

Chapitre 4: Le champ magnétique Terrestre Ancien (Champ Archéo/Paléo-magnétique)



Chloé, Achille et Victor (L3, TPE). Etude d'un four Romain

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.1 Définition

Le CMT ancien : c'est l'histoire géologique du champ principal. (origine noyau liquide) seulement !!!

La différence entre CMT moderne et CMT ancien repose sur la manière de les mesurer et donc de les observer.

Nos connaissances du CMT moderne sont appliquées à la connaissance du CMT ancien (et vice et versa).

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.1 Définition

Les éléments du $CMT_{\text{ancien}} \equiv CMT_{\text{moderne}}$

I = Inclinaison

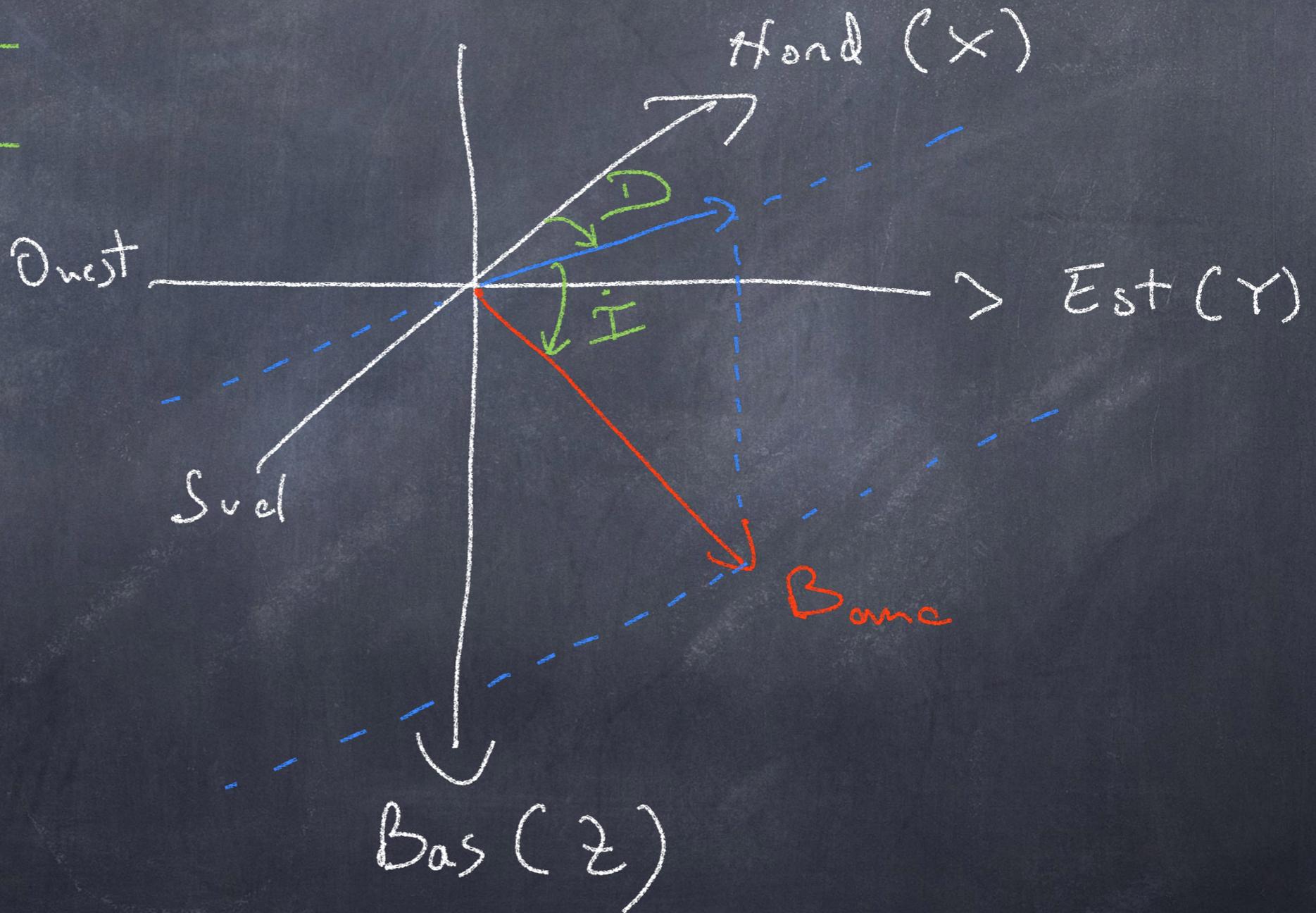
D = Déclinaison

$\|\vec{B}_{\text{anc}}\|$ = Intensité

avec

$$-90^\circ \leq I \leq 90^\circ$$

$$0^\circ \leq D < 360^\circ$$



4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.1 Définition

Les mesures du **CMT** ancien sont des mesures indirectes au travers de son enregistrement.

→ Par les roches

→ ou par les terres cuites archéologiques

qui contiennent
des minéraux
"Magnétiques"

c'est une
condition nécessaire.
évidemment.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

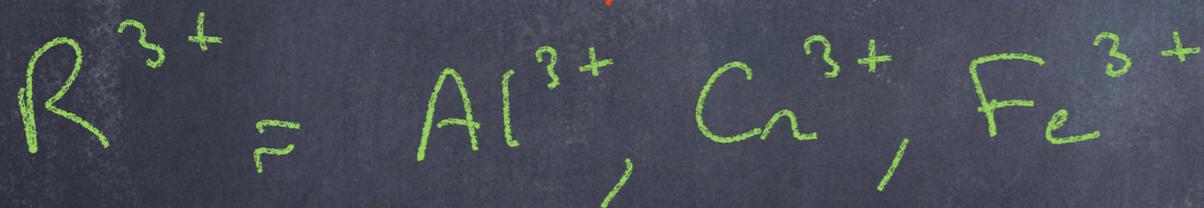
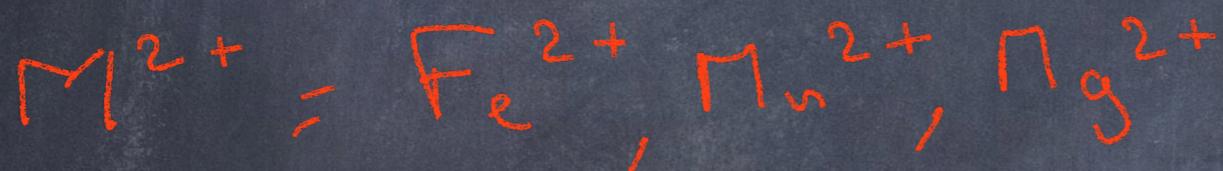
4.2 Les principaux minéraux magnétiques

Famille des Spinelles,

Système cristallin: Cubique

Formule générale: $M^{2+} R_2^{3+} O_4^{2-}$

avec



et la substitution possible

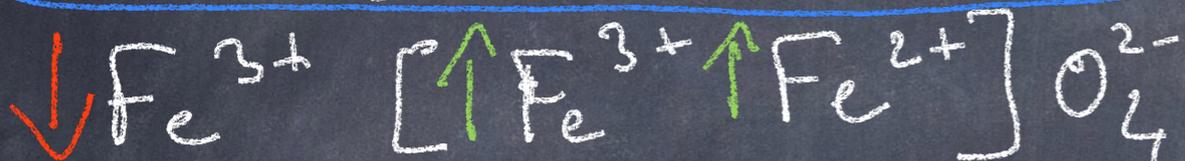


4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.2 Les principaux minéraux magnétiques

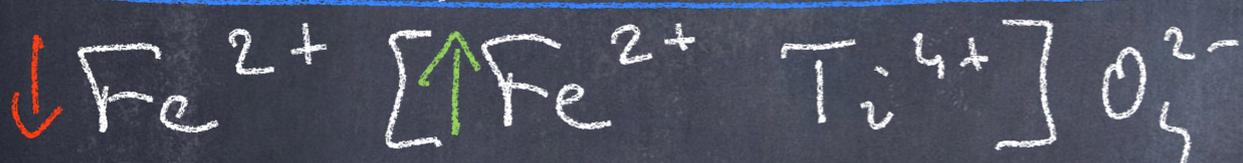
Famille des spinelles:

