

Méthode magnétique appliquée à l'exploration multi-échelle du Bassin de Franceville

Soutenance de Thèse

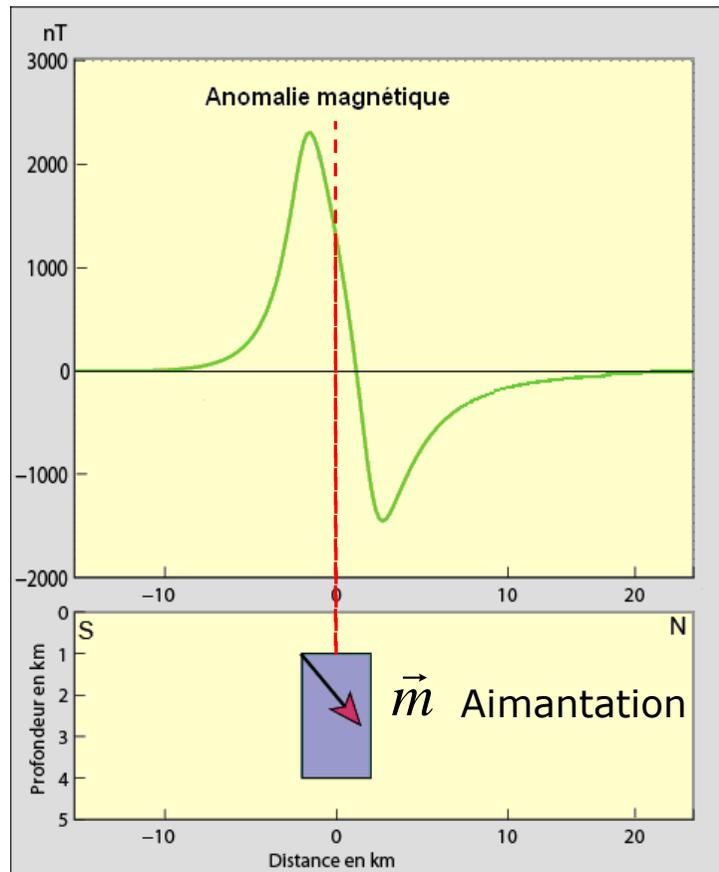
Mardi 27 septembre 2011

Simon FLEURY

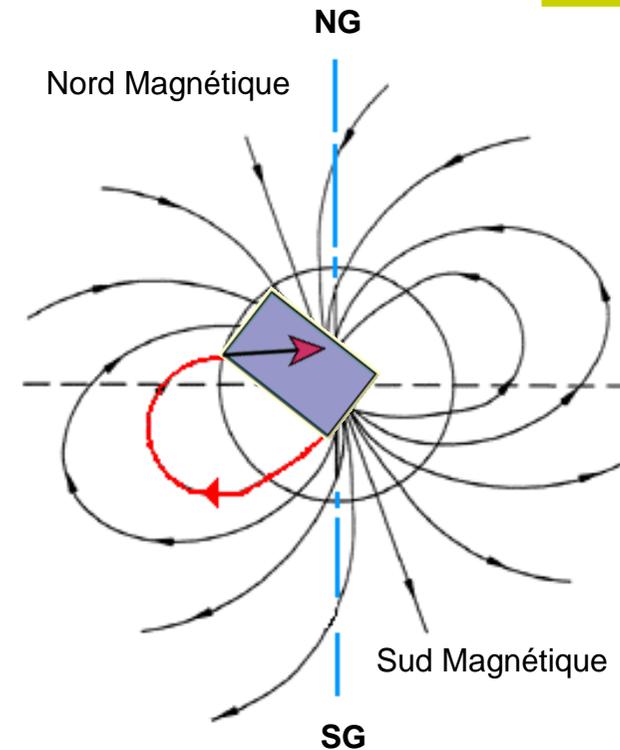
Directeur de thèse : Marc Munschy



Problématique



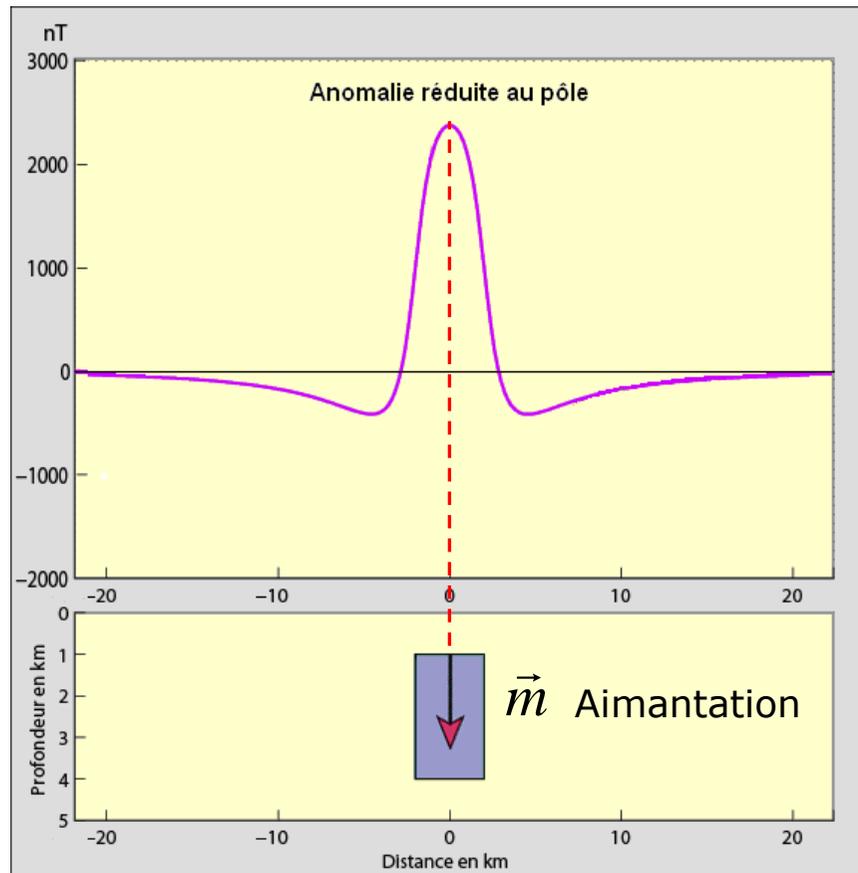
(Modifiée d'après Edel, Cours Méthodes Potentielles)



Lignes du champ de référence \vec{R}
(aimantation induite par le champ)

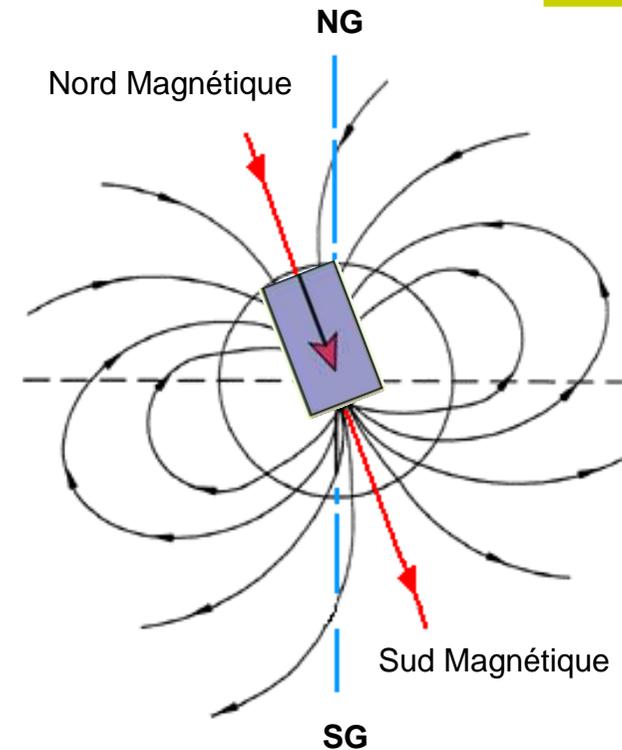
- ◆ Localisation quelconque :
anomalie dissymétrique

Problématique



(Modifiée d'après Edel, Cours Méthodes Potentielles)

- ◆ **Objet situé aux pôles :
anomalie symétrique centrée sur l'objet**



Lignes du champ de référence \vec{R}
(aimantation induite par le champ)

- ◆ **Méthode doublement vectorielle :**

$$\vec{m} \text{ et } \vec{R}$$

$$\vec{\mu} = (l, m, n) \text{ et } \vec{\rho} = (L, M, N)$$



▶ **Comment détecter des cibles uranifères à partir de données magnétiques ?**

⇒ Éléments de géologie, adapter outils de traitement

▶ **Qu'est ce qu'une anomalie magnétique ?**

⇒ Diversité des définitions, sous entend des approximations

▶ **Quelles sont les fonctions magnétiques caractéristiques des sources ?**

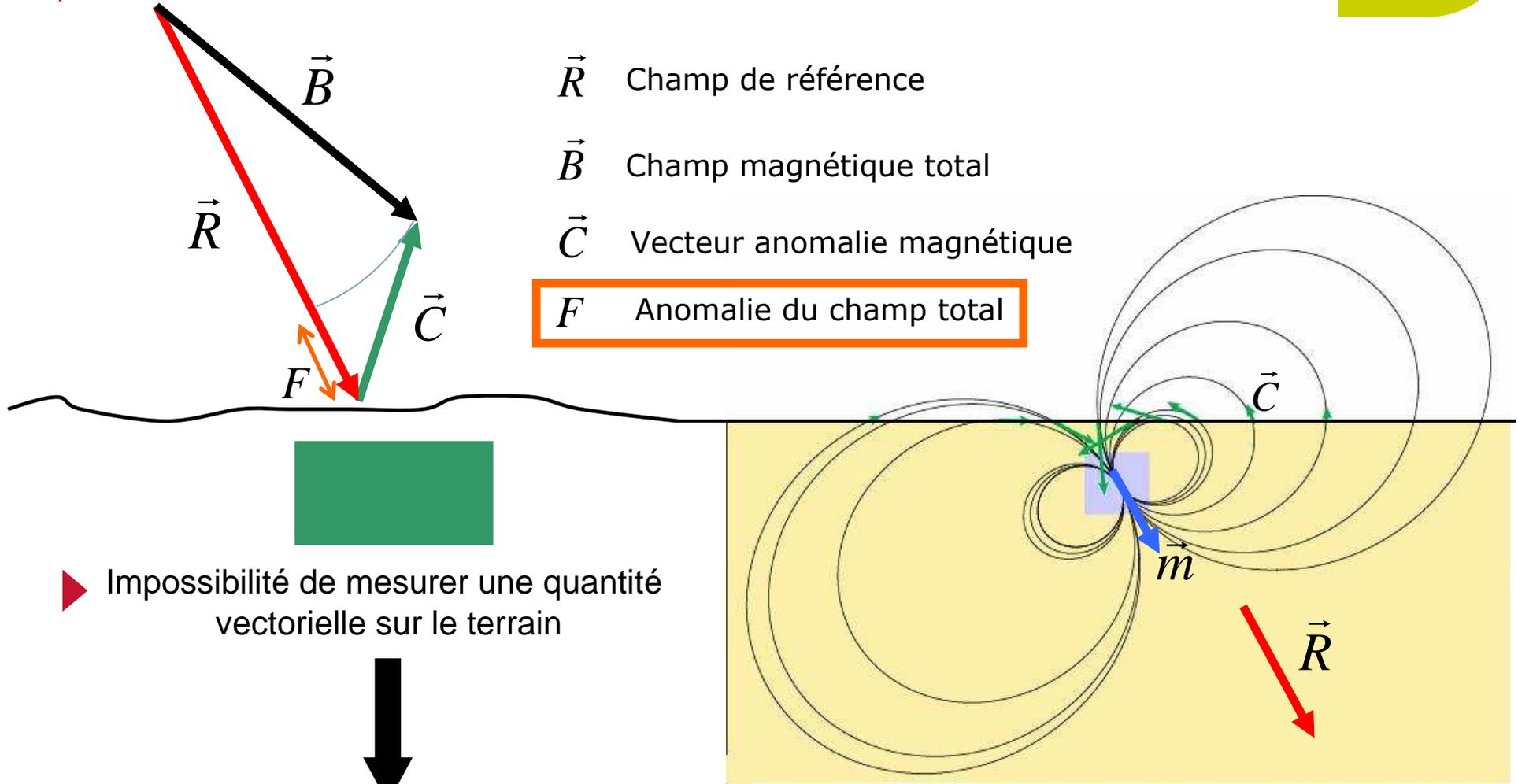
⇒ Magnétostatique/Méthodes potentielles, modélisation/inversion



- ▶ **1- Les fonctions magnétiques caractéristiques**
- ▶ **2- Superpotentiels et Tenseur de l'Anomalie Magnétique : Applications**
- ▶ **3- Prospection aéromagnétique du Bassin de Franceville**
- ▶ **4- Conclusions et perspectives**

1.1.1 Champ d'anomalie magnétique et Anomalie du champ total

► Définition du champ d'anomalie magnétique : $\vec{C} = \vec{B} - \vec{R}$



► Impossibilité de mesurer une quantité vectorielle sur le terrain



Mesure de l'anomalie scalaire : $F = B - R$

(Modifiée d'après Edel, Cours Méthodes Potentielles)

1.1.2 Anomalie de projection : F_1



$$F \neq C \quad F = \left\| \vec{R} + \vec{C} \right\| - \left\| \vec{R} \right\|$$

► Développement limité de F : $C \ll R \quad \alpha = (\vec{C}, \vec{R})$

$$F = \underbrace{C \cos \alpha}_{F_1} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \alpha \right) \frac{C^2}{R} + \left(-\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{1}{2} \cos^3 \alpha \right) \frac{C^3}{R^2} + O\left(\frac{C^4}{R^3} \right)$$

(Sailhac, 1999)

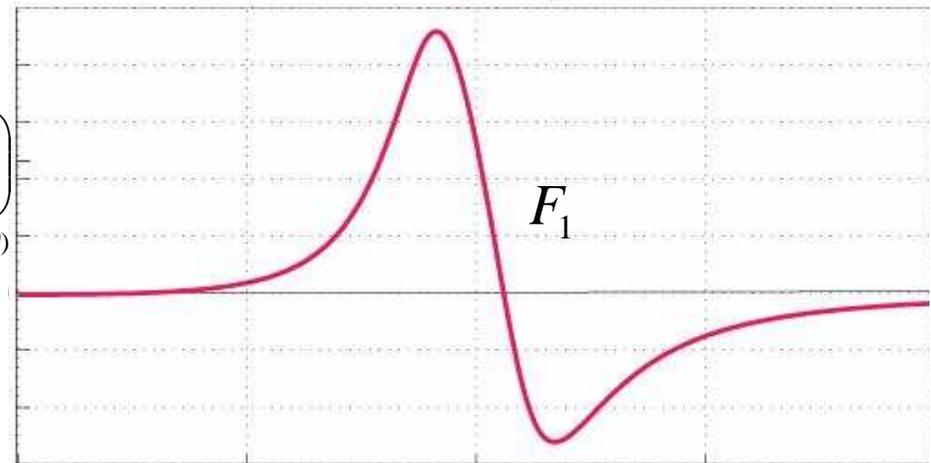
$$F_1 = \vec{\rho} \cdot \vec{C}$$

Classiquement : $F \approx F_1$ *(Blakely, 1995)*

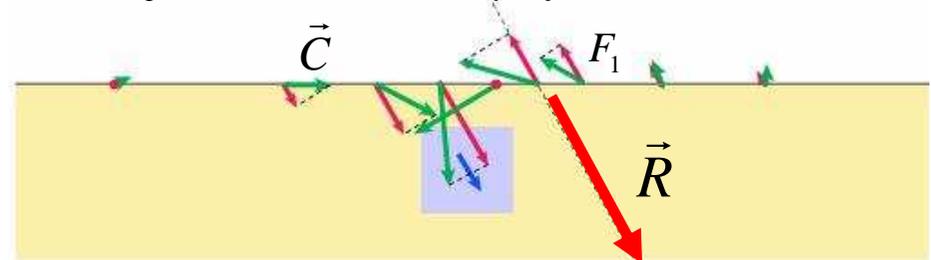
► Mais : $F \neq F_1$

Dans quelle mesure F est-il un bon estimateur de F_1 ?

Passage par F_1 essentiel pour les méthodes potentielles.



F_1 : définie comme la projection de \vec{C} sur \vec{R}

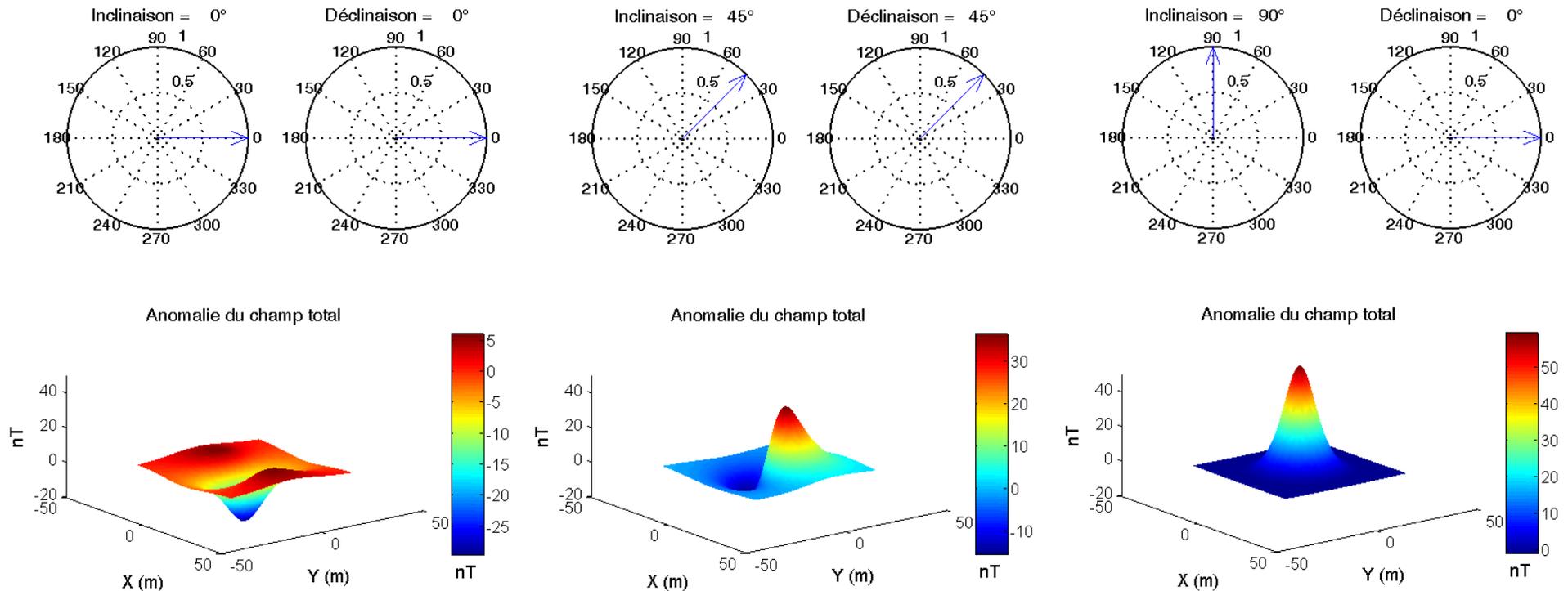


(Modifiée d'après Edel, Cours Méthodes Potentielles)

$$F_3 = F_1 + (C^2 - F_1^2) \frac{1}{2R} + (F_1^3 - C^2 F_1) \frac{1}{2R^2} + O\left(\frac{C^4}{R^3} \right) \quad \Rightarrow \quad F_{k+1} = F_1 + \frac{1}{2R} (C^2 - F_k^2) + O\left(\frac{C^{k+1}}{R^k} \right)$$

1.1.2 Anomalie de projection : F_1

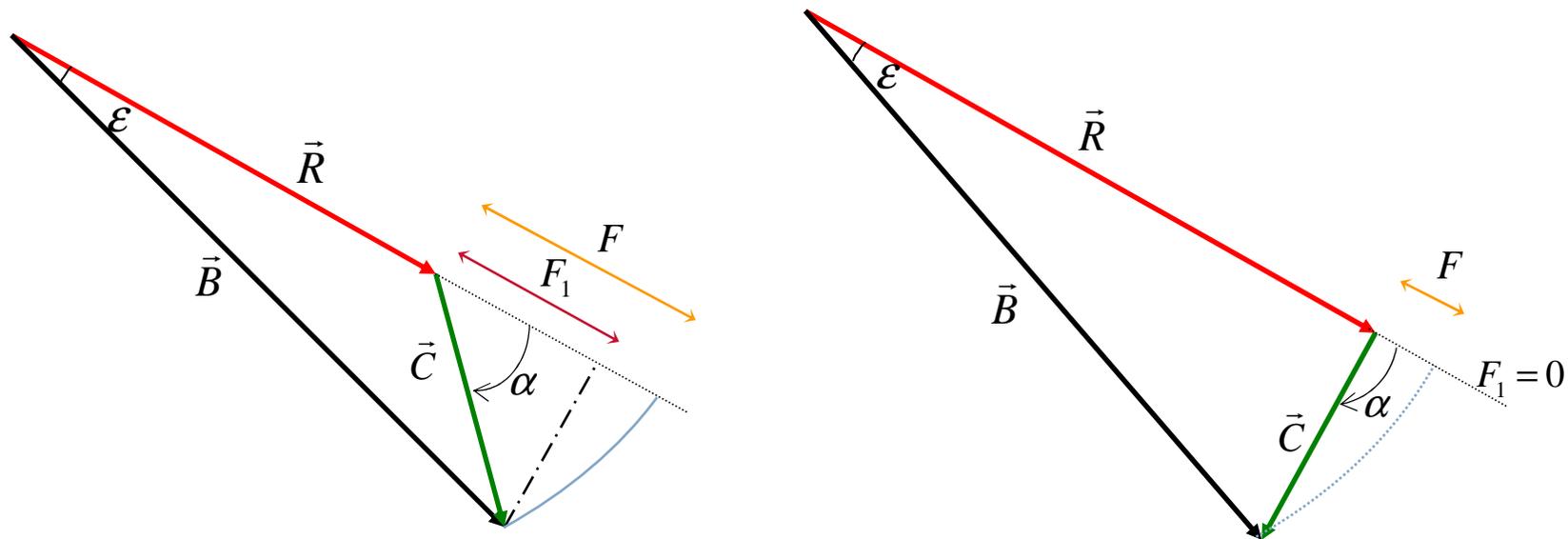
Cas du dipôle induit



Anomalies de projection pour différentes valeurs d'inclinaisons et de déclinaisons

