



MODELISATION DU CHAMP MAGNETIQUE INDUIT PAR DES TOLES

IDENTIFICATION DE L'AIMANTATION

**Application à l'immunisation en boucle fermée d'une coque
ferromagnétique**

Olivier CHADEBEC

Directeur de thèse : Jean-Louis COULOMB

Laboratoire de Magnétisme du Navire - Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

**Ce travail a été financé et suivi par le Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique
(GESMA - DGA)**

et mené en collaboration avec Thomson Marconi Sonar et Cedrat



Présentation de l'immunisation magnétique des navires



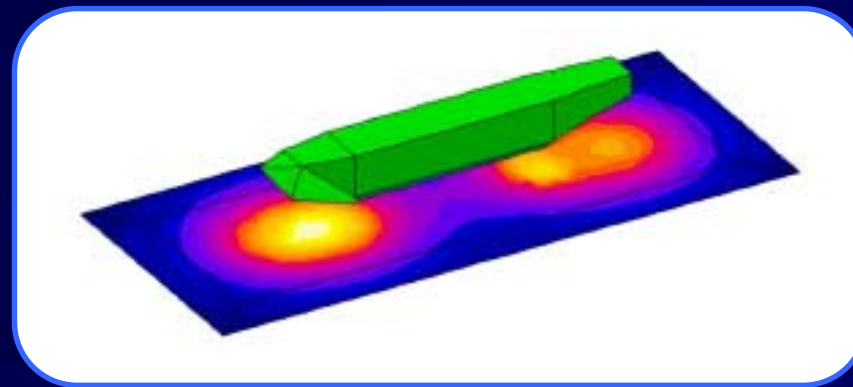
LEG

Risque magnétique



✓ Bâtiments constitués de matériaux ferromagnétiques

- Aimantation due au champ magnétique terrestre
- Création d'une anomalie locale de ce champ

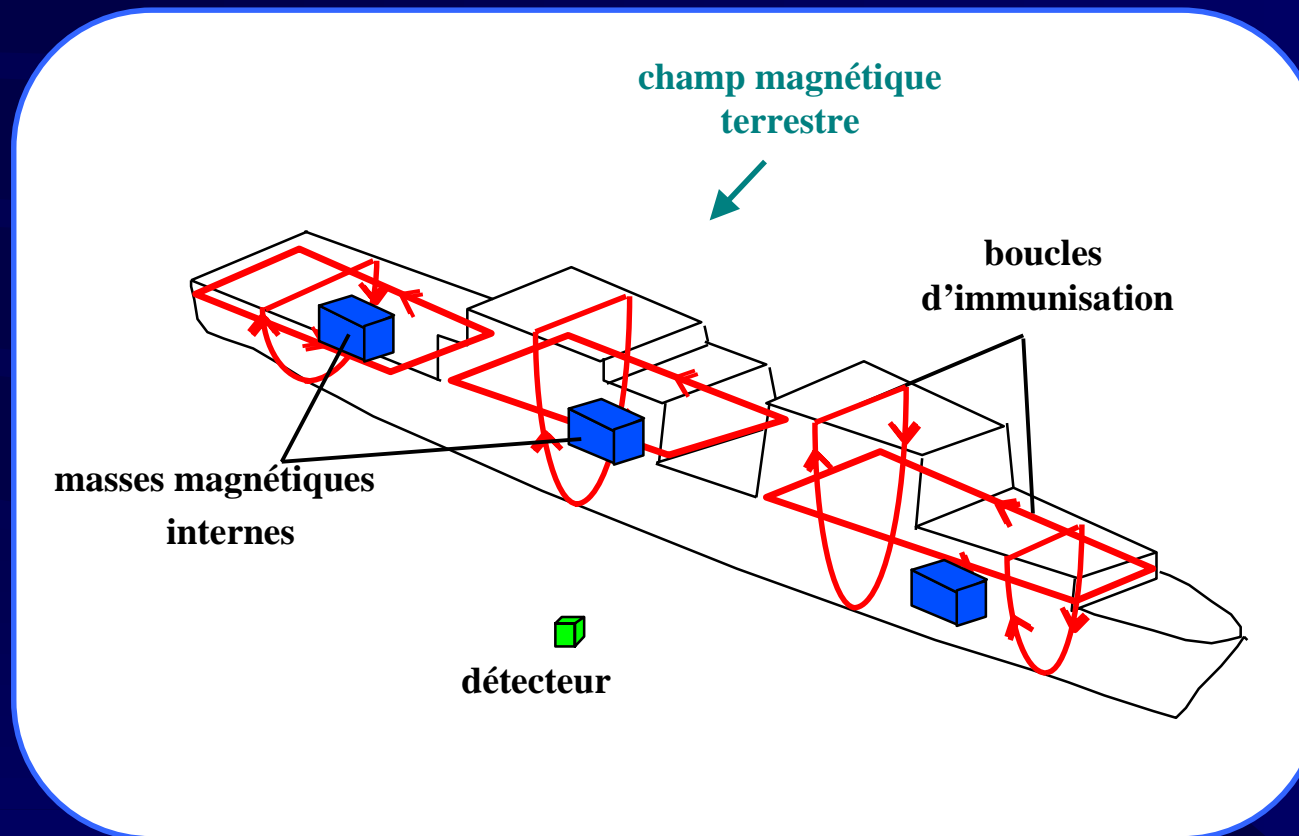


✓ Notion de risque magnétique

- Destruction (mines magnétiques)
- Localisation (sous-marins)

Nécessité de réduire le risque magnétique

✓ Contrôle des effets de l'aimantation par des boucles d'immunisation



Aimantation induite M_i

Réaction réversible du
matériau plongé dans le
champ terrestre

Données: **accessibles**
Modèle: **simple**

Problème direct

Éléments finis
Intégrales de frontières
Méthode des moments

Aimantation permanente M_p

Histoire magnétique du matériau
Hystérésis, contraintes mécaniques
et thermiques

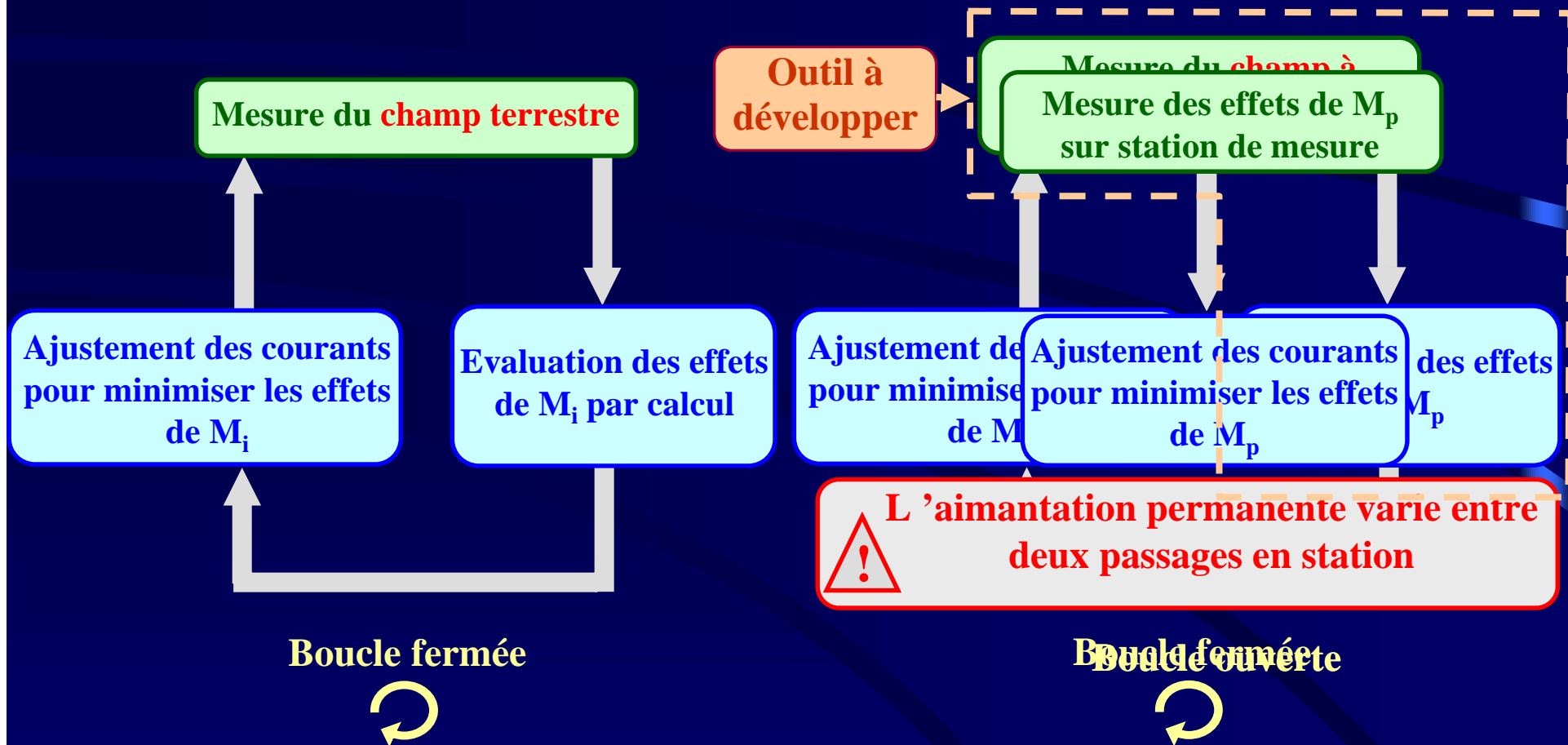
Données: **inaccessibles**
Modèle: **trop complexe**