→ Magnétite Fe_3O_4



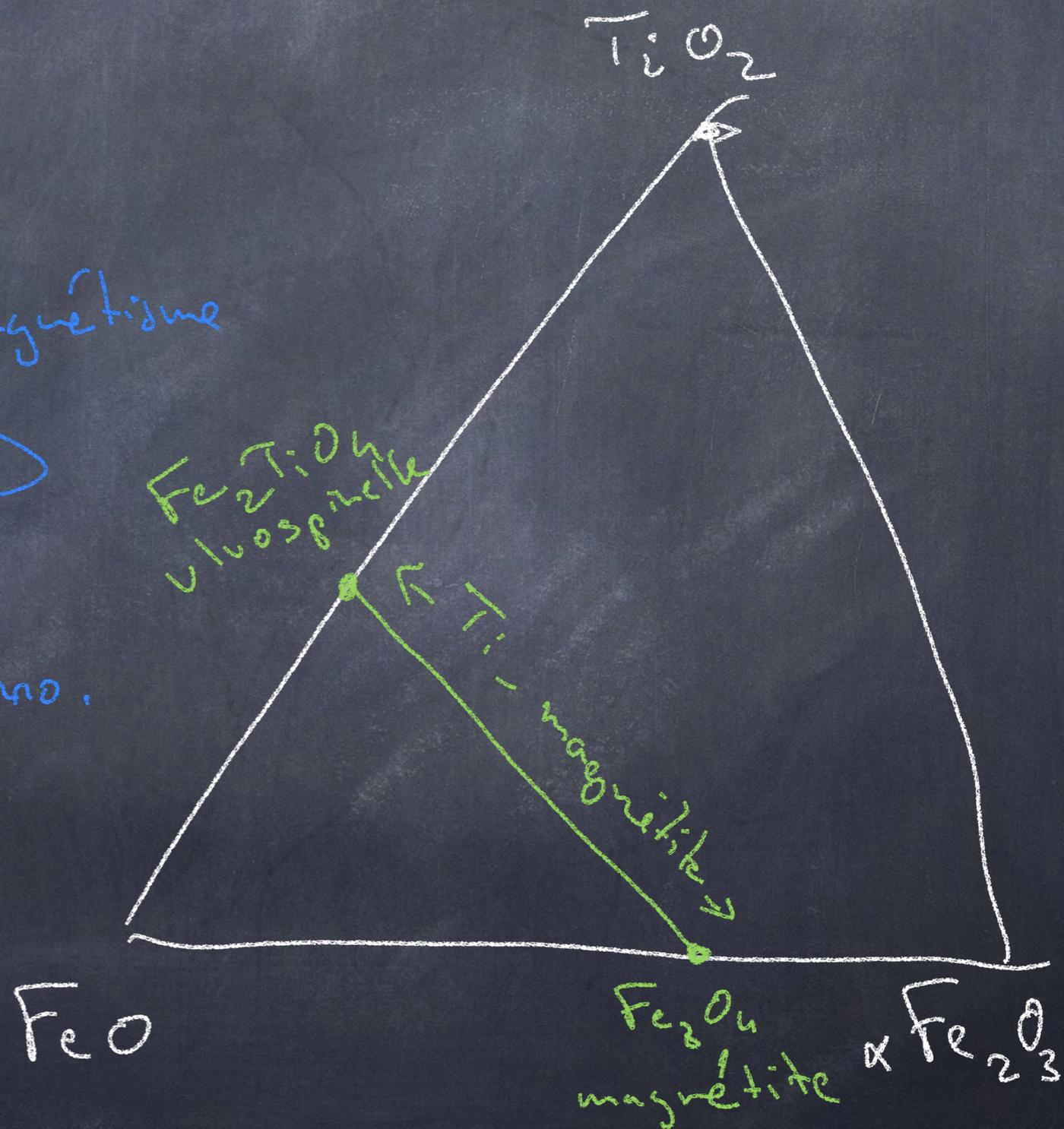
2 sous réseaux ($\downarrow \uparrow \uparrow$) = ferri-magnétique

→ Ulvospinelle: Fe_2TiO_4



2 sous réseaux ($\uparrow \downarrow$) = anti-ferro.

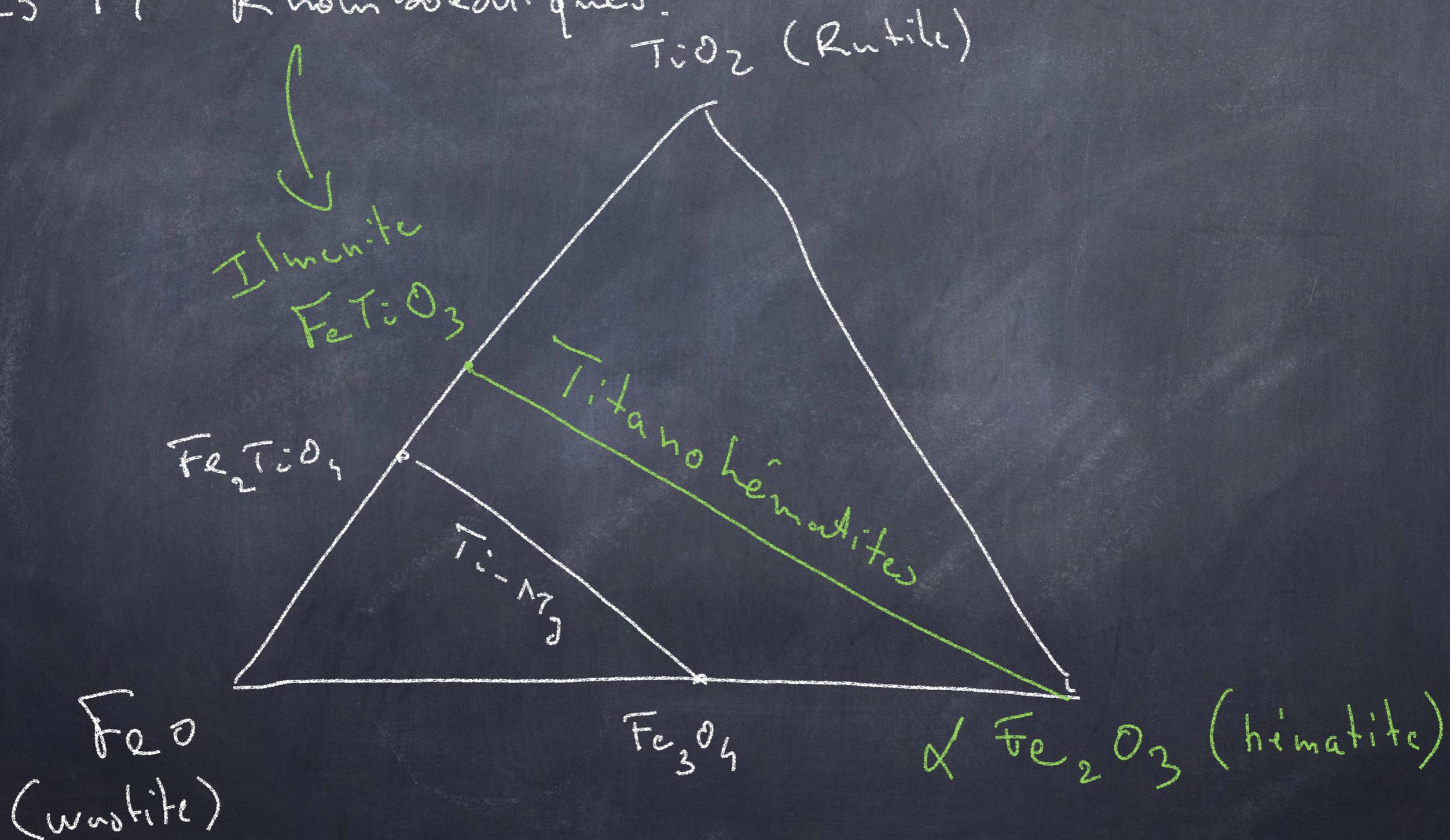
→ Titanomagnétite:



4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.2 Les principaux minéraux magnétiques

Les M^* Rhomboédriques.

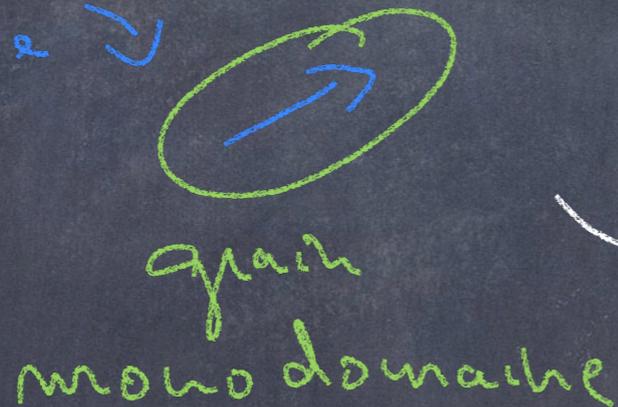


4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.3 comment les roches s'aimantent ?

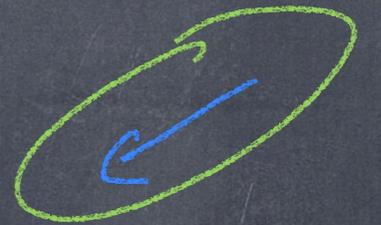
Dans le cas des grains monodomaines on fait appel au concept des **Équilibres dynamiques**.

