Lorenzo Audibert

CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

R&D : CHIFFRES CLÉS

2 100 salariés
dont
370 docteurs
150 doctorants
200 chercheurs enseignants
des universités et grandes écoles

553 millions
d'euros de budget en 2014

70 % de l'activité en appui à la performance des métiers du Groupe

15 départements
(compétences, partenariats
et maîtrise d'œuvre)

14 laboratoires communs de recherche

Partenaire de 6 fonds de capital-risque
dans le domaine des technologies propres

10 centres de recherche
dont
3 En France
7 A l'international
(Allemagne,
Royaume-Uni,
Italie, Pologne,
Chine , USA,
Singapour)

30 % de l'activité pour anticiper et préparer l'avenir

LES PARTENAIRES stratégiques DE LA R&D

Une logique de co-développement et de partage de compétences

AMÉRIQUE

CANADA

Hydro Québec

ÉTATS-UNIS

MIT · EPRI Electric Power Research Institute · Massachusetts Institute of Technology · Columbia University

BRESIL

Eletrobras Cepel

- Partenaires académiques internationaux
- Partenaires industriels
- Associations

AUTRES FORMES DE RECHERCHE COLLABORATIVE

- **Projets européens**
- **KIC** (Communautés de la Connaissance et de l'Innovation) : Climat, Inno Energy
- **Associations industrielles européennes :** Nugénia, EASE, E2BA, SEDC, ETI
- **Plates-formes technologiques & Initiatives Industrielles Européennes :** CO2 émission, Réseaux Intelligents, Nucléaire, Sûreté Industrielle, Construction, Eolien
- **Energy European Research Alliance**

EUROPE

JRC European Commission

ALLEMAGNE

KIT Karlsruhe Institute of Technology · Fraunhofer

ITALIE

Politecnico di Milano · Alma Mater Studiorum Università di Bologna Campus di Forlì

POLOGNE

Consortium d'Universités Polonaises

SUISSE

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

NORVEGE

SINTEF

FRANCE

ANDRA · CEA · Ifremer · INRIA · Irstea · CNRS · IRSN · CSTB · ParisTech · ONEMA · Dauphine Université Paris · Schneider Electric · INERIS · INSA · Total · Supélec · Grenoble INP · ENS · HORIBA

ROYAUME-UNI

Imperial College London · Manchester 1824 · The University of Edinburgh · Energy Technologies Institute · University of Bristol · EPSRC Engineering and Physical Sciences Research Council · UCL · University of Strathclyde Glasgow · University of Oxford

ASIE

CHINE

Tsinghua University 1911 · 国家电网 State Grid · 中国电力科学研究院 · Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences

JAPON

KEPCO · TEPCO · CRIEPI · The Kansai Electric Power Co., Inc.

Exploration des nouveaux usages de l'électricité et de développement de solutions innovantes liées aux Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) :
La maison Multi énergies

EDF Lab les Renardières

Élaborer et intégrer des innovations majeures dans la conception et la réalisation des systèmes de contrôle-commande des centrales nucléaires :
CLUSTER CONNEXION

EDF Lab Chatou

Développer des algorithmes destinés à l'effacement des clients industriels : le laboratoire d' « agrégation de données pour l'effacement des clients industriels »,
AGILE

EDF Lab les Renardières

Détection, localisation et quantification de déplacements par capteurs à fibre optique

Edouard Buchoud, Valeriu Vrabie, Sylvain Blairon, Jérôme Mars

CReSTIC

eDF

gipsa-lab

eDF

- Introduction
- Etude de cas
- Amélioration du pas de mesure d’un capteur
- Quantification de déplacement
- Conclusions et perspectives

- **Introduction**
  - Contexte
  - Les capteurs à fibre optique
  - Objectifs de la thèse
- Etude de cas
- Amélioration du pas de mesure d’un capteur
- Quantification de déplacement
- Conclusions et perspectives

Suivi de la santé des structures

Parc d'ouvrages génie civil d'EDF en France

Bâtiments nucléaires

Digue / Canal

Barrage

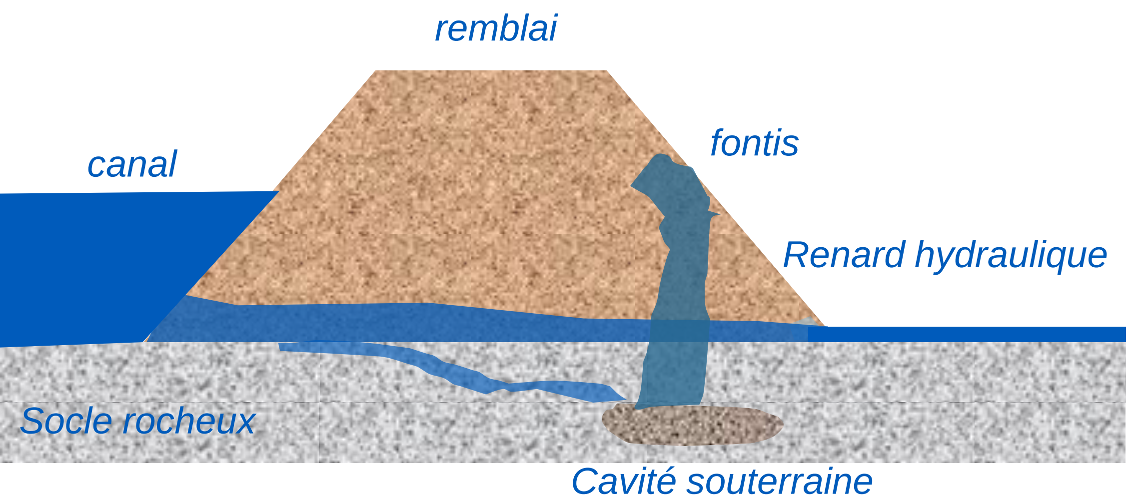
Objectifs

- Exploiter de manière sûre les ouvrages

- Optimiser la maintenance

Suivi de la santé des structures

Les défauts pathologiques à identifier



Moyens d'auscultations

Inspections visuelles

Grandeurs physiques internes :

Température, pression, déformation :

$\varepsilon = \Delta L / L_0$ (µm/m)

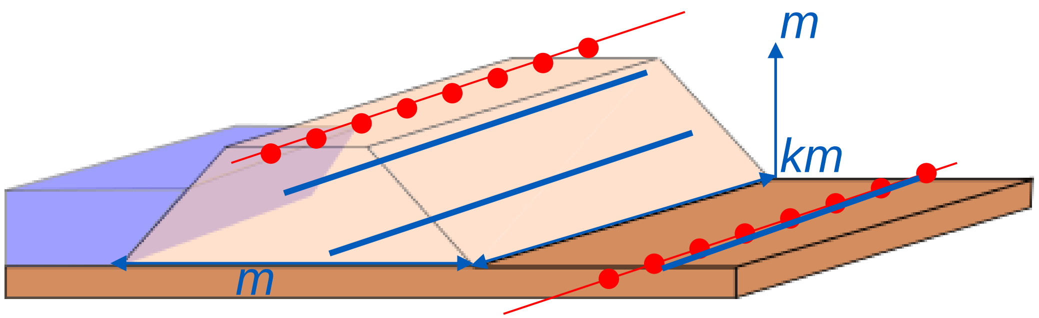
Besoin exprimé par les Maîtres d'Ouvrages

Défauts	Taille caractéristique	Déplacements
Renard / fontis	De 5 cm à 5 m	De 0,1 mm à 10 cm

Suivi de la santé des structures

Les moyens de surveillance des ouvrages hydrauliques en terre

Relevé topographique

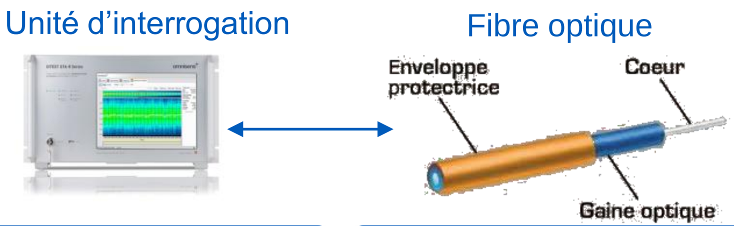


Contrainte

Ouvrages grands linéaires (km)

Solution

Réseau de capteurs



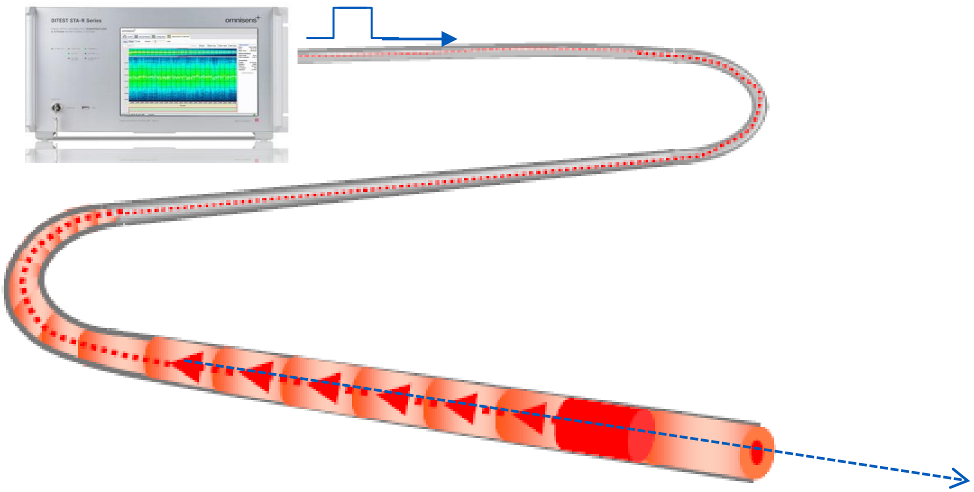
Capteurs à fibres optiques

- mesure la $\varepsilon - T$
- 1 point de mesure tous les mètres sur plusieurs km

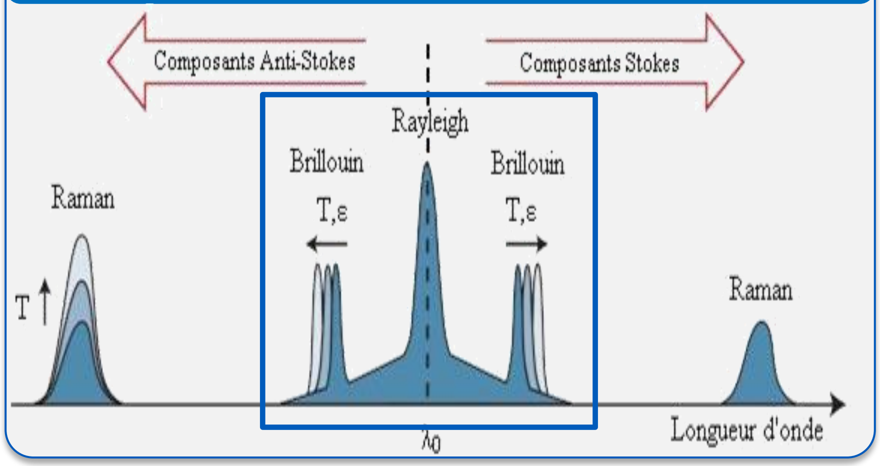
Avantages liés à la fibre optique

- Multiplexage
- Insensible EM, faible taille
- Faible coût par point de mesure

Principe de mesure d'un capteur réparti

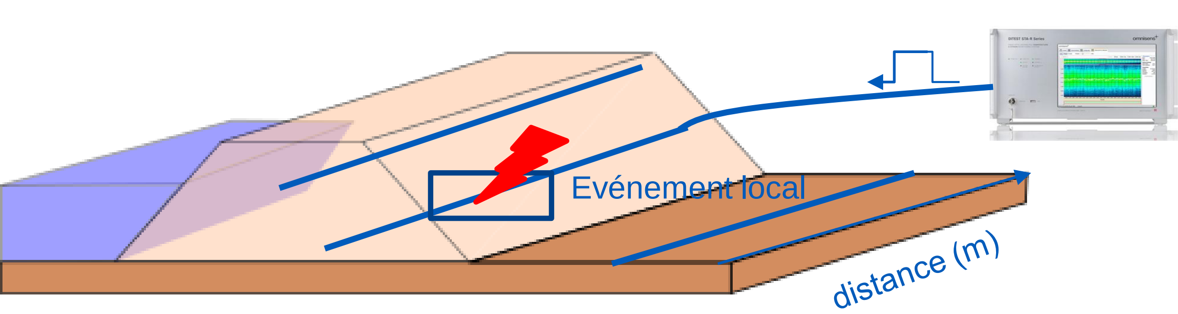


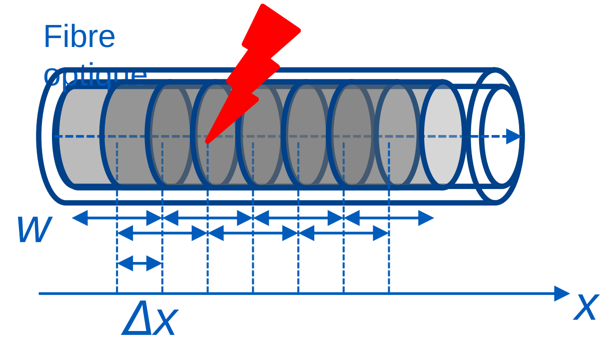
Spectre de diffusion de la lumière



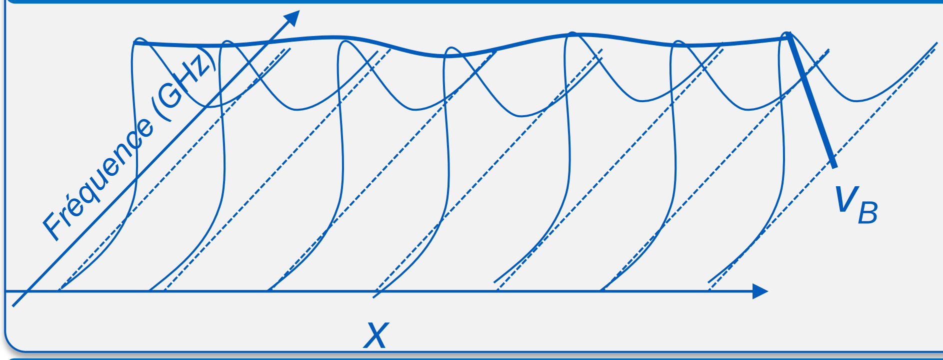
Phénomène de diffusion	Base de mesure *(w)*	Portée de l'appareil
Rayleigh	1 cm	< 70 m
Brillouin	1 m	> 25 km