Problème inverse

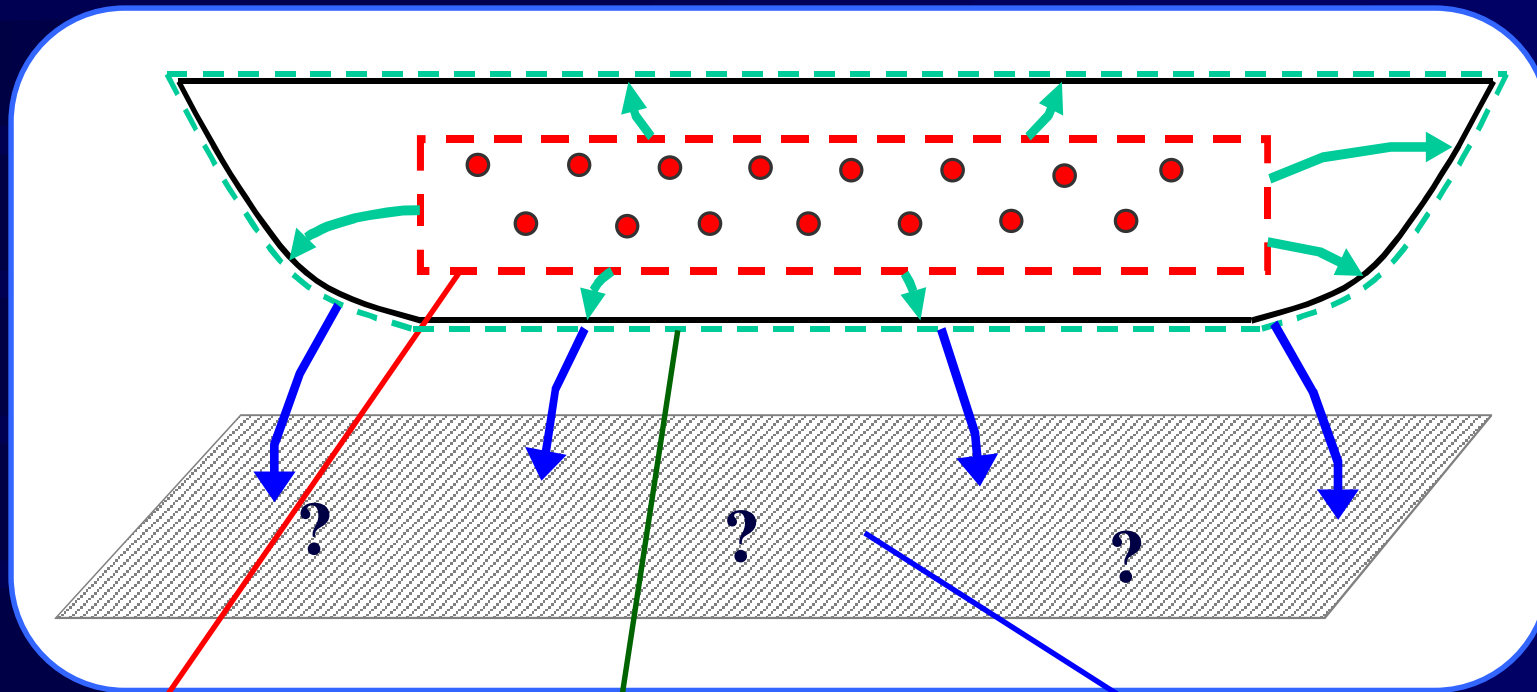
Nécessité de réaliser des
mesures de champ magnétique

Minimisation des effets de l'aimantation induite

Minimisation des effets de l'aimantation permanente



⚠ L'aimantation permanente varie entre deux passages en station



Etape 1

Mesure du champ
magnétique à
l'intérieur du navire

Etape 2

Construction d'un
modèle d'aimantation à
partir des mesures

Etape 3

Prédiction du champ
à l'extérieur à partir
du modèle



Plan de l'exposé



- ✓ **Présentation de l'immunisation magnétique des navires**
- ✓ **Méthodes directes de calcul de l'aimantation induite**
- ✓ **Identification de l'aimantation totale**
- ✓ **Validations expérimentales**
- ✓ **Conclusions et perspectives**



- ✓ Présentation de l'immunisation magnétique des navires
- ✓ **Méthodes directes de calcul de l'aimantation induite**
- ✓ Identification de l'aimantation totale
- ✓ Validations expérimentales
- ✓ Conclusions et perspectives

Caractéristiques géométriques

e est l'épaisseur de la tôle

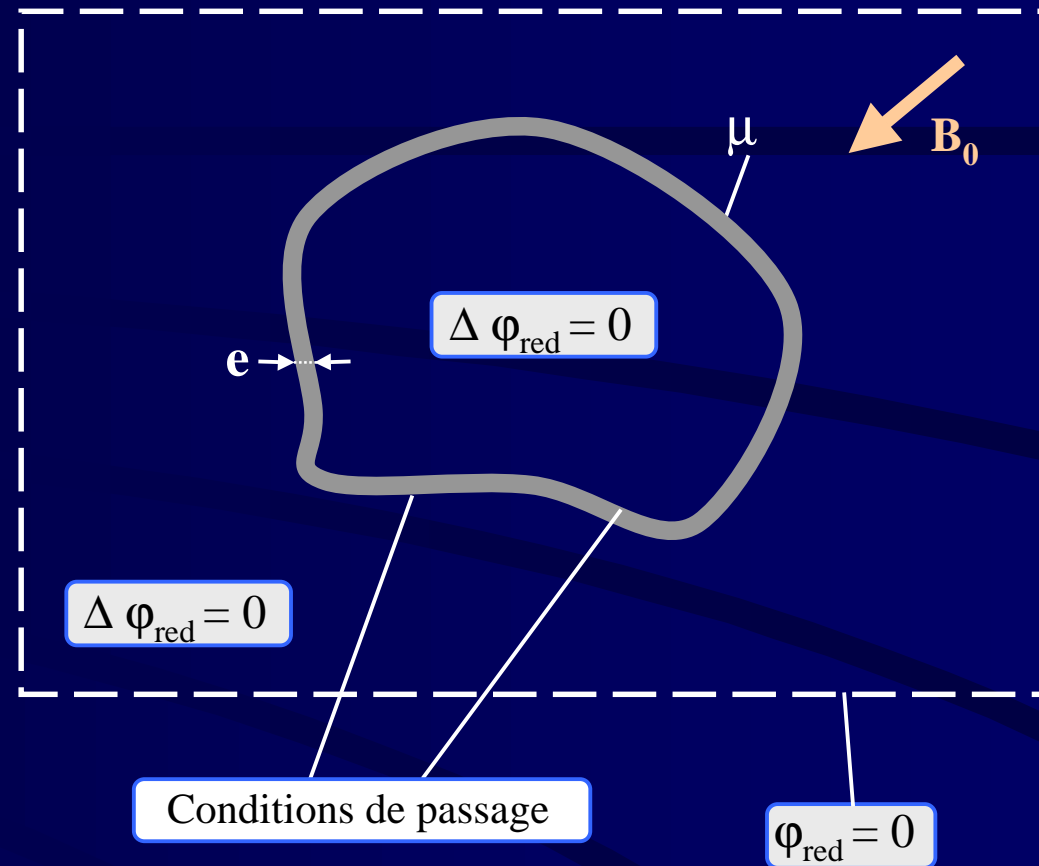
Caractéristiques physiques

B_0 est le champ terrestre

μ est la perméabilité réversible

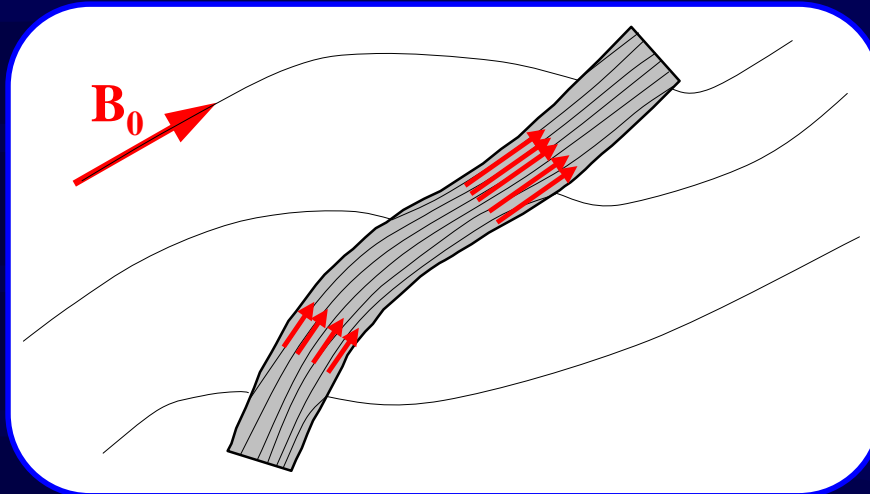
Modèle de matériau

$$B = \mu H$$



Utilisation du potentiel réduit

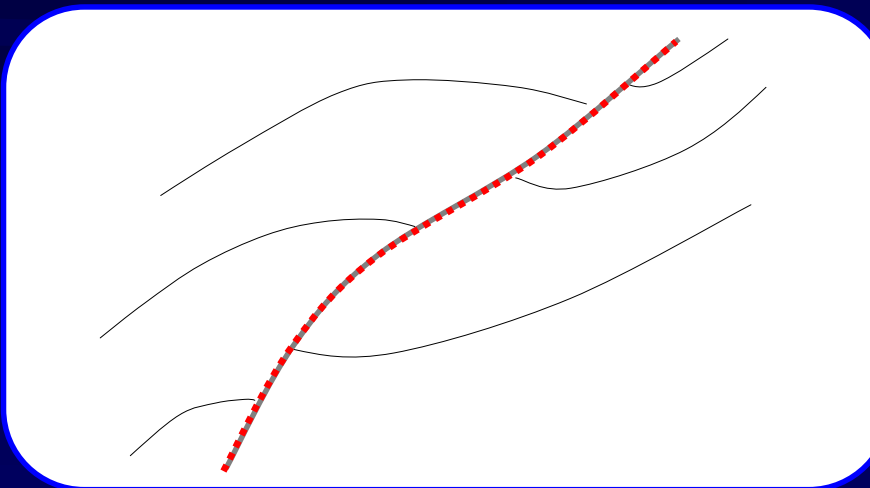
$$H = H_0 + H_{\text{red}} = H_0 - \text{grad } \varphi_{\text{red}}$$



$\left\{ \begin{array}{l} e \text{ est petit / aux autres dimensions} \\ \mu \text{ est grand / } \mu_0 \end{array} \right.$