Aimantation
spontanée \rightarrow



\bar{a} persiste d'un certain
temps

τ (tau)



L'aimantation

Spontanée peut
changer de sens

C'est la théorie de Néel (Prix nobel français)

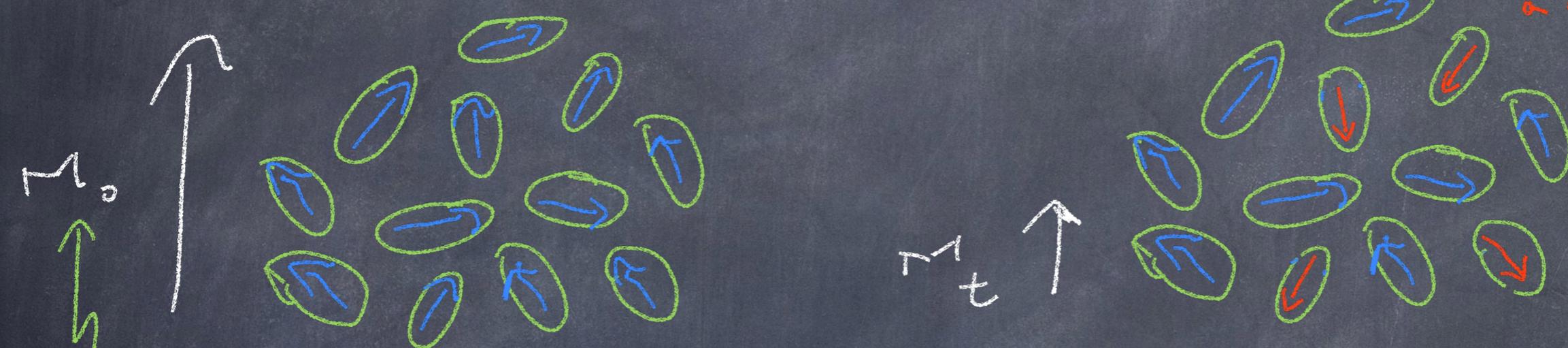
\Rightarrow Applicable uniquement aux grains
monodomaines.



4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.3 comment les roches s'aimantent ?

→ grains dont
l'aimantation
a changé de sens.



Aimantation
moyenne
(Loi des grands
nombres)

Aimantation \uparrow temps $M(t) = M_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$

M_0 : Aimantation initiale
 τ : temps de relaxation

τ : temps de relaxation = temps nécessaire pour que l'aimantation initiale (M_0) diminue de $\frac{1}{e}$

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.3 comment les roches s'aimantent ?

La Théorie de Néel:

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{E_{\text{alignement magnétique}}}{E_{\text{thermique}}}$$

$C \approx 10^{10} \text{ s.}$

aimantation spontanée pour le ferromagnétisme s.e

constante d'Anisotropie

