# Champs magnétique terrestre interne

Pierdavide Coïsson

Vincent Lesur

coisson@ipgp.fr

lesur@ipgp.fr



# **Définitions**



## Le champ magnétique est un champ vectoriel

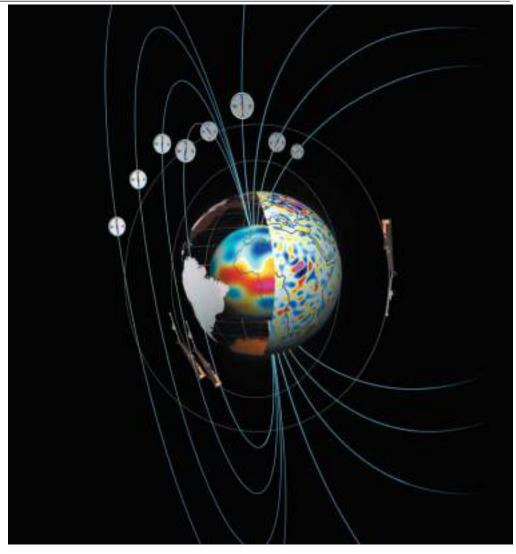


- Tout point de l'espace est caractérisé par des paramètres physiques.
- Le champ magnétique est un champ de force vectoriel:

$$\overrightarrow{B}(r,\theta,\phi)$$

- Il est généré par plusieurs phènomès, généralement associés à la présence de courants électriques.
- C'est un champ additif:

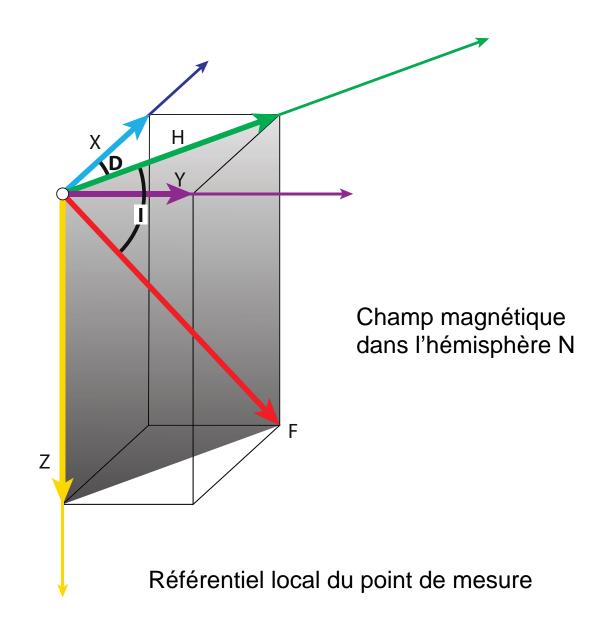
$$\overrightarrow{B}(r,\theta,\phi) = \sum_{j} \overrightarrow{B}_{j}(r,\theta,\phi)$$



## Eléments magnétiques



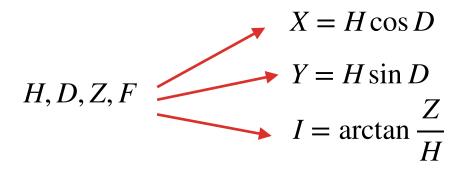
- Le vecteur champ magnétique est caractérisé par une intensité est une direction:
  - F intensité[nT]
  - I inclinaison [°]
  - D déclinaison [°]
  - H horizontale [nT]
  - Z verticale [nT]
  - X horizontale vers le N [nT]
  - Y horizontale vers l'E [nT]

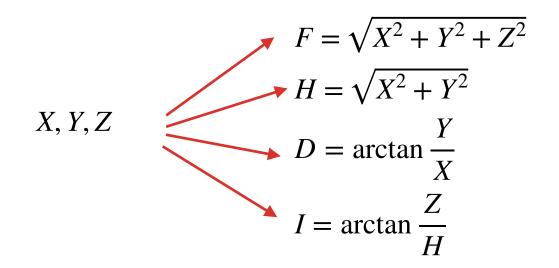


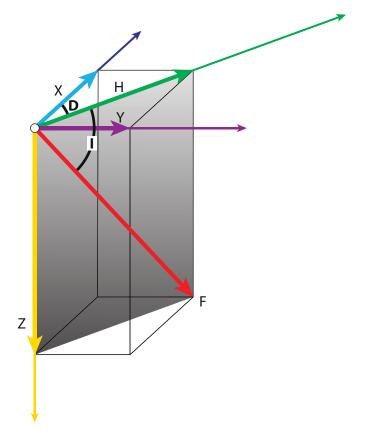
## Transformation entre éléments magnétiques



 Il est possible de calculer tous les éléments magnétiques à partir des valeurs mesurés par les instruments.







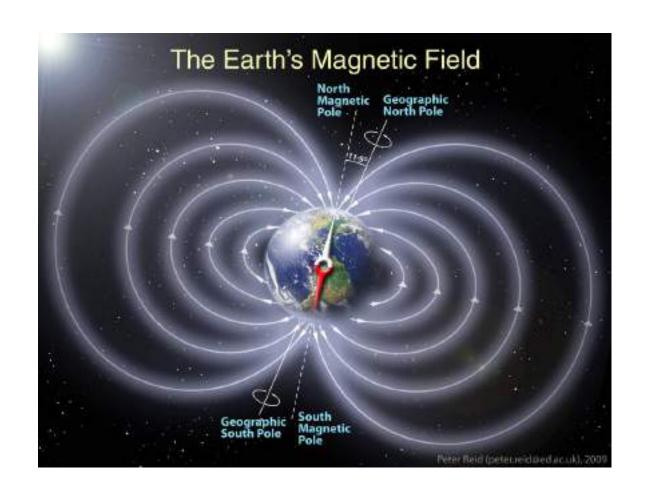
# Vue d'ensemble du champ magnétique terrestre



## Champs magnétique terrestre: principalement dipolaire



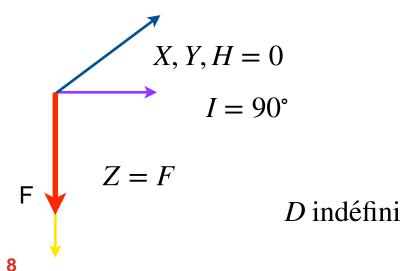
- Si l'on suit la direction du champ magnétique, point par point, il es possible de tracer des lignes de champ.
- Elles sortent de la surface de la Terre dans l'hémisphère S magnétique.
- Elles rentrent dans la surface de la Terre dans l'hémisphère N magnétique.
- A l'équateur magnétique, le champ est horizontal.

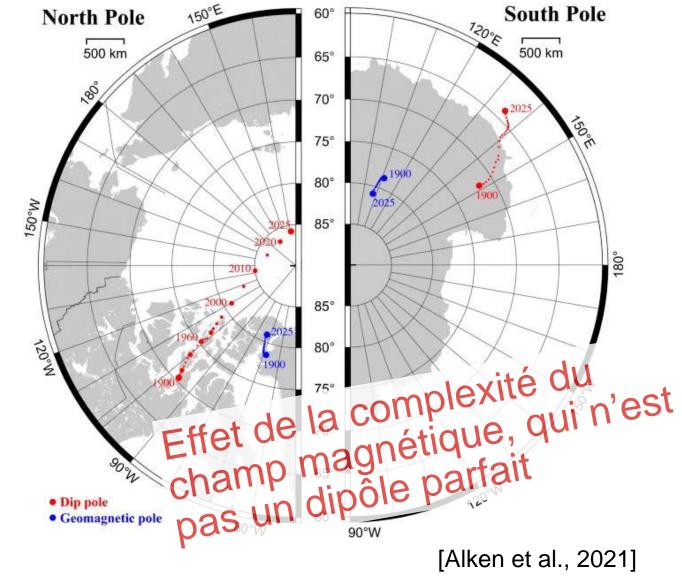


## Pôles magnétiques: plusieurs définitions sont possibles!



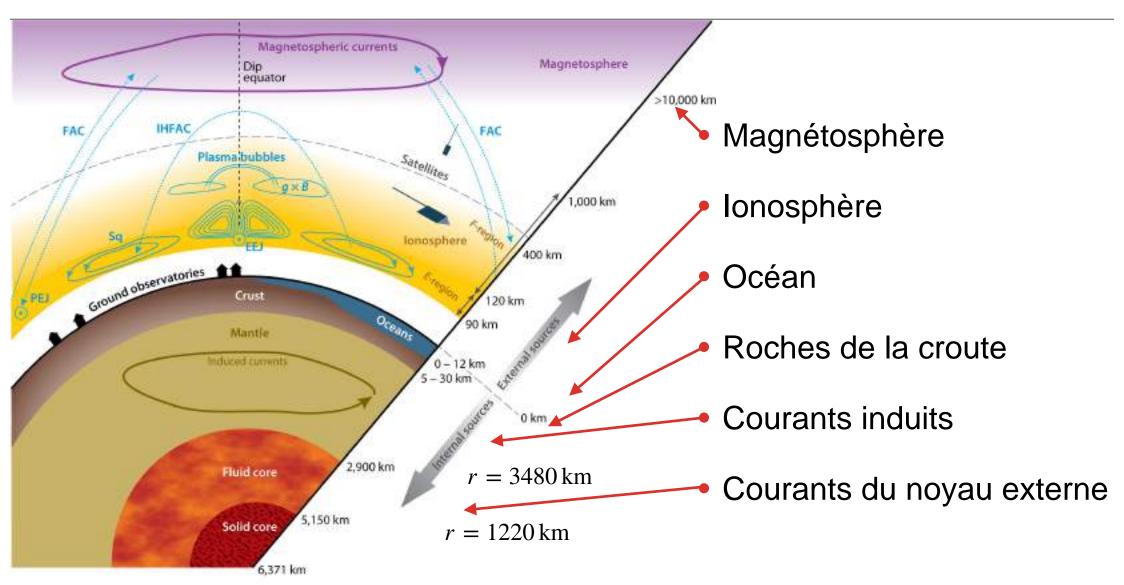
- Pôle géomagnétique: point d'intersection entre l'axe du dîpole magnétique avec la surface de la Terre.
- Pôle magnétique (dip pole): point où la direction locale du champ magnétique est verticale.