Mesure d'un capteur réparti Brillouin

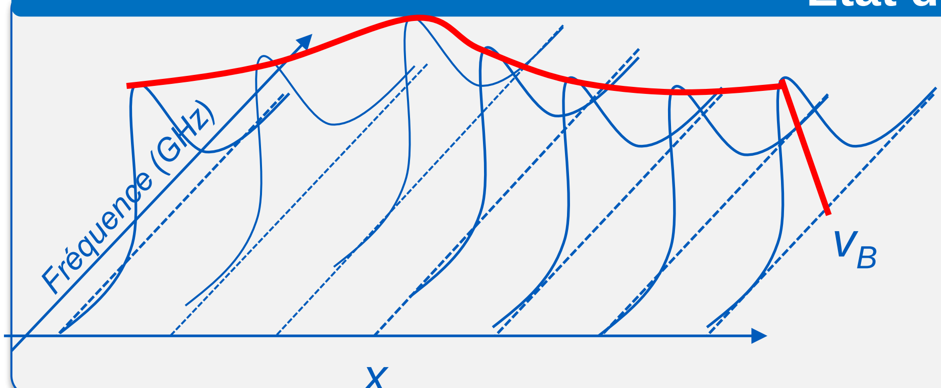


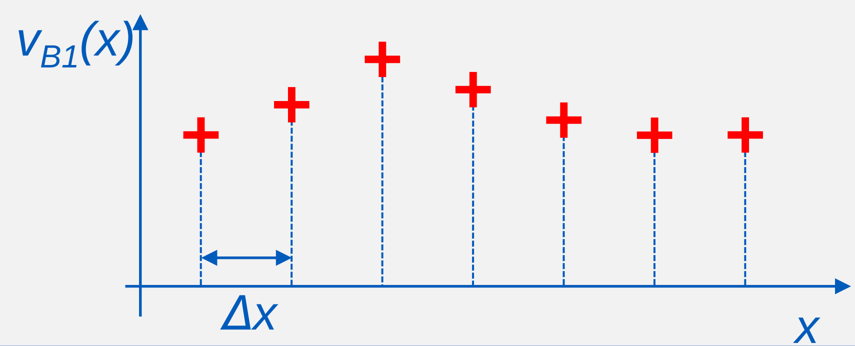


Etat initial

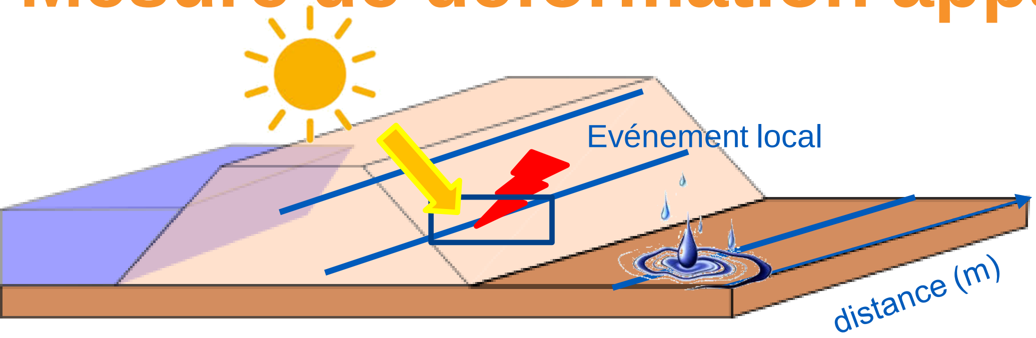


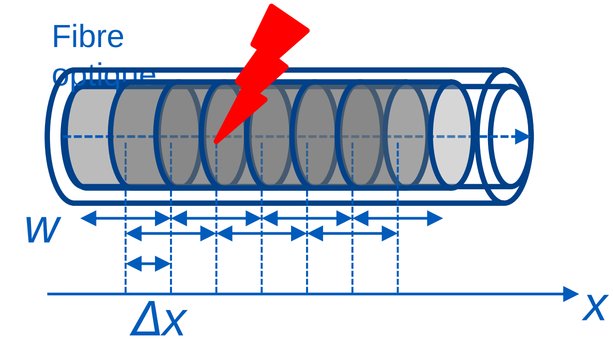
Etat déformé





Mesure de déformation apparente





Dépendance de la fréquence Brillouin

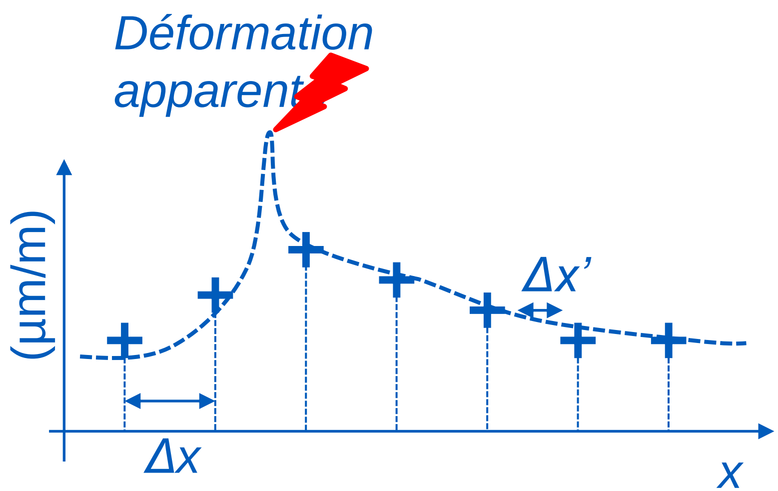
$$\nu_{B1}(x)=\nu_{B0}(x)+C_T.\Delta T_{0\to1}(x)+C_\varepsilon.\varepsilon_{0\to1}(x)$$

Coefficient de calibrage C_ε = 0.05 MHz/με et C_T = 1 MHz/°C (1550 nm, FO standard)

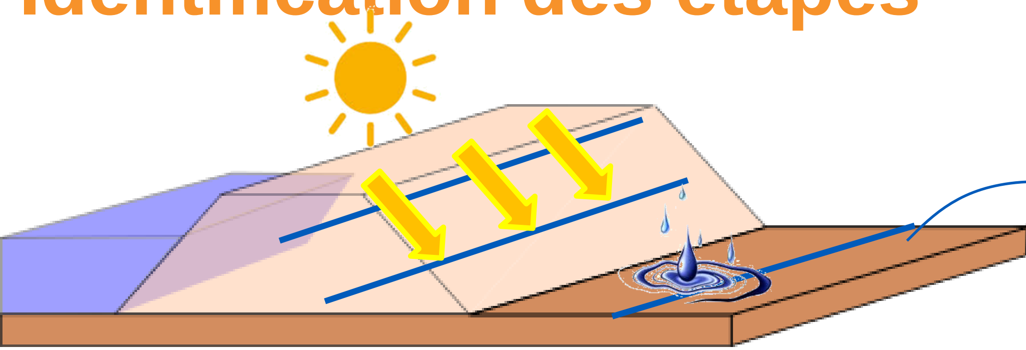
Déformation apparente (µm/m)

$$\varepsilon'_{0\to1}(x)=\frac{\nu_{B1}(x)-\nu_{B0}(x)}{C_\varepsilon}$$

Bao *et al.*, 1995



Identification des étapes



Données de l'interrogateur

Modélisation de la chaîne de mesure

Amélioration du pas de mesure

Séparation T / déformation

Profil de déformation avec $\Delta x'$ = 5 cm

Identification / détection / localisation signatures de déformation

Relation déformation / déplacement

Quantification de déplacements

Quantifier un déplacement de 0,1 mm

- Introduction

- **Etude de cas : création de fontis**
  - Apparition d’un tassement vertical
  - Influence de la chaine de mesure

- Amélioration du pas de mesure d’un capteur

- Quantification de déplacement

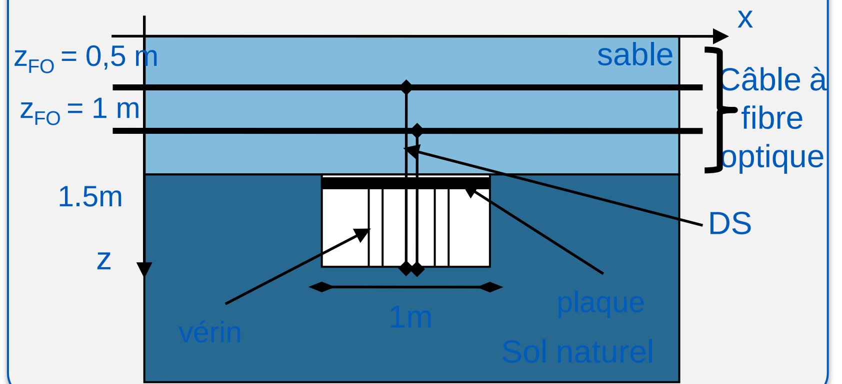
- Conclusions et perspectives

Présentation de l’expérience

Objectifs

- Créer de manière contrôlée une cavité souterraine
- Identifier une signature en déformation typique d’un tassement vertical
- Quantifier le tassement vertical

Création de cavité souterraine



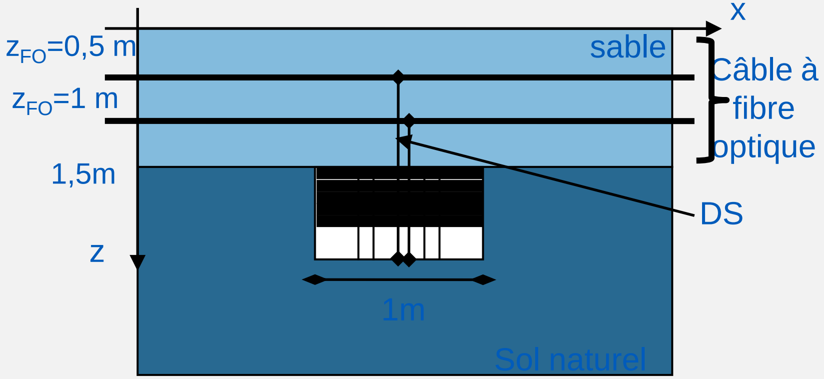
Instrumentation

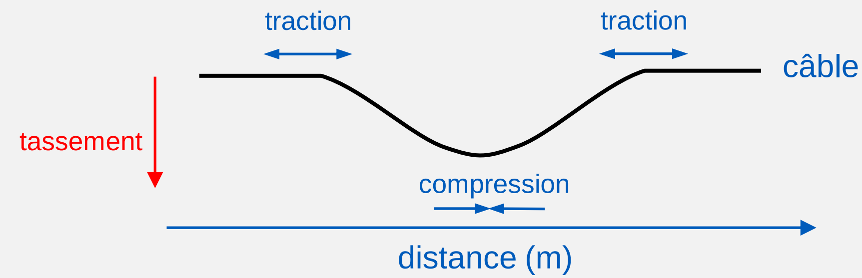
- 3 câbles industriels notés de A – C
- 2 interrogateurs : Rayleigh (cm) et Brillouin (m)
- 2 capteurs ponctuels de déplacements de références (DS)
- 7 abaissements de la plaque de 0,2 mm à 2,9 cm

Blairon *et al.*, 2011

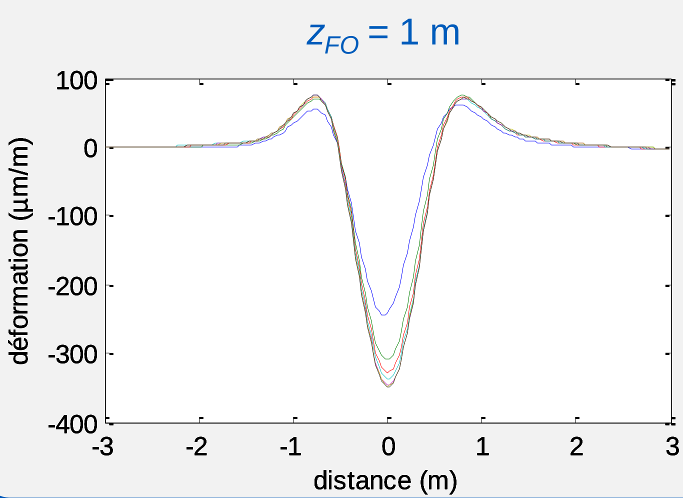
Signature en déformation d'un tassement vertical

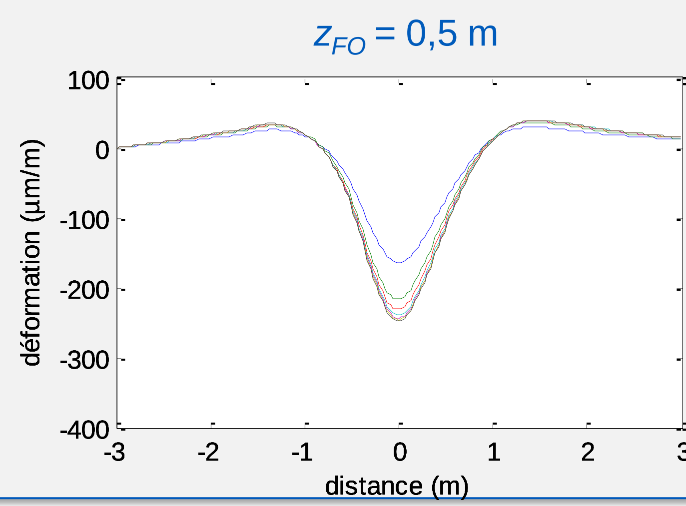
Signature d'un tassement





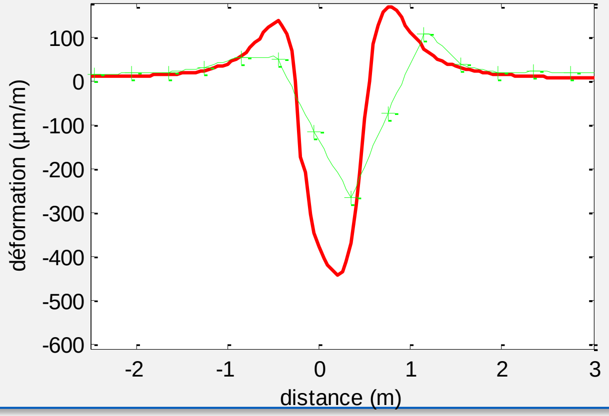
Mesure de déformation de référence : profil Rayleigh