La tôle canalise le flux d'induction

Aimantation : • parallèle à la tôle
• constante à travers celle-ci



Simplification de la géométrie

La tôle devient une surface avec un comportement mathématique particulier

e devient un paramètre

Permet de mailler la tôle surfaciquement et de réduire le nombre d'inconnues

Utilisation de méthodes du type
« intégrales globales »

Relation directe entre le champ d'un point de la région intérieure et une distribution sur la coque

Validité du modèle dans la région extérieure et la région intérieure

Deux types de distributions représentatives de l'anomalie créée par la tôle

Distribution surfacique dipolaire tangentielle

$$\mathbf{P} = e \mathbf{M}$$

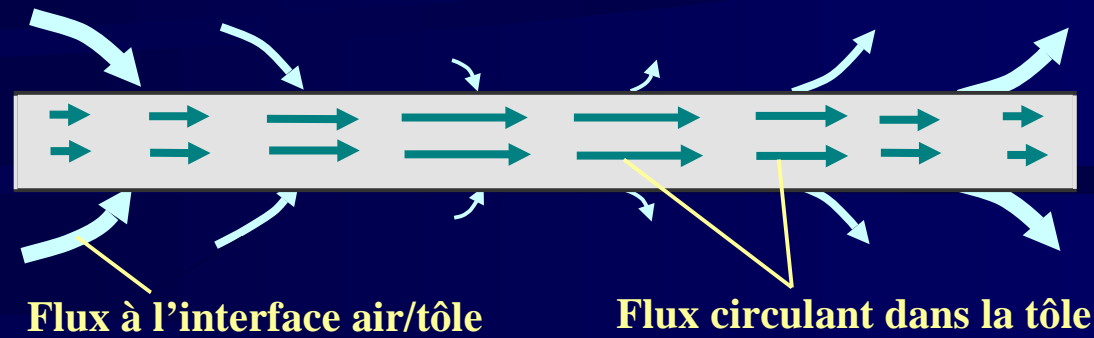
proportionnelle à l'aimantation

Distribution surfacique monopolaire

$$\rho = -e \operatorname{div}_s \mathbf{M}$$

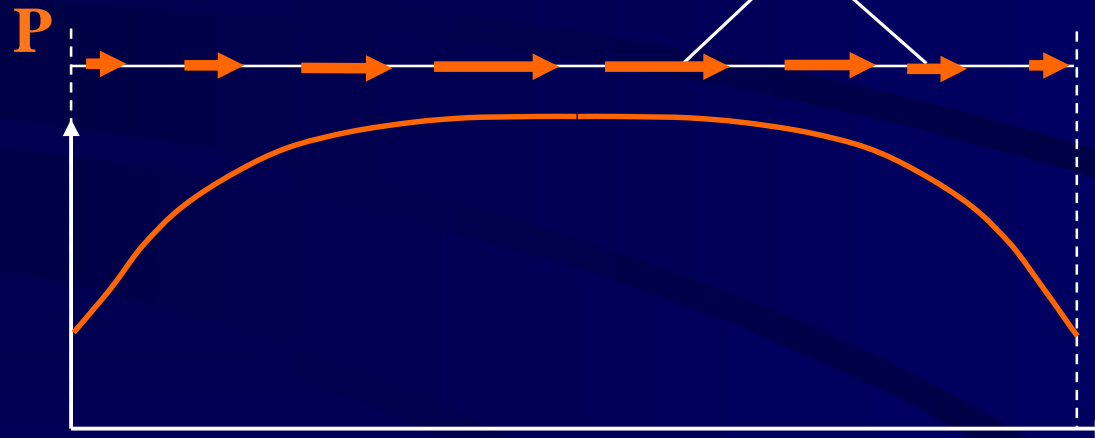
proportionnelle au flux s'échappant de la tôle

Cas didactique en deux dimensions



Approche dipolaire

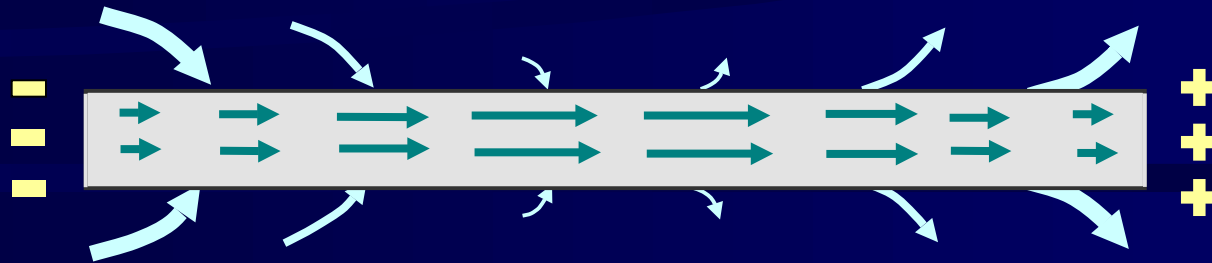
$$\mathbf{P} = e \mathbf{M}$$



Champ créé par la tôle :

$$\mathbf{H}_{\text{red}} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint_{\text{tôle}} \frac{1}{r^5} (3(\mathbf{P} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{P}) dS$$

Cas didactique en deux dimensions



Approche monopolaire

$$\rho = -e \operatorname{div}_S \mathbf{M}$$



Champ créé par la tôle :

$$\mathbf{H}_{\text{red}} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint_{\text{tôle}} \rho \frac{\mathbf{r}}{r^3} dS$$

Choix d'une distribution

Choix d'un maillage surfacique et d'une fonction de forme

Choix d'un modèle de matériau

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Collocation

Ecriture de l'équation $\mathbf{M} = (\mu_r - 1) (\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{red})$ en un nombre de points égal au nombre d'éléments

Ecriture d'un système d'équations

Problème de singularité

Dipôles

Charges

Répartition ponctuelle (condensation)

Répartition constante/élément (ordre 0)

Répartition linéaire/élément (ordre 1)

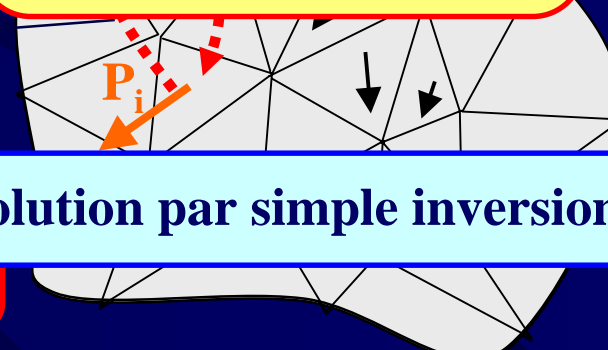
etc ...

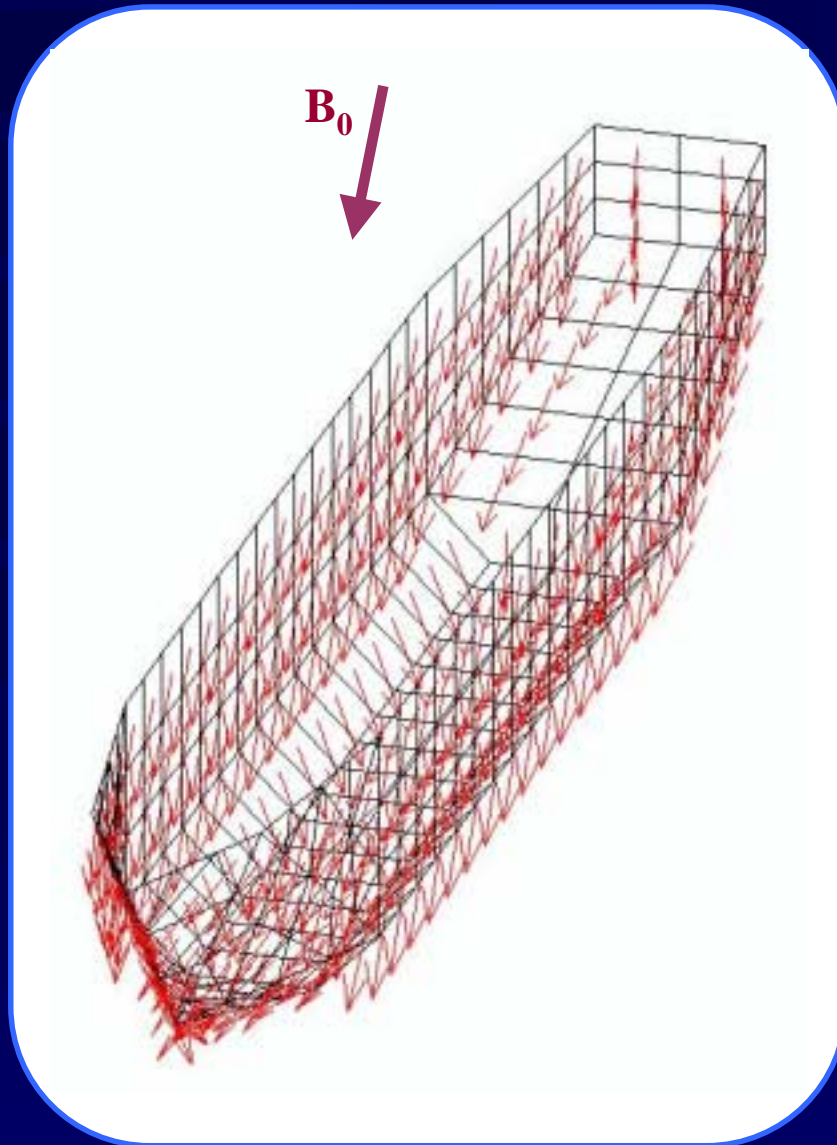
Systeme « plein »