# Principales sources du champ magnétique terrestre

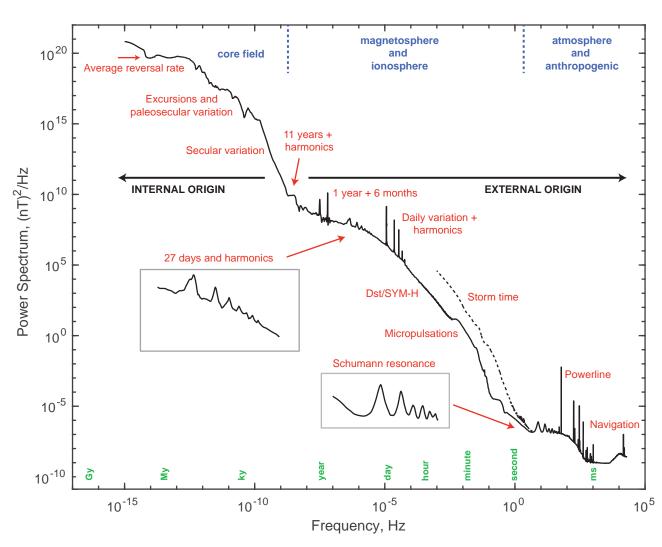




## Variations magnétiques dans toutes les échélles de temps



- Le grand spectre temporel des variations magnétique.
- Le champ magnétique terrestre est dominé par les sources internes: 90%.
- Le champ magnétique du passé est étudié par le paléomagnétisme, en analysant la magnétisation des roches.
- Le champ magnétique actuel est mesuré par des magnétomètres.



### Mesures du champ magnétique actuel



### **Observatoires**



CLF Chambon-la-forêt

- Infrastructure permanente.
- Variomètre, scalaire, pilier de mesure.
- Observateurs: mesures absolues

### **Stations**



**CMF Clermont Ferrand** 

- Infrastructure légère.
- Variomètre.

### Réseau de répétition

Mesures absolues ponctuelles.

### Satellites



Swarm

- Mission limitée dans le temps.
- Variomètre, scalaire, caméras stellaires.

### Contraintes d'un observatoire magnétique





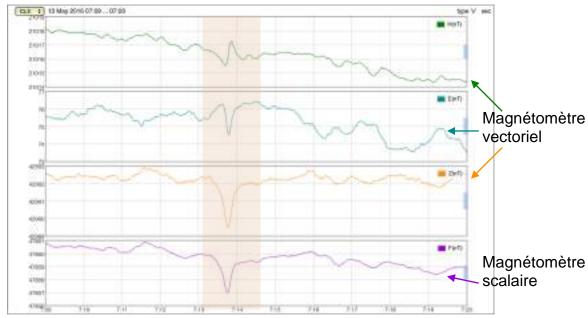
- Etre le plus magnétiquement propre possible:
  - isolement
  - périmètres d'interventions minimales autour des instruments

### Contraintes d'un observatoire magnétique





- Instruments sont très sensibles et détectent de signaux anthropiques:
  - passages de véhicules



~2 nT à 50 m de distance

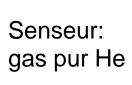
# Magnétomètre scalaire



précession du moment magnétique des protons



Senseur: liquide riche en protons Effet Zeeman sur les niveaux énergétiques des électrons





Effet overhauser: amélioration avec des électrons libres

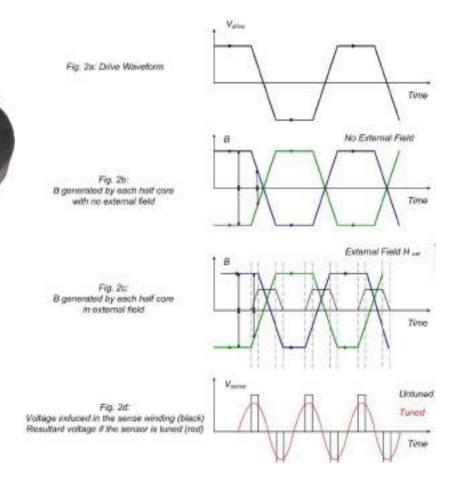
Effets microscopiques dûs à la présence d'un champ magnétique homogène sur le volume du capteur

## Variomètre, magnétomètre vectoriel



 Mesure 3 composantes orthogonales du vecteur champ magnétique.

- Fluxgate:
  - coeur à forte susceptibilité magnétique entouré d'une spire.
    - Courant électrique le magnétise.
    - Inverser le courant permet d'observer un cycle d'hystéresis.
  - Bobines de détections permettent de mesurer la réponse du capteur.



https://www.imperial.ac.uk

## Caractéristiques des fluxgates d'observatoire



#### Points forts

- Permettent de mesurer à 1 Hz.
  - Cette mesure peut être une moyenne sur des valeurs échantillonnées en interne à 5 Hz.
- Capteur robuste, peut fonctionner plusieurs décennies.

#### Points faibles

 Impossible de construire un instrument parfaitement orthogonal

$$F \neq \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

- Sensible aux variations de température.
- L'instrument peut dériver au cours du temps.
- Le pilier sur lequel est posé l'instrument peut bouger.



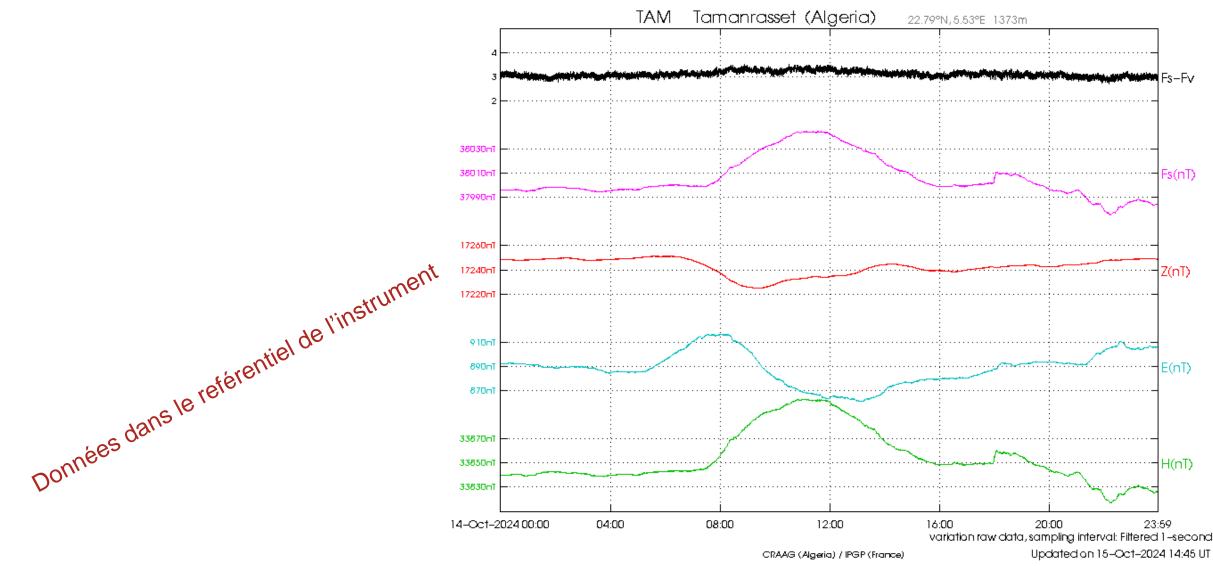






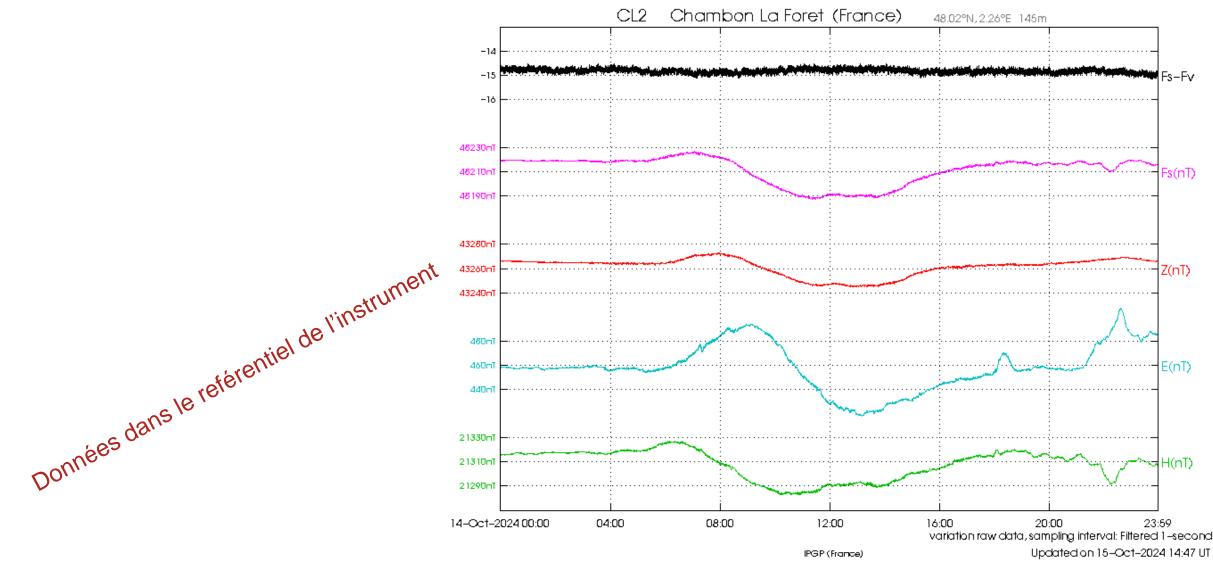
## Données d'observatoire magnétique: Tamanrasset (Algérie)