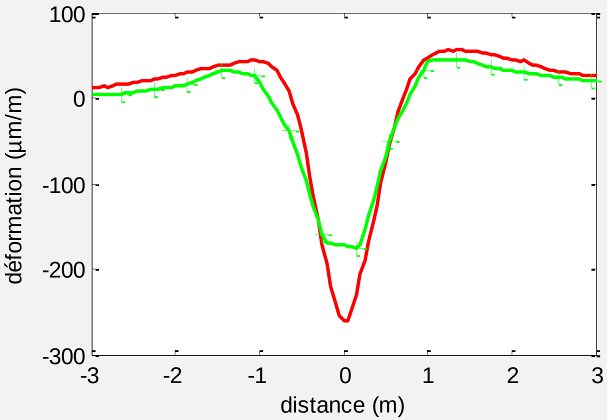
Influence de la chaine de mesure

Interrogateurs



Rayleigh : 3 cm

Brillouin : 40 cm



Influence de la chaine de mesure

Explication - Formulation

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{str}(\boldsymbol{x}) \otimes FTM_{cable}(\boldsymbol{x}) \otimes \Pi_{\text{interrogateur}}(\boldsymbol{x})$$

Déformation dans la fibre optique fournie par le capteur

Déformation subie par la structure

Fonction de transfert mécanique du câble

Influence de la base de mesure de l'interrogateur

Hénault *et al.*, 2012

Problématiques

- Reconstruire le profil de fréquence Brillouin avec un pas de mesure centimétrique
- Définir une relation entre la déformation et les déplacements dans la structure

- Introduction

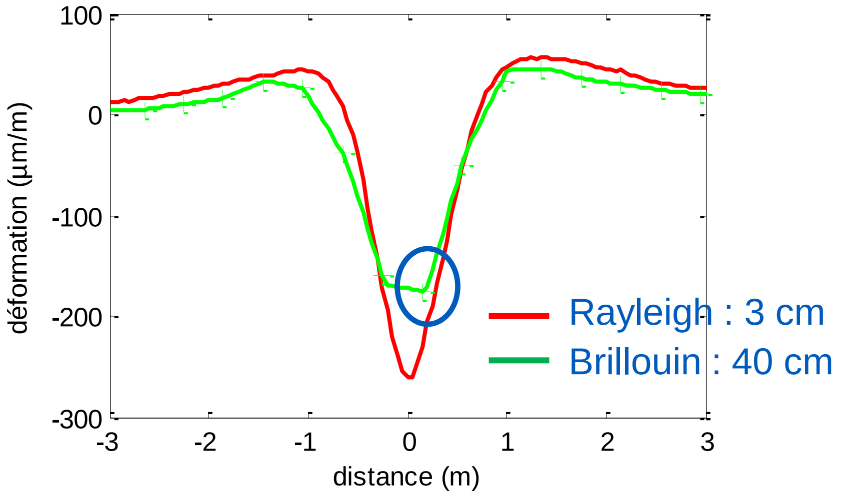
- Etude de cas : création de fontis

- **L’amélioration du pas de mesure d’un capteur**
  - Modélisation de la chaîne de mesure
  - Méthode de reconstruction du profil

- La quantification de déplacement

- Conclusions et perspectives

Phénomène de distorsion

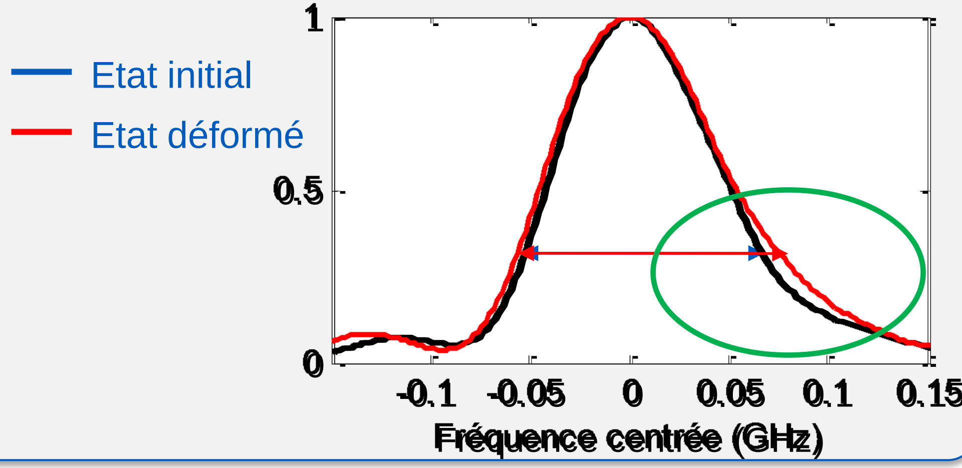


Etat de l'art

Une déformation importante dans la base de mesure *w* implique une distorsion du spectre Brillouin

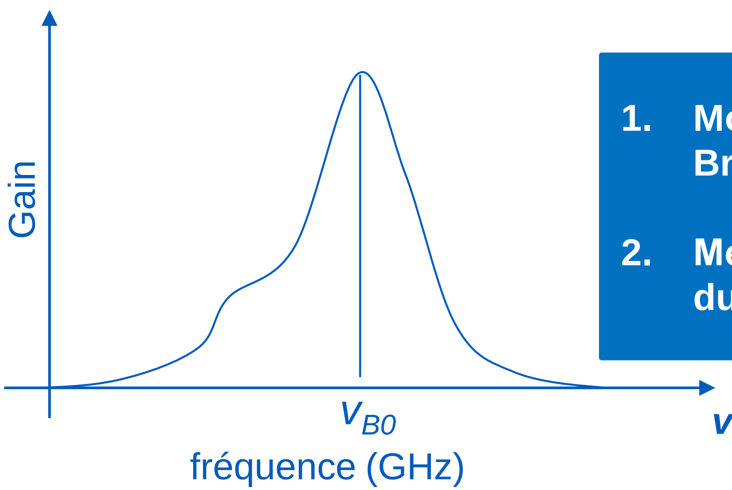
Ravet *et al.*, 2007

Spectres Brillouin

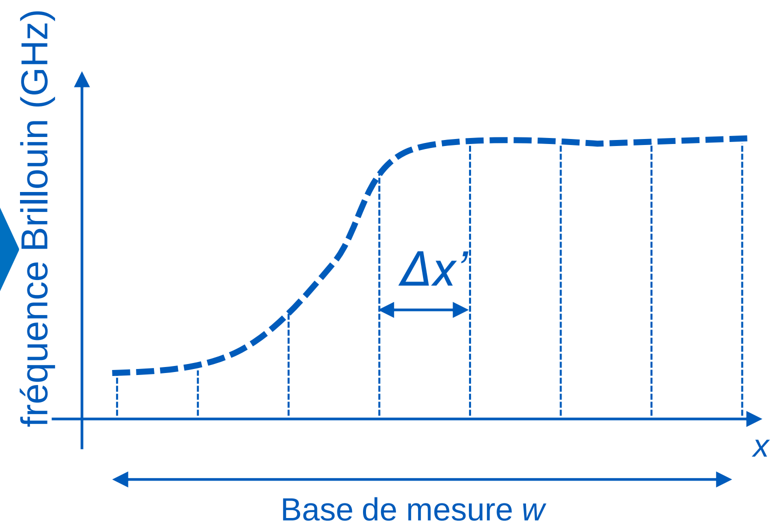


Les solutions existantes

Solutions	Performances	Inconvénients
Principes de mesures différents	1 cm 25 km	€€€
Post-traitement	Amélioration de la résolution spatiale	Paramètres avancés non fournis



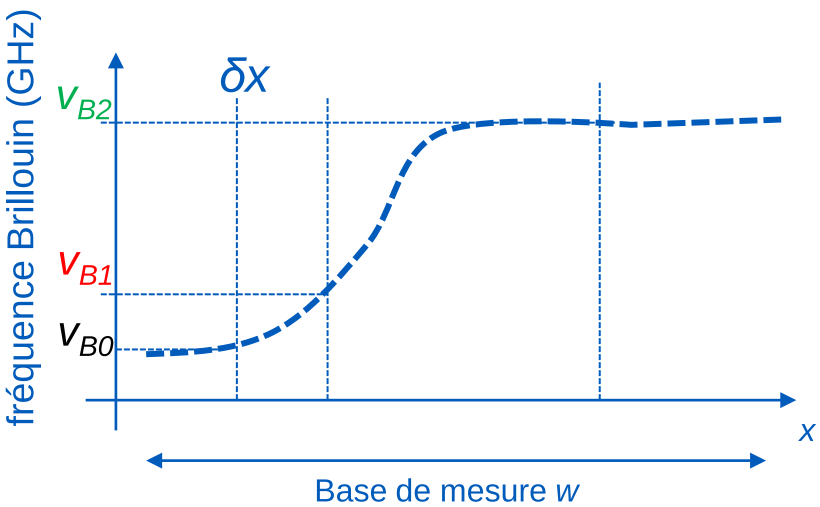
1. **Modéliser le spectre Brillouin**
2. **Méthode d'estimation du profil**



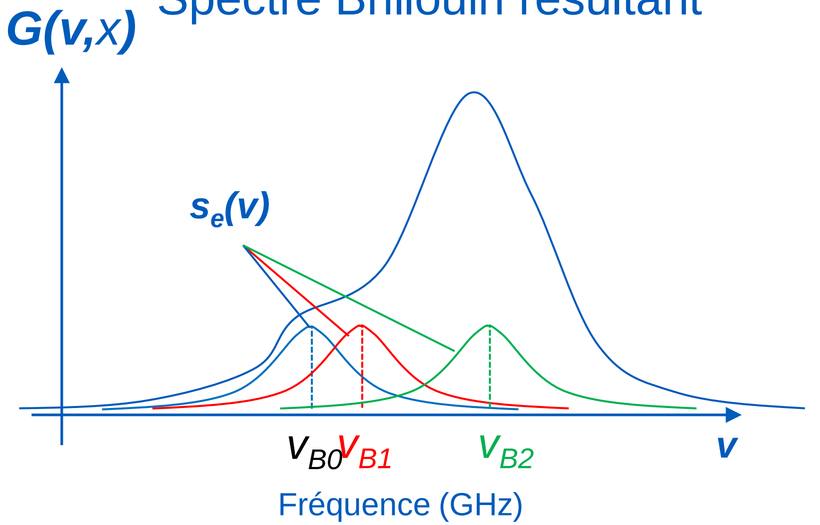
Ravet *et al.*, 2009
Yamauchi *et al.*, 2013

Modélisation de la chaine de mesure

Profil de fréquence Brillouin $v_B(x)$ au sein de w



Spectre Brillouin résultant



Mesure du spectre Brillouin sur *w*

Moyenne des spectre élémentaires sur chaque w :

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x}) \cong \int_{x-w/2}^{x+w/2} s_e\big(v - v_B(\zeta)\big).\,d\zeta$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{x}) \cong W *_x \big(s_e *_v\ f(v_B, x)\big) = SW(v_B)$$

Hypothèses

Sur $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{v_B}$ est continu

La forme du spectre $\boldsymbol{s_e(v)}$ est connue

Modèle de la chaîne de mesure

Données d'entrée

Paramètres d'acquisition : *w, Δx , L*

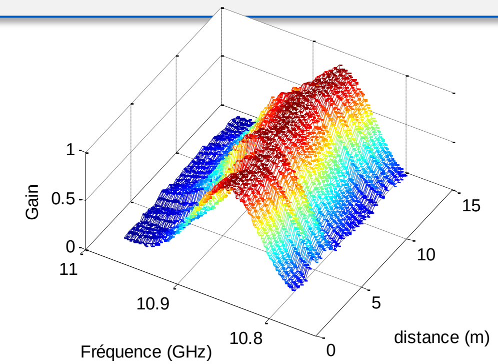
Forme du spectre élémentaire : $s_e(\nu)$

Estimation du profil de fréquences Brillouin : $\nu_B(x)$

Modèle

Données de sorties

Spectres Brillouin $G(\nu,x)$



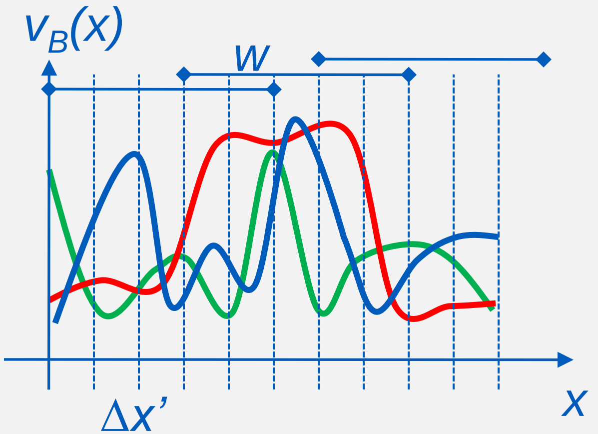
Inversion modèle direct

Inversion

Méthode

Problème direct $\boldsymbol{G = SW(v_B) + \epsilon}$

Fonction de coût $\boldsymbol{J(v_B) = \|G - SW(v_B)\|^2}$



- Paramétrisation de v_B **avec *Δx'* choisi**
- Problème mal posé car plusieurs solutions possibles