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{Kv}{kT}$$

temps de relaxation

Constante de Boltzmann

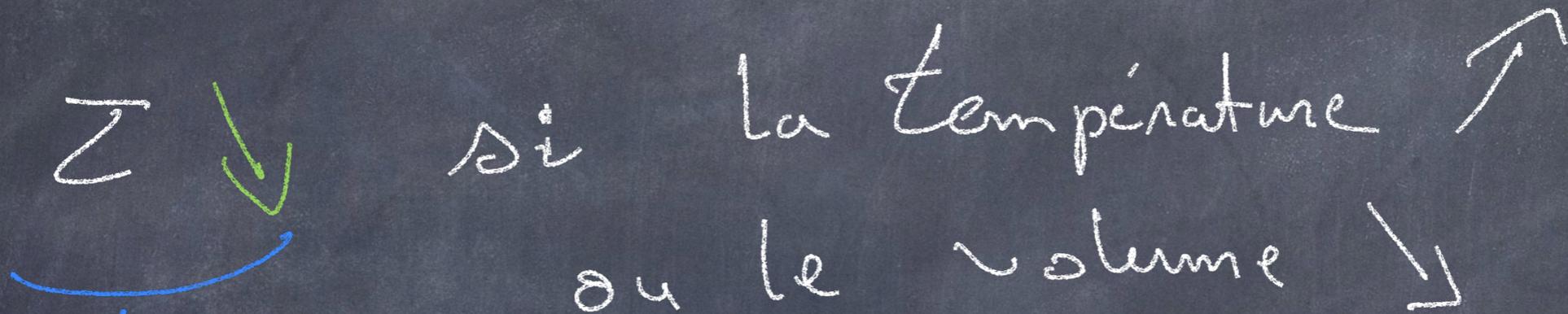
Temperature

volume

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.3 comment les roches s'aimantent ?

En résumé :



Les conditions énergétiques sont favorables à
↓ changement de la direction de l'aimantation.

!!! Les roches qui enregistrent le COT ancien doivent
avoir des temps de relaxation (τ) de l'ordre des
temps géologiques. (pour conserver l'aimantation).

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.4 Les aimantations naturelles primaires dans les roches

Primaires = acquises au moment de la formation de la roche.

Donc on connaît l'âge de l'aimantation.

Secondaires = acquises après la formation de la roche

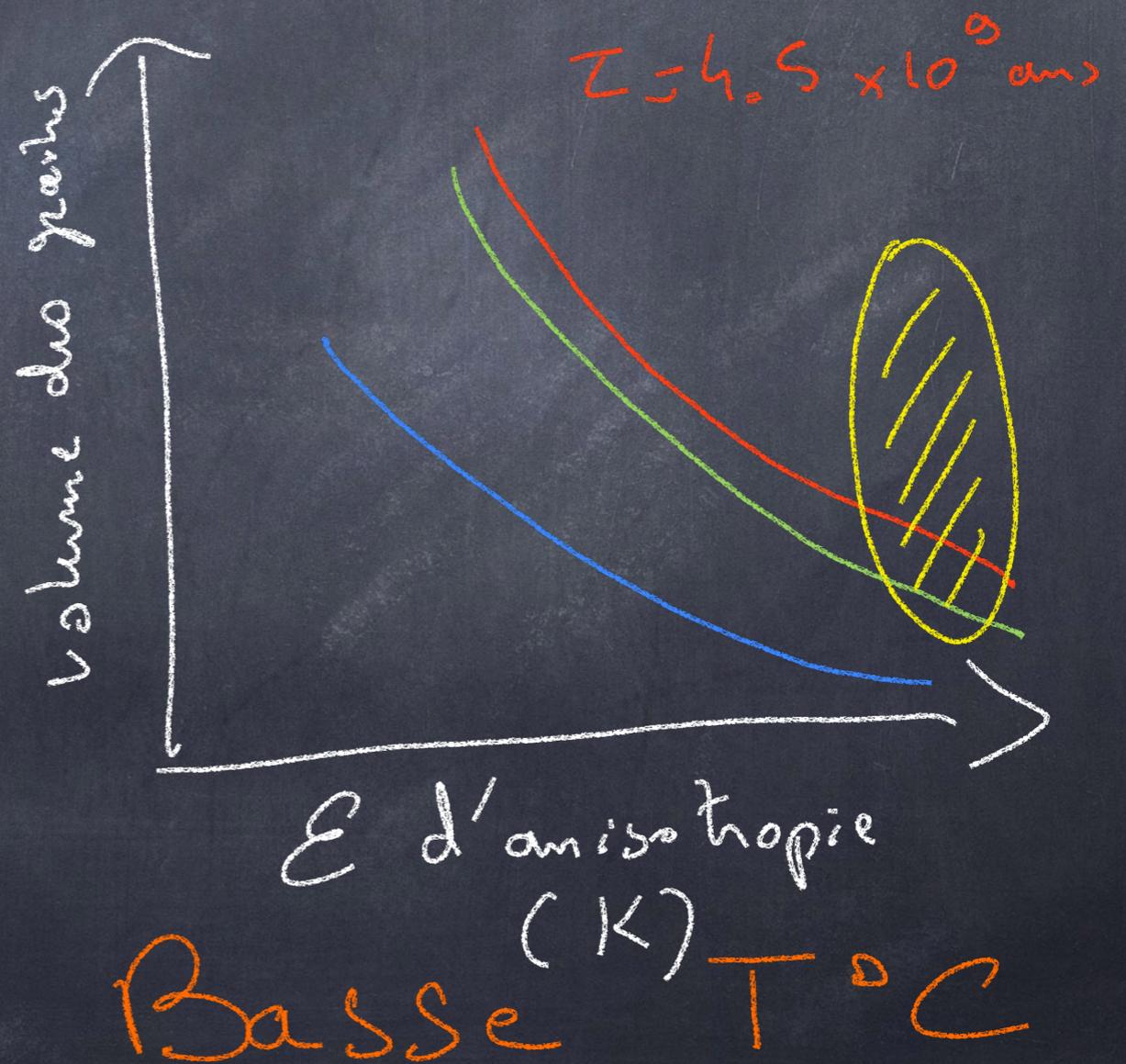
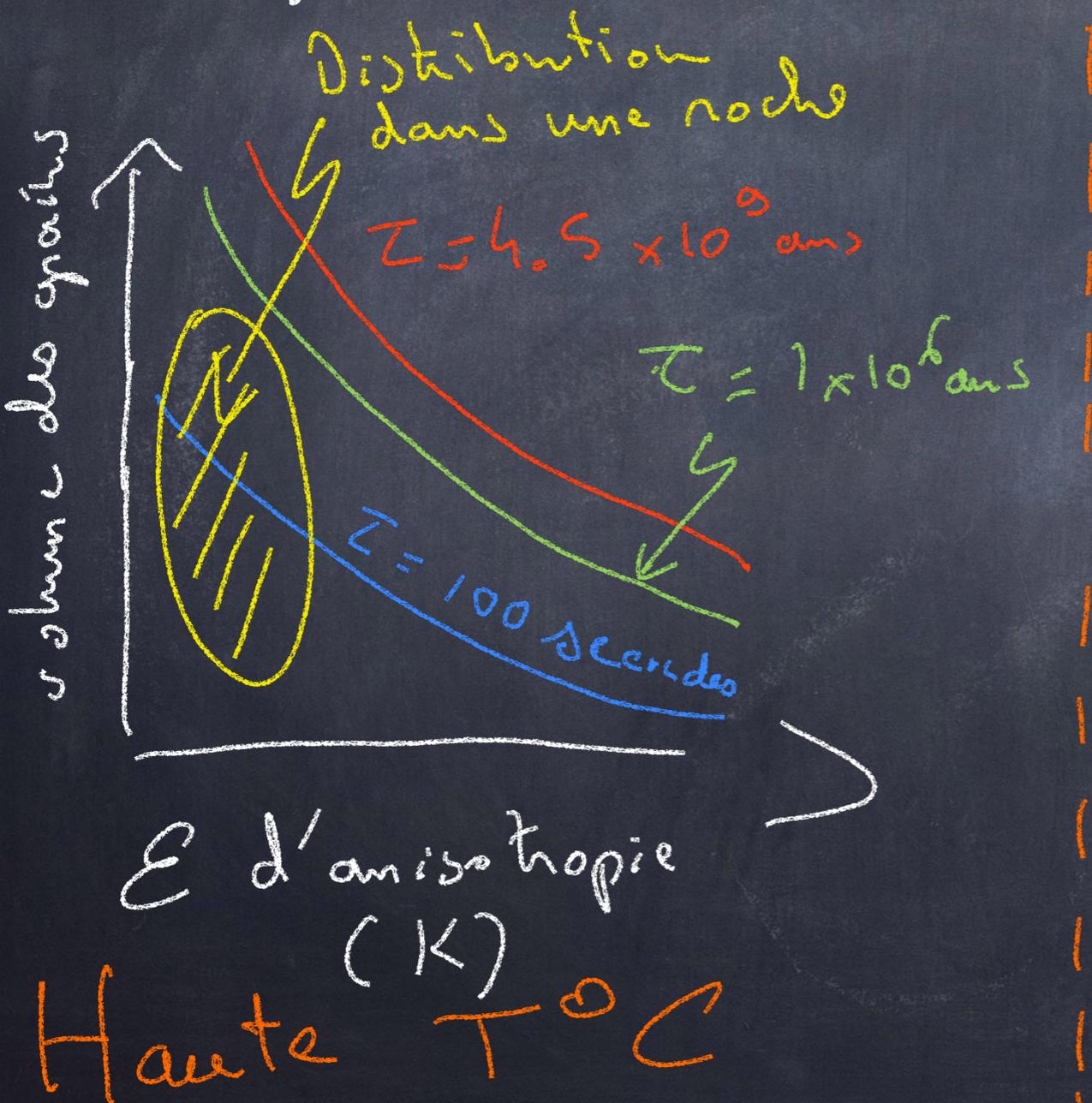
Dans bien des cas, on ne connaît pas l'âge.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.4 Les aimantations naturelles primaires dans les roches