1.2.1 Comparaison entre F et F_1

► Représentations géométriques de F et F_1 : $F_1 = \vec{\rho} \cdot \vec{C}$ et $F = B - R$



Représentations géométriques 2D de l'anomalie du champ total (F) et de l'anomalie de projection (F_1)

1.2.2 Estimation numérique de l'écart entre F et F_1

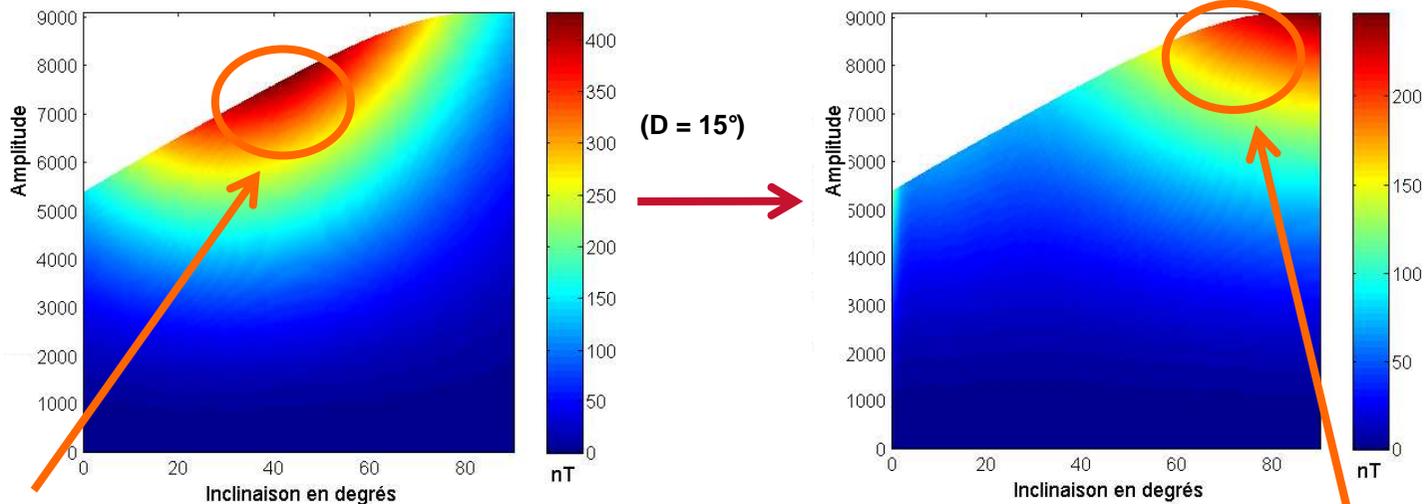
Cas du dipôle induit

$$F_{k+1} = F_1 + \frac{1}{2R} (C^2 - F_k^2) + O\left(\frac{C^{k+1}}{R^k}\right)$$

$$F_1 \leq F$$

$$F_1 = F - \frac{1}{2R} (C^2 - F^2) \quad (\text{Lourenço, 1973})$$

Inclinaison et amplitude de F variables



Ecart de 5 %

Différences maximales
entre F et F_1

Différences maximales
entre F_1 estimée et
 F_1 calculée par le modèle

Ecart de 2 %

1.3.1 Les fonctions magnétiques : Potentiels et Superpotentiels



Hors des boucles de courants, les deux équations de Maxwell dans le vide s'écrivent en statique

$$\vec{\nabla} \times \vec{C} = \vec{0}$$



Il existe un **potentiel scalaire** U tel que

$$\vec{C} = -\vec{\nabla}U$$

Or, $F_1 = \vec{\rho} \cdot \vec{C}$



$$F_1 = -\nabla_\rho U$$

avec $\nabla_\rho = L \frac{\partial}{\partial x} + M \frac{\partial}{\partial y} + N \frac{\partial}{\partial z}$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{C} = 0$$



Il existe un **potentiel vecteur** \vec{A} tel que $\vec{C} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$

Or, la Jauge de Coulomb assure l'unicité de ce potentiel $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$



Il existe un **superpotentiel vecteur** $\vec{\Pi}$ tel que $\vec{A} = \vec{\nabla} \times \vec{\Pi}$
(Hertz, 1889 ; Righi, 1901)

Nous définissons le **superpotentiel scalaire** $\Phi = \vec{\Pi} \cdot \vec{\mu}$

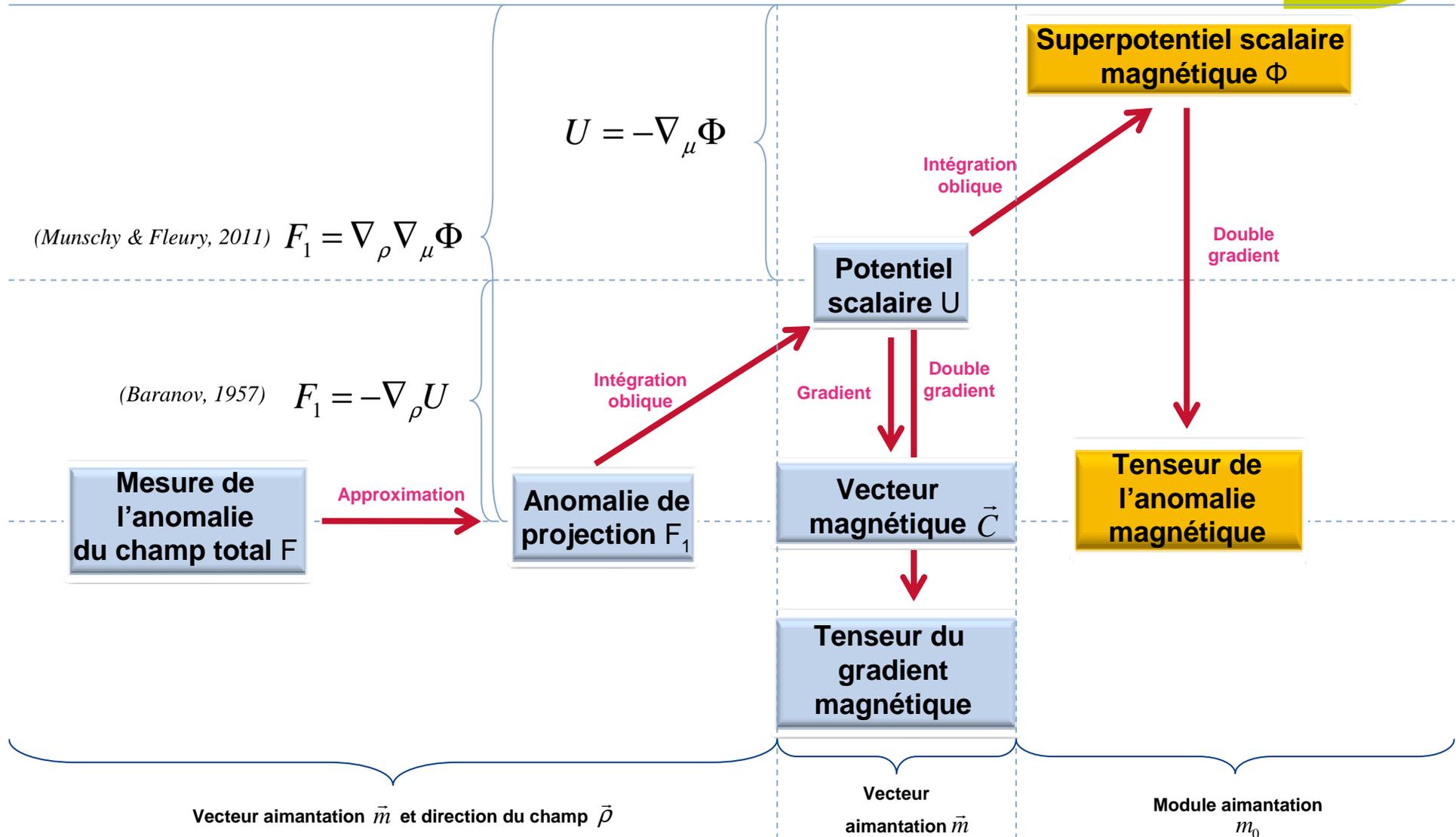


$$U = -\nabla_\mu \Phi$$

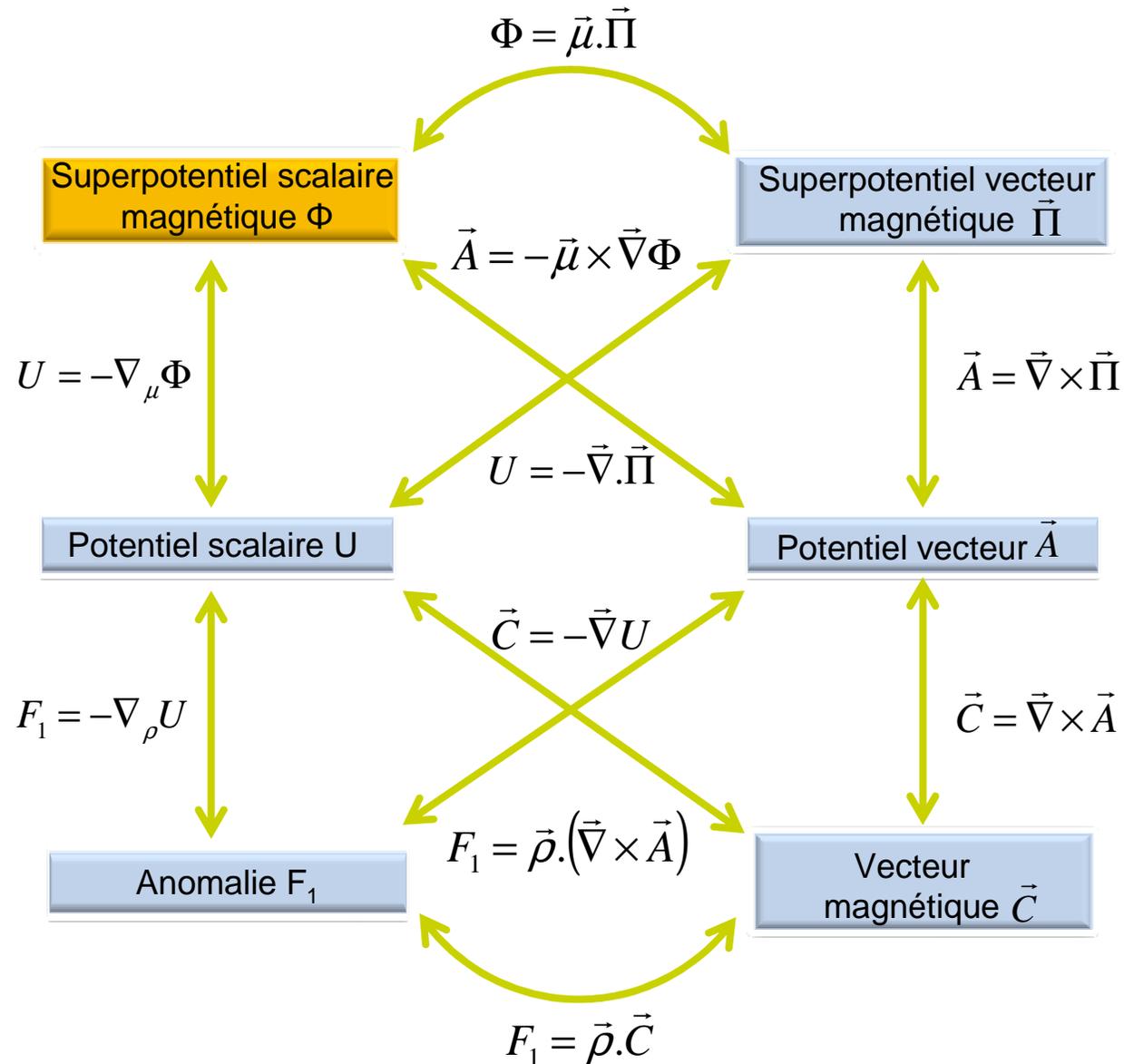
avec $\nabla_\mu = l \frac{\partial}{\partial x} + m \frac{\partial}{\partial y} + n \frac{\partial}{\partial z}$



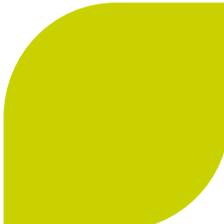
1.3.2 Les fonctions magnétiques dans le domaine spatial



1.3.3 Relations de passage dans le domaine spatial



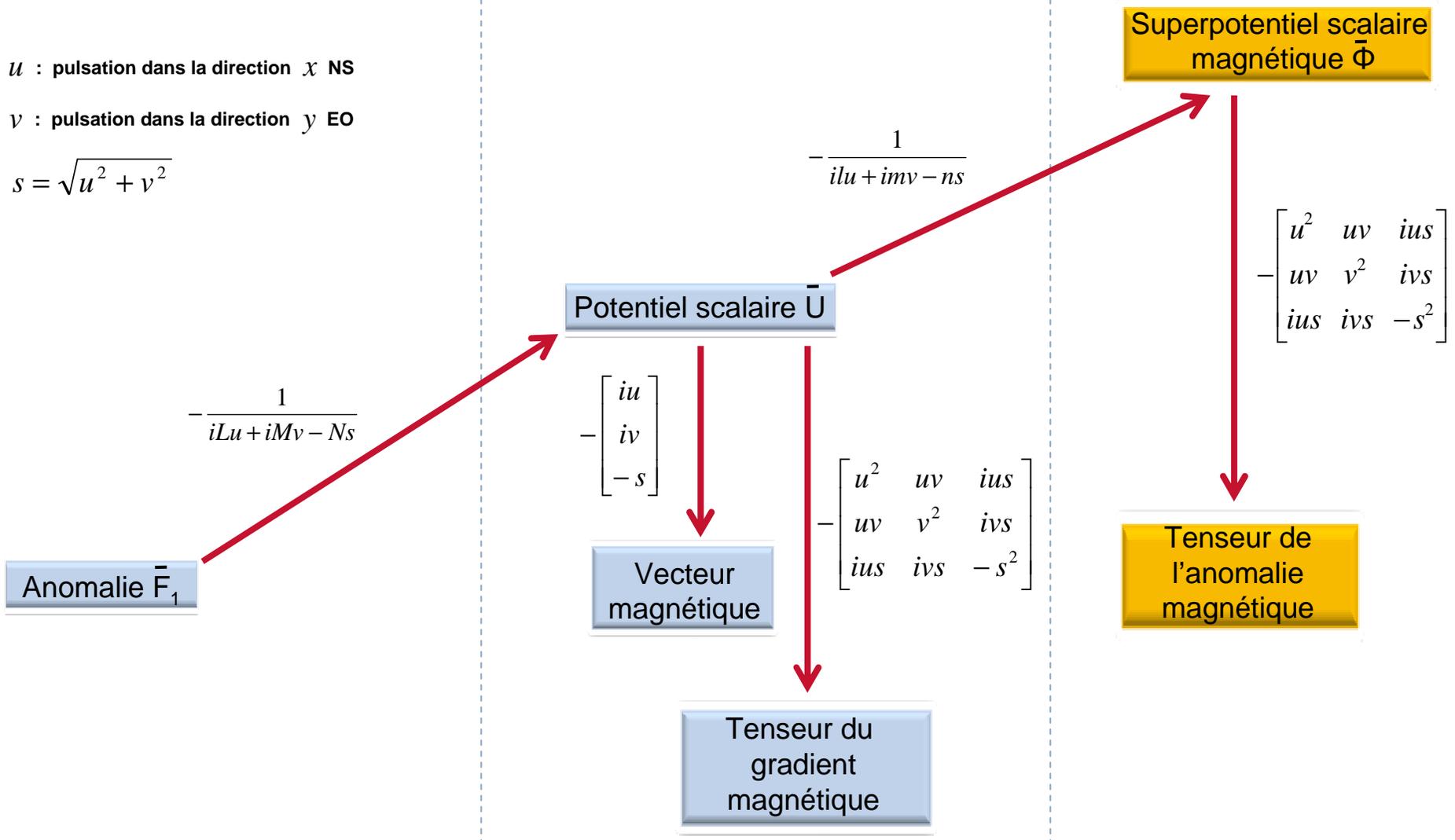
1.3.4 Les grandeurs magnétiques dans le domaine spectral



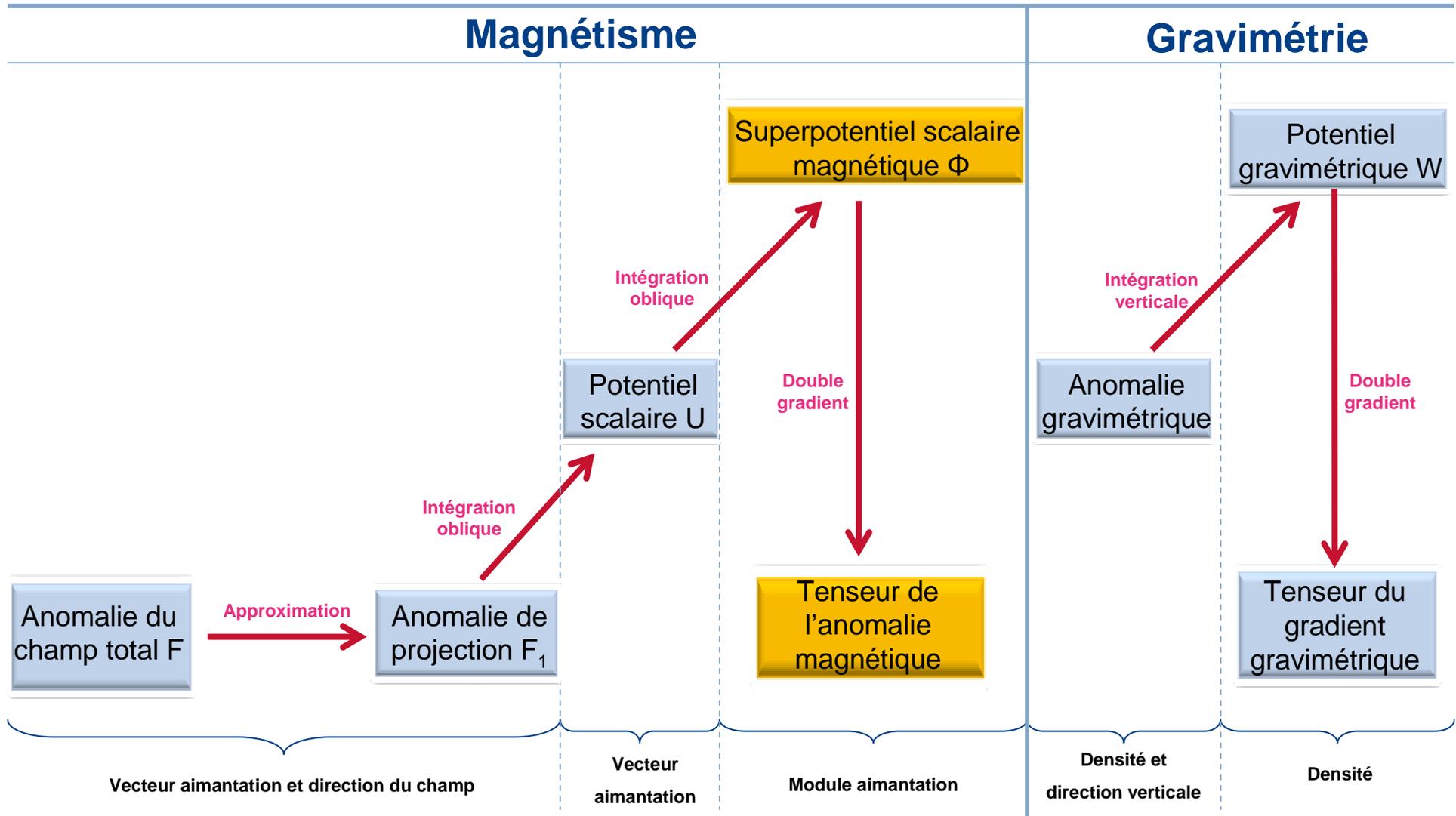
u : pulsation dans la direction x NS

v : pulsation dans la direction y EO

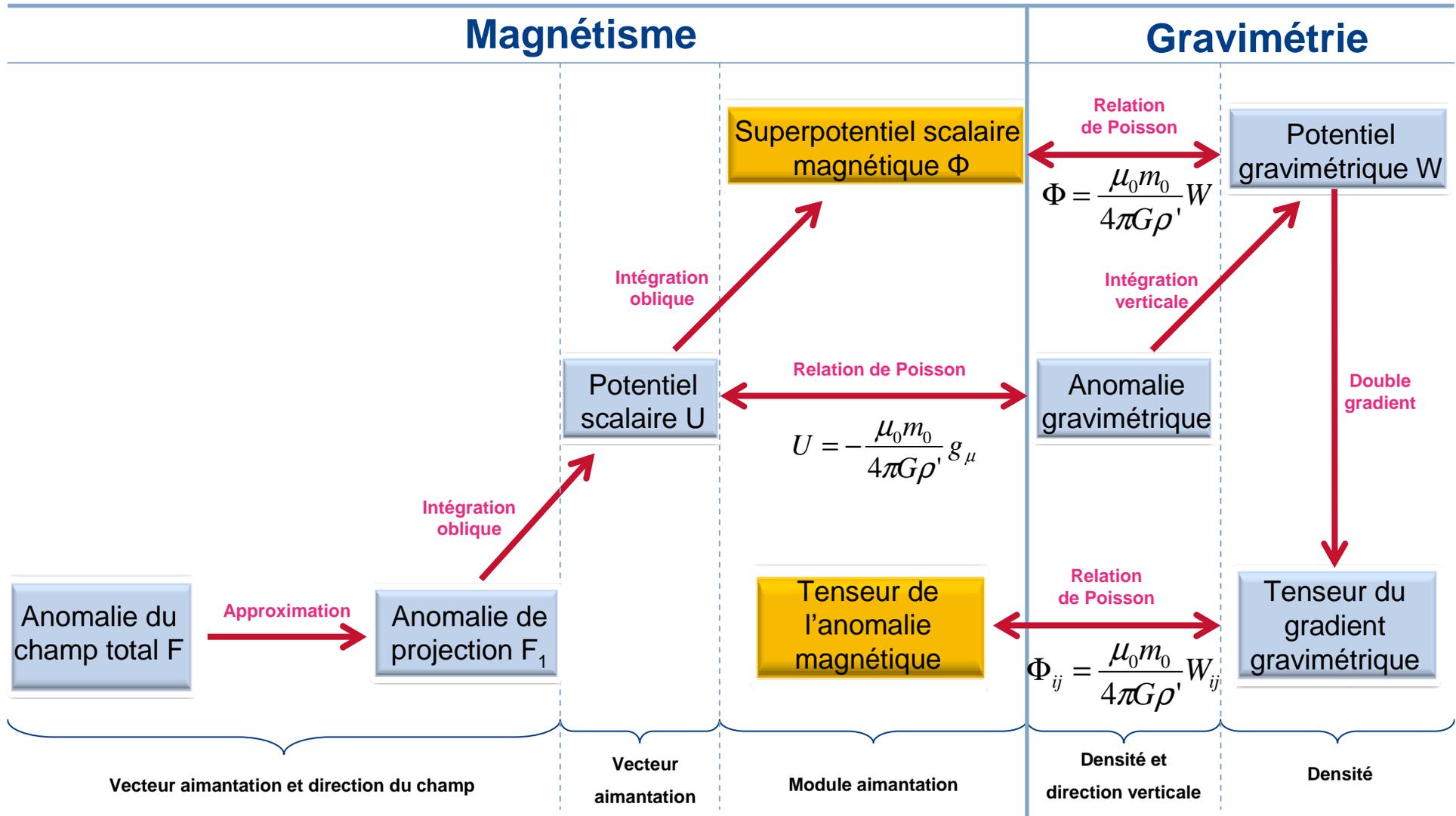
$$s = \sqrt{u^2 + v^2}$$



1.3.5 Les grandeurs en méthodes potentielles



1.3.5 Les grandeurs en méthodes potentielles



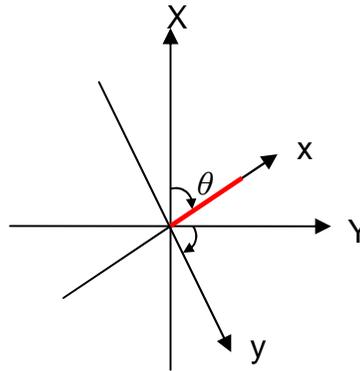


- ▶ 1- Les fonctions magnétiques caractéristiques
- ▶ **2- Superpotentiel et Tenseur de l'Anomalie Magnétique : Applications**
- ▶ 3- Prospection aéromagnétique du Bassin de Franceville
- ▶ 4- Conclusions et perspectives