n inconnues pour les charges

$2 \times n$ inconnues pour les dipôles

Résolution par simple inversion





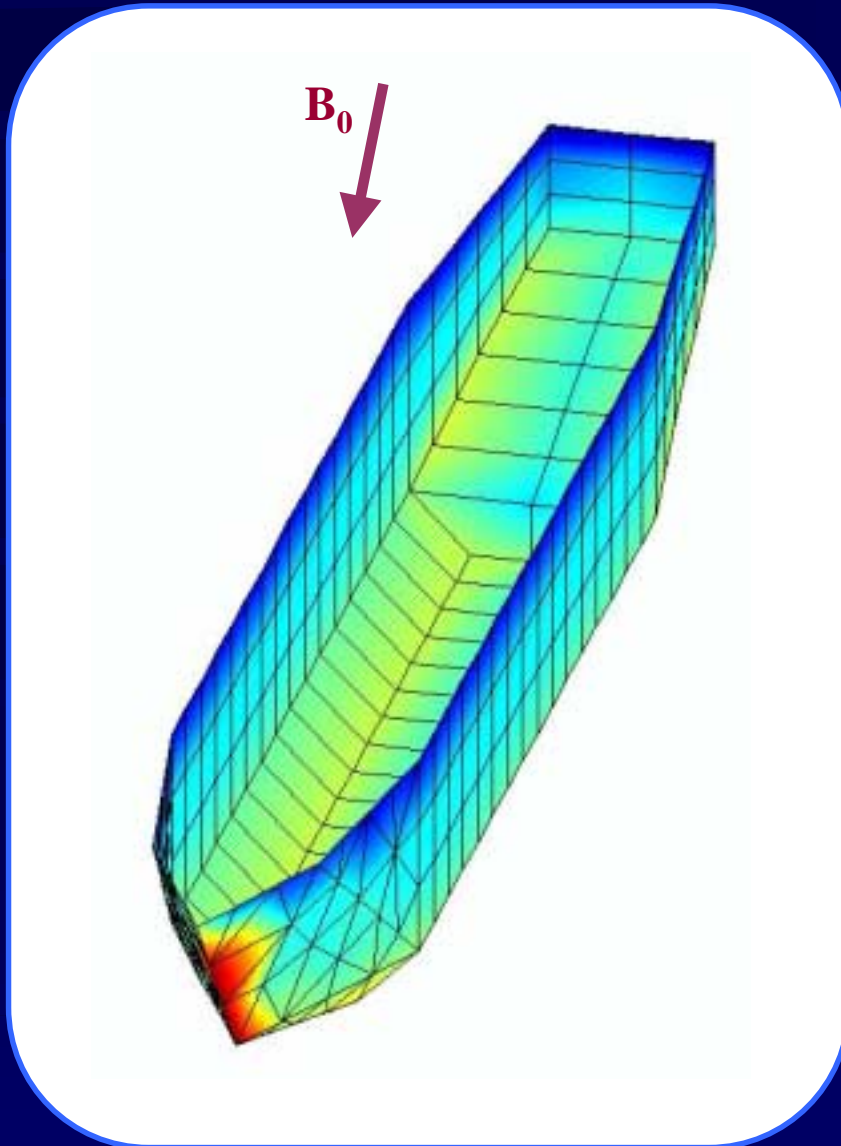
Dipôles ponctuels localisés au barycentre de chaque élément
condensation des dipôles

Avantage:

- **Grandeur représentative de l'aimantation**

Inconvénient:

- **Forte divergence au voisinage de la tôle (condensation + $1/r^3$)**



**Charges ponctuelles localisées en
chaque noeud**
condensation des charges

Avantage:

- **Moins fortes divergences à proximité de la tôle (condensation mais champ en $1/r^2$)**

Inconvénient:

- **Pas représentatif de l'aimantation**

On veut trouver une formulation pour résoudre le problème inverse

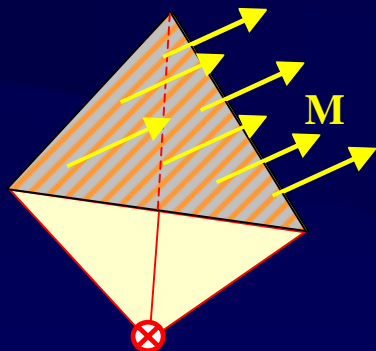
- Représentative de l'aimantation
- Validité du modèle près des sources (champ peu divergent près de la tôle)

✓ Pourquoi ?

✓ Résultat préliminaire

Elément de tôle uniformément aimanté \Leftrightarrow

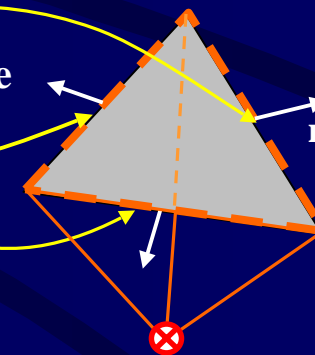
Distribution linéique de charges localisée sur les arêtes de l'élément



$$\mathbf{H}_{\text{red}} = -\frac{e}{4\pi} \text{grad} \iint_{\text{élément}} \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^3} dS$$

Répartition de charge linéique

$\mathbf{M} \cdot \mathbf{n}$



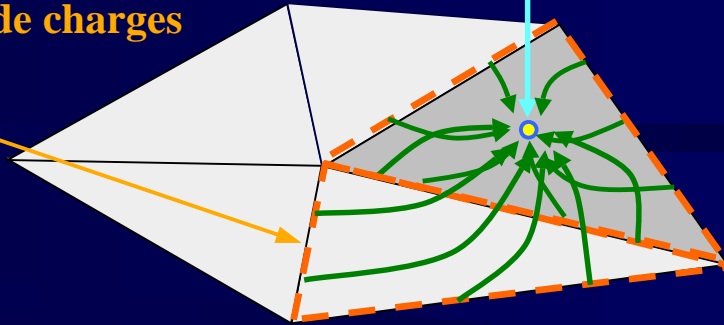
$$\mathbf{H}_{\text{red}} = \frac{e}{4\pi} \int_{\text{contour de l'élément}} \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} \frac{\mathbf{r}}{r^3} dL$$

Vers une nouvelle formulation

Point de collocation (barycentre de l'élément i)

Répartition linéique de charges

$M_j \cdot n_j$



$$\mathbf{M}_i = (\mu_r - 1) \left(\mathbf{H}_0 + \frac{e}{4\pi} \sum_j \int_{L_j} \mathbf{M}_j \cdot \mathbf{n}_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} dL_i \right)$$

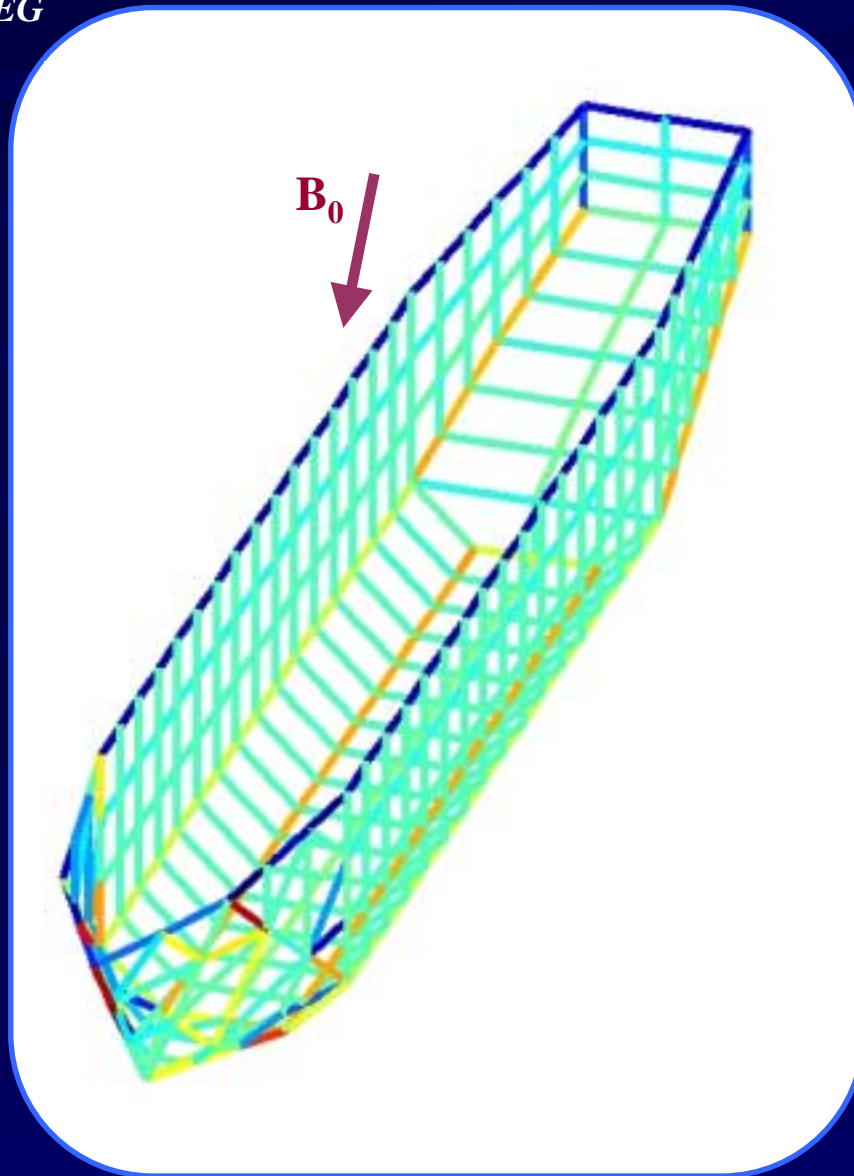
Obtention d'un système en écrivant l'équation sur tous les éléments

$$(\mathbf{C} + \mathbf{I}_d) \mathbf{M} = \mathbf{d}$$

Intérêts:

- Les inconnues sont les composantes de l'aimantation
- Le champ créé par la tôle dans l'air s'écrit :

$$\mathbf{H}_{\text{red}} = \frac{e}{4\pi} \sum_j \int_{L_j} \mathbf{M}_j \cdot \mathbf{n}_j \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} dL_i$$



Charges linéiques localisées sur les arêtes

strictement équivalent à une répartition dipolaire constante par élément

Avantages:

- Possibilité de remonter à l'aimantation
- Moins fortes divergences à proximité de la tôle (linéique + champ en $1/r^2$)



Emplacement capteur à quelques centimètres de la tôle



- ✓ **Présentation de l'immunisation magnétique des navires**
- ✓ **Méthodes directes de calcul de l'aimantation induite**
- ✓ **Identification de l'aimantation totale**
- ✓ **Validations expérimentales**
- ✓ **Conclusions et perspectives**

Problèmes inverses

Problèmes inverses de conception

Optimiser des sources pour obtenir un profil de champ désiré

Exemple: trouver la répartition optimale de courant dans les boucles pour annuler la signature sur un plan de référence

