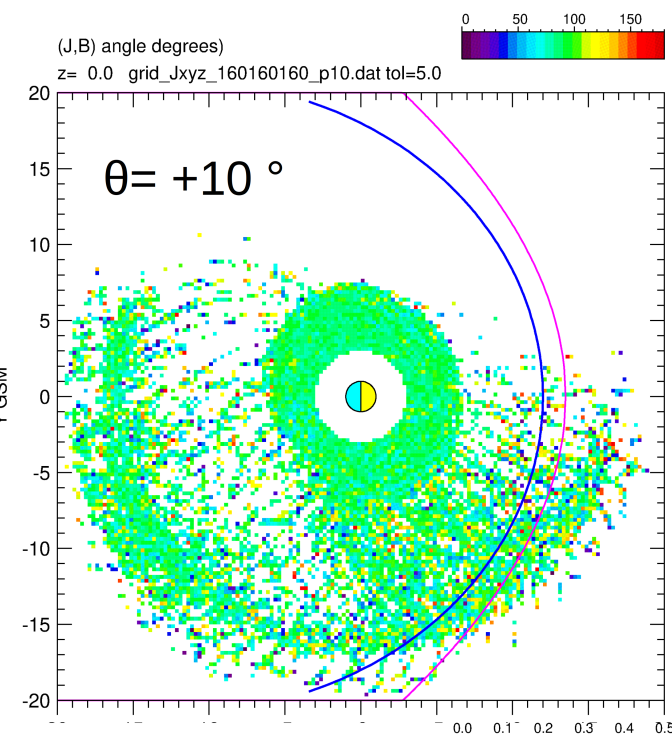
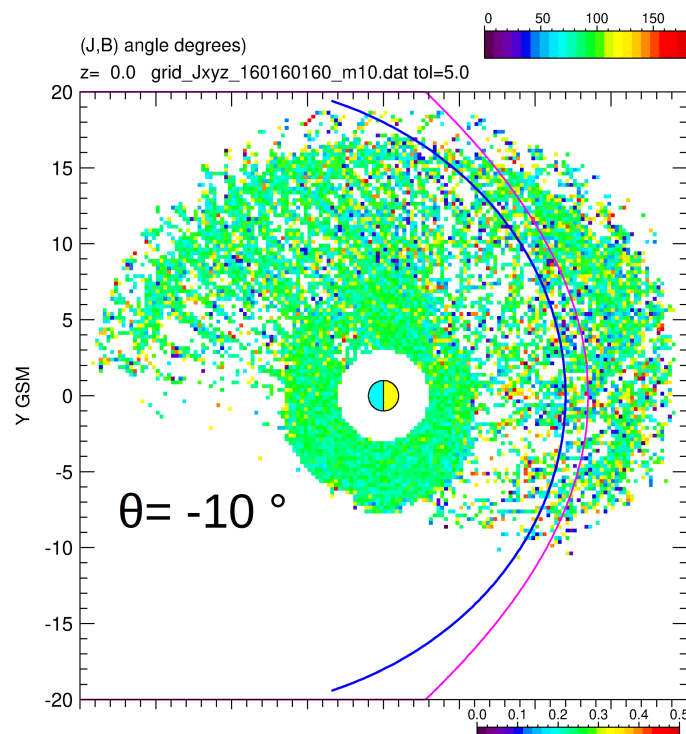
VIII – J, ROTATIONNEL ET DIVERGENCE

g) résultats pour la méthode 2

(J,B) angle ➡

- $(J,B) \sim 90^\circ$
- $\text{Div/Curl} \sim 0.1 - 0.2$

Div/Curl ➡



X - CONCLUSION

- création d'une base de donnée de B et de P *alignée en temps* (20 ans!)
- logiciel de lecture et de calcul de rot et div de B
- création de grilles 3D de B et de J
- interpolation 3D pour obtenir $B(x,y,z,\theta)$
- possibilité de calculer des lignes de force
- production de cartes de B et J, en module et en direction
- production de cartes des lignes de champ



Possibilité ultérieure de rajouter d'autres critères que le simple θ



Base de donnée, logiciels et principaux résultats sont disponibles en ligne :

roserv.ddns.net/DATA_JGR



Papier JGR disponible ici :

http://www.scientidev.fr/FTP_server/Publications/Articles/

Index of /DATA_JGR

	Name	Last modified	Size	Description
	Parent Directory		-	
	CLUSTER_20th_all_results.pdf	2021-11-09 03:53	2.2M	
	DATA_PRO/	2021-11-09 19:34	-	
	READ_ME.txt	2021-11-09 04:10	10K	
	SOFT_PRO.tar	2021-11-09 03:24	10M	
	WORK_PRO.tar.gz	2021-11-09 03:52	264M	