2.1 Utilisation des Superpotentiels en Modélisation

Source allongée de dipôles :

$$d\vec{\Pi} = \tilde{m}_0 \frac{\vec{\mu}}{\|\vec{r} - \vec{r}_0\|} d\ell'$$



Spécifications :

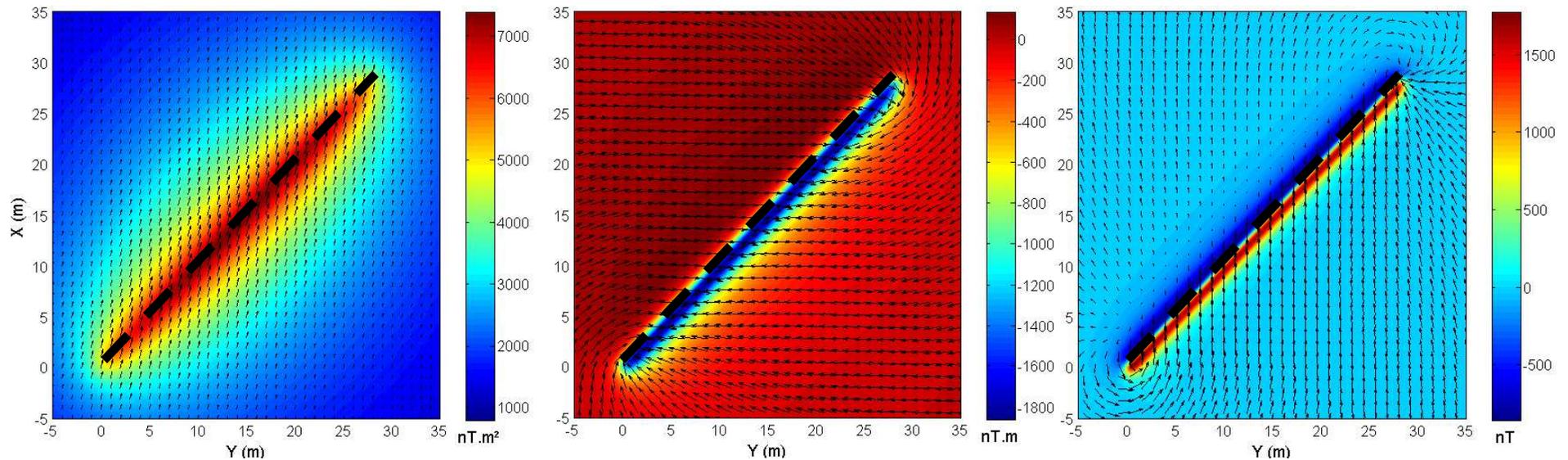
N 45°E

Z = 1 m

Aimantation induite :

Inclinaison = 60°

Déclinaison = 15°



Superpotentiel

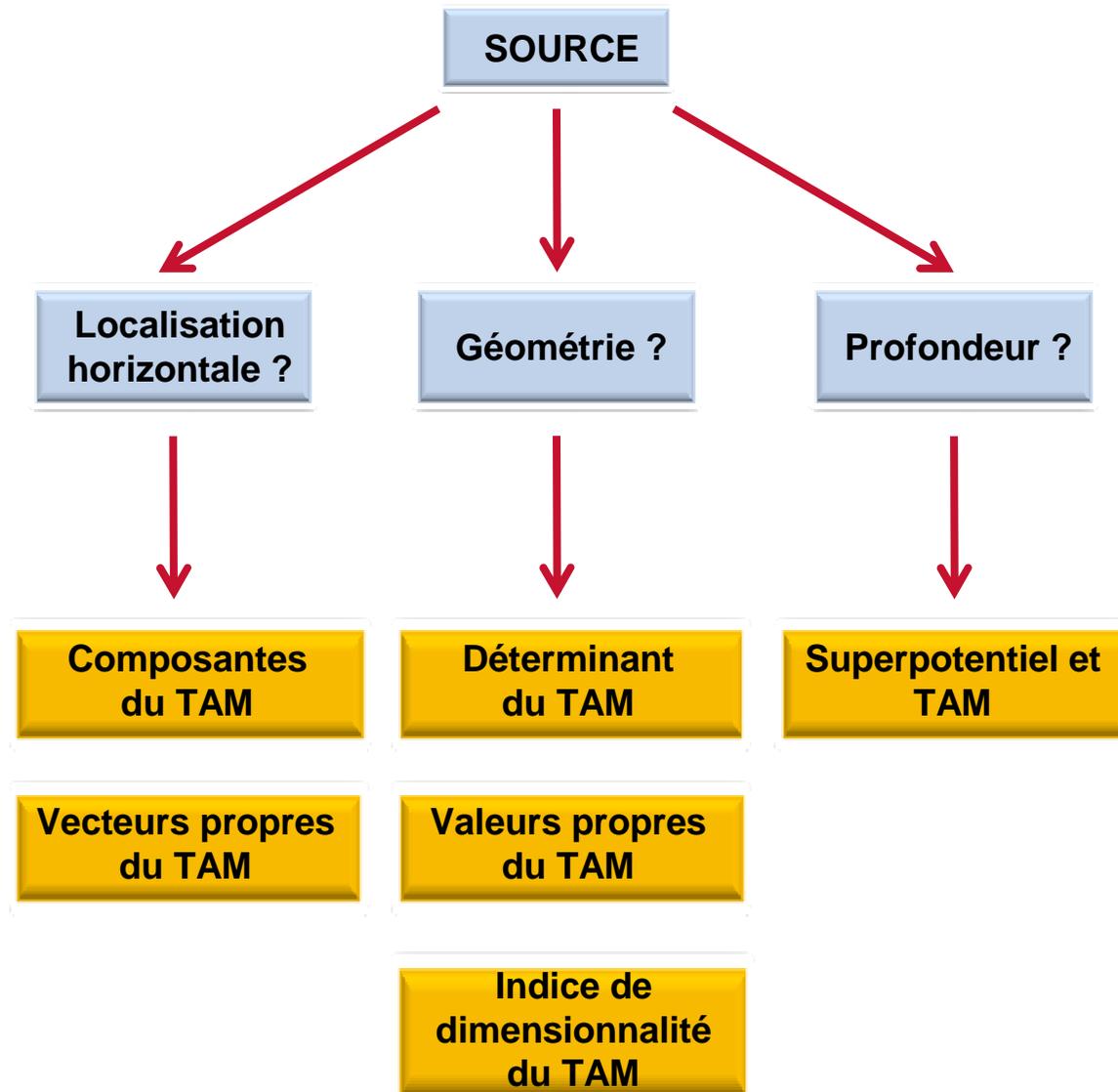
$$U = -\nabla_{\mu} \Phi$$

Potentiel

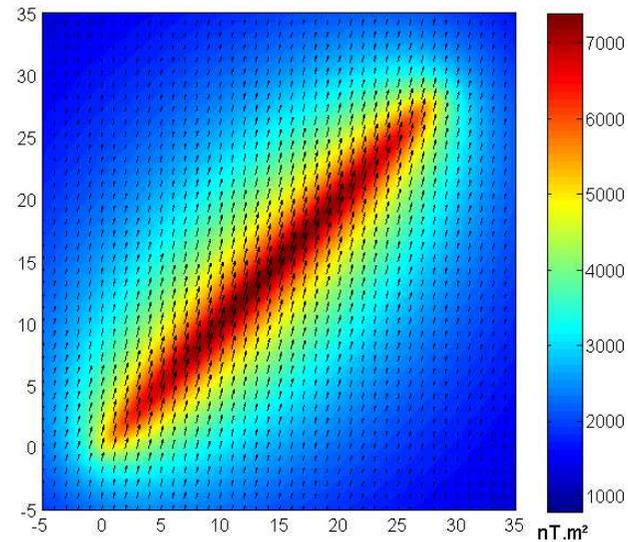
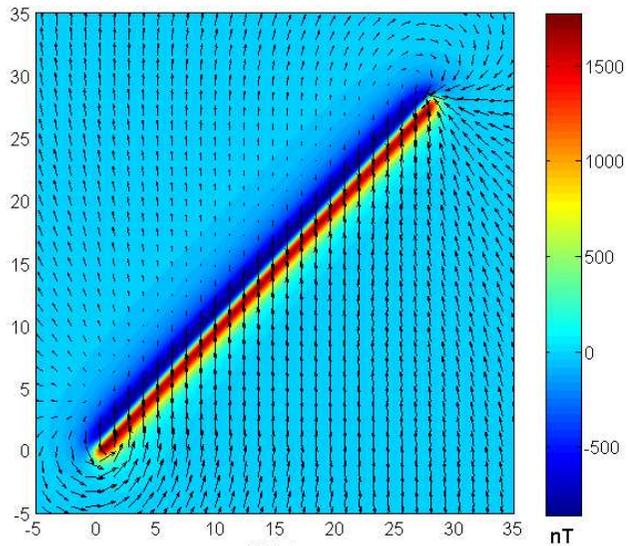
$$F_1 = -\nabla_{\rho} U$$

Anomalie F_1

2.2 Utilisation du Tenseur de l'Anomalie Magnétique (TAM) en Inversion



2.2.1 Localisation horizontale : Composantes du TAM



Anomalie F_1

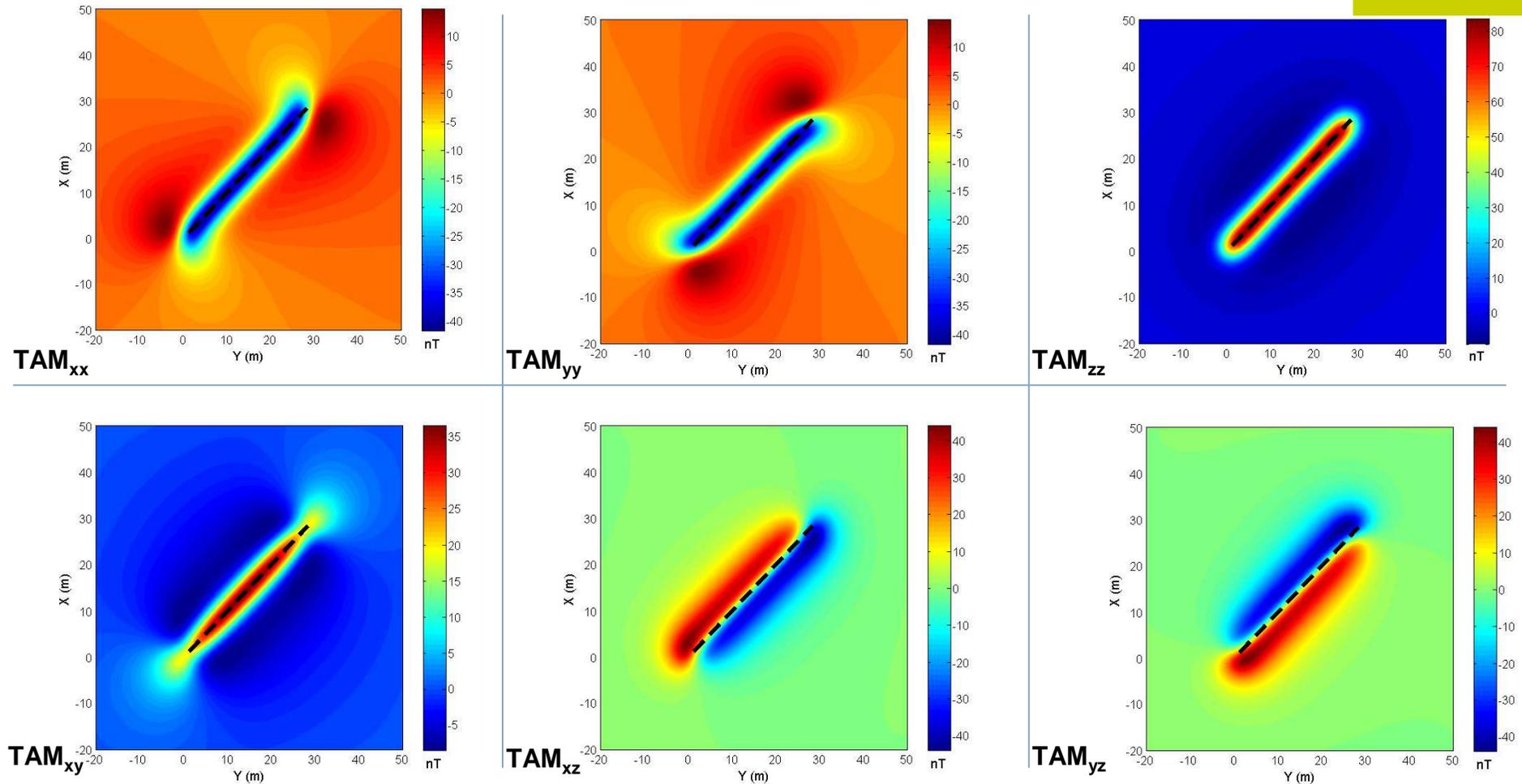
$$\frac{1}{(ilu + imv - ns)^2}$$

Superpotentiel scalaire
magnétique Φ

$$- \begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

Tenseur de
l'Anomalie
Magnétique

2.2.1 Localisation horizontale : Composantes du TAM



Anomalie F_1

$$\frac{1}{(ilu + imv - ns)^2}$$

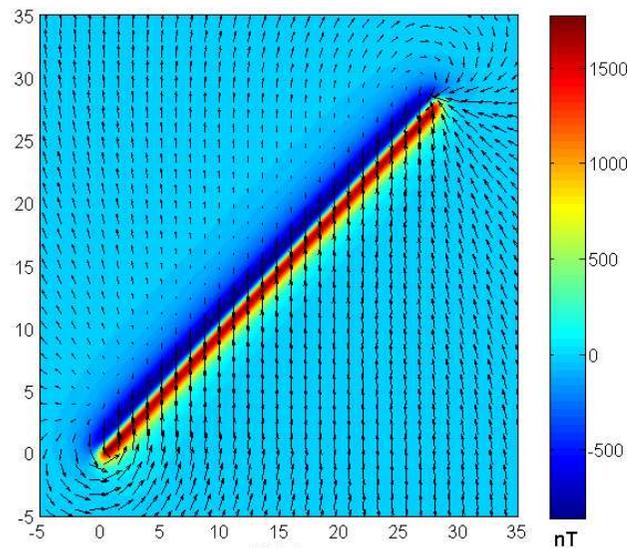
Superpotentiel scalaire
magnétique Φ

$$\begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

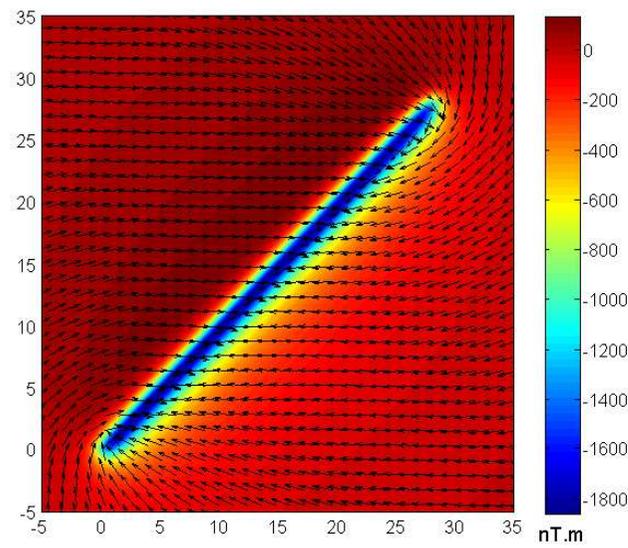
Tenseur de
l'Anomalie
Magnétique

SYMÉTRIQUE

2.2.1 Composantes du Tenseur du Gradient Magnétique



Anomalie F_1



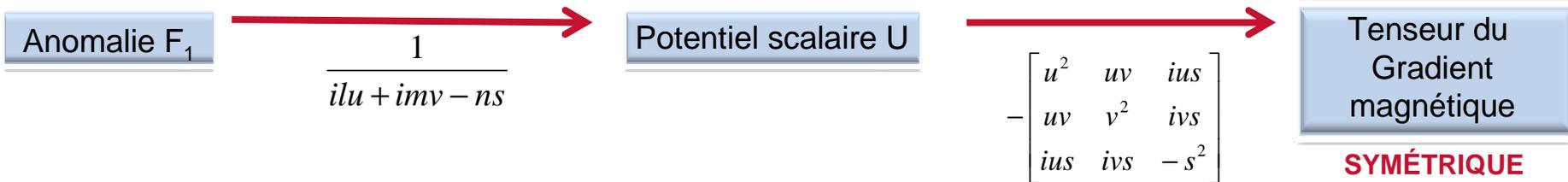
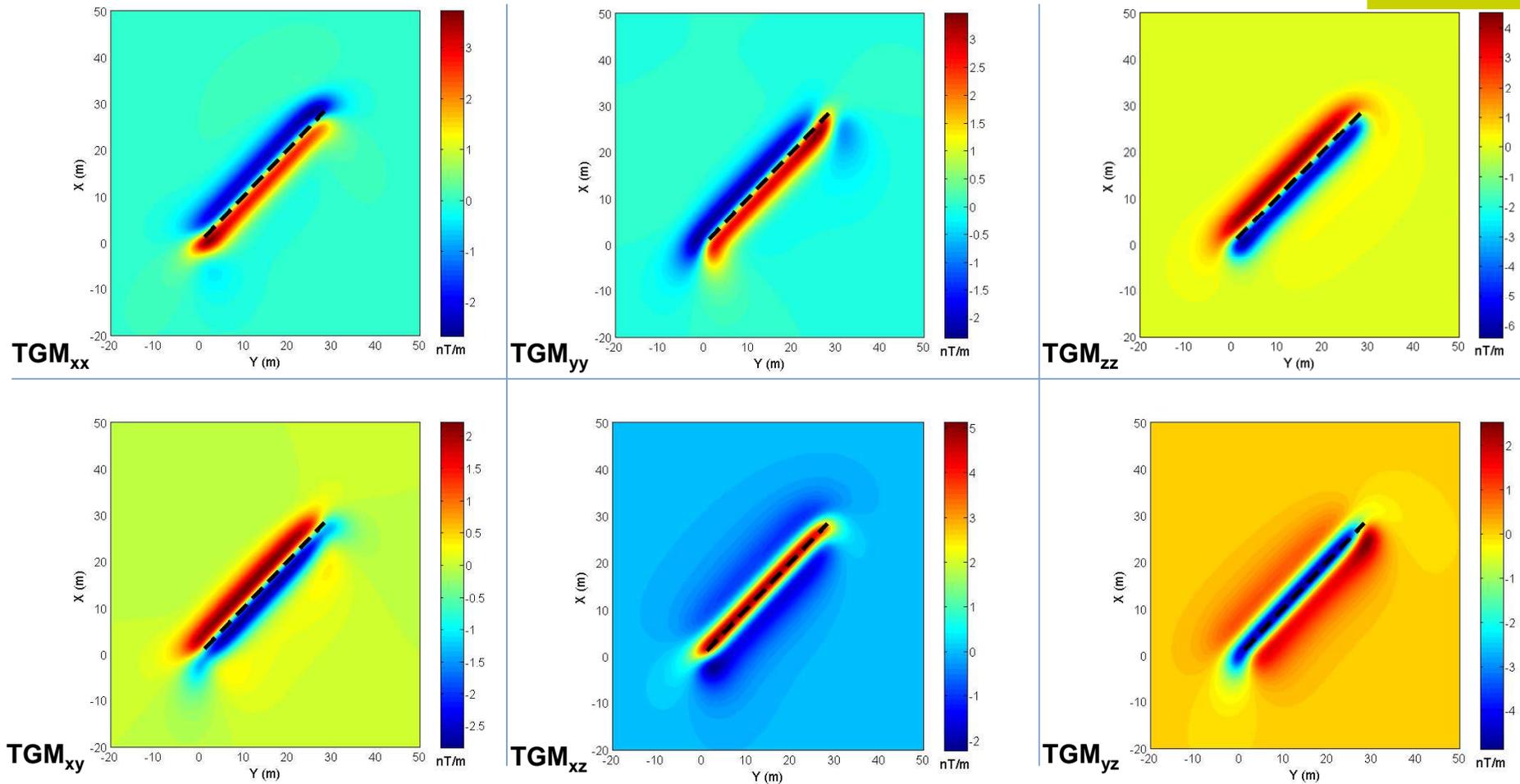
Potentiel scalaire U

