

# Paradoxe dans la dynamo du Soleil

Croissance exponentielle du champ magnétique en contradiction avec la conservation de l'hélicité

Recherche menée par: *Sarah Piché Perrier*  
Sous la direction de: *Paul Charbonneau et Noe Lugaz*

## Paradox in the Sun's dynamo

Exponential magnetic field growth contradicts conservation of helicity

Research conducted by: *Sarah Piché Perrier*

Under the direction of: *Paul Charbonneau and Noe Lugaz*

# Déroulement de la présentation:

1. Contexte Général
2. Le Paradoxe
3. Pistes de solutions
4. Outils disponibles
5. Pipeline numérique
6. État actuel
7. Résultats attendus
8. Références

# Course of the presentation:

1. General background
2. The Paradox
3. Possible solutions
4. Available tools
5. Digital pipeline
6. Current status
7. Expected results
8. References

# 1

# Contexte général

Le **Soleil** est l'étoile qui permet le maintien de la vie sur Terre. Les mouvements des fluides à l'intérieur du Soleil génèrent un champ électromagnétique, via une **dynamo**, qui régit son activité. Cette activité est observable par une croissance et une décroissance cyclique de l'intensité du champ magnétique sur une période d'environ 11 ans, au cours de laquelle il y a une inversion des pôles magnétiques du Soleil. C'est ce qu'on appelle le **cycle solaire**. La branche de la physique qui étudie les phénomènes liés aux mouvements des fluides conducteurs est la magnétohydrodynamique (**MHD**). Lorsque les fluides s'apparentent à des **conducteurs parfaits** (conductivité électrique  $\sigma \rightarrow \infty$ ), comme c'est le cas pour le Soleil, il s'agit de **MHD idéale**.

# 1

# General background

The **Sun** is the star that sustains life on Earth. The movement of fluids inside the Sun generates an electromagnetic field, via a **dynamo**, which governs its activity. This activity can be seen in the cyclical rise and fall of the magnetic field intensity over a period of around 11 years, during which there is a reversal of the Sun's magnetic poles. This is known as the **solar cycle**. The branch of physics that studies phenomena linked to the movement of conducting fluids is magnetohydrodynamics (**MHD**). When fluids are like **perfect conductors** (electrical conductivity  $\sigma \rightarrow \infty$ ), as is the case with the Sun, this is **ideal MHD**.

## 2

# Le Paradoxe

**Hélicité magnétique:** indique le taux de torsion des lignes de champ magnétique, ainsi que la présence ou l'absence de connexions entre elles. C'est une quantité indirecte, calculée en reconstruisant mathématiquement le champ magnétique.

En **MHD idéale**, l'hélicité magnétique est une **quantité conservée**. Sa valeur totale dans un volume doit donc demeurer constante.

$$\mathcal{H}_B = \int_{V_{dynamo}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \, dV = cte \quad , MHD \text{ idéale } (\sigma \rightarrow \infty) \quad (1)$$

Avec **A** le potentiel vecteur et le champ magnétique  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$  (2)

Le produit scalaire entre **A** et **B** doit demeurer fixe, mais les processus dynamos font croître et décroître exponentiellement **A** et **B** durant le cycle solaire. Ceci contredit l'équation 1 et représente un paradoxe de la dynamo solaire.

## 2

# The Paradox

**Magnetic helicity:** indicates the twisting rate of magnetic field lines, and the presence or absence of connections between them. It's an indirect quantity, calculated by mathematically reconstructing the magnetic field. In **ideal MHD**, magnetic **helicity** is a conserved quantity. Its total value in a volume must therefore remain constant.

$$\mathcal{H}_B = \int_{V_{dynamo}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \, dV = cte \quad , ideal MHD \, (\sigma \rightarrow \infty) \quad (1)$$

With **A** the vector potential and the magnetic field  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$  (2)

The scalar product between **A** and **B** should remain fixed, but dynamo processes cause **A** and **B** to grow and decay exponentially during the solar cycle. This contradicts *equation 1* and represents a solar dynamo paradox.

Forme observée avec le Soleil

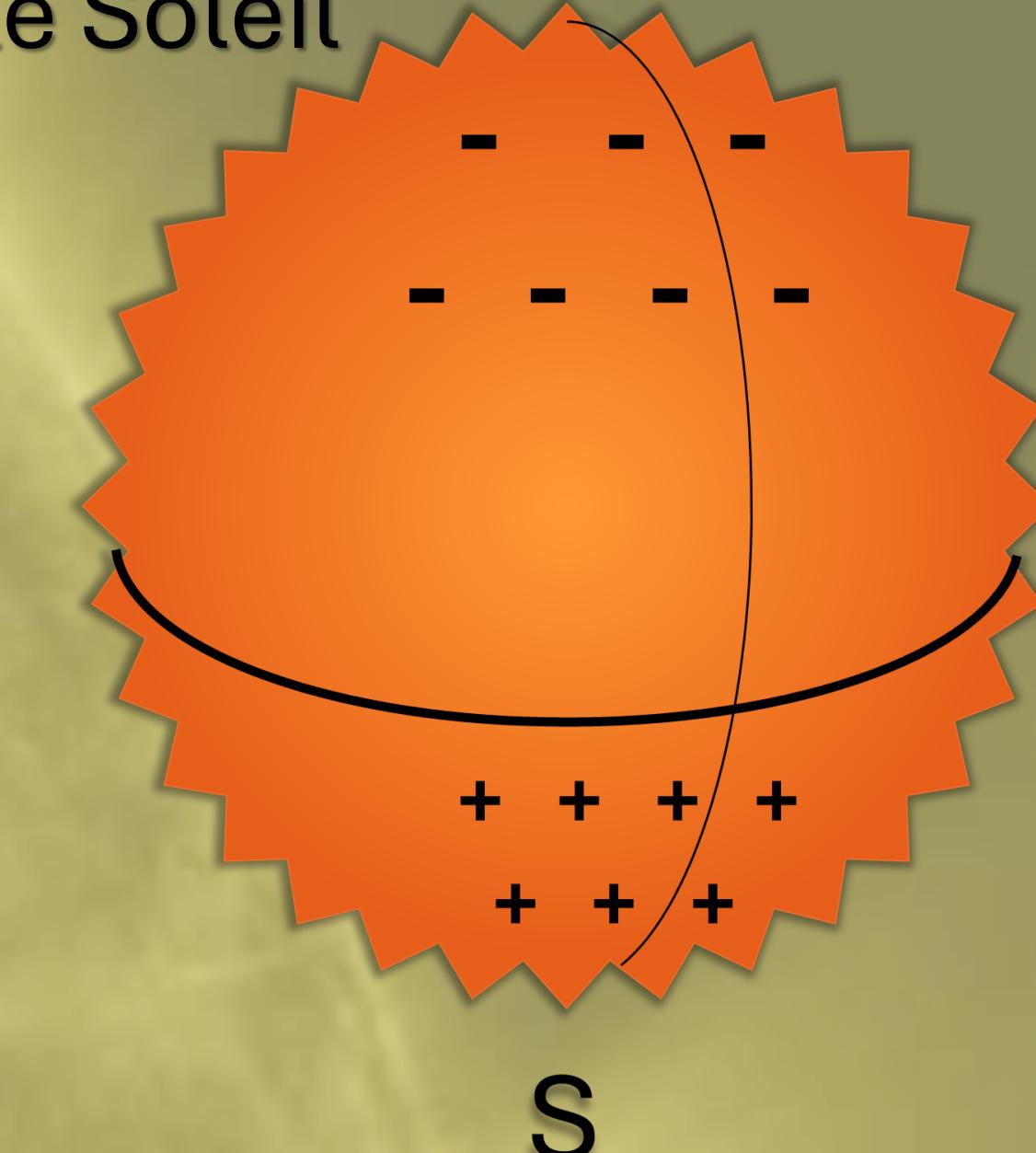


➤Figure 1. Exemple d'hélicité magnétique, avec  $\Phi$  le flux magnétique et  $T$  la torsion totale. Crédit: Takashi Sakurai