### Données d'observatoire magnétique: Chambon la forêt (France)





#### Mesures absolues



- Les instruments de mesure dérivent dans le temps:
  - variations de température,
  - mouvements de l'instrument
  - vieillissement de l'électronique.
- Pour corriger ces effets:
  - mesures absolues manuelles hebdomadaires.
    - Déclinaison.
    - Inclinaison.
    - Intensité

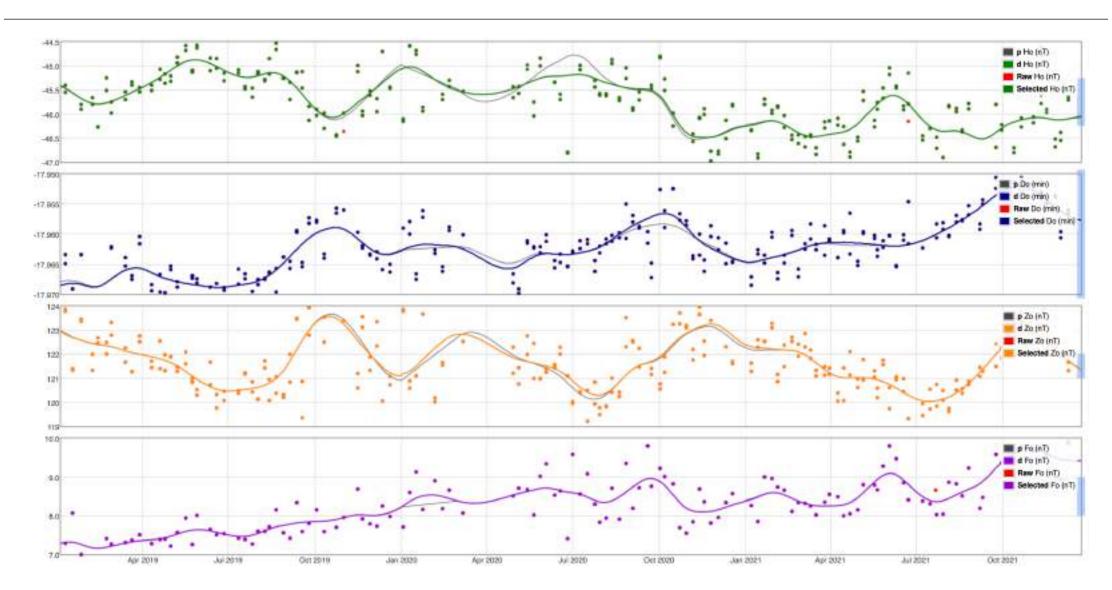




Théodolite DI-flux

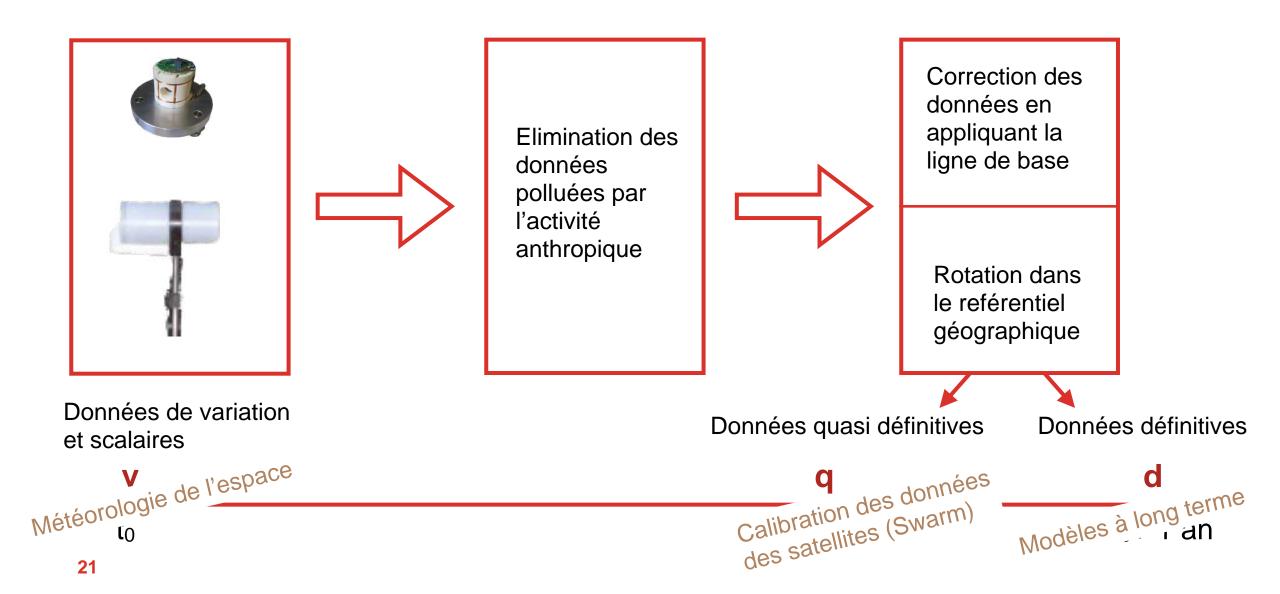
### Les mesures absolues permettent de construire une ligne de base





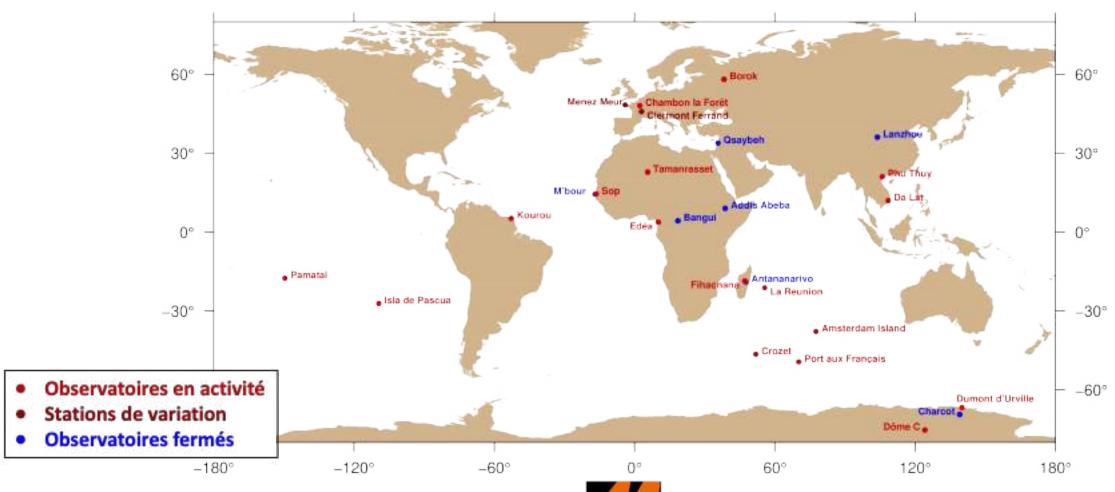
# Données définitives des observatoires magnétiques