$$\frac{1}{ilu + imv - ns}$$

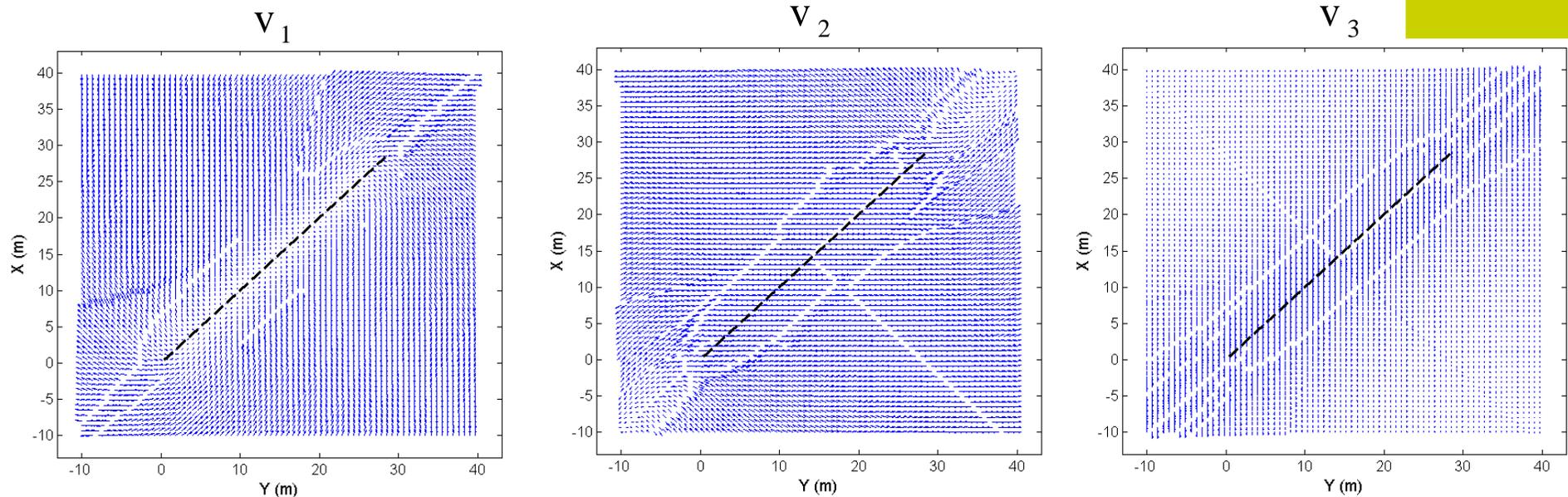
$$\begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ -uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

Tenseur du Gradient Magnétique

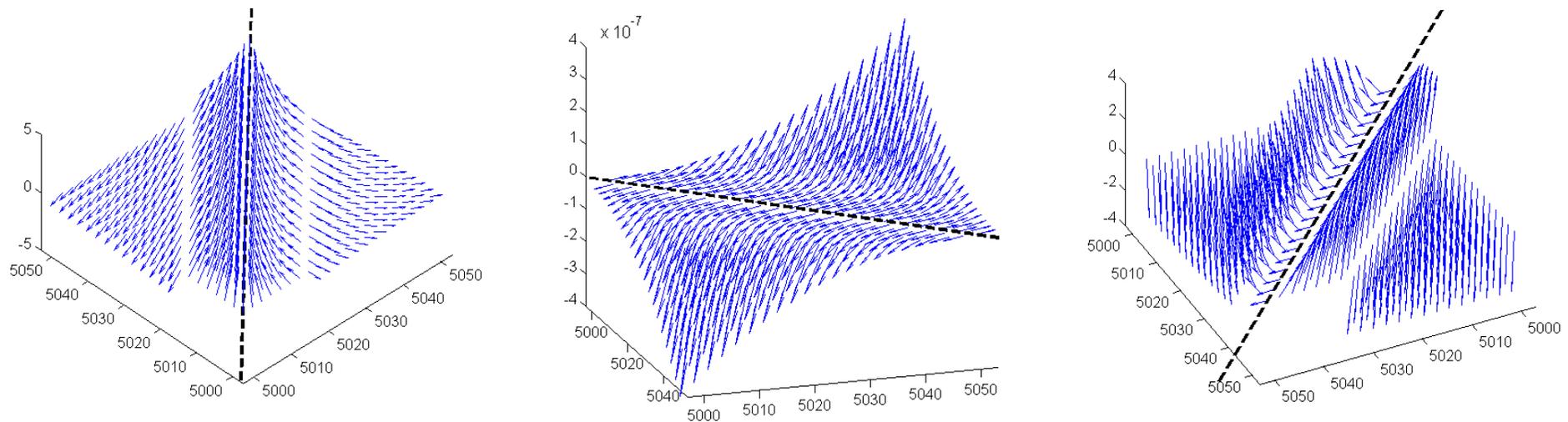
2.2.1 Composantes du Tenseur du Gradient Magnétique



2.2.1 Localisation horizontale : Vecteurs propres du TAM

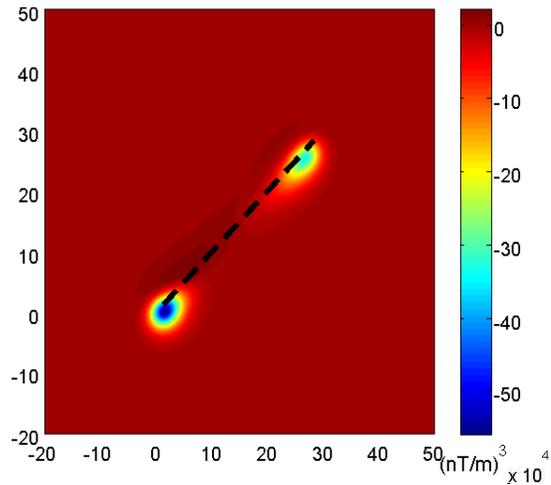


Composantes horizontales des trois vecteurs propres pour le segment horizontal



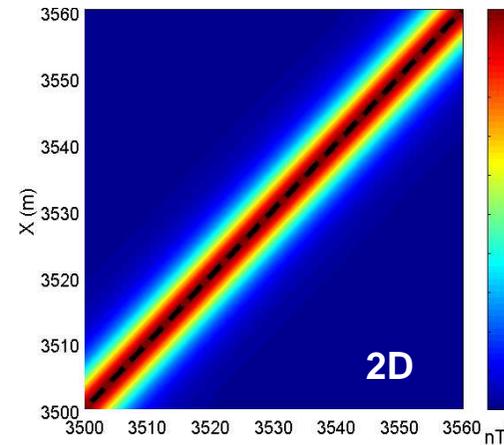
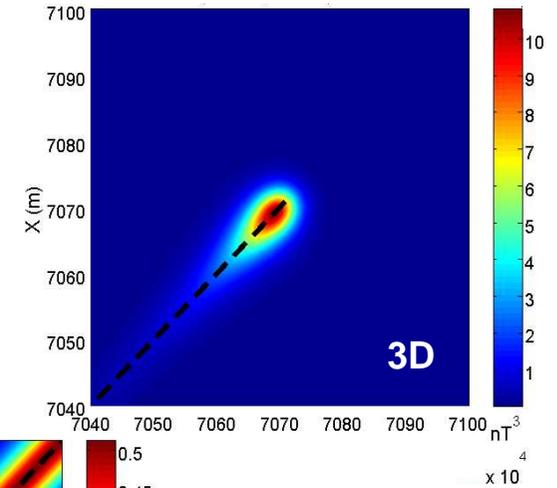
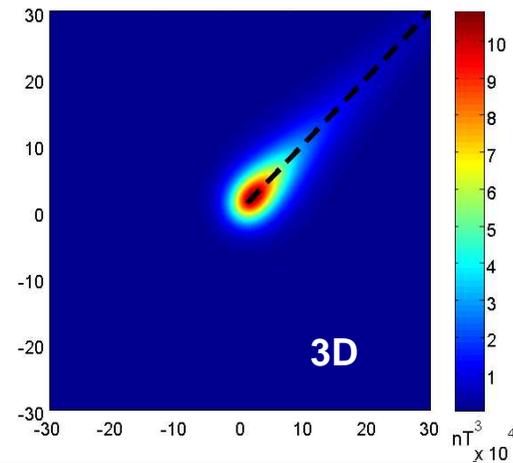
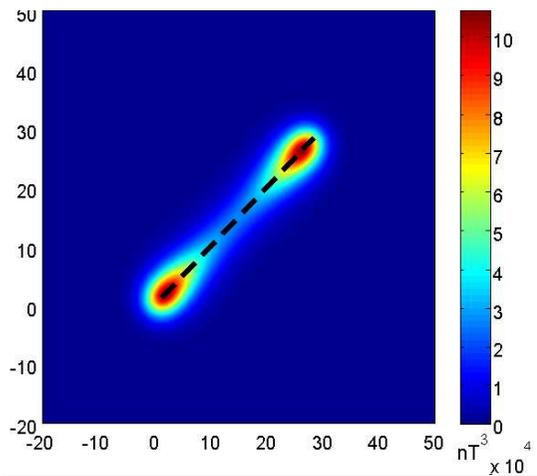
Vue 3D des trois vecteurs propres pour une ligne infinie horizontale

2.2.2 Géométrie : Déterminant du Tenseur de l'Anomalie Magnétique



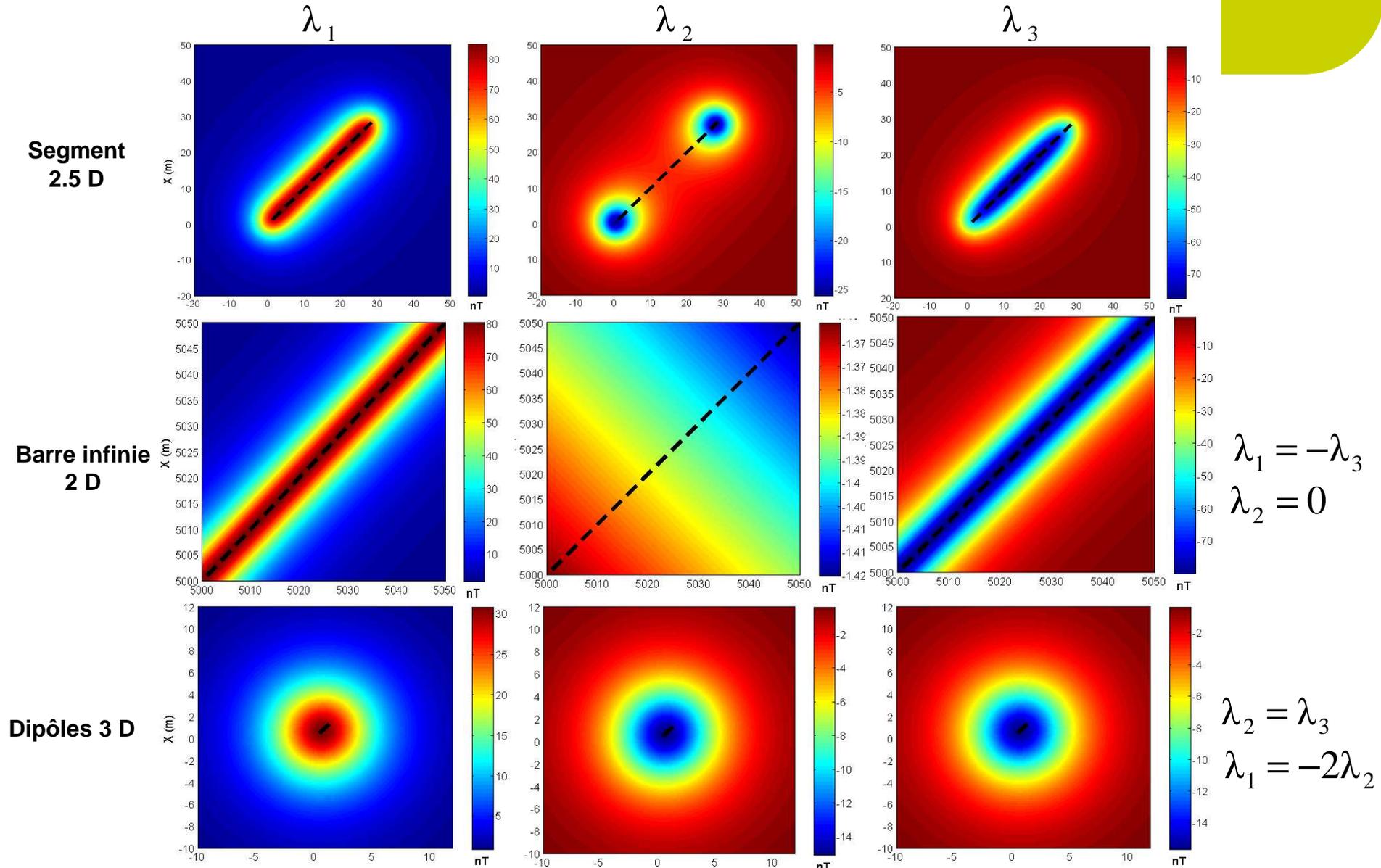
Déterminant du Tenseur du Gradient Magnétique

Déterminant du Tenseur de l'Anomalie Magnétique



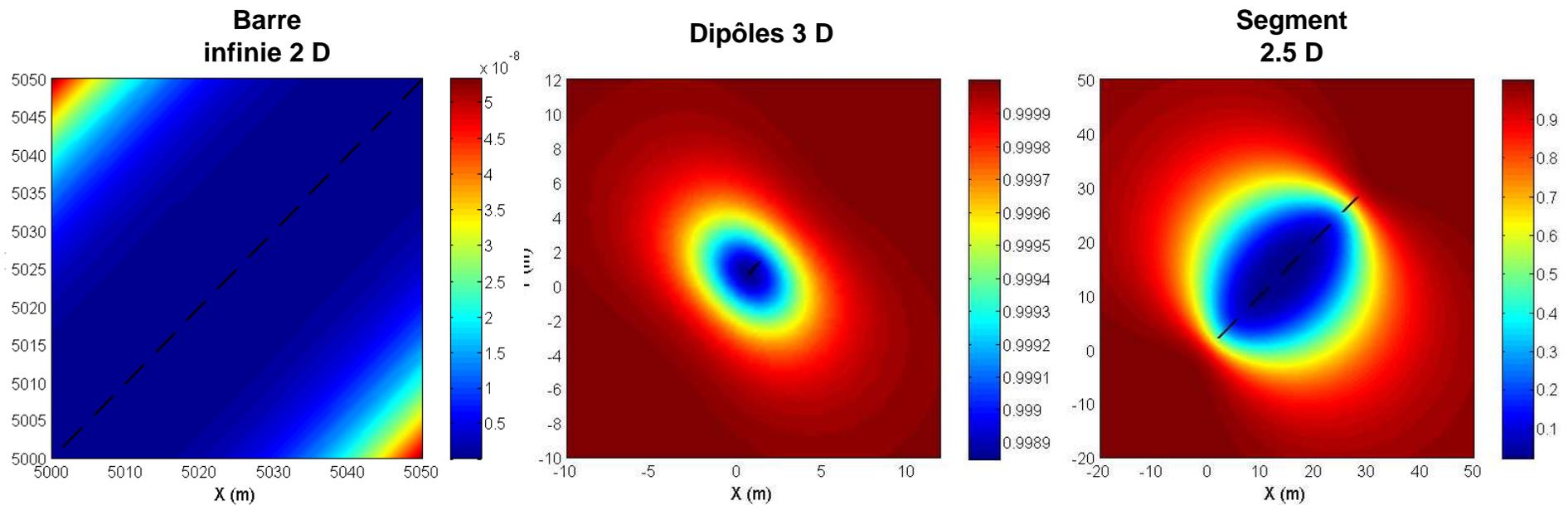
Déterminant du Tenseur de l'Anomalie Magnétique pour une ligne quasi infinie

2.2.2 Géométrie : Valeurs propres du TAM



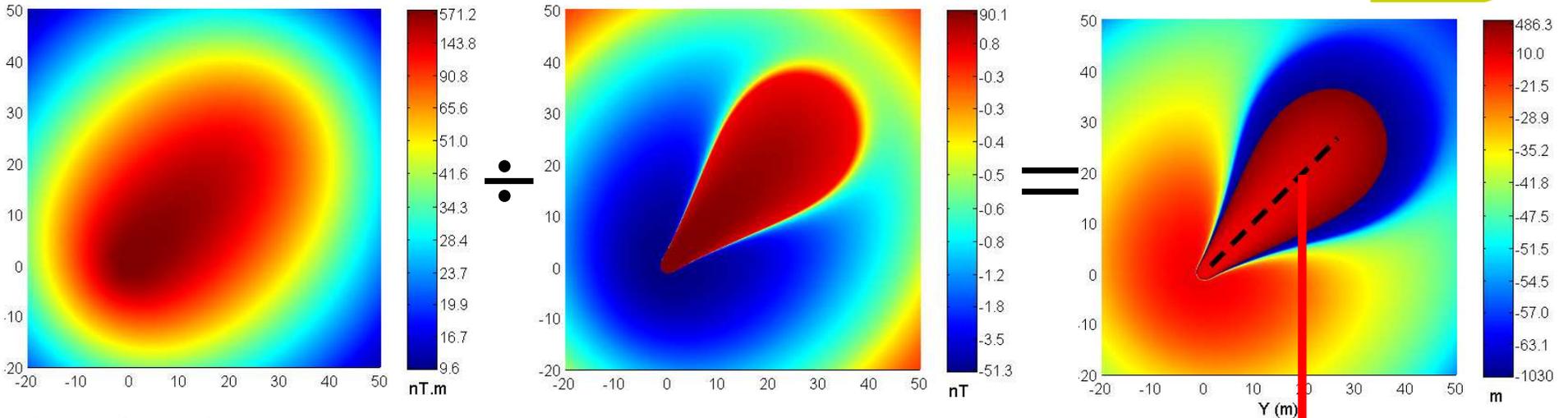
2.2.3 Géométrie : Indice de dimensionnalité du TAM

$$I_d = -\frac{27T_3^2}{4T_4^3} \quad \text{avec : } T_4 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3 \quad \text{et} \quad T_3 = -\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (\text{Pedersen, 1990})$$



Indice de dimensionnalité du Tenseur de l'Anomalie Magnétique

2.2.3 Profondeur : TAM et Superpotentiel



Anomalie du champ total pour un segment penté de 20°

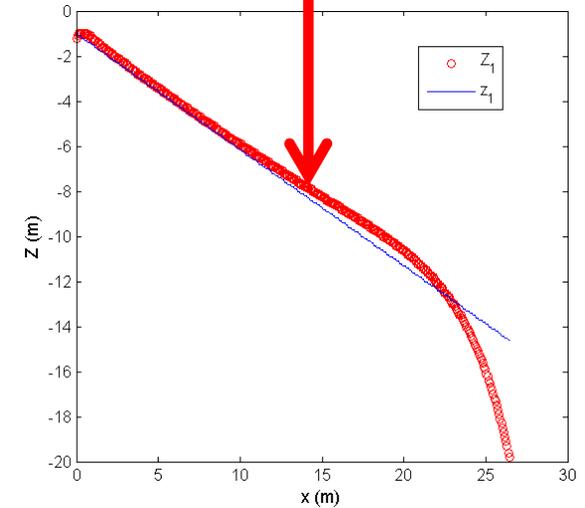
TAM_{zz}

Amplitude du signal analytique du superpotentiel :

$$H_{SA}(\Phi) = \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2}$$

(Roest., 1992)