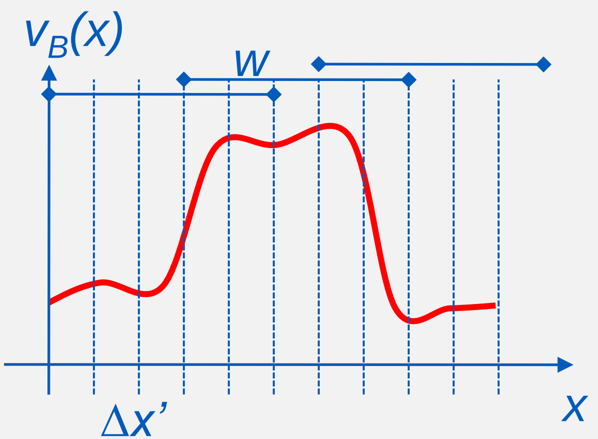
Tikhonov, 1963

Régularisation

- Hypothèse : le profil ***$v_B(x)$*** est continu

Fonction de coût $\boldsymbol{C(v_B) = J(v_B) + \lambda . \phi\ (v_B)}$

$$\text{Avec } \boldsymbol{\phi\ (v_B)} = \left\| \frac{\partial v_B}{\partial x} \right\|_2^2$$



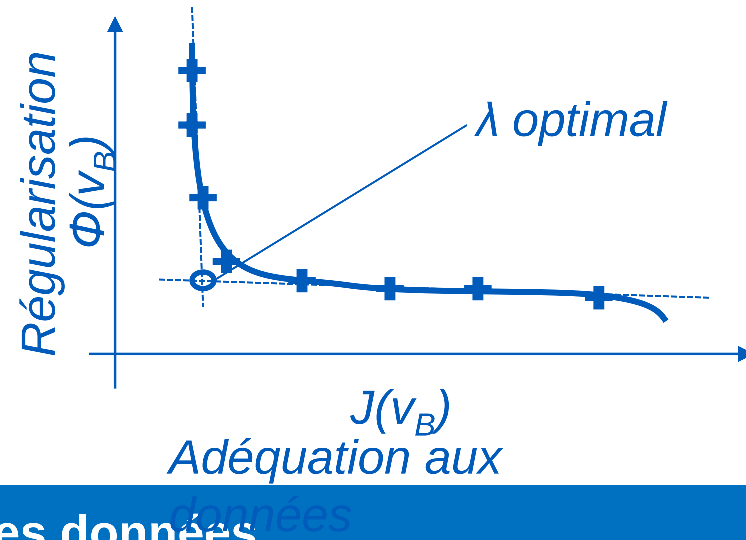
- *λ*, le coefficient de régularisation à déterminer

Lawson & Hanson, 1995

Choix du coefficient de régularisation

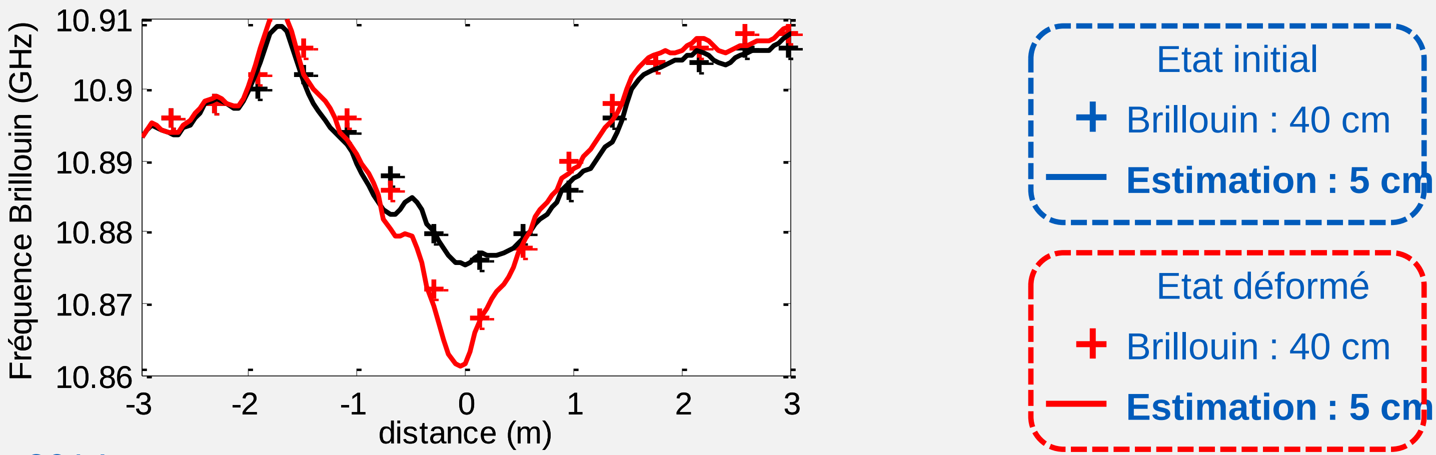
Méthode empirique

- Définition de bornes
- Intervalle régulier
- Obtention du λ optimal pour $\boldsymbol{\Delta x'}$ donné



Application sur les données

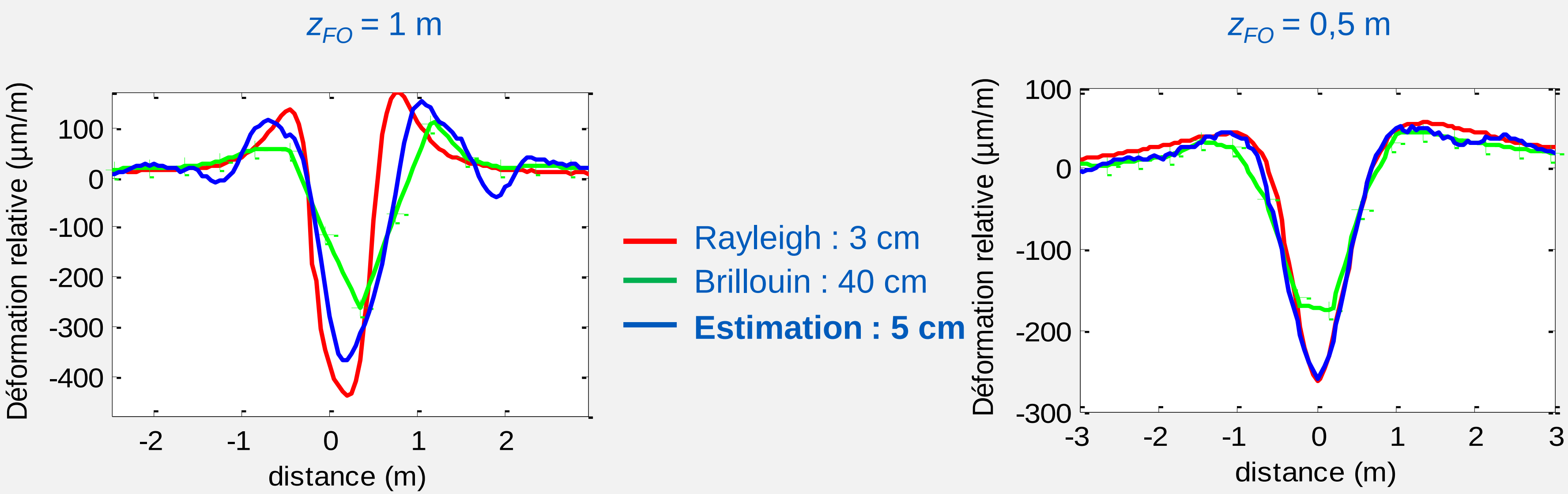
Nouveau pas de mesure $\boldsymbol{\Delta x'}$ **= 5 cm**



Buchoud *et al.*, 2014

Application sur le cas d'étude

Estimation de la déformation aux différentes hauteurs



Buchoud *et al.*, 2014

Conclusion sur l'amélioration du pas de mesure

Méthodes

- Proposition d'un modèle de la chaine d'acquisition
- Adaptation des méthodes de séparation de sources
- Développement des algorithmes de reconstruction de profil

Données simulées

- Comparaison des différentes méthodes
- Etude de l'influence des paramètres importants

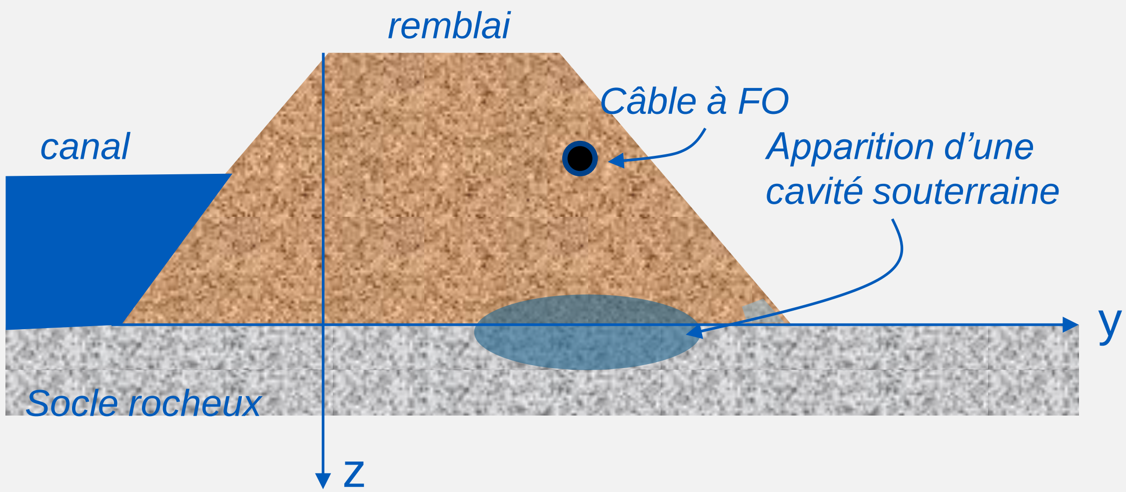
Données réelles

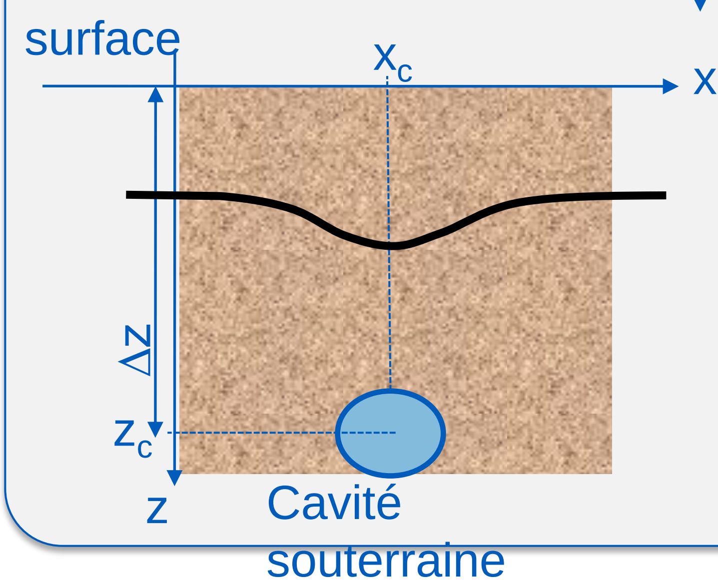
- **Diminuer le pas de mesure d'un facteur 8 : de 40 cm à 5 cm**
- **Améliorer la résolution en déformation**

- Introduction
- Etude de cas
- Amélioration du pas de mesure d’un capteur
- **Quantification de tassements verticaux**
  - Problématique
  - Relation entre la déformation et le déplacement
  - Procédé de quantification de déplacements
- Conclusions et perspectives

Objectifs

Problématique





Objectifs

- Relier la signature de la déformation avec le déplacement
- Estimer la profondeur de la cavité
- Quantifier un tassement vertical de l'ordre du mm

Méthode

Problématique

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{FO}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{str}(\boldsymbol{x}) \otimes FTM_{cable}(\boldsymbol{x}) \otimes \cancel{\Pi_{\text{interrogateur}}}(\boldsymbol{x})$$

Hypothèse : définition d'un système équivalent câble / sol

Mesure de déformation longitudinale $\varepsilon_{FO}(x)$

Déplacements verticaux $u_z(x)$

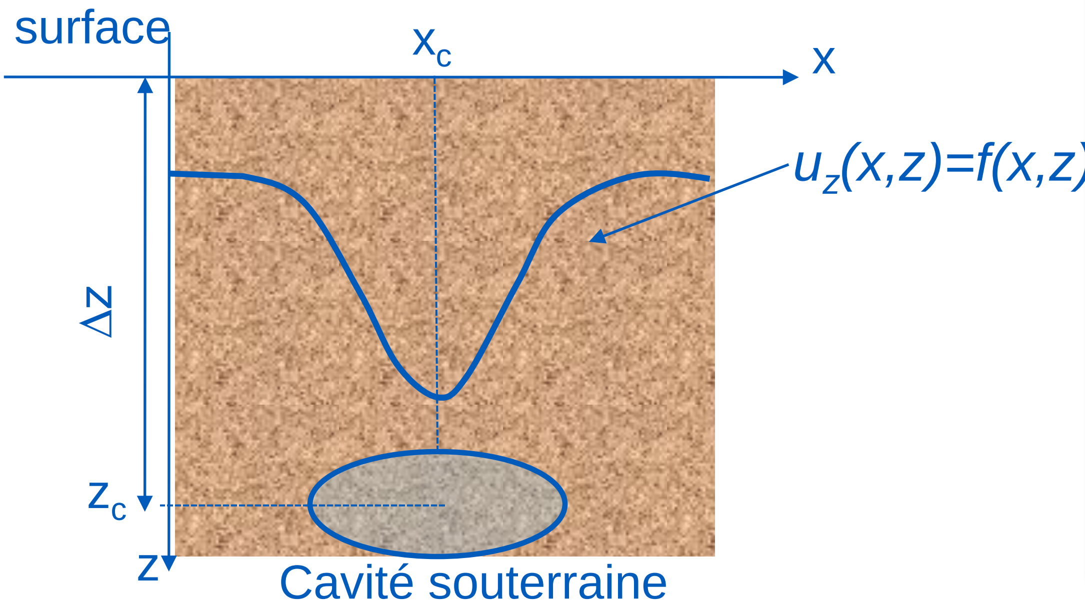
Solution

Déplacements longitudinaux $u_x(x)$

$$\varepsilon_{FO}(x) = \frac{\partial u_x(x,z)}{\partial x}$$

Modèle analytique
Modèle empirique

Lien entre les composantes du déplacement



Relation entre déplacement vertical et longitudinal

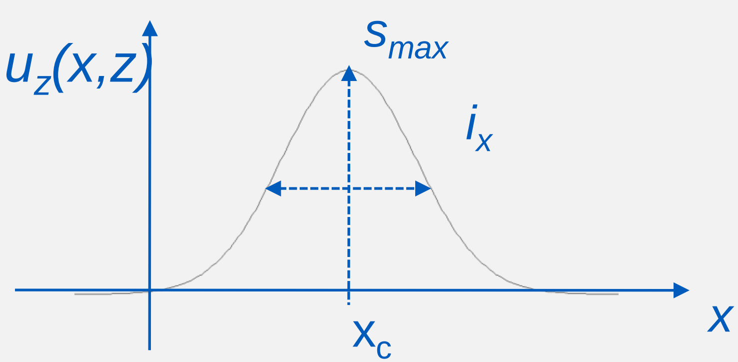
$$u_x(x,z) = -\frac{n.x}{\Delta z}.u_z(x,z)$$

$$u_z(x,z) = f(x,z)$$

f : modèle mathématique
n : lié aux propriétés du système câble / sol
Δz : distance cavité / surface