## Réseaux d'observatoires magnétiques: BCMT





BUREAU CENTRAL DE

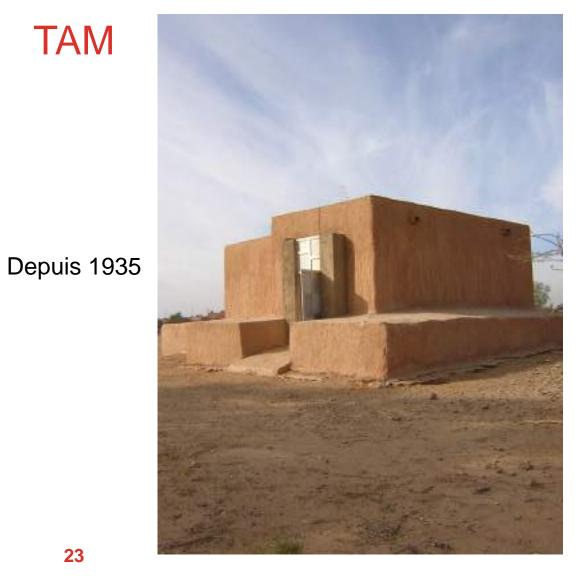


AGNÉTISME TERRESTRE

## Observatoires BCMT en Afrique: Tamanrasset



### **TAM**



Modernisé en 1993



## Observatoires BCMT en Afrique: M'bour → Sop



### **MBO**

### SOK



Depuis 2020



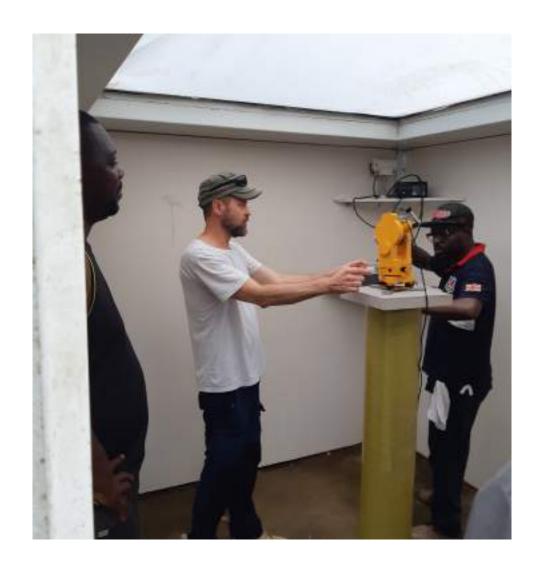
# Observatoires BCMT en Afrique: Édéa



**EDA** 

Depuis 2017





#### Accès aux donnés du BCMT



- Données de variation:
- Données définitives
- Image donnés temps réel

doi:10.18715/BCMT.MAG.VAR



doi:10.18715/BCMT.MAG.DEF





https://datacenter.ipgp.fr/networks/detail/BCMT/BCMT.MAG.VAR/

https://datacenter.ipgp.fr/networks/detail/BCMT/BCMT.MAG.DEF/

http://www.bcmt.fr/data\_plot\_realtime.php



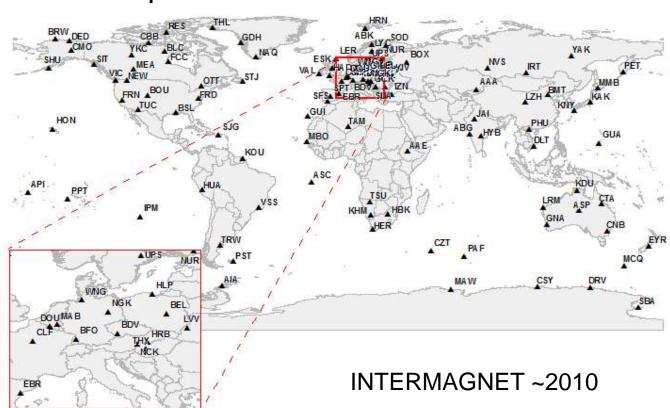
 Réséau international d'observatoires qui respectent des critères de qualités communs, qui diffusent les données rapidement, produisent les données définitives dans l'année suivante.

• Les données définitivent sont vérifiées par d'autres observateurs avant

publication.

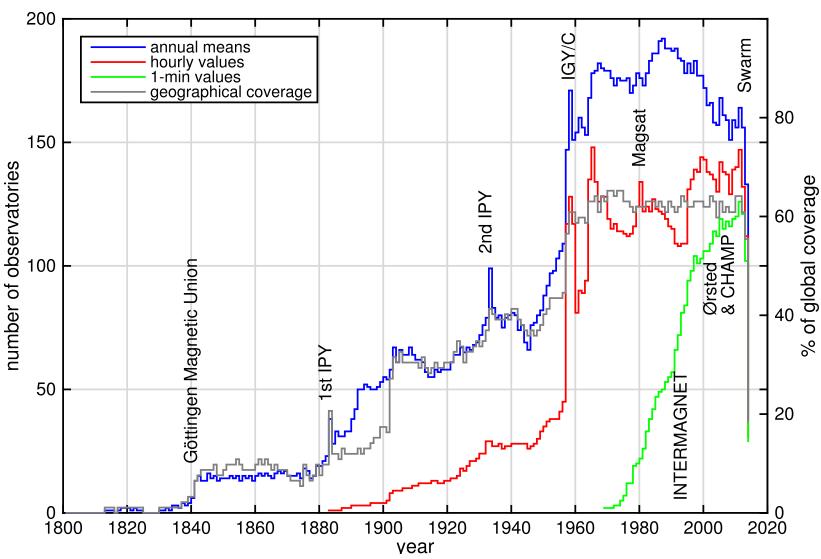
www.intermagnet.org

Uniquement observatoires labélisés



#### Evolution du nombre d'observatoires dans le monde





# Autres bases de données magnétiques



World Data Centre for geomagnetism Edinburgh: http://www.wdc.bgs.ac.uk/

• SuperMag, données d'observatoires et stations magnétiques : https://supermag.jhuapl.edu/

Ne distribue pas les données originelles, Ne distribue pas les données originelles, nume rotation de référentiel est effectuée.

Autres réseaux de stations de variation actifs : CARISMA (www.carisma.ca),
 EMMA (geofizika.canet.hu/plasmon)

# Recommandations sur l'exploitation scientifique des données



 Il peut y avoir des licences sur les données → lisez les documentations associées.

Il faut citer les données dans les articles → citez les doi s'il sont disponbiles.

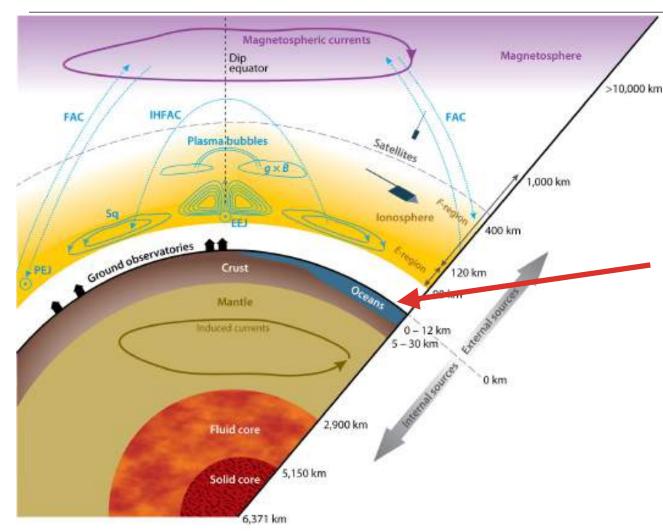
 Il y a des problèmes avec les données que vous cherchez → n'hesitez pas à contacter les producteurs des données.

# Modélisation du champ magnétique



# Séparation des sources de champ magnétique





 $\overrightarrow{B} = \sum_{i} \overrightarrow{B_i} + \sum_{e} \overrightarrow{B_e}$ 

Sources internes et externes à la surface sphérique où l'on veut effectuer une modélisation, qui ne présente pas de courants électriques.

Approche de potentiel magnétique :

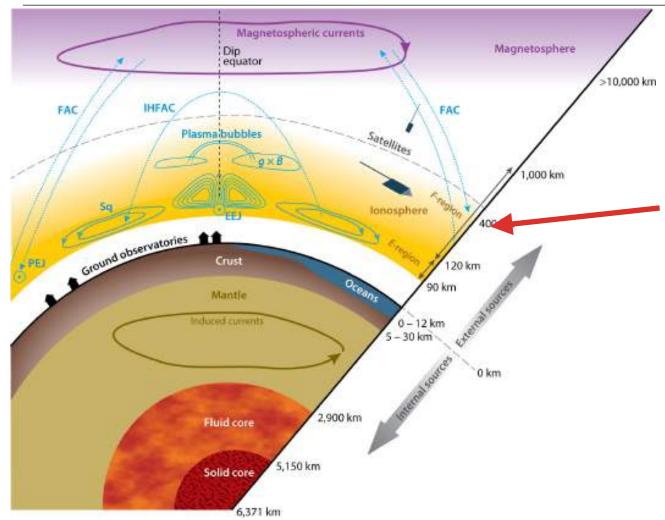
$$\overrightarrow{B} = -\nabla V$$

Rappel: équation de Maxwell :

$$\nabla \cdot \overrightarrow{B} = 0$$

### Cas de présence de courants électrique à l'altitude de modélisation





$$\overrightarrow{B} = \sum_{i} \overrightarrow{B_i} + \sum_{e} \overrightarrow{B_e} + \overrightarrow{B_t}$$

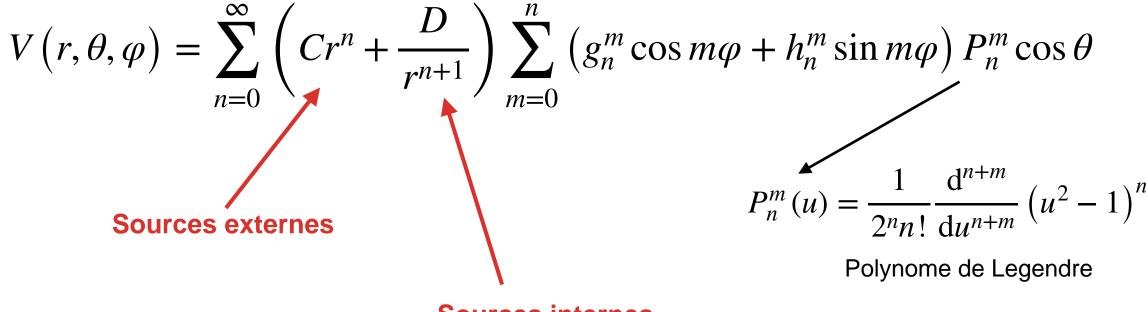
En présence de courant électriques poloidaux à l'altitude de modélisation, un champ toroïdal additionnel doit être ajouté.