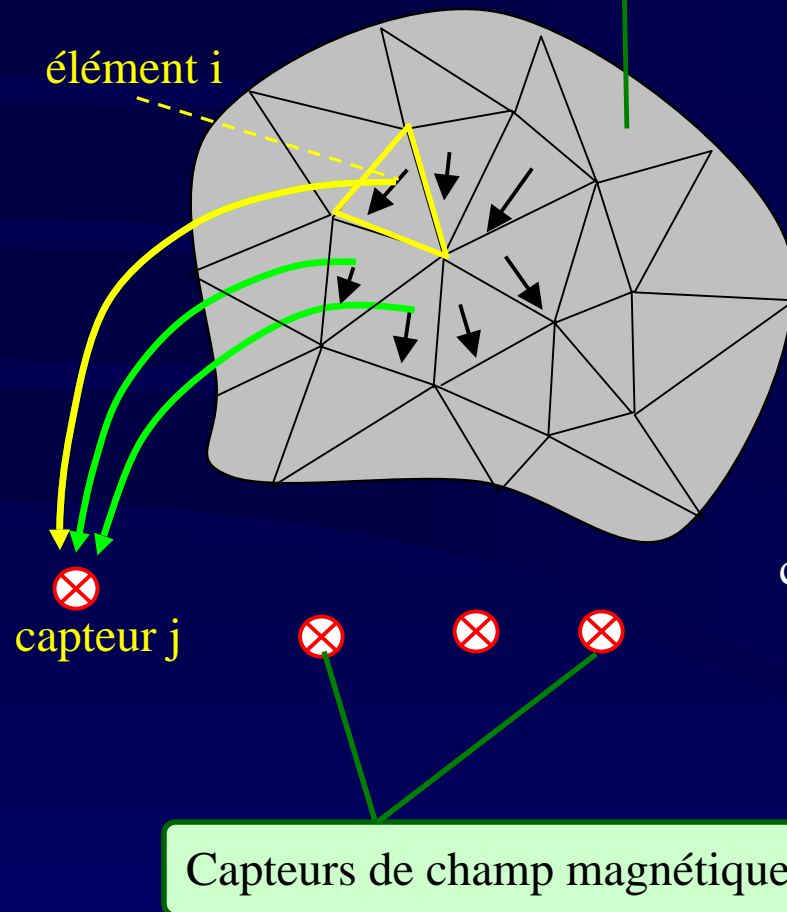
Problèmes inverses d'identification

Retrouver la valeur des sources à partir de mesures du champ magnétique

Exemple: A partir de mesures à l'intérieur du navire retrouver l'aimantation de la coque puis l'anomalie extérieure

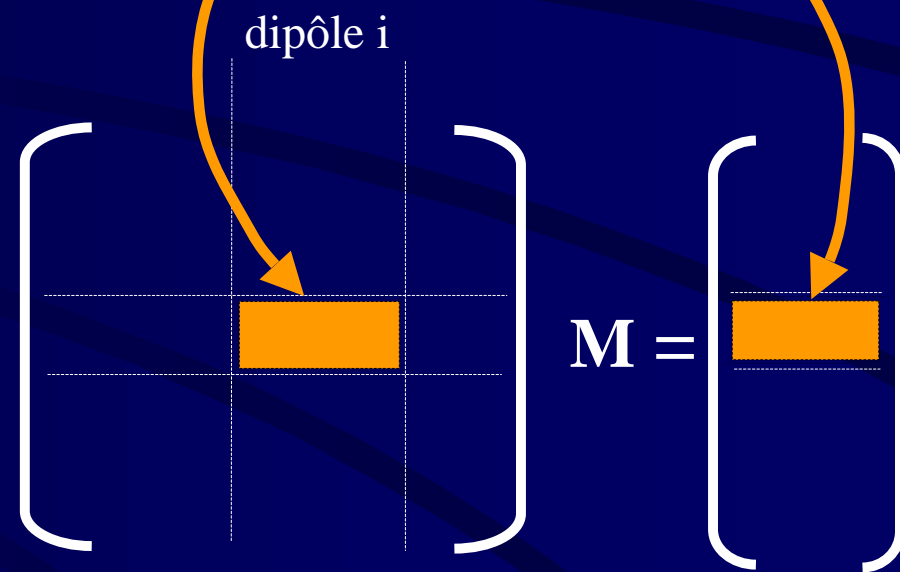
Construction du système exemple: formulation mixte

Tôle ferromagnétique avec une aimantation inconnue



Anomalie magnétique créée par le dipôle i
sur le capteur j

$$\frac{e}{4\pi} \int_{L_i} \mathbf{M}_i \cdot \mathbf{n}_i \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} dL_i = \mathbf{H}_{red_j}$$



$3 \times \text{nombre de capteurs}$

$$\left[\begin{array}{c} \mathbf{A} \\ \mathbf{x} = \mathbf{b} \end{array} \right]$$

$2 \times \text{nombre d'éléments pour un modèle en aimantation}$
 $1 \times \text{nombre d'éléments pour un modèle en charges}$

Utilisation de la **décomposition en valeurs singulières (SVD)**

Trouver x tel que $\|Ax - b\|$ soit minimum



Difficultés liées aux problèmes inverses



- ✓ **Le système est mal conditionné ou mal posé (beaucoup de capteurs)**
 - Une petite variation du second membre conduit à une forte variation de la solution
 - Les mesures sont fortement bruitées
- ➔ **La solution est divergente**

Il est nécessaire de régulariser

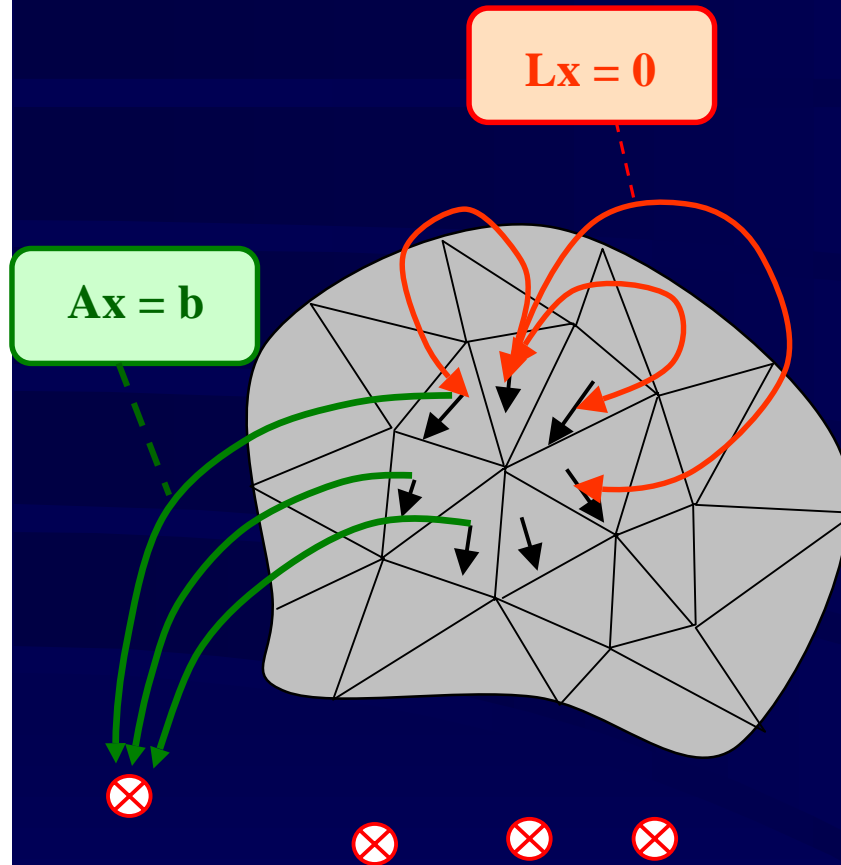
- ✓ **Le système est sous déterminé (peu de capteurs)**
 - Présence de moins d'équations que d'inconnues
- ➔ **La solution n'est naturellement pas unique**

Une inversion par SVD retourne la solution de norme minimum

Il n'y pas unicité de la solution

Régularisation des problèmes mal posés

Méthode de Tikhonov



Résolution simultanée de deux systèmes

Système mesure
 $Ax = b$

Matrice de régularisation
 $Lx = 0$

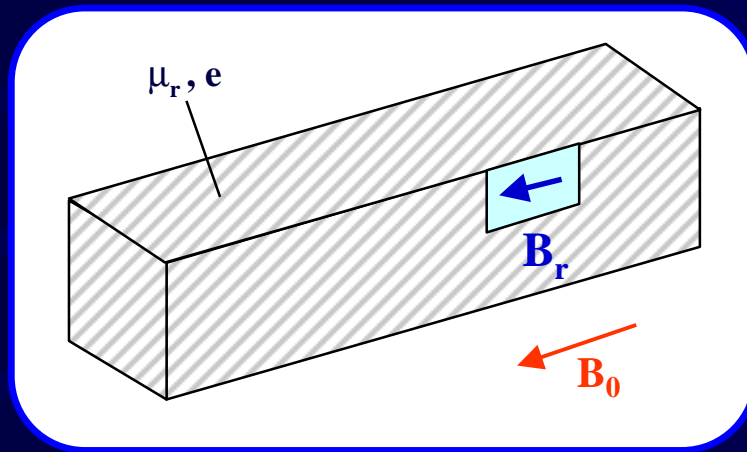
La distribution est en accord avec les mesures

- L opérateur identité
la solution est de norme faible
- L opérateur dérivée
la solution est régulière