# 3

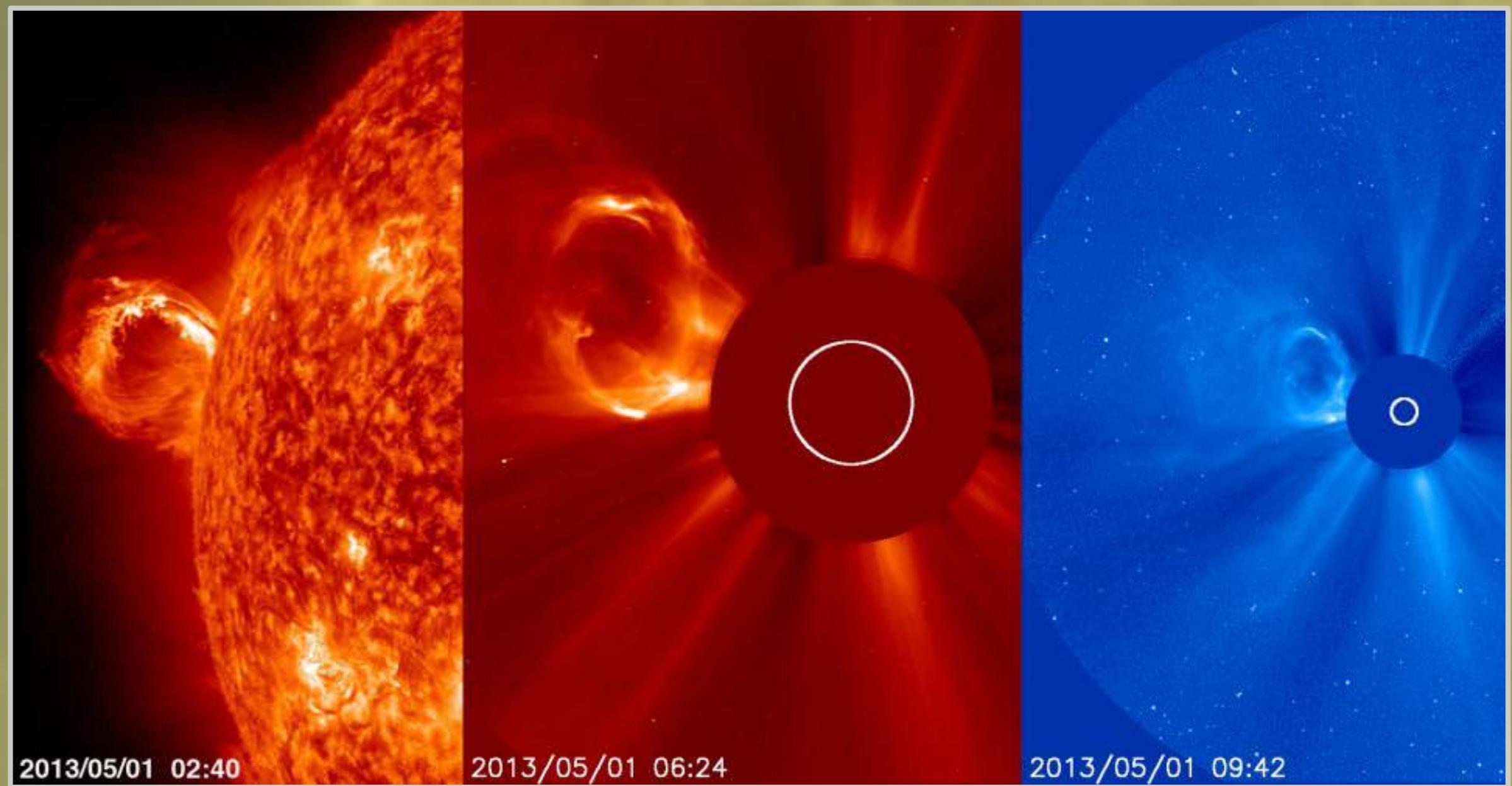
# Pistes de solutions

Tendance hémisphérique de N l'hélicité pour le Soleil



## Contraintes:

- 1) Produire autant d'hélicité positive que négative lors des variations de **A** et/ou **B**, afin de conserver un bilan global d'hélicité constant.
- 2) Conserver la tendance de signe hémisphérique observée pour l'hélicité



➤Figure 2. Image de SDO, SOHO et LASCO de l'EMC du 1<sup>e</sup> mai 2013. Crédit: NASA/ESA

## Solution proposée:

Expulser hors du Soleil l'hélicité de signe opposé en surplus via les **Éjections de Masse Coronale (EMCs)** :

- Éjection de plasma emprisonné dans une structure magnétique qui prend rapidement de l'expansion
- Propulse 5 à 50 milliards de tonnes de plasma
- Voyage à une vitesse allant de 50 à 1200 km s<sup>-1</sup>

# 3

# Possible solutions

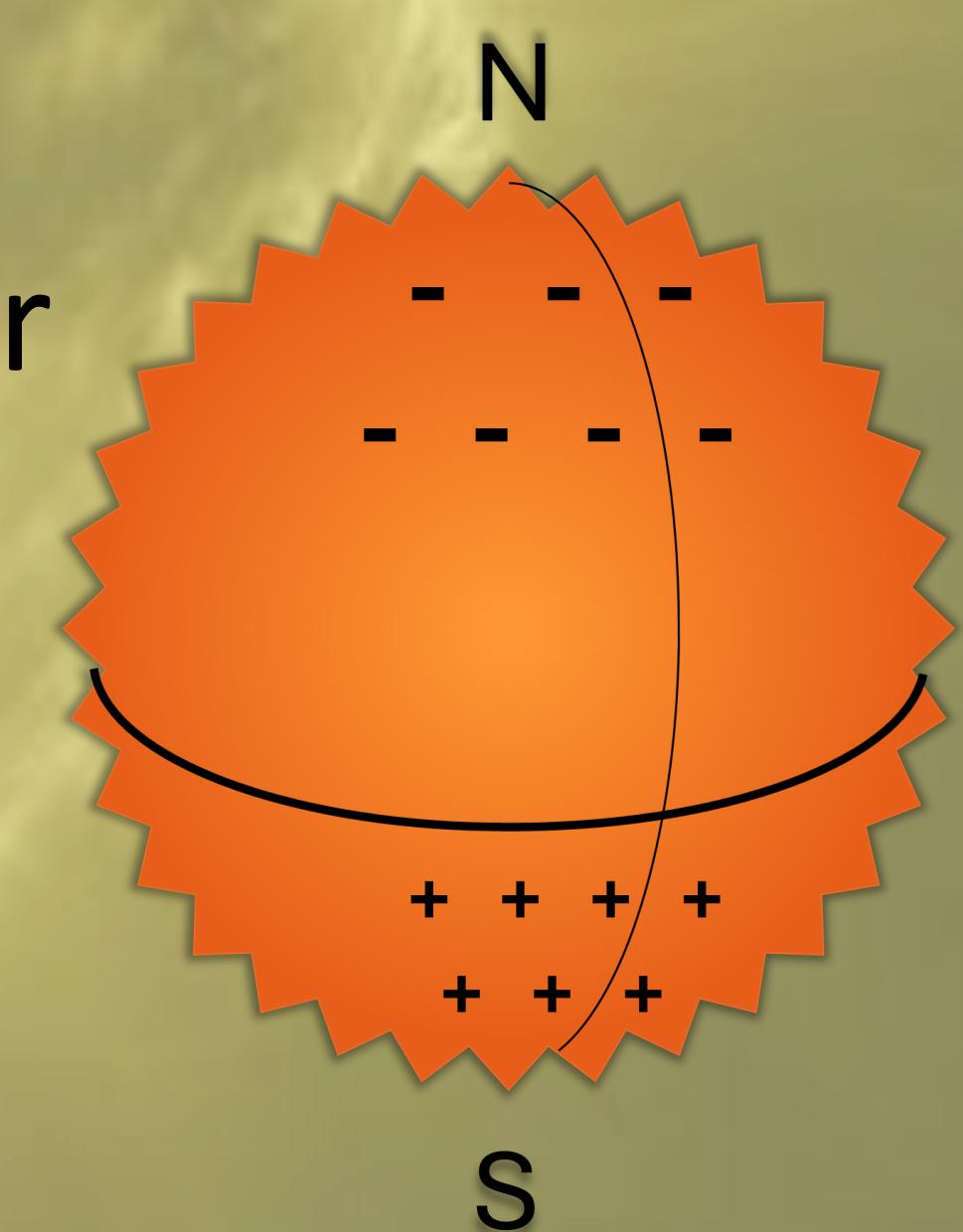
## Constraints:

- 1) Produce as much positive as negative helicity during variations in **A** and/or **B**, in order to keep the overall helicity balance unchanged.
- 2) Maintain the hemispheric sign trend observed for helicity.

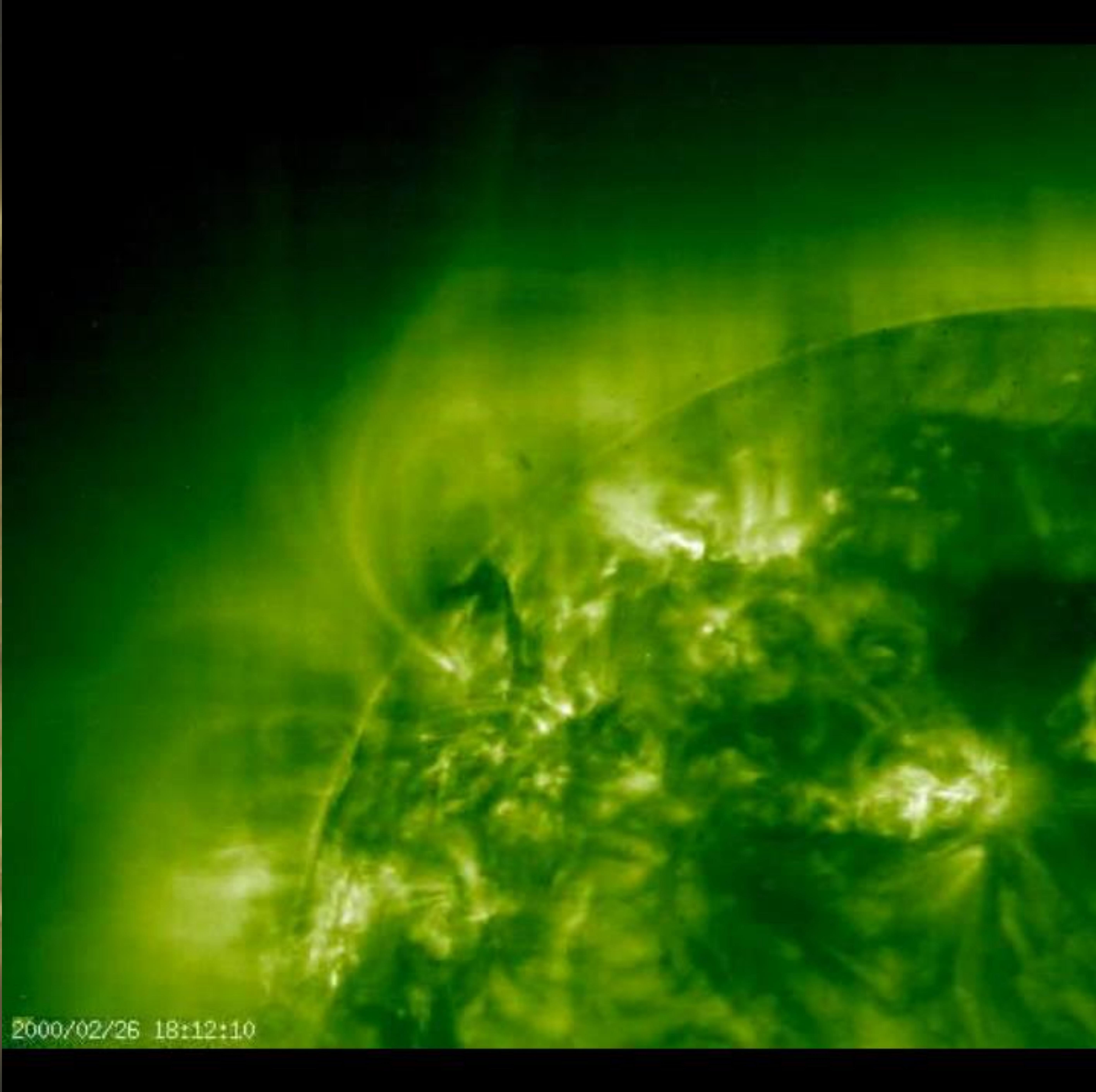
## Proposed solution:

Expel excess opposite-sign helicity from the Sun via **Coronal Mass Ejections (CMEs)**:

- Ejection of plasma trapped in a rapidly expanding magnetic structure
- Propels 5 to 50 billion tonnes of plasma
- Travels at speeds ranging from 50 to 1200 km s<sup>-1</sup>



Hemispherical trend of helicity for the Sun



Montage vidéo d'une éjection de masse coronale capté par le satellite SOHO le 27 février 2000.

- Segment vidéo 1:  
*Complex filament eruption - EIT 195A*  
(Feb. 27 2000)
- Segment vidéo 2:  
*Lightbulb shaped CME - LASCO C2*  
(Feb. 27 2000)
- Segment vidéo 3:  
*Lightbulb shaped CME - LASCO C3*  
(Feb. 27 2000)

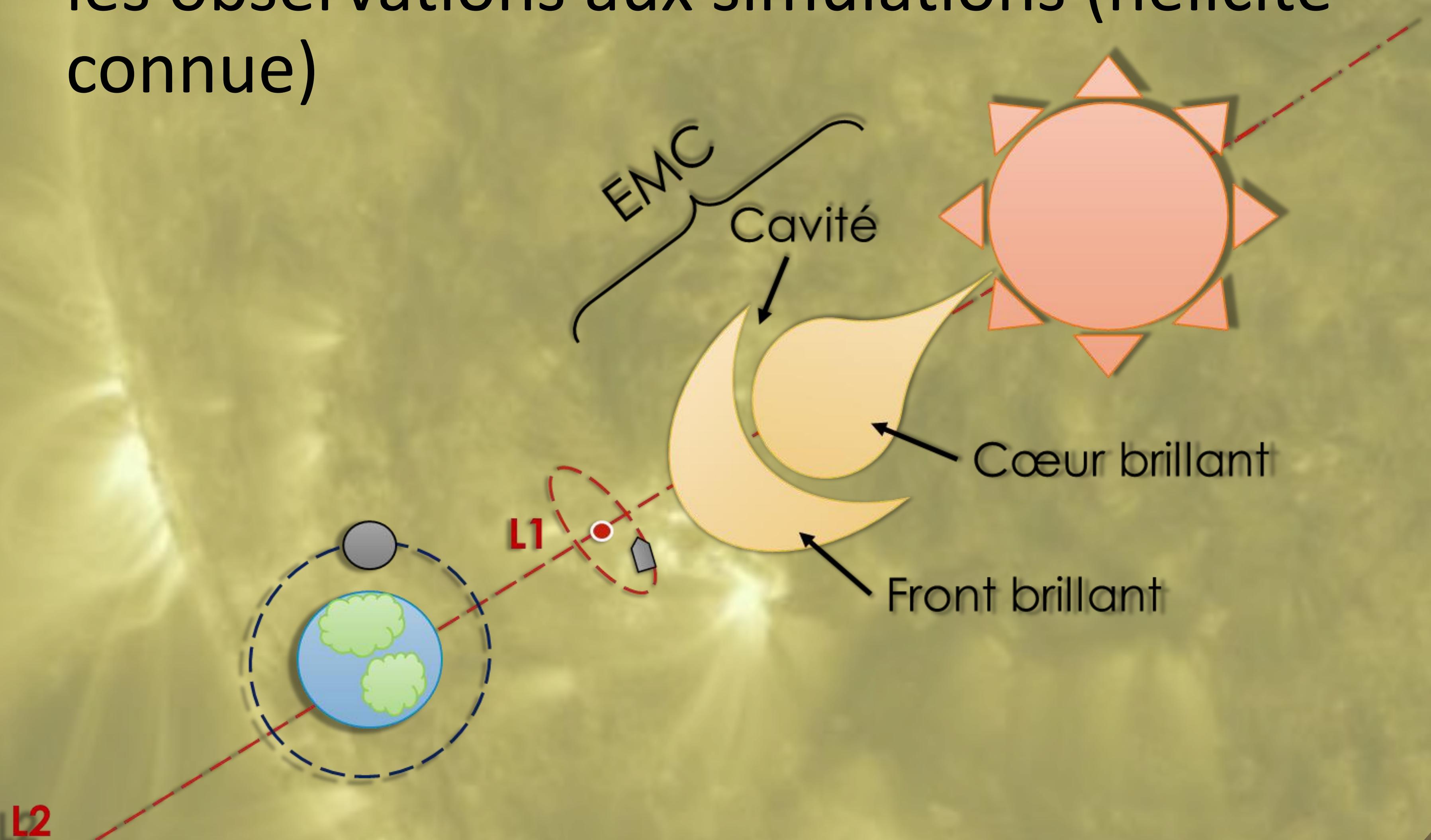
Credit: Juan Carlos Garcia, Source:  
<https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/Movies/flares.html>

Montage vidéo: Sarah Piché Perrier

## 4

# Outils disponibles

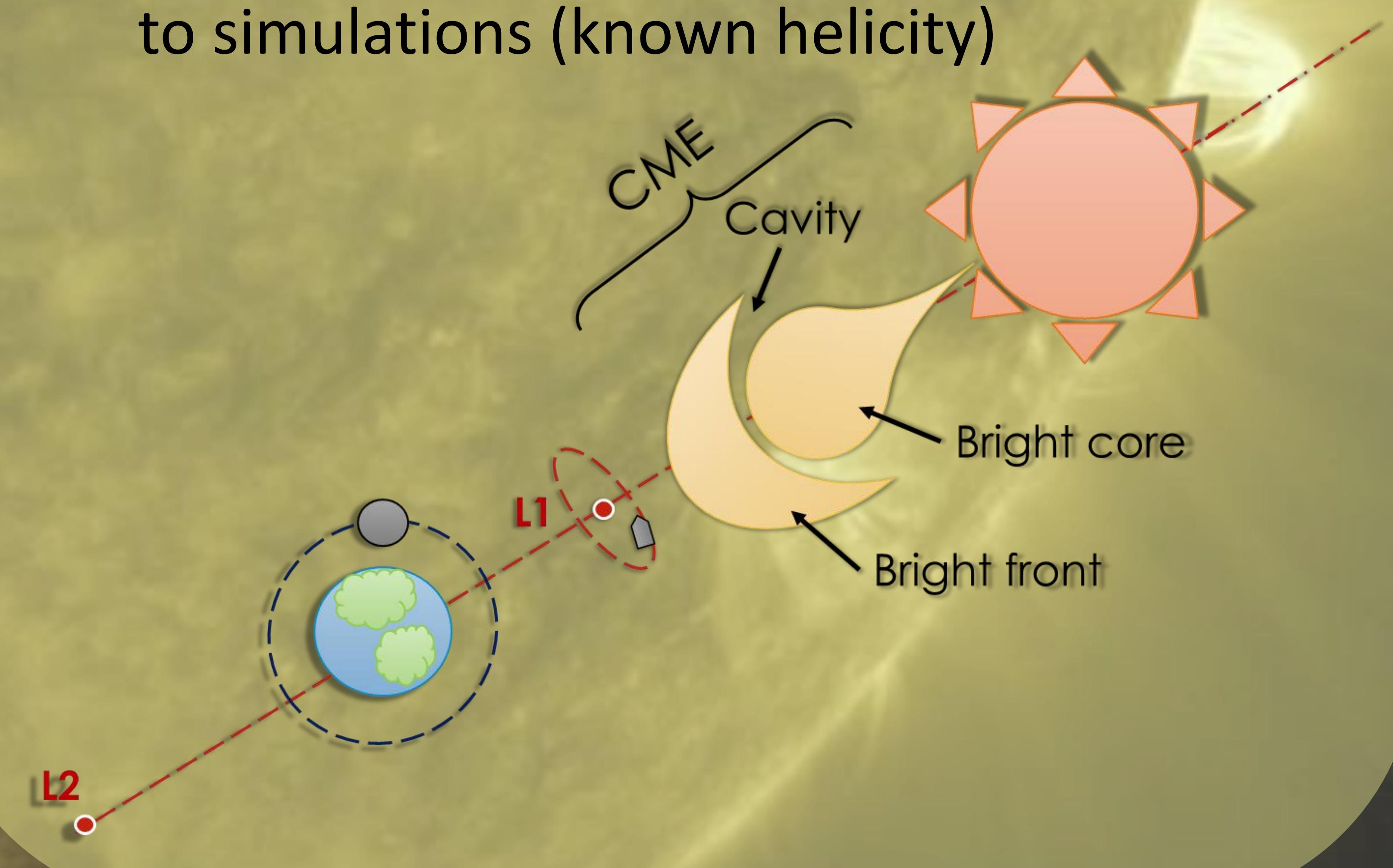
- Quelques satellites en orbitent à un point fixe par rapport à la Terre (ex. ACE)
  - données *in situ*
- Simulations numériques d'EMCs à la position spatiale des satellites
- Pipeline numérique permettant de relier les observations aux simulations (hélicité connue)