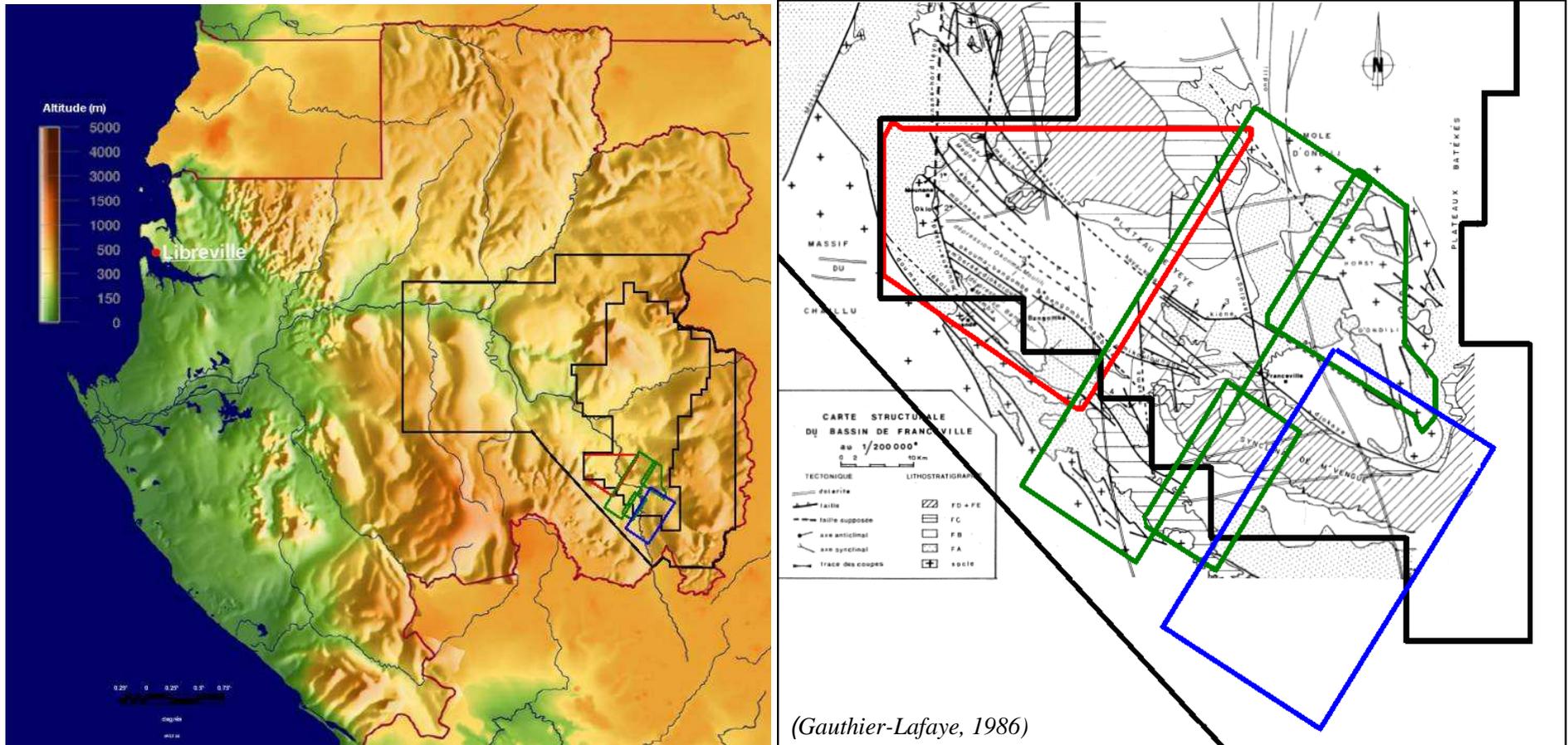
On montre que : $Z_1 = \frac{H_{SA}(\Phi)|_{x=0,z=0}}{|TAM_{zz}|_{x=0,z=0}}$





- ▶ 1- Les fonctions magnétiques caractéristiques
- ▶ 2- Superpotentiels et Tenseur de l'Anomalie Magnétique : Applications
- ▶ 3- **Prospection aéromagnétique du Bassin de Franceville**
- ▶ 4- Conclusions et perspectives

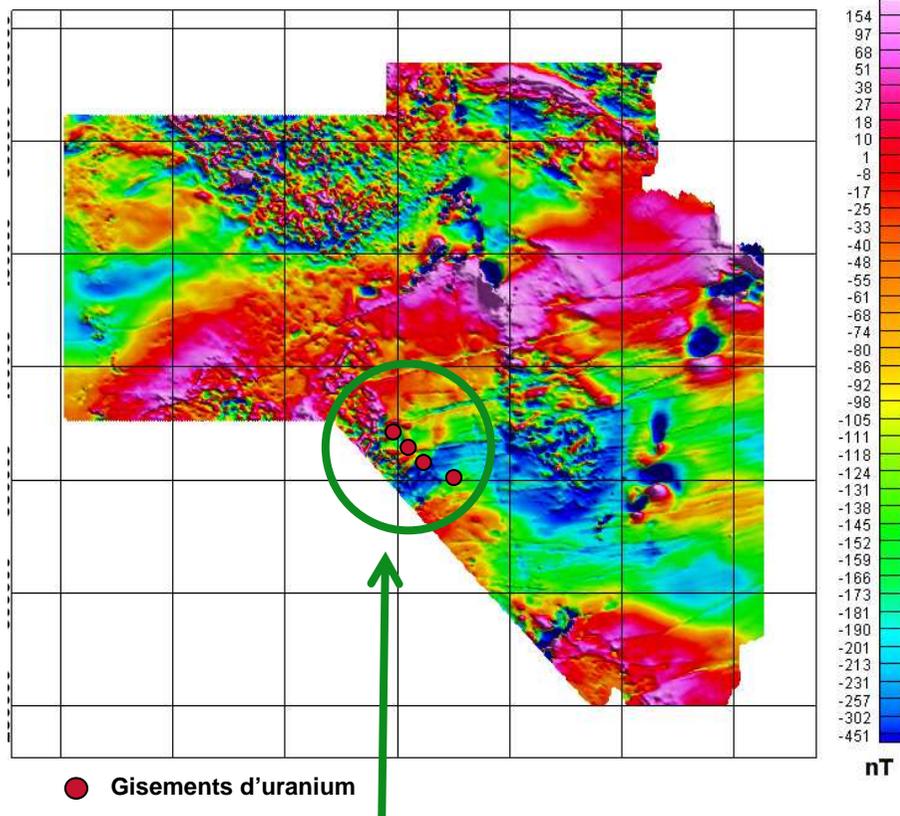
3.1.1 Levés aéromagnétiques dans la région de Franceville



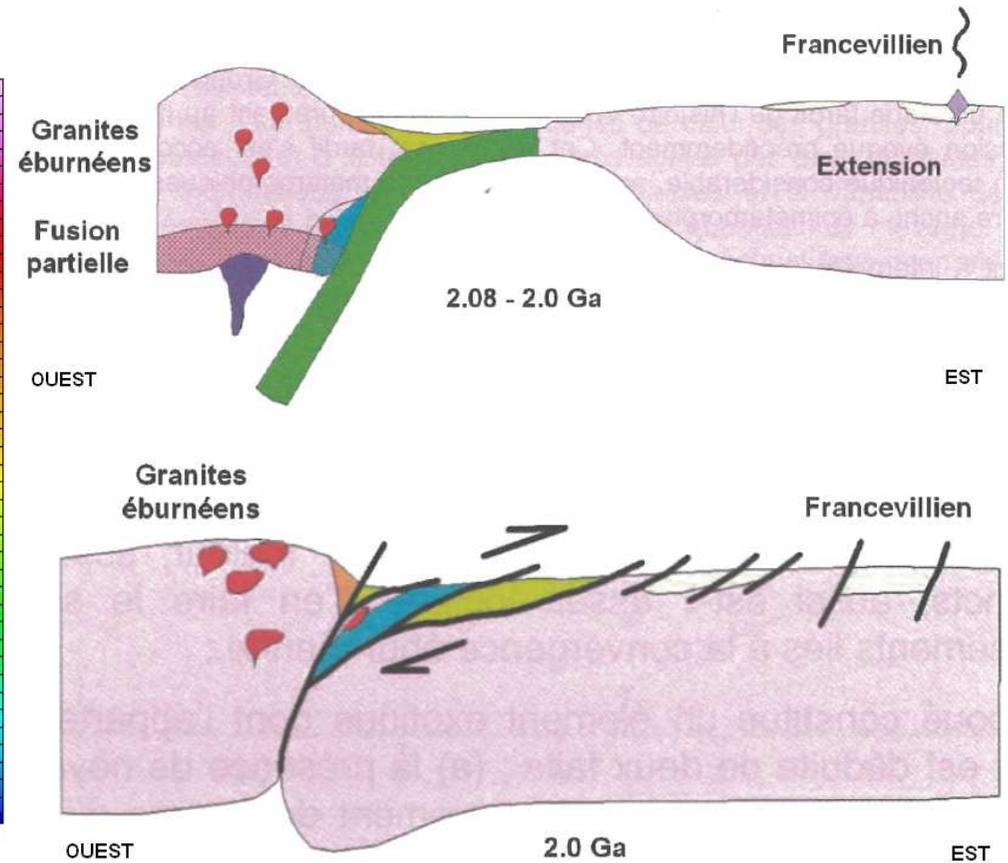
Localisation générale des différents levés sur le territoire gabonais et dans le Bassin de Franceville

3.1.2 Structuration générale du Bassin de Franceville

Carte d'anomalie du champ total (CGG 1983)



Zone d'étude : secteur Oklo

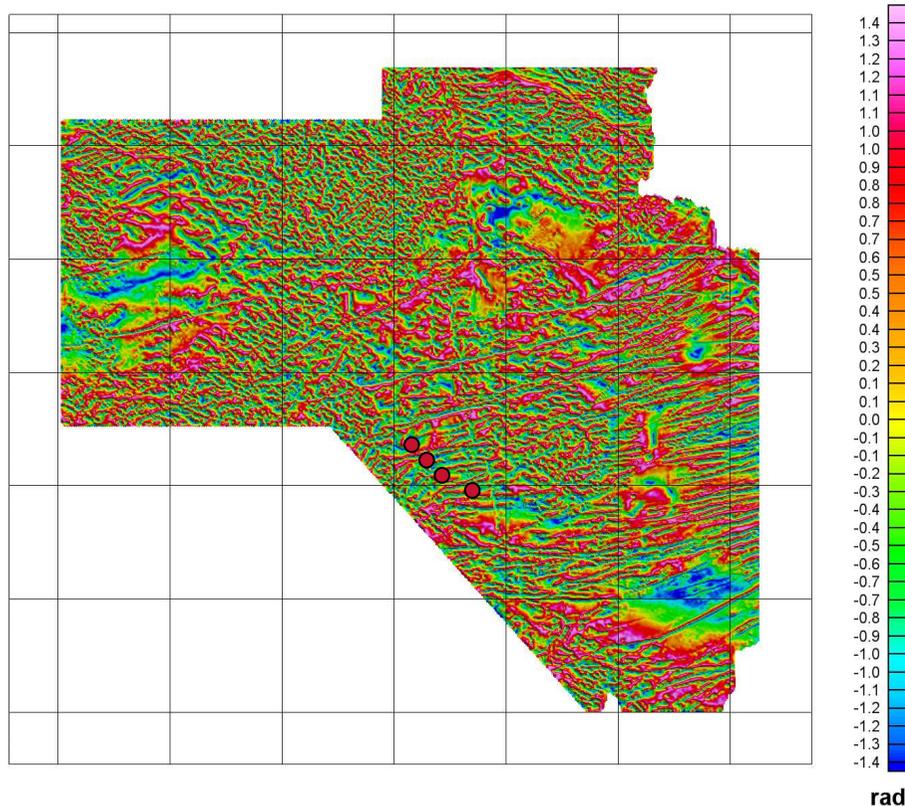


(D'après Feybesse, 1998)

- ▶ Bassin sédimentaire, grésopélitique, du protérozoïque reposant sur un socle cristallin archéen (2.7 Ga).

3.1.2 Structuration générale du Bassin de Franceville

Carte de la dérivée horizontale du tilt angle



● Gisements d'uranium

Opérateur de dérivation horizontale du tilt angle :

$$H_{DH_TA} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)^2}$$

avec

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial F_1}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial y}\right)^2}}$$

(Miller et Singh, 1994)

3.1.2 Structuration générale du Bassin de Franceville

Carte d'analyse structurale



● Gisements d'uranium

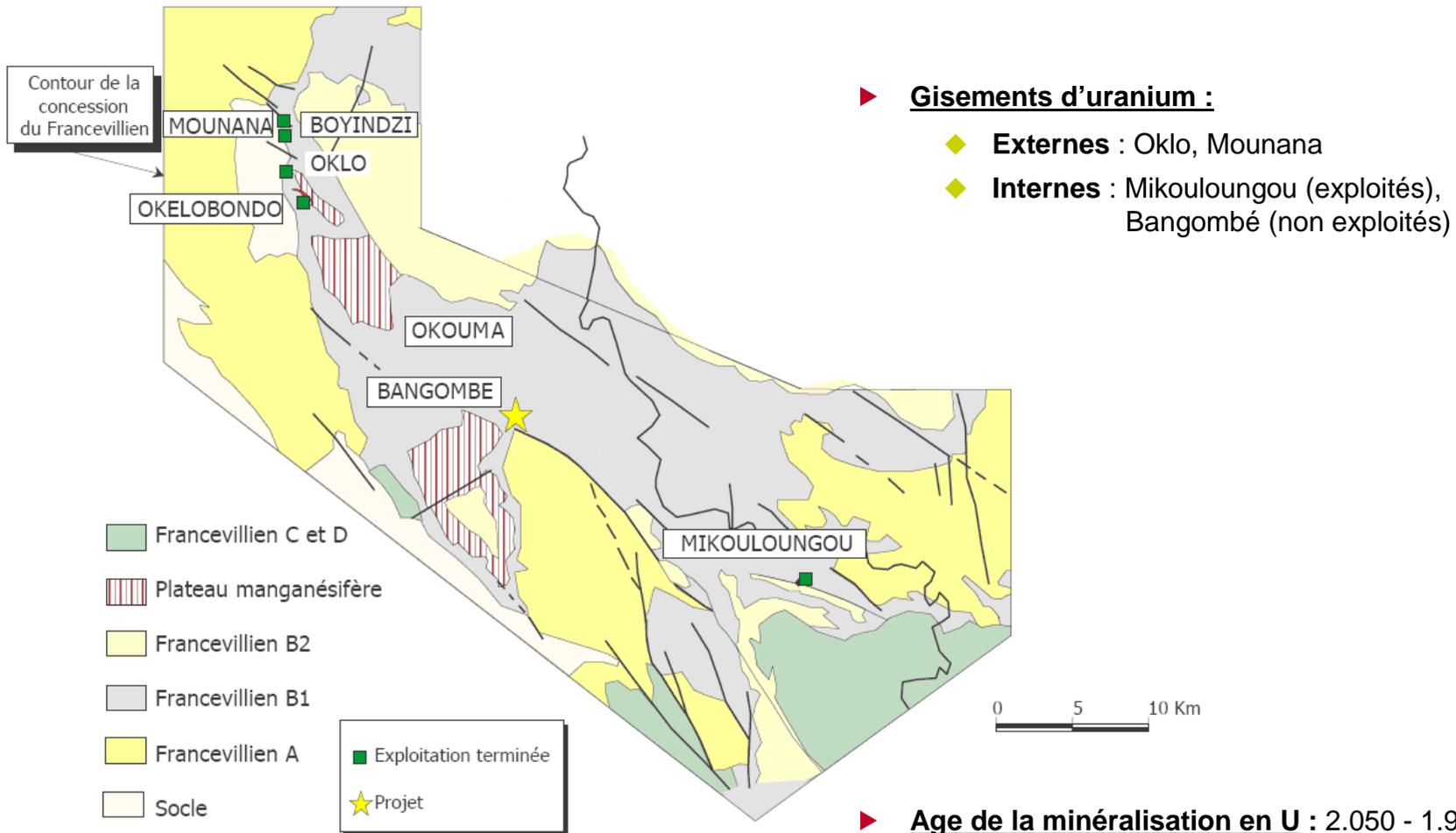
▶ **Trois structurations principales :**

◆ *Grands accidents NS*
↪ Directions régionales de l'orogénèse éburnéenne.

◆ *Deux grands types accidents :
EO et s'infléchissant NO-SE*
↪ Tectonique extensive en horsts et grabens subsidents pendant le dépôt du Francevillien.

▶ **Mise en place d'un réseau de filons de dolérite NS et EO entre 700 et 900 Ma.**

3.1.3 Potentiel uranifère du Bassin de Franceville

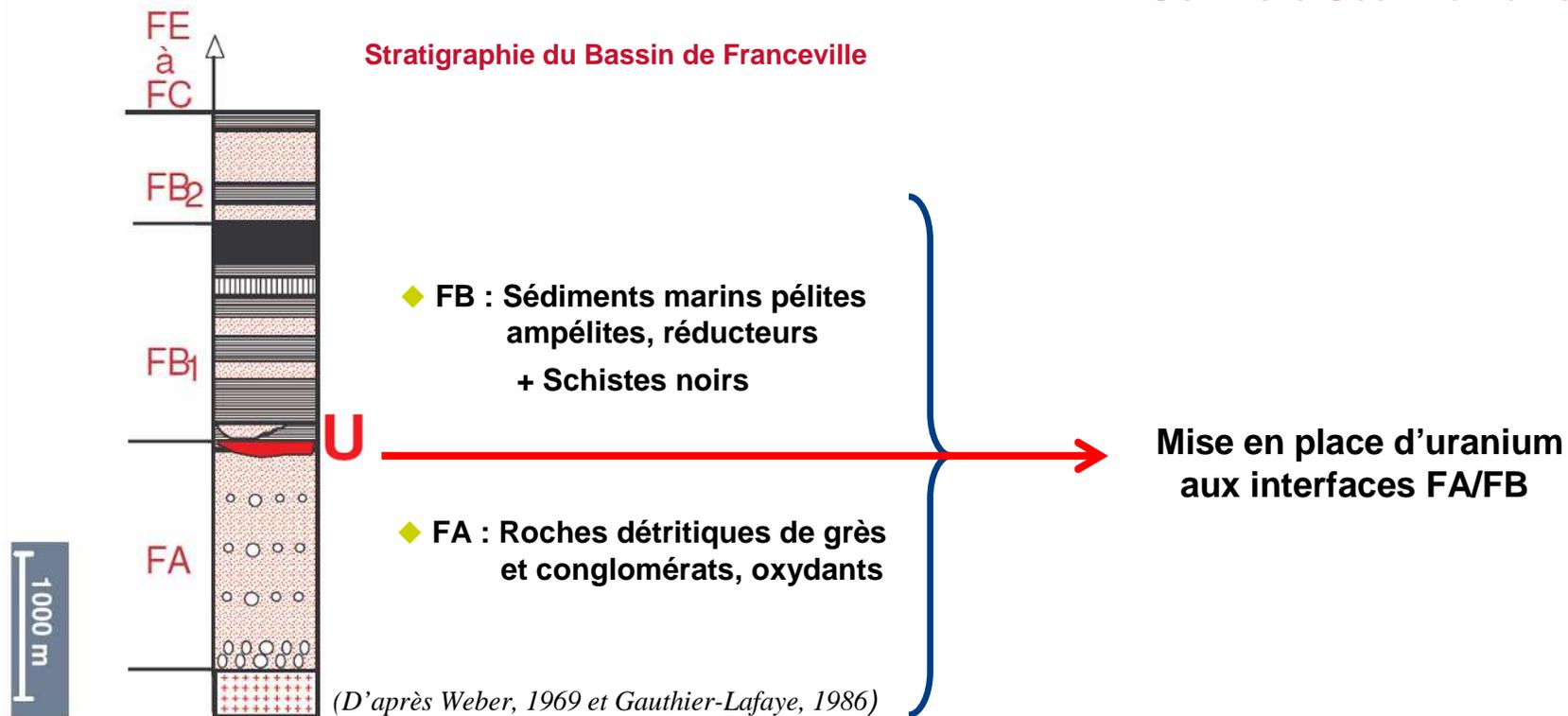


Gisements d'uranium dans le Bassin de Franceville

(d'après Matthieu, 2006)

3.1.4 Modèle métallogénique de l'uranium Francevillien

Contrôle Sédimentaire



Détection directe impossible : contraste de susceptibilité trop faible $\sim 10^{-5}$ SI.

3.1.4 Modèle métallogénique de l'uranium Francevillien

Contrôle Tectonique

► **Premier effet** : échelle bassinale

◆ Effondrement du bassin modifiant la topographie du socle



Puissants dépôts FA et FB



Augmentation de la quantité d'uranium mobilisable.

► **Deuxième effet** : échelle locale

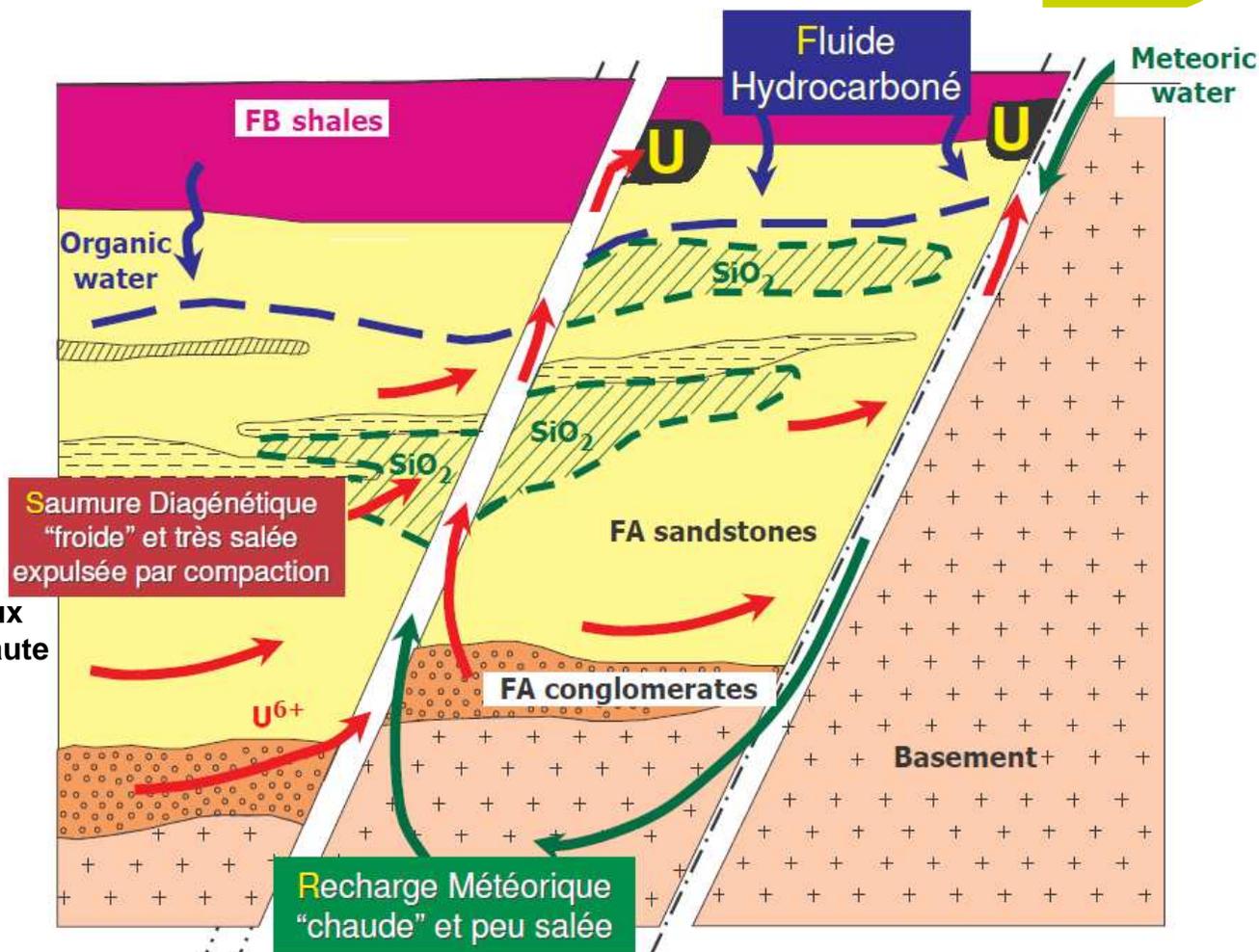
◆ Formation de pièges structuraux à hydrocarbures en position haute le long de failles perméables



U^{6+} contenu dans les fluides diagénétiques précipite en UO_2 .