Annu, Rev. Earth Planet, Sci. 40:441-65

## Modélisation du champ magnétique



 Solution générale en coordonnées sphériques de l'équation de Laplace  $\Delta V = 0$ :



**Sources internes** 

## Harmoniques sphériques



• Solution générale en coordonnées sphériques de l'équation de Laplace  $\Delta V = 0$  :

$$V(r,\theta,\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( Cr^n + \frac{D}{r^{n+1}} \right) \sum_{m=0}^{n} \left( g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right) P_n^m \cos \theta$$

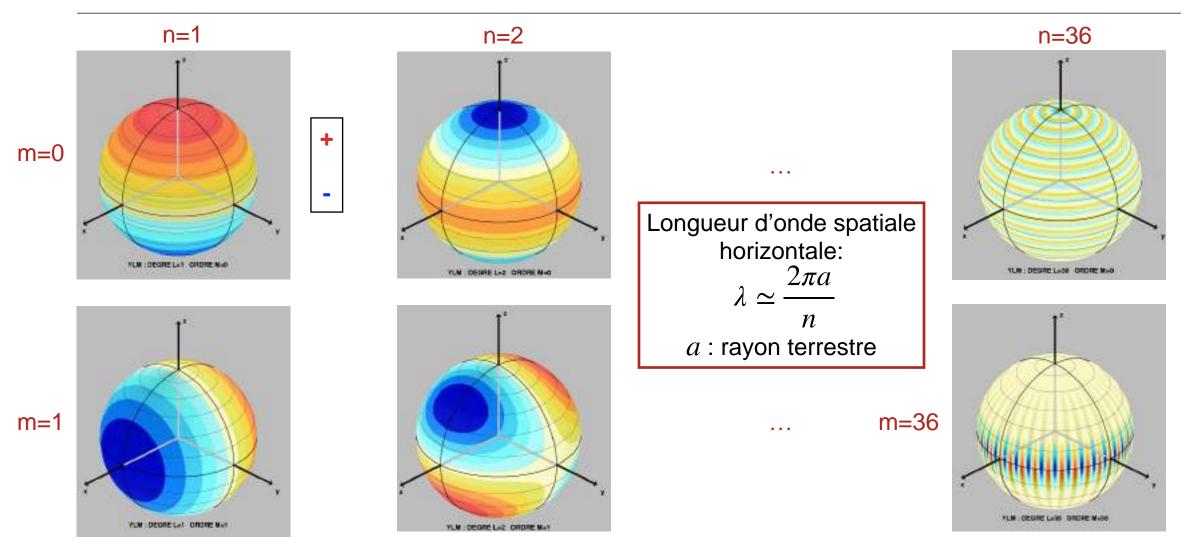
On introduit les fonctions harmoniques sphériques de degré n et ordre m:

$$Y_n^{mc}(\theta,\varphi) = P_n^m(\cos\theta)\cos m\varphi$$

$$Y_n^{ms}(\theta,\varphi) = P_n^m(\cos\theta)\sin m\varphi$$

## Quelques harmoniques sphériques





Ces images utilisent les symbole L pour le dégré de l'harmonique sphérique M pour l'ordre.

### Spectre en puissance spatial

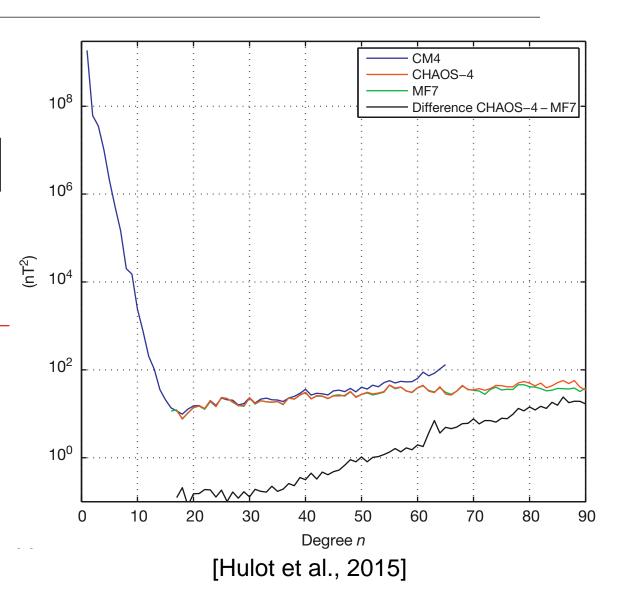


 A partir de la décomposition en harmoniques sphériques :

$$W_n(R) = (n+1) \left(\frac{a}{R}\right)^{2n+4} \sum_{m=0}^{n} \left[ \left(g_n^m\right)^2 + \left(h_n^m\right)^2 \right]$$

• a < R, rayon des sources internes.

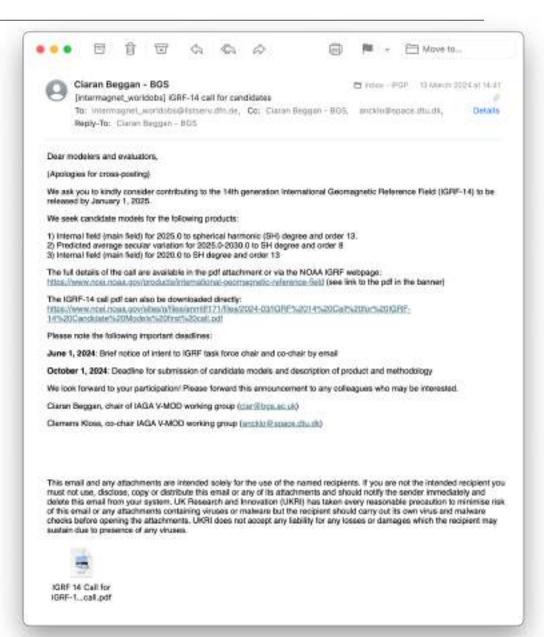
- Le spectre du champ magnétique terrestre interne présente 2 régimes differents:
  - n<14 champ principal</li>
  - n>14 champ crustal



#### International Geomagnetic Reference Field IGRF



- Modèle réalisé par la communauté scientifique: IAGA V-mod
- Mis à jour tous les 5 ans. Apel pour IGRF-14 :
  - DGRF 2020.0 n=13
  - IGRF 2025.0 n=13
  - Variation séculaire 2025.0 à 2030.0 n=8
- Les instituts participants peuvent soumettre un modèle candidat pour chacun des 3 éléments.
- Modèle final est une "moyenne" des modèles candidats.



#### Données utilisées pour réaliser IGRF



Données des missions spatiales en cours

- Données pendant faible activité magnétique
- Données de nuit
- Véctorielles à basses latitudes
- Scalaires aux hautes latitudes



Swarm

Données définitives et quasidéfinitives d'observatoires magnétiques

- Données pendant faible activité magnétique
- Moyennes mensuelles

Données des réseaux de répétition



#### **IGRF 13**

Full paper | Open access | Published: 11 February 2021

# International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation

P. Alken M. E. Thébault, C. D. Beggan, H. Amit, J. Aubert, J. Baerenzung, T. N. Bondar, W. J. Brown, S. Califf, A. Chambodut, A. Chulliat, G. A. Cox, C. C. Finlay, A. Fournier, N. Gillet, A. Grayver, M. D. Hammer, M. Holschneider, L. Huder, G. Hulot, T. Jager, C. Kloss, M. Korte, W. Kuang, A. Kuvshinov, B. Langlais, J.-M. Léger, V. Lesur, P. W. Livermore, F. J. Lowes, S. Macmillan, W. Magnes, M. Mandea, S. Marsal, J. Matzka, M. C. Metman, T. Minami, A. Morschhauser, J. E. Mound, M. Nair, S. Nakano, N. Olsen, F. J. Pavón-Carrasco, V. G. Petrov, G. Roop, M. Rother, T. J. Sabaka, S. Sanchez, D. Saturnino, N. R. Schnepf, X. Shen, C. Stolle, A. Tangborn, L. Tøffner-Clausen, H. Toh, J. M. Torta, J. Varner, F. Vervelidou, P. Vigneron, I. Wardinski, J. Wicht, A. Woods, Y. Yang, Z. Zeren & B. Zhou

- Show fewer authors

Earth, Planets and Space 73, Article number: 49 (2021) | Cite this article

47k Accesses | 397 Citations 51 Altmetric | Metrics

#### Abstract

In December 2019, the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)
Division V Working Group (V-MOD) adopted the thirteenth generation of the International
Geomagnetic Reference Field (IGRF). This IGRF updates the previous generation with a
definitive main field model for epoch 2015.0, a main field model for epoch 2020.0, and a
predictive linear secular variation for 2020.0 to 2025.0. This letter provides the equations
defining the IGRF, the spherical harmonic coefficients for this thirteenth generation model,
maps of magnetic declination, inclination and total field intensity for the epoch 2020.0, and
maps of their predicted rate of change for the 2020.0 to 2025.0 time period.