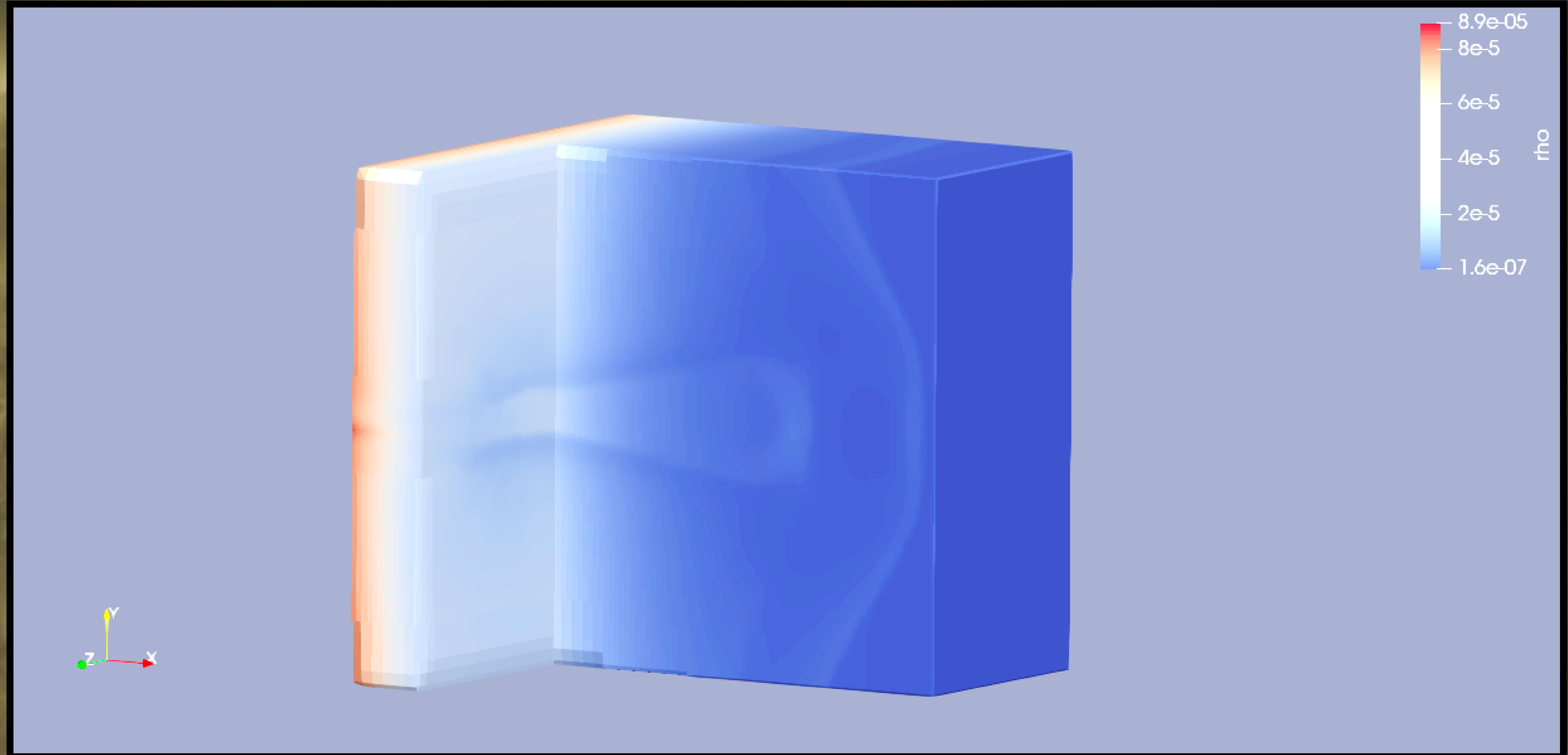
## 4

# Available tools

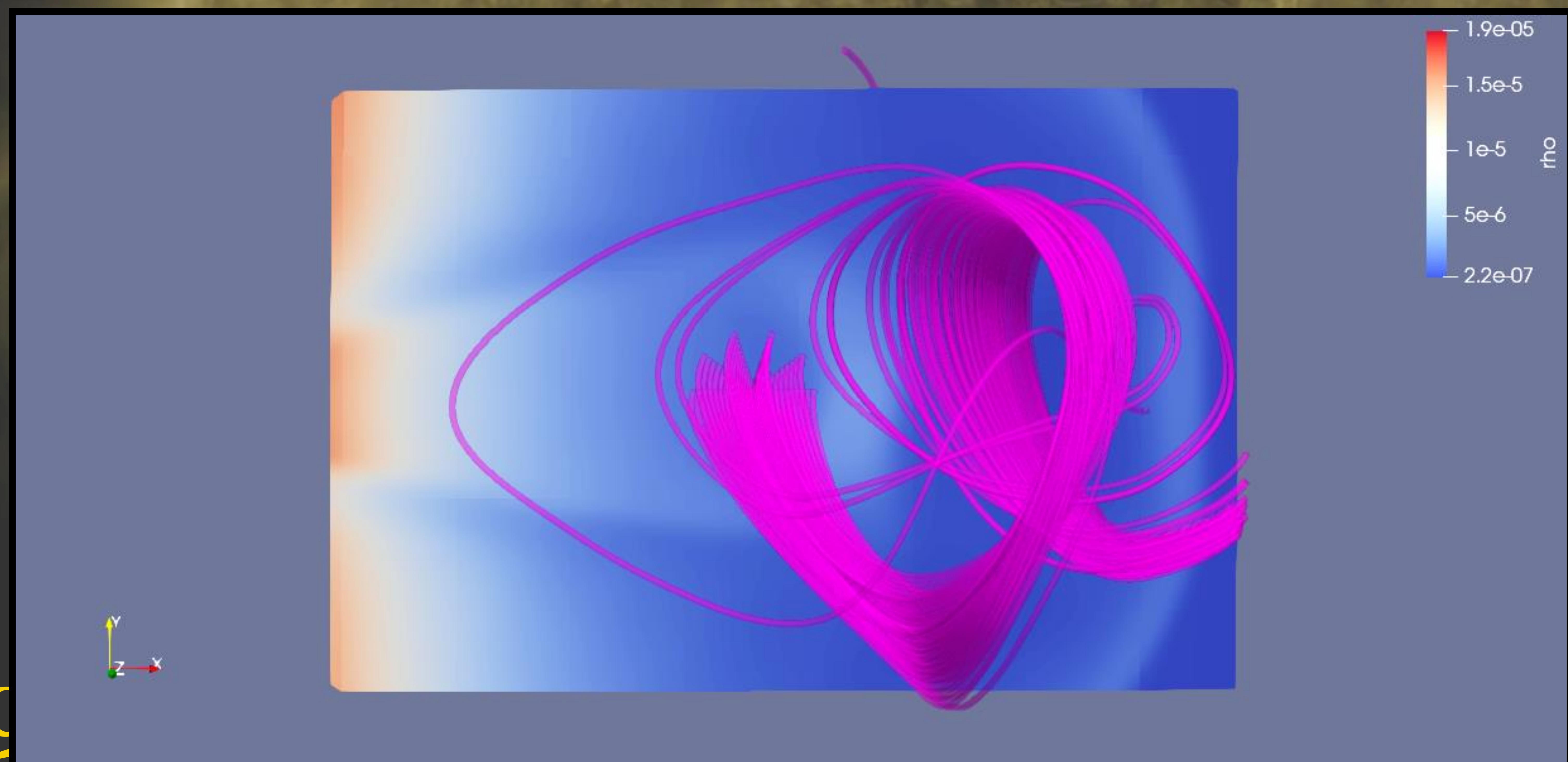
- Some satellites orbiting at a fixed point relative to the Earth (e.g. ACE)
  - *in situ* data
- Numerical simulations of CMEs at the satellites' spatial position
- Numerical pipeline linking observations to simulations (known helicity)



➤Figure 3. Visualisation de la densité de la sortie de simulation *thin1* à l’itération 215. Crédit: Henri Lamarre