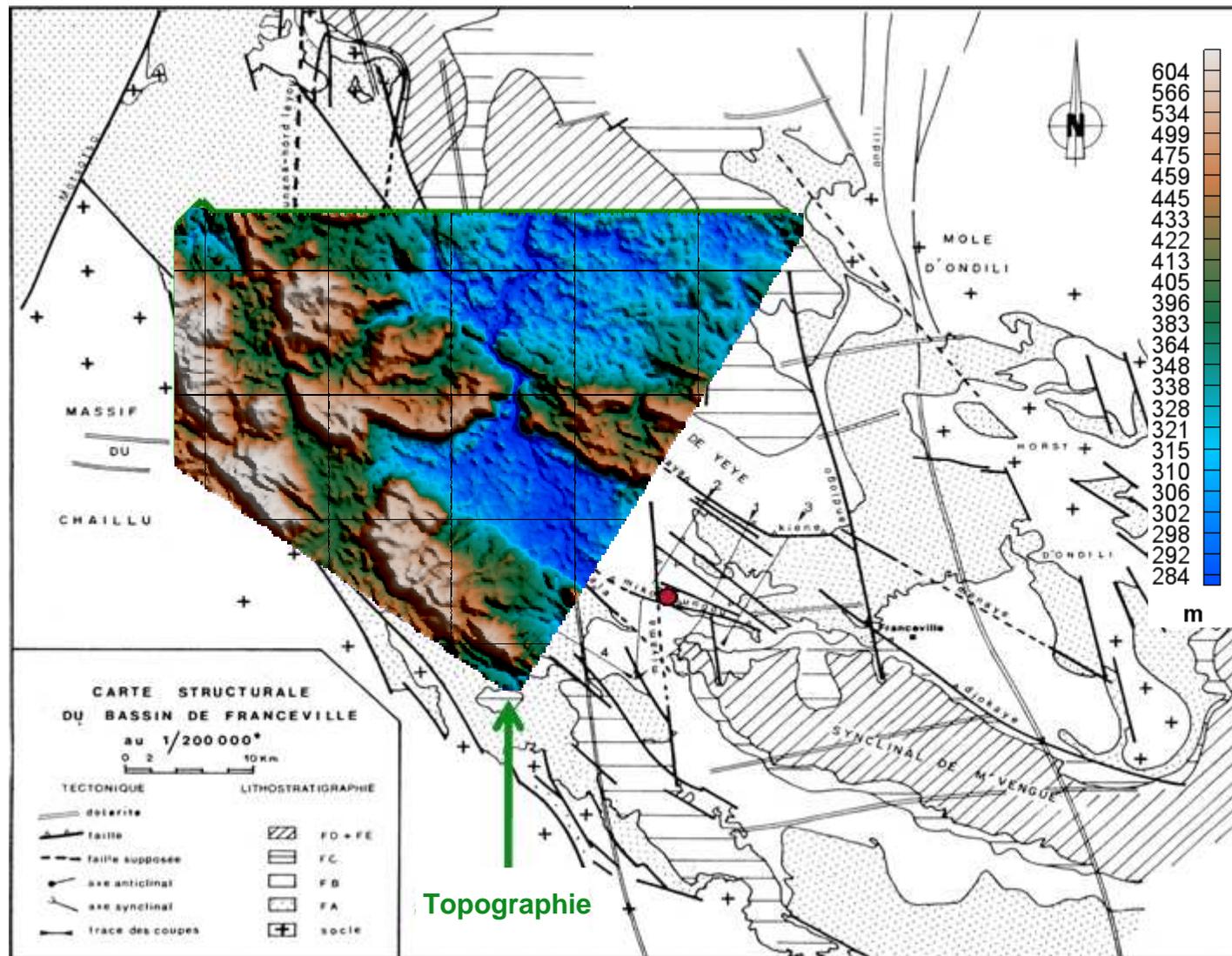
Localiser les grands couloirs de failles et oscillations du socle



Modèle métallogénique de l'uranium Francevillien

(modifié d'après Matthieu, 2001)

3.1.5 Zone d'intérêt stratégique



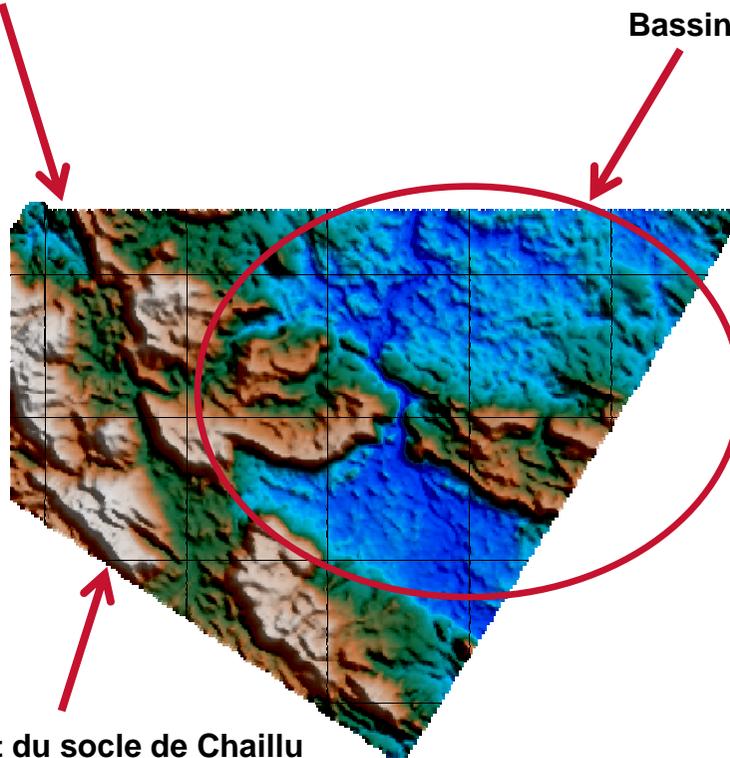
● Gisements d'uranium

(Gauthier-Lafaye, 1986)

3.1.5 Zone d'intérêt stratégique

Accident NO SE de
Mounana-Lékédi

Bassin



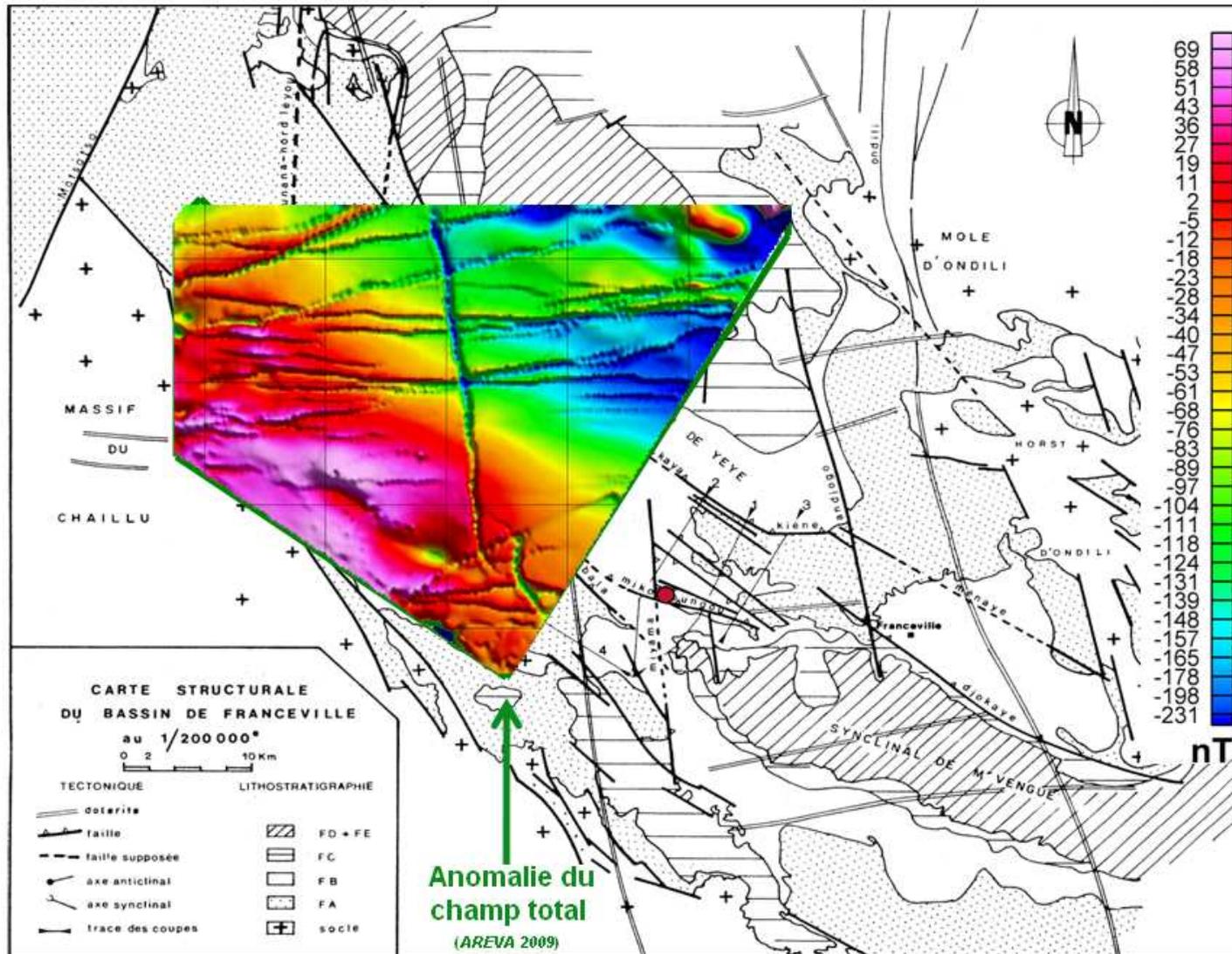
Signatures
géomorphologiques :

- ◆ Limite Sud du bassin
- ◆ Structuration du bassin
NO-SE

⇒ Localiser les grands
couloirs de failles NO-SE et
les limites Nord du bassin

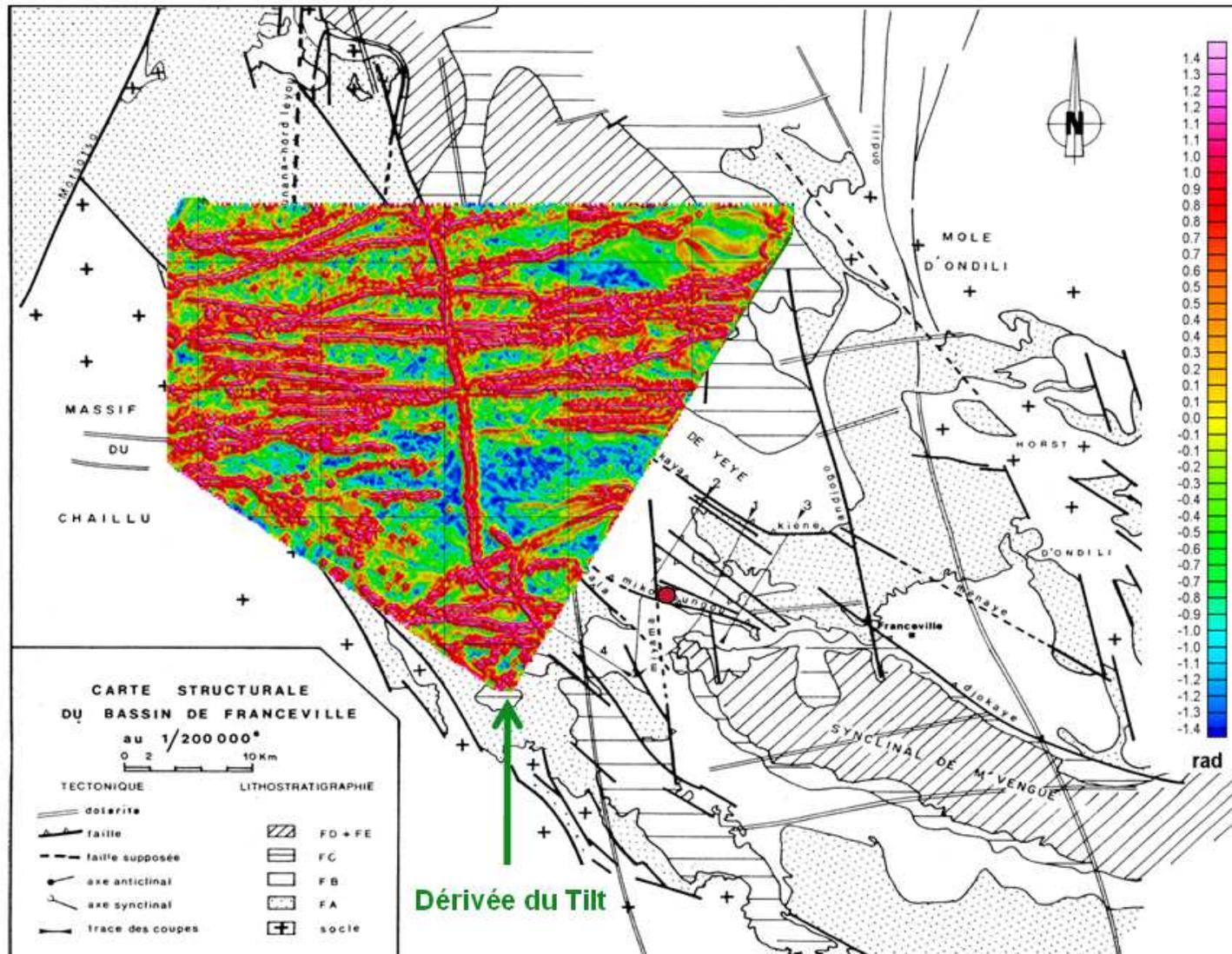
Topographie

3.1.5 Zone d'intérêt stratégique



● Gisements d'uranium

3.1.5 Zone d'intérêt stratégique



Linéations magnétiques majeures NS et EO

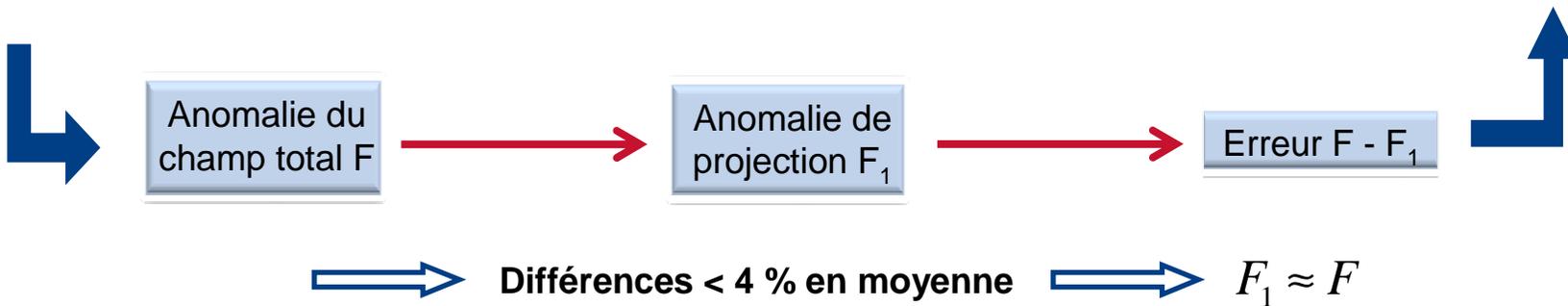
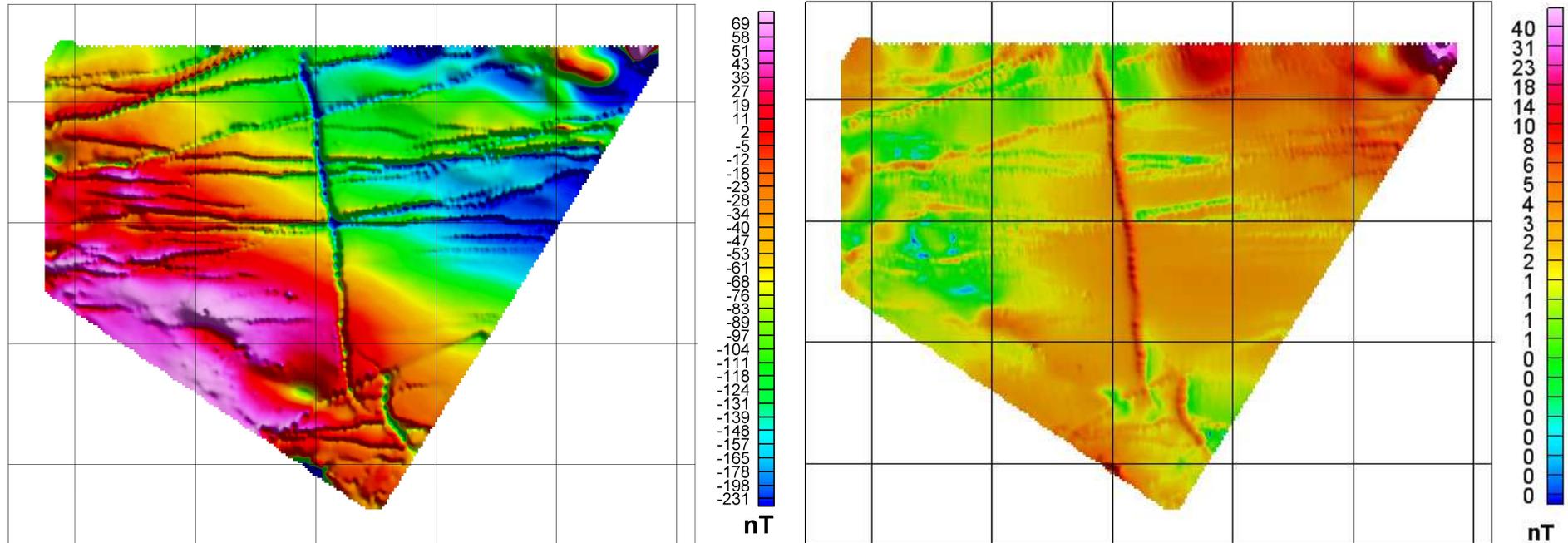


Effet gênant pour détecter les failles NO-SE

● Gisements d'uranium

(Gauthier-Lafaye, 1986)

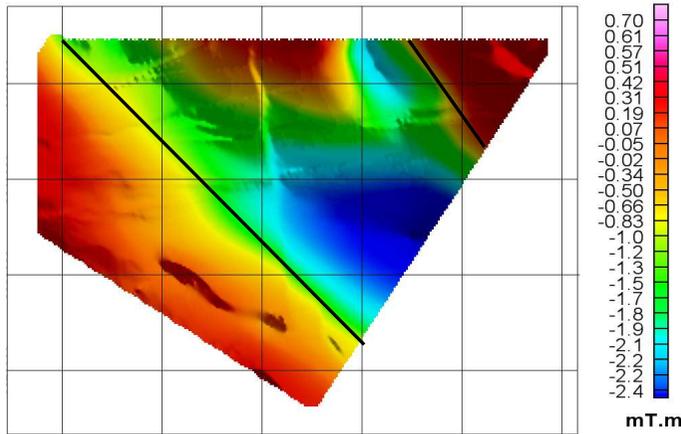
3.1.6 Comparaison entre F et F_1 : Levé aéroporté



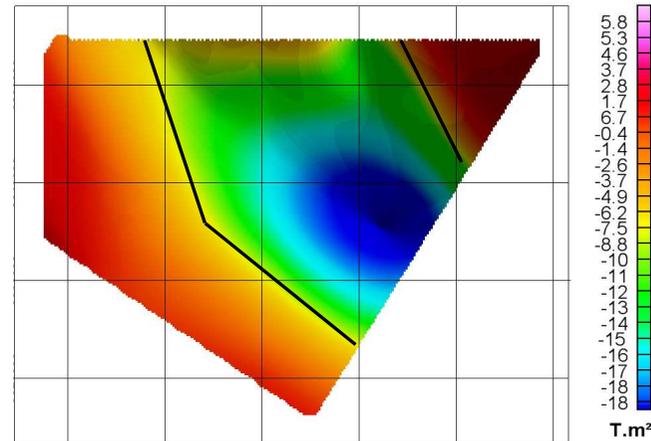
3.2.1 Etude du signal grande longueur d'onde