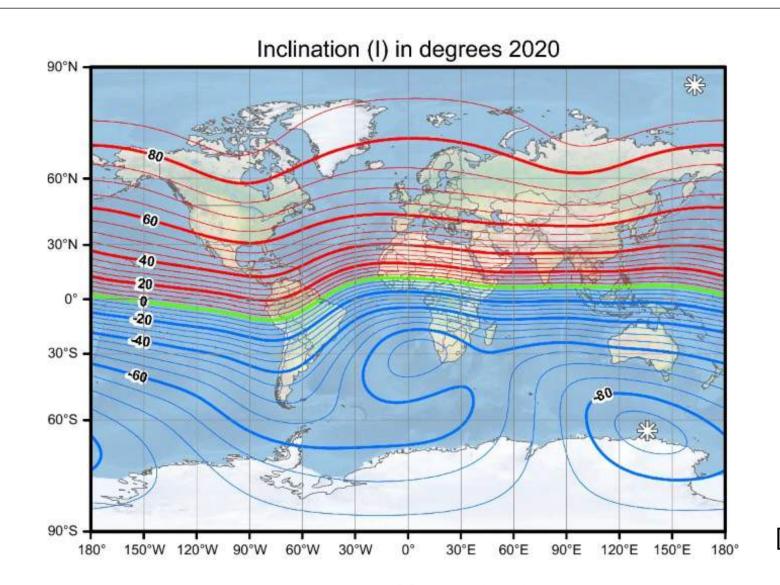






#### Inclinaison IGRF 2020.0

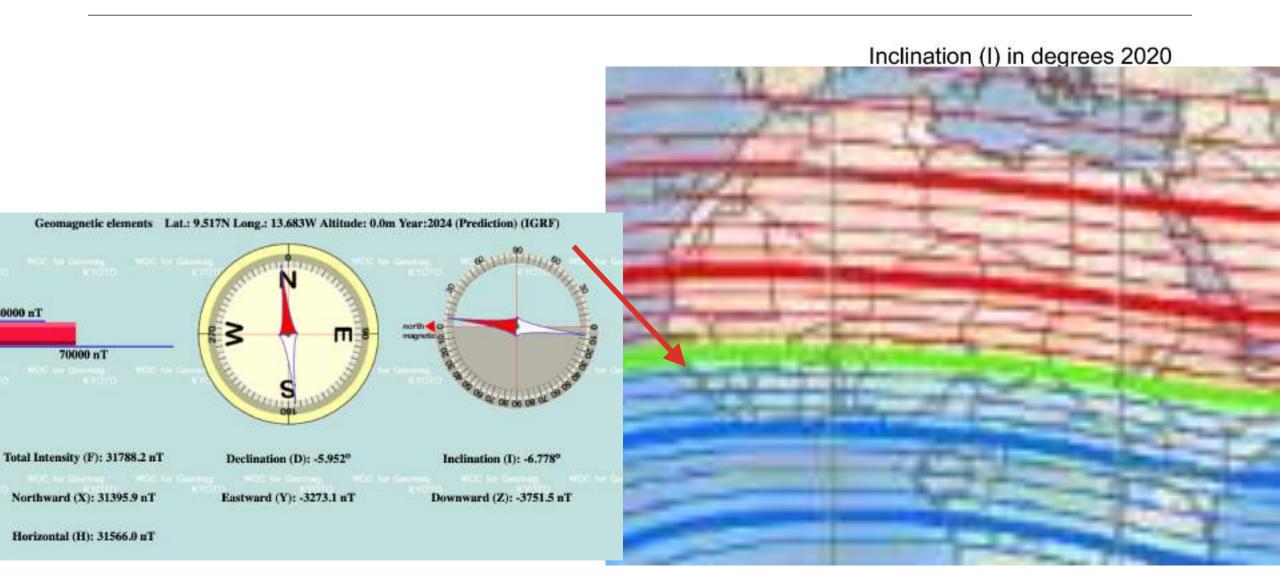




[Alken et al., 2021]

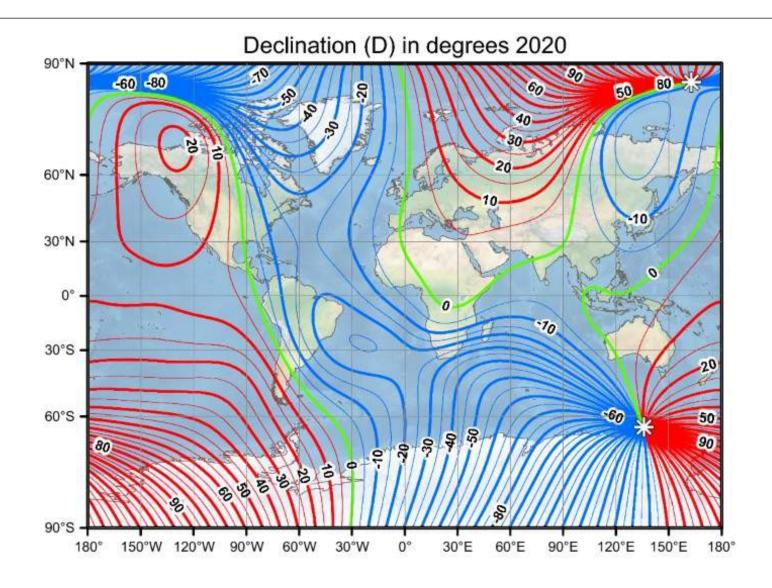
#### Inclinaison IGRF 2020.0





#### Déclinaison IGRF 2020.0

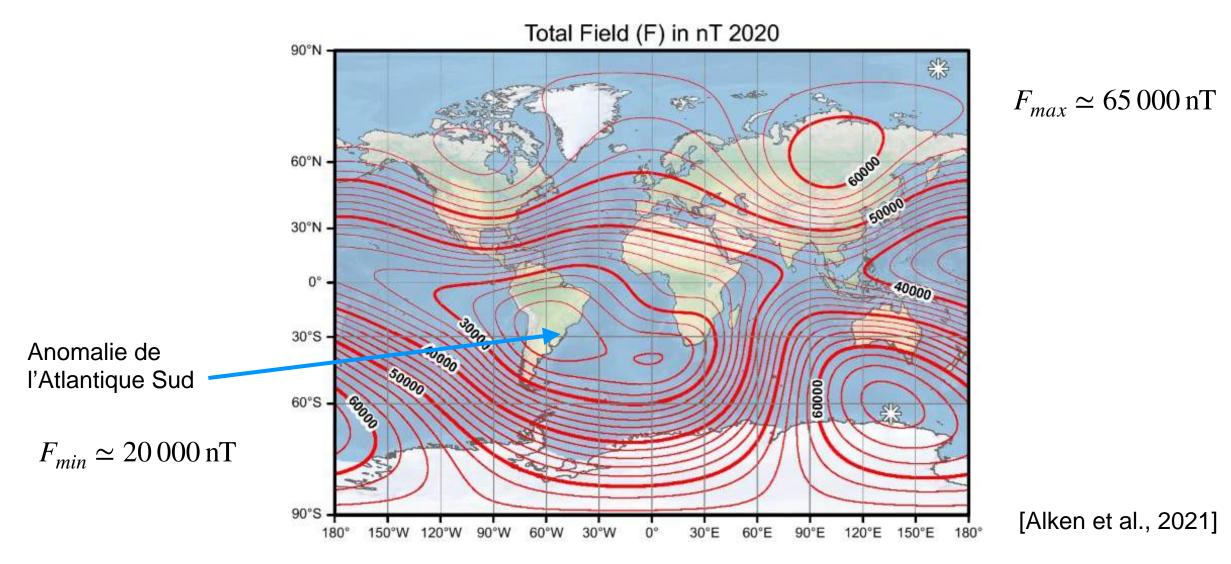




[Alken et al., 2021]

#### Intensité IGRF 2020.0





#### Comment calculer l'IGRF?



- Services en ligne :
  - https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml
  - http://geomag.bgs.ac.uk/data\_service/models\_compass/igrf\_calc.html
  - http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/index.html
- Coefficients:
  - https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/coeffs/igrf13coeffs.txt
- Plusieurs logiciels de calculs se trouvent sur le site de la NOAA (FORTRAN, C, python)
  - https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/pyIGRF.zip

### Que permet de modéliser l'IGRF?



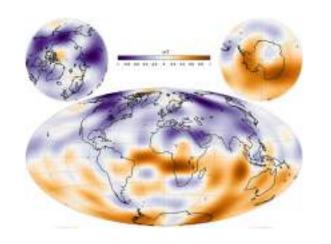
• Champ principal (noyau): 
$$\overrightarrow{B}(r, \theta, \phi) = \overrightarrow{B}_{noyau}(r, \theta, \phi)$$

- En coordonnées sphériques, pas géographiques! La surface de la Terre est elliptique!
- Puisque le champ crustal n'est pas modélisé, il peut y avoir ~1000 nT de différence entre IGRF et le champ mesuré en un point!
- Les champ dûs à l'ionosphère, la magnétosphère, l'océan et le champ induit dans le manteau ne sont pas modélisés!
- La variation séculaire est une extrapolation !

## Quelques autres modèles, mis à jours régulièrements



CHAOS: n=16 pour le champ du noyau, n=85 pour le champ lythosphérique.