1^{er} Cas: Diminution de la Température = $\uparrow Z$

Acquisition de l'Aimantation Thermo-Rémanente

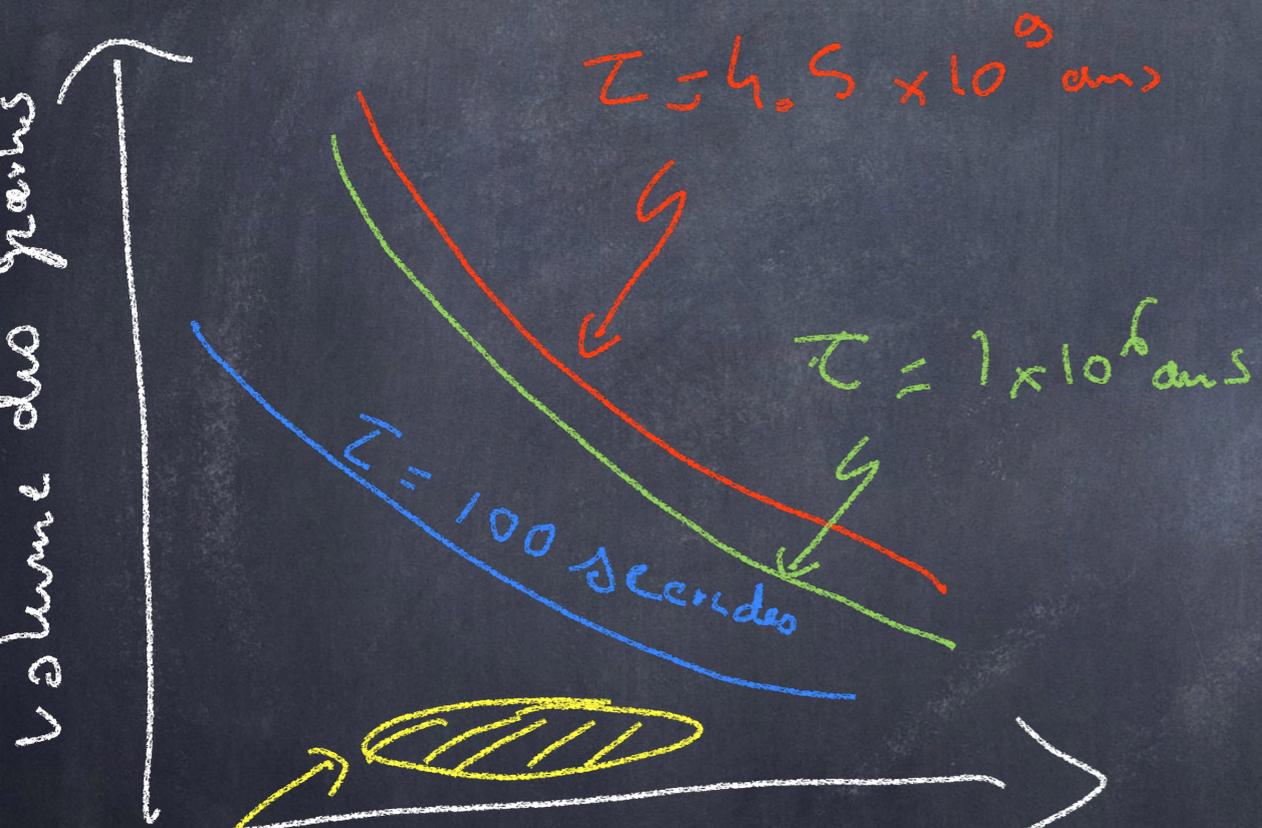


4. Le Champ magnétique terrestre ancien

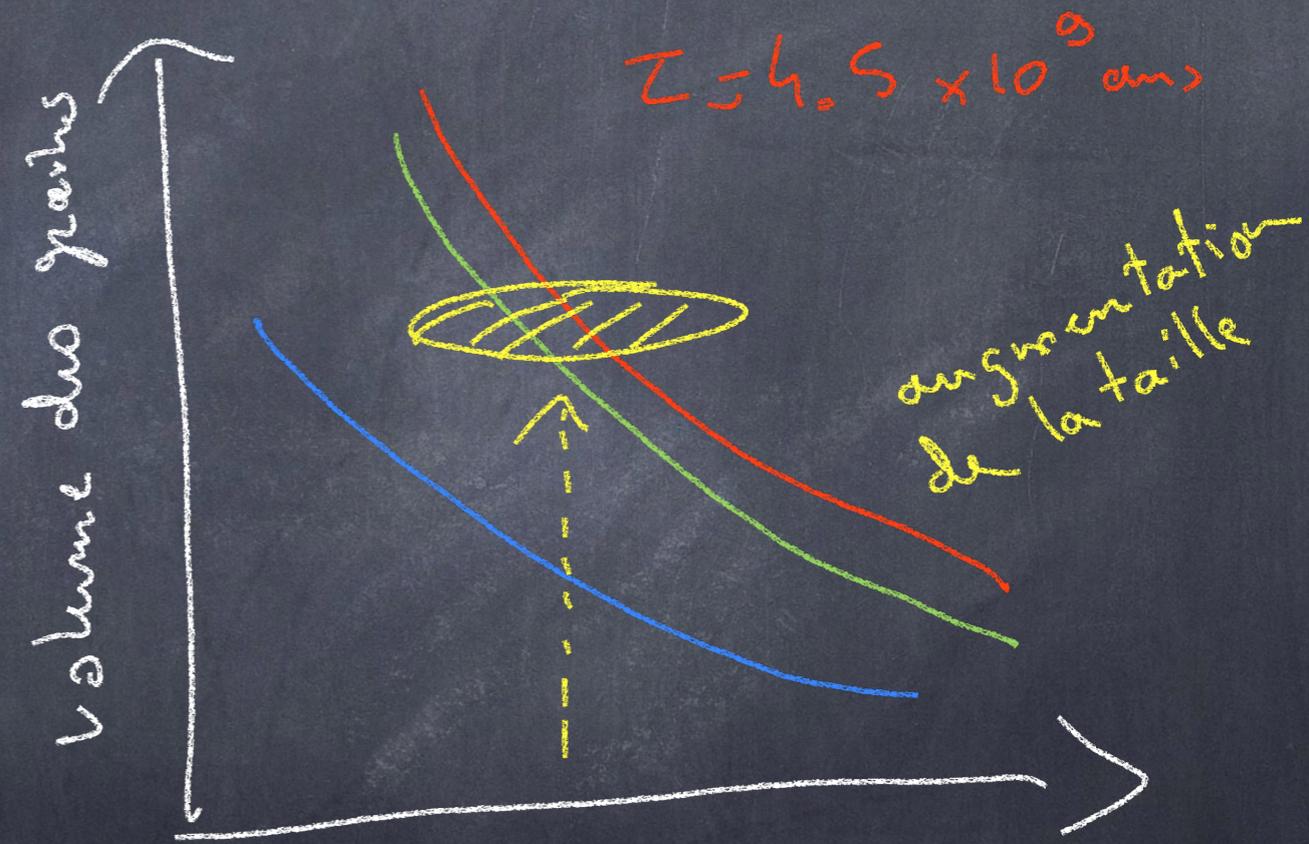
4.4 Les aimantations naturelles primaires dans les roches

2^{ème} Cas : Augmentation de la taille des grains (\uparrow)

Aquisition de l'Aimantation Rémanente Cristalline



Distribution dans une roche



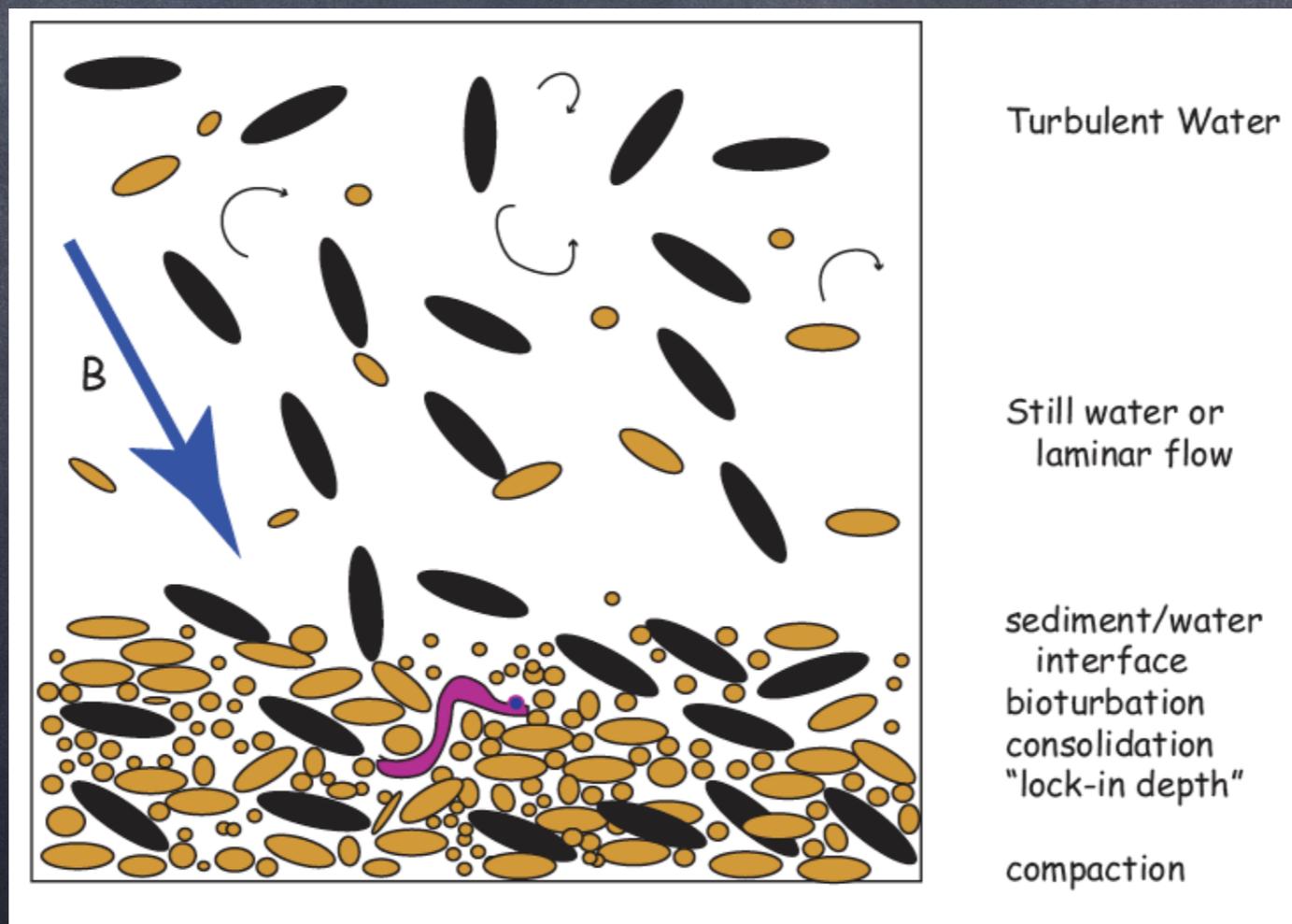
E d'anisotropie (K)

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.4 Les aimantations naturelles primaires dans les roches

Autre cas : Aimantation Rémanente Débitique

Ici on est dans un cas différent = Orientation mécanique des grains dans la colonne d'eau. (Sédiments).



P_b
du temps de
blocage de
l'ARD

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.5 Les aimantations naturelles secondaires dans les roches

ATR
ARC) → peuvent être secondaires si processus postérieur
à la formation de la roche.

+

ARV = Aim. Rem. Visqueuse = Temps long dans un
champ faible.

ARI = A. R. Isotherme = Temps court champ fort
ex: coup de foudre.

uniquement secondaires (jamais primaire).

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.6 Mesure de la direction du CMT ancien

Hypothèse: La direction d'aimantation de la roche est parallèle et dans certains cas proportionnelle à la direction du champ ambiant au moment de la formation de la roche.

$$I_{\text{aimantation}} = I_{\text{CMT ambiant}}$$

$$D_{\text{aimantation}} = D_{\text{CMT ambiant}}$$

$$I_{\text{aimantation}} \propto \|\vec{B}\|_{\text{CMT ambiant}}$$

Et il faut un temps de relaxation (τ) $>$ âge de la roche.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.6 Mesure de la direction du CMT ancien

Il faut donc !

① Prélèvement des échantillons orientés sur le terrain.
nos collègues lors de TPE



Maureen

Bloc de plâtre

(terre cuite archéologique)