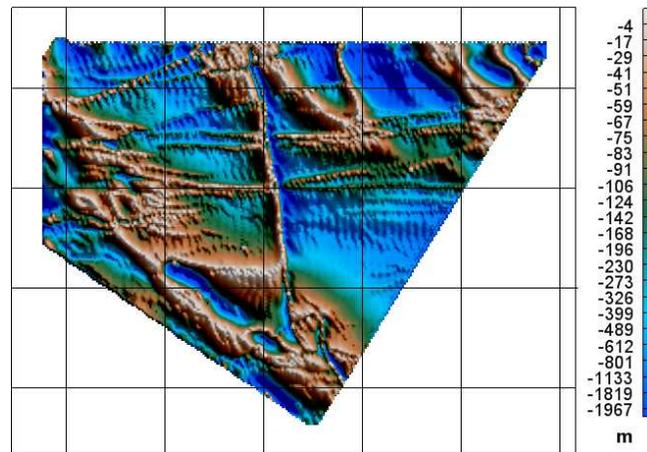
Potentiel



Superpotentiel



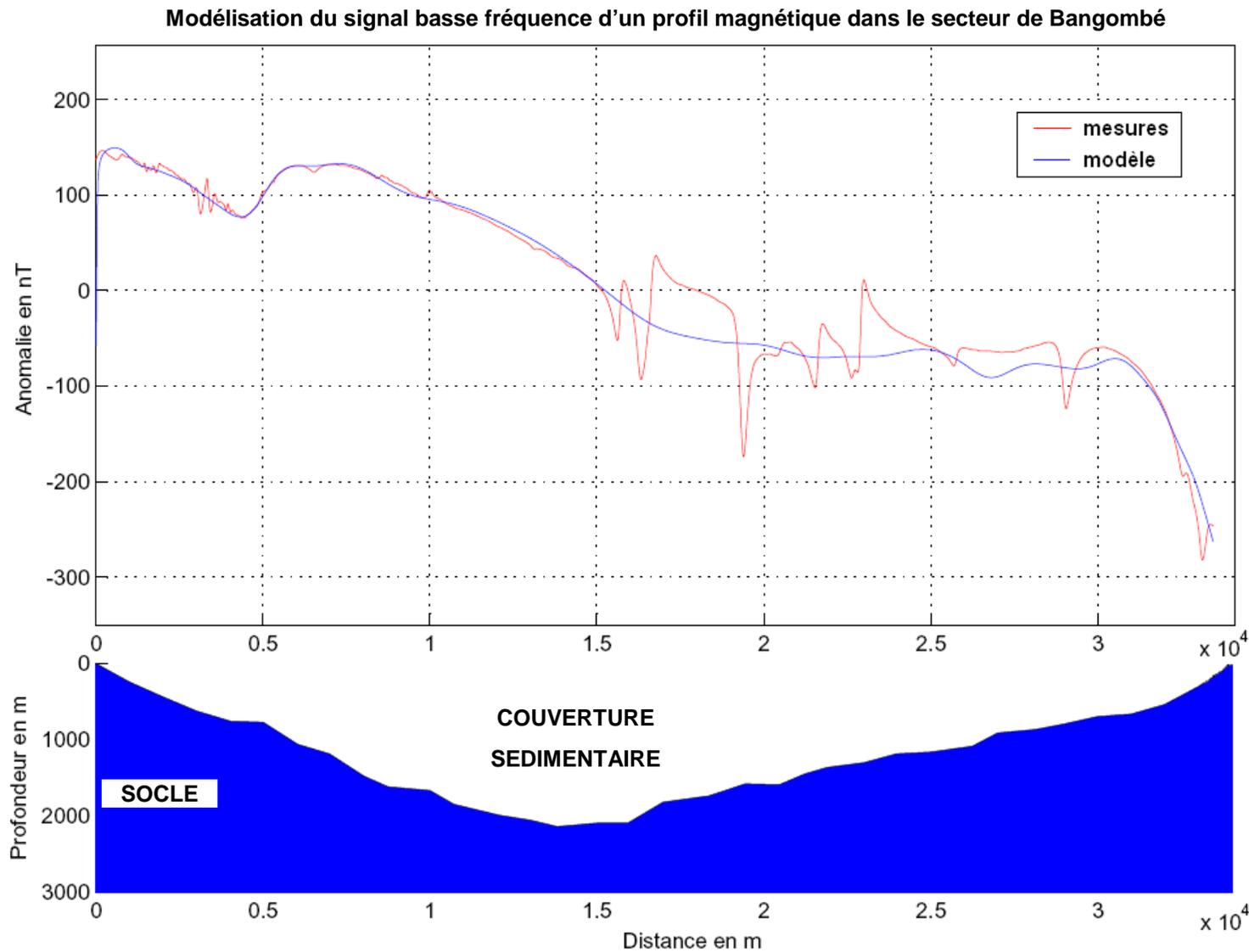
Carte de profondeur des sources aimantées



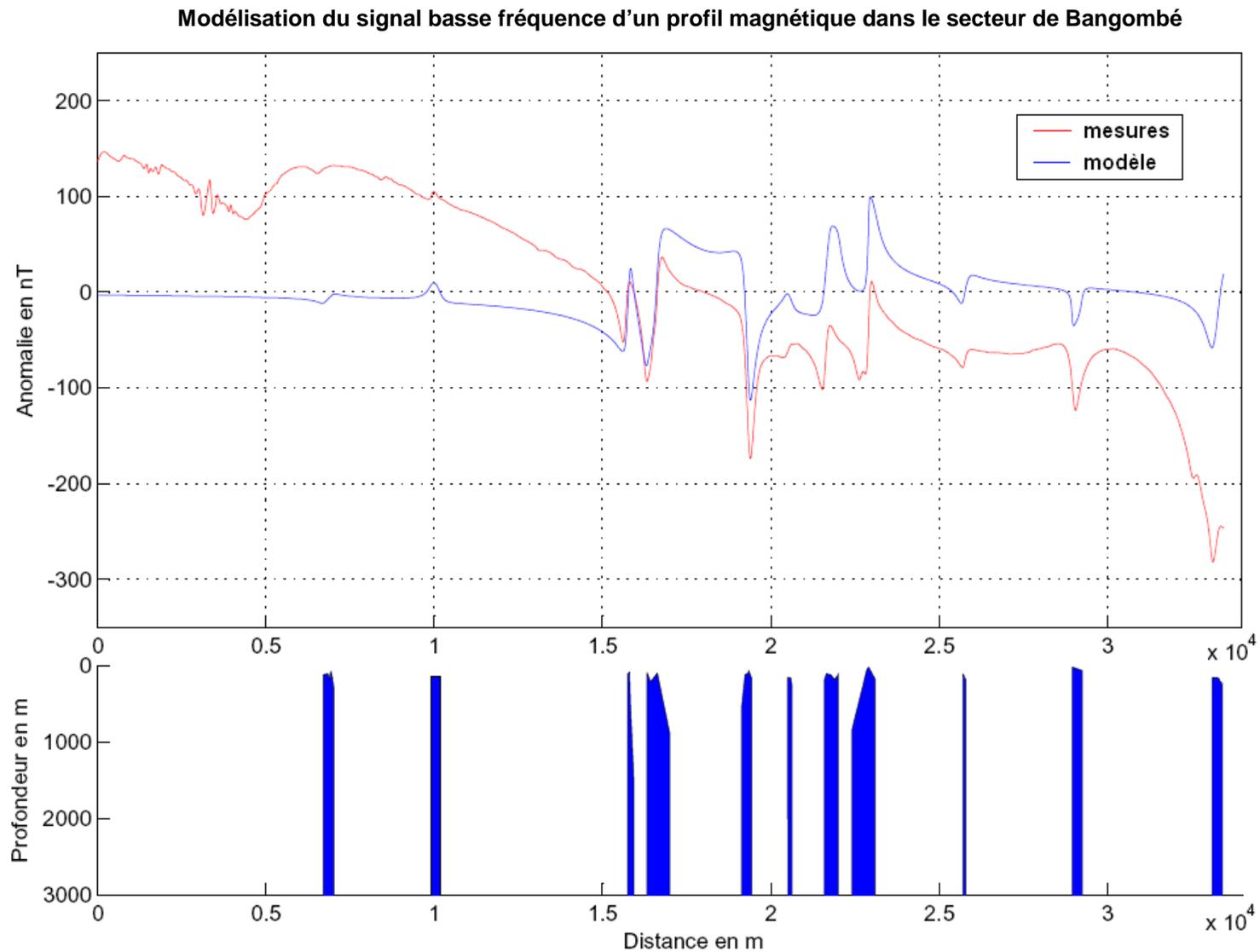
Rapport de l'amplitude du signal analytique du superpotentiel sur TAM_{zz}



3.2.2 Modélisation/Inversion 2D par la méthode de Talwani

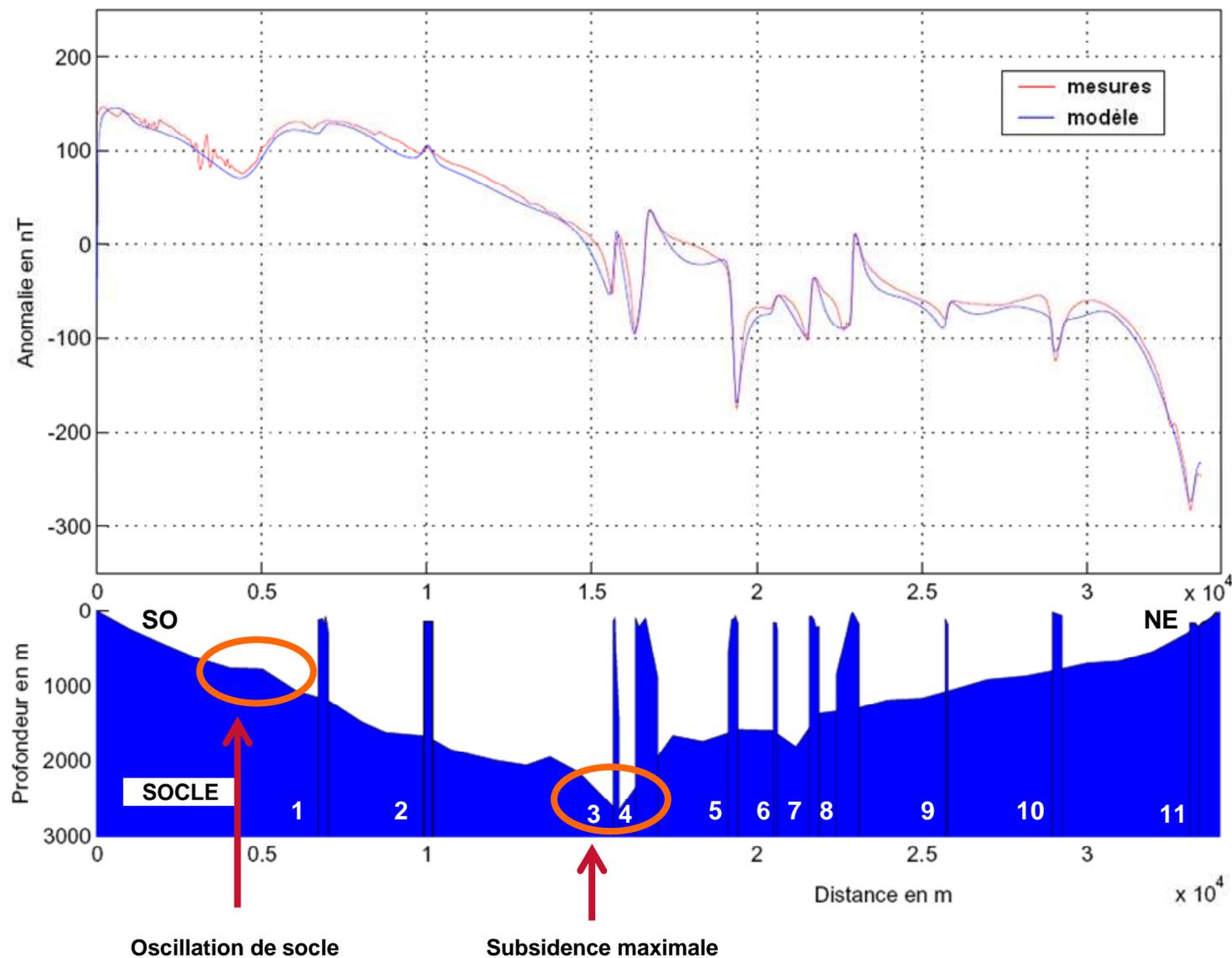


3.2.2 Modélisation/Inversion 2D par la méthode de Talwani

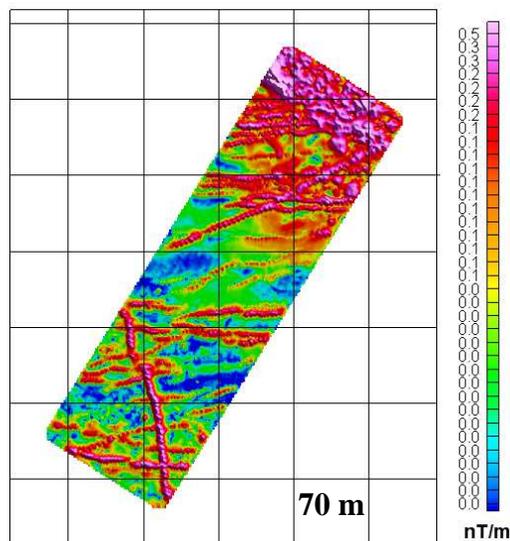


3.2.2 Modélisation/Inversion 2D par la méthode de Talwani

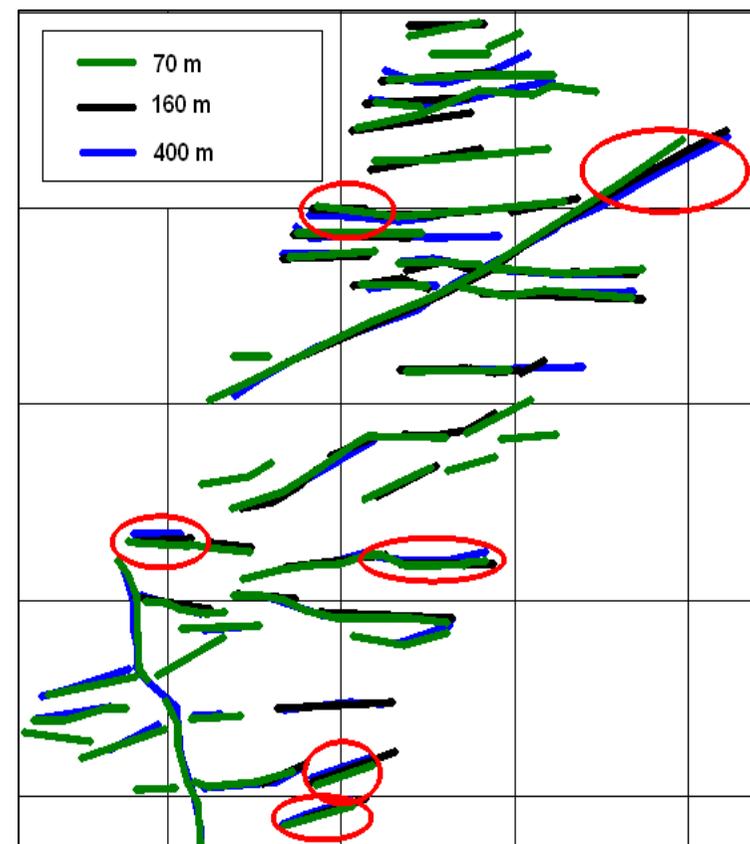
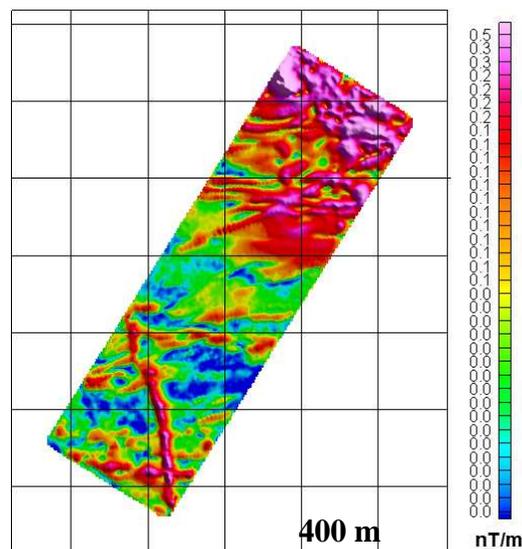
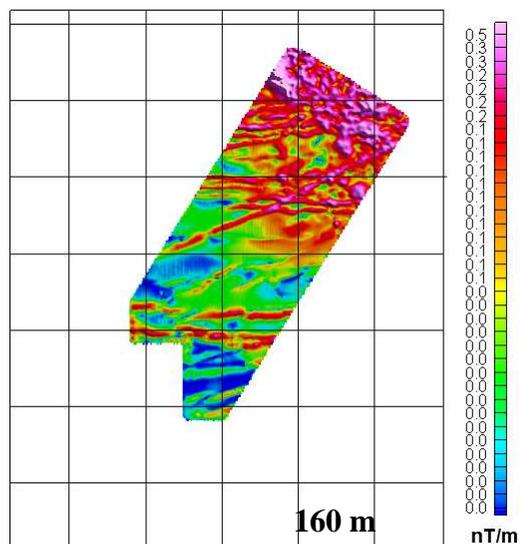
Modélisation du signal basse fréquence d'un profil magnétique dans le secteur de Bangombé



3.2.3 Etude multi-échelle : Signaux analytiques à différentes altitudes

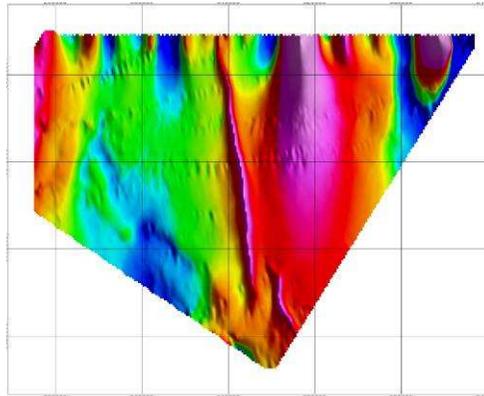


Amplitudes des signaux analytiques de trois levés aéromagnétiques

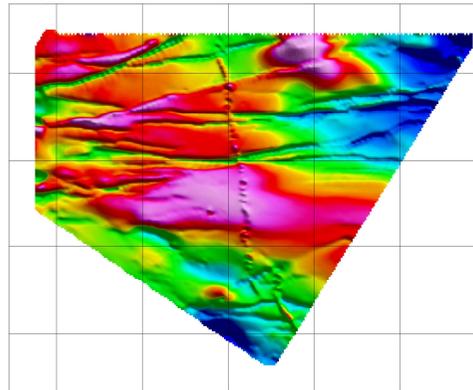


Superposition des maxima correspondants aux contacts. Les segments décalés sont cerclés en rouge.

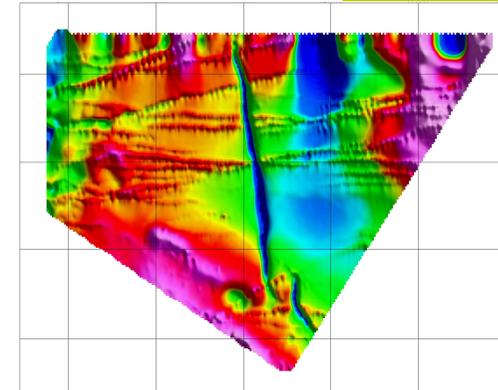
3.3.1 Tenseur de l'Anomalie Magnétique



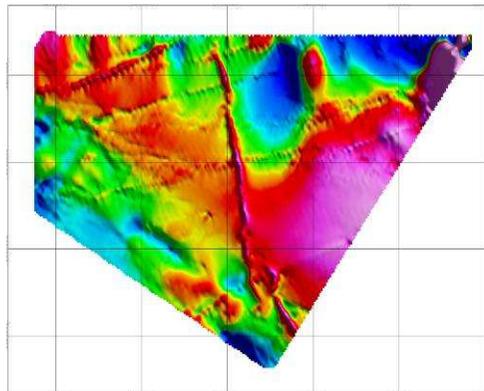
TAM_{xx}



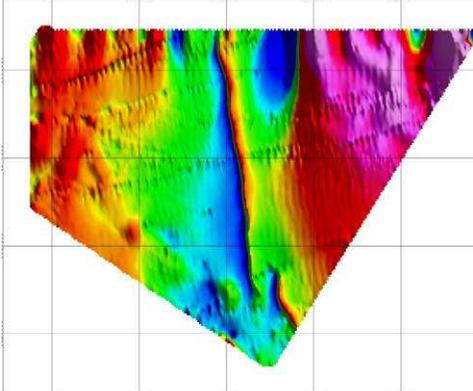
TAM_{yy}



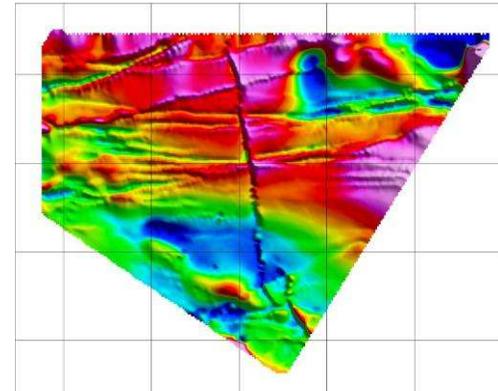
TAM_{zz}



TAM_{xy}



TAM_{xz}



TAM_{yz}

Anomalie de projection F_1

$$\frac{1}{(ilu + imv - ns)^2}$$

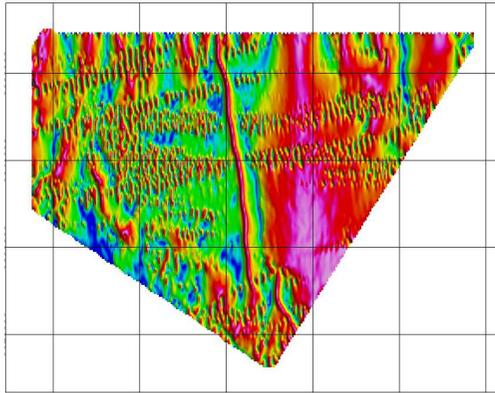
Superpotentiel scalaire magnétique Φ

$$\begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ -uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