Mair *et al.*, 1993

Les paramètres importants des modèles empiriques

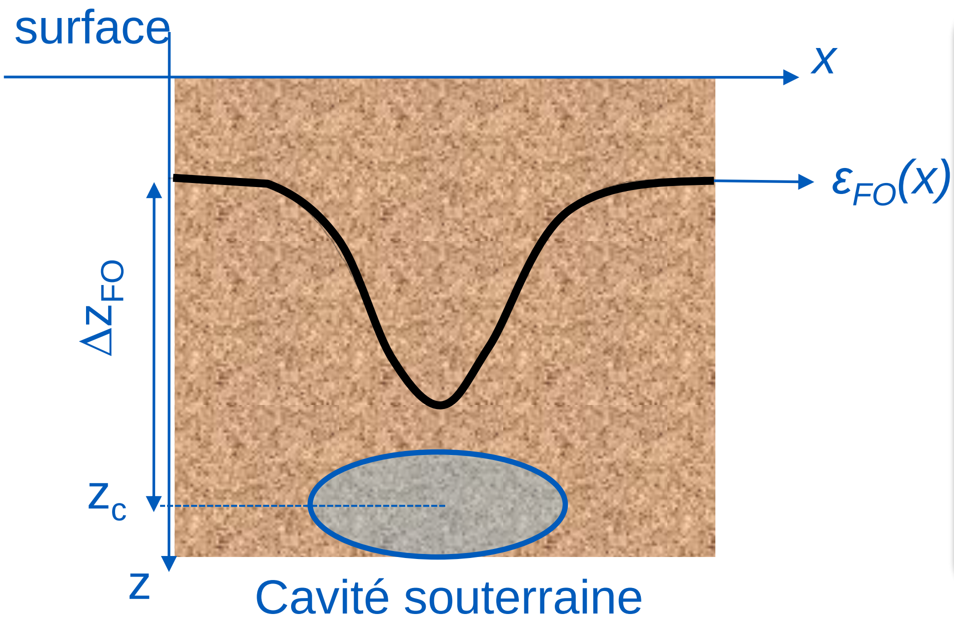


f : type gaussien

$\boldsymbol{s_{max}}$: tassement vertical maximal

$\boldsymbol{i_x}$: la largeur du profil au point d'inflexion

Lien entre la déformation et le tassement vertical



Relation entre déplacement vertical et longitudinal

$$\tilde{\varepsilon}_{FO}(x, z_{FO}) = \boxed{-\frac{n.\, s_{max}\,(z_{FO})}{\Delta z_{FO}}}\, g(x, z_{FO})$$

g : dérivée partielle de $x.u_z(x,z)$
n : lié aux propriétés du sol / câble
s_{max} : tassement vertical maximal
Δz_{FO} : distance cavité / câble à FO

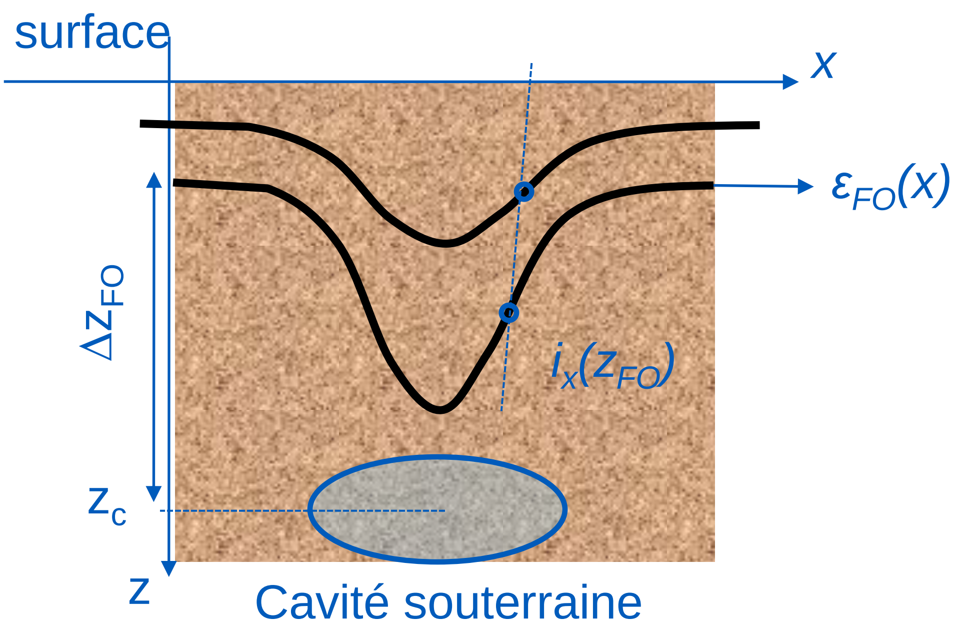
Optimisation des paramètres

Quelque soit la fonction *g*,

$$\{n, s_{max}, \Delta z_{FO}, i_x(z_{FO})\}^* = \boldsymbol{argmin}(\|\tilde{\varepsilon}_{FO}(x, z_{FO}) - \varepsilon_{FO}(x, z_{FO})\|^2)$$

Klar *et al.*, 2014

Lien entre la déformation et le tassement vertical



$$i_x(z_{FO}) = \alpha . z_c + \beta . (z_c - z_{FO})$$

$$z_c = \frac{i_x(z_{FO}) + \beta . z_{FO}}{\alpha + \beta}$$

Conditions d'application

N ≥ 2 profondeurs d'observations

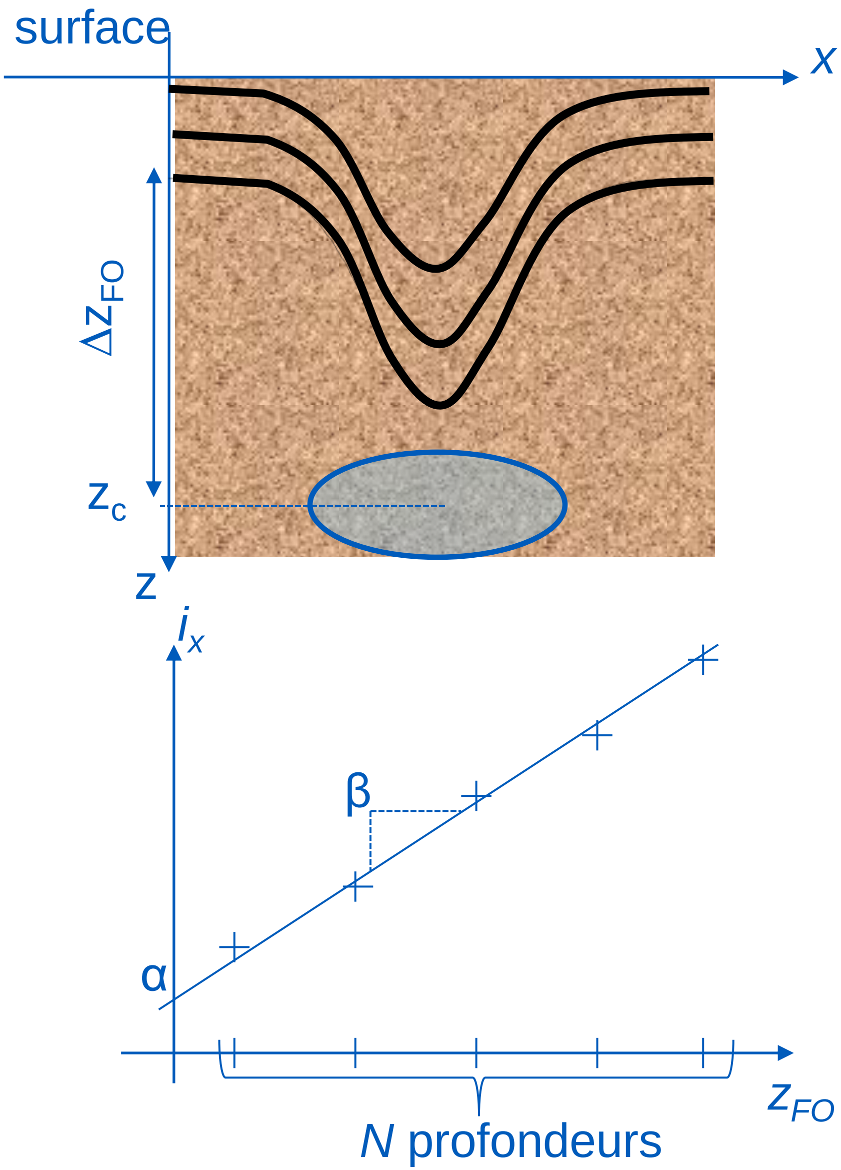
Paramètre lié au sol / câble *n*

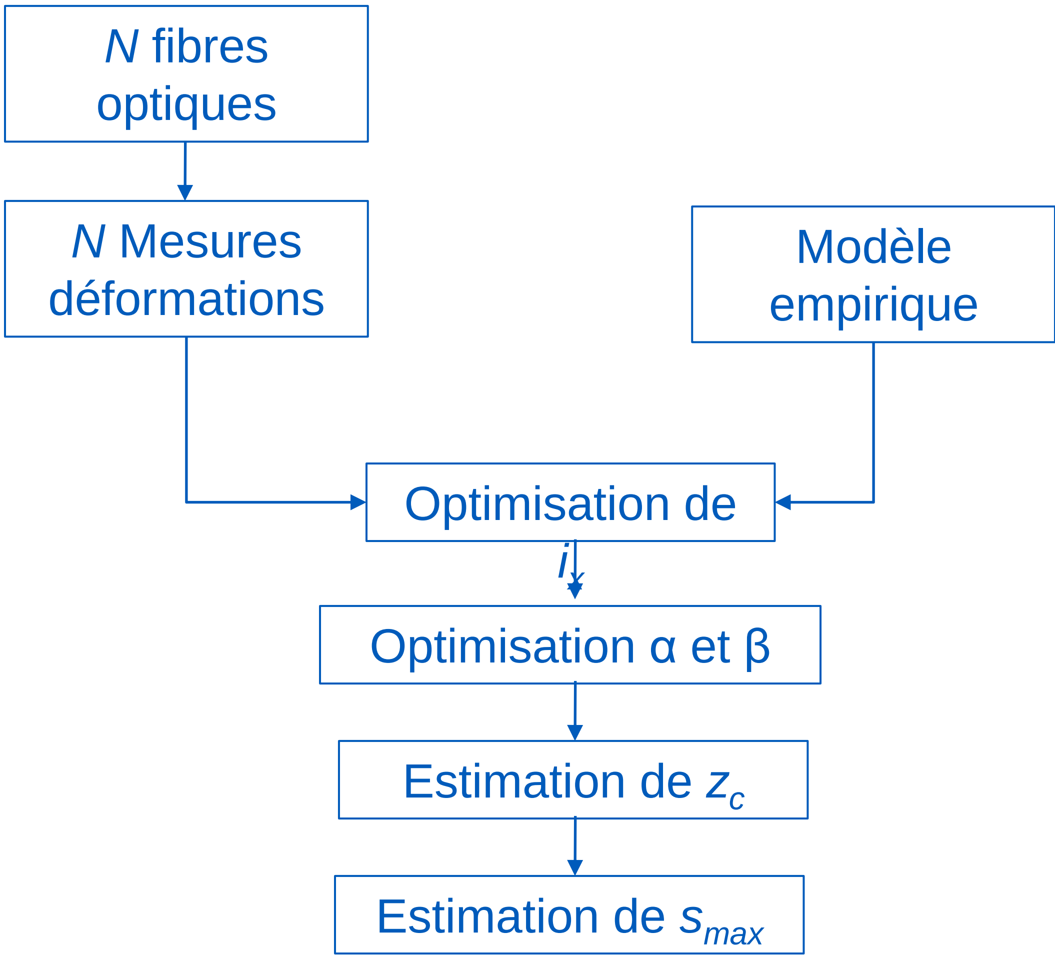
- Liée à la cohésion du sol et la FTM des câbles
- Estimable par optimisation globale