Charlotte (sédiments)
emporte-pièce

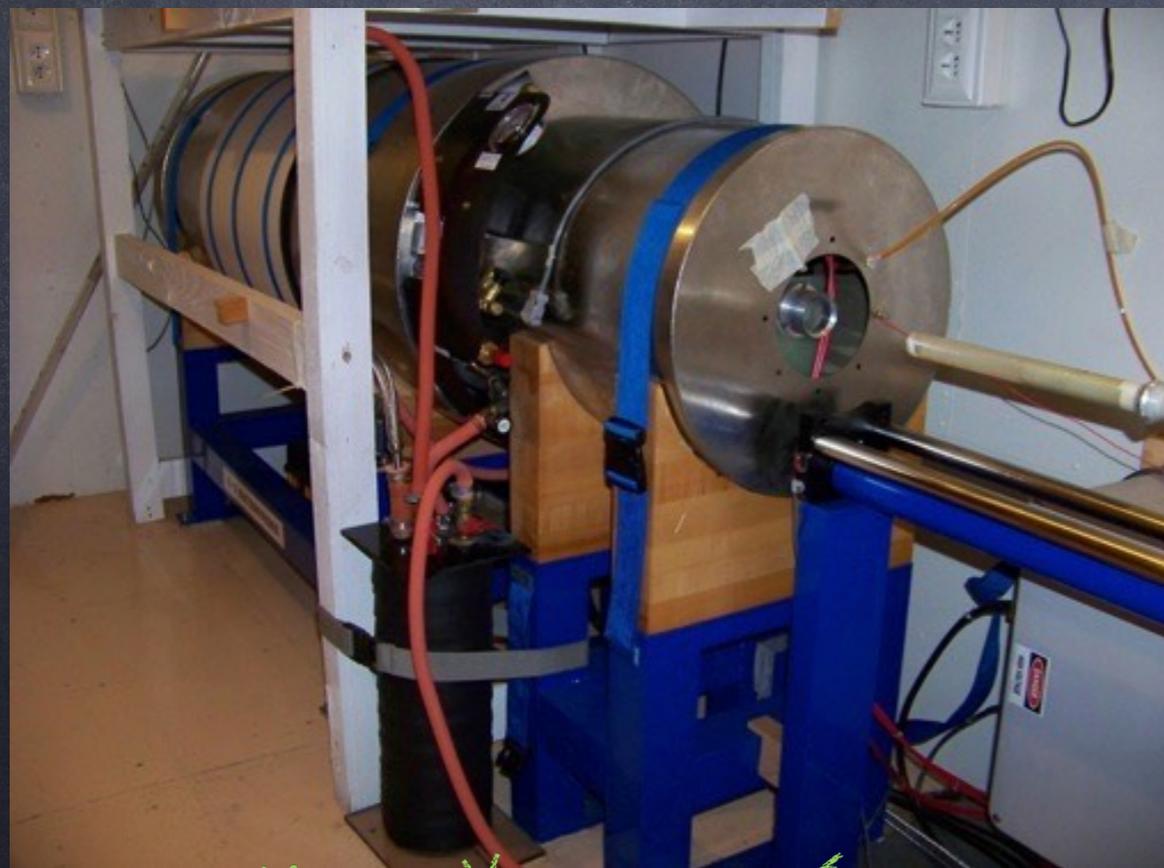


Yasmine (Basalte)
Carottage

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

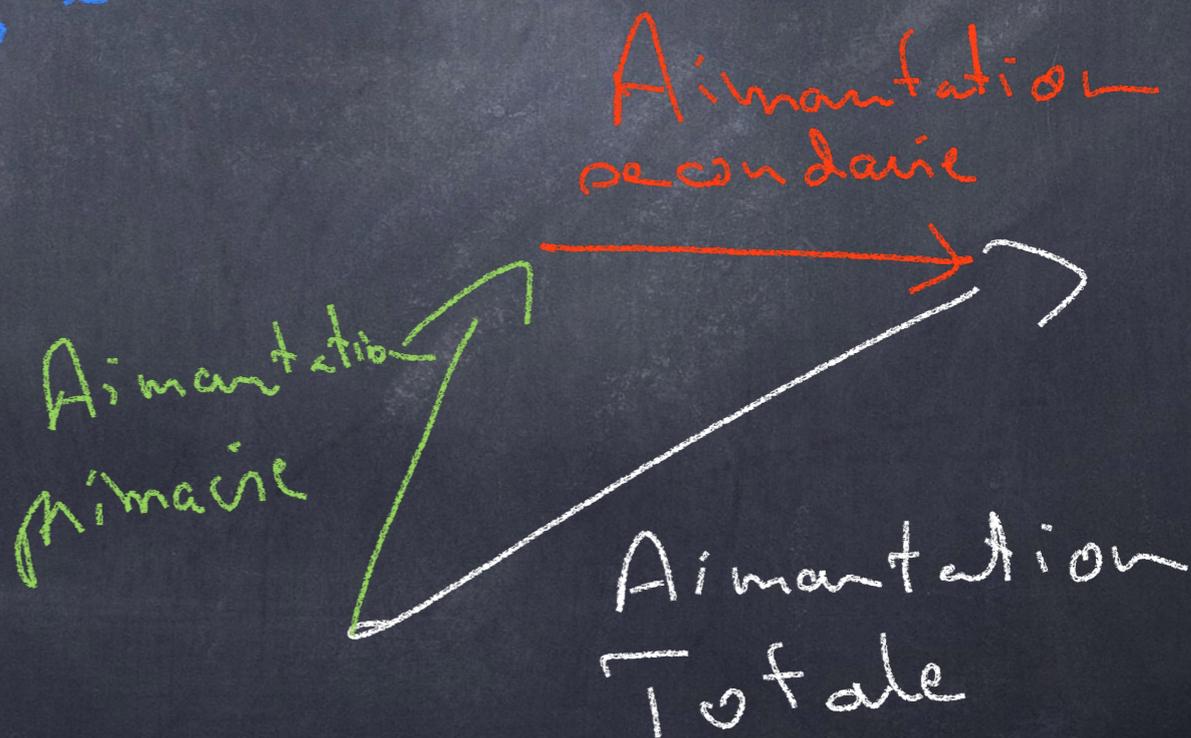
4.6 Mesure de la direction du CMT ancien

Il faut donc : (2)
Mesurer la direction d'aimantation en isolant (avec un traitement) la direction d'aimantation primaire d'éventuelles aimantations secondaires.



magnétométrie cryogénique

Le labo se visite !!!
sur demande



4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.7 Représentation indirecte du CMT ancien

Le **P**ôle **G**éomagnétique **V**irtuel

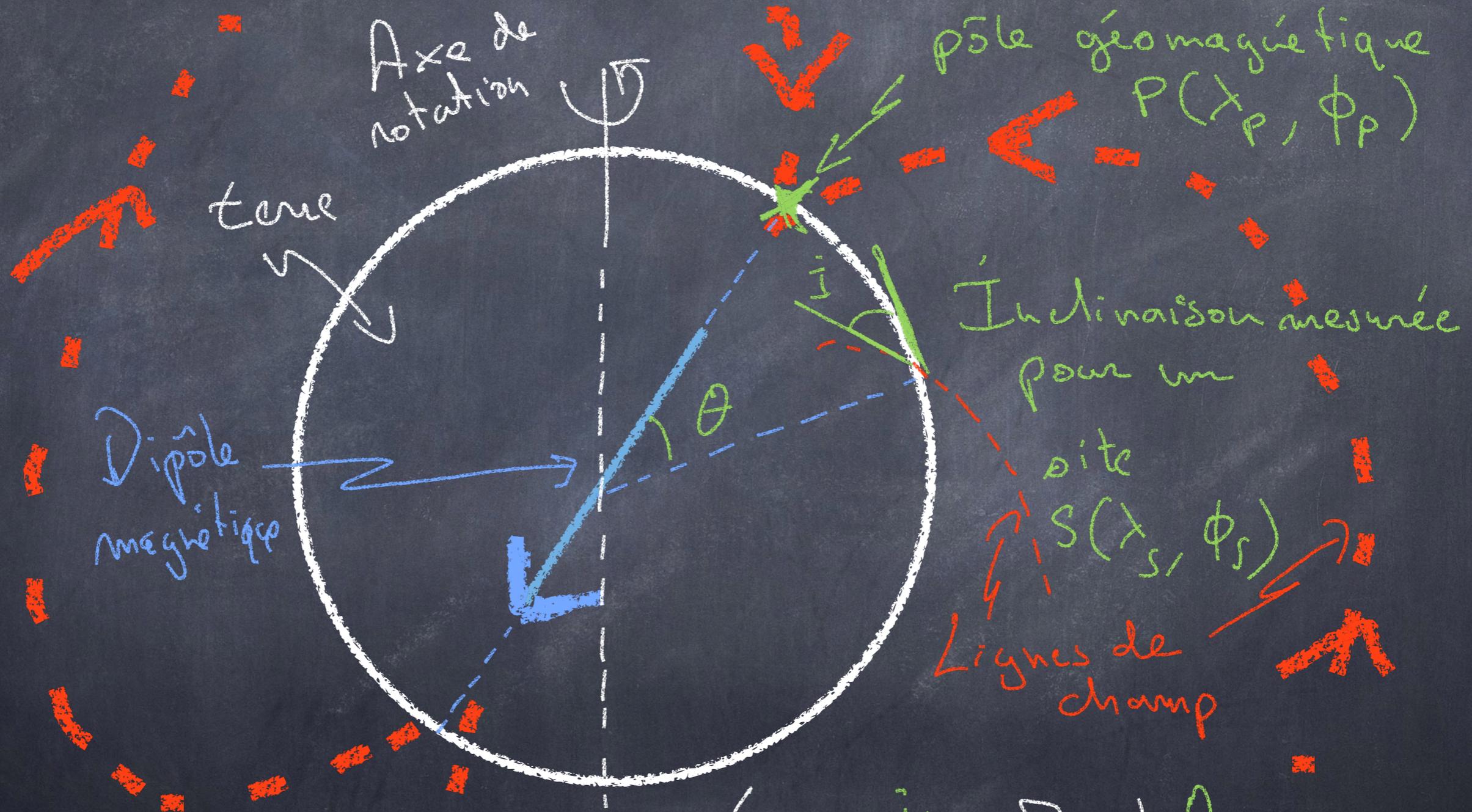
Un outil très pratique pour la description du CMT ancien.