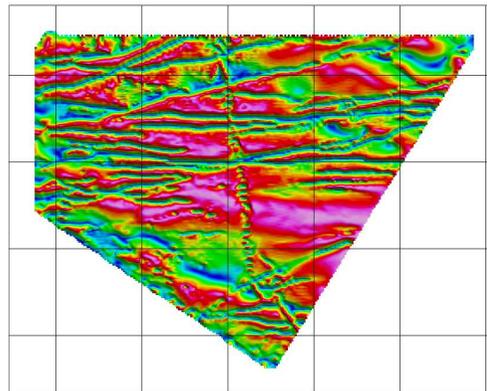
Tenseur de l'Anomalie Magnétique

Cartes de la dérivée du tilt angle
de chaque composante

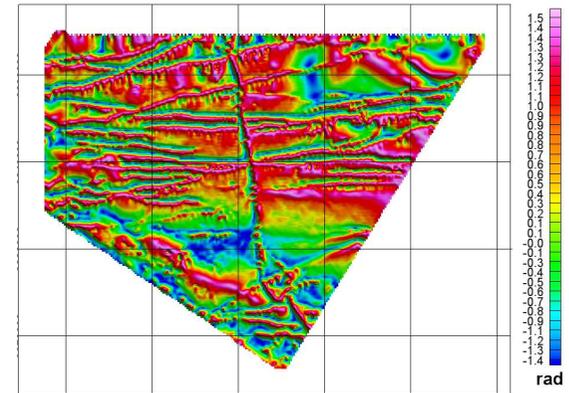
3.3.1 Tenseur de l'Anomalie Magnétique



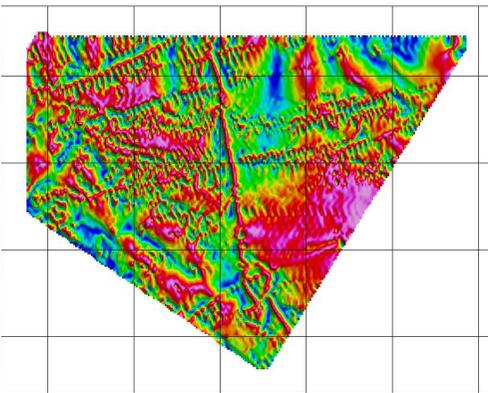
TAM_{xx}



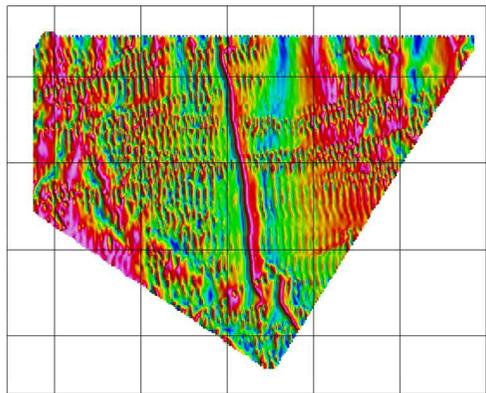
TAM_{yy}



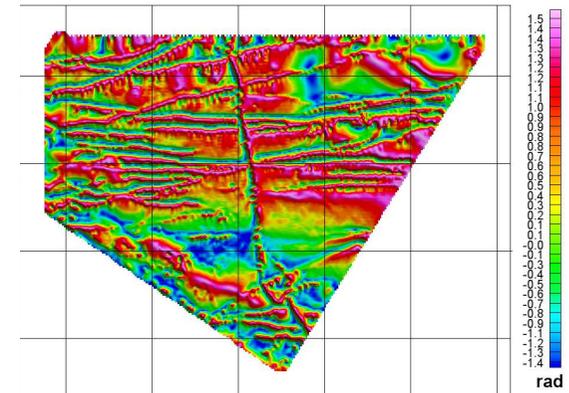
TAM_{zz}



TAM_{xy}



TAM_{xz}



TAM_{yz}

Anomalie de
projection F_1

$$\frac{1}{(ilu + imv - ns)^2}$$

Superpotentiel scalaire
magnétique Φ

$$\begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ -uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

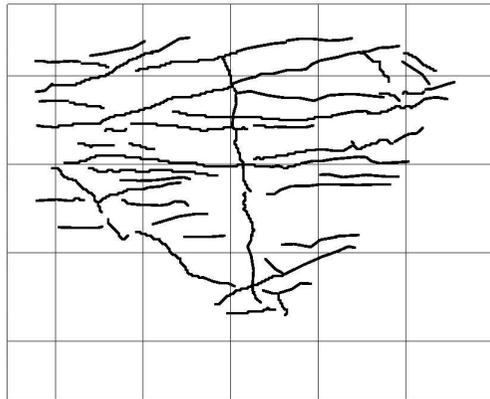
Tenseur de
l'Anomalie
Magnétique

Cartes d'analyse structurale
de chaque composante

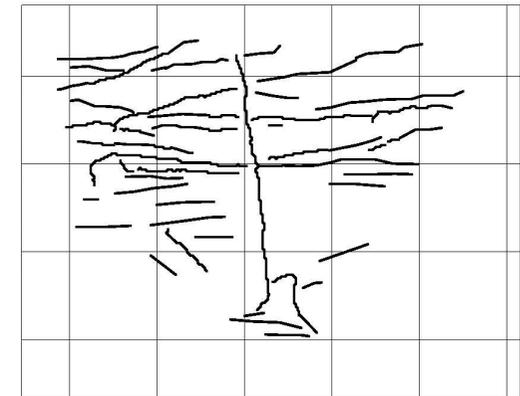
3.3.1 Tenseur de l'Anomalie Magnétique



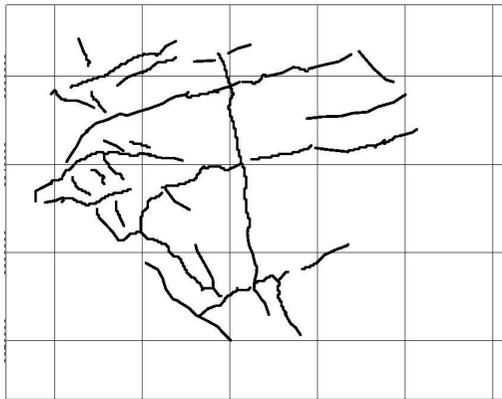
TAM_{xx}



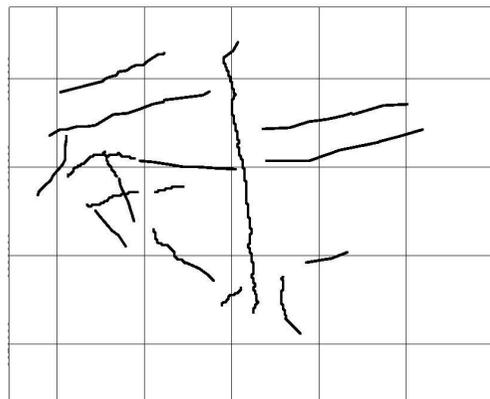
TAM_{yy}



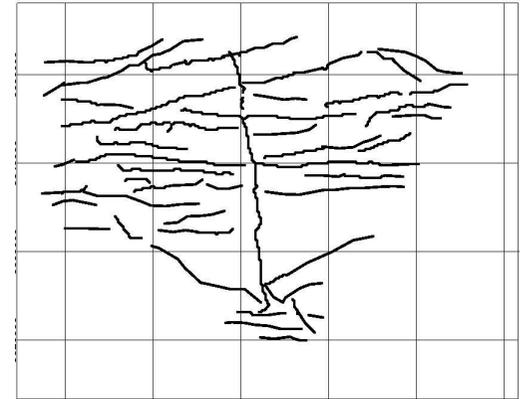
TAM_{zz}



TAM_{xy}



TAM_{xz}



TAM_{yz}

Anomalie de
projection F_1

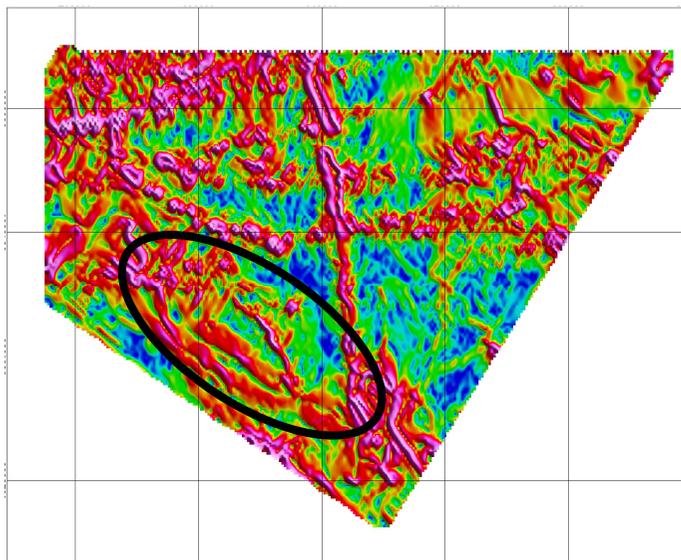
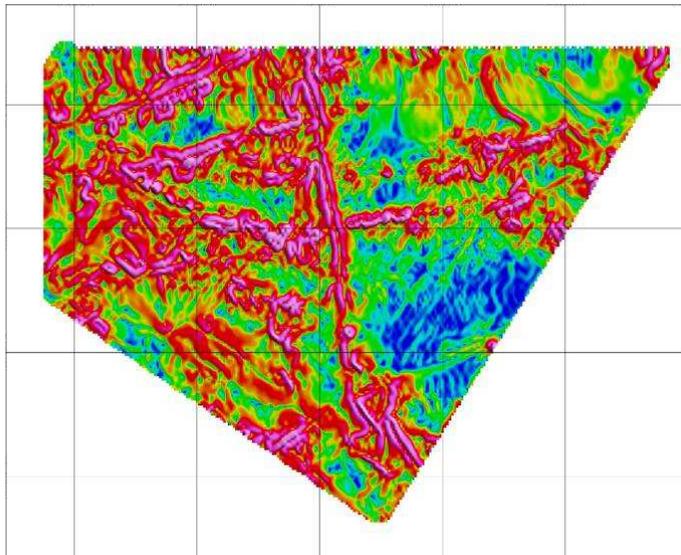
$$\frac{1}{(ilu + imv - ns)^2}$$

Superpotentiel scalaire
magnétique Φ

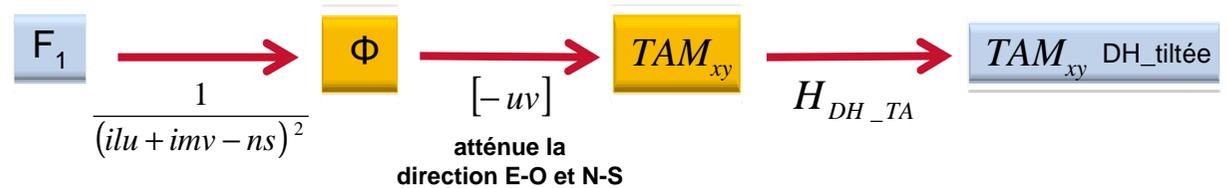
$$\begin{bmatrix} u^2 & uv & ius \\ -uv & v^2 & ivs \\ ius & ivs & -s^2 \end{bmatrix}$$

Tenseur de
l'Anomalie
Magnétique

3.3.2 Mise en évidence des directions NO-SE par réduction croisée



Traitement intermédiaire : Tenseur de l'Anomalie Magnétique et tilt angle



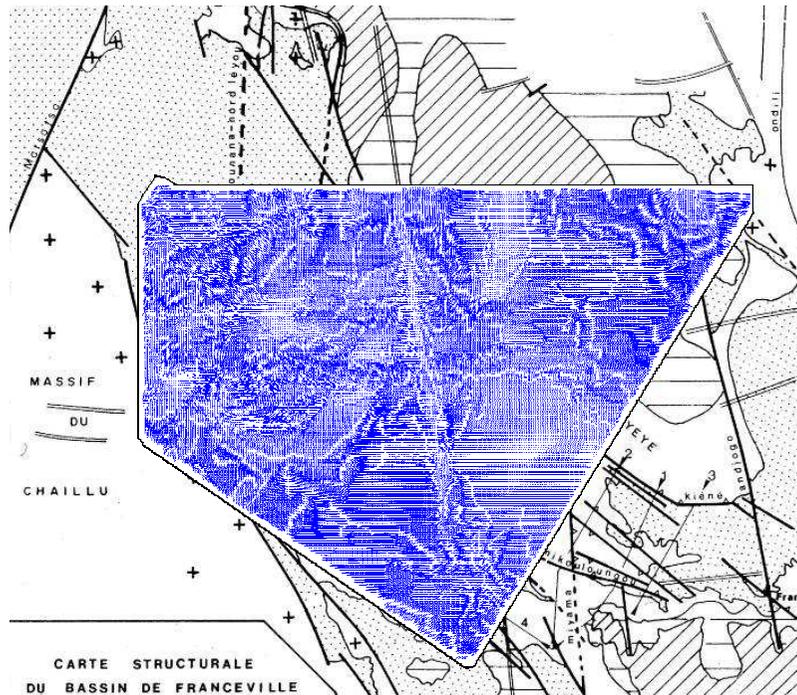
Structures NO-SE détectables

Traitement final : filtrage directionnel et tilt angle



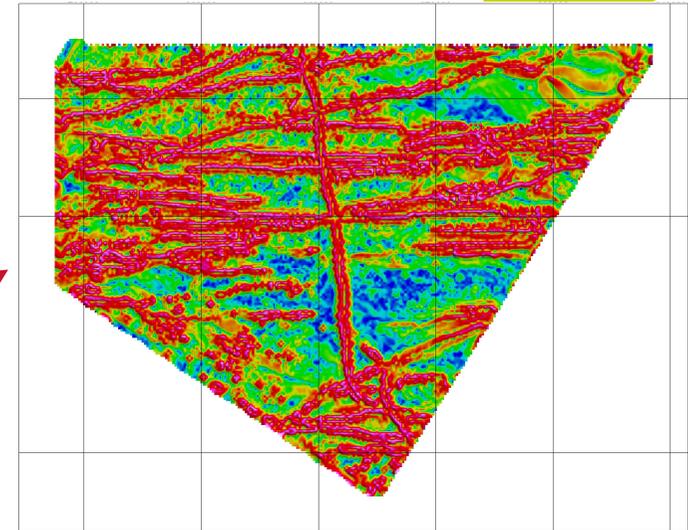
$$H_\alpha = \left| \cos^n \left(\alpha - \omega + \frac{\pi}{2} \right) \right| \quad \text{ici } \alpha = 0^\circ (\text{NS}) \text{ et } n = 1 \text{ avec } \begin{cases} \cos \omega = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \\ \sin \omega = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \end{cases}$$

3.3.2 Mise en évidence des directions NO-SE par réduction croisée

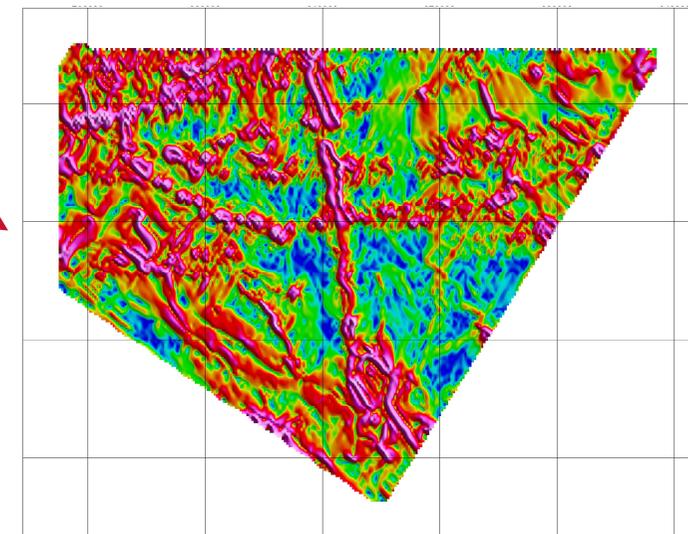


Troisièmes vecteurs propres

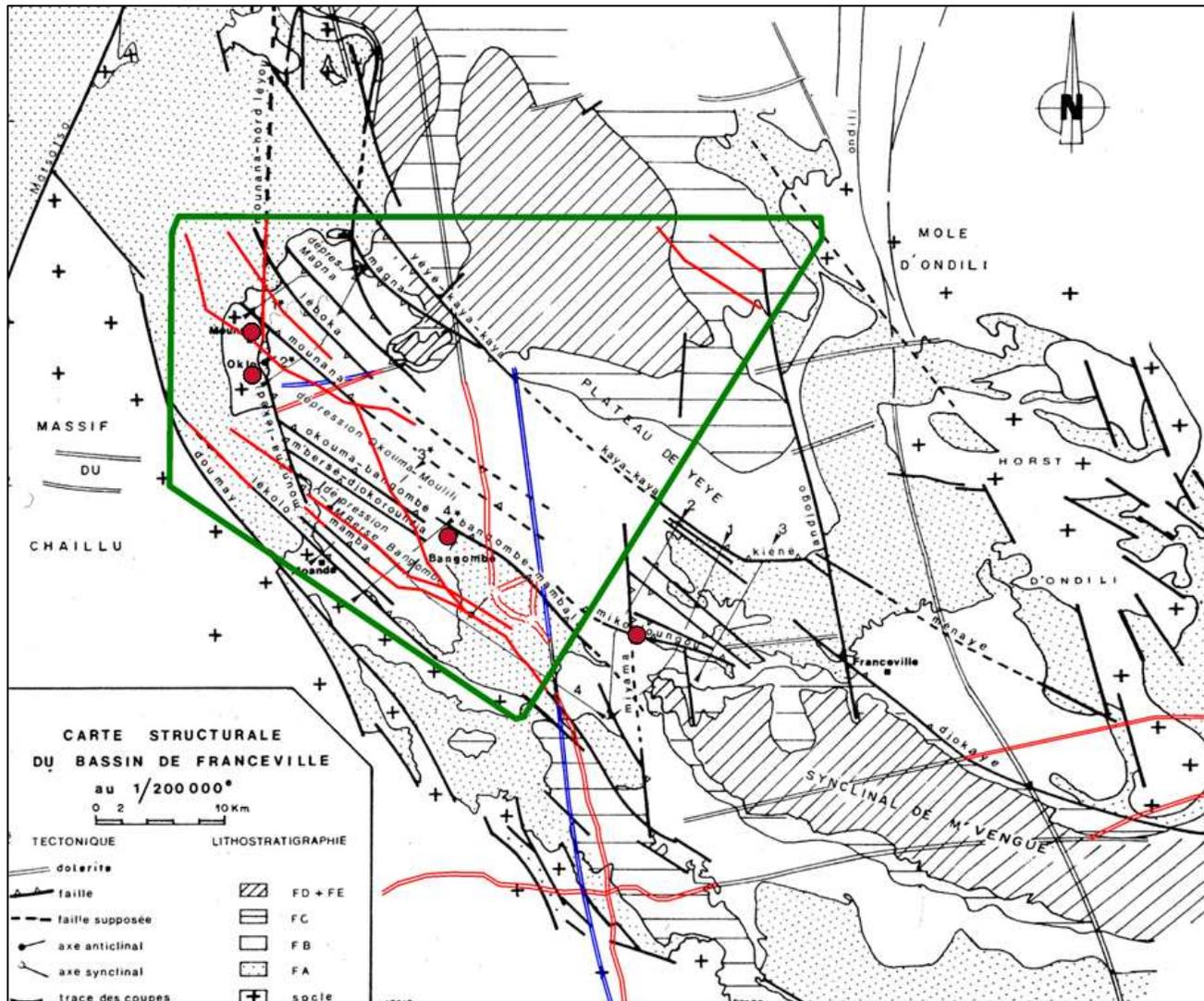
Traitement
classique



Traitement
amélioré



3.3.3 Réinterprétation de la carte structurale francevillienne



● Gisements d'uranium — Nouvelle structure — Erreur de positionnement — Zone d'étude

Intersection des structures
NO-SE et EO



Gisements potentiels ??

Symétrique d'Oklo en
position interne ??

(Modifiée d'après Gauthier-Lafaye, 1986)



- ▶ 1- Les fonctions magnétiques caractéristiques
- ▶ 2- Superpotentiels et Tenseur de l'Anomalie Magnétique : Applications
- ▶ 3- Prospection aéromagnétique du Bassin de Franceville
- ▶ 4- Conclusions et perspectives

Conclusions

- ▶ **Estimer F_1 à partir de F**
Formule de Lourenço revisitée
- ▶ **Introduction de nouvelles fonctions magnétiques : Superpotentiels et Tenseurs**
Fonctions extrémales à l'aplomb des sources
Prolégomènes au filtrage directionnel
- ▶ **Étude aéromagnétique du Francevillien**
Éléments nouveaux de gîtologie
Approche plus quantitative
- ▶ **Hypothèse** : directions d'aimantation supposées connues

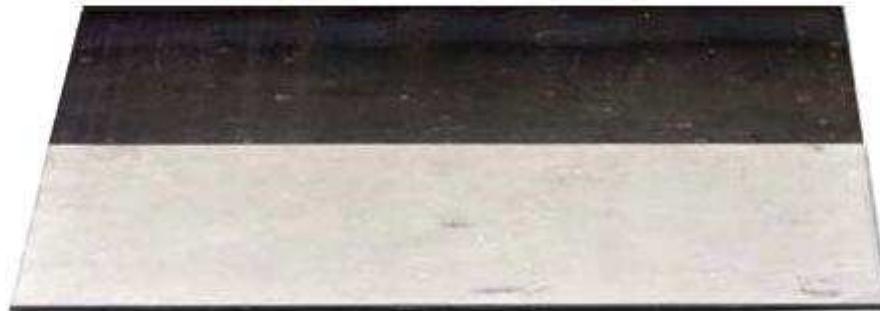
Perspectives



- ▶ Utiliser une centrale d'attitude pour mesurer la grandeur vectorielle ou tensorielle.
- ▶ Appliquer à d'autres problématiques d'échelles différentes (Risque sismique Mongolie).
Comparer avec les autres outils de transformation de carte.
- ▶ Confronter les résultats avec des structuralistes.
Modélisation 2D sur tout le socle.
- ▶ Contraindre l'effet de la rémanence.



Merci de votre attention !



Steel-Magnesium Dipole (N/S)

de Carl André (artiste américain minimaliste né en 1935)