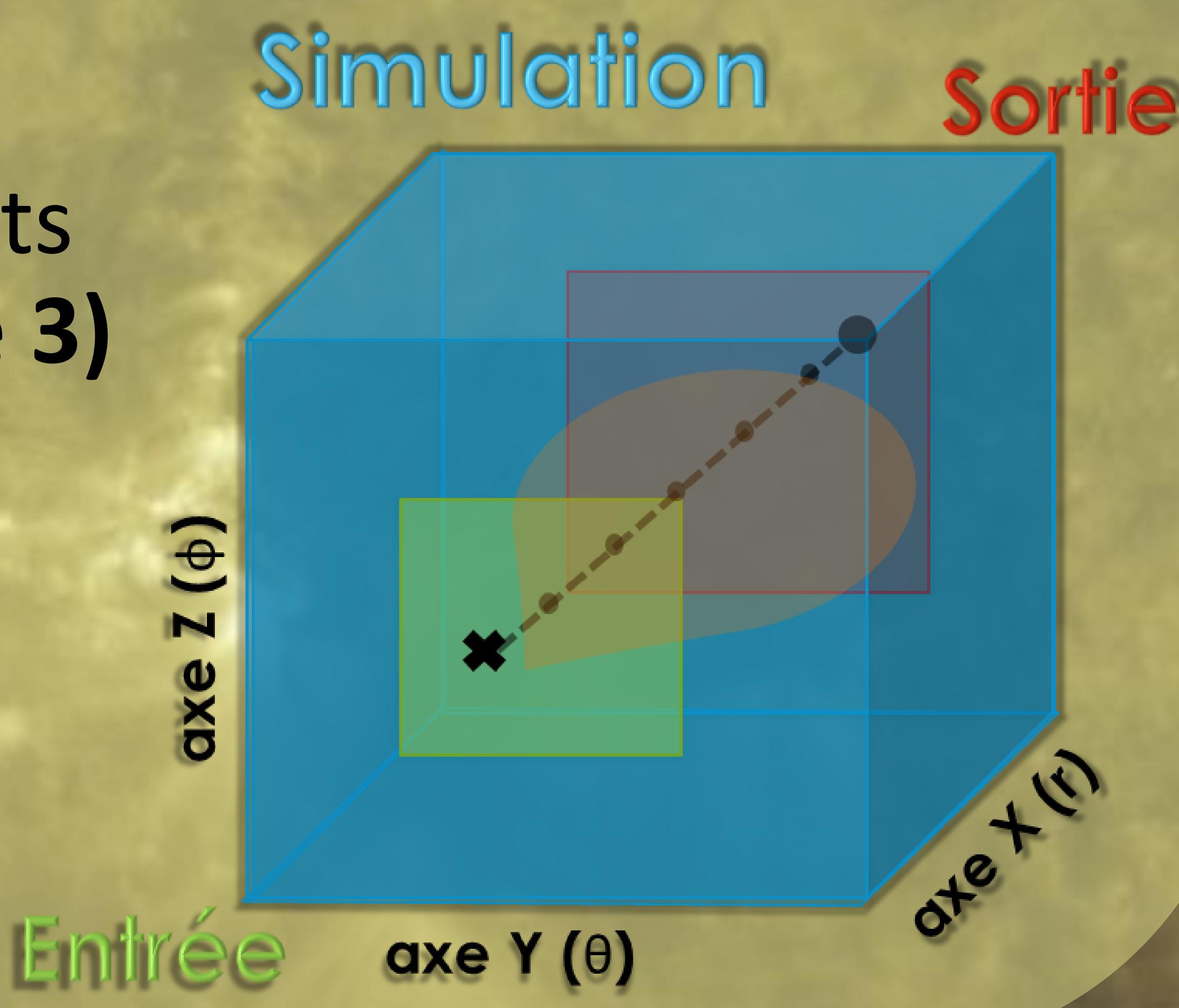
➤Figure 4. Visualisation des lignes du champ magnétique  $\mathbf{B}$  (en mauve) partant au centre du cœur brillant de l’EMC dans la sortie de simulation *thin1* à l’itération 215. Crédit: Henri Lamarre



# 5

# Pipeline numérique

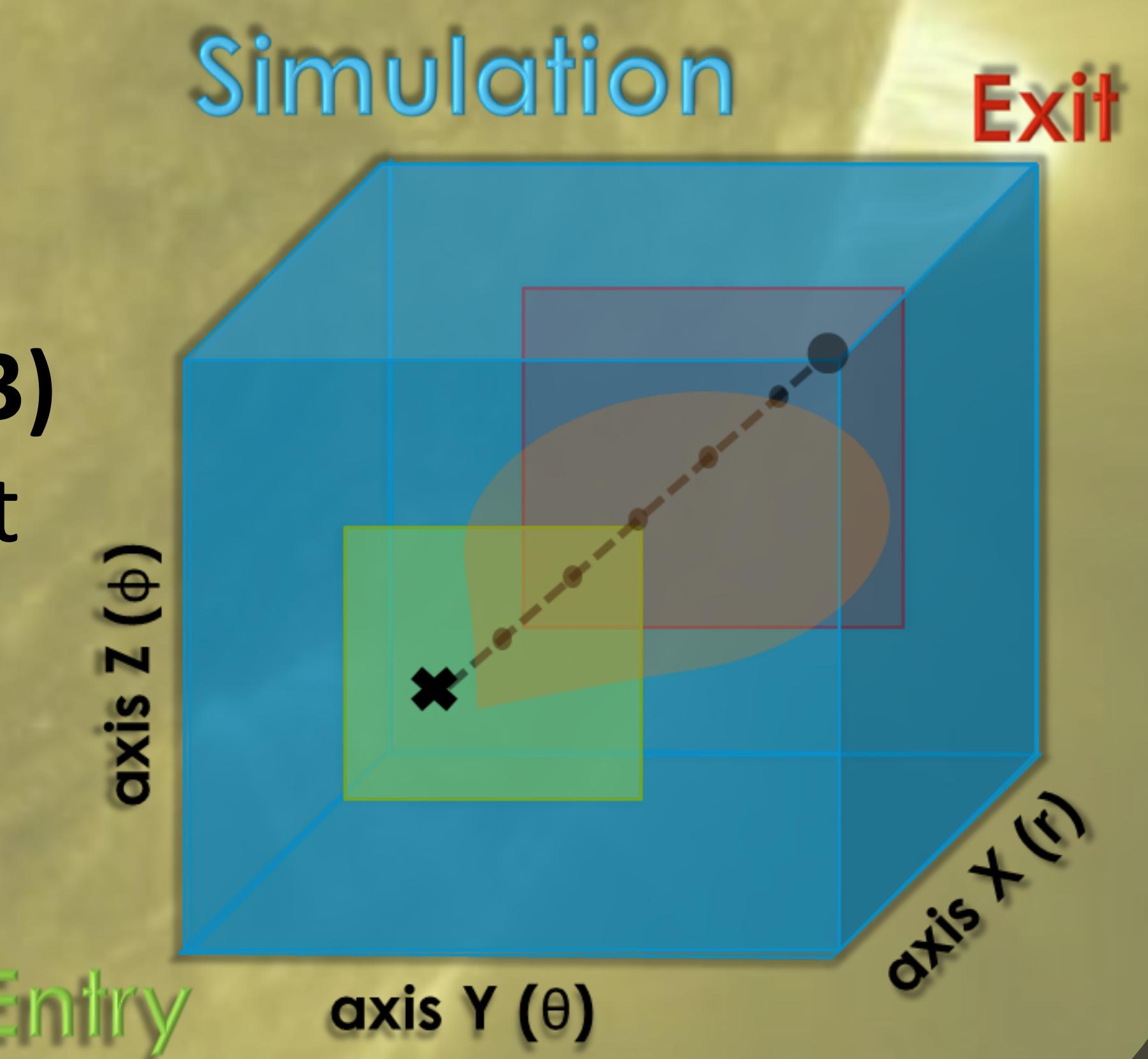
- 1) Modéliser une trajectoire similaire à celle du satellite dans une simulation numérique d'une EMC.
- 2) Optimiser l'ajustement de la trajectoire numérique avec les données réelles (satellite).
- 3) Conserver le résultat de l'optimisation et recommencer les étapes 1) et 2) avec d'autres simulations d'hélicités différentes.
- 4) Comparer les différents résultats obtenus à l'étape 3) et conserver le meilleur.



# 5

# Digital pipeline

- 1) Model a satellite-like trajectory in a numerical simulation of a CME.
- 2) Optimize the fit of numerical trajectory with real data (satellite).
- 3) Keep the optimization result and repeat steps 1) and 2) with other simulations of different helicity.
- 4) Compare the different results obtained in step 3) and keep the best one.



# 6

# État actuel / Current status

## Accompli:

- Tests sur des données synthétiques
- Bruit gaussien (10-25%)
- $\chi^2$  normalisé de l'ordre de l'unité
- Optimisation avec plusieurs simulations