Lien entre i_x et z_c

i_x dépend de la forme du tassement et de la profondeur de la cavité

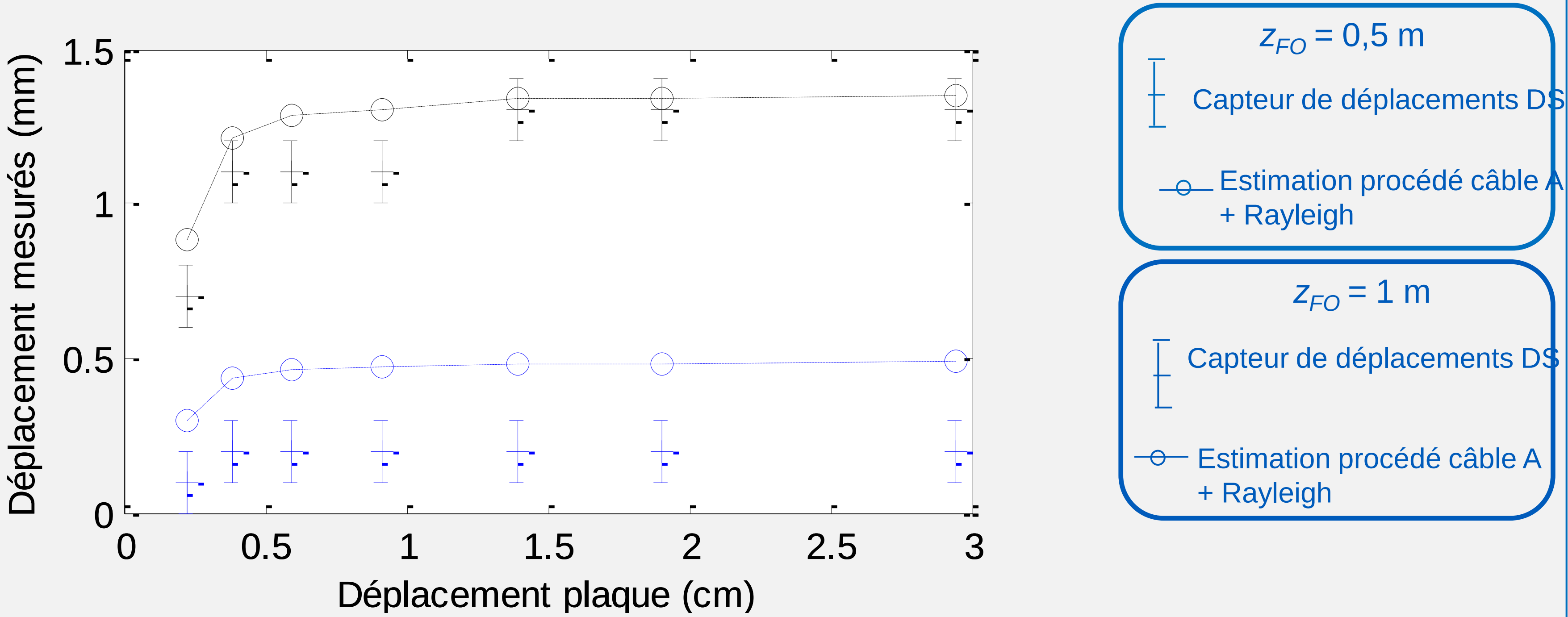
Procédé d'estimation de la profondeur de la cavité





Application sur le cas d'étude

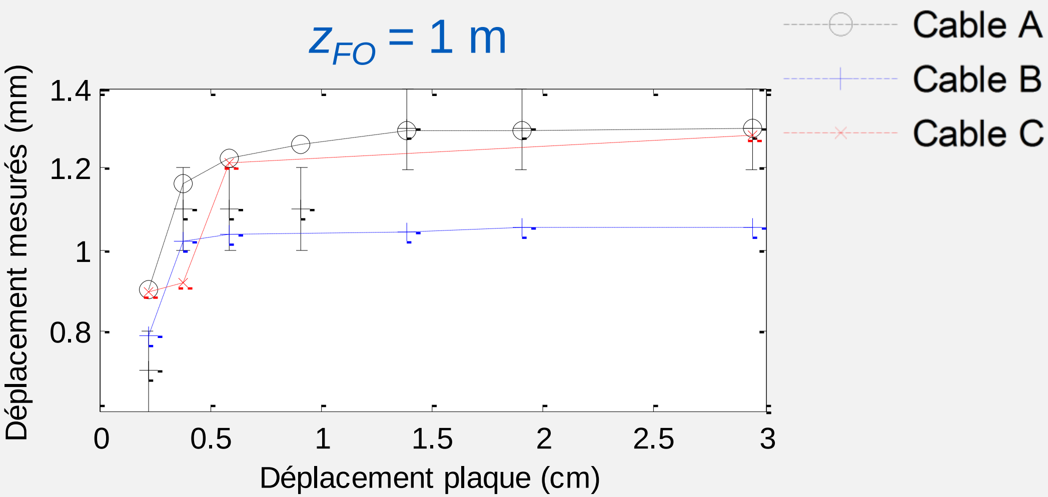
Estimation déplacements



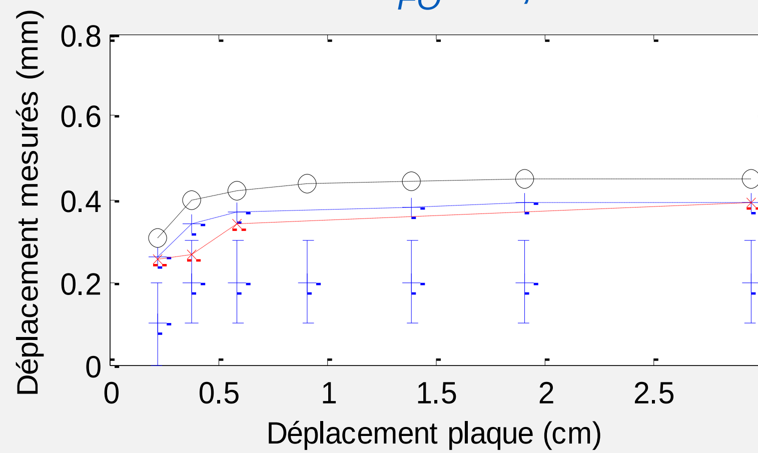
Influence de la chaîne de mesure

Câble à fibre optique

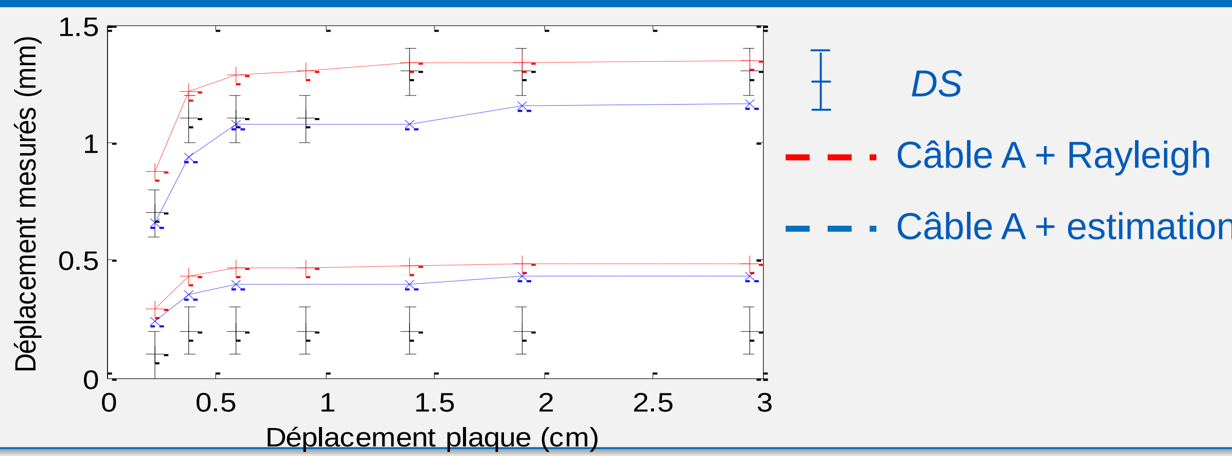
z_{FO} = 1 m



z_{FO} = 0,5 m



Interrogateurs



Conclusion sur la quantification de déplacements

Modèle géomécanique

- Proposition d'un nouveau modèle empirique
- Proposition d'une méthode pour la quantification
- Définition des conditions d'application de la méthode de quantification

Données réelles

- Détection / localisation de tassements verticaux de l'ordre de 0,1 mm
- Estimation de déplacements verticaux

Conclusion générale

- **Définition de la chaine de traitements des données issues d’un capteur à fibre optique de déformation**

- **Développement / tests / validation des modules de cette chaîne**

- **Spécifications industrielles pour l’application des modules**

    - Bobine amorce adaptée pour la mesure du spectre de référence
    - Capteurs de température ponctuels et distribués sur site
    - Plusieurs profondeurs d’observation

- **Estimation d’une mesure de déplacement interprétable par le Maître d’ouvrage**

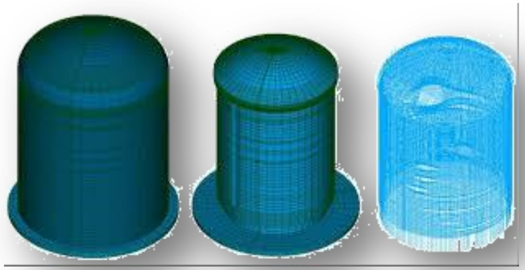
Applications

Ouvrages hydrauliques en terre : 3 km de câble à fibre optique pour la déformation

Ouvrages en béton : 3 km de câble à fibre optique pour la déformation

Appliquer les méthodes développées sur des ouvrages en béton :

- maquette 1/3 bâtiment réacteur
- EPR Flamanville



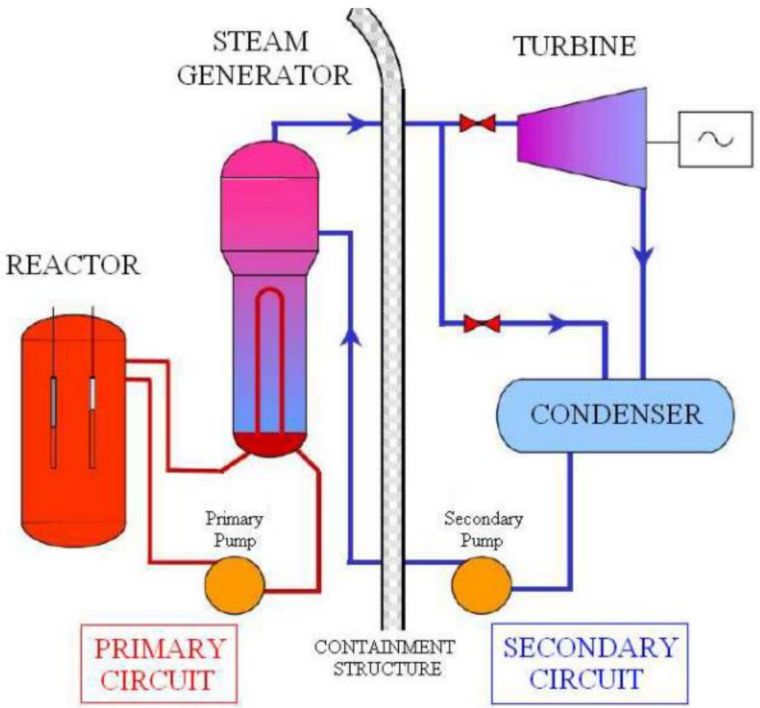
CND par courant de Foucault

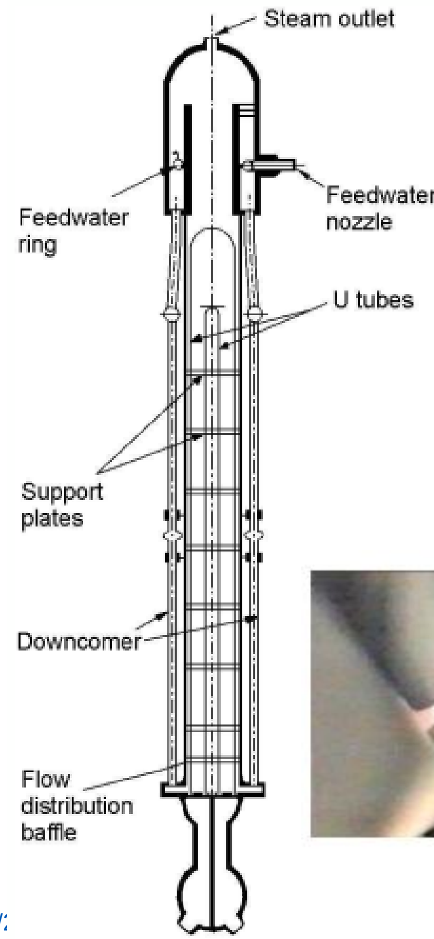
Zixian Jiang, Houssem Haddar (INRIA)
Alexandre Girard, Lorenzo Audibert (EDF)

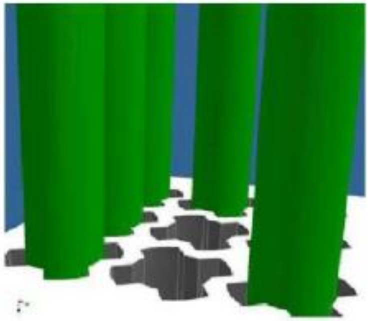
CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Contexte