C'est une façon de transformer une **direction locale** du champ (en un site donné) en son **pôle géomagnétique** équivalent. En clair,

Le **PGV** c'est la localisation sur le globe du pôle géomagnétique d'un champ qui donnerait la direction observée sur le site d'étude.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.7 Représentation indirecte du CMT ancien



$$\tan i = 2 \cot \theta$$

relation pour 1 dipôle

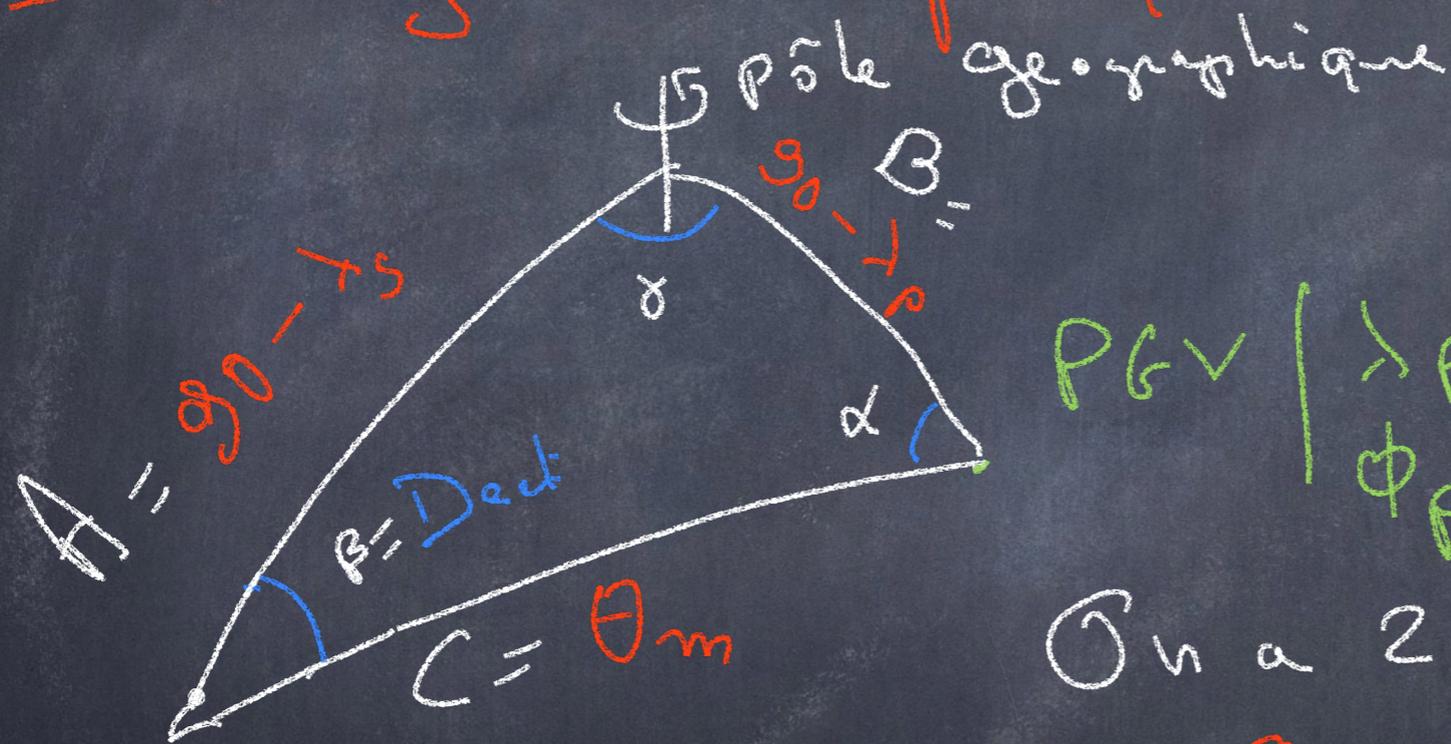
4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.7 Représentation indirecte du CMT ancien

Calcul de la position du Pôle Géomagnétique Virtuel

Pb de trigonométrie Sphérique.

Virtual car on
sait que le champ
n'est pas tout à
fait celui d'un
dipôle.



PGV (λ_p, ϕ_p) c'est ce que l'on
cherche.

On a 2 cotés du triangle

$$A = 90 - \lambda_s$$

$$C = \theta_m = \arctan(2 / \tan I)$$

et 1 angle

$$\beta = \text{Déclinaison}$$

Site (λ_s, ϕ_s)

↳ hypothèse du
dipôle

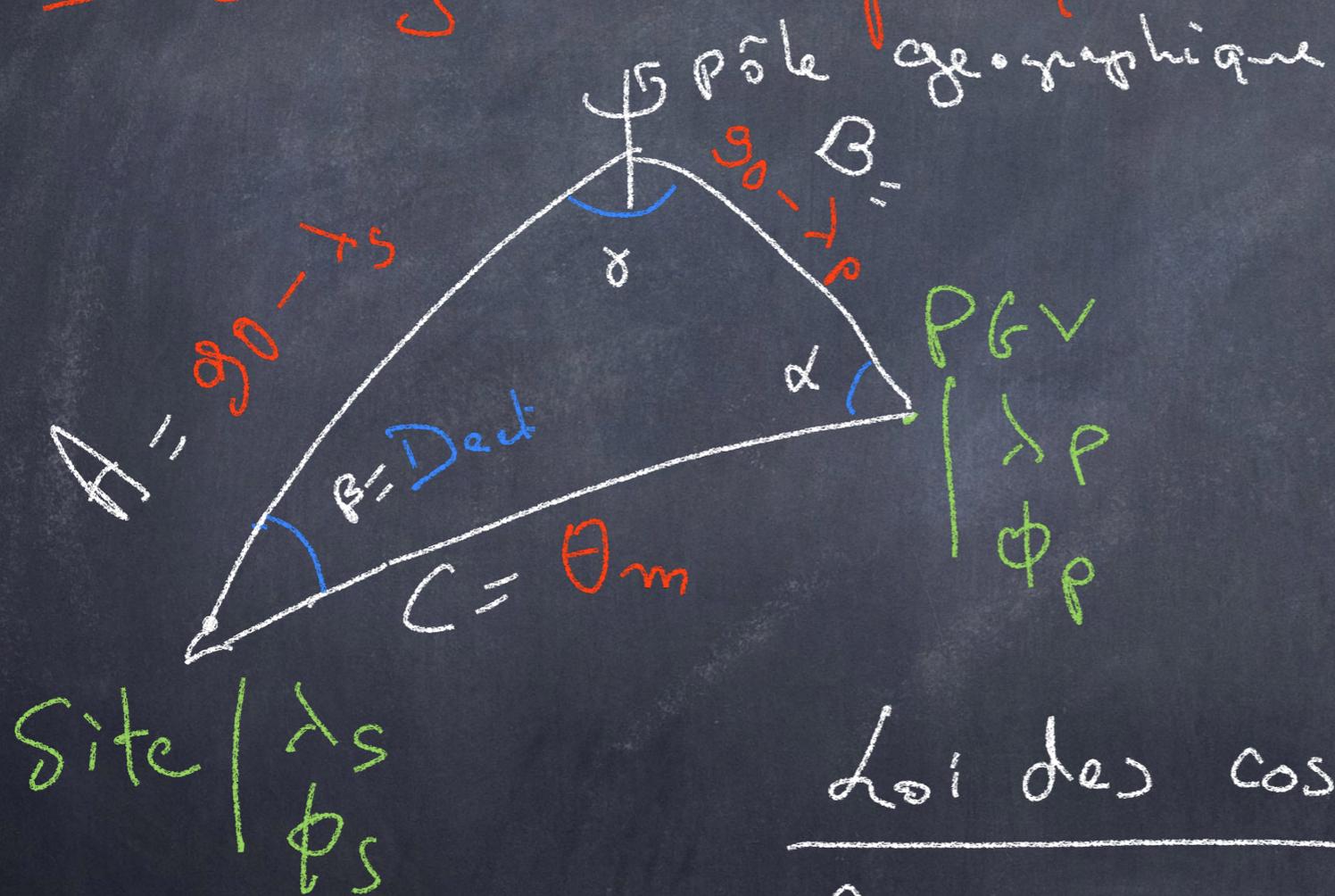
↳ mesuré dans
la roche.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.7 Représentation indirecte du CMT ancien

Calcul de la position du Pôle Géomagnétique Virtuel

Pb de trigonométrie Sphérique.