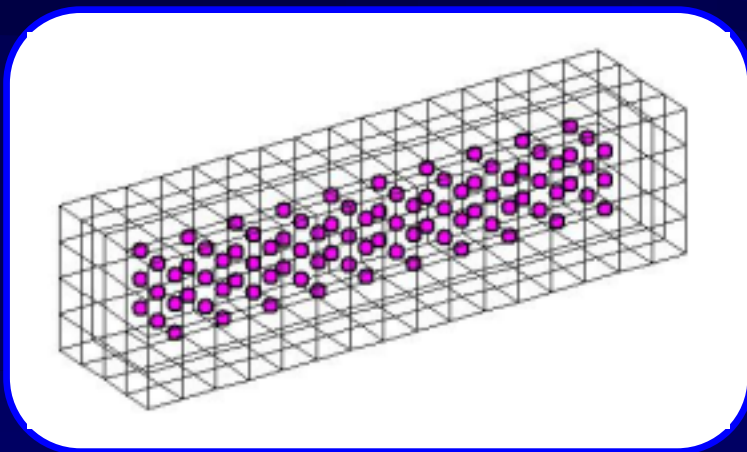
Pondération des deux systèmes

$$x \text{ minimise } \|Ax - b\| + \alpha \|Lx\|$$

Exemple numérique



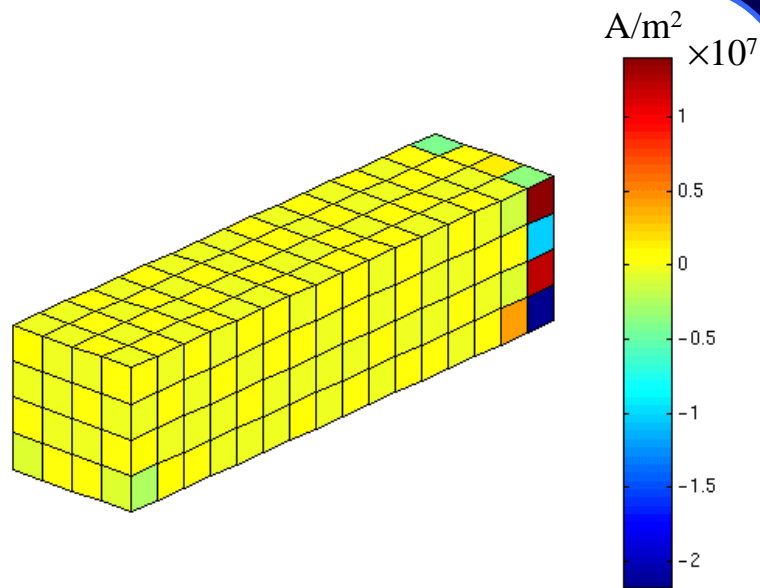
- ✓ Parallélépipède composé de tôles
- ✓ $\mu_r=1000$, $e=1$ mm, $B_r=0.005$ T
- ✓ $B_0 = 20\ 000$ nT



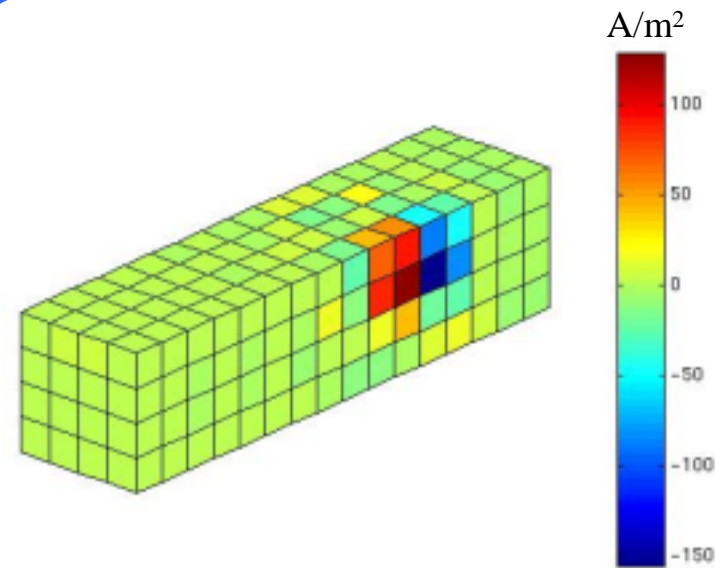
- ✓ 288 éléments surfaciques carrés
- ✓ 90 capteurs
- ✓ Mesures simulées par éléments finis

✓ Résolution du système

Conditionnement: 6.10^{18} → Problème mal posé



Inversion sans régularisation



Méthode de Tikhonov (ordre 0)

$\alpha = 10^{-6}$

Différentes tentatives d'inversion

**Inversion des modèles
en charges**

**Problème
mal posé**

**Régularisation
ordre 0
L simple**

**Problème
sous déterminé**

**Solution de norme
minimale souvent
physique**

**Réussite de l'approche
classique**

**Inversion des modèles
en dipôles
ex: modèle mixte**

**Problème
mal posé**

**Régularisation
ordre 1 nécessaire
L trop complexe**

**Problème
sous déterminé**

**Solution de norme
minimale non
physique**

**Echec de l'approche
classique**

**Nécessité de trouver une nouvelle
approche pour identifier l'aimantation**



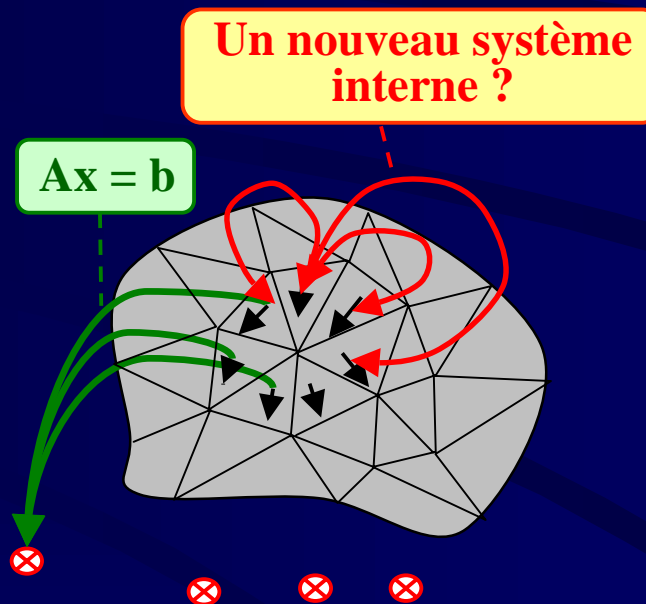
LEG

Vers une nouvelle approche



- ✓ **But: résoudre l'inversion du modèle mixte**
 - Représentatif de l'aimantation
 - Possibilité de rapprocher les capteurs de la tôle

- ✓ **Méthode: Contraindre la solution par un système interne**



- ✓ **Propriétés du système**
 - Doit prendre en compte le comportement physique du matériau

✓ **Modele de materiau**

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{B}_{rem}$$

✓ **L'aimantation induite en un point de la tôle est créée par**

- le champ inducteur \mathbf{H}_0
- l'aimantation induite de toute la tôle
- l'aimantation rémanente de toute la tôle

$$\mathbf{M}_{ind}^i = (\mu_r - 1) \left(\mathbf{H}_0 + \frac{e}{4\pi} \sum_j \int_{L_j} \mathbf{M}_{ind}^j \cdot \mathbf{n}_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} dL_j + \frac{e}{4\pi} \sum_j \int_{L_j} \mathbf{M}_{rem}^j \cdot \mathbf{n}_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} dL_j \right)$$

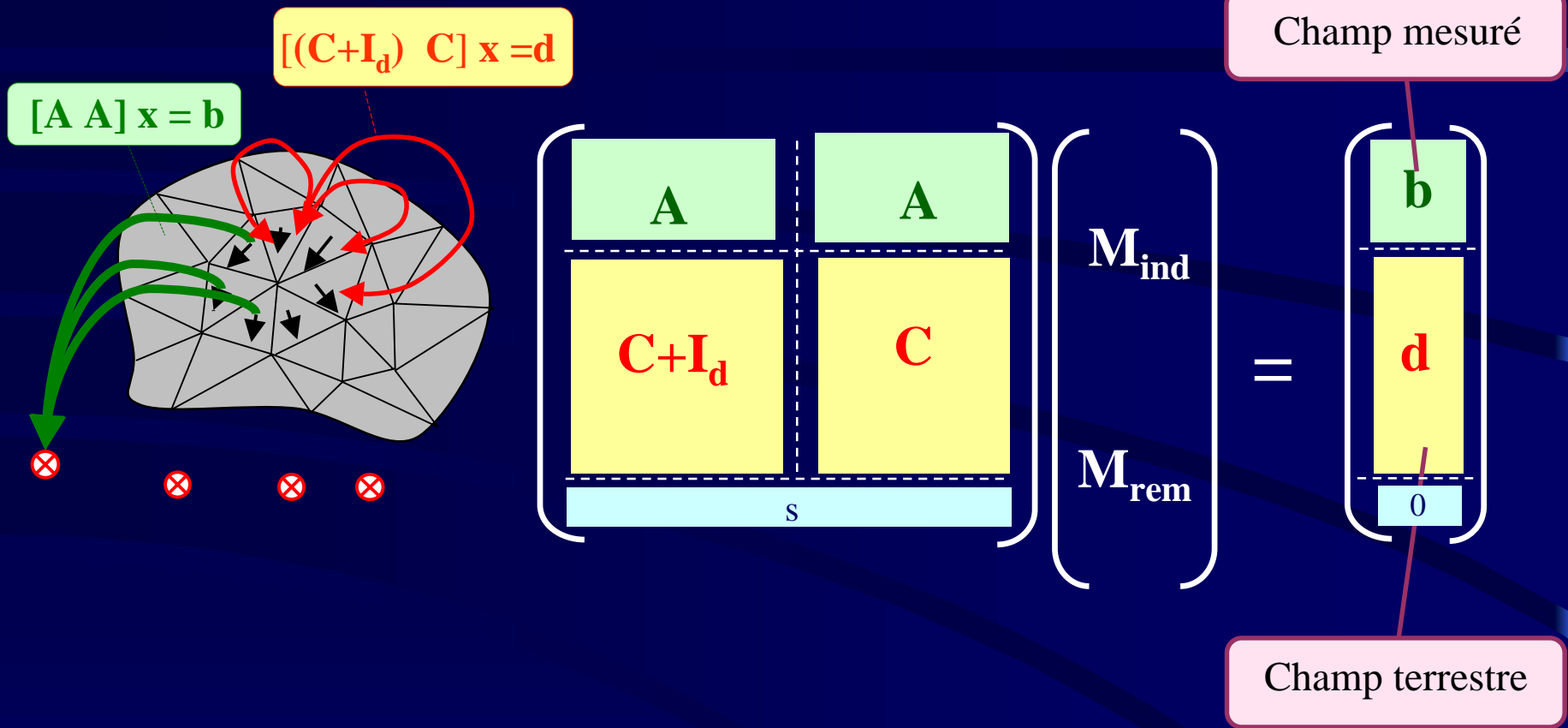
✓ **On applique cette équation sur chaque élément pour obtenir un système sous-déterminé**