- Colmatage des plaques entretoises

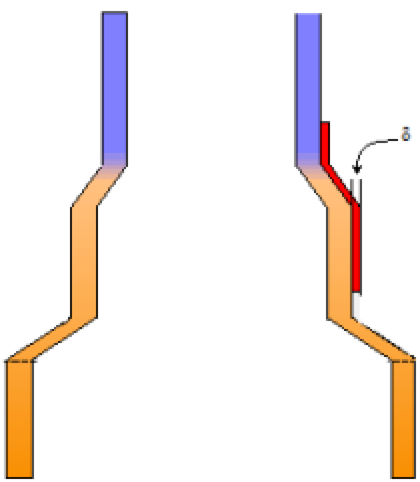


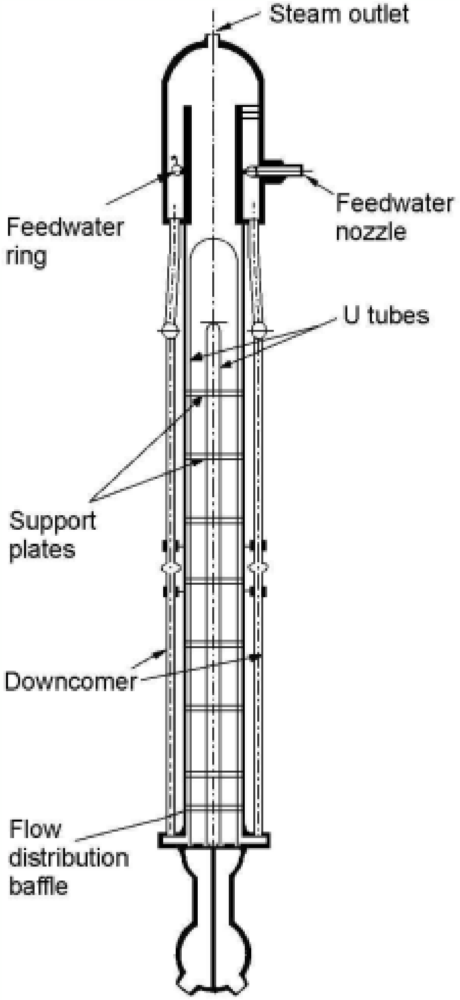




Contexte

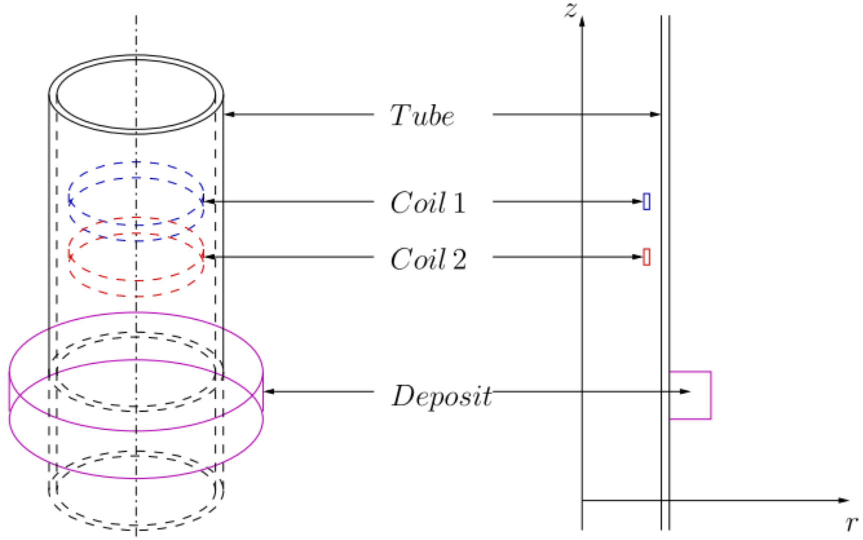
- Dépôt conducteur en pied de tube

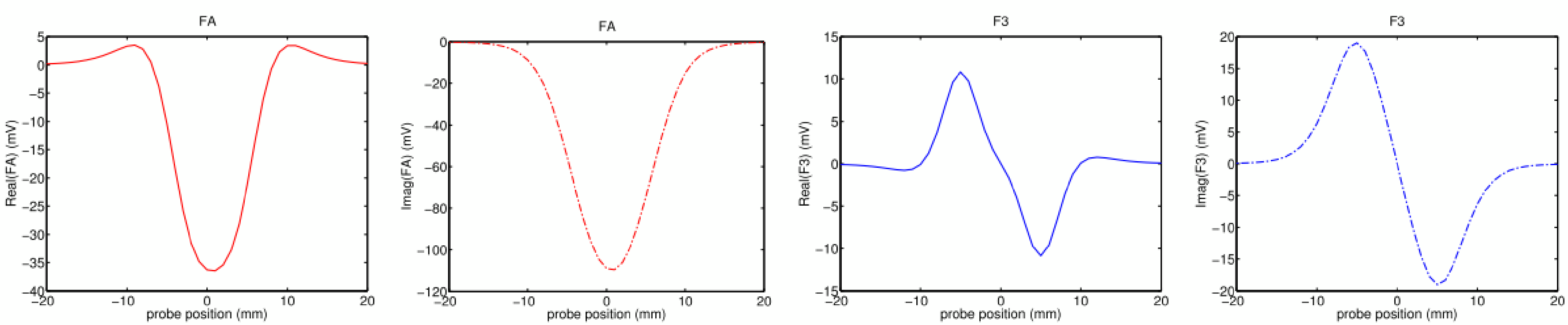




Contexte

- Sondes à Courant de Foucault





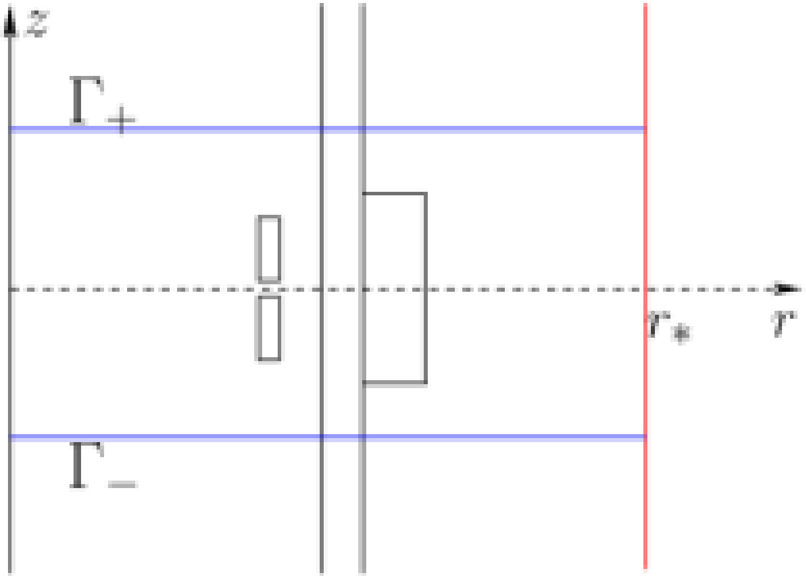
Problématique

- Peut on reconstruire les défauts à partir de ces mesures?

- A priori non, si on veut connaitre la forme, les paramètres des matériaux…

- On souhaite reconstruire les volumes occupés par les dépôts.
  - Problématique de reconstruction de forme
  - Problème de modélisation pour le cuivre forte conductivité et faible épaisseur

Modèle physique



- Approximation des CF.

$$\begin{cases} \operatorname{curl} \boldsymbol{H} + (\mathrm{i}\omega\epsilon - \sigma)\boldsymbol{E} = \boldsymbol{J}, \\ \operatorname{curl} \boldsymbol{E} - \mathrm{i}\omega\mu\boldsymbol{H} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial u}{\partial z}\right) - \dfrac{\partial}{\partial r}\left(\dfrac{1}{\mu r}\dfrac{\partial}{\partial r}(ru)\right) - \mathrm{i}\omega\sigma u = \mathrm{i}\omega J_\theta \\ u \to 0 \qquad (r^2 + z^2 \to \infty). \end{cases}$$

$$\int_{B_{r_*,z_*}} \left(\frac{1}{\mu r}\nabla w \cdot \nabla\bar{\varphi} - \frac{\mathrm{i}\omega\sigma}{r} w\bar{\varphi}\right) \mathrm{d}r\,\mathrm{d}z + \int_{\Gamma_\pm} \frac{1}{\mu^\pm}\mathcal{T}^\pm(w/r)\bar{\varphi}\,\mathrm{d}s = \int_{B_{r_*,z_*}} \mathrm{i}\omega J\bar{\varphi}\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}z.$$

- Mesure

$$\triangle Z_{kl} = \frac{1}{I^2}\int_{\partial\Omega_d^{3\mathrm{D}}} (\boldsymbol{E}_l^0 \times \boldsymbol{H}_k - \boldsymbol{E}_k \times \boldsymbol{H}_l^0) \cdot n\,\mathrm{d}S.$$

E_θ by u, $\mathbb{R}_+^2 = \{(r,z) : r \in \mathbb{R}_+, z \in \mathbb{R}\}$.

$$Z_{FA} = \frac{\mathrm{i}}{2}(\triangle Z_{11} + \triangle Z_{21}), \qquad Z_{F3} = \frac{\mathrm{i}}{2}(\triangle Z_{11} - \triangle Z_{22}).$$

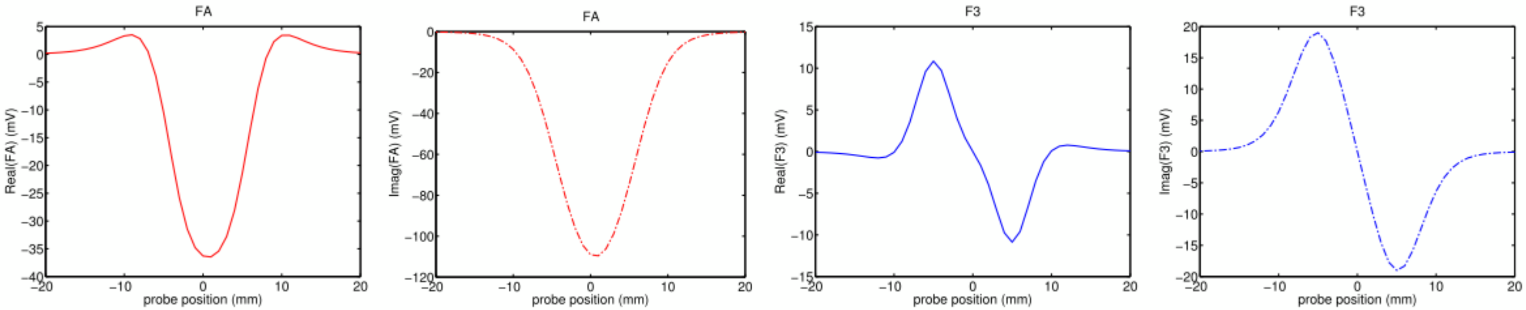
EDF

Modèle

- Partie réelle

- Partie Imaginaire

Problème inverse



- Avec les mesures:

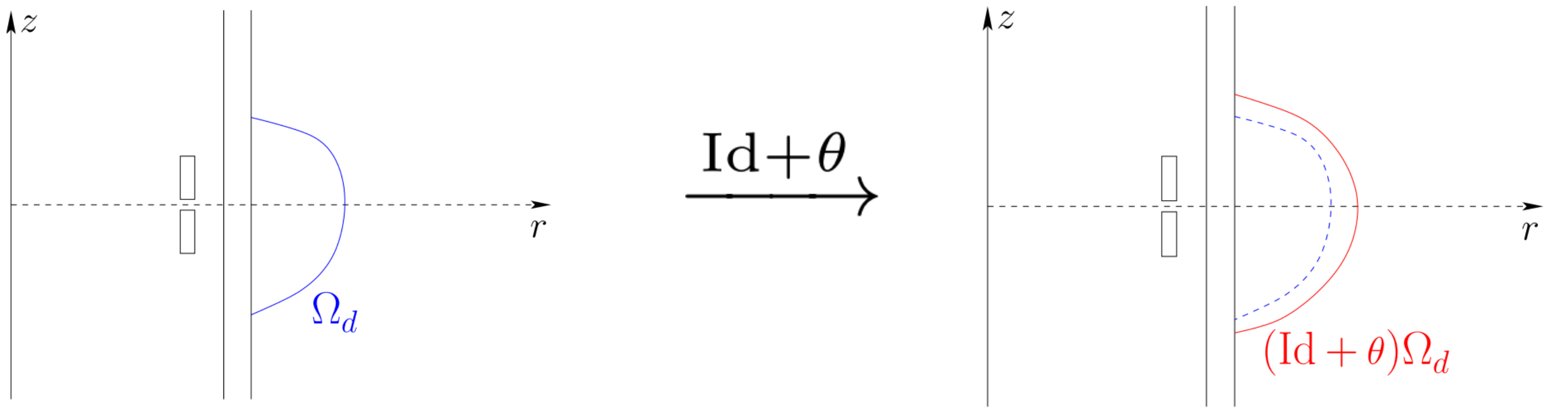
$$Z_{FA} = \frac{\mathrm{i}}{2}(\triangle Z_{11} + \triangle Z_{21}), \qquad Z_{F3} = \frac{\mathrm{i}}{2}(\triangle Z_{11} - \triangle Z_{22}).$$

$$\triangle Z_{kl} = \frac{2\pi}{\mathrm{i}\omega I^2} \int_{\Omega_d} \left\{ \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^0} \right) \frac{\nabla w_k \cdot \nabla w_l^0}{r} - \mathrm{i}\omega(\sigma - \sigma^0) \frac{w_k w_l^0}{r} \right\} \mathrm{d}r \, \mathrm{d}z.$$

- Retrouver la forme Ω_d

$$\mathcal{J}(\Omega_d) = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} |Z(\Omega_d; \zeta) - Z_{meas}(\zeta)|^2 \, \mathrm{d}\zeta.$$

Optimisation de forme



- Critère:

$$\mathcal{J}(\Omega_d) = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} |Z(\Omega_d;\zeta) - Z_{meas}(\zeta)|^2 \, \mathrm{d}\zeta. \qquad \triangle Z_{kl} = \frac{2\pi}{\mathrm{i}\omega I^2} \int_{\Omega_d} \left\{ \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^0} \right) \frac{\nabla w_k \cdot \nabla w_l^0}{r} - \mathrm{i}\omega(\sigma - \sigma^0) \frac{w_k w_l^0}{r} \right\} \mathrm{d}r \, \mathrm{d}z.$$

- Dérivation par rapport à la forme

$$w((\mathrm{Id}+\theta)\Omega; r, z) = w(\Omega; r, z) + w'(\theta; r, z) + o(\theta)$$

… Dérivée de forme

$$
\begin{aligned}
g_{kl} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \Re\Big\{ & \overline{(Z(\Omega_d;\zeta) - Z_{meas}(\zeta))} \frac{1}{r} \Big(\left[\frac{1}{\mu}\right] \nabla_\tau w_k \cdot \nabla_\tau (\overline{p_l} - w_l^0) \\
& - [\mu](\mu^{-1}\partial_n w_k) \Big(\frac{1}{\mu^0} (\partial_n \overline{p_l})_+ - \frac{1}{\mu^0} \partial_n w_l^0 \Big) - \mathrm{i}\omega[\sigma] w_k (\overline{p_l} - w_l^0) \Big) \Big|_\zeta \Big\} \, \mathrm{d}\zeta
\end{aligned}
$$

- Formule :

$$\mathcal{J}'(\Omega_d)(\theta) = \frac{2\pi}{\omega I^2} \int_\Gamma (n \cdot \theta) g \, \mathrm{d}s,$$

  - Ne depend que de la composante normale
  - Linéaire en θ
  - Après beaucoup de calcul … ne dépend que d'un calcul de modèle direct (calcul de p)

- Direction de descente :

$$\theta|_\Gamma = -\gamma g n$$

$$\mathcal{J}'(\Omega_d)(\theta) = -\gamma \frac{2\pi}{\omega I^2} \int_\Gamma |g|^2 \, \mathrm{d}s \leq 0$$