Loi des cosinus :

$$\cos B = \cos A \cos C + \sin A \sin C \times \cos \beta$$

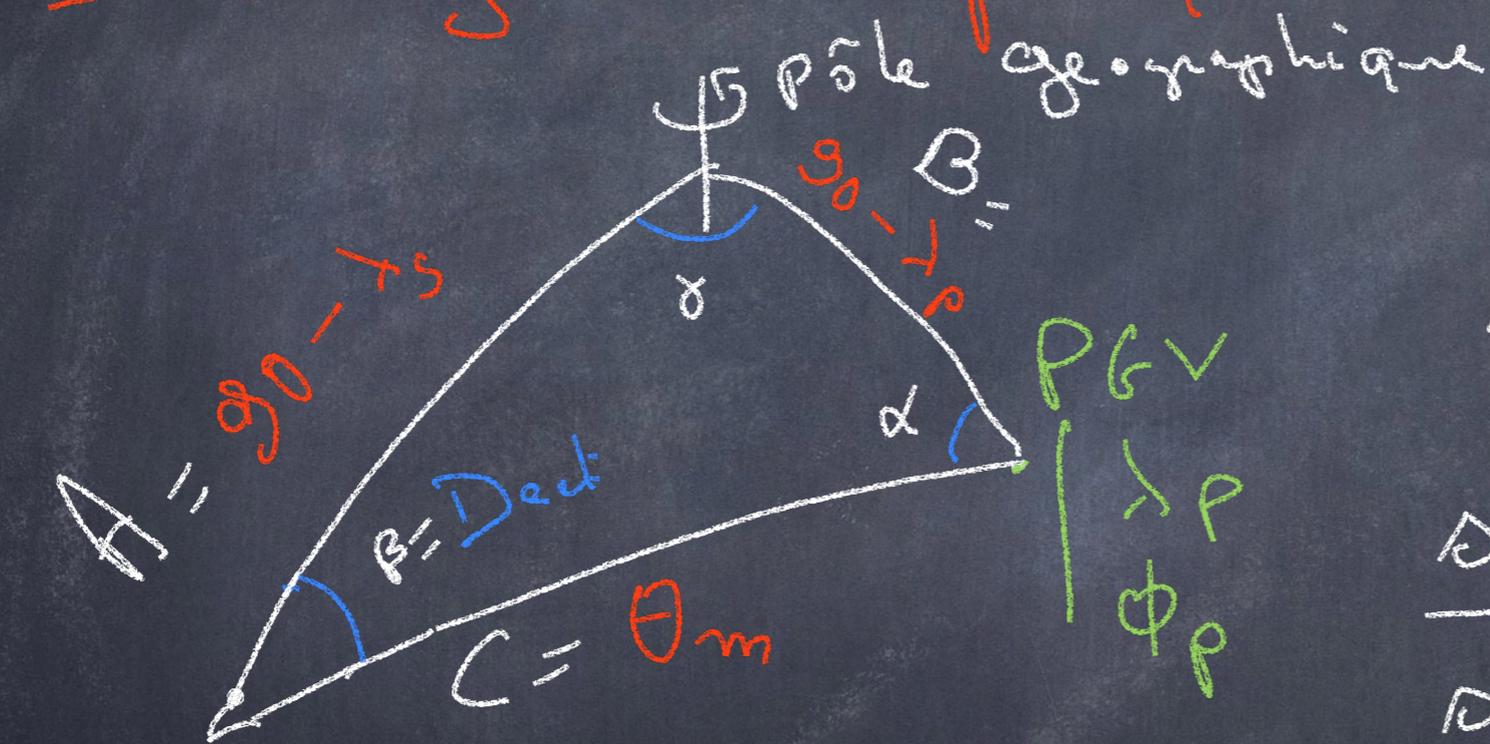
$$\sin \lambda_p = \sin \lambda_s \cos \theta_m + \cos \lambda_s \sin \theta_m \cos D$$

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.7 Représentation indirecte du CMT ancien

Calcul de la position du Pôle Géomagnétique Virtuel

Pb de trigonométrie Sphérique.



Loi des sinus

$$\frac{\sin \delta}{\sin C} = \frac{\sin \beta}{\sin B} = \frac{\sin \alpha}{\sin A}$$

Site / λ_s
 ϕ_s

$$\sin \delta = \frac{\sin D}{\cos \lambda_p} \times \sin \theta_m$$

$$\phi_p = \phi_s + \arcsin \left[\frac{\sin D \sin \theta_m}{\cos \lambda_p} \right]$$

On n'est aperçu qu'en faisant le calcul de

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.8 le CMT ancien de référence

position moyenne des PfV , on obtenait un pôle moyen confondu avec l'axe de rotation la Terre.

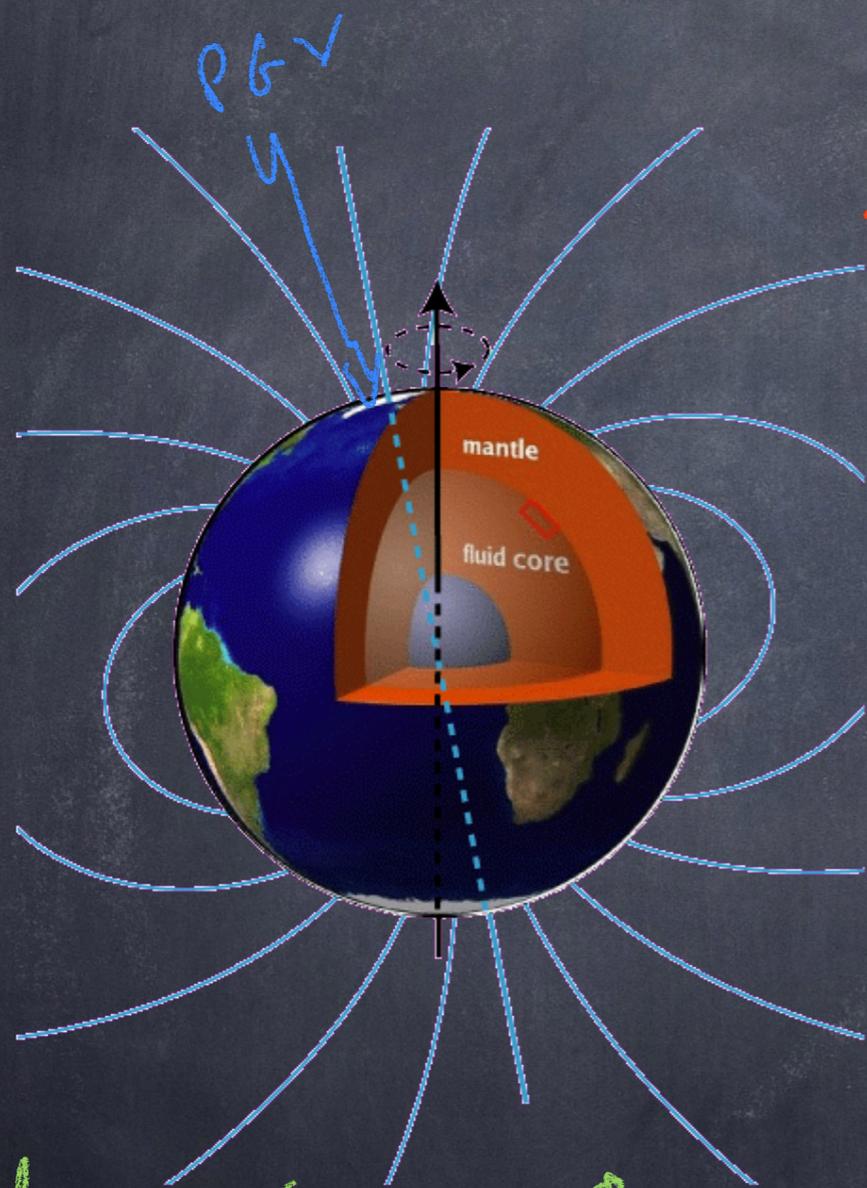
→ C'est le Pôle de Gauss ou encore appelé

Pôle Paléomagnétique.

Notion très importante pour le cours sur la paléogéographie.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.8 le CMT ancien de référence



Le pôle paléomagnétique ou pôle de Gauss correspond à la moyenne dans le temps de PGV afin d'éliminer la variation paléoseculaire. La différence entre PGV et pôle de Gauss se situe sur la fenêtre de temps considérée.

Le pôle de Gauss est confondu avec l'axe de rotation de la Terre → application en paléogéographie (voir futur cours).

4.8 les fluctuations du CMT ancien

① La variation paléoséculaire

Les points à approfondir :

- Caractéristiques géographiques et temporelles ?
- Origine ?
- Utilisation de la variation paléoséculaire des derniers millénaires pour la datation des terres cuites archéologiques.

→ voir TPE de Laureen.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.8 les fluctuations du CMT ancien

② Les excursions du CMT ancien

Les points à approfondir.

- Origine
- caractéristiques, durée
- Rechercher quelques exemples d'excursion du CMT ancien.

4. Le Champ magnétique terrestre ancien

4.8 les fluctuations du CMT ancien

③ Les renversements de polarité du CMT ancien

Les points à approfondir :

— Caractéristiques, durée etc...

— Quelle en est la cause ?

— Quelle utilisation pour la "stratigraphie"
et la datation de formations géologiques ?

— etc...