Composante Z à la limite noyau-manteau de CHAOS-6 [Finlay et al. 2016]

- CM, CI: modèles compréhensifs, modèlisent simultanément les sources internes et externes [Sabaka et al., 2018].
- WMM: n=12 [Chulliat et al., 2020]



### Variation séculaire



## Évolution sur plusieurs années du champ principal



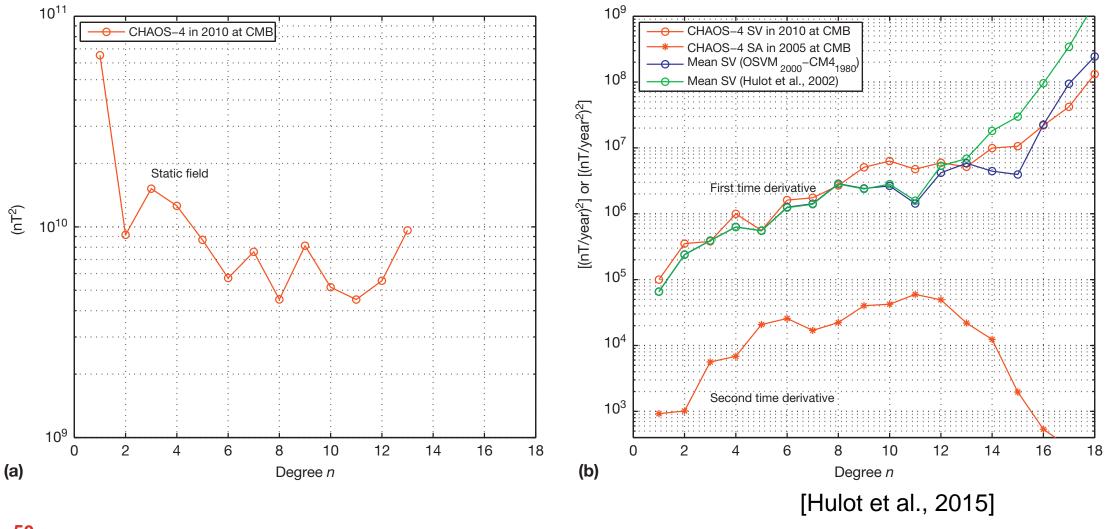
• Variation séculaire : 
$$\overrightarrow{SV} = \frac{d\overrightarrow{B}}{dt}$$

• Accélération séculaire : 
$$\overrightarrow{SA} = \frac{\mathrm{d}^2 \overrightarrow{B}}{\mathrm{d}t^2}$$

• Correspondent aux changements dans la dynamo terrestre, généralement lents, mais aussi abruptes, les **jerks**.

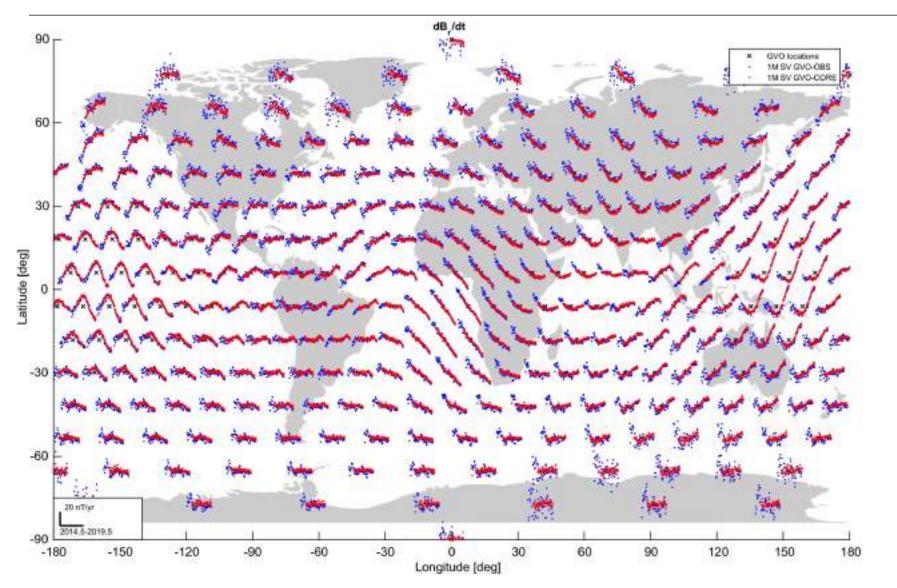
### Variation séculaire dans CHAOS à la limite noyau-manteau





#### Données satellitaires: observatoires virtuels





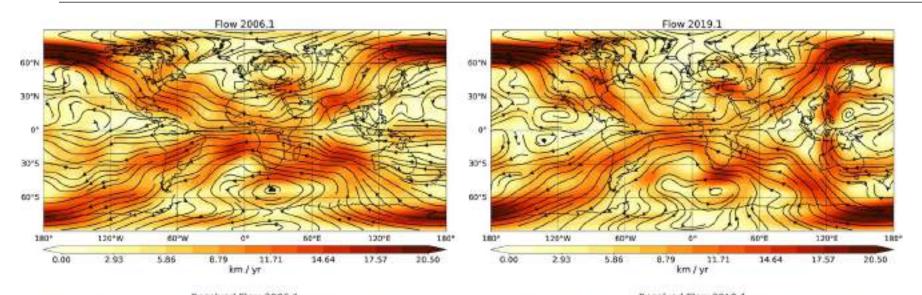
Données Swarm 2015-2020

Les mesures des sattelites au passage à travers des cylindres centrés les coordonnées des observatoires virtuels sont cumulées pour analyser localement les variations séculaires.

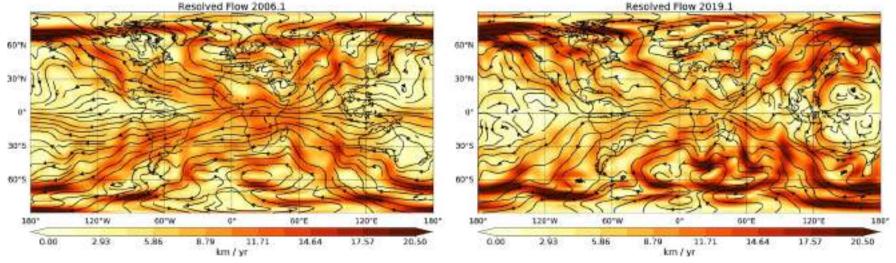
[Hammer et al., 2021]

#### Modélisation assimilative séquentielle





Écoulements à la surface du noyau en 2006 et 2019 obtenus à partir des données des observatoires au sol et de satellites CHAMP et Swarm.



Méthode utilisée aussi pour produire un modèle candidat IGRF [Ropp, Lesur, et al. 2020]

[Ropp, Lesur, 2023]

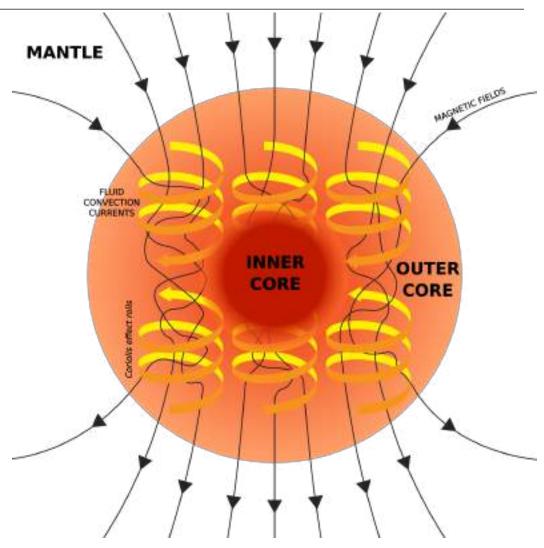
## Modélisation physique



#### Dynamo auto-entretenue



- Le noyaux externe est composé de fer à l'état liquide.
  - Rotation: formation de colonnes de Taylor sous la force de Coriolis
  - Conducteur: la circulation de courant électrique est possible.
- Effet dynamo: en présence d'un champ magnétique, un courant circule dans le conducteur.
- Ce courant magnétique génére à son tour un champ magnétique, qui renforce et maintient la dynamo.



[Andrew Z. Colvin, Wikipedia, 2021]

## Modélisation physique de la dynamo



• Convection de Boussinesq pour un champ de vitesse  $\vec{u}$  et d'anomalie de densité C, pour un fluide incompressif dans une couche entre  $r_i$  et  $r_0$ 

• 
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + 2\hat{e}_z \times \vec{u} + \nabla P = Ra_{(F)}^* \frac{\vec{r}}{r_0} C + \left(\nabla \times \overrightarrow{B}\right) \times \overrightarrow{B} + E \nabla^2 \vec{u}$$
dynamique du fluide

$$\bullet \ \, \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} = \nabla \times \left( \overrightarrow{u} \times \overrightarrow{B} \right) + \frac{E}{Pm} \nabla^2 \overrightarrow{B}_{\text{induction magnétique}}$$

• 
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = \frac{E}{Pr} \nabla^2 C + S$$
dynamique des anomalies de densité

•  $\nabla \cdot \vec{u} = 0$  Incompressibilité

• 
$$\nabla \cdot \overrightarrow{B} = 0$$

#### Modèles de dynamo: étude des écoulements dans le noyau



- Panneaux (a) et (c):
  - Demi-couronne de gauche: plan équatorial.
  - Demi-couronne de droite: plan longitudinal.

DNS magnetic Reynolds units -20002000 CE DNS LES

ε=1, Model 0

Figure 5. Evolution of velocity planforms (snapshots, units of  $\eta/D$  or magnetic Reynolds number units) in CE-type calculation as  $\varepsilon$  decreases (a-c), and comparisons at fixed  $\Leftrightarrow$  between DNS and LES (b), and between CE and ST cases (d). In panels (a) and (c), the left and right panels respectively present snapshots of the radial velocity in a half equatorial plane (red is outwards), and a meridional cut of the azimuthal velocity (blue is westwards). In (b) and (d) all panels represent snapshots of the equatorial radial velocity.