- Mise à jour :

$$\Omega_d \to (\mathrm{Id} + \theta)\Omega_d$$

Régularisation

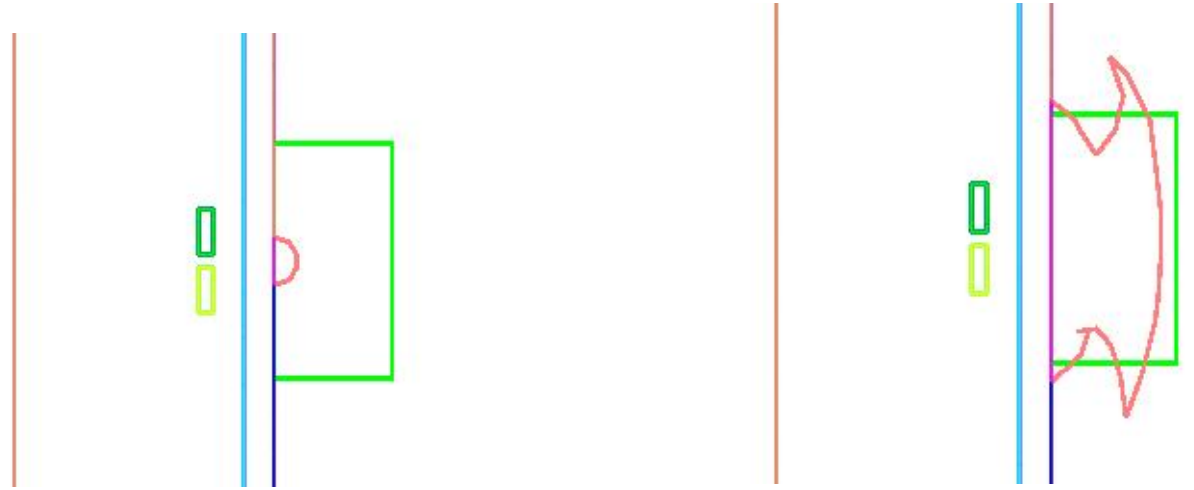
- Pour des recherches de forme quelconque le problème est toujours mal posé :

$$\int_\Gamma (\lambda \cdot \psi + \alpha \nabla_\tau \lambda \cdot \nabla_\tau \psi)\,\mathrm{d}s = -\int_\Gamma gn \cdot \psi\,\mathrm{d}s$$

  - Équivalent à un Tikhonov sur le gradient

- Finalement:

$$\theta = \gamma\lambda \quad \mathcal{J}'(\Omega_d)(\theta) = -\gamma \frac{2\pi}{\omega I^2} \int_\Gamma \left(|\lambda|^2 + \alpha \left|\nabla_\tau \lambda\right|^2 \right) \mathrm{d}s \leq 0$$

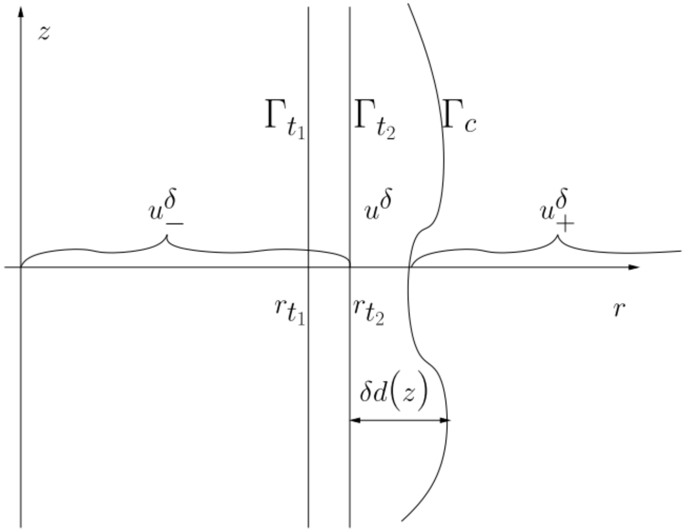


Reconstruction

- Reconstruction (Vidéo)

Problèmatique du cuivre

- Cuivre : dépôt très fin et très conducteur



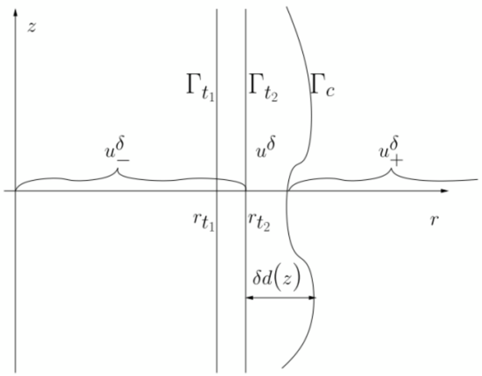
$$\sigma_c = 5.8 \times 10^7 S \cdot m^{-1}$$

$$f_\delta(z) = 10^{-6} m$$

- Maillage trop gros

Modèle asymptotique

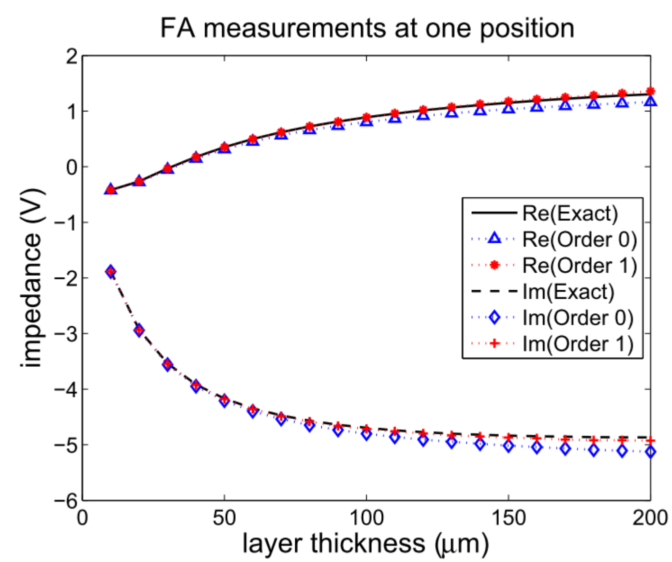
- On remplace la fine couche par un modèle de transmission sur la frontière



$$\begin{aligned}\triangle Z_{kl}(f_\delta) &= -\frac{2\pi}{I^2}\int_{\Gamma_{t_2}} \sigma_c f_\delta(s) u_k^\delta(r_{t_2}, s) u_l^0(r_{t_2}, s) r_{t_2}\,\mathrm{d}s + \mathcal{O}(\delta)\\ &= -\frac{2\pi}{I^2}\int_{\Gamma_{t_2}} \sigma_c \Big\{ \Big(f_\delta(s) - \frac{f_\delta(s)^2}{2r_{t_2}} - \frac{\mathrm{i}\omega\sigma_c\mu_c f_\delta(s)^3}{6}\Big)\langle u_k^\delta\rangle u_l^0 r_{t_2}\\ &\quad + \frac{f_\delta(s)^2}{2}\mu_c\lambda_k u_l^0 + \Big(\frac{f_\delta(s)^2}{2} - \frac{\mathrm{i}\omega\sigma_c\mu_c f_\delta(s)^4}{8}\Big)\mu_v\langle u_k^\delta\rangle\lambda_l^0 \Big\}\,\mathrm{d}s + \mathcal{O}(\delta^2).\end{aligned}$$

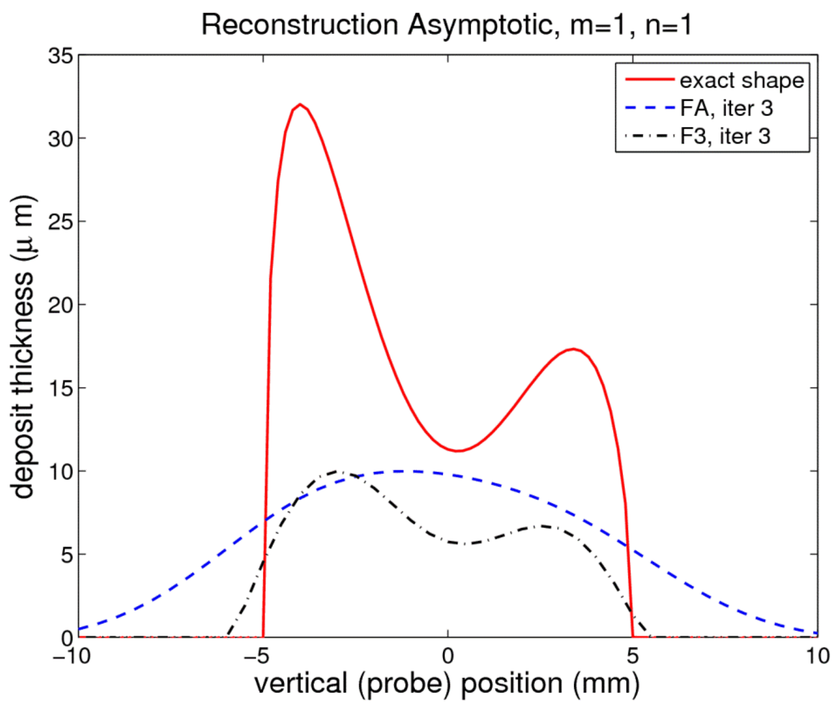
$$\mathcal{Z}_{1,0}\quad \begin{cases} u_+^\delta = u_-^\delta \\ \dfrac{1}{\mu_v}\partial_r(r u_+^\delta) = \dfrac{1}{\mu_t}\partial_r(r u_-^\delta) - \mathrm{i}\omega\sigma_1 d(z) r_{t_2} u_-^\delta. \end{cases}$$

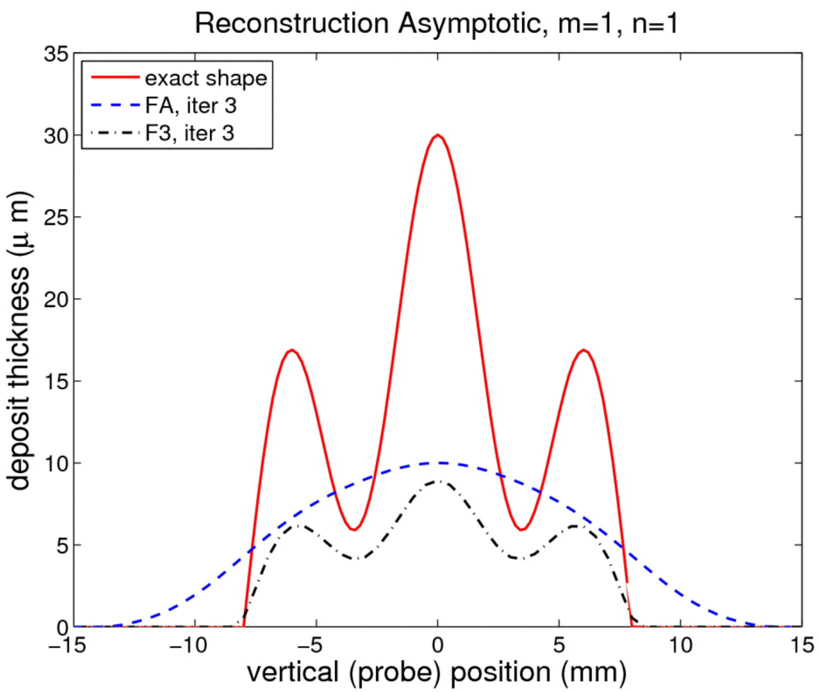
$$(\mathcal{Z}_{1,1})\quad \begin{cases} [u^\delta] = \dfrac{\mathrm{i}\omega\sigma_1\mu_c d(z)^2}{2}\delta\langle u^\delta\rangle + \alpha\mathrm{i}\omega\sigma_1\mu_c^2 d(z)^3\delta^2\langle\mu^{-1}\partial_r(ru^\delta)\rangle, \\ \left[\mu^{-1}\partial_r(ru^\delta)\right] = -\mathrm{i}\omega\sigma_1 r_{t_2} d(z)\langle u^\delta\rangle \\ \quad + \left(\dfrac{\mathrm{i}\omega\sigma_1 d(z)^2}{2} - \dfrac{\omega^2\sigma_1^2\mu_c r_{t_2} d(z)^3}{6}\right)\delta\langle u^\delta\rangle - \dfrac{\mathrm{i}\omega\sigma_1\mu_c d(z)^2}{2}\delta\langle\mu^{-1}\partial_r(ru^\delta)\rangle. \end{cases}$$



Reconstruction

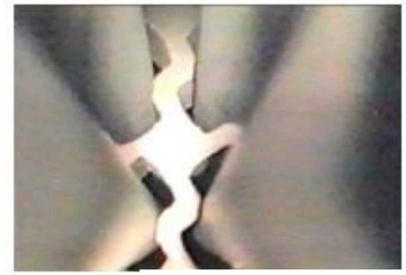
- Reconstruction (dérivée de forme)

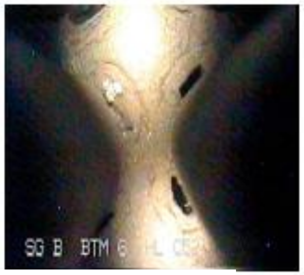


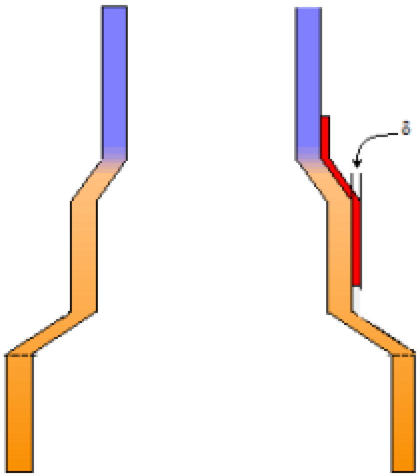


Perspectives

- 3D pour le colmatage
- Interaction fissure / cuivre
- Validation sur Maquette







Elément de bibliographie

- **Thèse de Zixian Jiang :**https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00943613/
- **Slides sur la dérivée de forme** http://www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/course_map562.html

Questions?