2 × nombre
d'éléments

$$\left[\begin{array}{c} (\mathbf{C} + \mathbf{I}_d) \mathbf{C} \\ \mathbf{M}_{ind} \\ \mathbf{M}_{rem} \end{array} \right] = \mathbf{d}$$

4 × nombre d'éléments

Obtention d'un système global



- ✓ **Sans mesure, la résolution du système interne seul conduit à l'aimantation induite**
 - **Solution physique la plus vraisemblable**

- ✓ **Si le système est mal conditionné (nombre important de capteurs)**
 - **Une régularisation à l'ordre 0 conduit à une solution physique**

- ✓ **Si le système est bien conditionné (peu de capteurs)**
 - **Une inversion par SVD conduit à une solution physique**
 - **Le système est suffisamment contraint**
 - **Pas de choix de paramètre empirique**

- ✓ **Présentation de l'immunisation magnétique des navires**
- ✓ **Méthodes directes de calcul de l'aimantation induite**
- ✓ **Identification de l'aimantation totale**
- ✓ **Validations expérimentales**
- ✓ **Conclusions et perspectives**

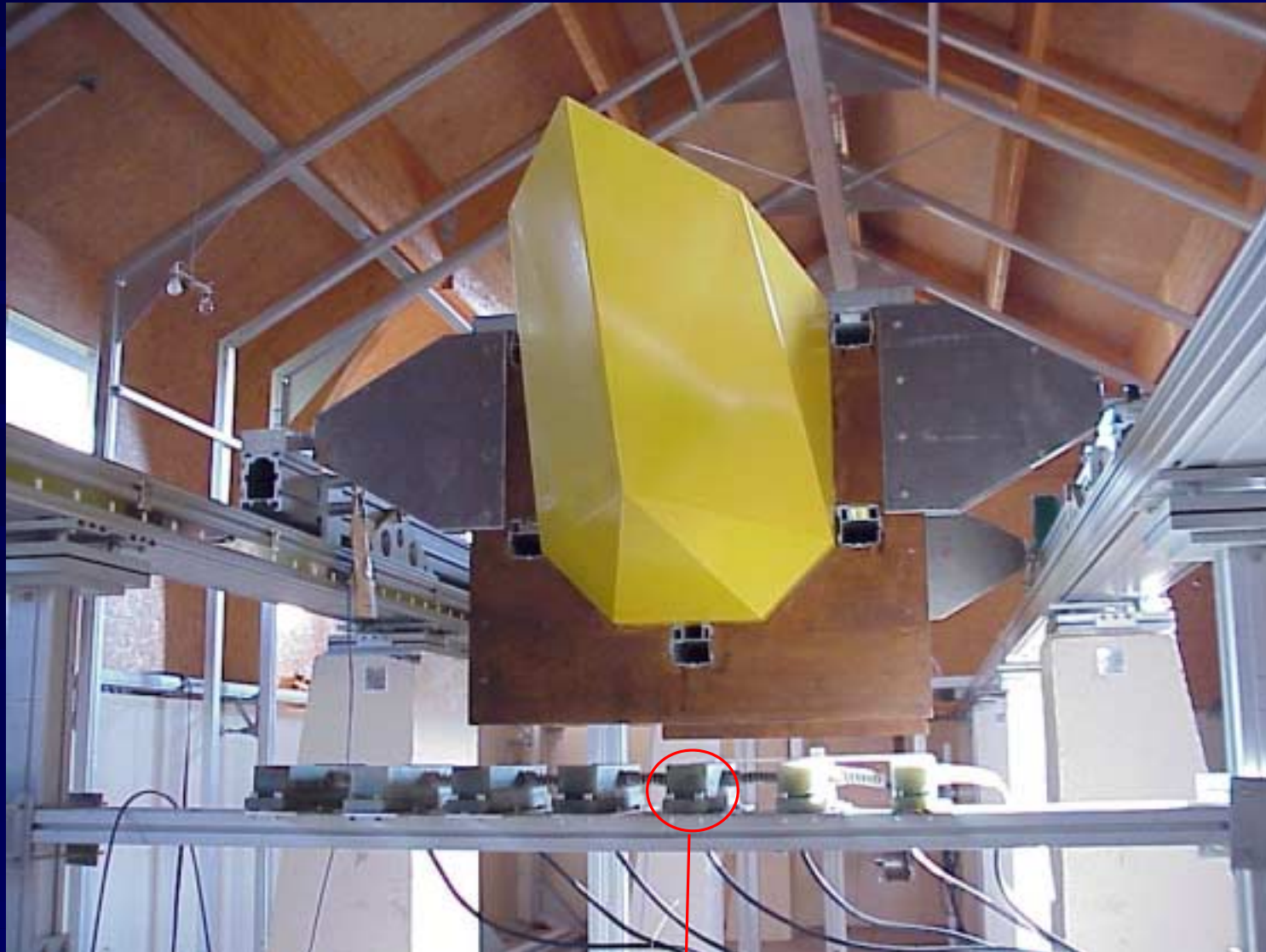


Maquette



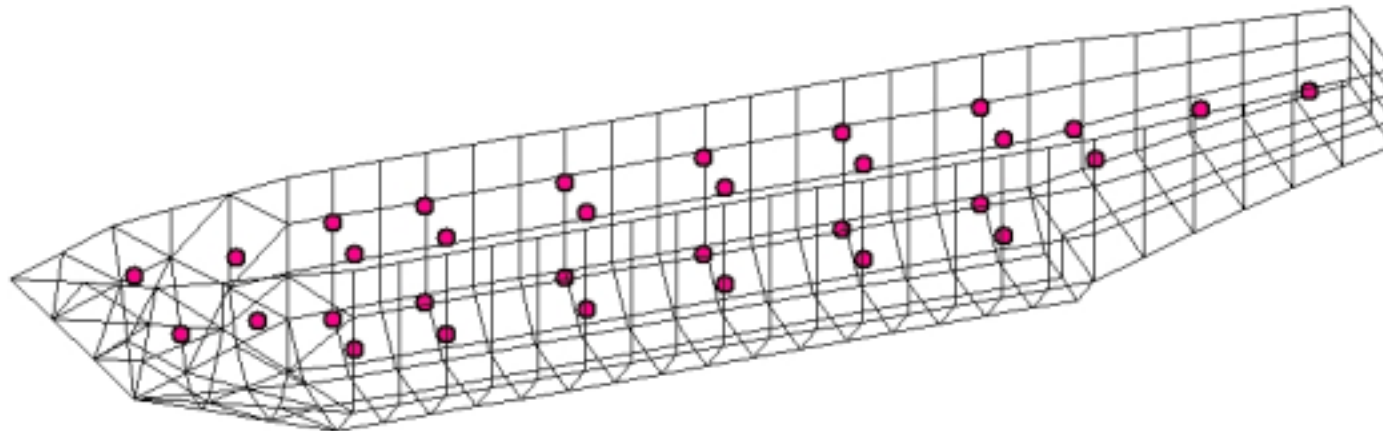


32 capteurs tri-axiaux fluxgates



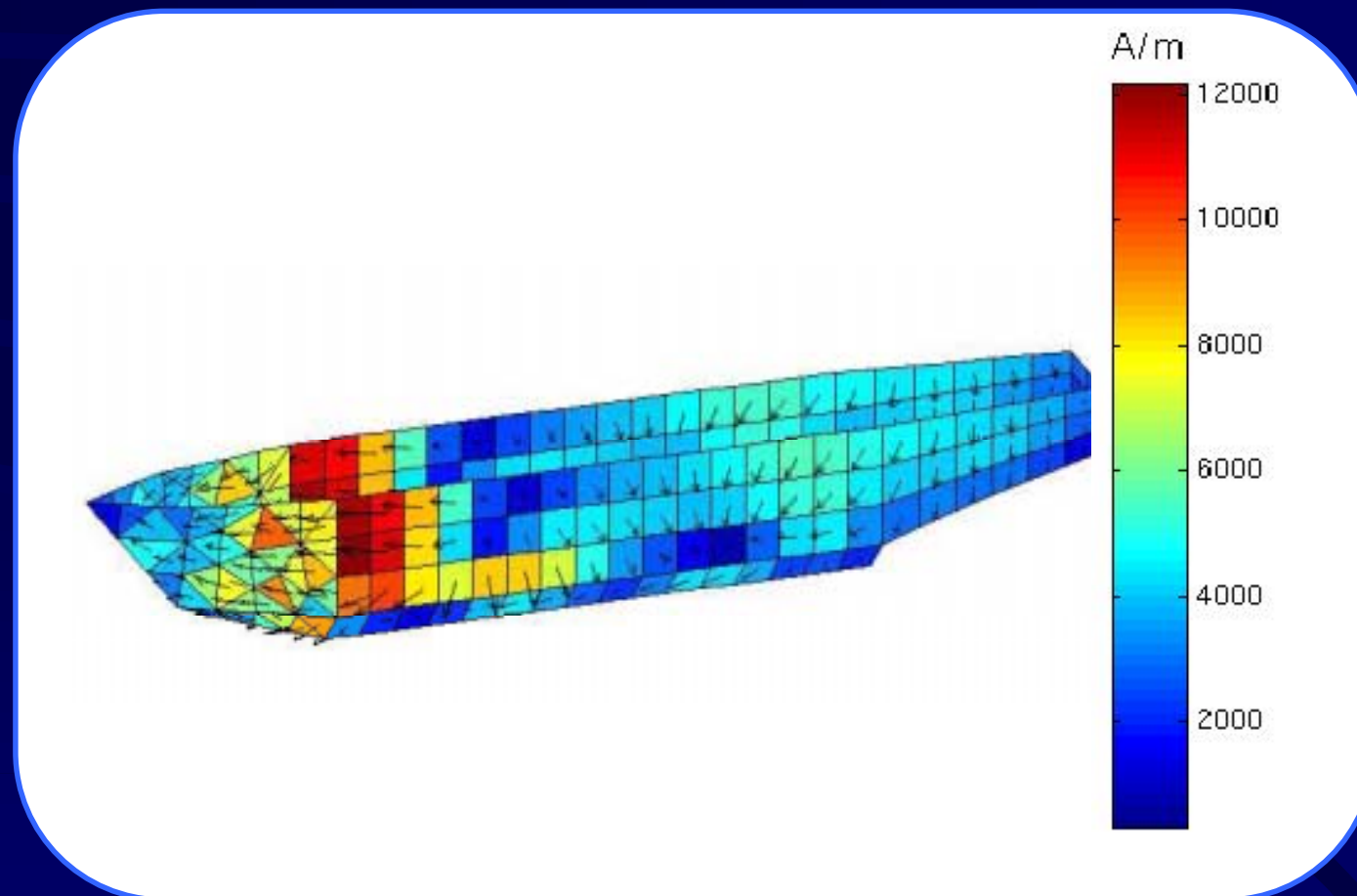
7 capteurs tri-axiaux fluxgates

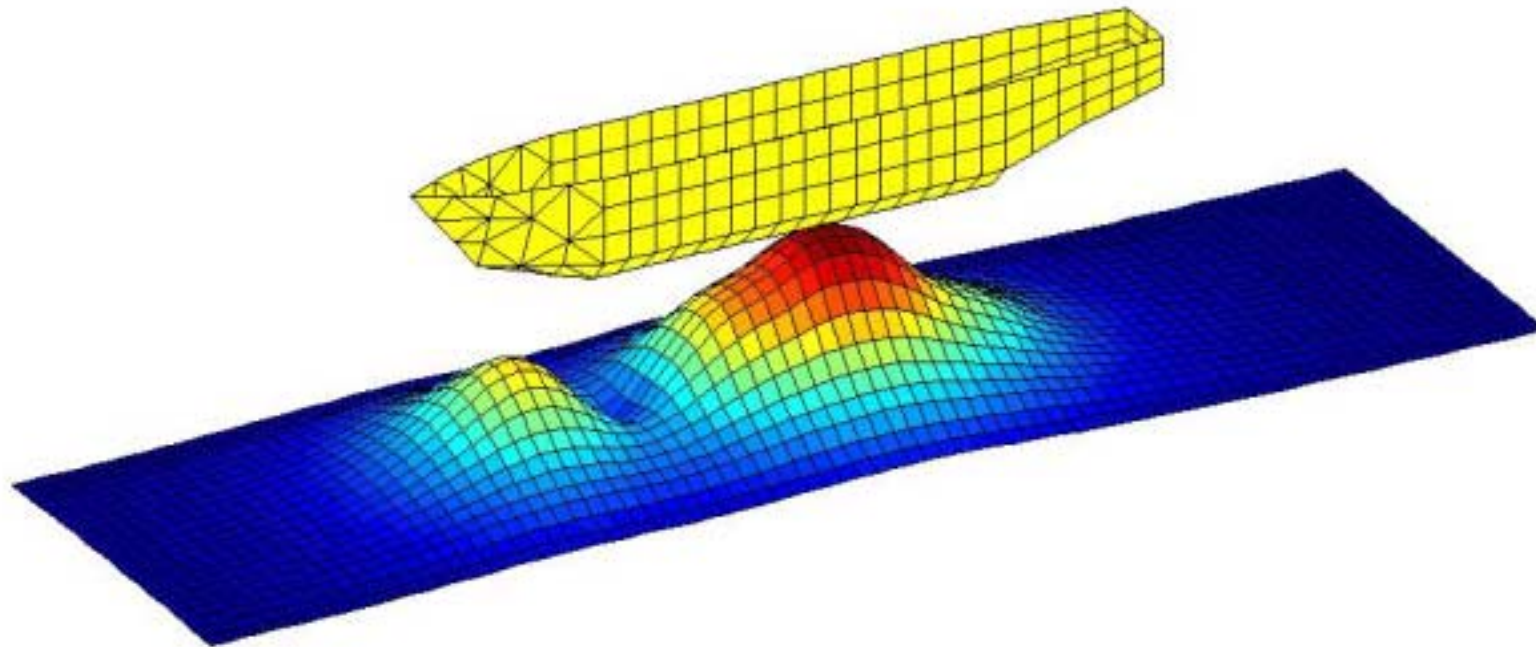
- ✓ Maillage de la maquette en 271 éléments / 32 capteurs fluxgate à l'intérieur



✓ Résolution du système

Conditionnement: **13,02** → Problème bien conditionné

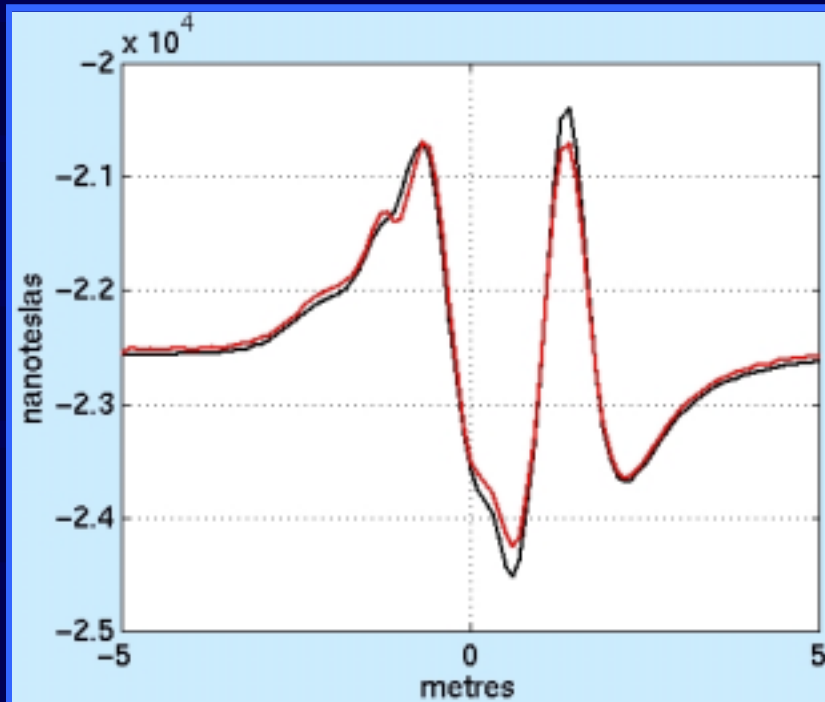




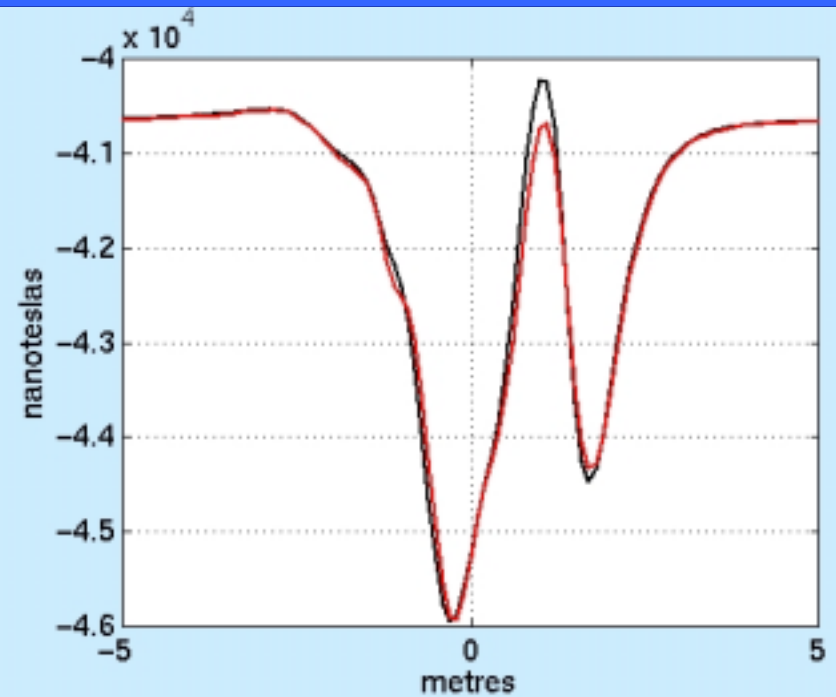
Module du champ à 30cm sous quille prédit par problème inverse

Comparaison champ reconstruit par problème inverse / champ mesuré

Composante longitudinale



Composante verticale