## À faire:

- Ajustements et début des tests sur les données *in situ*

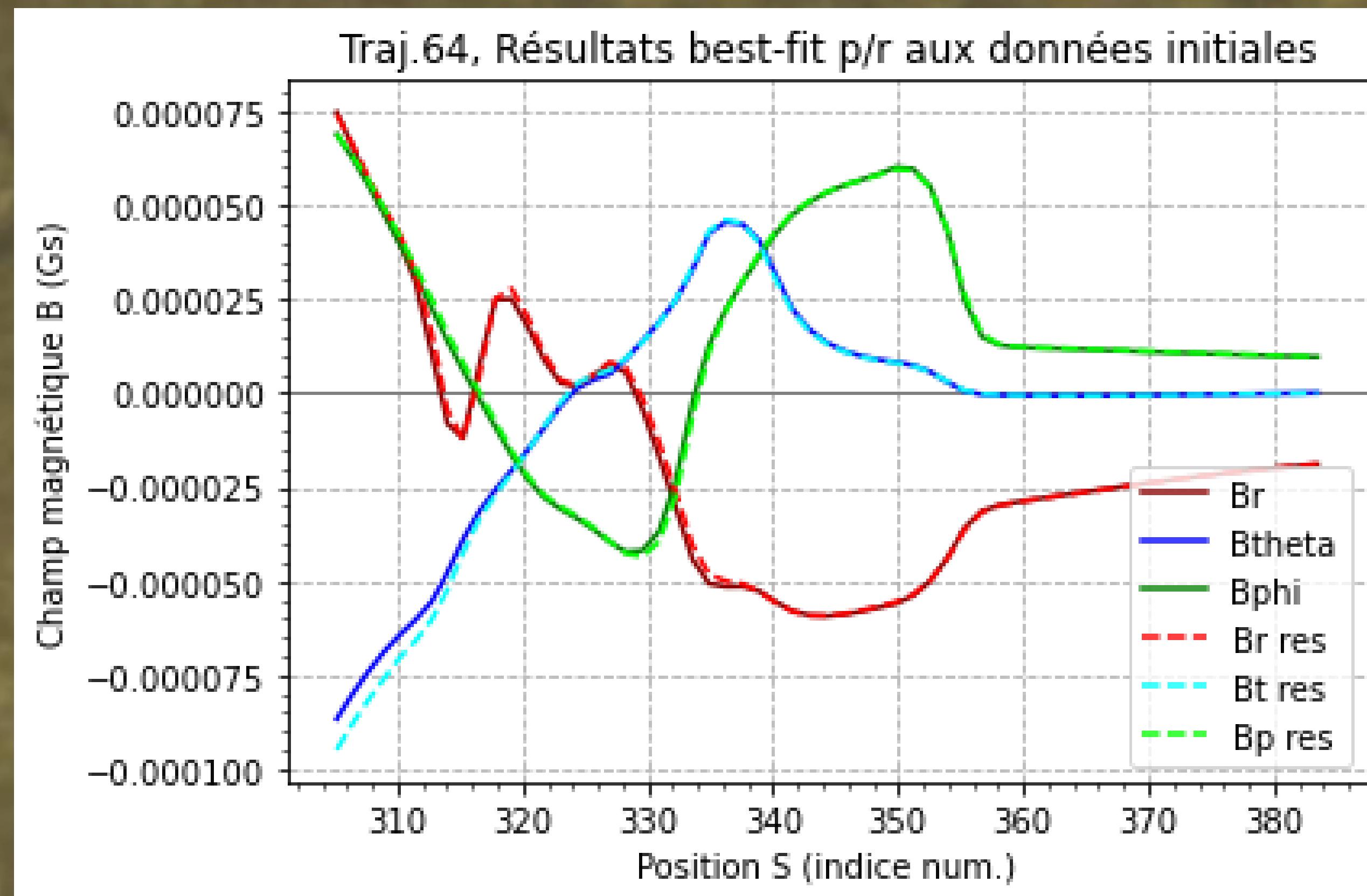
## Accomplished:

- Tests on synthetic data
- Gaussian noise (10-25%)
- $\chi^2$  normalized to the order of unity
- Optimization with multiple simulations

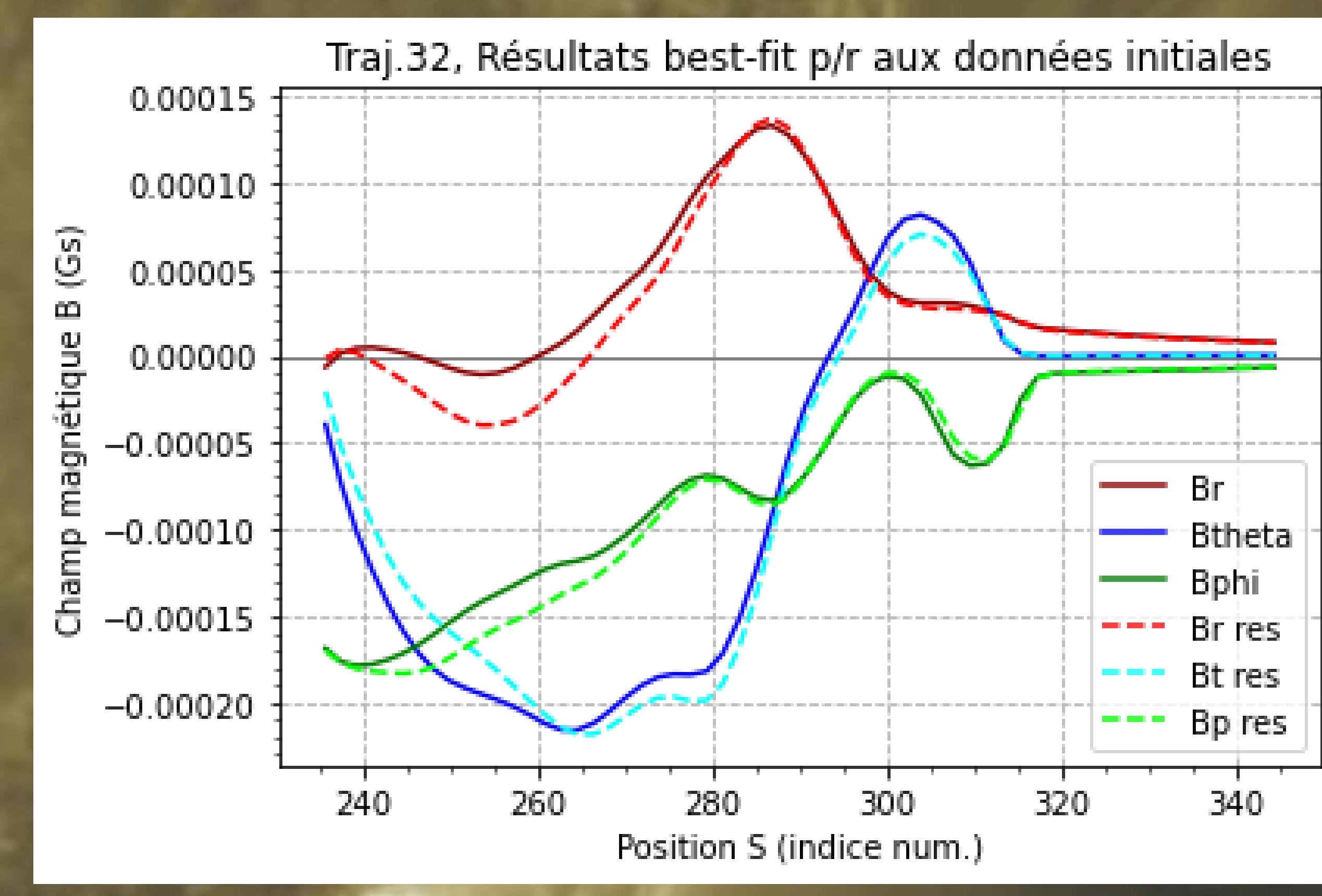
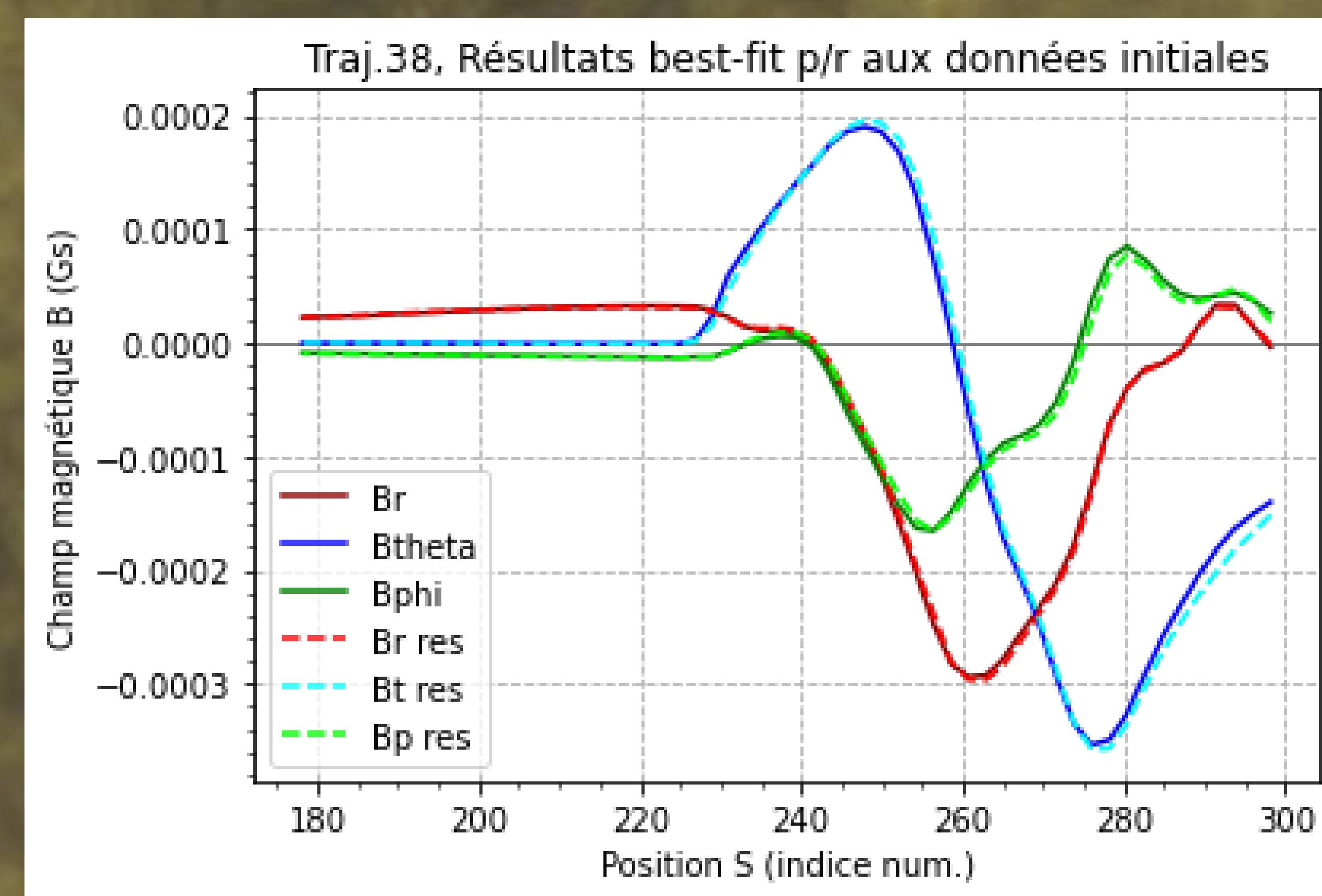
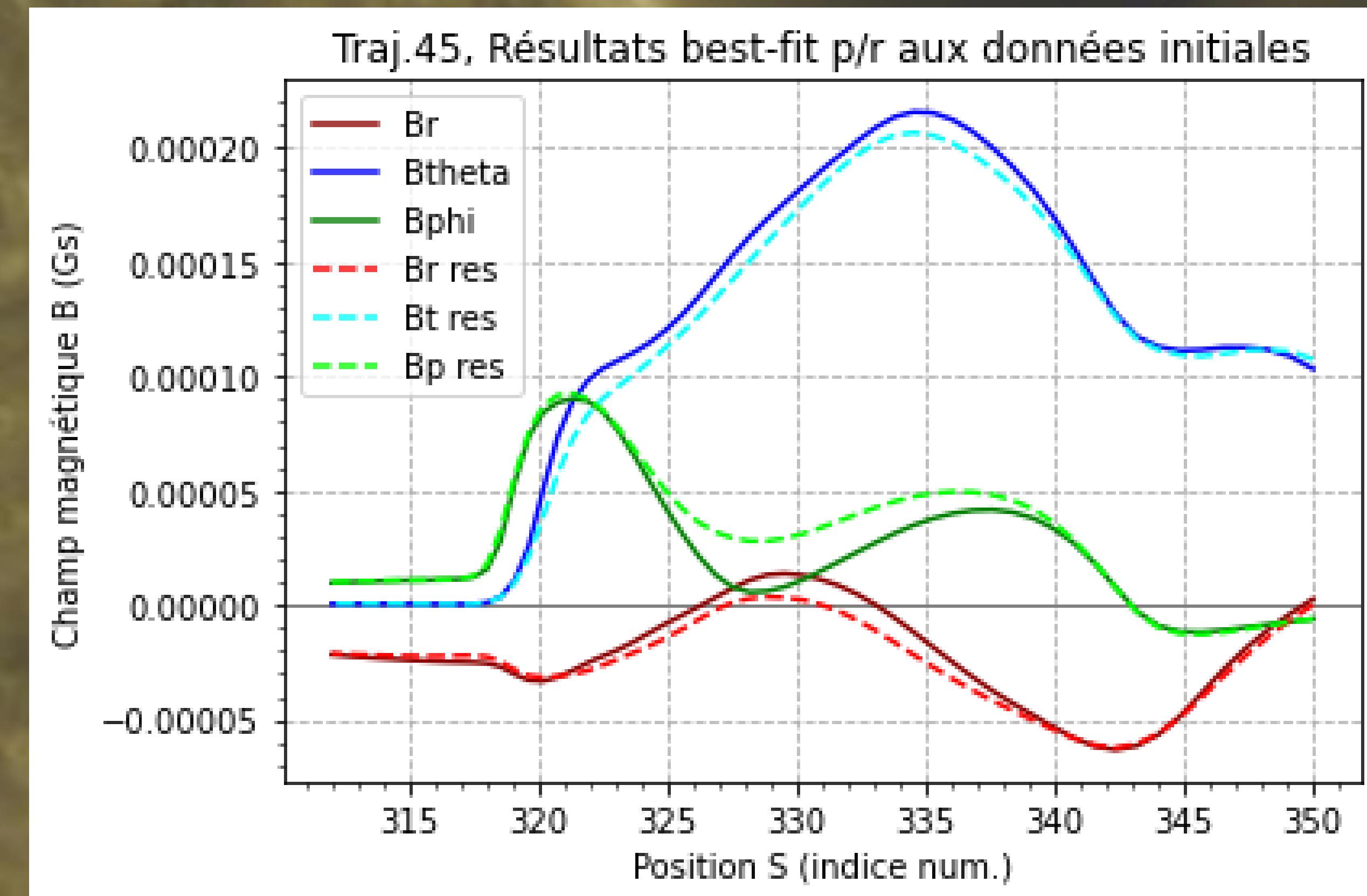
## To do:

- Adjustments and start testing with *in situ* data

## Ex: Meilleurs ajustements / Best fits



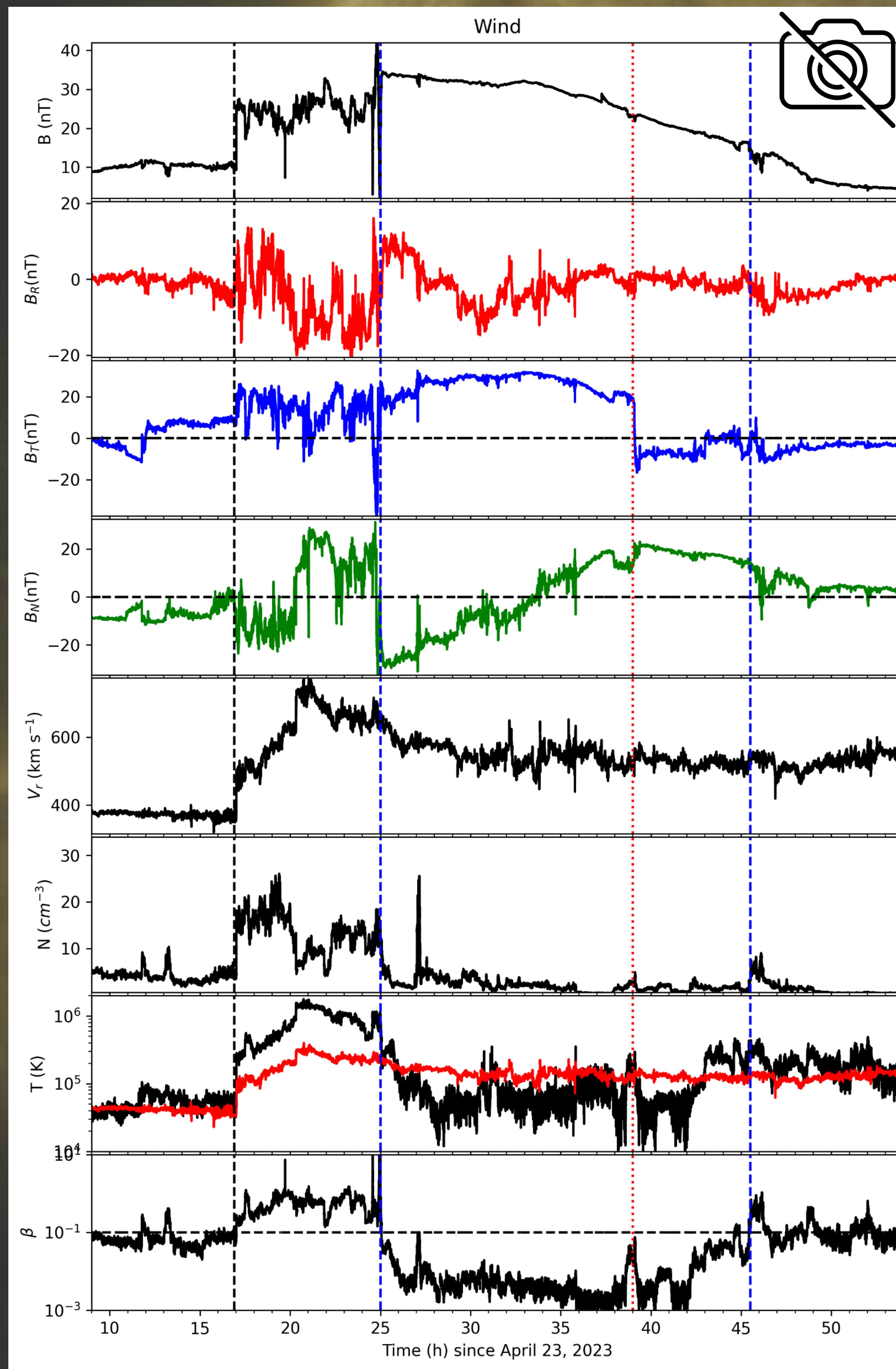
## Pires ajustements / Worst fits



# Trajettoire Trajectory #	Coordonnées / Coordinates (Zi,Yi, Zf,Yf)		$\chi^2$ résultant Resulting $\chi^2$ ( $\pm 0.001$ )	Bonne simulation? Good simulation?
	Vraies valeurs True values	Résultats / Results ( $\pm 1$ unité)		
32	(211,105, 319,121)	(207,107, 325,122)	1.093	✓
38	(260,146, 144,83)	(261,144, 140,87)	1.156	✓
45	(333,108, 262,158)	(331,108, 270,153)	1.160	✓
64	(292,164, 241,139)	(294,161, 239,142)	1.102	✓