[Aubert et al., 2017]

## Champ lithosphèrique

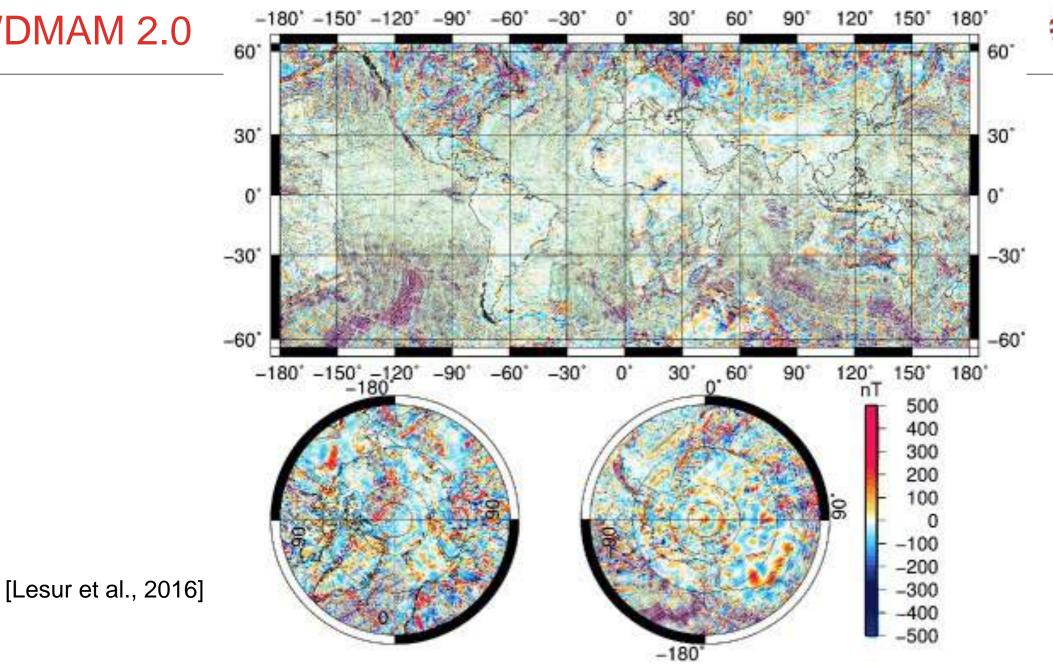


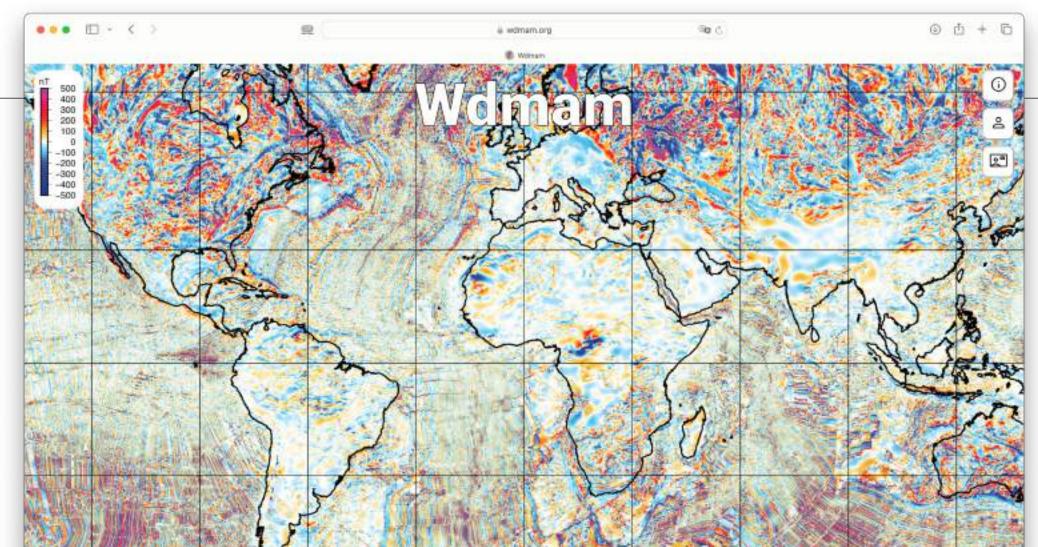
### World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM)



- Compilation homogène des prospection magnétiques mondiales.
- Principalement aéroportées.
- Please cite version 2.0 as: Dyment, J., Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Thebault, E., Catalan, M., the WDMAM Task Force\*, the WDMAM Evaluators\*\*, and the WDMAM Data Providers\*\*, World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0, map available at http://www.wdmam.org.
- Please cite version 2.1 as: Choi, Y., Dyment, J., Lesur, V., Garcia Reyes, Catalan, M., Ishihara, T., Litvinova, T., Hamoudi, M., the WDMAM Task Force\*, and the WDMAM Data Providers\*\*, World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.1, map available at http://www.wdmam.org.
- \* the WDMAM Task Force: J. Dyment (chair), M. Catalan (co-chair), A. de Santis, M. Hamoudi, T. Ishihara, J. Korhonen, V. Lesur, T. Litvinova, J. Luis, B. Meyer, P. Milligan, M. Nakanishi, S. Okuma, M. Pilkington, M. Purucker, D. Ravat, E. Thébault. (alphabetical order)
- \*\* the WDMAM Evaluators: C. Gaina, J. Luis, S. Maus, B. Meyer, M. Nakanishi, M. Purucker, Y. Quesnel, R. Saltus, P. Taylor. (alphabetical order)









### Annexes



#### Force de Coriolis



- Force apparente dans un reférentiel non-inertiel.
- ullet Rotation de période  $\Omega$
- S'exerce sur un élément de masse m en mouvement avec une vitesse  $\vec{v}$

• 
$$\overrightarrow{F}_c = -2m\overrightarrow{\Omega} \times \overrightarrow{v}$$

#### Bibliographie (1)



- Aubert, J., State and evolution of the geodynamo from numerical models reaching the physical conditions of Earth's core, Geophysical Journal International, 235(1), 2023, Pages 468–487, https://doi.org/10.1093/gji/ggad229
- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. Earth Planets Space 73, 49 (2021). https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x.
- Aubert J, Gastine T, Fournier A. Spherical convective dynamos in the rapidly rotating asymptotic regime.
   Journal of Fluid Mechanics. 2017;813:558-593. doi:10.1017/jfm.2016.789
- Chulliat, A., J. Matzka, A. Masson, and S. E. Milan (2017), Key ground-based and space-based assets to disentangle magnetic field sources in the Earth's environment, Space Science Reviews, 206(1), 123–156, doi:10.1007/s11214-016-0291-y.
- Chulliat, A., W. Brown, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, G. Cox, A. Woods, S. Macmillan, B. Meyer and M. Paniccia, The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA, doi:10.25923/ytk1-yx35, 2020.
- Constable, C. and S. Constable, A grand spectrum of the geomagnetic field, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 344, (2023), 107090, https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107090.

### Bibliographie (2)



- Finlay, C. C., N. Olsen, S. Kotsiaros, N. Gillet, and L. Tøffner-Clausen (2016), Recent geomagnetic secular variation from swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model, Earth, Planets and Space, 68(1), 112, doi:10.1186/s40623-016-0486-1.
- Hammer, M.D., Cox, G.A., Brown, W.J. et al. Geomagnetic Virtual Observatories: monitoring geomagnetic secular variation with the Swarm satellites. Earth Planets Space 73, 54 (2021). https://doi.org/10.1186/s40623-021-01357-9.
- Hulot, G., T. Sabaka, N. Olsen, and A. Fournier (2015), 5.02 The present and future geomagnetic field, in Treatise on Geophysics (Second Edition), edited by G. Schubert, pp. 33 – 78, Elsevier, Oxford, doi:10.1016/ B978-0-444-53802- 4.00096-8. Olsen, N., and C. Stolle (2017), Magnetic signatures of ionospheric and magnetospheric current systems during geomagnetic quiet conditions—an overview, Space Science Reviews, 206(1), 5–25, doi:10.1007/s11214-016-0279-7.
- Lesur, V., M. Hamoudi, Y. Choi, J. Dyment, and E. Thébault (2016), Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM), Earth, Planets and Space, 68(1), 27, doi:10.1186/s40623-016-0404-6.
- Ropp, G., Lesur, V., Baerenzung, J. and Holschneider, M., Sequential modelling of the Earth's core magnetic field. Earth Planets Space 72, 153 (2020). https://doi.org/10.1186/s40623-020-01230-1.

•

#### Bibliographie (3)



- G Ropp, V Lesur, Mid-latitude and equatorial core surface flow variations derived from observatory and satellite magnetic data, Geophysical Journal International, Volume 234, Issue 2, August 2023, Pages 1191–1204, https://doi.org/10.1093/gji/ggad113.
- Sabaka, T. J., L. Tøffner-Clausen, N. Olsen, and C. C. Finlay (2018), A comprehensive model of earth's magnetic field determined from 4 years of swarm satellite observations, Earth, Planets and Space, 70(1), 130, doi:10.1186/s40623-018- 0896-3.
- Thébault, E., C. C. Finlay, C. D. Beggan, et al. (2015), International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, Earth, Planets and Space, 67(1), 79, doi:10.1186/s40623-015-0228-9.