— Champ prédit par problème inverse sous quille
— Champ mesuré sur le capteur sous quille



LEG



- ✓ **Présentation de l'immunisation magnétique des navires**
- ✓ **Méthodes directes de calcul de l'aimantation induite**
- ✓ **Identification de l'aimantation totale**
- ✓ **Validations expérimentales**
- ✓ **Conclusions et perspectives**

- ✓ **L'algorithme proposé répond à l'objectif**
 - **Champs mesurés et champs prédits sont en bonne adéquation**
 - **L'algorithme permet d'identifier l'aimantation totale**

- ✓ **La nouveauté réside dans l'ajout d'un modèle de matériau adéquat**
 - **Le nombre de capteurs est peu important**
 - **Pas de choix empirique de paramètre de régularisation**

- ✓ **L'approche peut être utilisée**
 - **Pour des géométries « volumiques »**
 - **Pour d'autres méthodes numériques (éléments finis)**



Perspectives



- ✓ **Prendre en compte le système d'immunisation**
 - **Intégration du calcul des effets de boucle dans le modèle**

- ✓ **Bouclage du système**
 - **Temps réel**

- ✓ **Tester sur bâtiment réel**
 - **Mise au point du système à bord de « L ' Aventurière » ou autre**



MODELISATION DU CHAMP MAGNETIQUE INDUIT PAR DES TOLES

IDENTIFICATION DE L'AIMANTATION

**Application à l'immunisation en boucle fermée d'une coque
ferromagnétique**

Olivier CHADEBEC

Directeur de thèse : Jean-Louis COULOMB

Laboratoire de Magnétisme du Navire - Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

**Ce travail a été financé et suivi par le Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique
(GESMA - DGA)**

et mené en collaboration avec Thomson Marconi Sonar et Cedrat