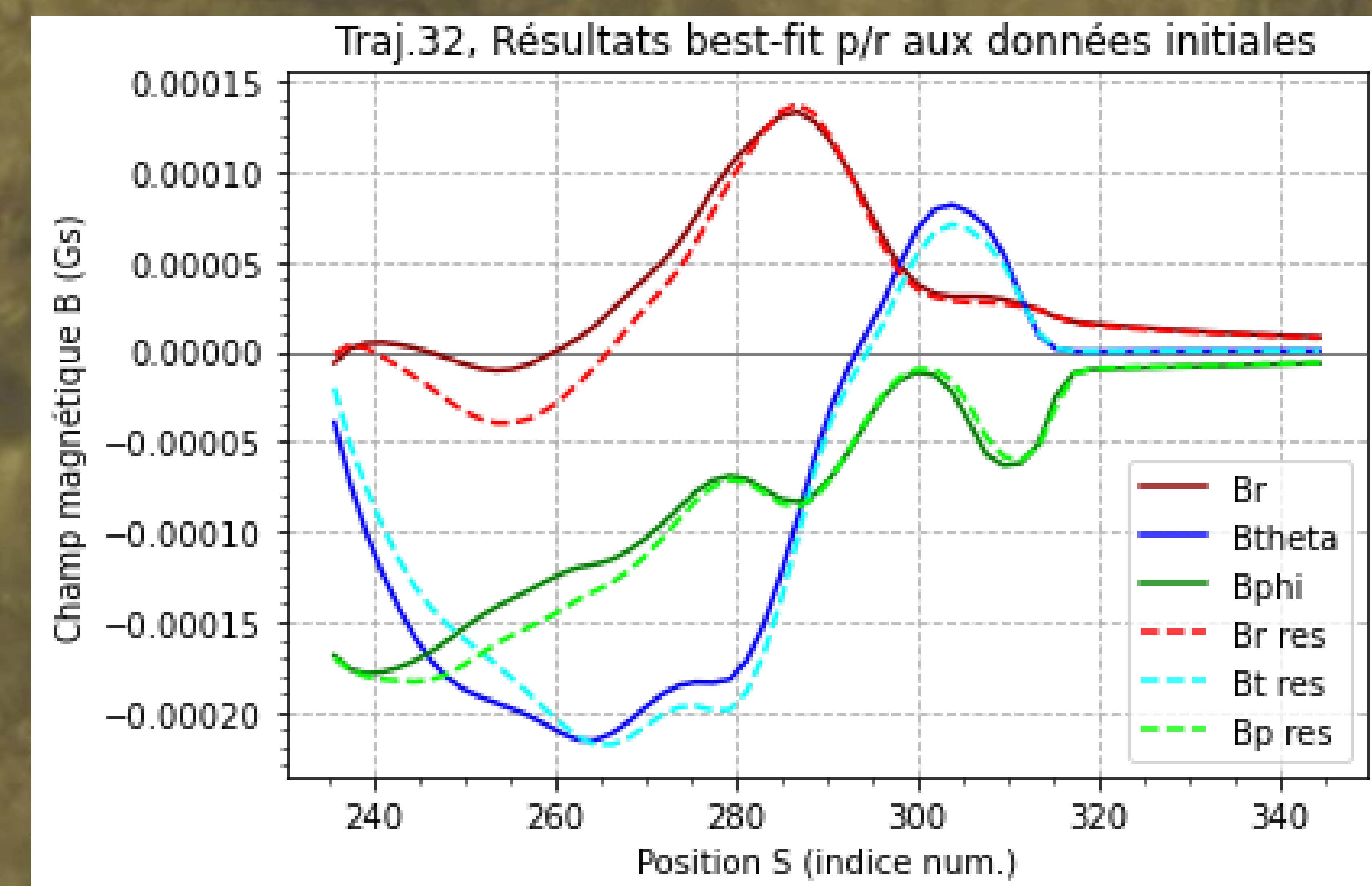
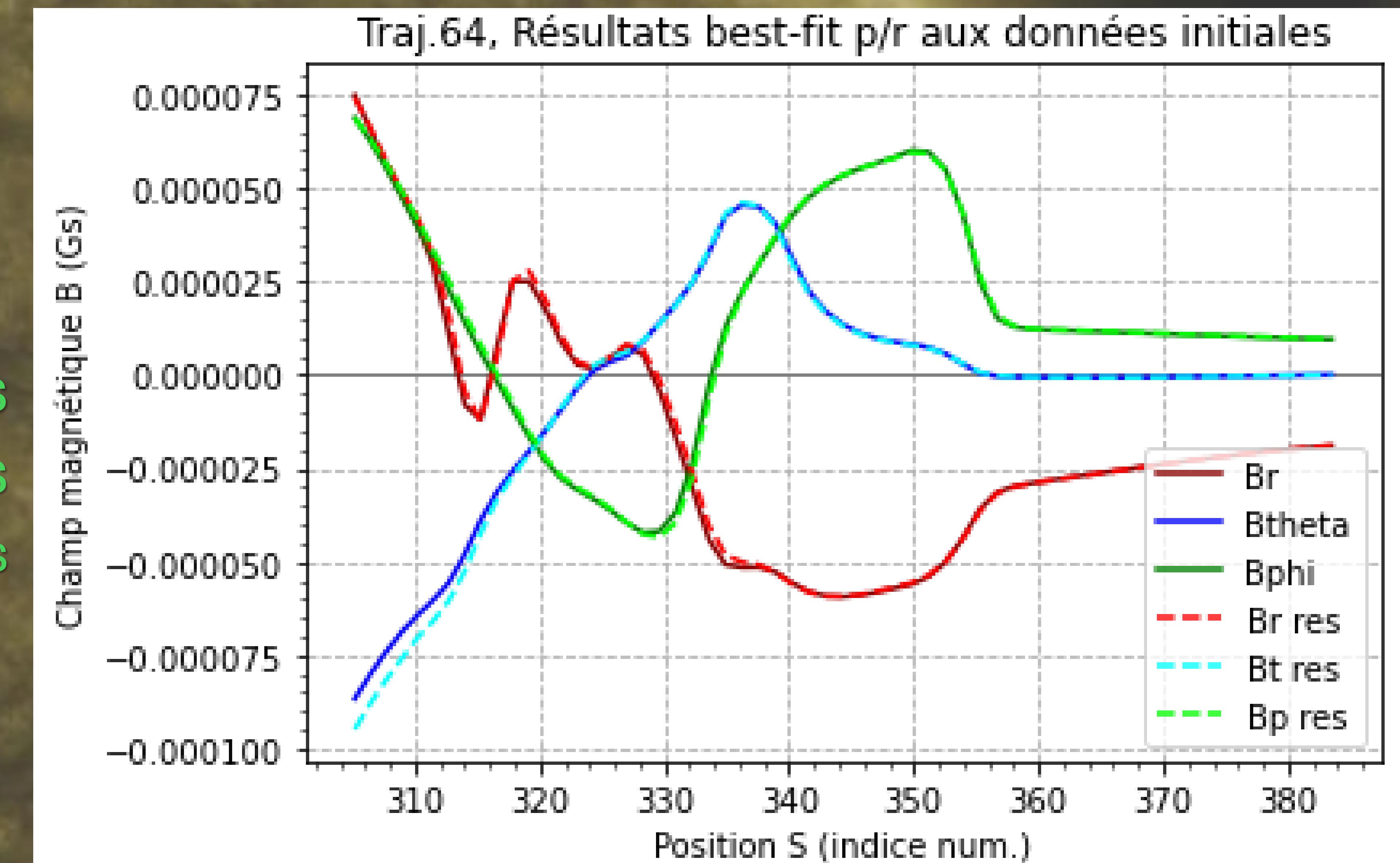
# 6

# État actuel / Current status




➤Figure 5. Exemple de données *in situ* d'une CME captée par le satellite Wind. Crédit: Noe Lugaz

Meilleurs  
ajustements  
/ Best fits



Pires  
ajustements  
/ Worst fits

A large, semi-transparent background image of the Sun's surface, showing bright solar flares and sunspots against a dark, textured background.

7

# Résultats attendus

## Objectifs:

- Mesurer efficacement l'hélicité dans les EMCs → Plus de données disponibles
- Vérifier s'il y a une tendance hémisphérique de signe dans l'hélicité des EMCs
- Ultimement, comparer les variations d'hélicité des EMCs avec celles du Soleil

**Cible:** Permettent de baliser les hypothèses possibles pour le paradoxe de la croissance exponentielle d'un champ magnétique aux grandes échelles et la conservation de l'hélicité grâce aux résultats.

7

# Expected results

## Objectives:

- Efficiently measure helicity in CMEs → More data available
- Verify whether there is a hemispheric sign trend in the helicity of CMEs
- Ultimately, compare CMEs helicity variations with those of the Sun

**Target:** Allow to mark out, from the results, possible hypotheses concerning the paradox at large scale exponential magnetic field growth and helicity conservation.

# 8

## Références

- [1] Charbonneau, Paul (Août 2022). *PHY-6756 FLUIDES ASTROPHYSIQUES* [notes de cours]. Département de physique, Université de Montréal. Astro Umontreal.  
<https://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/phy6756/phy6756.html>
- [2] Lang, Kenneth R. (2001). *The Cambridge Encyclopedia of the Sun* (1<sup>e</sup> éd.). Cambridge : Cambridge University Press, 256p.

Traduction anglaise via: Deepl traduction (<https://www.deepl.com/translator>)

# 8

## References

- [1] Charbonneau, Paul (August 2022). *PHY-6756 FLUIDES ASTROPHYSIQUES* [course notes]. Physics department, Université de Montréal. Astro Umontreal.  
<https://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/phy6756/phy6756.html>
- [2] Lang, Kenneth R. (2001). *The Cambridge Encyclopedia of the Sun* (1<sup>st</sup> ed.). Cambridge : Cambridge University Press, 256p

English translation via: Deepl traductor (<https://www.deepl.com/translator>)



# Questions?

